



11

**Maschinenbau**  
Lehrstuhl für  
Umformtechnik  
und Gießereiwesen

Daniel Marian Opritescu

# Risikominimale Überbrückung von Kapazitätsengpässen im Presswerksverbund der Automobilindustrie

*Schriftenreihe Umformtechnik  
und Gießereiwesen*



*Daniel Marian Opritescu*

# Risikominimale Überbrückung von Kapazitätsengpässen im Presswerksverbund der Automobilindustrie

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen  
Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

2. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 26.04.2018 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für  
Maschinenwesen am 20.11.2018 angenommen.

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

## Impressum

1. Auflage

Copyright © 2019 der vorliegenden Ausgabe: TUM.University Press

Copyright © 2019 Daniel Marian Opritescu

Alle Rechte vorbehalten

Herausgeber: Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg),  
Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München

Reihe: Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen

Layout und Gestaltung: utg/TUM.University Press

Layoutrichtlinien der Umschlaggestaltung: Designbuero Josef Grillmeier Munich

Umschlaggestaltung: Caroline Ennemoser

Umschlagabbildung: Caroline Ennemoser

TUM.University Press

Verlag der Technischen Universität München

Arcisstraße 21

80333 München

ISSN: 2364-6942

ISBN: 978-3-95884-020-1

ISSN der digitalen Ausgabe: 2569-4928

DOI der digitalen Ausgabe: 10.14459/2018md1438196

[www.tum.de](http://www.tum.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München im Rahmen einer Forschungs- und Entwicklungskooperation mit der BMW Group. Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, gilt mein besonderer Dank für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die mir zugestandene Freiheit bei der Bearbeitung der Themenstellung. Zugleich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls, ganz herzlich für die außerordentliche fachliche und persönliche Förderung bedanken.

Ebenfalls meinen Dank aussprechen möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Ordinarius des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, für das Interesse an meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Koreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Ordinarius des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Der BMW Group danke ich für die Förderung des Kooperationsprojekts. Für die hervorragende Zusammenarbeit gilt mein Dank insbesondere den Kolleginnen und Kollegen im Werk München. Allen voran bin ich dabei Herrn Klaus Mözl für die Initiierung des Projekts sowie darüber hinaus den Herren Stefan Eichhorn und Thomas Späthling für ihre Unterstützung zu Dank verpflichtet.

Herrn Dr.-Ing. Roland Golle danke ich ganz herzlich für die Förderung und die von mir stets als sehr fruchtbar empfundenen Diskussionen während meiner Lehrstuhlzeit. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie Studierenden des Lehrstuhls möchte ich ebenfalls meinen herzlichen Dank für die stets kollegiale Zusammenarbeit sowie die freundschaftliche Verbundenheit aussprechen. Meinem langjährigen Bürokollegen Michael Krinninger habe ich für die angenehme Atmosphäre und die schöne gemeinsame Zeit am Lehrstuhl zu danken.

Schließlich möchte ich es nicht versäumen, mich bei meiner Familie für die fortwährende Förderung sowie den bedingungslosen Rückhalt zu bedanken, wodurch sie meinen Werdegang ermöglicht hat. Mein größter und ganz besonderer Dank gilt jedoch insbesondere meiner Ehefrau Ute, die durch ihre Geduld und ihre Unterstützung ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

München, Dezember 2018

Daniel Opritescu



## **Kurzbeschreibung**

In der Automobilindustrie spielt der Presswerksverbund als primärer Akteur im internen Leistungserstellungsprozess eine zentrale Rolle. Die Auswirkungen einzelner Maschinenausfälle und Anlagenstörungen in den Presswerken sind aufgrund der hochgradigen Vernetzung und der ausgeprägten Abhängigkeiten in den Wertschöpfungsstrukturen der automobilen Fertigung schwer abzuschätzen. Auftretende Fehlteile bergen unkalkulierbare Gefahren für die übergreifende Versorgungskette und sind daher mit erheblichem finanziellen Risiko verbunden. Die Einbindung sämtlicher verfügbarer Netzwerkressourcen zur Überbrückung von Kapazitätsengpässen ist daher zwingend geboten.

Um die in einem Störfall hochkomplexen Herausforderungen bei der Anpassung der Produktionsprogramme auf Verbundebene zu bewältigen, wird ein rechnergestützter Ansatz für die logistikintegrierte Feinsteuerung in verteilten Netzwerken vorgestellt. Ein kostenbasiertes Optimierungsmodell bildet die kurzfristige Maschinenbelegungs- und Losgrößenplanung im Presswerksverbund unter Berücksichtigung der erforderlichen physischen Distributionsprozesse ab. Das Planungsinstrument unterstützt die Generierung von Handlungsalternativen und stellt eine kurzfristige Anpassung der Produktionsprogramme bei optimaler Ausschöpfung und Koordination vorhandener Netzwerkressourcen sicher, um bei Engpässen ein Abreißen in den Produktionshauptlinien der automobilen Fertigung bestmöglich zu vermeiden.

Des Weiteren erlaubt der ganzheitliche Ansatz neben der Einbettung in ein umfassendes Konzept zum reaktiven Störfallmanagement auch die Integration externer Produktionskapazitäten und -ressourcen. Schließlich befördert das System eine verbundweite Transparenz, wodurch eine prognostische Überprüfung laufender Programme und eine Absicherung bestehender Strategien ermöglicht wird.





## **Executive Summary**

In the automotive industry, the press shop network plays a central role as a primary player for the internal production processes. The effects of individual machine failures and system malfunctions in the press shops can hardly be estimated due to the high degree of interconnectedness and the strong dependencies in the value added structures of automotive production. Occurrence of missing parts carries incalculable dangers for the overall supply chain and holds therefore significant financial risks. Therefore, the integration of the entire available network resources to bridge capacity bottlenecks is essential.

To overcome the highly involved challenges for adapting the production programs at network level in the event of an incident, a computer-aided approach for the logistics-integrated manufacturing control in distributed networks is presented. A cost-based optimization program allows for short-term machine scheduling and lot size planning in the press shop network considering the required physical distribution processes. The planning tool supports the generation of action alternatives and thus ensures a short-term adjustment of the production programs under optimal utilization and coordination of available network resources in order to avoid breakdowns in the main lines of automotive manufacturing in case of shortages at its best.

Furthermore, the holistic approach allows for both an embedding into a comprehensive framework for reactive failure management and the integration of external production capacities and resources. Finally, the system promotes network-wide transparency, which enables a prognostic screening of current programs and a validation of existing strategies.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Kurzzeichen.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen.....</b>	<b>XXI</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Der Presswerksverbund im herausfordernden Produktionsumfeld.....	2
1.2 Zielsetzung und Organisation der Arbeit.....	3
<b>2 Begriffe und Grundlagen der Produktionswirtschaft.....</b>	<b>7</b>
2.1 Systemische Organisation industrieller Produktionsprozesse.....	7
2.2 Betriebsorganisation und Produktionsmanagement.....	11
2.3 Operative Produktionsplanung und Produktionssteuerung.....	14
<b>3 Management von Kapazitätsengpässen im Produktionsnetzwerk.....</b>	<b>21</b>
3.1 Bauteileherstellung im Presswerk.....	21
3.2 Formalisierung und Konkretisierung der Problemstellung.....	26
3.3 Logistikintegrierte Maschinenbelegungsplanung.....	29
<b>4 Exkurs: Mathematische Optimierung.....</b>	<b>35</b>
4.1 Optimierungsprobleme und Linearität.....	35
4.2 Zur Komplexität ganzzahliger Programme.....	36
4.3 Numerische Lösung von linearen ganzzahligen Problemen.....	38
<b>5 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>41</b>
<b>6 Modell für die logistikintegrierte Feinplanung im Presswerksverbund.....</b>	<b>43</b>
6.1 Abstraktion der Aufgabenstellung.....	43
6.2 Komplexitätstheoretische Betrachtungen.....	46
6.3 Mathematisches Optimierungsprogramm.....	48
6.4 Kurzfristige Neuplanung der Feinsteuerung in der Produktion.....	60
6.5 Modellannahmen und flexible Zielgrößen.....	61
<b>7 Implementierung und numerische Lösung des Programms.....</b>	<b>65</b>
7.1 Testumgebung und -daten für die numerischen Betrachtungen.....	65
7.2 Adaption der Modellformulierung und Laufzeitanalysen.....	67
7.3 Rollierende Planung für realbetriebliche Störfallszenarien.....	88
7.4 Ansätze zur Beschleunigung der Lösungsfindung.....	92

---

7.5	Alternative und erweiterte Modellierungsansätze .....	97
<b>8</b>	<b>Umsetzung im realbetrieblichen Umfeld .....</b>	<b>105</b>
8.1	Technische Konzeption .....	105
8.2	Rahmenbedingungen einer Umsetzung .....	109
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>117</b>
<b>A</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>119</b>
<b>B</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>121</b>
<b>C</b>	<b>Normenverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
<b>D</b>	<b>Verzeichnis betreuter Studienleistungen .....</b>	<b>143</b>

## Verzeichnis der Kurzzeichen

Zeichen	Bedeutung
$b_v$	Liefermenge im Knoten $v$ einer Netzwerk-Fluss-Instanz
$\tilde{b}_j, \hat{b}_j$	Bearbeitungsgeschwindigkeiten für den Auftrag $j$
$B, \hat{B} \in \mathbb{N}_0$	Konstanten
$\tilde{c}_j$	Fertigstellungstermin des Auftrags $j$
$c_{v_1, v_2}$	Kosten pro Einheit, die bei einem Fluss vom Knoten $v_1$ zum Knoten $v_2$ über die Kante $(v_1, v_2)$ anfallen
$\tilde{d}_j, \hat{d}_j$	Fristen zur Erfüllung des Auftrags $j$
$D_n$	mit zunehmendem Index feiner werdende Zeitdiskretisierung
$\mathfrak{D}_{\mathfrak{M}}$	Entscheidungsversion des Optimierungsproblems $\mathfrak{M}$
$\mathfrak{D}_{P pmtn \sum_j U_j}$	Entscheidungsversion des Optimierungsproblems $P pmtn \sum_j U_j$
$e$	Kante in einem zugehörigen Graphen
$E$	Kantenmenge eines zugehörigen Graphen
$F^*, F^+$	zulässige Flüsse über die Kanten in einem zugehörigen Graphen
$f^I$	Flüsse über die Menge $I$ der Kanten in einem zugehörigen Graphen
$f_e$	Fluss über die Kante $e$ in einem zugehörigen Graphen
$f_{m,t} \in \{0, 1\}$	Verfügbarkeitsstatus der Maschine $m$ im Zeitslot $t$
$F_{v_1, v_2}$	Kapazität bzw. Beschränkung an einen Fluss über die Kante $(v_1, v_2)$
$g$	Abbildungsvorschrift, die aus einer optimale Lösung für das Programm $\mathfrak{P}_1$ eine zulässige Lösung für $\mathfrak{P}_n$ abzuleiten vermag
$G(V, E)$	Graph mit Knotenmenge $V$ und Kantenmenge $E$
$GAP(t)$	aus den besten verfügbaren oberen und unteren Schranken, $UB(t)$ sowie $LB(t)$ , ermittelte relative Optimalitätslücke eines Programms zum Zeitpunkt $t$ der Berechnung
$J, \tilde{J}, \hat{J}$	Mengen zu erfüllender Aufträge bzw. Bedarfe

$k_{s_1, s_2, p}$	Kosten für den Transport eines Bauteils der Art $p$ vom Standort $s_1$ nach $s_2$
$l_i$	Anzahl an Zeitslots aus denen das Zeitfenster $T_i$ in einem gleitend rollierenden Planungsansatz besteht
$\mathcal{L}(\mathfrak{P}_n)$	der Raum aller für das Programm $\mathfrak{P}_n$ zulässigen Lösungen
$LB(t)$	zum Zeitpunkt $t$ der Berechnung beste verfügbare untere Schranke eines Optimierungsprogramms
$M, \tilde{M}, \hat{M}$	Mengen der Maschinen für die Bauteilproduktion
$M_s$	Menge der Maschinen am Standort $s$
$M_{p,s}$	Bedarfsknoten des Standorts $s$ für Bauteile der Art $p$ in der Netzwerk-Fluss-Instanz des Modells $\mathfrak{P}_{MCF}$
$\mathfrak{M}$	formales Optimierungsmodell der Problemstellung einer risikominimalen Überbrückung von Kapazitätengässen im Presswerksverbund
$n_i$	Anzahl der zu fixierenden Zeitslots im Zeitfenster $T_i$ vor der $i$ -ten Iteration eines gleitend rollierenden Planungsansatzes
$\mathbb{N}$	Menge der natürlichen Zahlen $\{1, 2, 3, \dots\}$
$\mathbb{N}_0$	Menge der natürlichen Zahlen einschließlich der Null $\{0, 1, 2, \dots\}$
$\text{NP}$	Klasse aller auf einer nicht-deterministischen Turingmaschine in Polynomialzeit lösbaren Entscheidungsprobleme
$o_i$	Überlappung der Zeitfenster $T_i$ und $T_{i+1}$ in Zeitslots in einem gleitend rollierenden Planungsansatz
$opt(\mathfrak{P})$	Zielfunktionswert im Optimum eines Modells $\mathfrak{P}$
$P$	Menge der unterschiedlichen, herstellbaren Bauteile
$P_m$	Bauteilearten, deren Fertigung auf der Maschine $m$ mit den strategisch dafür vorgesehenen Werkzeugen $W_m$ geplant ist
$P pmtn \sum_j U_j$	Reihenfolgeplanungsproblem auf parallelen, identischen Maschinen mit erlaubter Auftragsunterbrechung zur Minimierung der Anzahl verspätet erfüllter Aufträge

$\mathbb{P}$	Klasse aller auf einer deterministischen Turingmaschine in Polynomialzeit lösbaren Entscheidungsprobleme
$\mathfrak{P}_{MCF}$	<i>MCFP</i> -Netzwerkinstanz zu gegebener Lösung des Programms $\mathfrak{P}_2$
$\mathfrak{P}_{mod}$	Abwandlung der <i>MCFP</i> -Netzwerkinstanz $\mathfrak{P}_{MCF}$
$\mathfrak{P}_n, \mathfrak{P}_1, \mathfrak{P}_2, \mathfrak{P}_3$	konkrete Programmvarianten für das formale Modell $\mathfrak{M}$
$\mathfrak{P}(I)$	Zielfunktionswert eines Modells $\mathfrak{P}$ zu gegebener Lösung $I$
$\mathfrak{P} _I$	Betrachtung des Programms $\mathfrak{P}$ auf lokalem Lösungsanteil bzw. restringierter Variablenmenge $I$
$\mathbb{R}_0^+$	Menge der positiven reellen Zahlen einschließlich der Null $[0, \infty[$
$s(m)$	Standort der Maschine $m$
$S$	Menge räumlich verteilter Standorte
$\mathfrak{S}_1, \mathfrak{S}_2$	spezifische Verbundscenarien zur beispielhaften Ableitung von Netzwerk-Fluss-Instanzen
$T$	Zeithorizont in diskreter Zeitdarstellung als Menge an Zeitslots
$T_{AM}$	Zeitspanne der Nicht-Verfügbarkeit einer Maschine in zusammenhängenden Zeitslots
$T_{AW}$	Zeitspanne der Nicht-Verfügbarkeit eines Werkzeugs in zusammenhängenden Zeitslots
$u$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $u_{s,p,t}$ in Spaltenvektornotation
$u_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	ganzzahlige Entscheidungsvariable <i>Fehlteilmenge</i> gibt die Anzahl der zur Bedarfsdeckung fehlenden Bauteile der Art $p$ am Standort $s$ im Zeitslot $t$ an
$U_p^-$	Fehlteilknoten für Bauteile der Art $p$ in der Netzwerk-Fluss-Instanz des Modells $\mathfrak{P}_{MCF}$
$U_p^+$	Überlaufknoten für Bauteile der Art $p$ in der Netzwerk-Fluss-Instanz des Modells $\mathfrak{P}_{MCF}$
$U_j$	Beitrag des Auftrags $j$ zur Zielfunktion des Optimierungsproblems $P pmtn \sum_j U_j$



$UB(t)$	zum Zeitpunkt $t$ der Berechnung beste verfügbare obere Schranke eines Optimierungsprogramms
$v_{m,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Werkzeugaktivität</i> gibt an, ob das Werkzeug $w$ ab Beginn des Zeitslots $t$ auf der Maschine $m \in M$ eingesetzt wird bei unmittelbar vorheriger Nicht-Verwendung auf derselben Maschine
$v_{s,t,p}$	Standortknoten des Standorts $s$ zum Zeitslot $t$ für Bauteile der Art $p$ in der Netzwerk-Fluss-Instanz des Modells $\mathfrak{P}_{MCF}$
$V$	Knotenmenge eines zugehörigen Graphen
$w_{m,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Ertüchtigung</i> gibt an, ob zu Beginn des Zeitslots $t$ ein Ertüchtigungsauftrag für die Werkzeug-Maschine-Kombination $(w m)$ vergeben wird
$W$	Menge der Werkzeuge für die Bauteilproduktion
$W_m$	Menge der Werkzeuge, die strategisch für den Einsatz auf der Maschine $m$ vorgesehen sind
$W_p$	Menge der Werkzeuge, die eine Herstellung von Bauteilen der Art $p$ ermöglichen
$W_w$	Menge der Werkzeuge, die eine physische Abhängigkeit zu Werkzeug $w$ aufweisen
$x$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $x_{m,w,t}$ in Spaltenvektornotation
$\tilde{x}$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $\tilde{x}_{m,w,t}$ in Spaltenvektornotation
$x_{m,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Produktionsphase</i> gibt an, ob im Zeitslot $t$ mit dem Werkzeug $w$ auf der Maschine $m$ produziert wird
$\tilde{x}_{m,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Bauteilewechselphase</i> gibt an, ob im Zeitslot $t$ das Werkzeug $w$ auf der Maschine $m$ für die Produktion vorbereitet wird
$X_{s,p,t}$	Menge der am Standort $s$ im Zeitslot $t$ produzierten Bauteile der Art $p$

$y$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $y_{s,w,t}$ in Spaltenvektornotation
$\tilde{y}$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $\tilde{y}_{s_1,s_2,w,t}$ in Spaltenvektornotation
$y_{s,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Werkzeugstandort</i> gibt an, ob sich das Werkzeug $w$ im Zeitslot $t$ am Standort $s$ befindet
$\tilde{y}_{s_1,s_2,w,t} \in \{0, 1\}$	binäre Entscheidungsvariable <i>Werkzeugtransport</i> gibt an, ob zu Beginn des Zeitslots $t$ ein Transportauftrag zur Verlagerung des Werkzeugs $w$ vom Standort $s_1$ nach $s_2$ vergeben wird
$z$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $z_{s_1,s_2,p,t}$ in Spaltenvektornotation
$\hat{z}$	komponentenweise geordnete Darstellungen der Entscheidungsvariablenklasse $\hat{z}_{s_1,s_2,t}$ in Spaltenvektornotation
$z_{s_1,s_2,p,t} \in \mathbb{N}_0$	ganzzahlige Entscheidungsvariable <i>Bauteiletransport</i> gibt an, ob zu Beginn des Zeitslots $t$ ein Transportauftrag zur Distribution von Bauteilen der Art $p$ vom Standort $s_1$ nach $s_2$ vergeben wird; zugleich wird gegebenenfalls die zu versendende Bauteilemenge angegeben
$\hat{z}_{s_1,s_2,t} \in \mathbb{N}_0$	ganzzahlige Hilfsvariable zu Modellierungszwecken
$\alpha$	Maschinencharakteristik eines Reihenfolgeplanungsproblems
$\beta$	Prozess- und Auftragscharakteristik eines Reihenfolgeplanungsproblems
$\gamma$	Zielsetzung eines Reihenfolgeplanungsproblems
$\Gamma_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	Anzahl produzierter Bauteile der Art $p$ am Standort $s$ ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Beginn des Zeitslots $t$
$\delta_{s_1,s_2,w} \in \mathbb{R}_0^+$	Kosten pro gerichtete Verlagerung des Werkzeugs $w$ vom Standort $s_1$ nach $s_2$
$\delta_p$	Bilanzterm für Bauteile der Art $p$ über alle Standorte und den gesamten Zeithorizont hinweg

$\varepsilon \in \mathbb{R}_0^+$	maximale Differenz zwischen den optimalen Zielfunktionswerten $opt(\mathfrak{P}_n)$ und $opt(\mathfrak{P}_1)$ der Programme $\mathfrak{P}_n$ und $\mathfrak{P}_1$
$\varepsilon_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	vom Standort $s$ für den Zeitslot $t$ angeforderter Bedarf an Bauteilen der Art $p$
$\zeta \in \mathbb{N}_0$	Anzahl an Werkzeugverlagerungen, an denen der Standort $s$ maximal innerhalb eines Zeitfensters von $\omega_s$ Zeitslots involviert sein darf
$\eta_{s_1,s_2,w} \in \mathbb{N}_0$	Dauer der gerichteten Verlagerung des Werkzeugs $w$ vom Standort $s_1$ nach $s_2$ in Zeitslots
$\Theta \in \mathbb{R}_0^+$	Kosten für die gesamten über den Zeithorizont auftretenden Fehlteilermengen
$\vartheta_{m,w} \in \{0, 1\}$	Ertüchtigungsstatus des Werkzeugs $w$ auf der Maschine $m$
$l_{m,w} \in \mathbb{N}_0$	Dauer der Ertüchtigung des Werkzeugs $w$ auf der Maschine $m$ in Zeitslots
$\kappa_p \in \mathbb{N}$	Füllgrad der für Bauteile der Art $p$ verwendeten Behälter
$\lambda \in \mathbb{N}$	pauschale Rüstdauer in Zeitslots für die Vorbereitung von Werkzeugwechseln
$\Lambda, \Lambda', \Lambda'' \in \mathbb{R}_0^+$	Kosten für die gesamte über den Zeithorizont beauftragte Bauteiledistribution innerhalb des Netzwerks
$\mu \in \mathbb{N}$	Mindestbelegdauer in Zeitslots für den Einsatz von Werkzeugen auf Maschinen
$v_{s,p} \in \mathbb{N}_0$	vorzuhaltender Sicherheitsbestand an Bauteilen der Art $p$ am Standort $s$
$\Xi \in \mathbb{R}_0^+$	Kosten für die gesamten über den Zeithorizont beauftragten Werkzeugverlagerungen
$\xi_{s_1,s_2} \in \mathbb{N}$	Dauer der gerichteten Bauteiledistribution vom Standort $s_1$ nach $s_2$ in Zeitslots
$\pi^*, \pi^+$	zulässige Lösungen zu entsprechenden Optimierungsprogrammen
$\rho_{m,w} \in \mathbb{N}$	effektive Bauteileausbringung pro Zeiteinheit beim produktiven Einsatz des Werkzeugs $w$ auf der Maschine $m$

$\sigma_p \in \mathbb{N}$	maximale Ladekapazität in vollen Behältern für Bauteile der Art $p$ für ein Transportmittel zur Bauteiledistribution
$\tau$	Dauer eines Zeitslots in Zeiteinheiten
$\tau_{m,w}$	Dauer der Installationsphase für das Werkzeug $w$ auf der Maschine $m$ in Zeiteinheiten
$\Upsilon_{m,w} \in \mathbb{N}_0$	Anzahl nicht produzierter Bauteile der Art $p$ aufgrund von Bauteilwechselzeiten am Standort $s$ ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Beginn des Zeitslots $t$
$\upsilon_{m,w} \in \mathbb{N}_0$	Dauer der Installationsphase für das Werkzeug $w$ auf der Maschine $m$ in Zeitslots
$\Phi$	Kardinalität des diskreten Zeithorizonts $T$
$\varphi_{s,p} \in \mathbb{N}_0$	verfügbarer Bestand an Fertigteilen der Art $p$ am Standort $s$ zu Beginn des betrachteten Zeithorizonts
$\varphi'_{s,p} \in \mathbb{N}_0$	um Sicherheitsbestand bereinigte, verfügbare Fertigteile der Art $p$ am Standort $s$ zu Beginn des betrachteten Zeithorizonts
$\chi_{s_1,s_2} \in \mathbb{R}_0^+$	Kosten pro Einsatz eines Transportmittels zur gerichteten Bauteiledistribution vom Standort $s_1$ nach $s_2$
$\psi_{s,p} \in \mathbb{R}_0^+$	Strafkosten für das Fehlen eines Bauteils der Art $p$ zur Bedarfsdeckung am Standort $s$
$\Psi_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Ende des Zeitslots $t$ vom Standort $s$ aus zur Versorgung des Netzwerks versendete Menge an Bauteilen der Art $p$
$\omega_s \in \mathbb{N}_0$	Zeitfenster in Zeitslots innerhalb dessen der Standort $s$ maximal an einer begrenzten Anzahl $\zeta$ von Werkzeugverlagerungen involviert sein darf
$\Omega_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	Menge an Bauteilen der Art $p$ , mit welcher der Standort $s$ durch Bauteileversand aus dem Netzwerk ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Ende des Zeitslots $t - 1$ versorgt wird



## Verzeichnis der Abkürzungen

BMI	Bundesministerium des Innern
BVA	Bundesverwaltungsamt
CIRP	Internationale Forschungsgemeinschaft für Mechanische Produktionstechnik
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
FICO	Fair Isaac Corporation
FMEA	Fehlermöglichkeiten- und -einflussanalyse
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
<i>MCFP</i>	Min-Cost-Flow-Problem
NIW	Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V.
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
UN	United Nations
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
ZEW	Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH



# 1 Einleitung

Klassifizierungen wirtschaftlicher Aktivitäten (UN, 2008, S. 43)<sup>1</sup>, (Eurostat, 2008, S. 50), (Statistisches Bundesamt, 2008, S. 54) bilden die Grundlage für eine Aufteilung von Volkswirtschaften in unterschiedliche Tätigkeitsbereiche, welche als Wegweiser für langfristige Entwicklungen und gleichzeitig als Hebel für strategische Weichenstellungen dient.

Gemäß dem Drei-Sektoren-Modell (Fourastié, 1969, S. 72ff), (Pohl, 1970), ist im sekundären oder industriellen Sektor für die Bundesrepublik Deutschland das produzierende Gewerbe inklusive Baugewerbe zusammengefasst, welches im Jahr 2016 mit einem Volumen von ca. 857 Mrd. Euro insgesamt mit etwa 30 Prozent an der Bruttowertschöpfung und damit am Bruttoinlandsprodukt in Deutschland beteiligt war (Statistisches Bundesamt, 2017, S. 325). Das darin abgebildete produzierende, größtenteils verarbeitende Gewerbe beschäftigte im Jahr 2015 knapp zehn Mio. der Erwerbstätigen in Deutschland (Statistisches Bundesamt, 2017, S. 515). Dies spiegelt die zentrale Bedeutung des sekundären Sektors für den Wirtschaftsstandort Deutschland wider.

Innerhalb des verarbeitenden Gewerbes gilt die Automobilindustrie als Schlüsselbranche, welche auch in Zukunft einen erheblichen Anteil an der Struktur der deutschen Industrie haben wird (Prognos, 2016, S. 50ff). Die zentrale Bedeutung der Branche lässt sich an ihren volkswirtschaftlichen Beiträgen bemessen. Mit einem jährlichen Umsatz von über 400 Mrd. Euro (VDA, 2016, S. 42) trägt sie wesentlich zur Wirtschaftsleistung und damit zum Wohlstand in Deutschland bei. Gleichzeitig ist sie durch die hohen Investitionen im Bereich der Forschung und Entwicklung treibende Kraft für Innovation, die als Notwendigkeit für eine nachhaltige sowie erfolgreiche wirtschaftliche Entwicklung gilt (VDA, 2016, S. 14).

Die Unternehmen der deutschen Automobilindustrie beschäftigen unmittelbar schätzungsweise 800.000 Arbeitnehmer (VDA, 2016, S. 15). Hinzu kommt eine beträchtliche Anzahl an Arbeitsplätzen, welche indirekt vom Erfolg der Branche abhängen. Dies ist darin begründet, dass in der Wertschöpfungskette Unternehmen aus allen drei volkswirtschaftlichen Sektoren involviert sind. Eine detaillierte Quantifizierung gestaltet sich im Allgemeinen schwierig. Jedoch ist unstrittig, dass eine produzierende Automobilindustrie durch ihren Bedarf an Rohstoffen, Produktionsanlagen und anschließenden Vertriebs- und Handelsmöglichkeiten ihrer Produkte, Tätigkeit und Aktivität vom primären über den sekundären bis hin zum tertiären Sektor voraus-

---

<sup>1</sup>Zitierweise: Nimmt der Quellenverweis ausschließlich auf ein Wort oder eine Wortgruppe Bezug, so ist dieser unmittelbar nach dem letzten Bezugswort und damit vor einem eventuell folgenden Satzzeichen platziert. Literaturverweise, die nach einem Satzzeichen angegeben sind, beziehen sich auf einen durch Satzzeichen eingeschlossenen Satzteil, umfassen vollständige Sätze oder ganze Absätze.



setzt und damit befördert. (ZEW & NIW, 2009, S. 10ff), (Dietz, 2012, S. 34ff), (VDA, 2015) Zusammenfassend kann die Automobilbranche damit als eine tragende Säule und Garant volkswirtschaftlicher Leistungsfähigkeit am Hochlohnstandort Deutschland angesehen werden. Eine nachhaltige Entwicklung und der wirtschaftliche Erfolg liegen damit nicht allein im Interesse der Automobilunternehmen.

### **1.1 Der Presswerksverbund im herausfordernden Produktionsumfeld**

Flexibilität und Wandlungsfähigkeit spielen stets eine zentrale Rolle für den unternehmerischen Erfolg in der heutigen Zeit (Milberg, 2004), (ElMaraghy und H.-P. Wiendahl, 2009), (Fiebig, 2012). Um den zunehmend dynamischen Marktbedingungen in einem turbulenten Produktionsumfeld (Westkämper, 1997), (H.-H. Wiendahl, 2006), (Westkämper, 2009) zu begegnen, vollzieht sich eine Entwicklung der Organisation von tayloristischen Ansätzen (Taylor, 1903), (Taylor, 1911, S. 24ff) hin zu heterarchischen Netzwerkstrukturen (Warnecke, 1999), (Buck, 2003), (Westkämper und Löffler, 2016, S. 45ff). In der Automobilindustrie agieren nach heterarchischem Prinzip einzelne Presswerke im Unternehmensnetzwerk autonom, entsprechend den normativen und strategischen Vorgaben der Zentralabteilungen (Friedli und Liebetrau, 2016). Eine solche Dezentralisierung hilft die Komplexität einer zentralistisch geprägten Konzernstruktur aufzubrechen und schafft die individuell nötige Agilität, um eine schnelle Handlungs- und eine fortwährende Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten (Milberg, 2002), (Warnecke, 2002), (Blecker und Kaluza, 2004).

Als primäre Akteure in der internen Wertschöpfungskette der Automobilindustrie kommt den Presswerken der Branche eine besondere Bedeutung bei der Karosseriefertigung zu, da sämtliche folgenden Verarbeitungsstufen – Karosserierohbau, Lackiererei, Endmontage – auf die hier gefertigten Bauteile angewiesen sind. Eine reibungslose Produktion im Presswerksverbund ist damit die Grundlage für die übergreifende Realisierung einer Fahrzeugherstellung. Betrachtet man jedoch die Bauteileherstellung in den einzelnen Presswerken der Automobilbranche, so zeichnet sich indessen eine neue Herausforderung ab: Neue Entwicklungen in der Anlagentechnologie befördern eine Effizienzsteigerung der Produktionsanlagen, welche sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit in der Blechteilefertigung auswirkt (Roll, Bogon und Ziebert, 2007), (Doege und Behrens, 2010, S. 838ff), insbesondere gilt dies für den aktuellen Einzug der Servopressentechnologie in die Presswerke (Osakada et al., 2011), (Kreth et al., 2012), (Dittmann, 2014). Die Tatsache, dass Presswerke zu den kapitalintensivsten Fertigungsbereichen zählen (Mennerich, 2005, S. 1), gepaart mit der Forderung nach einer schlanken Produktion (Syska, 2006, S. 84ff), (Bleher, 2013, S. 9ff), (Dombrowski und Mielke, 2015, S. 13ff), bringt an

dieser Stelle zeitgleich eine nachhaltige Veränderung des Produktionssystems Presswerk mit sich. Wenige, hocheffiziente Fertigungslinien ersetzen den technisch veralteten Maschinenpark, bei gleichbleibenden oder sogar erhöhten Ausbringungsmengen. Die Konsequenzen sind eine drastische Reduzierung der Anlagenverfügbarkeit sowie kaum vorhandene Möglichkeiten zur Kompensation sogar bei kurzfristigen Störungen oder Ausfällen der Produktionsanlagen (Thun, Drüke und Hoenig, 2009). Im Einzelfall bleibt es unklar, ob oder inwieweit sich das einzelne Presswerk individuell behelfen kann, um seiner zentralen Rolle als interner Lieferant für die Perlenkette in der Fahrzeugherstellung gerecht zu werden.

Aufgrund der stark ausgeprägten Abhängigkeiten in der Versorgungskette des Unternehmensverbunds ziehen Ausfälle und Störungen durch die verringerte, anlagenseitige Redundanz am einzelnen Standort schwer absehbare Folgen für den wirtschaftlichen Erfolg des gesamten Unternehmens nach sich (Asbjørnslett, 2009), (Cruz, 2009), (Sodhi und Tang, 2012). Im Störfall muss daher kurzfristig eine risikoarme Neuplanung oder Anpassung der hochgradig komplexen Produktionsprogramme unter Berücksichtigung der aktuellen Gegebenheiten möglich sein. Um eine eventuell nötige, teure externe Fertigung zu umgehen oder das schlimmstenfalls drohende Abreißen in den Produktionshauptlinien zu vermeiden, erscheint es in Notlagen sinnvoll, zeitweise auf die Kapazitäten des Presswerksverbunds bis zur Bewältigung der Kalamitäten zurückzugreifen. Zumindest ist es jedoch unabdingbar, übergreifende Strukturen in die Betrachtungen der kurzfristigen Produktionsprogrammsteuerung einzubeziehen, um die Bedarfsdeckung beim internen Kunden bestmöglich zu gewährleisten.

## **1.2 Zielsetzung und Organisation der Arbeit**

Die vierte industrielle Revolution eröffnet branchenübergreifend neue Handlungsspielräume für Unternehmen (PricewaterhouseCoopers, 2014), (McKinsey & Company, 2016). Insbesondere für die Produktion besteht das Potential erheblicher Effizienzsteigerungen durch eine Integration vertikaler und horizontaler Wertschöpfungsketten (The Boston Consulting Group, 2015), (PricewaterhouseCoopers, 2016, S. 6). Effizienzsteigerungen über alle Stufen der Wertschöpfung hinweg sind eine Notwendigkeit zur Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit und Sicherung der Führungsposition von Unternehmen im globalen Umfeld (The Boston Consulting Group, 2006, S. 22), (Kemper, Baars und Lasi, 2011). Die Möglichkeiten, welche sich im Rahmen des digitalen Wandels und im Zeitalter der digitalen Revolution eröffnen, dürfen nicht unbeachtet bleiben sondern müssen ausgeschöpft werden (Forstner und Dümmler, 2014), (Bauernhansl, 2014), (Huber, 2016, S. 14ff). Für die Produktion steht die Beherrschung und Kontrolle der operativen Komplexität in der Fertigung im Vordergrund (The Boston Consulting Group, 2006, S. 22).

Für die Presswerksverbände der Automobilindustrie ist ein ganzheitliches Risikomanagement (Horváth, Meyer-Schwickerath und Seiter, 2011) im Speziellen bei Ausfällen im Anlagenpark in Zukunft unabdingbar. Standortbezogene Lösungen bei der Ausrichtung der Produktionsaktivitäten, wie sie derzeit hauptsächlich praktiziert werden (Friedli und Liebetrau, 2016), greifen im Störfall an dieser Stelle zu kurz, sodass aus strategischer Sicht die Verbundkapazitäten zwingend Berücksichtigung finden müssen (Schubert, 2008), (Abele und Reinhart, 2011, S. 144ff), (Friedli und Schuh, 2012, S. 185ff).

Die Kernfrage, welcher sich die vorliegende Arbeit unter den eingangs erwähnten Gesichtspunkten annimmt, lautet somit: Wie können Produktionskapazitäten des gesamten Presswerksverbands flexibel und effizient im Rahmen einer Gesamtunternehmensstrategie für die kurzfristige Produktionssteuerung im Störfall Berücksichtigung finden?

Dazu werden zu Beginn die *Begriffe und Grundlagen der Produktionswirtschaft* erläutert, wobei die systemische Organisation industrieller Produktionsprozesse und deren Management im Rahmen einer betrieblichen Struktur beleuchtet wird. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf dem Aufgabenspektrum der Produktionsplanung und -steuerung auf operativer Ebene. Der Stand der Forschung und Technik wird durch eine Betrachtung zum *Management von Kapazitätsengpässen im Produktionsnetzwerk* komplettiert. Diesbezüglich wird die Bauteileherstellung in den Presswerken der Automobilindustrie in ihrem vollen Umfang analysiert und unter den bestehenden realbetrieblichen Rahmenbedingungen sowie Zielsetzungen als Problemstellung formalisiert und konkretisiert. Dies ermöglicht in einem nächsten Schritt eine zielorientierte Auswertung vorhandener Lösungsansätze für die formulierte Problemstellung und identifiziert zugleich den Forschungsbedarf hinsichtlich einer Problembehandlung. Bevor hieraus jedoch direkt die *Zielsetzung und Vorgehensweise* für die vorliegende Arbeit abgeleitet wird, erfolgt zuvor ein kurzer *Exkurs: Mathematische Optimierung*, welcher dem Leser ein grundlegendes Verständnis zu mathematischen Aspekten bei der Problembehandlung vermitteln soll.

Durch Abstraktion der Problemstellung wird ein *Modell für die logistikintegrierte Feinplanung im Presswerksverbund* abgeleitet, welches die komplexitätstheoretische Betrachtung der vorliegenden Fragestellung erlaubt. Ein konkretes mathematisches Optimierungsprogramm wird formuliert und es wird dargelegt, wie dieses eine kurzfristige Neuplanung oder Anpassung in der realbetrieblichen Feinplanung in der Produktion unter Berücksichtigung von Verbundaspekten bei Kapazitätsengpässen ermöglicht. Anschließend steht die *Implementierung und numerische Lösung des Programms* im Fokus, um einen Einsatz in der Realproduktion hinsichtlich Laufzeiten und Speicherbedarf sicherzustellen. Hierbei werden zur Reduzierung von Laufzeiten Modifikationen an der Modellformulierung vorgenommen, welche schließlich in einem Lö-

sungsansatz für realbetriebliche Probleminstanzen einfließen. Zudem werden eine alternative Modellformulierung und eine erweiterte Modellversion vorgestellt, um Ansatzpunkte für eine verbesserte Ausschöpfung des Potenzials im konkreten Anwendungsfall aufzuzeigen.

In der Folge wird für das Planungsinstrument die *Umsetzung im realbetrieblichen Umfeld* skizziert, wobei die Einbettung in einem umfassenden Entwurf zum Störfallmanagement in der Produktion im Mittelpunkt steht, welcher um Rahmenbedingungen und Grenzen hinsichtlich einer Realisierung ergänzt wird. Daraufhin erfolgt eine *Zusammenfassung* der Entwicklungen und Ergebnisse, die mit den konkreten Nutzen schließt, welcher von einem derartigen Planungsinstrument ausgeht.



## **2 Begriffe und Grundlagen der Produktionswirtschaft**

Dieses Kapitel beschäftigt sich zu Beginn mit der abstrakten, systemischen Organisation und dem Management der Wertschöpfung in industriellen Unternehmen. Auf dieser Basis ist es im Anschluss möglich, sich gezielt der Betriebsorganisation und dem Produktionsmanagement im Speziellen zu widmen. Damit ist die Grundlage gelegt, um sich schließlich den konkreten Zusammenhängen und Abhängigkeiten bei Planungs- und Steuerungsprozessen in der Produktionswirtschaft zuwenden zu können.

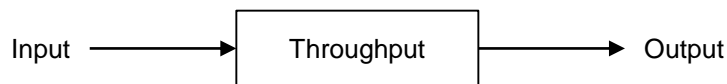
Neben dem Vermitteln eines ganzheitlichen Verständnisses für die übergreifenden Strukturen in der industriellen Produktion liegt der weitergehende Schwerpunkt dieses Kapitels im Wesentlichen darin, die Voraussetzungen zu schaffen, um im Folgenden eine sinnvolle Verortung der eingangs skizzierten Problemstellung einer kurzfristigen Neuplanung bzw. Änderung von Produktionsprogrammen mit Blick auf die realbetrieblichen Planungsabläufe zu ermöglichen.

### **2.1 Systemische Organisation industrieller Produktionsprozesse**

Ein System beschreibt in der Regel eine organisierte, zweckorientierte Struktur voneinander abhängiger und miteinander in Beziehung stehender Elemente (Ulrich, 2001b, S. 132f), (Blackstone, 2008, S. 135). Die Einzelteile eines solchen Komplexes greifen nach bestimmten Regeln, Gesetzen oder Prinzipien ineinander, um den Sinn, die Aufgabe oder den Zweck der strukturierten Ganzheit zu erfüllen (Hügli und Lübcke, 2003, S. 611), (Schindele, 1996, S. 40ff). Ferner kann eine Klassifizierung gemäß der Zielsetzung des Systems vorgenommen werden (DIN IEC 60050-351, 2014, S. 21).

In der Produktionswirtschaft sind insbesondere Produktionssysteme von Bedeutung. Nach Corsten und Gössinger (2012, S. 2ff) oder Zahn und Schmid (1996, S. 109ff) kann ein Produktionssystem als Subsystem der Unternehmung verstanden werden. Dabei erlauben diese Systeme eine umfassende Abbildung industrieller Produktionsprozesse (Zahn und Schmid, 1996, S. 112) und erfüllen im konkreten Fall eine Produktionsaufgabe (Weber, 1984). In diesem Rahmen bezeichnet der Begriff Produktion das Zusammenwirken von wirtschaftlichen, technologischen sowie organisatorischen Aktivitäten und Funktionen zur Herstellung von Gütern (CIRP, 2004, S. 18). Hierbei werden durch einen wertschöpfenden Umwandlungsprozess Erzeugnisse materieller und immaterieller Art hergestellt (Schneeweiß, 1999, S. 1ff). In der Literatur und in verschiedenen Bereichen existieren unterschiedliche Auffassungen für den Begriff der Wertschöpfung (Redlich, 2010, S. 19ff), (Alisch, Arentzen und Winter, 2004, S. 3322). Im Rahmen der weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit wird die Definition nach Bach et al. (2012, S. 3ff)

zugrunde gelegt, wonach Wertschöpfung im Wesentlichen die Schaffung von Mehrwert durch Transformationsprozesse ist und die Eigenleistung eines Systems beschreibt (vergleiche dazu auch Müller-Stewens und Lechner (2011, S. 354ff), Haasis (2008, S. 6)). Die Hauptaufgabe eines Produktionssystems liegt demnach in der Erstellung von End- bzw. Zwischenprodukten durch wertschöpfende und zusammenhängende Prozesse innerhalb des Systems (Günther und Tempelmeier, 2012, S. 6f). Charakteristische Elemente des Systems sind Input, Throughput und Output. Sie prägen die Makrostruktur eines Produktionssystems, die in Abbildung 2.1 rudimentär dargestellt ist. Ganz konkret werden Produktionsfaktoren (Input) im Leistungserstellungsprozess (Throughput) kombiniert, um die final angestrebte Ausbringungsmenge (Output) herzustellen. (Corsten und Gössinger, 2012, S. 4ff), (Schneeweiß, 1999, S. 1ff), (Neumann, 1996, S. 1f)



*Abbildung 2.1: Makrostruktur eines Produktionssystems nach Corsten und Gössinger (2012, S. 4): der Input wird in einem Leistungserstellungsprozess zu einem Output transformiert*

Ein Produktionssystem integriert im Allgemeinen eine Menge unterschiedlicher Funktionen und setzt sich aus verschiedenen direkten und indirekten Komponenten zusammen (CIRP, 2004, S. 22), welche zur Wertschöpfung beitragen. Neben dem Betrieb und der Bedienung der für den Wertschöpfungsprozess nötigen Ressourcen können dabei zusätzlich bspw. der Transport, die Lagerung und der Vertrieb von Gütern inbegriffen sein, womit es sich bei einem Produktionssystem um die Verkettung von Fertigungs- und Distributionsprozessen handelt (Sencar, 2001, S. 28) und die einzelnen Elemente über einen Material- sowie Informationsaustausch in Verbindung stehen (Warnecke, 1995b, S. 15), (Dyckhoff und Spengler, 2010, S. 4). In den Produktionsressourcen sind dabei nicht nur Betriebsmittel sondern z. B. auch Mitarbeiter zusammengefasst; Regeln, Abläufe und Methoden vervollständigen das Produktionssystem. (Gottschalk, 2005, S. 6), (Dreher, 2014, S. 9) Je nach Betrachtungsebene und Aggregationsstufe können einzelne Arbeitsplätze, ganze Fertigungslinien oder Funktionsbereiche bis hin zur Gesamtheit des Unternehmens als Produktionssysteme aufgefasst werden (Dyckhoff, 1994, S. 11), (H.-P. Wiendahl, ElMaraghy et al., 2007), (Moser, 2014, S. 7f). In Abbildung 2.2 sind diesbezüglich verschiedene Aggregationsgrade unter Ressourcen- bzw. Raumaspekten beispielhaft aufgezeigt.

Produktionssysteme lassen sich anhand ihrer verschiedenen Eigenschaften charakterisieren. Insbesondere die Kapazität und die Flexibilität werden dabei zur qualitativen sowie quantitativen Beschreibung herangezogen. Kapazität beschreibt in diesem Rahmen das Leistungsvermögen

einer Einheit innerhalb einer Zeitspanne (Kern, 1962, S. 14ff), wohingegen mit Flexibilität die Anpassungsfähigkeit eines Systems beschrieben wird (Behrbohm, 1985, S. 165ff), im Allgemeinen also die Fähigkeit sich auf veränderte Rahmenbedingungen einzustellen bzw. sich einer abgewandelten Systemumwelt entsprechend umstellen zu können. (Zahn und Schmid, 1996, S. 122), (Zäpfel, 2000, S. 268ff), (Corsten und Gössinger, 2012, S. 10ff)

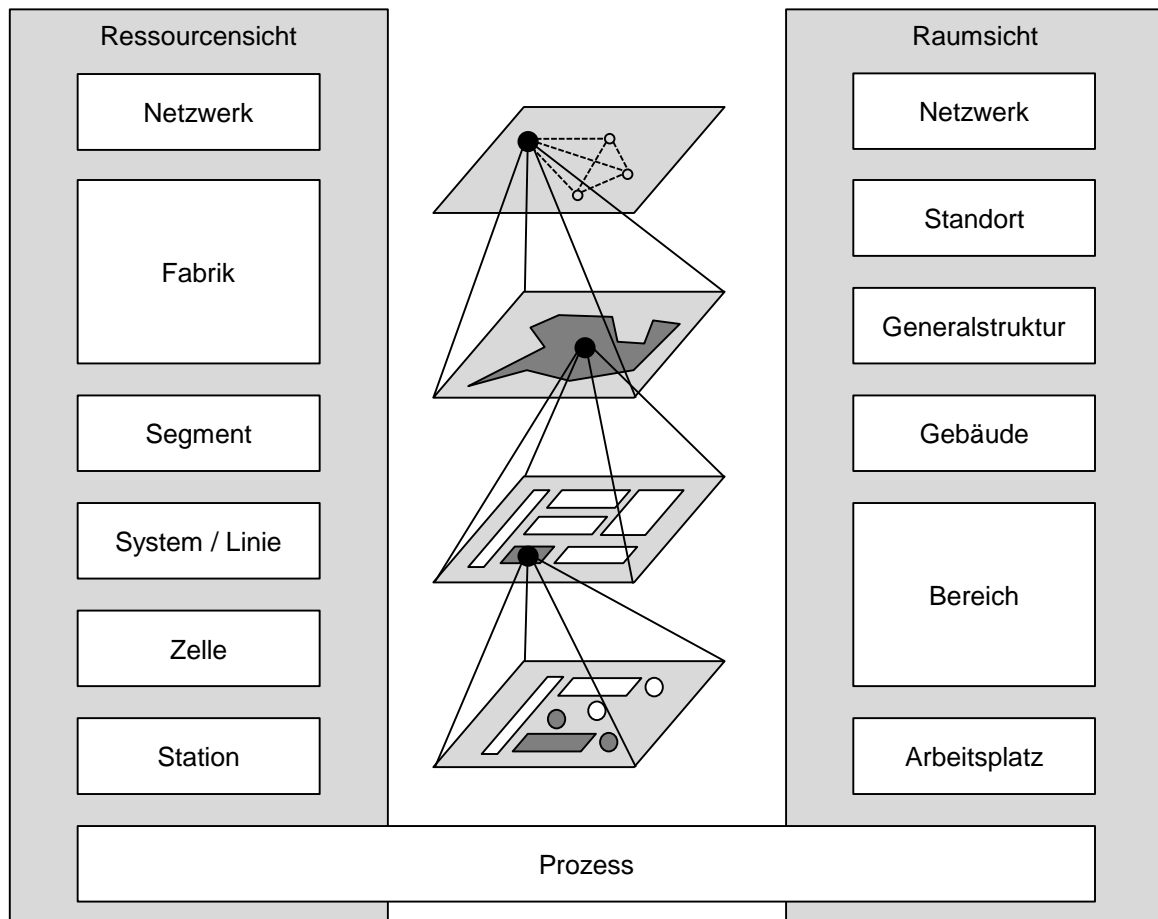


Abbildung 2.2: *Aggregationsgrad eines Produktionssystems nach H.-P. Wiendahl, ElMaraghy et al. (2007): Produktionssysteme können aus verschiedenen Perspektiven unterschiedliche Leistungseinheiten darstellen*

Aufgrund der Vielschichtigkeit und der Heterogenität von wertschöpfenden Prozessen im produktionswirtschaftlichen Alltag, erweist sich eine weitere Differenzierung industrieller Produktionssysteme als sinnvoll (Zahn und Schmid, 1996, S. 129). Hauptsächlich werden für eine detailliertere Klassifizierung der industriellen Leistungsstrukturen der Wiederholungsgrad und der Organisationstyp der Produktion herangezogen. Bei einer Einteilung gemäß dem Wiederholungsgrad lassen sich Einzel-, Serien-, Sorten- und Massenfertigung voneinander trennen. Diese Betrachtung beruht im Wesentlichen auf einer Unterscheidung entsprechend der quantitativen Produktionsmenge und der qualitativen Verschiedenheit der produzierten Güter. Eine



Kategorisierung industrieller Wertschöpfungsprozesse entsprechend ihrer organisatorischen Ausgestaltung kann nach dem Organisationsprinzip vorgenommen werden – hier wird eine Einteilung nach Verrichtungs-, Gruppen- bzw. Zentren- oder Fluss- bzw. Objektprinzip zugrunde gelegt. Diese Prinzipien führen ihrerseits auf den Organisationstypus, wonach eine Differenzierung zwischen Werkstatt-, Gruppen- und Fließproduktion stattfindet. (Zäpfel, 1989, S. 157ff), (Zahn und Schmid, 1996, S. 129ff), (Kistner und Steven, 2001, S. 18ff), (Dyckhoff und Spengler, 2010, S. 13ff), (Corsten und Gössinger, 2012, S. 28ff), (Günther und Tempelmeier, 2012, S. 13ff), (Jammernegg und Poiger, 2013) Klassischerweise werden in der Produktionswirtschaft lediglich zwei Ausprägungsformen industrieller Prozesse betrachtet: Die Werkstattproduktion nach dem Verrichtungsprinzip und die Fließproduktion nach dem Fluss- bzw. Objektprinzip (Fandel, Fistek und Stütz, 2011, S. 17). Eine schematische Klassifizierung nach der organisatorischen Anordnung und der vorliegenden Transportbeziehungen ist in Abbildung 2.3 beschrieben.

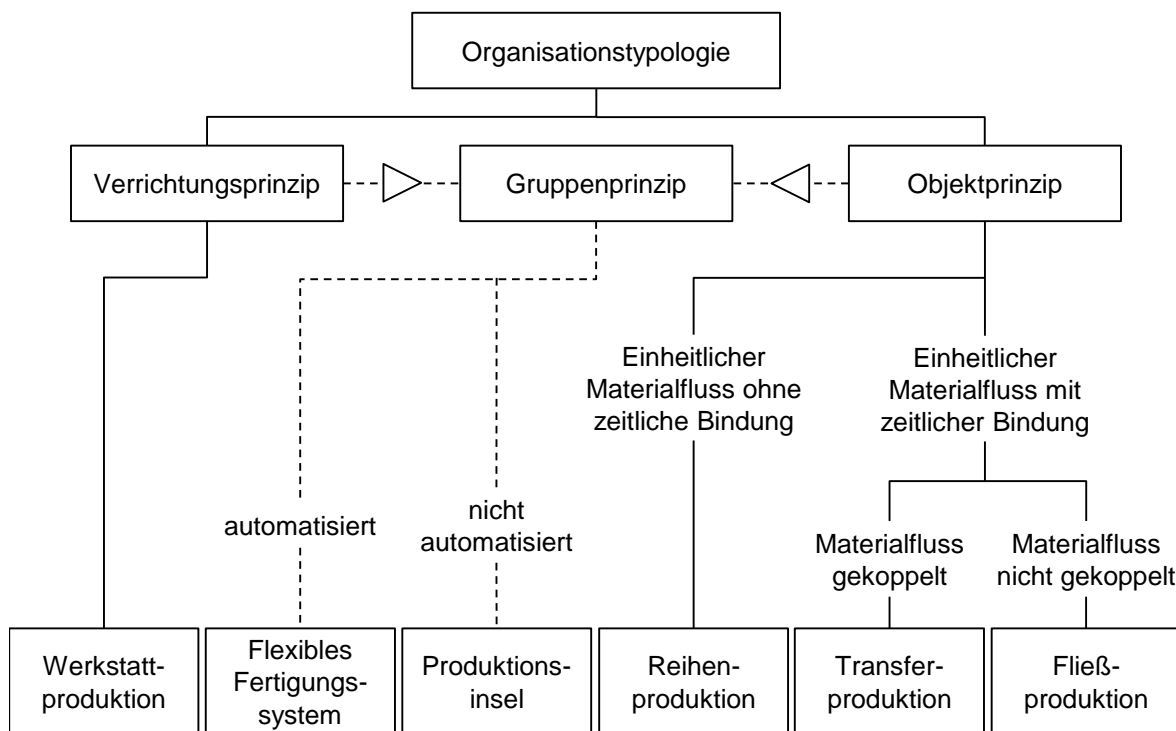


Abbildung 2.3: Typologie der Produktion nach Günther und Tempelmeier (2012, S. 13): unter dem Aspekt der Organisationsstruktur lassen sich verschiedene Typen der Produktion unterscheiden

Aus den Zusammenhängen wird ersichtlich, dass die Gruppenfertigung als Versuch verstanden werden kann, Synergien aus einer Verbindung von Aspekten der Fließ- und der Werkstattproduktion zu heben. (Zahn und Schmid, 1996, S. 133ff)

Arbeitssysteme hingegen spezifizieren auf ähnliche Weise zum Begriff des Produktionssystems organisatorisch untergeordnete Objekte innerhalb der betrieblichen Struktur (Dangelmaier, 2009,

S. 3). Sie erfüllen eine spezifische Zielsetzung oder Aufgabe und bestehen in der Regel aus einem einzelnen oder mehreren systemischen Elementen mit gleichartigen Fähigkeiten. Nach DIN EN ISO 6385 (2016, S. 7ff) kann ein Arbeitssystem als organisatorische Einheit aufgefasst werden, welche jeweils einen einzelnen Abschnitt eines Produktionsprozesses ausführt. Es ist damit die kleinste selbstständig arbeitsfähige Einheit eines Produktionssystems. (Günther und Tempelmeier, 2012, S. 7ff) Ein Produktionssystem setzt sich dieser Logik folgend aus mehreren Arbeitssystemen zusammen (Dreher, 2014, S. 9).

Nimmt das Produktionssystem die organisatorisch übergeordnete Rolle ein, so findet menschliche Arbeitsleistung hauptsächlich in den Arbeitssystemen statt, wodurch diese ähnlich den Produktionssystemen von technischen gleichwohl aber auch von personenspezifischen, aufgabenspezifischen sowie soziokulturellen Aspekten und Komponenten geprägt sind (Zahn und Schmid, 1996, S. 110f). Somit sind Produktions- als auch Arbeitssysteme soziotechnische Systeme und damit durch Systemoffenheit als auch Systemdynamik gekennzeichnet. Arbeitssysteme zeichnen sich dabei gemäß ihrer Natur insbesondere durch eine gewisse Determiniertheit und Abgrenzung stets als Subsysteme in einer Organisationsstruktur aus. (Ulich, 2013)

## 2.2 Betriebsorganisation und Produktionsmanagement

Management in seiner funktionalen Bedeutung beschreibt in allgemeiner Auffassung die Gestaltung und Lenkung von Institutionen der menschlichen Gesellschaft (Ulrich, 2001c, S. 243). Die menschlichen Handlungs- und Denkweisen wiederum werden im Wesentlichen durch die zugrunde liegenden Modelle zumindest erheblich beeinflusst (Schwaninger und Ambroz, 2009). Für ein nachhaltiges unternehmerisches Handeln und für eine langfristig erfolgreiche betriebliche Tätigkeit sind daher Managementmodelle von zentraler Bedeutung (Ulrich, 2001a, S. 463ff).

In einer holistischen Formulierung im Sinne der Systemtheorie beschreibt bspw. Schwaninger (2009, S. 48ff) eine Dreiteilung von Managementtätigkeiten im Rahmen einer Klassifizierung nach logischen Ebenen. Dabei wird zwischen normativem, strategischem und operativem Management unterschieden. (Ulrich und Fluri, 1995, S. 18ff), (Bleicher, 1999, S. 71ff) Die Zusammenhänge zwischen den drei logischen Ebenen mit ihren Orientierungsgrundlagen und Zielkategorien sind in Abbildung 2.4 veranschaulicht.

Die normative Ebene beschäftigt sich demnach hauptsächlich mit der Viabilität und der Entwicklung des Systems, wobei Fragen zum Ethos, der Identität und der Vision des Systems sowie strukturelle und kulturelle Gesichtspunkte im Vordergrund stehen. Demgegenüber stehen im strategischen Bereich die bestehenden und die etwaigen neuen Erfolgspotentiale im Fokus, wohingegen im operativen Anteil konkreter Nutzen für unterschiedliche Anspruchsgruppen

geschaffen werden muss. (Schwaninger und Ambroz, 2009), (Zahn und Schmid, 1996, S. 144) Während das normative Management dem System seine Legitimität gibt, geht es aus strategischer Sicht um die Effektivität und schließlich im operativen Teil um die Effizienz in der Ausführung (Ulrich, 2001c, S. 424), (Schwaninger, 2009, S. 50). Aus dieser Betrachtungsweise lässt sich ableiten, dass die höheren Managementebenen in gewisser Weise eine Funktion der Vorsteuerung auf die nachgelagerten Ebenen ausüben, wie dies Gälweiler (2005, S. 27ff) insbesondere für die Beziehungen zwischen dem strategischen und dem operativen Bereich herausstellt.

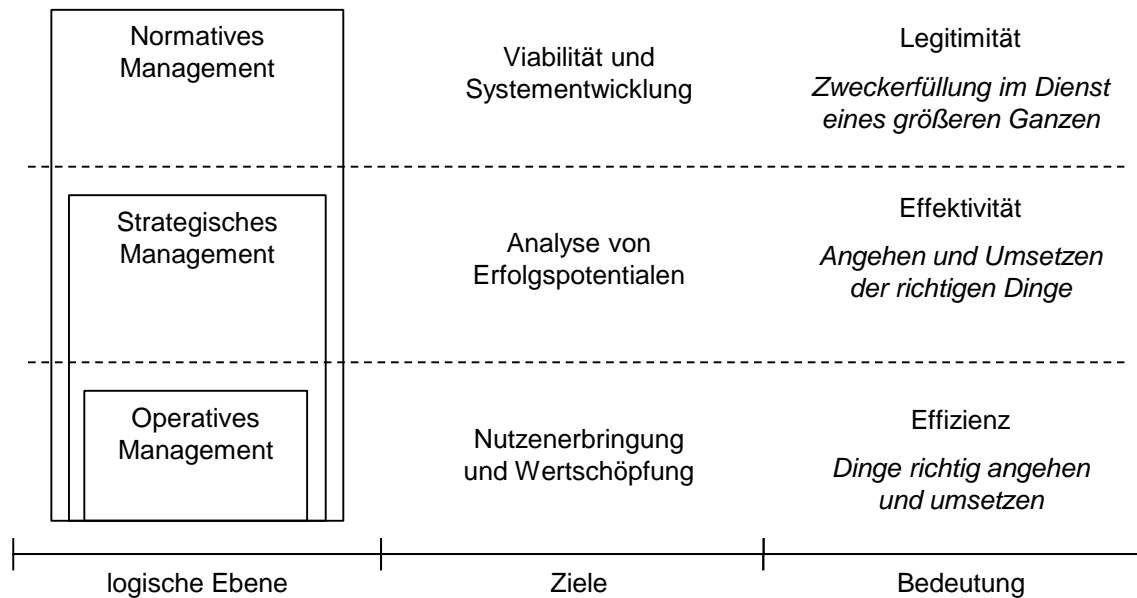


Abbildung 2.4: *Logische Ebenen des Managements nach Schwaninger (2009, S. 50): das Management kann gemäß der unterschiedlichen Zielkategorien und Orientierungsgrundlagen in eine normative, eine strategische und eine operative Ebene unterteilt werden*

Industrielle Führungssysteme können hierbei auf Basis verschiedener Kriterien in Teilsysteme untergliedert werden. Das industrielle Produktionsmanagement wird dabei in der Regel unter dem Aspekt der Tragweite der zu treffenden Entscheidungen, anhand der Prozessphasen der Führung und gemäß der Objektbereiche der Führung betrachtet (Zahn und Schmid, 1996, S. 145f). Bei letzterem differenziert man ausführende Organe der Unternehmung im Sinne einzelner Produktionssysteme. Die Prozessphasen der systemischen Lenkung können generell in die Bereiche Planung, Steuerung und Kontrolle aufgeteilt werden. Wird wie häufig in der Literatur üblich die Tragweite einzelner Entscheidungen herangezogen, so wird zwischen strategischer, taktischer und operativer Ebene unterschieden. (Zahn und Schmid, 1996, S. 144ff), (Corsten und Gössinger, 2012, S. 24ff), (Jammernegg und Poiger, 2013) Die Dimension industrieller Führungssysteme kann somit durch die Darstellung in Abbildung 2.5 erfasst werden.

Berücksichtigt man wiederum die Vorsteuerungsfunktion hinsichtlich der verschiedenen logischen Ebenen bei einer solchen Differenzierung, so haben Entscheidungen übergeordneter Managementebenen wegweisenden Charakter für die nachgelagerten Bereiche und geben damit wesentlich deren Rahmenbedingungen vor (VDI 2870 Blatt 1, 2012, S. 27). Des Weiteren ist zwar der Erfolg der untergeordneten Ebenen von den Entscheidungen des übergeordneten Managements abhängig, jedoch ist der Erfolg übergeordneter Ebenen maßgeblich mit dem Erfolg nachgelagerter Ebenen gekoppelt. Somit sind die verschiedenen Bereiche nicht isoliert zu betrachten, vielmehr handelt es dabei um Problemkomplexe, welche direkt miteinander in Beziehung stehen, sodass vermaschte Entscheidungsprozesse koordiniert werden müssen. (Corsten und Gössinger, 2012, S. 24f) Ganz im Sinne von Zäpfel (2000, S. 3f) sollte daher diese hierarchische Einteilung in unterschiedliche Entscheidungsebenen in erster Linie als funktionale Abhängigkeit verstanden werden und weniger als Ordnungsstruktur.

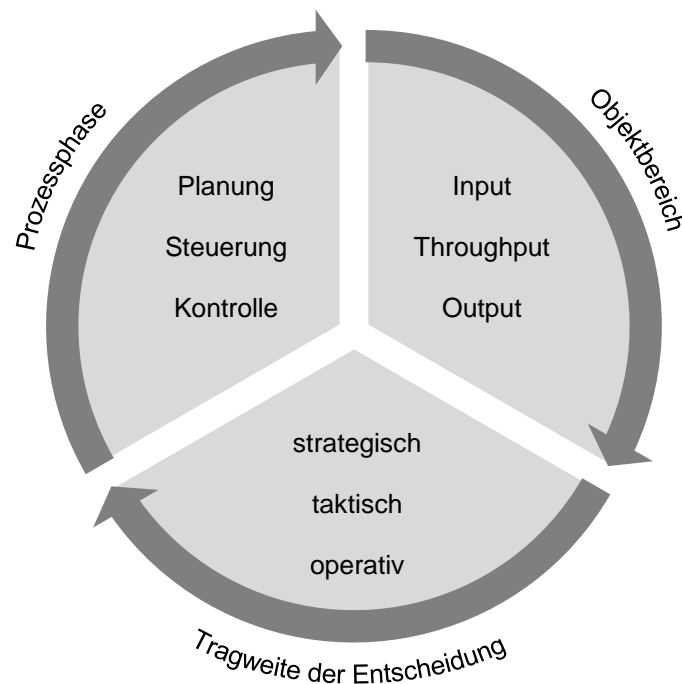


Abbildung 2.5: *Dimension industrieller Führungssysteme nach Zahn und Schmid (1996, S. 145): klassischerweise werden Führungssysteme unter dem Aspekt der Tragweite der Entscheidungen, anhand der Prozessphasen und entsprechend der Objektbereiche der Führung betrachtet*

Bei einer genaueren Betrachtung der Entscheidungsinhalte können Merkmale und Ausprägungen mit den unterschiedlichen Managementebenen verknüpft werden. Günther und Tempelmeier (2012, S. 26) geben als zentrale Eigenschaften von Entscheidungen deren Planungshorizont oder Realisierungszeitraum, die Bedeutung für das Gesamtunternehmen, den Aggregationsgrad und die Managementebene an, welche widerspiegelt, inwieweit Entscheidungsträger verschiedener

Ebenen der Unternehmung einbezogen sind. Das Entscheidungsfeld des Produktionsmanagements unter Berücksichtigung dieser vier Dimensionen ist in Abbildung 2.6 festgehalten.

		Bedeutung für das Gesamtunternehmen				
		hoch	mittel	gering		
Planungshorizont	lang	strategisch			Aggregationsgrad	hoch
	mittel		taktisch			mittel
	kurz			operativ		gering
		hoch	mittel	gering	Managementebene	

Abbildung 2.6: *Entscheidungsfeld der Managementebenen nach Günther und Tempelmeier (2012, S. 26): zentrale Eigenschaften von Entscheidungen – der Planungshorizont, die Bedeutung für das Gesamtunternehmen, der Aggregationsgrad, die Managementebene – lassen eine direkte Verknüpfung mit den unterschiedlichen Managementebenen zu*

Industrielle Produktion ist nach Abschnitt 2.1 in Produktionssystemen organisiert. Dahingehend beschäftigt sich das Produktionsmanagement mit der zielorientierten Ausgestaltung und Durchführung der entsprechenden Wertschöpfungsprozesse (Schuh und C. Schmidt, 2014) und übernimmt damit eine Lenkungsfunktion für Produktionssysteme (Dyckhoff und Spengler, 2010, S. 29ff), (Kämpf, 2007).

### 2.3 Operative Produktionsplanung und Produktionssteuerung

Das Produktionsmanagement ist abstrakt für die Produktionsplanung, Produktionssteuerung und Produktionskontrolle zur Leistungserstellung im Unternehmen verantwortlich (Neumann, 1996, S. 3), (Kistner und Steven, 2001, S. 7ff). Zahn und Schmid (1996, S. 155ff) erfassen die einzelnen Entscheidungstatbestände und Kernaufgaben des industriellen Produktionsmanagements. In diesem Zusammenhang grenzen sie die Aufgabenstellung auf Aspekte der Produktplanung, der strategischen Produktionsprogrammplanung, der Potentialverfügbarkeitsplanung, der ope-

rativen Produktionsprogrammplanung, der Faktorbereitstellungsplanung, der Prozessplanung, der Produktionssteuerung und der Produktionskontrolle ein. Dabei weisen die Produktplanung, die strategische Produktionsprogrammplanung und die Potentialverfügbarkeitsplanung eher strategischen Charakter auf.

Im operativen Bereich hat das Produktionsmanagement die Aufgabe, die vorgegebenen strategischen Produktionsziele unter den taktisch festgelegten Bedingungen zu verwirklichen (Kiener et al., 2006, S. 138ff). Damit ist also die Umsetzung der wertschöpfenden Transformationsprozesse samt ihrer Überwachung im Betrieb durch geeignete Maßnahmen bei bestmöglicher Erfüllung der produktionswirtschaftlichen Zielsetzungen zu gewährleisten. Eine Produktionsstrategie gibt den Rahmen dafür über einen längeren Zeitraum hinweg vor. Beschränkt man sich nun ausschließlich auf die Aspekte nicht-strategischer Natur, dann lassen sich bei einer weiteren Differenzierung anhand der Objektbereiche industrieller Führung spezifische input-, throughput- und outputbezogene Aufgaben konkretisieren. Wird zudem noch der dynamische Gesichtspunkt durch eine Unterscheidung der Prozessphasen Planung, Steuerung und Kontrolle in die Betrachtung einbezogen, so ergeben sich die zentralen Herausforderungen für das operative Produktionsmanagement. Diese setzen sich zusammen aus der outputbezogenen, operativen Produktionsprogrammplanung, der inputbezogenen Faktorbereitstellungsplanung, der throughput-orientierten Produktionsprozessplanung sowie der Produktionssteuerung und schließlich der Produktionskontrolle. (Zahn und Schmid, 1996, S. 162ff)

In Literatur und Betriebspraxis hat sich für den Aufgabenkomplex des operativen Produktionsmanagements die Bezeichnung Produktionsplanung und Produktionssteuerung (PPS) etabliert, sodass im Folgenden diese Bezeichnung gemäß den vorhergehenden Ausführungen für das operative Produktionsmanagement Verwendung finden soll. Das operative Produktionsmanagement ist somit konkret für die Durchführung der operativen Produktionsplanung sowie der Produktionssteuerung zuständig (Kiener et al., 2006, S. 137), (Dangelmaier, 2009, S. 9f). U. a. nach Auffassung von Zahn und Schmid (1996, S. 162ff) können die Planungsaufgaben zum Produktionsprogramm, zur Faktorbereitstellung und zum Produktionsprozess in der Produktionsplanung zusammengefasst werden. Die Steuerungs- und Kontrollaufgaben gehen in der Produktionssteuerung auf. (Zäpfel, 2000, S. 190ff), (Corsten und Gössinger, 2012, S. 576ff) Ähnlich dazu wird nach dem VDI (1992, S. 167) die Produktionsplanung beschrieben als eine systematische Suche und Festlegung von Produktionszielen sowie der entsprechenden Vorbereitung notwendiger Aufgaben samt Definition ihrer Abläufe zum Erreichen der Zielsetzung. Die Produktionssteuerung ist dahingehend die Veranlassung, Überwachung und Sicherung der Realisierung von Produktionsaufgaben (DIN EN 62264-1, 2014, S. 31). Die PPS-Aufgaben

werden dabei in die drei Aufgabengebiete Bestell- und Lagerwesen, Fertigungsplanung und Fertigungssteuerung aufgeteilt, welche wiederum in vielfältige Aufgabenbereiche zerlegbar sind (VDI, 1992, S. 9ff). Warnecke (1995a, S. 245ff) fasst dabei die Fertigungsplanung und die Fertigungssteuerung in der Arbeitsvorbereitung zusammen.

Bei der konkreten Umsetzung von PPS-Ansätzen im Produktionsbetrieb muss den bestehenden zuvor erläuterten Interdependenzen im Produktionsbereich zwingend Rechnung getragen werden. Einerseits sind sachlich-horizontale Beziehungen zwischen den Handlungsalternativen zu einem Zeitpunkt sowie andererseits zeitlich-vertikale Zusammenhänge zwischen Entscheidungen aufeinanderfolgender Zeitpunkte offenkundig. In diesem Rahmen ist nach Zäpfel (1982, S. 297) für eine Implementierung der Integrationsgrad von hoher Bedeutung. Wie in Abbildung 2.7 verdeutlicht, umfasst dieser im Wesentlichen die Aspekte des Sachumfangs der Planung und der Koordination des Entscheidungsprozesses. Ersterer beschreibt die Modellcharakteristik mit Blick auf die abgebildeten Systemgrenzen. Man unterscheidet dabei zwischen Totalmodellen, welche jegliche relevanten Interdependenzen erfassen, und Partialmodellen, die bewusst lediglich auf gewisse Aspekte beschränkte Teilprobleme einer isolierten Betrachtung unterziehen. Hinsichtlich des Entscheidungsfindungsprozesses unterscheidet man zwischen Simultanplanungsansätzen, welche eine gleichzeitige Lösung des zugrunde liegenden Modells mit allen damit verbundenen Entscheidungen vorsehen, und der Sukzessivplanung, bei der eine logische Zerlegung in separat und sequentiell zu lösende Teilprobleme durchgeführt wird. (Steven, 1994, S. 9ff), (Neumann, 1996, S. 193ff), (Kurbel, 2016, S. 36)

		Modellansatz	Entscheidungsprozess
Integrationsgrad	gering	Partialmodell	Sukzessivplanung
	hoch	Totalmodell	Simultanplanung

Abbildung 2.7: *Modelltyp Integrationsgrad nach Steven (1994, S. 11): unter dem Aspekt des Sachumfangs der Planung wird klassischerweise zwischen Partial- und Totalmodellen unterschieden, wohingegen bei der Koordination des Entscheidungsprozesses Sukzessiv- oder Simultanplanungsansätze zum Einsatz kommen*

Zwar können prinzipiell ausschließlich durch ein Totalmodell mit Simultanplanung die gegenseitigen Interdependenzen bei der PPS berücksichtigt werden (Gutenberg, 1983, S. 199ff), jedoch

sind solche Ansätze kaum von praktischer Bedeutung. Dies liegt zum einen in der algorithmischen Komplexität der auftretenden Problemformulierungen begründet – eine Lösung der Modelle ist nicht in vertretbarer Laufzeit möglich. Zudem stellt der hohe Detaillierungsgrad, in dem benötigte Daten als Grundlage einer numerischen Problembehandlung zur Verfügung gestellt werden müssen, und deren Aktualisierung die Anwender vor große Herausforderungen. Des Weiteren ist ungewiss, ob bspw. die Güte von Prognosen ausreichend ist, aber auch der dynamischen Natur von Daten und Prozessen ist in der Regel nicht entsprechend beizukommen. (Müller-Merbach, 1984), (Neumann, 1996, S. 193f)

Nach Kiener et al. (2006, S. 144ff) kann dementsprechend die PPS in einem Stufenkonzept erfasst werden, welches deutlich macht, dass es sich um ein sukzessives Vorhaben handelt, welches auf einer Lösung von Teilbereichen mit zunehmenden Detaillierungsgrad bei abnehmendem Planungshorizont beruht (Kistner und Steven, 2001, S. 254ff). In diesem hierarchischen Ansatz bestehen zwischen den Teilproblemen Schnittstellen, welche eine begrenzte Rückkopplung ermöglichen. Diese Herangehensweise versucht Vorteile unterschiedlicher Integrations- als auch Koordinationsansätze auszunutzen und verbindet einen integrierten Ansatz mit der Lösbarkeit detaillierter Fragestellungen (Steven, 1994, S. 16f). In der Planungsphase sind sequentiell die Produktionsprogramm- und die Materialbedarfsplanung angesiedelt. Weiter schließt sich hier die Produktionsdurchführungsplanung mit ihren Aufgaben der Durchlauf- und Kapazitätsterminierung mit der finalen Auftragsfreigabe an, wohingegen in der Steuerungsphase die Planungen hinsichtlich einer konkreten Produktionsdurchführung und -überwachung zusammengefasst sind.

Ein erweitertes, formales Modell der PPS – das Aachener PPS-Modell – beschreiben bspw. Schuh, Brosze und Brandenburg (2012). Auf Grundlage des Konzepts eines ganzheitlichen Produktionssystems werden mitunter Netzwerkaufgaben bzw. überbetriebliche Aspekte integriert. Die Basis ist eine Beschreibung der PPS unter vier unterschiedlichen Referenzsichten: Aufgabensicht, Prozesssicht, Prozessarchitektursicht und Funktionssicht. Die Aufgabensicht ist in Abbildung 2.8 dargelegt und gliedert demnach den Komplex in Kern-, Netzwerk- und Querschnittsaufgaben (Lödding, 2008, S. 5ff).

Die Prozessreferenzsicht dient der Ableitung von Prozessen für die Erfüllung der Aufgaben aus der Aufgabenreferenzsicht. Inhaltlich werden die entsprechenden Prozesse zeitlich-logisch geordnet und detaillierter beschrieben. Das Bindeglied zwischen erweiterter Aufgabensicht und betriebstypbezogener Prozesssicht bildet die Prozessarchitekturreferenzsicht. Darin findet die Verteilung und Koordination von Netzwerkaufgaben statt, womit dem überbetrieblichen und unternehmensübergreifenden Charakter der Produktion Rechnung getragen wird. Schließlich sind in der Funktionsreferenzsicht Anforderungen in einer flachen Hierarchie geordnet und



semantisch beschrieben festgehalten, welche an ein IT-System zur Unterstützung innerbetrieblicher PPS-Aktivitäten gestellt werden. Diese abstrakte Modellformulierung beschreibt Teile der PPS aus verschiedenen Perspektiven und bietet damit eine effiziente Projektunterstützung für Praxisvorhaben.

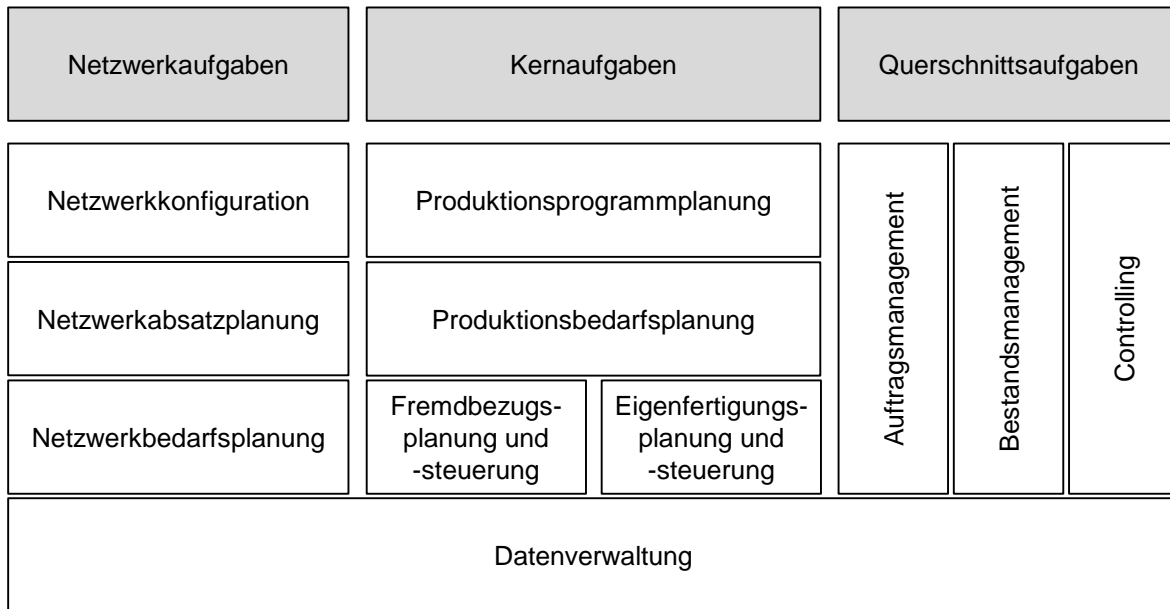


Abbildung 2.8: *Aufgabensicht der Aachener-PPS nach Schuh, Brosze und Brandenburg (2012): die Aufgabensicht nimmt eine Unterteilung in die klassischen Kern- und Querschnittsaufgaben vor, welche um Netzwerkaufgaben und überbetriebliche Aspekte ergänzt werden*

Das Zielsystem der PPS lässt sich dabei anhand des Zielsystems der umfassenderen Produktionslogistik beschreiben. Die ausschlaggebenden Zielgrößen sind hierbei die marktbezogene Logistikleistung, welche durch die Liefertreue und die Lieferzeit repräsentiert wird, und die betriebsbezogenen Logistikkosten, die sich aus Prozess- und Kapitalbindungskosten zusammensetzen (Lödding, 2008, S. 19ff). Wie bereits erwähnt, liegt die originäre Aufgabe der PPS in der möglichst wirtschaftlichen Realisierung des laufenden Produktionsprogramms und damit im Spannungsfeld hoher Termintreue bei der Fertigstellung der Aufträge sowie hoher Auslastung der Kapazität bei gleichzeitig kurzen Durchlaufzeiten der Aufträge und niedrigen Beständen an halbfertigem Material. Diese vier Maße stehen dabei gemäß der vereinfachten Visualisierung in Abbildung 2.9 im Zielkonflikt, da sie nicht gleichmäßig zu erreichen sind. (Vahrenkamp, 2008, S. 113f), (Nyhuis und H.-P. Wiendahl, 2009, S. 4ff), (Dreher, 2014, S. 18f), (H.-P. Wiendahl, 2014, S. 250ff)

Es bleibt festzuhalten, dass die PPS eine der zentralen Aufgaben in einem Industrieunternehmen darstellt (Schuh, Brosze und Brandenburg, 2012) und von hoher Komplexität geprägt ist

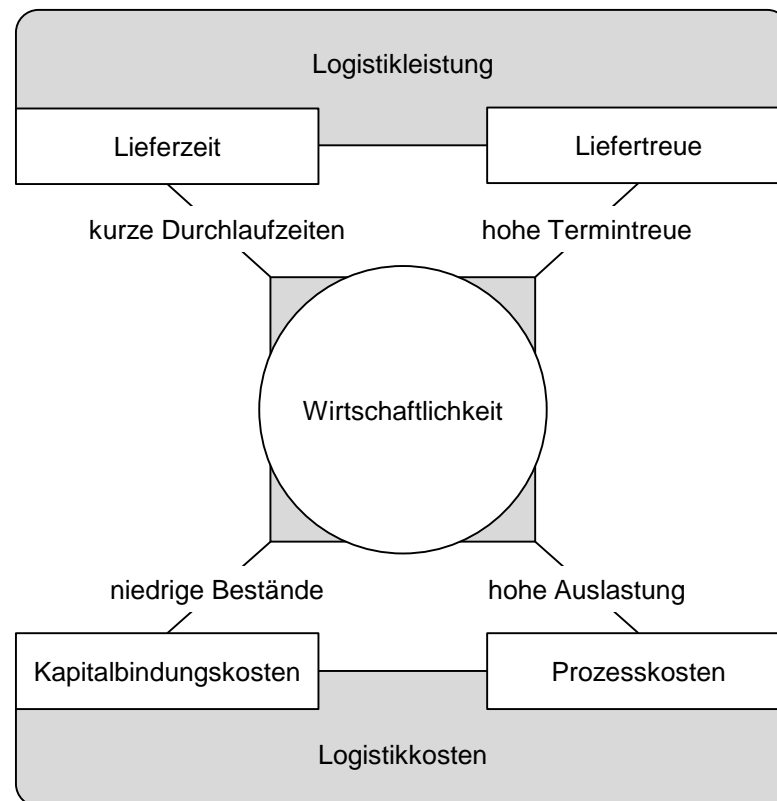


Abbildung 2.9: Zielsystem und Spannungsfeld der Produktionslogistik nach H.-P. Wiendahl (2014, S. 251): unter den Aspekten der marktbezogenen Logistikleistung und der betriebsbezogenen Logistikkosten liegt die Zielsetzung der PPS im Spannungsfeld hoher Termintreue bei der Fertigstellung der Aufträge sowie hoher Auslastung der Kapazitäten bei gleichzeitig kurzen Durchlaufzeiten der Aufträge und niedrigen Beständen an halbfertigem Material, was wiederum nicht gleichmäßig zu erreichen ist

(H.-P. Wiendahl, 2014, S. 278). Zur Erfüllung des Aufgabenumfanges wurden in den Betrieben daher seit ihrer Einführung IT-Systeme zur Unterstützung verwendet. Ausgehend vom Material Requirements Planning entwickelte sich das Manufacturing Resource Planning, welches die ursprüngliche reine Fixierung auf materialwirtschaftliche Belange um Funktionalitäten der Zeit- und Kapazitätswirtschaft ergänzt. Diese ausschließlich auf die Produktion ausgerichteten Systeme sind mittlerweile übergreifend im Enterprise Resource Planning integriert, in welchem sämtliche an der Wertschöpfung beteiligten Ressourcen eines Unternehmens eingebunden sind, sodass neben technischen auch kaufmännische Aspekte der Auftragsabwicklung Berücksichtigung finden. Kollaboration im unternehmensinternen Produktionsverbund und vermehrt überbetriebliche sowie unternehmensübergreifende Zusammenarbeit in Produktionsnetzwerken erweitern den Blickwinkel auf die Wertschöpfung und machen dahingehend eine Planung und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette notwendig. Diese Aspekte greift in der heutigen Zeit das Supply

Chain Management auf, dessen zentrale Aufgaben in der Koordination der Produktion und in der Sicherstellung der Versorgung im Netzwerk liegen. (Schuh, Stich und Helmig, 2009), (Herlyn, 2012, S. 21f), (Schuh, Schürmeyer und Hering, 2012), (Kurbel, 2016, S. 403ff)

### **3 Management von Kapazitätsengpässen im Produktionsnetzwerk**

Für die vorliegende Arbeit steht der Presswerksverbund der Automobilindustrie im Fokus der Untersuchungen. Mit den Grundlagen aus dem vorhergehenden Kapitel ist es möglich, das Problem einer kurzfristigen Neuplanung oder Anpassung von Produktionsprogrammen im Störfallszenario unter Berücksichtigung der Verbundkapazitäten innerhalb der systemischen Organisationsstruktur zu verorten und den aktuellen Stand der Forschung und Technik zu eruieren. Dabei schafft die Beschreibung der Bauteileherstellung im Presswerksverbund mit ihrer Einbettung in die Wertschöpfungskette des Gesamtunternehmens sowie die Charakterisierung des zugrunde liegenden Produktionssystems die Basis für die folgenden Betrachtungen, welche sich den aktuellen Ansätzen und Verfahren zur Bewältigung der Problemstellung widmen.

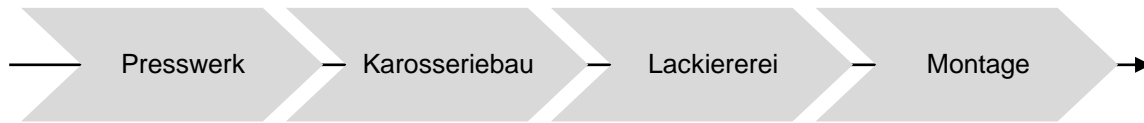
#### **3.1 Bauteileherstellung im Presswerk**

Kernkompetenz der Automobilindustrie ist die Herstellung der Fahrzeugkarosserie. Vornehmlich in den unternehmensinternen Presswerksverbänden erfolgt die industrielle Fertigung komplexer Blechbauteile, welche nachfolgend im Karosserierohbau zu Komponenten gefügt werden. Anschließend erfolgt in den unternehmenseigenen Lackierereien die Farbgebung der Zusammenbauten, welche schließlich in der Montage zur Gesamtkarosserie vereint werden. Die Presswerksverbände bestehen dabei aus organisatorisch dezentralen und regional verteilten, jedoch hochgradig interdependenten einzelnen Presswerken. Eine solche Verbundstruktur wird aufgrund der netzwerkartigen Ausprägung auch als Produktionsnetzwerk bezeichnet (H.-P. Wiendahl und Lutz, 2002).

Wie aus Abbildung 3.1 hervorgeht, kommt dem Presswerksverbund als Primärakteur in der internen Versorgungskette im Wertschöpfungsprozess der Fahrzeugherstellung eine herausragende Rolle zu. Dabei liegt die Kernaufgabe darin, die Versorgung der Folgestufe in der Wertschöpfungskette mit den benötigten Bauteilen sicherzustellen. Damit steht die Bauteileherstellung im Presswerk in direktem Zusammenhang zu den Bedarfen des Karosserierohbaus, welche wiederum in letzter Konsequenz der Lieferkettenstruktur direkt an die Fahrzeugbestellungen und -käufe durch Kunden auf Vertriebssebene gekoppelt sind. (Mennerich, 2005, S. 19)

Die Fertigung von Bauteilen im Karosseriepresswerk erfolgt dabei im Kern grundsätzlich nach folgendem Prinzip: Das Ausgangsmaterial wird als Coil vom Blechlieferanten angeliefert. Dieser Blechwerkstoff wird direkt in angelieferter Form oder gegebenenfalls als vorab beschnittene Formplatte durch verschiedene Werkzeugsätze auf den verfügbaren Pressenanlagen weiterverarbeitet (Dreher, 2014, S. 6f). Die Pressenanlagen übertragen dabei Kräfte und Bewegungen auf

die darin im Einsatz befindlichen Werkzeugsätze, wodurch die nötigen Fertigungsoperationen am Werkstück realisiert werden (Sencar, 2001, S. 6), (Kreth et al., 2012).



*Abbildung 3.1: Wertschöpfungskette in der automobilen Karosseriefertigung: das Presswerk produziert Karosseriebauteile, welche im Rohbau zu Komponenten gefügt und, nach einer anschließenden Oberflächenveredelung, in den Endmontagelinien zur Gesamtkarosserie vereinigt werden*

DIN 8580 (2003, S. 6f) nimmt eine Unterteilung der Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen vor, welche Warnecke (1995b, S. 1ff) gemäß der Begriffsdefinitionen aus VDI 2815 Blatt 1 (1978, S. 3) weiter der Teilefertigung oder der Montage zuordnet. Für die vorliegende Arbeit ist ausschließlich die Teilefertigung von Belang. Dabei unterscheidet man wiederum zwischen den Hauptaufgaben und den Nebenaufgaben der Fertigung (Mennerich, 2005, S. 13ff). Im Karosseriepresswerk besteht die Hauptaufgabe darin, Bauteile durch Umformen (DIN 8582, 2003, S. 3ff) herzustellen. Im Rahmen des Fertigungsprozesses kommt dabei nicht ausschließlich Umformen zum Einsatz, vielmehr müssen Verfahren aus anderen Hauptgruppen einbezogen werden. Im Wesentlichen kommt bei der Teileherstellung im Presswerk das Umformen zum Einsatz in Kombination mit Scherschneidprozessen aus der Gruppe Zerteilen (DIN 8588, 2013, S. 5) und seltener Verfahren aus der Hauptgruppe Fügen (DIN 8593-0, 2003, S. 3ff), wie z. B. das Fügen durch Umformen (DIN 8593-5, 2003, S. 3ff) oder An- und Einpressprozesse (DIN 8593-3, 2003, S. 3ff).

Die zur Bauteileherstellung eingesetzten Werkzeugsätze bestehen dabei aus unterschiedlichen Stufenwerkzeugen, welche die nötigen Arbeitsfolgen in vorgegebener Reihenfolge ausgehend vom Rohmaterial umsetzen (Mennerich, 2005, S. 19). Ganz wesentlich ist hierbei das teilespezifische Konzept zur Herstellung des Pressteils. Für jedes Bauteil ist dabei aus vorgelagerten Planungsstadien ein bestimmtes Fertigungskonzept vorgesehen. Dieses beschreibt, welche Teile mit welchem Werkzeugsatz auf welche Art in den vorgesehenen Arbeitsfolgen gefertigt werden. (Mennerich, 2005, S. 29).

Nach Mennerich (2005, S. 29) spielt im Rahmen des Fertigungskonzepts insbesondere der Fertigungsfaktor eines Werkzeugsatzes eine wichtige Rolle. Dieser gibt die Bauteilemenge an, welche mit dem entsprechenden Werkzeugsatz simultan gefertigt wird. Grundlegend kann hierbei zwischen einer Einzelteilefertigung und einer Mehrfachteilefertigung unterschieden werden. In

Abbildung 3.2 sind die elementaren Möglichkeiten der Pressteilefertigung anhand von Beispielen erläutert, wobei selbstverständlich Kombinationen der unterschiedlichen Fälle möglich sind.

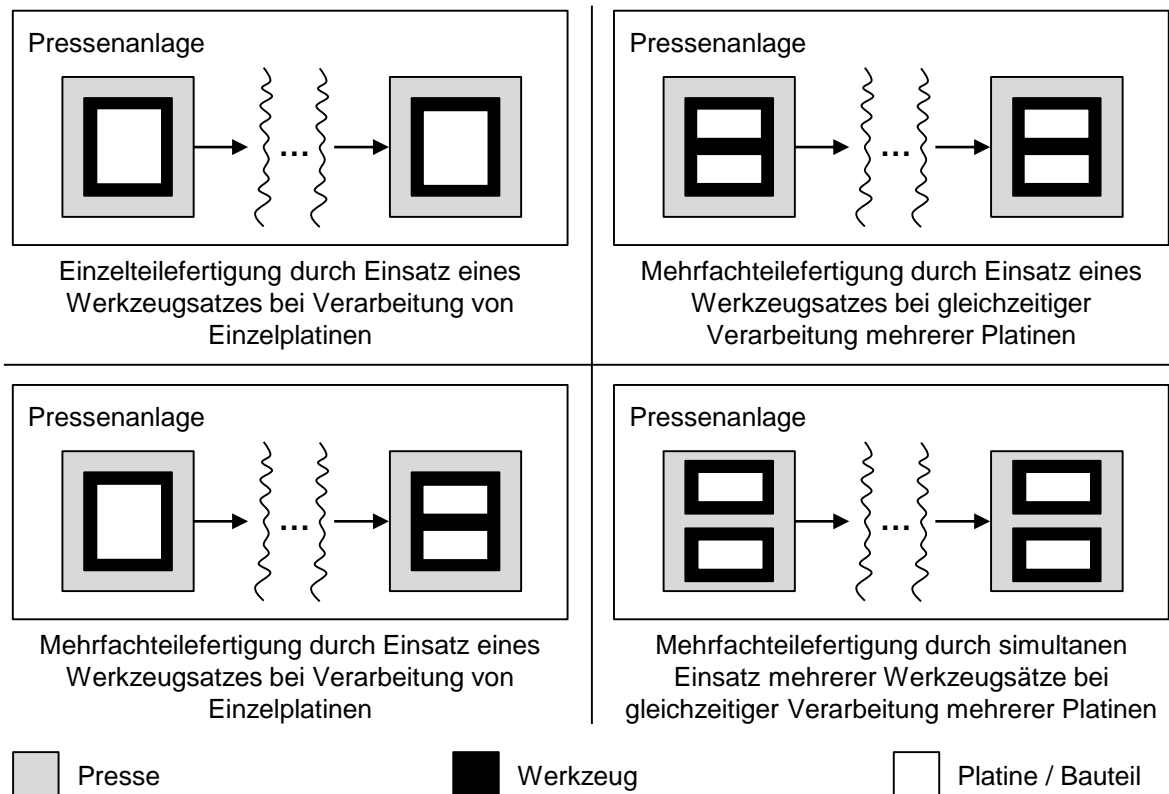


Abbildung 3.2: *Fertigungsfaktor: die exakte Ausgestaltung des Fertigungskonzepts bestimmt die Anzahl simultan produzierter Pressteile, wobei hinsichtlich der Bauteileherstellung zwischen den elementaren Typen einer Einzelteile- oder Mehrfachteilefertigung unterschieden wird*

Eine weitere Komplexität bringt an dieser Stelle die sogenannte Variantenfertigung mit sich, welche die Option beschreibt mit einem Werkzeugsatz verschiedene Ausprägungen von Bauteilen herzustellen. Wie in Abbildung 3.3 angedeutet, wird dies durch die Modifikation bzw. den Austausch gewisser Werkzeugstufen realisiert, sodass spezifische Bauteilelemente oder Geometriemerkmale in unterschiedlichen Variationen abgebildet werden können.

Die Pressenanlagen, welche bei der Bauteileherstellung in den Karosseriepresswerken zum Einsatz kommen, können gemäß der Anlagenstruktur grundsätzlich entweder als Pressenstraße oder als Transferpresse ausgeführt sein. Bei einer Pressenstraße handelt es sich um eine Verkettung von Einzelanlagen, auf welche die verschiedenen Stufenwerkzeuge verteilt werden. Im Gegensatz dazu erlaubt ein Transferpressensystem den gleichzeitigen Betrieb aller nötigen Arbeitsfolgen in einer Anlage. (Sencar, 2001, S. 7f), (Mennerich, 2005, S. 20ff), (Doege und Behrens, 2010, S. 840) Der Einsatz der unterschiedlichen Produktionsanlagen für die Bauteile-

fertigung folgt dabei planerisch strategischen Gesichtspunkten, welche sich im Wesentlichen an dem zu produzierenden Teilespektrum manifestieren lassen (Eversheim, 1999), (Dreher, 2014, S. 7). Andererseits erlauben die unterschiedlichen Pressenanlagen aufgrund ihrer Konzeption nur die Herstellung bestimmter Teilespektren, z. B. schränkt die Anzahl der Arbeitsfolgen eines Werkzeugsatzes den Einsatz auf einer Pressenstraße ein. So kann auf einer Pressenlinie mit vier Einzelpressen kein Bauteil gefertigt werden, dessen Werkzeugsatz fünf Werkzeugstufen vorsieht. Ebenso muss beachtet werden, ob mit der entsprechenden Anlage die nötigen Prozesskräfte für die Gesamtheit der vorgesehenen Operationen aufgebracht werden können.

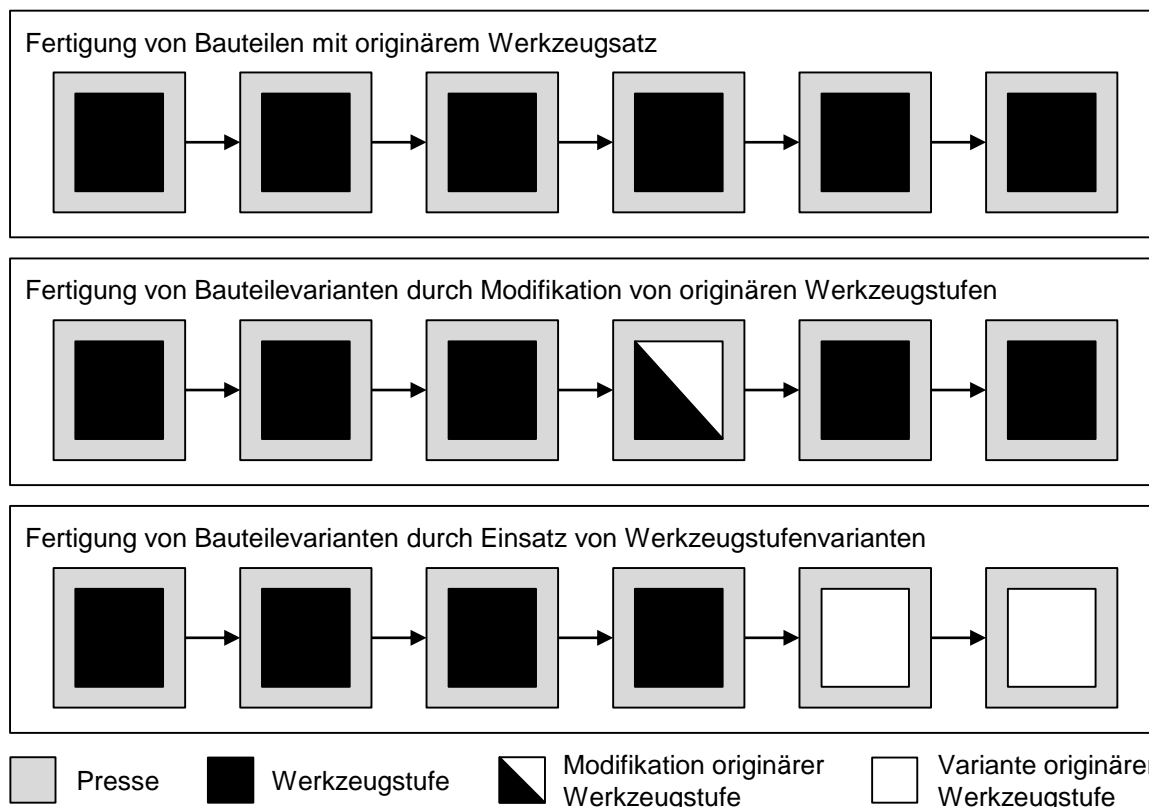


Abbildung 3.3: *Variantenfertigung: durch die Modifikation oder den Austausch einzelner Werkzeugstufen können spezifische Bauteilelemente oder Geometriemerkmale in unterschiedlichen Variationen umgesetzt werden, womit eine Fertigung von Bauteilen in verschiedenen Ausprägungen möglich ist*

Zusätzlich zu den Pressensystemen sowie den Werkzeugsätzen kommen weitere Anlagentechnik und Produktionsmittel in der Prozessperipherie zum Einsatz, um die Nebenaufgaben der Teilefertigung zu erfüllen (Mennerich, 2005, S. 14f). Erfolgt die Werkstoffzufuhr für den Fertigungsprozess bspw. direkt vom Coil, so ist oftmals eine entsprechende Coil- oder Bandanlage, bestehend aus einer Haspel zum Abspulen des Coils und einer Richtmaschine, den Pressenanlagen vorgeschaltet. Wird die Pressenanlage hingegen mit Formplatinen bestückt, so müssen

diese vorab durch dafür vorgesehene Platinenschneidanlagen bereitgestellt und den Produktionsanlagen bspw. durch einen Platinenlader vereinzelt zugeführt werden. Zudem muss die Teilehandhabung während des gesamten Fertigungsprozesses gewährleistet werden bis hin zur Einsortierung der Bauteile in dafür vorgesehene Behälter. Außerdem sind für das Umrüsten der Werkzeugsätze bei Bauteilewechsel auf den Pressenanlagen entsprechende Wechseinrichtungen notwendig. In der Regel werden Werkzeugwechsel in den Presswerken mittels Schiebetischen oder Werkzeugwechselwagen durchgeführt. (Sencar, 2001, S. 9ff), (Mennerich, 2005, S. 24ff) Die Bauteileherstellung im Presswerk ist demnach im Grundsatz ähnlich zur schematischen Darstellung in Abbildung 3.4 organisiert.

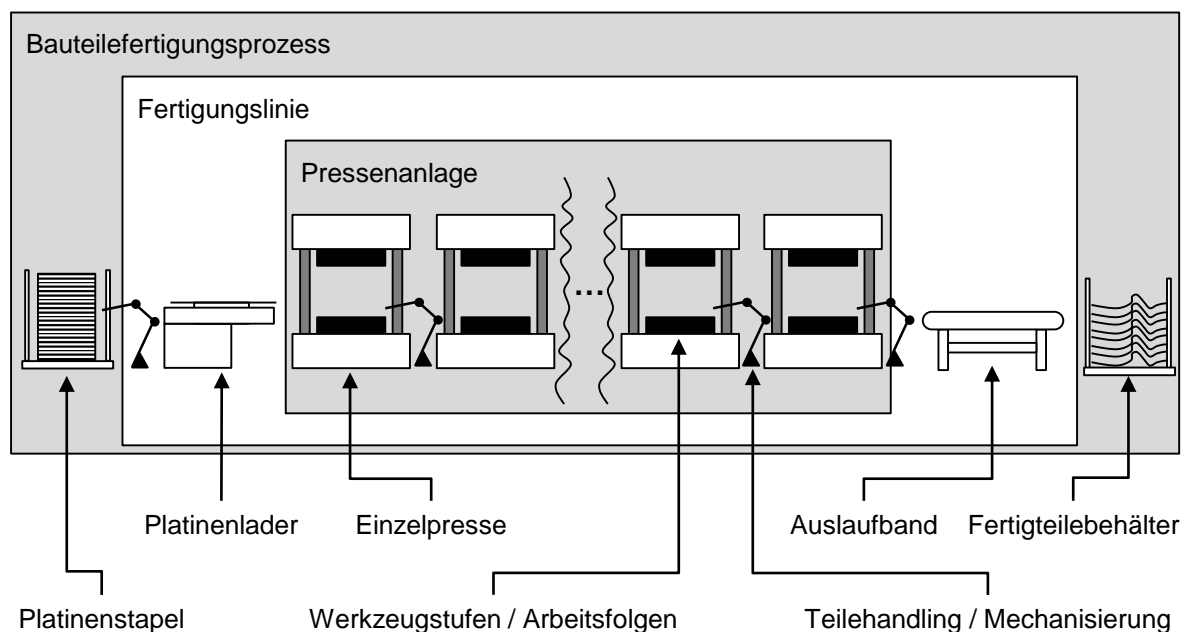


Abbildung 3.4: *Schema Bauteilefertigungsprozess: die bereitgestellten Formplatinen werden vom Stapel über einen Platinenlader der Pressenanlage vereinzelt zugeführt, wo sie die vorgesehenen Arbeitsfolgen auf den verschiedenen Werkzeugstufen durchlaufen; das Teilehandling erfolgt hierbei durch entsprechende Mechanisierungseinrichtungen, welche die Pressteile im Anschluss auf ein Auslaufband ablegen, von dem aus diese schließlich direkt in die Fertigteilbehälter einsortiert werden*

Transfersimulatoren und Tryout-Center, die ermöglichen, neue Werkzeugsätze mit zugehörigen Mechanisierungen bei laufender Produktion für den Einsatz im Serienbetrieb vorzubereiten oder gegebenenfalls Nachbesserungen an Serienwerkzeugen vorzunehmen, ergänzen das Bild (Sencar, 2001, S. 14), (Dreher, 2014, S. 7). Schließlich müssen räumliche Kapazitäten für Fertigteil- und Werkzeuglager mit entsprechenden Stellflächen vorgesehen werden, sodass sich insgesamt der Aufbau eines Presswerks ähnlich Abbildung 3.5 darstellen lässt. (Schuler, 1998, S. 389ff)



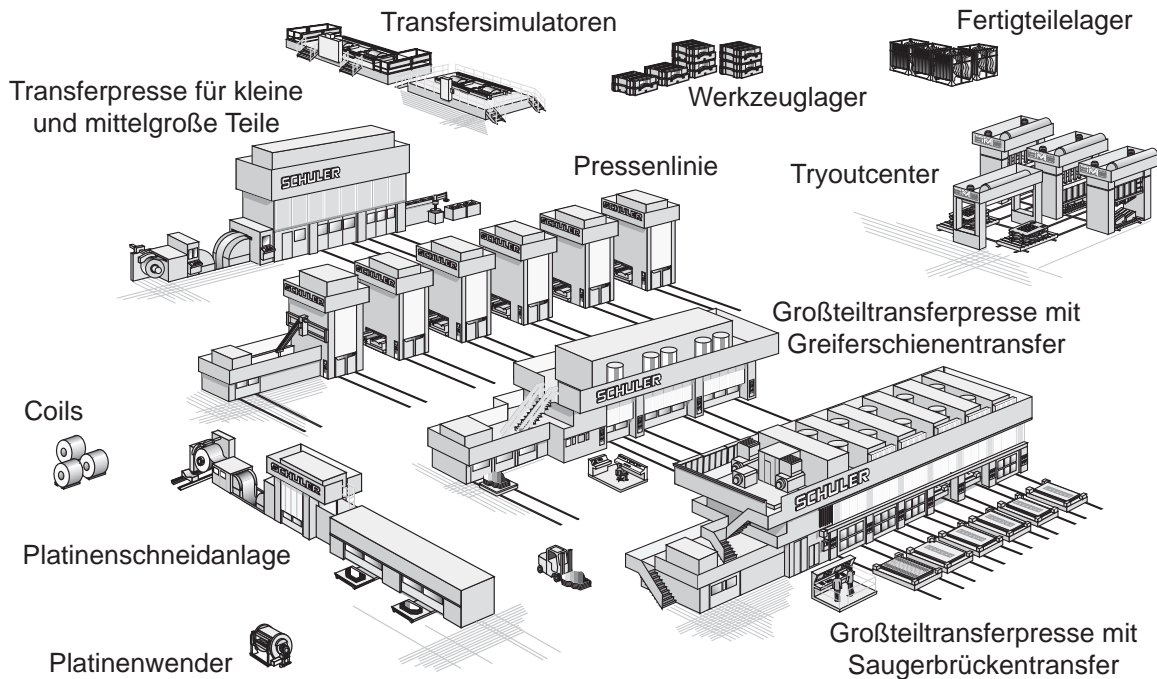


Abbildung 3.5: Aufbau eines Presswerks nach Schuler (1998, S. 389): neben den für die Bauteileherstellung notwendigen Fertigungslinien, ist das Erscheinungsbild eines Presswerks geprägt durch Platinenschneidanlagen zur Herstellung der Formplatinen sowie Tryoutcenter und Transfersimulatoren zur Vorbereitung von Werkzeugsätzen für den Serienbetrieb; außerdem müssen Flächen für Fertigteile- und Werkzeuglager aber auch für die Lagerung des Rohmaterials bereitgestellt werden

### 3.2 Formalisierung und Konkretisierung der Problemstellung

Die Produktionsaktivitäten im Presswerksverbund der Automobilindustrie und das Risikomanagement bei Störungen im Anlagenpark bilden den Schwerpunkt der weiteren Betrachtungen. Systemisch kann hierbei der Presswerksverbund als Produktionssystem verstanden werden. Dieses System ist für die Versorgung der Folgestufe im automobilen Wertschöpfungsprozess zuständig. Damit müssen die Presswerke die Versorgung des unternehmenseigenen Karosserierohbaus im Rahmen der Lieferkettenbeziehung sicherstellen, um ein Abreißen in den Produktionshauptlinien zu vermeiden. Zur Erfüllung dieser Aufgabe wird auf den Fertigungslinien – Pressenstraßen oder Transferpressenlinien mit der zugehörigen Peripherie und den nötigen Produktionsfaktoren – die Bauteileherstellung realisiert. Diese Fertigungslinien sind dabei für die weiteren Betrachtungen als die elementaren Arbeitssysteme aufzufassen.

Bei der Produktion im Presswerk handelt es sich um die Herstellung materieller Stückgüter in Serienproduktion. Der Fertigungsprozess ist dabei nach dem Prinzip einer künstlichen Fließfer-

tigung organisiert. Die Produktionsanlagen sind entsprechend der Arbeitsvorgangsreihenfolge angeordnet und zeitlich aufeinander abgestimmt. Der Materialfluss ist bei dieser Taktfertigung starr, sodass sich die Pressteileherstellung als quasi-kontinuierliche Produktion darstellt. (Kistner und Steven, 2001, S. 18ff)

Zusammen mit den Erläuterungen zur Bauteileherstellung im Presswerk können somit einige weitere Spezifikationen dieser Produktionsart festgehalten werden: Die Fertigung erfolgt auf Pressenanlagen mit gleichen oder unterschiedlichen Eigenschaften, wobei jedoch die Fertigungsoperationen als pressenunabhängig angenommen werden können. Die Anlagen sind nicht produktgebunden, im Gegensatz zu den Werkzeugen, welche speziell für die vorbestimmten Bauteilegeometrien ausgelegt sind. Die Pressenanlagen können in Abhängigkeit des betriebenen Werkzeugsatzes unterschiedliche Fertigungsoperationen durchführen. Zudem können in Abhängigkeit der technischen Anforderungen manche Werkzeuge nur auf bestimmten Anlagen betrieben werden, ebenso wie manche Werkzeugsätze einer Einschränkung auf bestimmte Fertigungslinien unterliegen. Der Herstellprozess geht vollständig auf einer Fertigungslinie vonstatten. Dabei durchlaufen alle Teile auf den Pressenanlagen die gleiche Richtung während des Fertigungsprozesses. Nicht benötigte Pressenstufen werden als Leerfolgen übersprungen. Des Weiteren findet der Teiletransport zwischen den einzelnen Pressen einer Fertigungslinie vollautomatisiert statt und die Taktzeit der Gesamtlinie wird von der langwierigsten Arbeitsfolge vorgegeben. Aufgrund der fehlenden Zwischenlagerung der Teile liegt organisatorisch und technisch bedingt eine starre Verkettung der Anlagen einer Fertigungslinie vor. Eine solche Bauteileherstellung, bei der alle notwendigen Arbeitsfolgen auf einer Fertigungslinie erfolgen, wird als einstufige Fertigung bezeichnet. Damit kann im weiteren Verlauf die formale Annahme getroffen werden, dass die Produktion eines Pressteils im Presswerk jeweils mit einem dafür vorgesehenen Werkzeug auf einer beliebigen, verfügbaren Maschine stattfindet, sofern dies technologisch zulässig und machbar ist. In diesem Rahmen beschreibt ein Werkzeug den vollständigen Werkzeugsatz samt Mechanisierung und eine Maschine bezeichnet eine komplette Fertigungslinie des Presswerks. (Mennerich, 2005, S. 16)

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich konkret mit dem Problem reduzierter Produktionskapazitäten im automobilen Presswerksverbund aufgrund von Störungen der Arbeitssysteme und wie diese unter gewissen Gesichtspunkten optimal überbrückt werden können. Der Begriff Störung taucht dabei an vielen Stellen in der Literatur auf. DIN EN 13306 (2018, S. 33) beschreibt Störungen als die auftretende Unfähigkeit einer Betrachtungseinheit zur Funktionserfüllung. Patig und Thorhauer (2002) fassen Störungen als unvorhergesehen und unbeabsichtigt auftretende Ereignisse auf, deren Auswirkungen Abweichungen der Istwerte von den Planwerten nach sich

ziehen, sofern keine weiteren Maßnahmen eingeleitet werden. Das gemeinsame Merkmal dieser unterschiedlichen Definitionen ist eine dynamische Größe mit zeitlicher Dimension, sodass sich Störungen stets auf die Aufgabendurchführung, den Fertigungsablauf oder betriebliche Prozesse beziehen (Wildemann, 1995, S. 19). Dabei können Betriebsstörungen klassisch nach exogenen und endogenen Ursachen differenziert werden, je nachdem, ob externe Einflüsse oder aber betriebsinterne Zustände oder Ereignisse die Störung verursachen (Kollerer, 1978, S. 34ff). Patig und Thorhauer (2002) unterscheiden an dieser Stelle zwischen auftretenden Potenzialfaktor- und Repetierfaktorstörungen. Dabei bezeichnen Potenzialfaktoren u. a. die ausführende menschliche Arbeitskraft und betriebliche Gebrauchsgegenstände, wohingegen in den Repetier- bzw. Verbrauchsfaktoren im Allgemeinen Rohstoffe bzw. Hilfsstoffe zusammengefasst sind (Busse von Colbe und Laßmann, 1991, S. 76ff). Wird zudem die zeitliche Komponente einer Störung hinzugezogen, so erlaubt diese eine Klassifizierung kurzfristiger, mittelfristiger und langfristiger unerwünschter Unterbrechung oder Beeinträchtigung der Funktion einer Einheit. Neben den zusätzlichen Kosten mit denen Betriebsstörungen oftmals verbunden sind, bergen diese nicht selten ein unkalkulierbares Risiko für den Produktionsbetrieb. Je nach Art, Umfang und Ausdehnung der Störung kann diese erhebliche Folgen nach sich ziehen, wie bspw. eine Unterbrechung der Lieferkette im Versorgungsnetzwerk einhergehend mit Produktionsausfällen bis hin zu den damit verbundenen Lieferschwierigkeiten im Vertrieb. Kollerer (1978, S. 44ff) spricht in diesem Kontext allgemein von Betriebsunterbrechungen durch Störungen.

Der Umgang mit Störungen ist Aufgabe des Störungsmanagements. Dabei liegen die zwei grundlegenden Herausforderungen in der präventiven Abwehr und der reaktiven Bewältigung von Störungen. Erstere soll das Auftreten von Störungen verhindern, wohingegen Letztere eine Bewältigung nicht verhinderter Störungen mit minimalen Auswirkungen zum Ziel hat. (Wildemann, 1995, S. 41ff), (Patig und Thorhauer, 2002) Die Bewältigung der Störung bzw. die Überbrückung des Kapazitätsengpasses bei Arbeitssystemen in der Produktion des Presswerksverbunds muss unter den strategisch vorgegebenen Bedingungen und taktischen Gegebenheiten erfolgen. Das Störungsmanagement muss im Rahmen der Unternehmens- und Verbundstruktur mit den zur Produktion vorgesehenen und aktuell vorhandenen Produktionsfaktoren und -ressourcen auskommen. Lang- und mittelfristige Präventionsmaßnahmen sowie deren Berücksichtigung auf strategischer oder taktischer Planungsebene sind sinnvoll im Rahmen einer Störungsabwehr. Im Einzelfall einer Störung im laufenden Produktionsprozess müssen diese Ansätze zwingend durch kurzfristig wirksame, reaktive Maßnahmen ergänzt werden (Schönsleben und Scherer, 2009).

Unter betriebsorganisatorischen Gesichtspunkten lässt sich das Management von auftretenden Störungen bei Arbeitssystemen damit im operativen Bereich verorten, womit auch die Stell-

hebel zum Risikomanagement im Presswerksverbund der Automobilindustrie bei derartigen Kapazitätsausfällen auf der Ebene des operativen Produktionsmanagements anzusiedeln sind. Bedient man sich des Rahmens der PPS mit ihren Kernaufgaben der Planung, Durchführung und Kontrolle von Produktionsprozessen, so kann der Umgang mit Störungen dem Bereich der Produktionskontrolle bzw. -überwachung zugeordnet werden. Im erweiterten Sinne ist das Störungsmanagement in diesem Zusammenhang als Teil des Regelkreises der Produktionssteuerung anzusehen und muss dem Zielsystem und Spannungsfeld der Logistikleistung genügen.

Die Überbrückung des Kapazitätsengpasses muss somit bestmöglich mit den zur Verfügung stehenden Mitteln erfolgen. Eine kurzfristige Maßnahme zur Bewältigung des Störszenarios muss somit im Kern eine Anpassung der Ressourceneinsatz- sowie der Reihenfolgeplanung vorsehen. Zentrale Aufgabe ist die Erstellung eines Maschinenbelegungsplans zur Feinplanung der Produktion für die temporär verfügbaren Arbeitssysteme. Aufgrund der erheblichen Interdependenzen im Produktionsnetzwerk und unter dem Aspekt verteilter Standorte ist hierbei eine logistikintegrierte Lösung zwingend notwendig. Das oberste Ziel ist dabei die Bedarfsdeckung entsprechend der Aufträge des internen Kunden bei möglichst geringen Aufwendungen hinsichtlich logistischer Operationen für anfallende Werkzeugverlagerungen und der Bauteilelogistik zwischen den unterschiedlichen Werken.

### **3.3 Logistikintegrierte Maschinenbelegungsplanung**

Kapazitätsengpässe in der Produktion z. B. durch Anlagenausfälle machen eine Neuplanung oder Anpassung in der Produktionsfeinplanung nötig. Eingeplante Aufträge müssen entsprechend auf derzeit vorhandene, funktionstüchtige Maschinen verteilt und eingesteuert werden. Dies ist jedoch im Allgemeinen nicht ohne Weiteres möglich, da in der Regel die Produktionskapazitäten durch das laufende Produktionsprogramm ausgelastet sind. Die Maschinenbelegungsplanung ist damit im Störfall die Stellschraube, um dem Problem beizukommen, da genau im Rahmen der Feinplanung detailliert festgelegt wird, auf welchen Maschinen und zu welcher Zeit die einzelnen Aufträge durchgeführt werden (Kiener et al., 2006, S. 247), (Fandel, Fistek und Stütz, 2011, S. 721), (Corsten und Gössinger, 2012, S. 537), (Günther und Tempelmeier, 2012, S. 230). Die Aufträge sind im Fall des Presswerksverbunds direkt mit den Werkzeugen zur Bauteilfertigung gekoppelt, sodass ganz konkret zu bestimmen ist, welche Werkzeuge zu welchen Zeiten auf den Maschinen produktiv eingesetzt werden müssen, um die vorhandenen Bedarfe zu decken.

Aufgabenstellungen der Reihenfolgeplanung können dabei unter prozessspezifischen Gesichtspunkten abgegrenzt und damit das vorliegende Problem eingegrenzt werden, um die Entwicklung angepasster Modelle und Lösungsansätze zu ermöglichen. Hierfür ist die  $\alpha|\beta|\gamma$ -Notation zur

Klassifizierung gebräuchlich, die u. a. Pinedo (2016, S. 13ff) beschreibt und Domschke, Scholl und Voß (1997, S. 283ff) verwenden.  $\alpha$  als Maschinencharakteristik beschreibt dabei das betrachtete Produktionsanlagensystem.  $\beta$  fasst die Prozess- und Auftragscharakteristika zusammen und  $\gamma$  gibt Auskunft über die Zielsetzung der Maschinenbelegungsplanung.

Für eine Kategorisierung der Maschinenart und -anordnung können zu Beginn die auszuführenden Aufträge mit ihrer benötigten Anzahl an Arbeitsgängen pro Auftrag herangezogen werden. Wie bereits erwähnt, kann die Produktion im Presswerk als eine einstufige Fertigung aufgefasst werden, wodurch die Arbeitsgangzahl determiniert ist. In diesem Fall können Probleme anhand der verfügbaren Maschinenart unterschieden werden. Dieser Konvention folgend ist im Presswerk eine Reihenfolgeplanung in einer heterogenen, parallelen Maschinenumgebung durchzuführen, da Taktzeiten bei der Fertigung von Maschine zu Maschine als auch von Auftrag zu Auftrag variieren können (Domschke, Scholl und Voß, 1997, S. 284ff), (Neumann und Morlock, 2002, S. 487f), (Brucker, 2007, S. 5f).

Die Produktion selbst richtet sich zwar prinzipiell nach den Bedarfsmengen, jedoch ist primär lediglich eine Fertigung zur Auftragsdeckung bei vorgegebenen Fertigstellungsterminen notwendig, welche mit Beständen des Fertigteilelagers soweit nötig ergänzt werden kann. Somit steht nicht das strikte Abarbeiten der vorliegenden, beliebigen Auftragsmenge in exakt den angeforderten Mengenpaketen im Vordergrund, vielmehr muss eine positive Bauteilebilanz im Fertigteilebestand unter Berücksichtigung der Abrufe durch den Karosseriebau gewährleistet werden, womit eine Reihenfolgeplanung dieser Art indirekt die Losgrößenplanung integriert. Damit ist offensichtlich, dass die Produktion bestimmter Pressteile unterbrochen werden darf, um bspw. die Fertigung anderer Pressteile voranzutreiben. Des Weiteren müssen Unterbrechungen des Herstellprozesses im Sinne von Schichtmodellen oder Nicht-Verfügbarkeiten von Anlagen z. B. für Instandhaltungs- oder Wartungsmaßnahmen zulässig sein. Eine Zusammenfassung von Aufträgen zu Produktfamilien ist möglich, sofern es sich um Bedarfe gleicher Bauteile handelt. Für die jeweilige Herstellung von Bauteilen mit den entsprechenden Werkzeugen sind selbstverständlich Rüstzeiten an den Maschinen zu berücksichtigen, welche jedoch als rein maschinenabhängig angenommen werden können und produktfamilienspezifisch sind. Reihenfolgebeziehungen zwischen den Aufträgen sowie Auftragsfreigabe- und Nachlaufzeiten existieren nicht. Schließlich bestehen Maschineneignungsbedingungen, da durchaus eine Fertigung bestimmter Bauteile auf manchen Maschinen ausgeschlossen sein kann. (Domschke, Scholl und Voß, 1997, S. 287ff), (Brucker, 2007, S. 1ff), (Pinedo, 2016, S. 13ff)

Die Zielsetzung der vorliegenden Problemstellung ist eine Leistungserstellung mit bestmöglicher Deckung der eingehenden bzw. der bestehenden Bedarfe und damit einer Minimierung der

Fehlteilmenge, um damit die Versorgung der nächsten Stufe innerhalb der Wertschöpfungskette der automobilen Fertigung aufrechtzuerhalten.

In der Literatur existiert eine nahezu unüberschaubare Menge an Arbeiten, die sich explizit mit dem Problem der Reihenfolgeplanung beschäftigen. Bereits sehr früh eröffneten Ansätze der dynamischen Programmierung (Bellmann, 1957, S. 81ff) Zugang zur Lösung derartiger Probleme, wie dies bspw. Held und Karp (1962) in ihrer Arbeit demonstrieren. Damit ließen sich bestimmte Probleme für kleine Instanzen exakt lösen und die Verfahren boten geeignete Methoden zur Behandlung größerer Instanzen. Nichtsdestotrotz erwiesen sich zahlreiche, wenn nicht sogar die meisten Probleme aus den Anwendungen selbst mit computergestützten Mitteln als schwer bis kaum lösbar.

Mit Einführung der Komplexitätstheorie rückte gezielt die Klassifizierung von Problemklassen in den Fokus und ist Bestandteil wissenschaftlicher Untersuchungen, die bis in die heutige Zeit reichen (Lenstra, Rinooy Kan und Brucker, 1977), (Graham et al., 1979), (Blazewicz, Lenstra und Rinooy Kan, 1983), (Lawler et al., 1993), (B. Chen, Potts und Woeginger, 1998), (Liu und Zheng, 2013). Eine Unterscheidung von mit vertretbarem Aufwand lösbaren und schwer bis kaum lösbaren Problemen ermöglicht die Entwicklung angepasster Lösungsstrategien.

In der vorliegenden Arbeit wird das Problem für den Fall einer Umgebung paralleler, heterogener Maschinen betrachtet. Für praktische Probleme moderaten Umfangs werden in der Literatur oftmals Optimallösungsalgorithmen wie z. B. der Ansatz von Liaw et al. (2003) entwickelt, welche im Wesentlichen auf enumerativen Ansätzen basieren. Bei der Betrachtung großer und beliebiger Instanzen ist aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Probleme häufig eine exakte Lösung nicht mit akzeptablem Rechenaufwand zu erzielen, sodass in der Regel auf sämtlichen Anwendungsgebieten bestenfalls auf Approximationsalgorithmen wie nach Bougeret et al. (2011) ausgewichen werden muss. Approximationen können zwar keine Optimallösung garantieren, sie stellen aber zumindest eine bestimmte Lösungsqualität und eventuelle Laufzeitbeschränkungen zur Lösungsbestimmung sicher (Sahni, 1977), (Lenstra und Shmoys, 1995), (Williamson und Shmoys, 2011, S. 3ff). Mehrheitlich aber kommen heuristische wissens- und erfahrungsbasierte Ansätze und Metaheuristiken zum Einsatz (Zanakis und Evans, 1981), (Colomi et al., 1996), (Zäpfel und Braune, 2005, S. 21ff), wie bspw. die Implementierungen von Kim, Na und F. Chen (2003), J.-F. Chen (2005), Vallada und Ruiz (2011), Monemi et al. (2015), Afzalirad und Rezaeian (2016) und Geiger und Reinhart (2016). Der erhebliche Nachteil derartiger Verfahren sind die üblicherweise fehlenden Aussagen zu Lösungsqualität und eventuell sogar zu Laufzeiten (Wotzlaw, 2006, S. 5), sodass nicht selten die Methodiken exakter und heuristischer Verfahren kombiniert werden.

In einem dynamischen Umfeld wie es in der Produktion vorzufinden ist, müssen darüber hinaus unvorhersehbare Änderungen und stochastische Einflüsse innerhalb des betrachteten Systems bedacht werden (Cowling und Johansson, 2002). Eine strukturierte Zusammenfassung zu bestehenden Ansätzen hierzu geben Vieira, Herrmann und E. Lin (2003) in ihrem Beitrag und auch Sauer (2010) greift das Thema im Rahmen der Betrachtung von Versorgungsketten auf. Speziell die Reihenfolgeplanung unter dem Aspekt von Nicht-Verfügbarkeiten liegt bspw. im Fokus der Arbeiten von Albers und G. Schmidt (2001), Fu, Huo und Zhao (2011) oder Hashemian, Diallo und Vizvári (2014). Dabei können Nicht-Verfügbarkeiten u. a. durch Maschinenausfälle auftreten. Eine reaktive Planung muss in der Praxis zeiteffizient erfolgen und u. U. bestehende Planvorgaben berücksichtigen. Zur Lösungsfindung kommen daher auch an dieser Stelle hauptsächlich heuristische Methoden zum Einsatz (Vieira, Herrmann und E. Lin, 2003), (Sawik, 2007).

Insbesondere die zwingend notwendige integrierte Losgrößenbetrachtung zur Gewährleistung einer ganzheitlichen Betrachtung und maximaler Elastizität für eine erfolgreiche Überbrückung eines auftretenden Kapazitätsengpasses im Presswerksverbund zeigt die Nähe des Problems zum Bereich der Lagerhaltung und Losgrößenplanung. Deren Fragestellungen können an dieser Stelle ebenfalls gemäß einer Vielzahl von Kriterien klassifiziert werden. Dabei weist insbesondere das diskrete Losgrößen- und Reihenfolgeproblem (Brüggemann, 1995, S. 201ff), (Domschke, Scholl und Voß, 1997, S. 133ff) als Formulierungsoption für die kurzfristige Feinplanung eine starke Ähnlichkeit zur Problemstellung der vorliegenden Arbeit auf.

Es handelt sich hierbei um eine Modellierungsmöglichkeit für einstufige Mehrproduktprobleme unter dynamischen Bedarfsmengen mit beschränkten Produktionskapazitäten. Der betrachtete endliche Planungshorizont ist in gleichlangen Zeitperioden diskretisiert und die vorhandenen Kapazitäten sind zeitinvariant. Pro Zeitintervall kann maximal die Fertigung einer Produktart auf einer Maschine erfolgen, wobei sich das entsprechende Los jeweils über den gesamten Zeitslot erstreckt aber auch mehrere Zeitperioden vollständig umfassen kann und Rüstaufwendungen lediglich zu Beginn einer zusammenhängenden Produktionsperiode anfallen. Die diskrete Losgröße ist hierbei gegeben durch die Anzahl der aufgewendeten Zeiteinheiten zur Fertigung des entsprechenden Produkts unter Berücksichtigung der endlichen Produktionsgeschwindigkeit abzüglich angefallener unproduktiver Beiträge durch Rüstvorgänge. Damit erfolgt durch die Festlegung einer Reihenfolge für die Fertigung zugleich eine Maschinenbelegungsplanung. Die Zielsetzung ist die Bestimmung von über den Planungshorizont veränderlichen Losgrößen minimaler Gesamtkosten im betrachteten Zeitraum.

Fehlmengen sind jedoch bei dieser Art von Modellen in der Regel nicht erlaubt. Für das Szenario der Anlagenstörung im Presswerk sind Fehlmengen jedoch zwingend zu berücksichtigen, da

im Allgemeinen je nach Ausmaß des Kapazitätsengpasses eine Nicht-Erfüllung von Aufträgen in Erwägung gezogen werden muss. Nach Domschke, Scholl und Voß (1997, S. 73) kann aber die formulierte Zielsetzung einer Minimierung der Fehlteilmenge als Maximierung der Lieferbereitschaft aufgefasst werden.

Auch zur simultanen Behandlung von Losgrößen- und Reihenfolgeplanung existiert bereits eine Vielzahl an Publikationen. Fokussierte und umfassende Übersichten geben u. a. Drexl und Kimms (1997) und Copil et al. (2017). Das zum ersten Mal von Lasdon und Terjung (1971) vorgestellte diskrete Losgrößen- und Reihenfolgeproblem ist ebenfalls Fokus intensiver Untersuchungen. Das Problem wird in den verschiedensten Varianten betrachtet und unterschiedlichste Lösungsansätze werden dafür entwickelt, wie z. B. in den Arbeiten von Fleischmann (1990), Fleischmann (1994), Jordan und Drexl (1998), Brüggemann und Jahnke (2000) oder Gicquel, Minoux und Dallery (2009). Eine Übersicht findet sich u. a. bei Potts und van Wassenhove (1992) und aktueller bei Gicquel (2008, S. 18ff).

Allerdings bleibt bei all den bisher erwähnten Ansätzen die Verbundkomponente unberücksichtigt. Logistische Aspekte der Versorgungskette im Produktionsnetzwerk müssen bei der Maschinenbelegungs- und Losgrößenplanung im Presswerksverbund jedoch zwingend einfließen. Dies betrifft die Bauteildistribution zwischen den verteilten Standorten, da die Presswerke in der Regel als exklusive Lieferanten spezifischer Bauteile im Netzwerk auftreten. Zusätzlich muss eine Verlagerung von Werkzeugen im Netzwerk möglich sein, um die vorhandenen Verbundkapazitäten bei Engpässen bestmöglich zur Bedarfsdeckung auslasten zu können.

Eine Integration oder zumindest eine enge Verzahnung von Produktions- und Distributionsplanung bietet signifikantes Einsparpotenzial oder erhöht den Servicegrad für Kunden, sodass derartige integrative Ansätze vermehrt auf Interesse stoßen (Viergutz, 2011, S. 6ff), (Ehm und Freitag, 2016). Für die Versorgungskette in der Automobilindustrie müssen zusätzlich Aspekte einer verteilten Produktion im Netzwerk unter den Gesichtspunkten einer logistikintegrierten Produktionsfeinplanung kombiniert werden.

Welche Bedeutung der Lösung dieses Problems beigemessen wird, zeigen die zahlreichen Publikationen, welche diese Fragestellung im Rahmen verschiedenster Beispiele aus dem industriellen Umfeld adressieren (Equi et al., 1997), (Timpe und Kallrath, 2000), (Guinet, 2001), (de Matta und Miller, 2004), (Park, 2005), (Sambasivan und Yahya, 2005), (Armstrong, Gao und Lei, 2008), (Nascimento, Resende und Toledo, 2010), (Aissani et al., 2012), (Terrazas-Moreno und Grossmann, 2011), (H'Mida und Lopez, 2013), (Steinrücke, 2015), (Darvish, Larrain und Coelho, 2016). Eine umfassende Übersicht und Klassifizierung zu den Arbeiten auf diesem Gebiet findet sich bei Behnamian und Fatemi Ghomi (2016). Üblicherweise werden solch integrierte Ansätze



aus dem Blickwinkel der strategischen und taktischen Ebene heraus betrachtet und behandeln nur selten die Herausforderungen der kurzfristigen operativen Feinplanung (Sawik, 2009). In Anbetracht der erheblichen Komplexität der Fragestellungen werden daher oftmals hierarchische Lösungsansätze zur Koordination der Ablaufplanung in verteilten Anwendungsszenarien vorgeschlagen (Sauer, 2002, S. 81ff), (Sauer, 2006).

Gleiches gilt für die PPS in der Automobilindustrie. Auch hier wird nach hierarchischem Prinzip zwar auf strategischer und vermehrt auch auf taktischer Ebene global gedacht, die operative kurzfristige Feinplanung erfolgt jedoch autonom in den einzelnen Presswerken. Für das Szenario eines auftretenden Kapazitätsengpasses wie bspw. durch Anlagenstörungen muss aber zur Risikovermeidung zwingend eine integrierte Struktur geschaffen werden, um die Effizienzgrenzen der heterarchischen Organisation zumindest kurzfristig zu Gunsten des unternehmerischen Gesamtwohls aufzubrechen. Hierfür muss kurzfristig im Sinne einer monolithischen Betrachtung eine Totalplanung für den Presswerksverbund ermöglicht werden. Eine solche Option ist nach derzeitigem Stand im automobilen Presswerksverbund nicht gegeben und damit in der Betriebspraxis nicht verfügbar.

## 4 Exkurs: Mathematische Optimierung

Ein kurzer Exkurs zur mathematischen Optimierung soll einen Einblick in die für die vorliegende Arbeit relevanten Themenfelder ermöglichen und damit zum besseren Verständnis beitragen.<sup>2</sup>

### 4.1 Optimierungsprobleme und Linearität

Optimierung beschäftigt sich mit der Minimierung oder Maximierung einer Zielfunktion, welche durch Parameter beschrieben ist. Im Falle einer Minimierung spricht man von einem Minimierungsproblem, für den Fall einer Maximierung von einem Maximierungsproblem. Optimierungsprobleme bzw. ihre Modellformulierungen werden auch als Programme bezeichnet. Es ist somit eine Entscheidung zur Belegung der Parameter zu treffen, durch welche sich für das beschriebene Ziel unter den gegebenen Umständen ein optimaler Zustand herbeiführen lässt. Die Parameter werden daher auch als Entscheidungsvariablen bezeichnet. (Gritzmann, 2013, S. 1f)

Neben vielen weiteren Kriterien kann grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen skalaren und vektoriellen Optimierungsproblemen anhand der Beschaffenheit des Zielfunktionalen vorgenommen werden. Ist die Zielfunktion vektorwertig, so spricht man von Vektoroptimierungsproblemen oder multikriterieller Optimierung. (Göpfert und Nehse, 1990, S. 15ff), (Collette und Siarry, 2004, S. 15ff) Analog sind skalare Programme dadurch charakterisiert, dass die Zielsetzung, welche verfolgt wird, durch eine skalarwertige Zielfunktion beschrieben ist. Vektorielle Probleme werden häufig bspw. durch die Priorisierung eines Zieles oder durch eine Skalarisierung des Zielvektors mit entsprechender Gewichtung der Zielkomponenten behandelt (Collette und Siarry, 2004, S. 45ff), (Ehrgott, 2005, S. 67ff), sodass im Weiteren eine Zuwendung zu skalaren Programmen erfolgt.

Eine weitere Differenzierung von Optimierungsproblemen kann zwischen unrestringierten und restringierten Programmen erfolgen. Im Gegensatz zur unrestringierten Optimierung, müssen bei den restringierten Varianten die Entscheidungsvariablen zusätzlichen Rand- bzw. Nebenbedingungen genügen. Diese Restriktionen können dabei in Form von Gleichungen oder Ungleichungen gegeben sein. Auch können bestimmte weitere Anforderungen vorliegen, die eine Einschränkung der Variablen auf explizite Mengen vorgeben. Die Nebenbedingungen grenzen damit den zulässigen Lösungsraum bzw. den zulässigen Bereich des Programms ein. Ein Optimierungsproblem

---

<sup>2</sup>Für eine umfassende Einführung in die Grundlagen und die Methoden der Optimierung wird auf Standardliteratur verwiesen (Burkard und Zimmermann, 2012), (Jungnickel, 2015). Für einen umfassenden Überblick in den für diese Arbeit relevanten Bereich der diskreten und kombinatorischen Optimierung empfiehlt sich bspw. Korte und Vygen (2012) oder auch das Werk von Schrijver (2003). Für einen ganzheitlichen Zugang seien klassischerweise zusätzlich Schrijver (1998) und Nemhauser und Wolsey (1999) empfohlen.

heißt in diesem Zusammenhang zulässig, wenn der beschriebene Lösungsraum nicht-leer ist. (Gritzmann, 2013, S. 2)

Sind die Zielfunktion bzw. Nebenbedingungen nicht-linear oder gilt Nicht-Linearität sogar für das gesamte System, so gestaltet sich die Lösungsfindung im Allgemeinen schwierig und es lassen sich i. d. R. lediglich lokale Optima bestimmen. Liegt im Gegensatz dazu ein lineares Zielfunktional vor und lassen sich die Nebenbedingungen durch ein System linearer Gleichungen und Ungleichungen darstellen, spricht man von linearer Optimierung. In diesem Spezialfall ist der Lösungsraum eines zulässigen Problems konvex und jedes lokale Optimum ist zugleich globales Optimum. Für die lineare Optimierung existieren effiziente Verfahren, z. B. Innere-Punkte-Verfahren nach Karmarkar (1984) oder die Ellipsoid-Methode nach Khachiyan (1979), welche auf den Arbeiten von Nemirovsky und Yudin (1979) und davor Shor (1970) basiert. In der Anwendung wird jedoch zumeist der von Dantzig (1963) erstmalig eingeführte Simplex-Algorithmus eingesetzt. Trotz seiner theoretisch exponentiellen Laufzeit (Klee und Minty, 1972) stellt sich das Simplex-Verfahren in der Praxis als überaus effektiver Lösungsalgorithmus heraus. Damit bietet sich in der Praxis eine lineare Modellformulierung bzw. eine Überführung bestehender Modelle in lineare Programme an.

## 4.2 Zur Komplexität ganzzahliger Programme

Aus den Anwendungen heraus ergeben sich oftmals Optimierungsprogramme mit Ganzzahligkeitsanforderungen an die Entscheidungsvariablen. Müssen derartige Restriktionen erfüllt werden, so erschwert dies entgegen der intuitiven Anschauung die Lösungsfindung der entsprechenden Programme im Allgemeinen erheblich. Der zulässige Bereich erfährt zwar eine deutliche Einschränkung, aufgrund dessen eine einfachere Lösungssuche vermutet werden könnte. Nicht zu vernachlässigen ist aber die Charakteristik des Lösungsraums, welcher sich nun diskret darstellt. Liegen bei zulässigen linearen Programmen mit kontinuierlichen Entscheidungsvariablen die Optima auf dem Rand des konvexen Lösungsraums und können effizient bestimmt werden, so geht diese Eigenschaft mit der Diskretisierung des zulässigen Bereichs verloren und Optima können im Allgemeinen nur mit erheblichem Rechenaufwand bestimmt werden.

Diese Schwierigkeit der Lösungsfindung und der damit einhergehende erhöhte Aufwand hinsichtlich Rechenzeit und Speicherbedarf wird mit der Komplexität eines ganzzahligen Problems begründet. Die Literatur unterscheidet hierzu verschiedene Komplexitätsklassen, die eine Klassifizierung von Optimierungsproblemen entsprechend ihrer Komplexität ermöglichen. Vereinfacht ausgedrückt ist damit eine Kategorisierung nach Schwierigkeitsgraden gegeben. Dabei wird die Komplexität eines Optimierungsproblems anhand seiner zugehörigen Entscheidungsversion

bestimmt. Nach Garey und D. Johnson (1979, S. 18ff) oder auch Papadimitriou und Steiglitz (1982, S. 342ff) können Entscheidungs- und Optimierungsversion eines Problems in Beziehung gestellt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Zielfunktion effizient auswertbar ist, sind Entscheidungsprobleme nicht schwieriger als ihre Optimierungsvarianten, wenn Laufzeitaspekte betrachtet werden. Hierbei bedeutet effizient, dass eine Lösung oder Auswertung in polynomieller Laufzeit entsprechend der zugrunde liegenden Instanz berechnet werden kann, die Rechenzeit eines Algorithmus also durch ein Polynom in der Eingabegröße beschränkt ist. Im Allgemeinen ist in der Praxis die Laufzeit der ausschlaggebende und beschränkende Faktor bei der numerischen Lösung von Problemen. Dies bedeutet konkret, dass Optimierungsprobleme demnach mindestens so schwer zu lösen sind wie ihre Entscheidungsprobleme.

Im Allgemeinen gehört die Entscheidungsversion eines ganzzahligen Programms selbst für den linearen Fall zur Klasse der  $\text{NP}$ -schweren Probleme. Dies wiederum bedeutet, dass, unabhängig von der konkreten Modellformulierung, kein effizienter Algorithmus zur Lösung existiert, sofern  $\mathbb{P} \neq \text{NP}$  gilt.  $\mathbb{P}$  beschreibt dabei die Klasse aller in Polynomialzeit auf einer deterministischen Turing-Maschine (Turing, 1936), (Hopcroft und Ullmann, 1969, S. 80ff) lösbaren Probleme und  $\text{NP}$  die Klasse aller Probleme, welche durch einen in seiner Laufzeit durch ein Polynom der Eingabe beschränkten Algorithmus auf einer nicht-deterministischen Turingmaschine (Hopcroft, Motwani und Ullmann, 2007, S. 431) gelöst werden können.<sup>3</sup> Im Wesentlichen kann somit festgehalten werden, dass für Problemstellungen mit Ganzzahligkeitsanforderungen nach derzeitigem Stand der Forschung im Allgemeinen keine effizienten Lösungsalgorithmen existieren. Trotzdem können häufig durch eine Analyse der zugrunde liegenden Problemstrukturen verbesserte Modellformulierungen abgeleitet und mittels angepasster Berechnungsverfahren Lösungen von ausreichender Güte in akzeptablen Laufzeiten bestimmt werden.

---

<sup>3</sup>Auf eine detaillierte Darstellung und ausführliche Behandlung der verschiedenen Komplexitätsklassen wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Standardwerke aus den entsprechenden wissenschaftlichen Bereichen verwiesen. Vorrangig aus dem Blickwinkel der theoretischen Informatik führen dabei bspw. Hopcroft, Motwani und Ullmann (2007, S. 425ff) oder Bovet und Crescenzi (1994, S. 33ff) durch die Thematik, wohingegen Garey und D. Johnson (1979, S. 18ff) und z. B. Papadimitriou und Steiglitz (1982, S. 342ff) die Fragestellungen stärker mit Fokus auf der mathematischen Optimierung beleuchten und D. Johnson und Papadimitriou (1985) den Bereich speziell im Rahmen der Betrachtungen zum weithin bekannten Problem des Handlungsreisenden aufgreifen. Pionierarbeit hat hierbei Cook (1971) geleistet, der den Begriff der  $\text{NP}$ -Vollständigkeit für das Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik einführte und damit den Grundstein für diese Problemklasse legte. Zur Popularität verhalf diesem Ansatz u. a. Karp (1972), der die Eigenschaft der  $\text{NP}$ -Vollständigkeit für viele weitere Probleme nachweisen konnte. Seither ist Vollständigkeit zum allgemeinen Konzept bei der Betrachtung beliebiger Probleme und Komplexitätsklassen avanciert. Für einen Einstieg und eine umfassende Einführung in die Komplexitätstheorie werden die Werke von Wegener (2005) und Sipser (2013) empfohlen.

Eine komplexitätstheoretische Untersuchung der betrachteten Problemstellung gewährleistet unter den genannten Aspekten eine frühzeitige Abschätzung oder Einordnung zur Problemkomplexität. Sie kann für die konkrete Formulierung des Optimierungsmodells hilfreich sein bzw. etwaige Schwächen in ebendieser Modellformulierung aufdecken helfen. Eine Komplexitätsanalyse sollte daher sinnvollerweise vor einer numerischen Behandlung der Problemstellung zwingend durchgeführt werden, da oftmals damit auch Hinweise zu verwandten Fragestellungen oder effektiven Lösungsverfahren einhergehen.

### 4.3 Numerische Lösung von linearen ganzzahligen Problemen

Zur exakten Lösung allgemeiner linearer Programme mit Ganzzahligkeitsanforderungen existieren nach heutigem Stand der Forschung keine effizienten Algorithmen. Einen klassischen Ansatz zur Lösungsbestimmung bieten daher Exhaustions- bzw. Brute-Force-Methoden, welche im Wesentlichen auf einer vollständigen Enumeration des Lösungsraums beruhen.

Eine Verbesserung bietet das sogenannte Branch-And-Bound-Verfahren nach Land und Doig (1960). Dabei wird der Lösungsraum sukzessive aufgespalten (Branch) und es entsteht eine Art Baumstruktur. Suboptimale Zweige werden mittels geeigneter Schranken erkannt und nicht weiter verfolgt (Bound) (Dakin, 1965), (Achterberg, T. Koch und Martin, 2005). Beim Branch-and-Bound-Ansatz müssen jedoch gleichzeitig mehrere Programme im Speicher verwaltet werden, was wiederum einen hohen Berechnungs- und Speicheraufwand nach sich zieht.

Eine Alternative zur Lösung ganzzahliger Programme eröffnen Schnittebenenverfahren, welche bereits durch Gomory (1958) u. a. auf Basis der Arbeiten von Dantzig, Fulkerson und S. Johnson (1954) sowie Markowitz und Manne (1957) eingeführt und stetig weiterentwickelt wurden (Marchand et al., 2002). Beim ursprünglichen Ansatz wird die LP-Relaxation des ganzzahligen Problems betrachtet; hierbei werden die Ganzzahligkeitsrestriktionen vernachlässigt. Aus dessen Lösung können sukzessive Ungleichungen abgeleitet werden, welche eine Einschränkung des zulässigen Bereichs erlauben. Dieses Vorgehen wird solange iteriert, bis eine ganzzahlige Lösung vorliegt, welche in diesem Fall auch optimal ist, oder keine Ungleichungen mehr konstruiert werden können. Einer der großen Nachteile der Schnittebenenverfahren liegt jedoch u. a. in der numerischen Instabilität, welche sich durch die mangelnde Genauigkeit der Zahlendarstellung im Computer ergibt und die Lösungssuche erschwert.

Der Branch-And-Bound-Ansatz kommt häufig in Kombination mit Schnittebenenverfahren zur Anwendung, um Synergien aus den Vorteilen der beiden Techniken zu heben. Mittels Schnittebenenverfahren lassen sich häufig verbesserte duale Schranken berechnen, sodass im Branch-And-Bound-Prozess bereits frühzeitig suboptimale Zweige erkannt und abgeschnitten

werden können. Diese kombinierte Lösungsmethodik wird als Branch-And-Cut bezeichnet und ist das gängigste Verfahren zur Lösung diskreter Optimierungsprobleme. (Ceria et al., 1998) Grötschel und Holland (1991) sowie Padberg und Rinaldi (1991) geben einen gelungenen Überblick zu dieser Lösungsmethode, mit der sie erfolgreich selbst große Instanzen eines komplexen kombinatorischen Problems lösen konnten.

In der Praxis wird der klassische Branch-And-Cut-Ansatz zusätzlich durch weitere Verfahren unterstützt. Eröffnungsheuristiken sollen bspw. möglichst gute Startlösungen liefern, wohingegen lokale Suchverfahren eine Verbesserung vorhandener zulässiger Lösungen vornehmen (Domschke und Scholl, 2006). Ebenso werden heuristische Ansätze verwendet, um während des Rechenlaufs kontinuierlich neue Schranken verbesserter Güte zu bestimmen oder bei der Ableitung scharfer Ungleichungen zur weiteren Eingrenzung des zulässigen Bereichs zu unterstützen. In den verfügbaren Solvern sind bereits eine Vielzahl an derartigen Routinen implementiert und somit standardmäßig verfügbar.

Erhebliche Verbesserungen in den Laufzeiten und bei der Lösungsfindung im Allgemeinen lassen sich jedoch insbesondere durch eine eingehende Untersuchung der zugrunde liegenden Problemstruktur erzielen. Eine Schärfung der Modellformulierung und die Entwicklung auf die spezifische Problemstellung zugeschnittener Algorithmen sind die Basis effektiver Lösungsansätze.



## 5 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus der Darstellung des aktuellen Stands der Forschung und Technik in den vorangegangenen Kapiteln wird ersichtlich, dass es eines ganzheitlichen, methodischen Ansatzes für eine logistikintegrierte operative Produktionssteuerung unter Berücksichtigung von Netzwerkkapazitäten in den Presswerksverbänden der Automobilindustrie zur risikoarmen Überbrückung von Störungen im Anlagenpark ermangelt. Um die in einem solchen Fall planerisch hochkomplexen Herausforderungen zu bewältigen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der möglicherweise erheblichen Risiken, welche sich bei einer eventuell notwendigen, kurzfristigen Umstrukturierung der laufenden Produktionsprogramme ergeben, wird ein modellbasiertes, rechnergestütztes Planungsinstrument benötigt. Das System muss die kurzfristige Maschinenbelegungs- und Losgrößenplanung im Presswerksverbund inklusive der nötigen physischen Distributionsprozesse abbilden und bei der frühzeitigen Alternativengenerierung sowie einer entsprechenden Risikoabschätzung unterstützen.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, wird zu Beginn die zugrunde liegende Problemstellung abstrakt erfasst. Hierzu wird eine Beschreibung der Produktionsaktivitäten im Presswerksverbund in der Automobilindustrie mit den angegliederten Prozessen des Realbetriebs vorgenommen und die Zielsetzung, welche im Störfallszenario verfolgt wird, mit den entsprechenden Restriktionen in einem initialen Metamodell formalisiert. Dies erlaubt in einem nächsten Schritt eine Komplexitätstheoretische Einordnung des Problems, gefolgt von einer konkreten Modellierung. Dabei wird das Problem als ein kostenbasiertes, ganzzahliges Minimierungsprogramm formuliert. In der Modellierungsphase werden benötigte Daten und Kennzahlen aus der Produktion sowie Parameter erläutert und im Modell verortet. Nötige Annahmen und sinnvolle Vereinfachungen sowie flexible Zielgrößen werden dabei an gegebener Stelle motiviert.

Die anschließenden Untersuchungen zur numerischen Lösung des Optimierungsprogramms sollen einen Einsatz im Realbetrieb hinsichtlich Laufzeiten und Ressourcenbedarf absichern. Dazu werden sinnvolle Relaxierungen im Modell vorgenommen und die dem Problem zugrunde liegende Struktur gezielt zu einer Modifizierung der Formulierung genutzt. Diese Methoden und die dadurch erzielte Reduzierung von Laufzeiten finden in einem sukzessiven, heuristischen Lösungsansatz Verwendung, welcher die Lösung realbetrieblicher Instanzen gewährleistet. Mit der anschließenden Vorstellung einer alternativen Modellformulierung und der Herleitung einer erweiterten Variante des Programms werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie das Potenzial des Ansatzes für konkrete Anwendungsfälle weiter ausgeschöpft werden kann, um bspw. Handlungsalternativen für die Planung umfassender abzubilden.



Im Anschluss steht die Umsetzung des entwickelten Planungsinstruments im realbetrieblichen Umfeld im Mittelpunkt. Dazu wird in einem ersten Schritt die Einbettung in ein umfassendes Konzept zum Störfallmanagement in der Produktion schematisch aufgezeigt, wobei gleichwohl die Rahmenbedingungen sowie die Grenzen beim Einsatz in der Realität angesprochen werden. Die Entwicklungen und Ergebnisse werden schließlich zusammengefasst, sodass die Vorgehensweise zum Erreichen der eingangs erwähnten Zielsetzung insgesamt dem Arbeitsplan aus Abbildung 5.1 folgt.

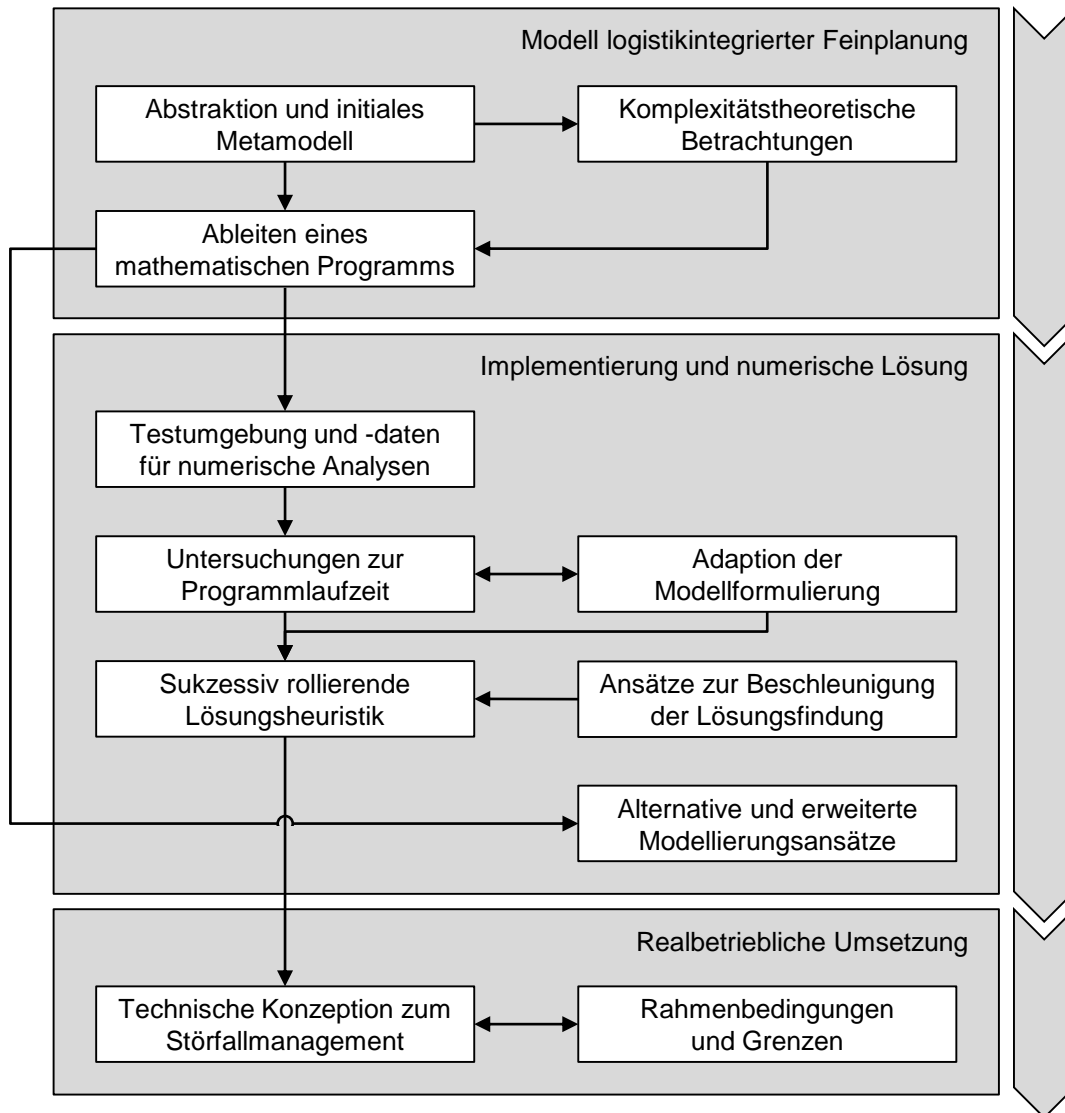


Abbildung 5.1: Arbeitsplan: Vorgehensweise zur Realisierung eines Planungsinstruments für eine kurzfristige Neuplanung bzw. Anpassung der Produktionsfeinplanung im Presswerksverbund der Automobilindustrie bei Kapazitätsengpässen

## 6 Modell für die logistikintegrierte Feinplanung im Presswerksverbund

Das folgende Kapitel nimmt sich der kurzfristigen Umplanung in der Produktionssteuerung im Störfallszenario an. Um die komplexe Aufgabenstellung greifbar zu machen, wird zu Beginn eine formale Problembeschreibung vorgenommen, welcher sich eine Komplexitätstheoretische Betrachtung und Einordnung anschließt. Schließlich wird eine mathematische Formulierung des Problems in Form eines gemischt-ganzzahligen Optimierungsprogramms hergeleitet, welches als Grundlage für die weiteren Betrachtungen in den anschließenden Kapiteln dient.

### 6.1 Abstraktion der Aufgabenstellung

Ein Presswerk besteht aus verschiedenen Fertigungslinien, auf welchen durch den Einsatz entsprechender Werkzeugsätze die Bauteilerstellung realisiert wird. Diese Werkzeugsätze sind ausschließlich für die Fertigung der vorgegebenen Bauteilgeometrien in Einzel- oder Mehrfachteilfertigung vorgesehen. Zusammen mit den Ausführungen aus den Abschnitten 3.2 und 3.3 ist es somit möglich, einen Werkzeugsatz mit seinen verschiedenen Stufen durch ein entsprechendes formales Werkzeug  $w \in W$  mit identischer Teileausbringung zu beschreiben, wobei  $W$  die Menge aller zur Verfügung stehenden Werkzeuge symbolisiert.

Des Weiteren kann eine Fertigungslinie einschließlich ihrer Peripherie als eine einzelne Maschine  $m \in M$  aufgefasst werden, auf welcher verschiedene Werkzeuge  $w \in W$  zur Fertigung von unterschiedlichen Bauteilen  $p \in P$  betrieben werden können. Dabei repräsentiert  $M$  die Menge der vorhandenen Fertigungsanlagen und  $P$  die Menge der zu produzierenden Pressteile. Hierbei werden Produktionskennzahlen der physischen Fertigungslinien und Werkzeugsätze sowie ihrer produktiven Kombination auf die formalen Maschinen und Werkzeuge vererbt, wie z. B. Leistungs-, Verfügbarkeits- und Qualitätsfaktoren.

An dieser Stelle muss jedoch eine weitere Differenzierung hinsichtlich der formalen Werkzeuge vorgenommen werden. Die Variantenfertigung von Pressteilen basiert üblicherweise auf der Modifikation einzelner Stufen des entsprechenden Werkzeugsatzes. Ein physischer Werkzeugsatz, welcher für die Fertigung von Teilevarianten verwendet wird, kann durch die Einführung eines formalen Werkzeugs  $\tilde{w}$  für jede einzelne Werkzeugsatzvariante modelliert werden. Selbstverständlich weisen diese Modellwerkzeuge eine starke Abhängigkeit aufgrund ihrer identischen physischen Basis auf. So versteht es sich von selbst, dass stets lediglich eine dieser Werkzeugvarianten im Einsatz auf einer Maschine sein kann. Zudem müssen die formalen Werkzeuge zur Abbildung des physischen Variantenwerkzeugsatzes stets am selben Standort sein und können nicht räumlich getrennt werden. Diese Beziehungen sind zusammengefasst

in der Menge  $W_w$ , welche für jedes einzelne Werkzeug  $w \in W$  den Satz abhängiger formaler Werkzeuge  $\tilde{w} \in W \setminus \{w\}$  beschreibt.

Die Variantenfertigung in Kombination mit einer Mehrfachteilefertigung kann außerdem dazu führen, dass bestimmte Bauteile durch mehrere formale Werkzeuge hergestellt werden können. Diese Zusammenhänge sind in der Menge  $W_p$  hinterlegt, welche diejenigen formalen Werkzeuge  $w \in W$  enthält, die zur Herstellung des Bauteils  $p \in P$  herangezogen werden können.

Bezeichne zusätzlich die Menge  $S$  in einer Mehrstandortproduktionsstruktur die verschiedenen Werke, so ist ein Presswerksverbund mit seinen vollständigen Produktionsressourcen durch die Gesamtheit der verfügbaren Maschinen  $M$  sowie der vorhandenen Werkzeuge  $W$  im Netzwerk gegeben, ergänzt um die Informationen zu Werkzeug-Werkzeug-Beziehungen  $W_w$  und Werkzeug-Presteil-Zusammenhängen  $W_p$ .

Mit dieser formalen Beschreibung können im Folgenden die Produktionsaktivitäten und ihre Restriktionen im Detail beschrieben werden. Hierbei ist die Kernaufgabe des Presswerksverbunds festzuhalten, die in der Presteileherstellung zur Bedarfsdeckung des Karosserierohbaus liegt. Dazu werden Werkzeuge auf Maschinen betrieben, um die angeforderten Bauteile in den benötigten Mengen unter Berücksichtigung der Fertigteilelagerbestände zur Verfügung zu stellen. Der Produktionsprozess selbst unterliegt dabei Bedingungen und Einschränkungen hinsichtlich der Verwendung von Ressourcen, welche zwingend berücksichtigt werden müssen. Schließlich geht in diesem Rahmen die Beschreibung des operativen Produktionssystems einher mit der Erzeugung von Maschinenbelegungsplänen unter vorgegebenen Nebenbedingungen an Ressourcen und Kapazitäten. Gesucht ist somit eine Zuweisung von Werkzeugen für den Betrieb auf den vorhandenen Maschinen zur Bauteileherstellung an den verschiedenen Standorten. Diesbezüglich müssen zum einen klassische Zuweisungsrestriktionen eingehalten werden:

- (1) Einer Maschine darf zu jedem Zeitpunkt höchstens ein Werkzeug zugewiesen werden.
- (2) Ein Werkzeug darf zu jedem Zeitpunkt höchstens einer Maschine zugewiesen werden.

Weiterhin müssen Bedingungen die fertigungstypischen Aspekte der physischen Vorgänge im Presswerk während der Produktion sicherstellen:

- (3) Rüstzeiten zur Vorbereitung von Werkzeugwechseln müssen sichergestellt werden.
- (4) Werkzeug- bzw. Bauteilewechselzeiten sind abzuschätzen und zu berücksichtigen.
- (5) Durch physische Abhängigkeiten ist der gleichzeitige Betrieb mancher Werkzeuge ausgeschlossen.

Da Netzwerkkapazitäten und -ressourcen berücksichtigt werden sollen, ist zu gewährleisten, dass räumliche Gegebenheiten und logistische Operationen korrekt abgebildet werden. Maschinen können als stationär angenommen werden, Werkzeuge und Bauteile sind jedoch nicht standortgebunden und dürfen im Netzwerk verschoben werden, sodass folgende Bedingungen gelten müssen:

- (6) Werkzeugverlagerungen und Bauteiltransporte müssen physisch konsistent ablaufen und damit verbundene Transportzeiten und Nicht-Verfügbarkeiten von Ressourcen sind zu beachten.
- (7) Physisch abhängige Werkzeuge durchlaufen identische logistische Prozesse.
- (8) Eine Zuweisung eines Werkzeugs zu einer Maschine ist nur zulässig, sofern sich Werkzeug und die verfügbare Maschine am selben Standort befinden.

Die gesuchte Zuweisung zwischen Werkzeugen und Maschinen zur Bauteileherstellung soll dabei die bestmögliche Deckung vorhandener Bedarfe und somit die Minimierung von Fehlteilermengen an den verschiedenen Standorten durch den optimalen Einsatz von Produktionskapazitäten und -ressourcen sicherstellen bei minimalem Aufwand für Werkzeugverlagerungen und Bauteildistribution im Netzwerk. Das Ziel der Produktionsaktivitäten unter den gegebenen Aspekten (1)–(8) lässt sich damit folgendermaßen formulieren:

- (0) Die Bedarfe des internen Kunden sind bestmöglich mit den zur Verfügung stehenden Produktionsmitteln zu erfüllen bei gleichzeitig minimalen Aufwendungen für logistische Operationen.

In Anbetracht der Perlenkettenstruktur in der Karosserieherstellung der Automobilindustrie werden im Folgenden Fehlteilermengen als verlorene Bauteile angenommen und somit als Verlustfall (Neumann, 1996, S. 25), (Domschke, Scholl und Voß, 1997, S. 73). In einer Kombination von Zieldominanz und Zielgewichtung (Domschke, Drexl et al., 2015, S. 62f) werden in der Zielsetzung lediglich die Kosten für verlorene Bauteile sowie Werkzeug- und Bauteilelogistikkosten berücksichtigt. Dabei wird allerdings keine explizite Gewichtung der Anteile vorgenommen, da diese indirekt durch die anfallenden Kosten gegeben ist.

Das soeben formulierte, abstrakte Modell (0)–(8) soll im weiteren Verlauf mit  $\mathfrak{M}$  bezeichnet werden. Es greift die vorliegende Fragestellung, wie Produktionskapazitäten des gesamten Presswerksverbands flexibel und effektiv im Rahmen einer Gesamtunternehmensstrategie für die kurzfristige Produktionssteuerung im Störfall Berücksichtigung finden können, direkt auf

und bietet gleichzeitig im Sinne eines Optimierungsproblems einen konkreten Ansatz. Die Lösung des Programms lässt sich als Entscheidung lesen und liefert als Ergebnis eine optimale, logistikintegrierte Maschinenbelegung zur bestmöglichen Lieferkettenversorgung. Im Störfall ermöglicht  $\mathfrak{M}$  damit die kurzfristige Neuplanung der Fertigung zur risikoarmen Überbrückung von Kapazitätsengpässen im Presswerksverbund.

Unter diesem Gesichtspunkt wird  $\mathfrak{M}$  zunächst im folgenden Abschnitt einer komplexitätstheoretischen Betrachtung unterzogen, um eine Einordnung in entsprechende Problemklassen vornehmen zu können. Hinsichtlich der numerischen Behandlung gibt dies Aufschluss über die erreichbare Lösungseffizienz und ist somit dienlich für eine zielgerichtete und zweckorientierte Algorithmenwahl.

## 6.2 Komplexitätstheoretische Betrachtungen

Das Optimierungsmodell  $\mathfrak{M}$  soll in diesem Abschnitt komplexitätstheoretisch klassifiziert werden. Daher liegt der Schwerpunkt im Beweis der folgenden Behauptung:

**Satz.** *Die Entscheidungsvariante des Optimierungsproblems  $\mathfrak{M}$  ist NP-schwer.*

*Beweis.* Der Beweis erfolgt durch Reduktion eines bekannten NP-schweren Problems auf die Entscheidungsversion von  $\mathfrak{M}$ . Hierzu betrachte man das Problem  $P|pmtn|\sum_j U_j$ . Gemäß der  $\alpha|\beta|\gamma$ -Notation für Maschinenbelegungsprobleme handelt es sich dabei um das Problem der Minimierung der Anzahl verspätet erfüllter Aufträge  $j$  aus einer Gesamtauftragsmenge  $\tilde{J}$ . Die Bearbeitung der Aufträge erfolgt hierbei in einer Umgebung paralleler, identischer Maschinen  $\tilde{M}$ , wobei Auftragsunterbrechung und damit eine partielle Bearbeitung der vorgegebenen Bedarfe zulässig ist. Mit  $\tilde{c}_j$  dem Fertigstellungstermin und  $\tilde{d}_j$  der Frist zur Erfüllung eines Auftrags  $j \in \tilde{J}$  gilt für dessen Beitrag  $U_j$  zur Zielfunktion:

$$U_j = \begin{cases} 1, & \text{für } \tilde{c}_j > \tilde{d}_j \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Formal gesehen liegt die Zielsetzung darin, eine Zuweisung von Maschinen  $m \in \tilde{M}$  aus dem verfügbaren Maschinenpool zu jedem Zeitpunkt über einen gegebenen Zeithorizont auf die zu erfüllenden Aufträge  $j \in \tilde{J}$  zu finden. Dabei ist es durchaus erlaubt, dass Maschinen zu bestimmten Zeitpunkten keinem Job zugewiesen werden; in diesem Fall wird die entsprechende Maschine nicht zur Auftragsbearbeitung verwendet. Die Eingabegrößen des Problems  $P|pmtn|\sum_j U_j$  sind somit die Auftragsmenge  $\tilde{J}$  mit den angeforderten Fertigstellungsterminen  $\tilde{d}_j$  sowie die Maschinen  $\tilde{M}$  mit den zugehörigen Bearbeitungsgeschwindigkeiten  $\tilde{b}_j$ .

In einem nächsten Schritt betrachte man das zu  $P|pmtn|\sum_j U_j$  gehörige Entscheidungsproblem  $\mathcal{D}_{P|pmtn|\sum_j U_j}$ , für welches Lawler (1983) mit einem technischen Beweis zeigen konnte, dass es in der Klasse der NP-schweren Probleme liegt. Gegeben sei eine Instanz des Problems  $P|pmtn|\sum_j U_j$  mit einer Menge  $\hat{M}$  an parallelen, identischen Maschinen und einer Auftragsmenge  $\hat{J}$  mit Fristen zur Erfüllung  $\hat{d}_j$  und Bearbeitungszeiten  $\hat{b}_j$  für jeden Auftrag  $j \in \hat{J}$  sowie der Konstanten  $\hat{B} \in \mathbb{N}$ ,  $\hat{B} \leq |\hat{J}|$ . Das Entscheidungsproblem  $\mathcal{D}_{P|pmtn|\sum_j U_j}$  besteht nun darin, zu entscheiden, ob eine Zuweisung von Aufträgen aus  $\hat{J}$  zu Maschinen in  $\hat{M}$  über einen vorgegebenen Zeithorizont existiert, sodass die Anzahl der nicht fristgerecht erfüllten Aufträge kleiner oder gleich  $\hat{B}$  ist. Dabei sind Auftragsunterbrechungen erlaubt.

Sei zudem die folgende Instanz von  $\mathfrak{M}$  gegeben: Es stehe insgesamt ein Maschinenpool  $M$  mit einer Anzahl von  $|M| = |\hat{M}|$  zur Verfügung. Dabei bestehe der Produktionsverbund  $S$  aus lediglich einem Presswerk  $s$ , welches sämtliche Maschinen beherbergt. Zudem liege eine zu erfüllende Auftragsmenge  $J = \hat{J}$  vor. Jeder Auftrag bestehe dabei aus Bedarfen eines Elements  $p$  aus einem Produktportfolio  $P$ , welches mit genau einem zur Verfügung stehendem Werkzeug  $w_p$  aus einer Gesamtwerkzeugmenge  $W$  hergestellt werden kann. Damit ist  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{|J|}\}$ ,  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{|J|}\}$  und  $W_{p_j} = \{w_j\}$ . Die Bedarfe für den Standort  $s$  entsprechen genau der Auftragsmenge  $J$  mit genau einem Bedarf pro Bauteil. Ferner sei angenommen, dass keine Abhängigkeiten zwischen den formalen Werkzeugen in  $W$  existieren, womit für alle  $w \in W$  gilt  $W_w = \emptyset$ . Des Weiteren sei die ursprünglich heterogene Maschinenumgebung auf einen Anlagenpark identischer, paralleler Maschinen reduziert. Dies bedeutet, dass für die Bearbeitungszeiten der einzelnen Bedarfe ausschließlich Auftragsabhängigkeit, jedoch keine Maschinenabhängigkeit vorliegt und die Bearbeitungszeiten für einen Auftrag  $j \in J$  seien durch  $\hat{b}_j$  gegeben. Die vorliegenden Aufträge belaufen sich jeweils auf einen Bedarf von einem Bauteil pro Auftrag und der Fälligkeitstermin für den Auftrag  $j \in J$  entspreche der Frist  $\hat{d}_j$ . Die Strafkosten im Verlustfall eines Bauteils und damit für die Überschreitung der Lieferfrist für einen bestimmten Auftrag werden für alle Aufträge gleichermaßen mit 1 beziffert. Zu Beginn des zu betrachtenden Zeithorizonts stehen keine Lagerbestände an Fertigteilen zur Verfügung, sodass die Auftragserfüllung einzig aus der Produktion bzw. dem Betrieb von Werkzeugen auf Maschinen erfolgen kann. Rüst- oder allgemeiner Bauteilewechselzeiten werden als vernachlässigbar angesehen und somit nicht berücksichtigt. Zusätzlich sind jegliche logistische Einflüsse aufgrund der Einstandortvoraussetzung als nicht existent anzunehmen. Damit sind in dieser Betrachtung Transportzeiten irrelevant und sämtliche mit der Bauteile- und Werkzeuglogistik verbundenen Kosten verschwinden.

Insgesamt lässt sich damit die Entscheidungsvariante  $\mathcal{D}_{\mathfrak{M}}$  für das Optimierungsproblem  $\mathfrak{M}$  in der geschilderten Instanz formulieren, deren Zielsetzung in der Beantwortung der Frage liegt,

ob eine Lösung existiert mit Kosten von maximal  $B \in \mathbb{N}$ ,  $B \leq |J|$ . Setzt man nun  $B = \hat{B}$ , so lässt sich damit entsprechend der durchgeführten Konstruktion  $\mathcal{D}_{P|pmtn|\sum_j U_j}$  auf  $\mathcal{D}_{\mathfrak{M}}$  reduzieren. Das bedeutet, falls ein Algorithmus existiert, der  $\mathcal{D}_{\mathfrak{M}}$  mit maximalen Kosten von  $B$  löst, so hat dieser zugleich  $\mathcal{D}_{P|pmtn|\sum_j U_j}$  mit maximal  $B$  verspäteten Aufträgen gelöst. Die Zuweisung von Werkzeugen zu Maschinen zur Bearbeitung von Aufträgen in  $\mathcal{D}_{\mathfrak{M}}$  entspricht der direkten Zuweisung von Aufträgen zu Maschinen in  $\mathcal{D}_{P|pmtn|\sum_j U_j}$ . Somit ist die Entscheidungsvariante von  $\mathfrak{M}$  unter komplexitätstheoretischen Gesichtspunkten mindestens genauso schwer zu lösen, wie die Entscheidungsvariante von  $P|pmtn|\sum_j U_j$ . Damit ist der Nachweis erbracht, dass die Entscheidungsversion von  $\mathfrak{M}$  NP-schwer ist.  $\square$

An dieser Stelle kann mit dem erbrachten Beweis der NP-Schwere des Problems  $\mathcal{D}_{\mathfrak{M}}$  insgesamt festgehalten werden, dass unabhängig von der konkreten Modellierung für die Problemstellung  $\mathfrak{M}$ , kein effizienter Algorithmus zu dessen exakter Lösung existiert, sofern  $\mathbb{P} \neq \text{NP}$  gilt.

### 6.3 Mathematisches Optimierungsprogramm

Im Störfallszenario in den Presswerken der Automobilindustrie ist für die Bauteileherstellung eine kurzfristige Um- bzw. effektive Neustrukturierung in der Feinplanung in Betracht zu ziehen, um eine risikoarme Überbrückung des Kapazitätsengpasses sicherzustellen. Als reaktive Maßnahme zur Störungsbewältigung bietet sich eine logistikintegrierte Reihenfolge- und Losgrößenplanung an.

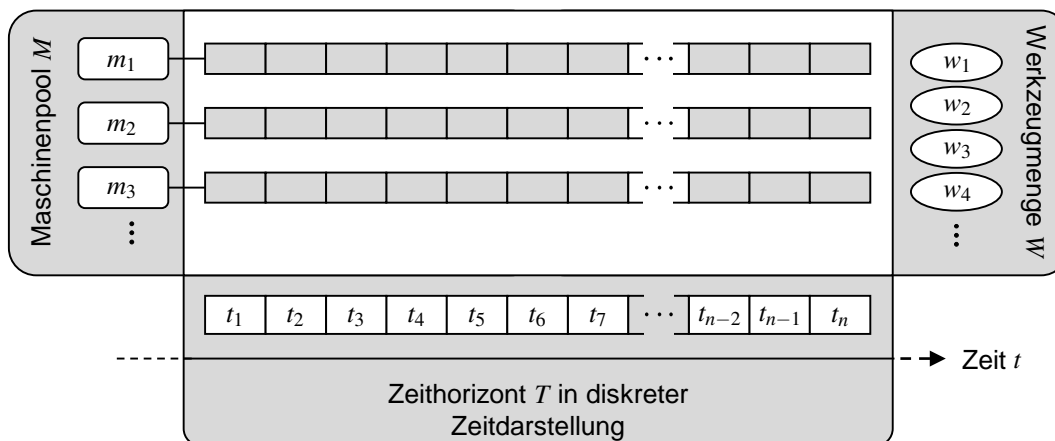


Abbildung 6.1: Gantt-Diagramm zur Veranschaulichung der Maschinenbelegung: eine effektive Losgrößen- und Reihenfolgeplanung bedeutet im vorliegenden Fall, eine Zuweisung von Werkzeugen aus einer Menge  $W$  auf den vorhandenen Maschinenpool  $M$  über einen betrachteten Zeithorizont  $T$  zur bestmöglichen Erfüllung der Bedarfsdeckung vorzunehmen

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert und in Abbildung 6.1 skizziert, besteht die Erzeugung einer Maschinenbelegung im Wesentlichen aus einer Zuweisung von Werkzeugen  $w \in W$  auf Maschinen  $m \in M$  über einen vorgegebenen Zeithorizont  $T$ , um dabei ein vorgegebenes Ziel zu erreichen. Im konkreten Fall liegt die Zielsetzung in der Erfüllung der Bauteilebedarfe des internen Kunden. Bei einer auftretenden Störung werden bestehende Maschinenbelegungs- und Losgrößenpläne der einzelnen Standorte verworfen. Im Sinne eines Gesamtplanungskonzepts sind diese gemeinsam zu betrachten und neu zu erstellen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Möglichkeiten, die eine Produktion im Verbund eröffnet. Diese liegen in der gemeinsamen Nutzung von Kapazitäten zur bestmöglichen Zielerfüllung. Diese Formalisierung erlaubte in Abschnitt 6.1 das Formulieren des abstrakten Modells  $\mathfrak{M}$  für die Feinplanung einer logistikintegrierten Produktion in einem Produktionsnetzwerk mit räumlich verteilten Standorten für einen festgelegten Zeitraum mit dem Ziel, die Fehlteilmenge in der Versorgungskette zu minimieren unter kostenoptimalem Einsatz logistischer Operationen.

Basierend auf den bisherigen Abstraktionen wird im Folgenden die Formulierung eines ganzzahligen Optimierungsprogramms im Sinne eines diskreten Losgrößen- und Reihenfolgeproblems für die betrachtete Fragestellung vorgenommen, wobei vorab der Aspekt verteilter Standorte mit den damit einhergehenden logistischen Aufgabenstellungen und die Charakteristika sowie Rahmenbedingungen der Bauteileherstellung in den Presswerken im Sinne einer logischen Ablaufregulierung gefasst werden müssen.

Sei  $T$  der für die Neuplanung betrachtete Zeithorizont, welcher bspw. die Zeitspanne ab Beginn bis zur Behebung der Störung widerspiegelt, eventuell ergänzt um einen hinreichenden Puffer. Nach dem Ende dieses Zeithorizonts soll die Produktion wieder in den Normalbetrieb übergehen. Der Modellierungsansatz einer kurzfristigen, ganzheitlichen Feinplanung von Produktionsaktivitäten verwendet eine Zeitdiskretisierung (Floudas und X. Lin, 2004), wobei die betrachtete Zeitperiode  $T$  in insgesamt  $\Phi$  Zeitslots gleicher Länge aufgeteilt wird. Ein Zeitslot habe dabei eine Dauer von  $\tau$  Zeiteinheiten. Des Weiteren beschreibe im Folgenden  $S$  die verteilten Presswerke sowie  $P$  die Bauteilepalette des Presswerksverbunds, welche mit den Werkzeugen  $W$  auf den vorhandenen Maschinen  $M$  hergestellt werden kann. Zudem seien die Menge  $W_w$  zur Beschreibung physischer Werkzeugabhängigkeiten und die Menge  $W_p$  zu jedem Bauteil gegeben, in welcher alle Werkzeuge zu dessen Fertigung zusammengefasst sind. Damit können folgende Klassen an Entscheidungsvariablen motiviert werden:

$$x_{m,w,t} \in \{0, 1\} \quad \text{Produktionsphase – das Werkzeug } w \in W \text{ produziert im Zeitslot } t \in T \\ \text{auf der Maschine } m \in M \text{ (1 - ja | 0 - nein)}$$



$\tilde{x}_{m,w,t} \in \{0, 1\}$	<i>Bauteilewechselphase</i> – im Zeitslot $t \in T$ wird die Produktion mit dem Werkzeug $w \in W$ auf der Maschine $m \in M$ vorbereitet (1 - ja   0 - nein)
$y_{s,w,t} \in \{0, 1\}$	<i>Werkzeugstandort</i> – das Werkzeug $w \in W$ befindet sich im Zeitslot $t \in T$ am Standort $s \in S$ (1 - ja   0 - nein)
$\tilde{y}_{s_1,s_2,w,t} \in \{0, 1\}$	<i>Werkzeugtransport</i> – zu Beginn des Zeitslots $t \in T$ wird ein Auftrag zur Verlagerung des Werkzeugs $w \in W$ vom Standort $s_1 \in S$ nach $s_2 \in S$ vergeben (1 - ja   0 - nein); mit diesem Auftrag ist das Werkzeug $w$ einschließlich des Zeitslots $t$ nicht mehr am Standort $s_1$ verfügbar
$z_{s_1,s_2,p,t} \in \mathbb{N}_0$	<i>Bauteiletransport</i> – zu Beginn des Zeitslots $t \in T$ wird ein Auftrag zur Verlagerung von Bauteilen der Art $p \in P$ vom Standort $s_1 \in S$ nach $s_2 \in S$ vergeben; mit diesem Auftrag ist eine Menge von $z_{s_1,s_2,p,t}$ Bauteilen der Art $p$ einschließlich des Zeitslots $t$ nicht mehr am Standort $s_1$ verfügbar
$u_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$	<i>Fehlteilmenge</i> – eine Menge von $u_{s,p,t}$ Bauteilen der Art $p \in P$ , welche im Zeitslot $t \in T$ zur Deckung der Bauteilebedarfe am Standort $s \in S$ fehlt; eine fristgerechte Bedarfsdeckung liegt vor, sofern die benötigten Bauteilmengen zu Beginn des entsprechenden Zeitslots vorliegen

Damit soll in einem ersten Schritt der Ablauf einer Bauteilfertigung veranschaulicht werden, d. h. wie ein Werkzeug Pressteile auf einer Maschine fertigt. In der Praxis muss ein zuvor betriebenes Werkzeug selbstverständlich ausgebaut werden. Das zu verwendende Werkzeug würde eingebaut und nach einer gewissen Installations- und Anlaufphase auf der Maschine Teile produzieren. In Abbildung 6.2 ist beispielhaft die formale Produktion im Modellrahmen mittels eines Werkzeugs  $w$  auf einer Maschine  $m$  am Standort  $s$  dargestellt.

Dabei wird der Betrieb des Werkzeugs  $w$  auf der Maschine  $m$  in zwei sich gegenseitig ausschließende Betriebsphasen gesplittet: Eine Bauteilewechsel- und eine Produktionsphase. In der Bauteilewechselphase ist der gesamte durch Werkzeugausbau, Rüst- sowie Anlaufzeiten verursachte Zeitverlust zusammengefasst, wohingegen die Produktionsphase den produktiven Anteil der Betriebszeit beschreibt. Der Aspekt räumlich verteilter Kapazitäten und Ressourcen bedingt die logische Forderung, dass das Werkzeug zumindest für die relevante Zeitspanne am Anlagenstandort  $s$  der Maschine vor Ort sein muss.

Zudem sind zwar Maschinen als stationär zu betrachten, die Werkzeuge im Presswerksverbund hingegen sind dies nicht. Diese können sehr wohl im Netzwerk verlagert werden unter

Berücksichtigung der entsprechend anfallenden Aufwände und Transportzeiten. Für das zu formulierende Programm wird dementsprechend eine logische Regulierung von Werkzeugverlagerungen benötigt, welche in Abbildung 6.3 skizziert ist.

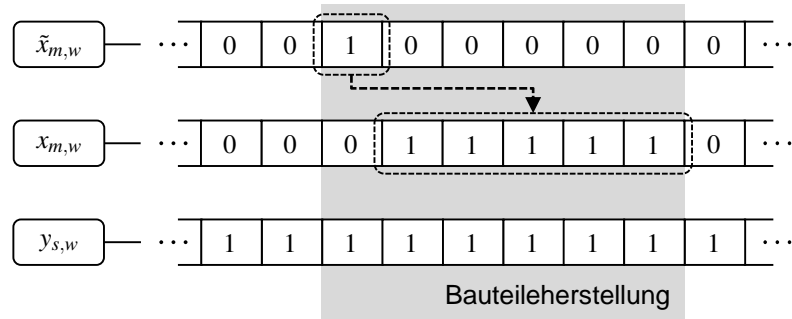


Abbildung 6.2: *Formale Pressteileherstellung: nach einer Bauteilewechselphase ist eine Pressteileherstellung auf der Maschine  $m$  möglich, wobei das Werkzeug  $w$  zumindest für die relevante Belegungszeit am Anlagenstandort  $s$  vor Ort sein muss*

Dabei ist eine Verlagerung eines Werkzeugs  $w$  von seinem derzeitigen Standort  $s_1$  zu einem gewünschten Standort  $s_2$  durch einen entsprechenden Transportauftrag vorgesehen. Der Auftrag ist gültig ab Beginn des Zeitslots in dem er vorgenommen wird, sodass das betroffene Werkzeug bereits im Zeitslot der Auftragserteilung formal nicht mehr verfügbar ist. Das Werkzeug befindet sich entsprechend der nötigen Transportdauer im Verlagerungszustand und ist erst nach seiner Ankunft am Standort  $s_2$  genau dort wieder einsetzbar.

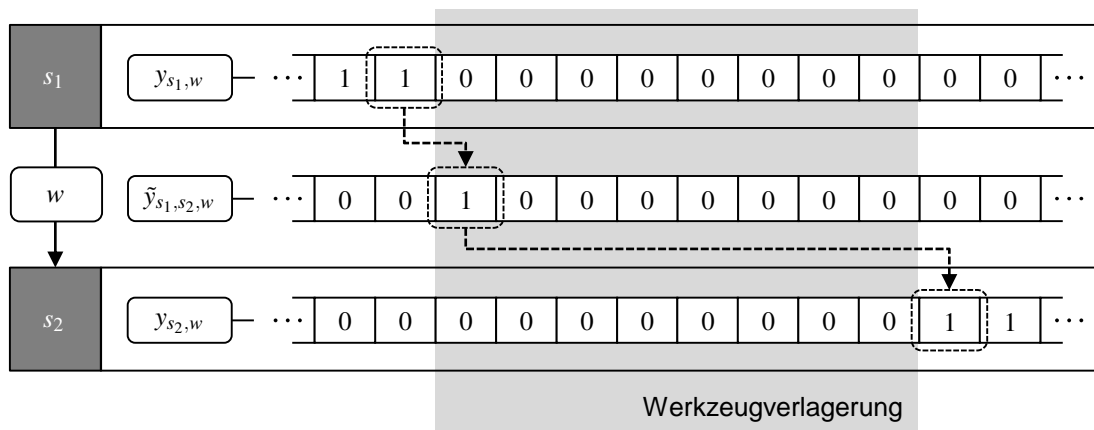


Abbildung 6.3: *Formale Werkzeugverlagerung: eine Verlagerung des Werkzeugs  $w$  vom Standort  $s_1$  nach  $s_2$  ist durch die Erteilung eines Transportauftrags möglich, wobei das Werkzeug unmittelbar mit der Auftragserteilung nicht mehr verfügbar ist und erst nach der Dauer der Verlagerung genau am Zielstandort wieder zur Verwendung bereit steht*

Eine Bauteiledistribution innerhalb des Produktionsnetzwerks wird auf ähnliche Weise modelliert. Im Unterschied zur Werkzeugverlagerung spielt jedoch für einen Bauteiletransport die Anzahl an Bauteilen, welche versendet werden soll, eine Rolle. Diese Bauteilemenge wird in den Entscheidungsvariablen für die Bauteilelogistik berücksichtigt, wie dies in Abbildung 6.4 schematisch wiedergegeben ist. Für den Transport von  $k$  Bauteilen der Art  $p$  von einem Senderstandort  $s_1$  zu einem Empfängerstandort  $s_2$  ist ein entsprechender Transportauftrag notwendig. Unmittelbar nach der Erteilung des Transportauftrags sind die Bauteile in der entsprechenden Menge nicht mehr verfügbar. Dies wird direkt im aktuellen Bestand an Fertigteilen am Standort  $s_1$  vermerkt und die versendete Bauteilemenge in Abzug gebracht. Nach der nötigen Dauer für den Transport sind die Bauteile mit ihrer Ankunft am Zielstandort  $s_2$  genau dort wieder verfügbar und erhöhen sogleich den nominellen Bestand an verfügbaren Fertigteilen am Standort  $s_2$ .

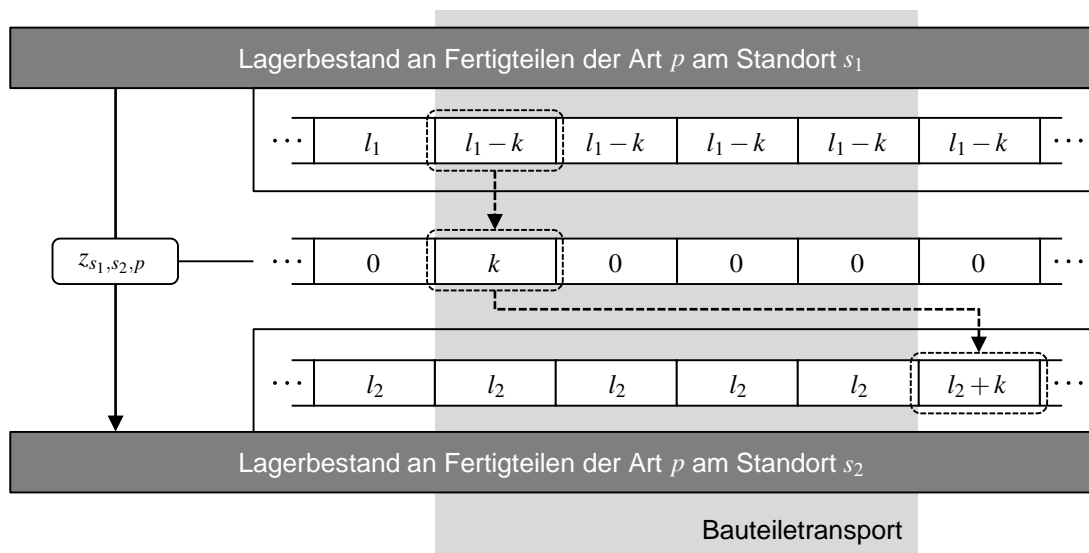


Abbildung 6.4: *Formaler Bauteiletransport: ein Transport von  $k$  Bauteilen der Art  $p$  vom Standort  $s_1$  nach  $s_2$  ist durch die Erteilung eines Transportauftrags möglich, wobei die versendete Bauteilemenge unmittelbar mit der Auftragserteilung nicht mehr verfügbar ist und erst nach der Dauer der Distribution genau am Zielstandort wieder zur Bedarfsdeckung bereit steht*

Unter den erläuterten Spezifikationen für die Bauteileherstellung sowie -distribution im Presswerksverbund und mit den eingeführten Regeln für den Ablauf von Produktion und Logistik kann im Folgenden  $\mathfrak{M}$  in Form eines ganzzahligen Optimierungsprogramms gefasst werden.

Sei zu Beginn für den Maschinenpool  $M$  des Presswerksverbunds durch  $f_{m,t} \in \{0, 1\}$  der Status der Maschine  $m$  im Zeitslot  $t$  für den betrachteten Zeithorizont  $T$  gegeben. Dabei beschreibt  $f_{m,t} = 1$  die Verfügbarkeit der Maschine  $m$  im Zeitslot  $t$ , wohingegen  $f_{m,t} = 0$  signalisiert, dass

die Anlage in diesem Zeitslot bspw. aufgrund einer Störung nicht für eine Bauteilproduktion verwendet werden kann. Damit können folgende logische Zuweisungsbedingungen formuliert werden:

$$(C-1) \quad \forall m \in M, \forall t \in T : \\ \sum_{w \in W} (\tilde{x}_{m,w,t} + x_{m,w,t}) \leq f_{m,t}$$

$$(C-2) \quad \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \sum_{m \in M} (\tilde{x}_{m,w,t} + x_{m,w,t}) \leq 1$$

Die Restriktionsklasse (C-1) gewährleistet den Betrieb höchstens eines Werkzeugs  $w$  auf einer Maschine  $m$  in einem Zeitslot  $t$  und verhindert des Weiteren über den Parameter  $f_{m,t}$  den Einsatz nicht verfügbarer Anlagen. Die Nebenbedingungen (C-2) stellen dahingehend sicher, dass ein Werkzeug  $w$  in einem Zeitslot  $t$  maximal auf einer Maschine  $m$  eingesetzt wird. Dabei ist unter physischen Gesichtspunkten selbstverständlich, dass sich ein Werkzeug entweder in der Bauteilwechsel- oder in der Produktionsphase befindet, eine Gleichzeitigkeit jedoch unzulässig ist.

Bevor ein Werkzeug  $w$  produktiv auf einer Maschine  $m$  eingesetzt werden kann, muss ein Bauteilwechsel durchlaufen werden. Sei  $v_{m,w} \in \mathbb{N}_0$  die Dauer einer solchen Installationsphase in Zeitslots, so ist die Forderung nach einer Bauteilwechselphase im Modell durch folgende Bedingungen (C-3) erfüllt:

$$(C-3) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \text{FOR } l = t - v_{m,w} \text{ TO } t - 1 \text{ DO} \\ x_{m,w,t} \leq \tilde{x}_{m,w,l} + x_{m,w,l}$$

Ein produktiver Einsatz ist damit nur möglich, sofern während der vorhergehenden  $v_{m,w}$  Zeitslots das Werkzeug  $w$  bereits auf der Maschine  $m$  verwendet wurde, womit eine vorhergehende Installationsphase zwingend notwendig ist.

Im laufenden Betrieb kann es u. U. zudem sinnvoll sein, eine Mindestbelegzeit für den Einsatz von Werkzeugen auf Maschinen zu fordern. Sei  $\mu \in \mathbb{N}_0$  die vorgegebene Mindestbelegdauer in Zeitslots im betrachteten Produktionsverbund, so lässt sich dies wie folgt formulieren:

$$(C-4) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \sum_{l=t}^{\min\{t+\mu-1; \Phi\}} x_{m,w,l} \geq \min\{\mu; \Phi - t + 1\} (x_{m,w,t} - x_{m,w,t-1}) - v_{m,w}$$

Wechselt ein Werkzeug  $w$  auf einer Maschine  $m$  im Zeitslot  $t$  von der Installations- in die Produktionsphase, so muss mindestens im Zeitslot  $t$  und in den nachfolgenden  $(\mu - 1 - v_{m,w})$  Zeitperioden weiterhin eine produktive Verwendung erfolgen, wodurch insgesamt unter Berücksichtigung der Bauteilewechseldauer  $v_{m,w}$  eine Belegungsdauer von mindestens  $\mu$  Zeitslots erzielt wird.

Zudem stellen die folgenden Restriktionen sicher, dass nötige pauschale Rüstzeiten  $\lambda \in \mathbb{N}$  in Zeitslots zur Vorbereitung von Werkzeugwechseln bereitgehalten werden:

$$(C-5a) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \sum_{l=t+1}^{\min\{t+\lambda; \Phi\}} \left( \sum_{h \in M_{s(m)} \setminus \{m\}} (\tilde{x}_{h,w,l} + x_{h,w,l}) + \sum_{h \in M_{s(m)}} \sum_{k \in W_w} (\tilde{x}_{h,k,l} + x_{h,k,l}) \right) \\ \leq \lambda (1 - \tilde{x}_{m,w,t} - x_{m,w,t})$$

$$(C-5b) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \sum_{l=t}^{\min\{t+\lambda-1; \Phi\}} (\tilde{x}_{m,w,l} + x_{m,w,l}) \leq \lambda (1 - x_{m,w,t-1} + x_{m,w,t})$$

Sei  $s(m)$  der Standort der Maschine  $m$  und  $M_{s(m)}$  bezeichne die Menge aller am Standort  $s(m)$  verfügbaren Maschinen. Sollte ein Werkzeug  $w$  auf einer Maschine  $m$  in einem Zeitslot  $t$  eingesetzt werden, verhindern die Nebenbedingungen (C-5a) den Einsatz desselben Werkzeugs auf den anderen Maschinen am Standort  $M_{s(m)} \setminus \{m\}$ , zumindest für eine Dauer von  $\lambda$  Zeitslots nach  $t$ . Ebenfalls um vorbereitende Arbeiten für etwaige spätere Werkzeugwechsel zu gewährleisten, schließt (C-5a) gleichzeitig eine Verwendung physisch abhängiger formaler Werkzeuge gemäß  $W_w$  auf allen Maschinen  $M_{s(m)}$  des Standorts  $s(m)$  für eine entsprechende Zeitspanne aus. Der Fall, dass ein Werkzeug nach Unterbrechung wieder auf derselben Maschine betrieben wird, ist in (C-5b) berücksichtigt. Sollte ein Werkzeug  $w$  auf einer Maschine  $m$  zum Zeitslot  $t$  inaktiv und damit ausgebaut werden, so ist dessen Einsatz auf derselben Maschine für die folgenden  $\lambda - 1$  Zeitslots nicht möglich. Insgesamt vergehen mindestens  $\lambda$  Zeitslots bis zu einer erneuten Verwendung von  $w$  auf  $m$ , wodurch die benötigte Zeit zur Vorbereitung eines Werkzeugwechsels bereitgestellt ist.

In Ergänzung müssen Regeln eingeführt werden, die ein korrektes ablauforganisatorisches Verhalten unter Verbundaspekten durchsetzen. Dahingehend muss mit  $\eta_{s_2, s_1, w} \in \mathbb{N}_0$  der Dauer einer vollständigen Verlagerung des Werkzeugs  $w$  vom Standort  $s_2$  nach  $s_1$  in Zeitslots zunächst eine Ergänzung zur Gewährleistung der Vorrüstzeit  $\lambda$  vorgenommen werden:

$$(C-5c) \quad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall t \in T :$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l=t}^{\min\{t+\lambda-1; \Phi\}} \sum_{h \in M_s} \left( \tilde{x}_{h,w,l} + x_{h,w,l} + \sum_{k \in W_w} (\tilde{x}_{h,k,l} + x_{h,k,l}) \right) \\ & \leq \lambda \left( 1 - \sum_{l \in S \setminus \{s\}} \tilde{y}_{l,s,w,t} - \eta_{l,s,w} \right) \end{aligned}$$

Sollte ein Werkzeug  $w$  im Verbund verlagert werden, so kann dieses nach seiner Ankunft an einem Zielstandort  $s$  nicht umgehend eingesetzt werden. Die Verwendung auf den Maschinen  $M_s$  des Standorts ist für eine Dauer von  $\lambda$  Zeitslots unzulässig. Gleiches gilt selbstverständlich für die mit  $w$  in physischer Abhängigkeit stehenden Werkzeuge  $W_w$ .

Außerdem sind die Bedingungen (C-6) einzuführen, die sicherstellen, dass der Einsatz von Werkzeugen auf Maschinen nur zulässig ist, sofern sich das betrachtete Werkzeug  $w$  am selben Standort  $s(m)$  wie die zu verwendende Maschine  $m$  befindet:

$$\begin{aligned} \text{(C-6)} \quad & \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ & \tilde{x}_{m,w,t} + x_{m,w,t} \leq y_{s(m),w,t} \end{aligned}$$

Zusätzlich müssen die bestehenden Werkzeugabhängigkeiten nach  $W_w$  einbezogen werden. Logischerweise müssen abhängige Werkzeuge immer am selben Standort vor Ort sein und exakt die selben logistischen Operationen durchlaufen:

$$\begin{aligned} \text{(C-7a)} \quad & \forall s \in S, \forall w \in W, \forall t \in T, \forall k \in W_w : \\ & y_{s,k,t} = y_{s,w,t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(C-7b)} \quad & \forall s_1, s_2 \in S, \forall w \in W, \forall t \in T, \forall k \in W_w : \\ & \tilde{y}_{s_1,s_2,k,t} = \tilde{y}_{s_1,s_2,w,t} \end{aligned}$$

(C-7a) erzwingt daher für ein Werkzeug  $w$  und ein Werkzeug  $k \in W_w$ , die physisch dieselbe Basis haben, dass sich diese stets an demselben Standort befinden. (C-7b) stellt in diesem Rahmen sicher, dass Transportaufträge, die ein Werkzeug  $w$  betreffen, unmittelbar für alle mit  $w$  in Abhängigkeit stehenden Werkzeuge Gültigkeit entfalten und sämtliche formalen Werkzeuge in  $W_w$  ebenfalls verlagert werden.

Im Allgemeinen gilt für ein bestimmtes Werkzeug  $w$  in einem Zeitslot  $t$ , dass es sich höchstens entweder an einem Standort im Netzwerk befindet oder gerade ein Transportauftrag für eine Verlagerung zwischen Standorten vorliegt:

$$\begin{aligned} \text{(C-8)} \quad & \forall w \in W, \forall t \in T : \\ & \left( \sum_{s \in S} y_{s,w,t} \right) + \left( \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \tilde{y}_{s_1,s_2,w,t} \right) \leq 1 \end{aligned}$$

Im Weiteren soll der Ablauf von Werkzeugverlagerungen nach Abbildung 6.3 abgebildet werden. Die regulatorische Grundlage liefern hierbei die Restriktionsklasse (C-8) in Kombination mit den folgenden Nebenbedingungen (C-9):

$$(C-9) \quad \forall s_1 \in S, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ y_{s_1, w, t} + \sum_{s_2 \in S} \tilde{y}_{s_1, s_2, w, t} = y_{s_1, w, t-1} + \sum_{s_2 \in S} \tilde{y}_{s_2, s_1, w, t} - \eta_{s_2, s_1, w}$$

Demnach besagt die Klasse (C-9), dass, falls sich ein Werkzeug  $w$  in einem Zeitslot  $t$  an einem Standort  $s_1$  befindet oder ein Transportauftrag für dieses Werkzeug zur Verlagerung von  $s_1$  ins Netzwerk erteilt wird,  $w$  sich bereits im vorhergehenden Zeitslot  $t - 1$  am Standort  $s_1$  befunden oder gerade eine Verlagerung durchlaufen haben muss, welche entsprechend in der Vergangenheit beauftragt wurde. Zusammen verhindern (C-8) sowie (C-9) ein unzulässiges Splitting bzw. eine simultane Verlagerung ein und desselben Werkzeugs und stellen überdies einen formell korrekten Werkzeugtransport entsprechender Dauer sicher.

Bei der Modellierung muss hinsichtlich Werkzeugtransporten zusätzlich berücksichtigt werden, dass derartige logistische Operationen an jedem Standort nur in beschränktem Maße möglich sind. U. a. ist zu bedenken, dass die formale Verlagerung eines Werkzeugs im Modell eine Verlagerung von bis zu sechs Werkzeugstufen in der Realität bedeutet. Jede Werkzeugstufe besteht dabei aus einem Werkzeugober- sowie Werkzeugunterteil, welche in der Regel wegen ihrer Abmessungen und ihres Gewichts bei einem Transport jeweils einen Lastkraftwagen vollständig für sich in Anspruch nehmen. Gleichzeitig müssen Mechanisierungseinrichtungen, Bauteilebehälter, eventuell Formplatinen und auch etwaige Spezialteile, wie z. B. Einpresselemente für die integrierte Bauteileherstellung, mitversendet werden. Daher ist mit Blick auf die Dauer und den operativen Aufwand für Transportvorbereitungen und Beladevorgänge sowie aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse vor Ort unter dem Aspekt der Menge an benötigten Transportmitteln die Anzahl möglicher Werkzeugverlagerungen pro Standort zu begrenzen:

$$(C-10) \quad \forall s \in S, \forall t \in T : \\ \sum_{l \in S} \sum_{w \in W} \sum_{k=t-\lceil \frac{\omega_s}{2} \rceil + 1}^{\min\{t+\lceil \frac{\omega_s}{2} \rceil, \Phi\}} \left( \tilde{y}_{s, l, w, k} + \tilde{y}_{l, s, w, k} - \eta_{l, s, w} \right) \leq \zeta_s$$

Mit den Restriktionen (C-10) ist für einen Standort  $s$  die Anzahl maximal möglicher Werkzeugverlagerungen innerhalb eines standortspezifischen Zeitfensters der Ausdehnung von  $\omega_s \in \mathbb{N}_0$  Zeitslots, in die der Standort involviert sein darf, auf  $\zeta_s \in \mathbb{N}_0$  beschränkt. Hierbei kann der Standort die Versendung von vor Ort liegenden Werkzeugen vornehmen oder mit dem Empfang von Werkzeugen von anderen Senderstandorten beschäftigt sein.

Bisher ist das Produktionssystem mitsamt seiner logistischen Komponenten formalisiert worden. Im nächsten Schritt soll die Berücksichtigung von Fehlteilermengen integriert und die Zielfunktion formuliert werden. Hierzu sei vorab folgende Definition (R-1) gegeben:

$$(R-1) \quad \Gamma(s, p, t) := \sum_{m \in M_s} \sum_{w \in W_p} \sum_{l=1}^{t-1} \rho_{m,w} \tau x_{m,w,l}$$

Mit  $\rho_{m,w} \in \mathbb{N}$  der effektiven Ausbringung an Bauteilen pro Zeiteinheit beim produktiven Einsatz des Werkzeugs  $w$  auf der Maschine  $m$  und  $M_s$  der Menge an verfügbaren Maschinen am Standort  $s$  beschreibt  $\Gamma(s, p, t)$  die Menge an produzierten Bauteilen der Art  $p$  am Standort  $s$  ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Beginn des Zeitslots  $t$ .  $\rho_{m,w}$  ist dabei ein störungsbereinigter Parameter, in welchem die Qualitätsrate des Realprozesses für die entsprechende Werkzeug-Maschinen-Kombination bereits berücksichtigt ist. Somit gibt  $\Gamma(s, p, t)$  Aufschluss über die tatsächlichen Bauteilmengen, welche durch Produktion für die Bedarfsdeckung hergestellt wurden.

Zusätzlich seien folgende Ausdrücke durch die Konventionen (R-2) und (R-3) definiert:

$$(R-2) \quad \Psi(s, p, t) := \sum_{k \in S} \sum_{l=1}^t z_{k,s,p,l}$$

$$(R-3) \quad \Omega(s, p, t) := \sum_{k \in S} \sum_{l=1}^t z_{k,s,p,l} - \xi_{k,s}$$

$\Psi(s, p, t)$  repräsentiert hierbei die Gesamtmenge an Bauteilen der Art  $p$ , welche ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Ende des Zeitslots  $t$  vom Standort  $s$  aus ins Netzwerk versendet wurden. Im Gegensatz dazu ist in  $\Omega(s, p, t)$  die Versorgung des Standorts  $s$  mit Bauteilen der Art  $p$  von Beginn des betrachteten Zeithorizonts an bis zum Beginn des Zeitslots  $t$  durch die restlichen Standorte des Netzwerks zusammengefasst, wobei  $\xi_{k,s} \in \mathbb{N}$  die gerichtete Dauer eines Bauteiletransports zwischen den Standorten  $k$  und  $s$  in Zeitslots beschreibt.

Die soeben eingeführten Termini (R-1), (R-2) und (R-3) ermöglichen eine Formulierung von Gleichgewichtsbedingungen derart, dass formell die Erfüllung der angeforderten Bedarfsmengen  $\varepsilon_{s,p,t} \in \mathbb{N}_0$  an Bauteilen der Art  $p$  am Standort  $s$  zum Zeitslot  $t$  gewährleistet ist:

$$(R-11) \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T :$$

$$\varphi_{s,p} + \Gamma(s, p, t) + \Omega(s, p, t) + \sum_{l=1}^t u_{s,p,l} \geq \Psi(s, p, t) + \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l}$$

In dieser Darstellung ist  $\varphi_{s,p} \in \mathbb{N}_0$  der Fertigteilbestand an Bauteilen der Art  $p$  am Standort  $s$  zu Beginn des betrachteten Zeithorizonts  $T$ . Die virtuellen Fehlteilermengen  $u_{s,p,l}$  stellen



die Deckung der vorliegenden Bedarfe sicher, indem sie etwaige für die Versorgung fehlende Fertigteile ausgleichen. Sollten gegebenenfalls zu einem Zeitslot  $t$  am Standort  $s$  der Bedarf  $\varepsilon_{s,p,t}$  an Bauteilen der Art  $p$  zusammen mit der Menge ins Netzwerk versendeter derartiger Bauteile  $\Psi(s, p, t)$  die Summe aus initialem Fertigteilebestand  $\varphi_{s,p}$ , produziertem Bauteilevolumen  $\Gamma(s, p, t)$  und erhaltene Versorgungsleistungen aus dem Netzwerk  $\Omega(s, p, t)$  übersteigen, so wird diese Unterdeckung durch den Zukauf virtueller Bauteile behoben. Da für die vorliegende Problemstellung der Verlustfall zugrunde gelegt wird, sind entsprechend die summierten Bedarfe und Fehlteilermengen in den Bedingungen (R-11) von herausragender Bedeutung.

Im Hinblick auf Fertigteilebestände ist oftmals eine Sicherheitsmenge für die Lagerbestände vorgegeben, welche auftretende kurzfristige Engpässe abfangen und im Notfall eine Versorgung der Wertschöpfungskette für einen gewissen Zeitraum sicherstellen soll. In der aktuellen Formulierung von (R-11) sind solche bauteile- und standortspezifischen Sicherheitsbestände  $v_{s,p} \in \mathbb{N}_0$  nicht berücksichtigt und ein Zugriff auf die gesamten Fertigteilebestände zur Bedarfsdeckung ist angedacht. In der betrieblichen Praxis kann es jedoch u. U. sinnvoll sein, trotz eines Kapazitätsengpässes einen bestimmten Anteil an Sicherheitsbeständen vorzuhalten bzw. die Sicherheitsbestände etwaiger kritischer Bauteile aus verschiedensten Gründen nicht anzutasten. Aus der Zielsetzung einer ganzheitlichen Betrachtung heraus werden die Bedingungen (R-11) um die genannten Aspekte ergänzt:

$$(C-11) \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T :$$

$$\varphi'_{s,p} + \Gamma(s, p, t) + \Omega(s, p, t) + \sum_{l=1}^t u_{s,p,l} \geq \Psi(s, p, t) + \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l}$$

Hierbei gilt  $\varphi'_{s,p} = \varphi_{s,p} - v_{s,p}$ , sodass zur Auftragsdeckung nicht wie bisher die gesamten vorliegenden Lagerbestände herangezogen werden dürfen, sondern diese um eine vorzuhaltende Sicherheitsmenge  $v_{s,p}$  an Bauteilen der Art  $p$  am Standort  $s$  bereinigt werden müssen.

Des Weiteren sei der Verlustfall eines Bauteils der Art  $p$  am Standort  $s$  durch die Strafkosten  $\psi_{s,p} \in \mathbb{R}_0^+$  in Währungseinheiten beziffert. Dann lassen sich die anfallenden Gesamtkosten aufgrund auftretender Fehlteilermengen über den Zeithorizont  $T$  folgendermaßen berechnen:

$$(F) \quad \Theta := \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \psi_{s,p} u_{s,p,t}$$

Zusätzlich seien mit  $\delta_{s_1, s_2, w} \in \mathbb{R}_0^+$  die Kosten in Währungseinheiten für eine Verlagerung des Werkzeugs  $w$  vom Standort  $s_1$  nach  $s_2$  festgesetzt. Damit sind die Gesamtaufwendungen für Werkzeugtransporte innerhalb des betrachteten Zeitrahmens  $T$  gegeben durch:

$$(W) \quad \Xi := \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} \delta_{s_1, s_2, w} \tilde{y}_{s_1, s_2, w, t}$$

Ferner liege der Füllgrad der für die Lagerung und den Transport von Bauteilen der Art  $p$  verwendeten Behälter bei  $\kappa_p \in \mathbb{N}$  Bauteilen pro Behälter und überdies sei  $\sigma_p \in \mathbb{N}$  die Kapazität an Behältern, die ein Transportmittel, wie bspw. ein Lastkraftwagen oder ein Eisenbahnwagen, aufzunehmen im Stande ist. Angenommen  $\chi_{s_1, s_2} \in \mathbb{R}_0^+$  seien die Kosten für den Transport von Bauteilen mit einem solchen vollbeladenen Transportmittel vom Standort  $s_1$  nach  $s_2$ , dann belaufen sich die Gesamtkosten für die Bauteiledistribution innerhalb des Netzwerks über den berücksichtigten Zeithorizont  $T$  auf insgesamt:

$$(B) \quad \Lambda := \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \left[ \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}}{\kappa_p \sigma_p} \right]$$

Dabei ist in dieser Formulierung ausschließlich der Bedarf an Transportmitteln für bauteile-spezifisch isolierte Packungen vorgesehen, wohingegen für eine exakte Kostenrechnung das in der Praxis vorliegende allgemeinere Packungsproblem betrachtet werden müsste. Da jedoch die Kosten für Bauteiletransporte sehr klein sind im Vergleich zu den Hauptkostentreibern, den u. U. auftretenden Fehlteilermengen, wird an dieser Stelle diese Vereinfachung billigend in Kauf genommen, um die ansonsten einhergehende Komplexitätssteigerung zu vermeiden.

Führt man sich erneut die Zielsetzung der Produktionsaktivitäten im Presswerksverbund vor Augen, so liegt diese in der Vermeidung bzw. Minimierung der Fehlteilermengen und somit in einer bestmöglichen Versorgung des internen Kunden durch die Erfüllung der vorliegenden Bedarfe bei minimalem Aufwand für Werkzeug- und Bauteilelogistik. Die Zielfunktion für das Optimierungsprogramm ist somit gegeben durch:

$$(O) \quad \min (\Theta + \Xi + \Lambda)$$

Das soeben abgeleitete Optimierungsprogramm mit dem aufgrund der oberen Gaußklammer  $[\cdot]$  in der Formulierung für  $\Lambda$  lediglich stückweise linearen Zielfunktional unter den linearen Nebenbedingungen (C-1)–(C-11) und den entsprechenden Ganzzahligkeitsanforderungen an die Entscheidungsvariablen sei im Folgenden mit  $\mathfrak{B}_n$  bezeichnet.

Die stückweise Linearität in der Zielfunktion (O) kann an dieser Stelle durch die Einführung einer Klasse von Hilfsvariablen mit entsprechenden Nebenbedingungen behoben werden. Seien  $\forall s_1, s_2 \in S, \forall t \in T : \hat{z}_{s_1, s_2, t} \in \mathbb{N}_0$  als Entscheidungsvariablen eingeführt und damit  $\Lambda$  reformuliert zu:

$$(B') \quad \Lambda' := \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \hat{z}_{s_1, s_2, t}$$

Mit diesem technischen Griff ergibt sich eine lineare Zielfunktion (O'):

$$(O') \quad \min \left( \Theta + \Xi + \Lambda' \right)$$

Des Weiteren werden die Nebenbedingungen (C-1)–(C-11) um folgende Restriktionen ergänzt:

$$(N-12) \quad \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}}{k_p \sigma_p} \leq \hat{z}_{s_1, s_2, t}$$

Fasst man das Zielfunktional (O') mit den Restriktionen (C-1)–(C-11), (N-12) und den entsprechenden Ganzzahligkeitsbedingungen an die Entscheidungsvariablen zusammen, so ist dadurch eine äquivalente Formulierung zu  $\mathfrak{P}_n$  in linearer Form gegeben, welche im weiteren Verlauf als Ausgangspunkt für die späteren, numerischen Betrachtungen herangezogen wird.

#### 6.4 Kurzfristige Neuplanung der Feinsteuerung in der Produktion

Nachdem in den vorangegangenen Abschnitten Modelle für die kurzfristige logistikintegrierte Produktionsfeinplanung in einem interdependenten Presswerksverbund der Automobilindustrie abgeleitet wurden, soll in diesem Abschnitt gezeigt werden, wie diese Programme bei auftretendem Kapazitätsengpass aufgrund von Störungen oder Ausfällen für die Neuerstellung von Losgrößen-, Reihenfolgeplänen und zur Distributionsplanung angewendet werden können.

Dazu sei mit  $T$  der betrachtete Planungshorizont gegeben und des Weiteren sei angenommen, dass ein Maschinenausfall auftritt, wodurch die Maschine  $m_i \in M$  für eine zusammenhängenden Zeitspanne von  $T_{AM} \subseteq T$  nicht verfügbar ist. Weiterhin seien alle Netzwerkressourcen und -kapazitäten bekannt sowie jegliche nach Abschnitt 6.3 zusätzlich benötigten Daten und Kennzahlen. Damit kann eine Produktionsfeinplanung minimalen Risikos entsprechend der gesteckten Zielsetzung mittels einer Lösung des Modells  $\mathfrak{P}_n$  unter folgenden zusätzlichen Bedingungen ermittelt werden:

$$(A-M) \quad \forall w \in W, \forall t \in T_{AM} : \\ \tilde{x}_{m_i, w, t} = 0 \wedge x_{m_i, w, t} = 0$$

Dabei wird die Nicht-Verfügbarkeit der Maschine  $m_i$  erzwungen durch ein Verbot ihrer Verwendung zur Bauteilerstellung in Kombination mit Werkzeugen, welches für die Dauer der Zeitspanne des Ausfalls gilt. Selbstverständlich ist die Modellierung eines Maschinenausfalls auch über die Maschinenverfügbarkeit  $f_{m, t}$  möglich.

Das Konzept einer A-priori-Festsetzung von Variablen wie in (A-M) ist jedoch von Interesse, da es auch zur Modellierung von Werkzeugausfällen herangezogen werden kann. Beschreibe in diesem Zusammenhang  $T_{AW} \subseteq T$  die Dauer eines Ausfalls des Werkzeugs  $w_i \in W$ , dann ist dessen Berücksichtigung im Modell durch eine entsprechende Festsetzung der Variablen mit Bezug zu  $w_i$  möglich:

$$(A-W) \quad \forall m \in M, \forall t \in T_{AW} : \\ \tilde{x}_{m,w_i,t} = 0 \wedge x_{m,w_i,t} = 0$$

Auf kanonische Weise kann sogar eine Nicht-Verfügbarkeit ganzer Standorte (A-S) einkalkuliert oder die Beschränkung der Planung auf eine begrenzte Auswahl an Standorten, welche in die Betrachtungen einbezogen werden sollen, realisiert werden. In einem solchen Szenario sind sämtliche Ressourcen sowie Kapazitäten der nicht zu betrachtenden Standorte für das formale Netzwerk nicht verfügbar und Werkzeugverlagerungen sowie Bauteildistribution beschränken sich entsprechend einzig auf Prozesse zwischen den verfügbaren Standorten.

Analog dazu, können die Vorgehensweisen (A-M), (A-W) und (A-S) dazu verwendet werden, Nicht-Verfügbarkeiten von Ressourcen aufgrund von gesetzlichen Feiertagen, Ruhetagen oder bspw. anfallenden Wartungsarbeiten zu berücksichtigen. Somit erlaubt das Optimierungsprogramm  $\mathfrak{P}_n$  eine ganzheitliche Behandlung von Kapazitätsengpässen im Presswerksverbund selbst bei Nicht-Verfügbarkeiten unterschiedlichster Ressourcen.

## 6.5 Modellannahmen und flexible Zielgrößen

Das mathematische Optimierungsprogramm  $\mathfrak{P}_n$  aus dem vorangegangenen Abschnitt 6.3 stellt offensichtlich eine Vereinfachung der realbetrieblichen Produktions- und Logistikaktivitäten eines Presswerksverbunds dar. Jedoch liegt der Kernaspekt nicht in der vollumfänglichen Abbildung aller Gegebenheiten und Zusammenhänge der betrieblichen Realität, sondern in der Behandlung des Problems einer logistikintegrierten Feinplanung der Produktion in den Presswerken unter dem Verbundaspekt mit dem Ziel einer bestmöglichen Versorgung der Kundenaufträge bei Berücksichtigung von Bauteildistribution und möglicher Werkzeugverlagerungen. Nichtsdestotrotz seien an dieser Stelle die vorgenommenen Vereinfachungen und die getroffenen Annahmen im Modell angesprochen.

So werden die Mengen an Betriebsmitteln und Personal, die zur Durchführung und Aufrechterhaltung des Leistungserstellungsprozesses notwendig sind, als verfügbar angenommen und sollen bestmöglich eingesetzt werden. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit wird daher angenommen, dass benötigte Rohmaterialien wie Formplatinen in ausreichender Anzahl vor Ort vorhanden

sind oder bereitgestellt werden. Ebenfalls werden Bauteilebehälter und Transportmittel als in ausreichenden Mengen vorhanden vorausgesetzt. Außerdem werden Rüst-, Betriebskosten und fixe sowie variable Lagerkosten vernachlässigt, so wie Personalkosten gleichermaßen nicht in die Betrachtungen einbezogen werden.

Ferner seien Stammdaten und Produktionskennzahlen stets und auf Abruf verfügbar, wie z. B. bereinigte zeitabhängige Pressteileausbringungen bei Einsatz von Werkzeugen auf Anlagen oder werkzeugspezifische Werkzeugwechselzeiten an den Maschinen. Diese Annahme ist realistisch, da im Rahmen der üblichen Untersuchungen zur Gesamtanlageneffektivität (Nakajima, 1988, S. 21ff), (May und A. Koch, 2008) durchgehend Kennzahlen im Umfeld der Produktionsanlagen im Presswerksbetrieb aufgezeichnet werden (Griffel, 1999, S. 7ff), (Sencar, 2001, S. 17ff) und sämtliche statische Daten bereitgestellt oder aus bestehenden Systemen und Planungsständen extrahiert werden können.

Darüber hinaus werden logistische Operationen simplifizierend als Prozessschritte angenommen, für deren Dauer vernünftige Just-in-time-Abschätzungen vorliegen müssen. So wird eine komplexe Werkzeugverlagerung, welche u. a. etliche Transportmittel bindet, mit den gesamten damit einhergehenden Aufgaben und Abläufen in einem einzigen Blockauftrag realisiert.

Gleichzeitig müssen Kosten für Bauteile- und Werkzeugverlagerungen abgeschätzt werden. Oftmals bestehen Pauschalen für derartige Leistungen durch Logistikunternehmer, sodass die verhandelten Kostensätze direkt Verwendung finden können. Im Allgemeinen berücksichtigen Kosten für Fehlteile anfallende Aufwendungen durch einen Produktionsausfall in den Hauptlinien und Personal- und Betriebskosten zu dessen Kompensation, sodass diese einer standortspezifischen Beurteilung unterzogen werden müssen. Gleichwohl sind die exakten Kosten für Fehlteile oder logistische Prozesse von nachrangiger Bedeutung, da die zentrale Information in ihrer Gewichtung zueinander hinsichtlich ihrer Berücksichtigung in der Zielfunktion liegt. Es sei angemerkt, dass Strafkosten für auftretende Fehlteile um ein Vielfaches höher sind als die Kosten für Werkzeugverlagerungen oder die vergleichsweise kostengünstigen Distributionskosten für Bauteile.

Schließlich sucht die vorliegende Arbeit einen auftretenden Kapazitätsengpass durch kurzfristige Umplanungsmaßnahmen unter optimaler Ausnutzung der Kapazitäten des Produktionsnetzwerks risikoarm zu überbrücken. Dieser Eingriff in den Normalbetrieb ist auf einen vorgegebenen Zeithorizont beschränkt, nach dessen Ende die konventionellen, etablierten Produktionsplanungsstrukturen fortgeführt werden sollen. Aufgrund der zeitlich beschränkten Komponente des Ansatzes, die sich damit auf das Optimierungsprogramm überträgt, können die Parameter für  $\mathfrak{P}_n$  als statisch angenommen werden.

Insgesamt ist das formulierte Modell  $\mathfrak{P}_n$  damit für die kurzfristige Produktionsfeinplanung unter Berücksichtigung von Netzwerkaspekten hinreichend realitätsnah und zulässig, sodass dessen numerische Lösung im Folgenden in den Fokus rückt und näher untersucht werden soll.



## 7 Implementierung und numerische Lösung des Programms

In diesem Kapitel steht die numerische Lösung des abgeleiteten Optimierungsprogramms für die kostenoptimale Überbrückung von Nicht-Verfügbarkeitsszenarien im Presswerksverbund der Automobilindustrie im Vordergrund. Das Ziel besteht darin, Lösungsansätze abzuleiten, die einen Einsatz hinsichtlich Laufzeiten und Ressourcenbedarf ermöglichen. Zu Beginn wird eine Vereinfachung der Formulierung motiviert, welche als Ausgangspunkt für algorithmische Betrachtungen dient. Zusätzliche Relaxierungen sowie die gezielte Ausnutzung der Problemstruktur ermöglichen weitere Laufzeitreduzierungen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein heuristischer Lösungsansatz vorgestellt, der für Instanzen aus dem realbetrieblichen Umfeld nutzbar ist. Abschließend werden eine alternative Formulierung und eine erweiterte Modellversion hergeleitet, um Optionen für eine verbesserte Ausschöpfung des Potenzials im konkreten Anwendungsfall aufzuzeigen bzw. einen erweiterten Blick auf vorhandene Handlungsalternativen für die Planung zu ermöglichen. Bevor jedoch im Folgenden auf die Implementierung und Lösung des Programms eingegangen wird, soll kurz die Testumgebung dargestellt werden, in welcher die Untersuchungen durchgeführt wurden.

### 7.1 Testumgebung und -daten für die numerischen Betrachtungen

Die numerischen Untersuchungen wurden unter dem Betriebssystem Microsoft Windows 7 Enterprise in der Version 6.1.7601 mit Service Pack 1 auf einem x64-basierten Fujitsu Celsius W550 durchgeführt. Es kam eine Prozessoreinheit Intel Xeon CPU E3-1270 v5 mit einer Taktfrequenz von 3,60 GHz auf 4 Kernen mit 8 logischen Prozessoren zum Einsatz bei einem installierten physikalischen Speicher von 32,0 GB. Sämtliche Modellvarianten wurden in der FICO Xpress Optimization Suite unter Xpress-IVE Version 1.24.12 64 bit in der Modellierungssprache Xpress-Mosel Version 4.0.3 implementiert und alle Testinstanzen mit dem Xpress-Optimizer Version 29.01.10 berechnet. (FICO, 2016a), (FICO, 2015), (FICO, 2016b), (FICO, 2016c)

Als Basis für die Testdaten lag ein Auszug der Produktionskapazitäten für den Presswerksverbund eines deutschen Automobilherstellers vor, welcher für die vorliegende Arbeit als virtueller Verbund genutzt wurde. Aus dem statischen Auszug an Stamm- und Betriebsdaten konnten für die Analysen in dieser Arbeit quasi-realistische Störfallszenarien abgeleitet werden. Der virtuelle Verbund besteht aus 4 Presswerken an den 4 unterschiedlichen Standorten  $S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}$  mit den 5 Maschinen  $M = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}$  für die Produktion der insgesamt 310 Bauteile  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{310}\}$  unter Verwendung der 171 Werkzeuge  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{171}\}$ . Die detaillierte Darstellung auf Ebene der einzelnen Standorte ergibt sich wie folgt: An den Standorten  $s_1$ ,  $s_2$  und  $s_3$  stehen im Normalbetrieb jeweils eine Maschine und am Standort  $s_4$  zwei Ma-



schinen zur Verfügung. Auf der Maschine  $m_1$  am Standort  $s_1$  werden mit den 28 Werkzeugen  $W_{m_1} = \{w_1, w_2, \dots, w_{28}\}$  die 49 verschiedenen Bauteile  $P_{m_1} = \{p_1, p_2, \dots, p_{49}\}$  gefertigt, die Anlage  $m_2$  am Standort  $s_2$  produziert die 69 unterschiedlichen Pressteile  $P_{m_2} = \{p_{50}, p_{51}, \dots, p_{118}\}$  mit den 42 Werkzeugen  $W_{m_2} = \{w_{29}, w_{30}, \dots, w_{70}\}$  und auf der Pressenlinie  $m_3$  am Standort  $s_3$  sind die 46 Werkzeuge  $W_{m_3} = \{w_{71}, w_{72}, \dots, w_{116}\}$  im Einsatz, um die 70 verschiedenen Bauteile  $P_{m_3} = \{p_{119}, p_{120}, \dots, p_{188}\}$  herzustellen. Am Standort  $s_4$  ist es strategisch vorgesehen auf der Maschine  $m_4$  mit den 24 Werkzeugen  $W_{m_4} = \{w_{117}, w_{118}, \dots, w_{140}\}$  die Menge an 52 verschiedenen Pressteilen  $P_{m_4} = \{p_{189}, p_{190}, \dots, p_{240}\}$  und auf der Maschine  $m_5$  mit den 31 Werkzeugen  $W_{m_5} = \{w_{141}, w_{142}, \dots, w_{171}\}$  die 70 unterschiedlichen Pressteile  $P_{m_5} = \{p_{241}, p_{242}, \dots, p_{310}\}$  zu fertigen, womit am Standort in Summe 122 Pressteile unter Einsatz von 55 Werkzeugen hergestellt werden.

Im Übrigen sind die exakten Parameterwerte für die weiteren Betrachtungen von nachrangiger Bedeutung, da zu Gunsten der Allgemeingültigkeit im Wesentlichen davon abstrahiert werden soll. Daher wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Aufstellung verzichtet, nichtsdestotrotz soll kurz in groben Zügen das verwendete Parametersetting umrissen werden.

Für die Untersuchungen in den folgenden Abschnitten wird die Dauer eines Zeitslots auf  $\tau = 60$  Minuten festgelegt. Die Installationsphasen  $v_{m,w}$ , die Werkzeuge vor ihrem produktiven Einsatz auf Maschinen durchlaufen müssen, ist gering im Vergleich zur Zeitslotlänge, sodass diese vernachlässigt werden. Die Mindestbelegzeit wird zu  $\mu = 2$  Zeitslots angenommen und die Zeitspanne, welche zur Vorbereitung von Werkzeugwechseln vorzuhalten ist, sei ebenfalls mit  $\lambda = 2$  Zeitslots gegeben. Des Weiteren werden die benötigten Zeitspannen  $\eta_{s_1, s_2, w}$  für Werkzeugverlagerungen als werkzeugunabhängig angenommen, sodass diese ausschließlich von den relativen Entfernungen der am Versand beteiligten Standorte abhängen. Selbiges gilt für die Kosten von Werkzeugverlagerungen  $\delta_{s_1, s_2, w}$  und die Aufwendungen für Bauteildistributionen  $\chi_{s_1, s_2}$  sowie für deren Dauer  $\xi_{s_1, s_2}$ , welche nur von den Entfernungen zwischen den Standorten abhängen und keine Abhängigkeit zu Bauteiletyp oder Werkzeug aufweisen. Die Kosten für Bauteilverluste  $\psi_{s,p}$  werden als konstant und somit weder als standort- noch bauteileabhängig angenommen. Die Lagerbestände  $\varphi_{s,p}$  und die Bauteilebedarfe  $\varepsilon_{s,p,t}$  werden aus dem Datenauszug der realen Produktion übernommen und die Sicherheitsbestände  $v_{s,p}$  gegebenenfalls an die initialen Lagerbestände gekoppelt gemeinschaftlich variiert. Dabei fallen Bedarfe stets an allen Standorten lediglich einmal täglich zu einem fest vorgegebenen Zeitpunkt an. Gleichermäßen sind die Behälterkapazitäten  $\kappa_p$  im Datenauszug gegeben. Die entsprechenden Kapazitäten  $\sigma_p$  der Transportmittel können mittels der zugehörigen Zuladegewichts- und Ladevolumenbeschränkungen sowie den vorliegenden Abmessungs- und Gewichtsinformationen von Bauteilen und

Behältern ermittelt werden. Dabei werden für den Transport von Werkzeugen und Bauteilen ausschließlich Lastkraftwagen betrachtet, da diese für Verlagerungen innerhalb des Verbunds als Transportmittel üblich sind. Die effektive Pressesteileausbringung  $\rho_{m,w}$  für Werkzeuge auf den strategisch vorgesehenen Maschinen ist ebenfalls im Auszug enthalten.  $\rho_{m,w}$  wird für die Betrachtungen als maschinenunabhängig angenommen und zudem wird unterstellt, dass für sämtliche Werkzeuge eine Verwendung auf allen Maschinen des Verbunds zulässig ist. Diese Annahme ist durchaus begründet, da der Maschinenpark homogen ist und es sich um nahezu baugleiche Anlagen handelt. Selbstverständlich ist in der betrieblichen Praxis eine Ertüchtigung für ein Werkzeug auf einer Maschine vorzunehmen, falls die entsprechende Werkzeug-Maschine-Kombination zur Bauteileherstellung genutzt werden soll. An dieser Stelle seien entsprechende Ertüchtigungsprozesse vorausgesetzt. Schließlich wird das Zeitfenster, innerhalb dessen ein Standort lediglich an einer Werkzeugverlagerung beteiligt sein darf, für alle Standorte gleichermaßen mit  $\omega_s = 12$  Zeitslots festgelegt. Physische Abhängigkeiten zwischen den Werkzeugen sowie Zusammenhänge im Sinne einer Variantenfertigung gehen ebenfalls aus den zur Verfügung gestellten Datensätzen hervor.

Abschließend bleibt anzumerken, dass die Logistikkosten  $\delta_{s_1,s_2,w}$  für Werkzeugverlagerungen die Kosten für Bauteildistributionen  $\chi_{s_1,s_2}$  deutlich übersteigen. Die anfallenden Kosten  $\psi_{s,p}$  bei auftretenden Fehlteilen wiederum sind um ein Vielfaches höher als die betrachteten Arten von Logistikkosten, sodass durch die Zielsetzung diesbezüglich folgende Priorisierung gegeben ist: Der Verlustfall bei der Bedarfsdeckung ist unter allen Umständen zu vermeiden. Hierfür müssen eventuell aufwendige Werkzeugverlagerungen in Betracht gezogen werden, ergänzend zur ohnehin vorgesehenen Bauteildistribution ins Netzwerk.

## 7.2 Adaption der Modellformulierung und Laufzeitanalysen

Der Schwerpunkt in diesem Abschnitt liegt in der Untersuchung der zugrunde liegenden Problemstruktur und der Ausnutzung realer Gegebenheiten, um die numerische Lösung des initialen Optimierungsprogramms zu beschleunigen.

Ruft man sich das Programm  $\mathfrak{P}_n$  erneut vor Augen, so hatte insbesondere die lediglich stückweise Linearität der Zielfunktion (O) zu einer Umformulierung (O') geführt, um die vollständige Linearität des Programms herzustellen. Dies wurde jedoch durch Einführung zusätzlicher Entscheidungsvariablen sowie der Restriktionsklasse (N-12) erkauft. In einem ersten Schritt soll daher eine Relaxierung des modifizierten Zielfunktional von  $\mathfrak{P}_n$  motiviert werden. Betrachtet man nämlich den Anteil  $\Lambda$  der logistischen Kosten für die Bauteildistribution innerhalb des Netzwerks, so wurde bereits bei dessen Formulierung eine vereinfachte Abbildung durch

die Betrachtung bauteilespezifisch isolierter Packungen vorgenommen. Diese Vereinfachung ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt der erheblichen Gewichtungsunterschiede und der Dominanz der Fehlteilekosten zulässig. Mit demselben Argument wird an dieser Stelle die Ganzzahligkeit von Packungen aufgegeben, wodurch die Gaußklammer  $\lceil \cdot \rceil$  entfällt und sich der Bauteilelogistikkostenanteil in der neuen Formulierung (B'') darstellt als:

$$(B'') \quad \Lambda'' := \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}}{\kappa_p \sigma_p}$$

Das Programm, welches sich aus  $\mathfrak{P}_n$  durch Ersetzen von  $\Lambda$  durch  $\Lambda''$  in der Zielfunktion (O) ergibt, wird im Weiteren mit  $\mathfrak{P}_1$  bezeichnet. Durch die mit dieser Relaxierung einhergehende Verringerung der Variablenanzahl im Modell und somit Reduktion der Komplexität ist eine erhebliche Verbesserung der Laufzeiten für die Optimierung zu erwarten.

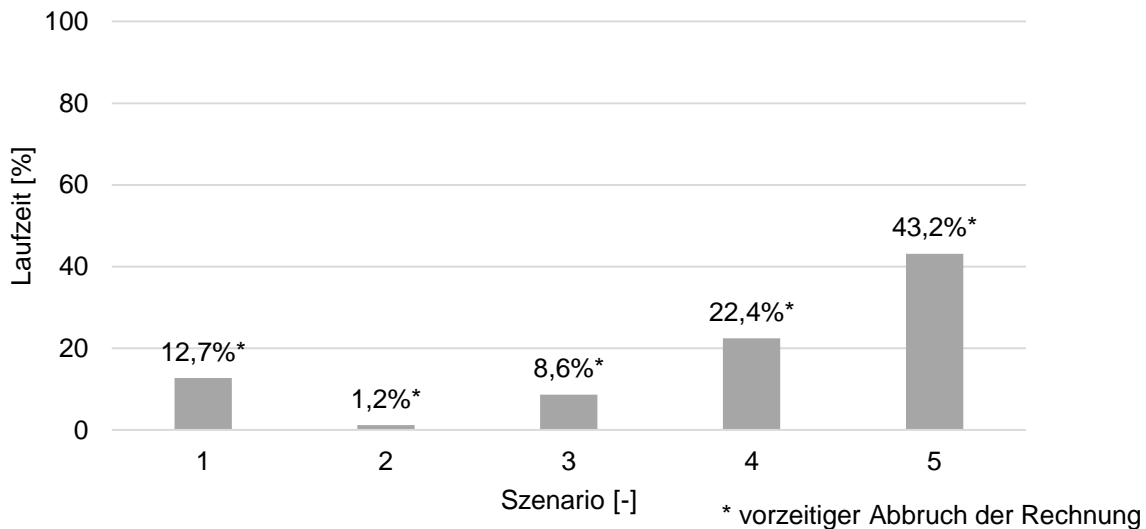


Abbildung 7.1: Laufzeitverhalten des Programms  $\mathfrak{P}_1$  im relativen Vergleich zu  $\mathfrak{P}_n$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_1$  geht gegenüber  $\mathfrak{P}_n$  mit signifikanten Laufzeitverbesserungen einher; die Laufzeiten einer exakten Lösung für  $\mathfrak{P}_1$  sind relativ zu denen für  $\mathfrak{P}_n$  dargestellt, wobei sogar sämtliche Berechnungen mit  $\mathfrak{P}_n$  nach der vorgegebenen Schranke von 3600 s vorzeitig abgebrochen wurden und damit die Zeiten für  $\mathfrak{P}_1$  lediglich relativ zur Abbruchzeit aufgetragen sind

Die dokumentierten Laufzeiten in Abbildung 7.1 für die verschiedenen Szenarien  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  bestätigen die Erwartungshaltung, dass sich die Lösungsfindung für die relaxierte Version  $\mathfrak{P}_1$  im Vergleich zu  $\mathfrak{P}_n$  erheblich schneller vollzieht. So konnte  $\mathfrak{P}_n$  für sämtliche betrachteten Testszenarien nicht innerhalb der vorgegebenen maximalen Laufzeit von 3600 s zur Optimalität gelöst werden und die Berechnungen wurden vorzeitig abgebrochen. Die benötigten Rechenzeiten zur exakten Lösung des Programms  $\mathfrak{P}_1$  sind dabei relativ zu den Laufzeiten für  $\mathfrak{P}_n$  dargestellt,

wobei als Laufzeiten für  $\mathfrak{P}_n$  jeweils die 3600 s bis Rechnungsabbruch für die Gegenüberstellung herangezogen wurden. Es ist offensichtlich, dass für  $\mathfrak{P}_1$  eine exakte Lösung mit deutlich verringerten Laufzeiten möglich war.<sup>4</sup>

Hinsichtlich der Programmlaufzeiten ist die Lösungsentwicklung während des Berechnungsvorgangs von Interesse. Insbesondere spielen dabei der effektive Fortschritt in den zulässigen Lösungen sowie den unteren Schranken an den Zielfunktionswert eine gewichtige Rolle. Ein Vergleich der zum Zeitpunkt  $t$  besten verfügbaren oberen und unteren Schranken,  $UB(t)$  sowie  $LB(t)$ , kann ohne Kenntnis des Optimalwerts einen relativen Maximalabstand  $GAP(t)$  zwischen ebendiesem und dem Zielfunktionswert der besten verfügbaren zulässigen Lösung  $UB(t)$  während der Minimierung liefern. Die sogenannte relative Optimalitätslücke  $GAP(t)$  zum Zeitpunkt  $t$  der Berechnung lässt sich hierbei für ein Minimierungsproblem folgendermaßen angeben:

$$GAP(t) = \frac{UB(t) - LB(t)}{UB(t)}$$

Die  $GAP$ -Propagation ist nicht unerheblich bei der Lösung von Optimierungsprogrammen, bietet sie doch eine sinnvolle Möglichkeit zur Definition eines Abbruchkriteriums.

In Abbildung 7.2 ist die  $GAP$ -Propagation über die Laufzeiten der Programme  $\mathfrak{P}_n$  und  $\mathfrak{P}_1$  für die unterschiedlichen Testszenarien dargestellt, woraus sich schließen lässt, dass neben den reduzierten Laufzeiten zur Lösung des Programms  $\mathfrak{P}_1$  in der Regel auch der Lösungsfortschritt im Vergleich zu  $\mathfrak{P}_n$  beschleunigt vorstättgeht. Selbstverständlich existieren Ausnahmen, wie die Testszenarien 1 oder 4 belegen, für welche sich beispielsweise die Optimalitätslücke zumindest temporär beim Modell  $\mathfrak{P}_n$  besser darstellt. Insgesamt stellt sich jedoch für sämtliche Testfälle das Modell  $\mathfrak{P}_1$  aufgrund der signifikant reduzierten Laufzeiten und der Tatsache, dass die Szenarien in der vorgegebenen Zeit zur Optimalität gelöst werden konnten, als numerisch geeigneter zur Lösungsfindung heraus.

Im Folgenden soll der Fehler beleuchtet werden, welcher mit der Modellreformulierung einhergeht. Sei dazu  $\mathcal{L}(\mathfrak{P}_n)$  der Raum aller zulässigen Lösungen für  $\mathfrak{P}_n$  und sei zudem eine Abbildung  $g$  gegeben, welche eine optimale Lösung  $\pi^*$  zum Problem  $\mathfrak{P}_1$  in eine zulässige Lösung  $\pi^+$  für das Problem  $\mathfrak{P}_n$  zu transformieren vermöge:

$$g : \pi^* = (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^*, z^*)^\top \mapsto \pi^+ = (x^+, \tilde{x}^+, y^+, \tilde{y}^+, u^+, z^+, \hat{z}^+)^\top$$

$$g(\pi^*) = \pi^+ \in \mathcal{L}(\mathfrak{P}_n)$$

<sup>4</sup>Die Lösungsfindung erfolgte deterministisch und die Schwankungen in den Laufzeiten waren für sämtliche Rechenläufe vernachlässigbar, sodass auf eine explizite Fehlerbetrachtung verzichtet wird. Im Folgenden war die Lösungsfindung, soweit nicht anders angegeben, für sämtliche Berechnungen auf eine Laufzeit von 3600 s beschränkt, nach welcher ein automatisierter Abbruch erfolgte.

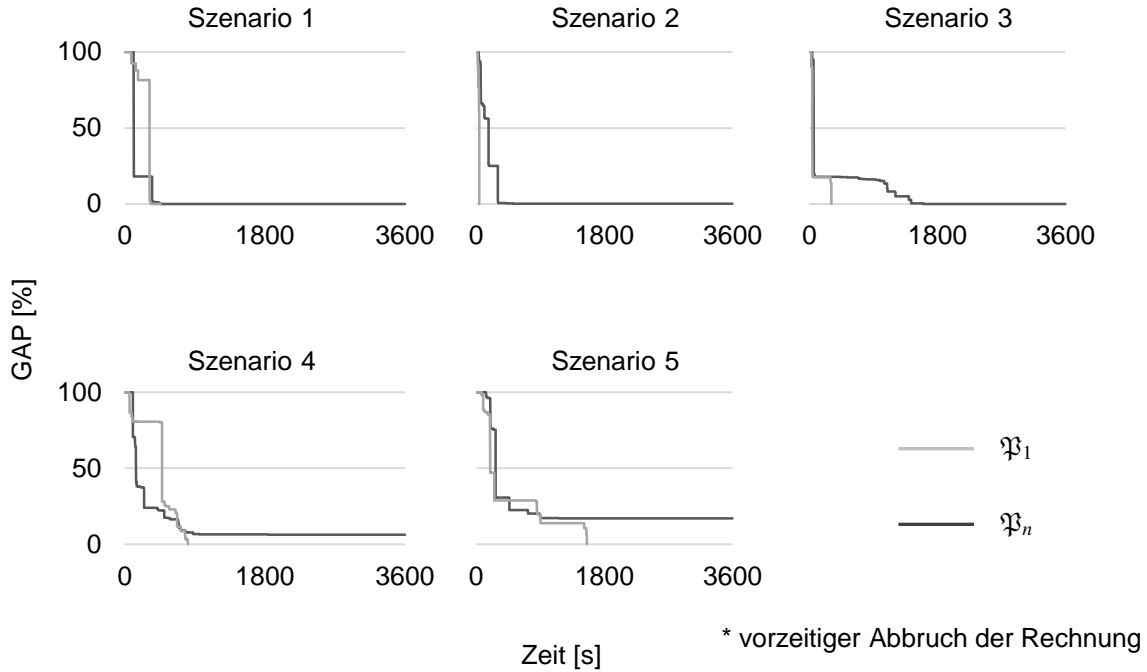


Abbildung 7.2: *GAP-Propagation während der Lösungsfindung für  $\mathfrak{P}_n$  und  $\mathfrak{P}_1$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_1$  weist gegenüber  $\mathfrak{P}_n$  eine deutliche Verbesserung im Lösungsfortschritt auf, wobei sogar für sämtliche Berechnungen mit  $\mathfrak{P}_n$  nach der vorgegebenen Schranke von 3600 s noch keine Optimallösung vorlag*

Dabei sei  $x^*$  eine geordnete Darstellung der Klasse an binären Entscheidungsvariablen  $x_{m,w,t}$  zur Modellierung der Produktionsphase in Spaltenvektornotation; analog dazu seien in  $\tilde{x}^*$ ,  $y^*$ ,  $\tilde{y}^*$ ,  $u^*$ ,  $z^*$ ,  $x^+$ ,  $\tilde{x}^+$ ,  $y^+$ ,  $\tilde{y}^+$ ,  $u^+$ ,  $z^+$  sowie  $\hat{z}^+$  die entsprechenden Variablenklassen der Modelle  $\mathfrak{P}_n$  und  $\mathfrak{P}_1$  zusammengefasst. Eine mögliche Konstruktion einer solchen Abbildung  $g$  ist durch die folgende Vorschrift gegeben:

$$g : (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^*, z^*)^\top \mapsto (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^*, z^*, \hat{z}^+)^\top$$

Dabei werden die Komponenten des Vektors  $\hat{z}^+$  folgendermaßen aus den Einträgen in  $z^*$  berechnet:

$$\hat{z}_{s_1, s_2, t}^+ = \left\lceil \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right\rceil$$

Die Zulässigkeit der Lösung  $g(\pi^*) = \pi^+$  für das Programm  $\mathfrak{P}_n$  ist noch zu zeigen. Die Restriktionen (C-1)–(C-11) sind dabei offensichtlich weiterhin gültig, womit lediglich die Zulässigkeit hinsichtlich der Bedingungen (N-12) zu prüfen ist. Deren Gültigkeit kann jedoch nach Konstruktion von  $\hat{z}^+$  direkt gefolgert werden:

$$\sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \leq \left\lceil \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right\rceil \leq \hat{z}_{s_1, s_2, t}^+$$

Damit ist es möglich, für den maximalen Unterschied  $\varepsilon$  zwischen dem Zielfunktionswert  $opt(\mathfrak{P}_n)$  im Optimum von  $\mathfrak{P}_n$  sowie dem Zielfunktionswert  $opt(\mathfrak{P}_1) = \mathfrak{P}_1(\pi^*)$  von  $\mathfrak{P}_1$ , der bei der vorgenannten Relaxierung auftreten kann, folgende Abschätzung anzugeben:

$$\varepsilon = opt(\mathfrak{P}_n) - \mathfrak{P}_1(\pi^*) \leq \mathfrak{P}_n(\pi^+) - \mathfrak{P}_1(\pi^*)$$

Für diese Abschätzung wurde die Tatsache verwendet, dass der Zielfunktionswert einer zulässigen Lösung für ein Minimierungsproblem stets eine obere Schranke an den Zielfunktionswert im Optimum darstellt und somit gilt:

$$opt(\mathfrak{P}_n) \leq \mathfrak{P}_n(\pi^+)$$

Verwendet man zudem die gegebene Abbildungsvorschrift  $g : g(\pi^*) = \pi^+$ , so lässt sich die Fehlerabschätzung weiter umformulieren:

$$\begin{aligned} \varepsilon &\leq \left( \Omega(\pi^+) + \Theta(\pi^+) + \Lambda'(\pi^+) \right) - \left( \Omega(\pi^*) + \Theta(\pi^*) + \Lambda''(\pi^*) \right) \\ &= \left( \Omega(\pi^*) + \Theta(\pi^*) + \Lambda'(\pi^+) \right) - \left( \Omega(\pi^*) + \Theta(\pi^*) + \Lambda''(\pi^*) \right) \\ &= \Lambda'(\pi^+) - \Lambda''(\pi^*) \\ &= \left( \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \hat{z}_{s_1, s_2, t}^+ \right) - \left( \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right) \\ &= \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \left( \left[ \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right] - \left( \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right) \right) \\ &\leq \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \left( \left( \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right) + 1 - \left( \sum_{p \in P} \frac{z_{s_1, s_2, p, t}^*}{\kappa_p \sigma_p} \right) \right) \\ &= \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \sum_{t \in T} \chi_{s_1, s_2} \\ &= |T| \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \chi_{s_1, s_2} \end{aligned}$$

Der maximale Fehler zwischen den Modellen  $\mathfrak{P}_n$  und  $\mathfrak{P}_1$  ist somit deterministisch beschränkt. Betrachtet man zudem die erzielten Lösungen der beiden Modelle miteinander, so unterstützen diese die getroffene These, dass der Fehler, der durch die Relaxierung in  $\mathfrak{P}_1$  mit der Begründung der Dominanz der Kosten für Fehlteile billigend in Kauf genommen wurde, tatsächlich vernachlässigbar ist. Dazu sind in Abbildung 7.3 die Zielfunktionswerte für  $\mathfrak{P}_1$  in Relation zu den Gesamtkosten für  $\mathfrak{P}_n$  aufgetragen und unterstützen auch hier die Annahme vernachlässigbarer Abweichungen in den Gesamtkosten.

In Abbildung 7.4 ist zudem die Abweichung in den berechneten Gesamtkosten relativ zur Fehlerschranke  $\varepsilon$  dargestellt und auch hier zeigt sich, dass die auftretenden Differenzen deutlich unter dem theoretischen, maximalen Fehler liegen.

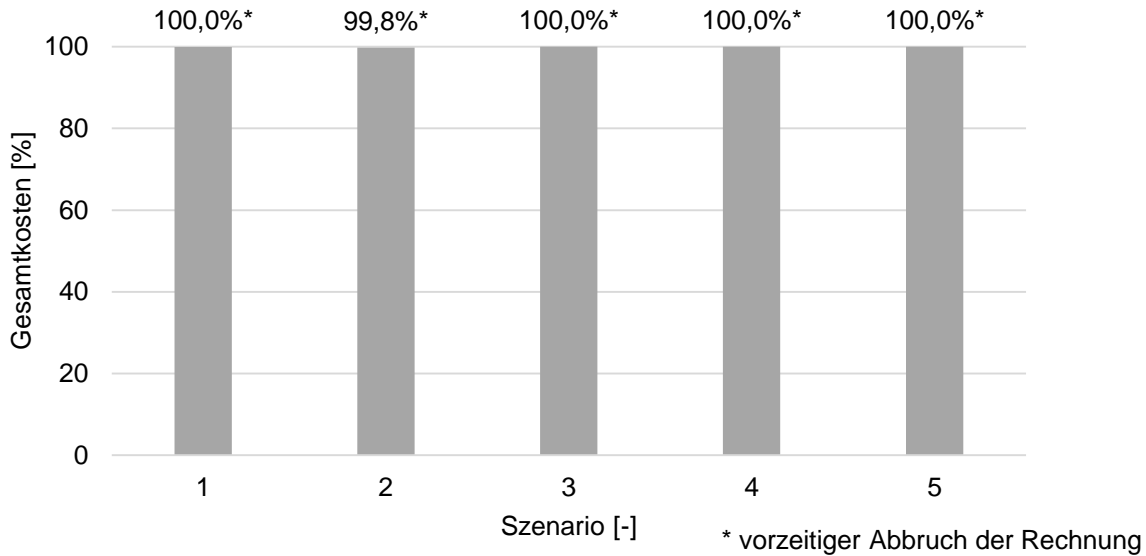


Abbildung 7.3: Unterschied in den Zielfunktionswerten des Programms  $\mathfrak{P}_1$  relativ zu  $\mathfrak{P}_n$ : die Zielfunktionswerte für  $\mathfrak{P}_1$  sind in Relation zu denen für  $\mathfrak{P}_n$  dargestellt, wobei sich der Unterschied in den Gesamtkosten als vernachlässigbar darstellt

Zusätzlich besitzen die Programme die Eigenschaft, dass mit jeder Lösung eine uni-direktionale Bauteildistribution ermittelt wird oder sich zumindest in einem nachgelagerten Schritt eine solche konstruieren lässt. Uni-direktionale Bauteildistribution bedeutet in diesem Rahmen, dass zum Zeitslot  $t$  zwischen zwei Standorten  $s_1$  und  $s_2$  für Bauteile des Typs  $p$  höchstens ein Transportauftrag entweder von  $s_1$  nach  $s_2$  oder aber von  $s_2$  nach  $s_1$  vorliegt. Liege demnach eine Lösung vor, welche keine uni-direktionale Bauteildistribution vorsieht, so lassen sich offensichtlich unnötige Bauteileverschiebungen innerhalb des Netzwerks detektieren und entsprechend komprimieren. Mit der für die vorliegenden Testdaten gültigen Symmetrie  $\chi_{s_1,s_2} = \chi_{s_2,s_1}$  und der trivialerweise gültigen Annahme  $\chi_{s,s} = 0$  ergibt sich damit für die untersuchte Problemstellung im Folgenden:

$$\varepsilon \leq \frac{1}{2}|T| \sum_{s_1 \in S} \sum_{s_2 \in S} \chi_{s_1,s_2}$$

Zudem werden Bauteiletransporte in der Betriebspraxis gepulkt und somit wäre lediglich in einer begrenzten Menge an Zeitslots des betrachteten Zeithorizonts eine Distribution vorzusehen, wodurch anzunehmen ist, dass der Unterschied im konkreten Anwendungsfall in einem vertretbaren Bereich liegt. Insbesondere wenn man zusätzlich die Dominanz der Kosten für Bauteilverluste bedenkt, erscheint in Summe die Reformulierung zu  $\mathfrak{P}_1$  zulässig.

Zusammen mit den Betrachtungen zu den Zielfunktionswerten wird aus dieser Darstellung ersichtlich, dass nahezu kein Unterschied zwischen den Lösungen der Szenarien für die beiden Programme existiert und die Abweichung aufgrund der Relaxierung damit tatsächlich vernachlässigbar ist. Die signifikanten Laufzeitverbesserungen bei nahezu gleichbleibender Lösungsgüte

motivieren die Verwendung von  $\mathfrak{P}_1$  anstatt  $\mathfrak{P}_n$ , sodass dieses Programm als Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen herangezogen werden soll.

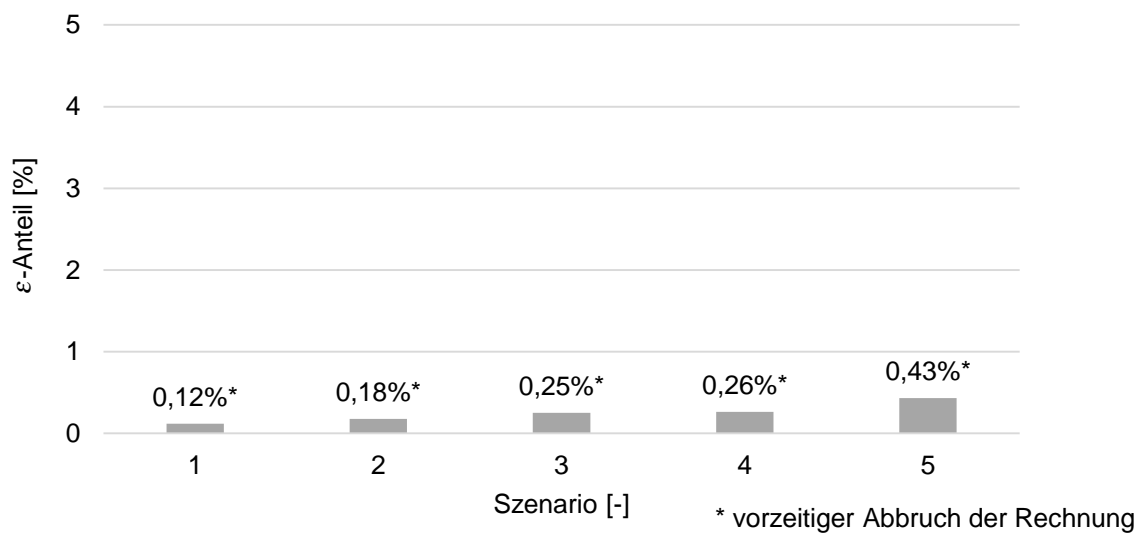


Abbildung 7.4: Auftretender Fehler zwischen den Programmen  $\mathfrak{P}_1$  und  $\mathfrak{P}_n$  in Relation zum theoretischen Fehler  $\varepsilon$ : die Abweichung in den berechneten Gesamtkosten ist relativ zur Fehlerschranke  $\varepsilon$  dargestellt und zeigt vernachlässigbare real auftretende Fehler zwischen den Programmen

In einem nächsten Schritt wird eine weitere Vereinfachung am Modell  $\mathfrak{P}_1$  vorgenommen. Für die Klassen an Entscheidungsvariablen zur Modellierung von Bauteiltransporten sowie Fehlteilermengen werden die Ganzzahligkeitsbedingungen fallen gelassen und durch folgende relaxierte Formulierungen ersetzt:

$$\begin{aligned} \forall s_1, s_2 \in S, \forall p \in P, \forall t \in T: & \quad z_{s_1, s_2, p, t} \in \mathbb{R}_0^+ \\ \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T: & \quad u_{s, p, t} \in \mathbb{R}_0^+ \end{aligned}$$

Das Modell, welches sich durch diese Modifikation am Programm  $\mathfrak{P}_1$  ergibt, sei im Weiteren mit  $\mathfrak{P}_2$  bezeichnet. Die Motivation einer solchen Relaxierung liegt in der Tatsache begründet, dass die realbetriebliche Produktion im übertragenen Sinne atmet. Ebenso wie Betriebsdaten und Produktionskennzahlen gewissen Schwankungen unterliegen, ist eine exakte Abarbeitung von fixierten Produktionsprogrammen in der Praxis kaum realisierbar. Vielmehr sind gewisse Abweichungen vom Sollablauf nicht zu vermeiden, können jedoch in der Regel durch die gewisse Elastizität abgefangen werden, welche die Betriebspraxis aufweist. Fehlen beispielsweise bei der Bearbeitung eines Loses zum Auftragsende einige wenige Bauteile, so wird selten die Losbearbeitung nach exakt der vorab festgelegten Produktionszeit unvollständig beendet, vielmehr wird die Belegzeit um die benötigte Dauer ausgeweitet, um das Los zu komplettieren. Daher erscheint es kaum sinnvoll, bei der Berechnung von Störfallszenarien für das vorliegende Problem



der Überbrückung eines auftretenden Kapazitätsengpasses im Presswerksverbund auf einer zu gegebenen Parametern exakten Bestimmung der Bauteilmengen für die Distribution innerhalb des betrachteten Produktionsnetzwerks zu beharren. Genauso wenig hilfreich ist eine strikte Fixierung auf die bis auf das Einzelteil exakt berechneten Fehlteilermengen. Beide Ergebnisgrößen sind abhängig von der Eingabedatenqualität und deren Korrektheit über den berechneten Zeithorizont. Daher und aufgrund der beschriebenen Elastizität in der Produktionspraxis erscheint die Relaxierung des Modells  $\mathfrak{P}_1$  zu  $\mathfrak{P}_2$  plausibel.

Des Weiteren lässt sich sogar zeigen, dass aus einer gegebenen optimalen Lösung zu  $\mathfrak{P}_2$  in polynomieller Zeit eine zulässige Lösung für  $\mathfrak{P}_1$  konstruiert werden kann, welche zudem für  $\mathfrak{P}_1$  optimal ist. Sei dazu  $\pi^* = (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^*, z^*)$  eine zulässige Lösung zum Programm  $\mathfrak{P}_2$ . Die Lösung  $\pi^*$  enthält eine für  $\mathfrak{P}_1$  ebenfalls zulässige Maschinenbelegung sowie eine zulässige Planung hinsichtlich Werkzeugtransporten und -standorten, denn die entsprechenden Variablen sind von der Relaxierung unberührt und daher ganzzahlig. Es soll gezeigt werden, dass bei festem Lösungsanteil  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  die verbleibenden, relaxierten Variablen als Teilproblem der Verteilung von Fehlbeständen und Bauteilen aufgefasst werden können. Das Subproblem besteht darin, die Fehlteile- und Bauteiledistributionskosten in der Zielfunktion unter den Nebenbedingungen (C-11) zu minimieren und lässt eine Formulierung als Netzwerk-Fluss-Problem zu. Konkret kann für die Bauteiledistribution und Fehlteilermengenbestimmung eine äquivalente Formulierung als Instanz des wohlbekanntes Min-Cost-Flow-Problems (*MCFP*) angegeben werden.

Veranschaulichend erfolgt hierzu zunächst eine explizite Konstruktion eines gerichteten Graphen  $G(V, E)$  mit Knotenmenge  $V$  und Kantenmenge  $E$  zur Beschreibung eines entsprechend gerichteten Netzwerks. Dazu sei im Folgenden mit  $X_{s_i, p_j, t}$  die Menge der am Standort  $s_i$  im Zeitslot  $t$  produzierten Produkte  $p_j$  beschrieben:

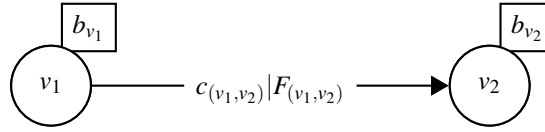
$$X_{s_i, p_j, t} := \sum_{w \in W_{p_j}} \sum_{m \in M_{s_i}} \tau \rho_{p_i, w} x_{m, w, t}^*$$

Hierbei ist  $x_{m, w, t}^*$  der entsprechende Lösungsanteil aus einer zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$ . Mit dem entsprechenden Lösungsanteil  $u_{s_i, p_j, t}^*$  aus  $\pi^*$  kann damit zusätzlich ein Bilanzterm  $\Delta_{p_j}$  für ein Produkt  $p_j$  über alle Standorte definiert werden:

$$\Delta_{p_j} := \sum_{s_i \in S} \left( \phi'_{s_i} + \sum_{t \in T} \left( u_{s_i, p_j, t}^* - \varepsilon_{s_i, p_j, t} + X_{s_i, p_j, t-1} \right) \right)$$

Zudem seien mit  $c_{(v_1, v_2)}$  die Kosten pro Einheit, die bei einem Fluss vom Knoten  $v_1$  zum Knoten  $v_2$  über die Kante  $(v_1, v_2)$  anfallen, und durch  $F_{(v_1, v_2)}$  die Kapazitäten bzw. Beschränkungen an einen Fluss über die Kante  $(v_1, v_2)$  bezeichnet. Durch  $b_{v_1}$  sei die Liefermenge im Knoten  $v_1$  beschrieben, sodass  $b_{v_1} > 0$  einen Versorgungsknoten und analog dazu  $b_{v_1} < 0$  einen Bedarfsknoten  $v_1$

beschreibt. Für den Fall  $b_{v_1} = 0$  stellt der Knoten  $v_1$  einen Umschlagsknoten dar, womit sich in der Darstellung insgesamt folgende Konvention ergibt:



Zu Beginn sei ein vereinfachtes Szenario  $\mathfrak{S}_1$  mit zwei Produkten  $P = \{p_1, p_2\}$  und zwei Standorten  $S = \{s_1, s_2\}$  über einen Zeithorizont von nur einem einzigen Zeitslot  $T = \{1\}$  angenommen. Damit liegen vorerst lediglich Bedarfe zu Beginn des Zeithorizonts vor, welche vollständig aus den Lagerbeständen am jeweiligen Standort gedeckt oder als Fehlteilmenge deklariert werden müssen. Der Beitrag aus der Teileproduktion greift hier noch nicht und wird dabei vernachlässigt, ebenso wie die Bauteiledistribution zwischen den Standorten. Insgesamt kann damit zu einer gegebenen, zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{B}_2$  zum Szenario  $\mathfrak{S}_1$  der in Abbildung 7.5 dargestellte Graph  $G_{\mathfrak{S}_1}(V_{\mathfrak{S}_1}, E_{\mathfrak{S}_1})$  als Netzwerk-Fluss-Instanz entsprechend konstruiert werden.

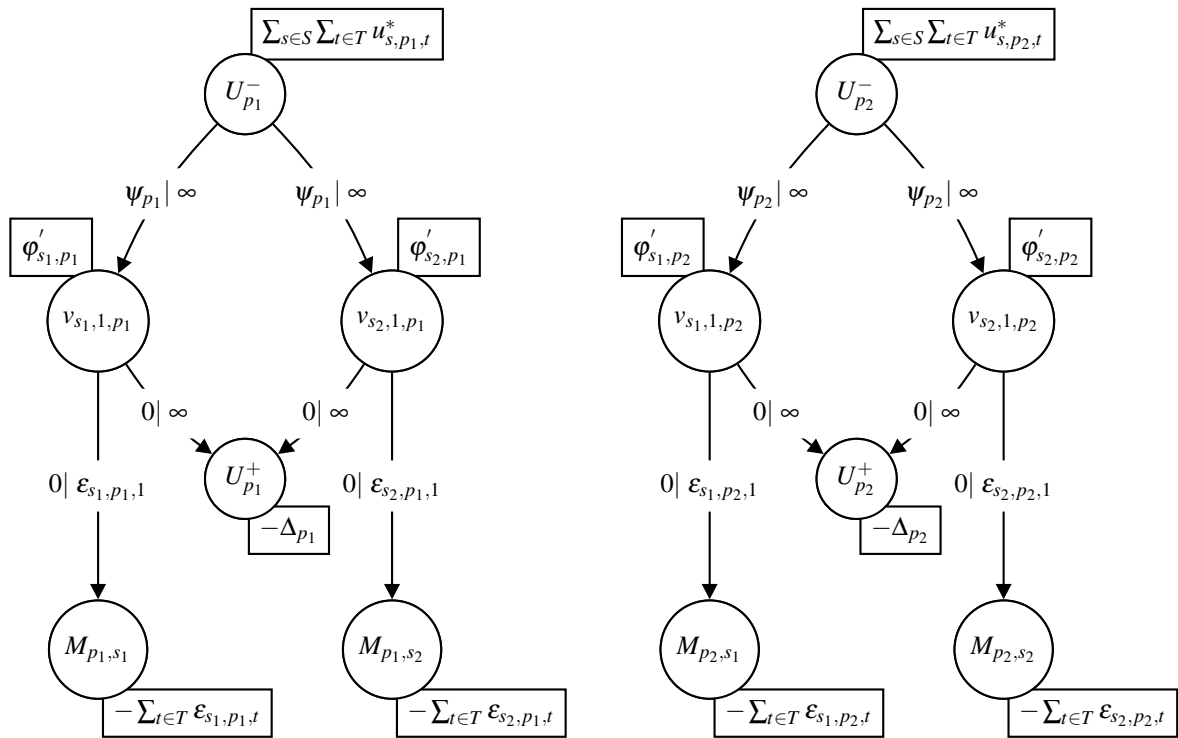


Abbildung 7.5: Netzwerk-Fluss-Instanz  $G_{\mathfrak{S}_1}(V_{\mathfrak{S}_1}, E_{\mathfrak{S}_1})$  zur zulässigen Lösung  $\pi^*$  von  $\mathfrak{B}_2$  für das Szenario  $\mathfrak{S}_1$  mit  $T = \{1\}$

Dabei besteht  $V_{\mathfrak{S}_1}$  aus den folgenden Teilknotenmengen:

$$\begin{aligned}
 \text{Fehlteileknoten:} & \quad V_1 = \{U_p^- \mid p \in P\} \\
 \text{Standortknoten:} & \quad V_2 = \{v_{s,t,p} \mid s \in S, t \in T, p \in P\} \\
 \text{Überlaufknoten:} & \quad V_3 = \{U_p^+ \mid p \in P\} \\
 \text{Bedarfsknoten:} & \quad V_4 = \{M_{p,s} \mid p \in P, s \in S\}
 \end{aligned}$$

Mit den Fehlteilenknoten werden die virtuellen Notversorger modelliert, über welche sich gegebenenfalls Fehlteile in entsprechender Menge zur Bedarfsdeckung bei Unterversorgung beziehen lassen, wohingegen die Standortknoten die jeweiligen Standorte mit ihren zugehörigen Bauteilebeständen beschreiben, die zur Bedarfsdeckung heranzuziehen sind. Schließlich werden die Bedarfe durch die Bedarfsknoten abgebildet, welche entsprechend zu versorgen sind. Die Überlaufknotenmenge dient dazu, etwaige im Netzwerk anfallenden Überschüsse an Bauteilen aufzunehmen. Entsprechend setzt sich die Kantenmenge  $E_{\mathfrak{S}_1}$  aus folgenden Teilen zusammen:

$$\begin{aligned} \text{Fehlbedarfskanten: } E_1 &= \{e_{p,s} = (U_p^-, v_{s,1,p}) \mid p \in P, s \in S\} \\ \text{Überlaufkanten: } E_2 &= \{e_{p,s} = (v_{s,\Phi,p}, U_p^+) \mid p \in P, s \in S\} \\ \text{Bedarfskanten: } E_3 &= \{e_{p,s,t} = (v_{s,t,p}, M_{p,s}) \mid p \in P, s \in S, t \in T\} \end{aligned}$$

Für dieses vereinfachte Szenario werden die Bedarfsknoten von den Standortknoten über die Bedarfskanten versorgt, über welche der Zugriff auf die Lagerbestände an den entsprechenden Standorten erfolgt; es sei nochmals erwähnt, dass Produktionsbeiträge für dieses Szenario noch nicht zu berücksichtigen sind. Des Weiteren ist gegebenenfalls eine Versorgung über die Fehlteilenkanten von den Fehlteilenknoten aus vorgesehen. Die Überlaufknoten hingegen nehmen sämtliche im Netzwerk verbleibenden Überschüsse über die Überlaufkanten auf. Die entsprechenden Versorgungs- und Bedarfsmengen an den einzelnen Knoten sind mit der zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$  entsprechend determiniert, ebenso wie die Kapazitäten und Transportkosten direkt auf die Kantenmengen entsprechend übertragen werden.

Aus dieser Darstellung geht hervor, dass eine Dekomposition des Problems bezüglich der unterschiedlichen Produkte möglich ist. Für jedes Produkt kann eine Formulierung als unabhängiges Teilproblem vorgenommen werden, sodass im Folgenden ein Szenario  $\mathfrak{S}_2$  mit zwei Standorten  $S = \{s_1, s_2\}$  über einen Zeithorizont von drei Zeitslots  $T = \{1, 2, 3\}$  angenommen sei. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit können dabei die Betrachtungen auf nur ein Produkt  $P = \{p_1\}$  begrenzt werden. Die Dauer sämtlicher Bauteiltransporte zwischen den Standorten soll zudem einen Zeitslot betragen, womit Beiträge aus der Teileproduktion und eine entsprechende Bauteiledistribution im Netzwerk zur Bedarfsdeckung zu berücksichtigen sind, und beschreibe  $k_{s_1, s_2, p_1}$  die Kosten für den Transport eines Bauteils der Art  $p_1$  vom Standort  $s_1$  nach  $s_2$ :

$$k_{s_1, s_2, p_1} := \frac{\chi_{s_1, s_2}}{\kappa_{p_1} \sigma_{p_1}}$$

Damit kann für  $\mathfrak{S}_2$  mit einer gegebenen, zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$  eine Netzwerk-Fluss-Instanz durch die Konstruktion eines Graphen  $G_{\mathfrak{S}_2}(V_{\mathfrak{S}_2}, E_{\mathfrak{S}_2})$ , wie er in Abbildung 7.6 dargestellt ist, abgeleitet werden.

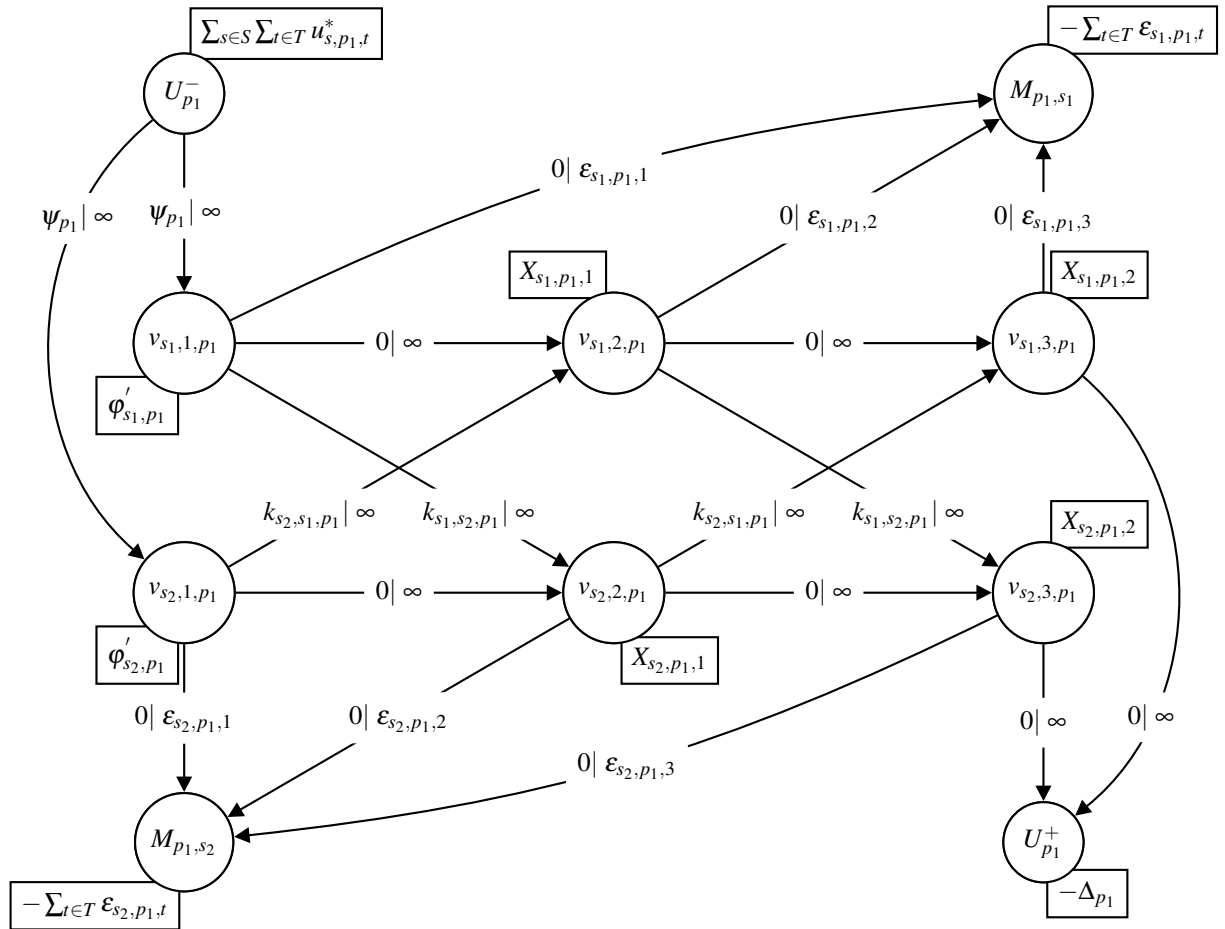


Abbildung 7.6: Netzwerk-Fluss-Instanz  $G_{\mathfrak{S}_2}(V_{\mathfrak{S}_2}, E_{\mathfrak{S}_2})$  zur zulässigen Lösung  $\pi^*$  von  $\mathfrak{P}_2$  für das Szenario  $\mathfrak{S}_2$  mit  $T = \{1, 2, 3\}$

Die Knotenmenge  $V_{\mathfrak{S}_2}$  ergibt sich mit einer entsprechenden Ausweitung der Standortknotenmenge  $V_2$  aufgrund des verlängerten Zeithorizonts analog zu  $V_{\mathfrak{S}_1}$ . Die Kantenmenge  $E_{\mathfrak{S}_2}$  hingegen bedarf im Vergleich zu  $E_{\mathfrak{S}_1}$  einer Erweiterung der Mengen  $E_1$ ,  $E_2$  und  $E_3$  um die Lagerkanten  $E_4$  und die Transportkanten  $E_5$ , welche die Bauteiledistribution innerhalb des Verbunds abbilden:

$$\text{Lagerkanten: } E_4 = \{e_{p,s,t} = (v_{s,t,p}, v_{s,t+1,p}) \mid p \in P, s \in S, t \in T \setminus \{|T|\}\}$$

$$\text{Transportkanten: } E_5 = \{e_{p,s_1,s_2,t} = (v_{s_1,t,p}, v_{s_2,t+\xi_{s_1,s_2,p}}) \mid p \in P, s_1, s_2 \in S, s_1 \neq s_2, t \in \{1, \dots, |T| - \xi_{s_1,s_2}\}\}$$

Über die Lagerkanten werden die Bauteilebestände eines entsprechenden Standorts in den nächsten Zeitslot transferiert. Die Transportkanten hingegen spiegeln in diesem Zusammenhang die Bauteiledistribution zwischen Standorten wider, wobei entsprechend den Transportzeiten nur für den Zeithorizont relevante Kanten zu berücksichtigen sind. Die Fehlteilieknoten versorgen initial über die Fehlteiliekanten ausschließlich die Standortknoten des ersten Zeitslots mit der benötigten Menge an Bauteilen, um eine Bedarfsdeckung sicherzustellen. Die Zulässigkeit einer solchen Komprimierung der standortspezifischen, virtuellen Fehlteilerversorgung auf den

ersten Zeitslot ist aufgrund der Zeitinvarianz der Fehlteilekosten offensichtlich. Ebenso werden Überschüsse erst zum Ende des Zeithorizonts über die Überlaufkanten an die Überlaufknoten abgegeben. Hingegen muss über die Bedarfskanten in jedem Zeitslot und von jedem Standort aus die Bedarfsdeckung in den Bedarfsknoten erfolgen. Erneut sind die entsprechenden Versorgungs- und Bedarfsmengen an den einzelnen Knoten mit einer zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$  determiniert, wobei hier nun selbstverständlich Beiträge aus der Produktion einfließen und Standortknoten somit ab dem zweiten Zeitslot als Versorger auftreten. Zusammen mit den initialen Beiträgen der Fehlteileknoten über die Fehlteilekanten sowie den Lagerbeständen zum ersten Zeitslot bilden die Lagerkanten im Zusammenspiel mit den Standortknoten die Bauteilebestände über den Zeithorizont für die jeweiligen Standorte ab. Die Kapazitäten und Transportkosten werden erneut direkt entsprechend auf die Kantenmengen übertragen.

Mit diesen intuitiv abgeleiteten Beschreibungen der Knoten- und Kantenmengen sowie deren Zusammenhängen kann zu gegebener Produktion  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  einer zulässigen Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$  ein gerichteter Graph  $G(V, E)$  als Netzwerk-Fluss-Problem abgeleitet werden. Mit  $f_e^i$ , dem Fluss über die Kante  $e \in E_i$ , kann für beliebige, allgemeine Szenarien folgende Formulierung  $\mathfrak{P}_{MCF}$  einer *MCFP*-Netzwerkinstanz erfolgen:

$$(M-0) \quad \min \sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^1 \psi_{p,s} + \sum_{e_{p,s_1,s_2,t} \in E_5} f_{e_{p,s_1,s_2,t}}^5 k_{s_1,s_2,p}$$

$$\text{u. d. N. } (M-1) \quad \forall p \in P: \quad \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* = \sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^1$$

$$(M-2) \quad \forall p \in P, \forall s \in S:$$

$$\phi'_{s,p} = \sum_{e_{p,s,1} \in E_3} f_{e_{p,s,1}}^3 + \sum_{e_{p,s,1} \in E_4} f_{e_{p,s,1}}^4 + \sum_{e_{p,s,l,1} \in E_5} f_{e_{p,s,l,1}}^5 - \sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^1$$

$$(M-3) \quad \forall p \in P, \forall s \in S, \forall t \in T \setminus \{1, |T|\}:$$

$$\begin{aligned} X_{s,p,t-1} &= \sum_{e_{p,s,t} \in E_3} f_{e_{p,s,t}}^3 + \sum_{e_{p,s,t} \in E_4} f_{e_{p,s,t}}^4 + \sum_{e_{p,s,l,t} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t}}^5 \\ &\quad - \sum_{e_{p,s,t-1} \in E_4} f_{e_{p,s,t-1}}^4 - \sum_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}}}^5 \end{aligned}$$

$$(M-4) \quad \forall p \in P, \forall s \in S:$$

$$\begin{aligned} X_{s,p,|T|-1} &= \sum_{e_{p,s,|T|} \in E_3} f_{e_{p,s,|T|}}^3 + \sum_{e_{p,s} \in E_2} f_{e_{p,s}}^2 - \sum_{e_{p,s,|T|-1} \in E_4} f_{e_{p,s,|T|-1}}^4 \\ &\quad - \sum_{e_{p,s,l,|T|-\xi_{s,l}} \in E_5} f_{e_{p,s,l,|T|-\xi_{s,l}}}^5 \end{aligned}$$

$$(M-5) \quad \forall p \in P: \quad -\Delta_p = - \sum_{e_{p,s} \in E_2} f_{e_{p,s}}^2$$

$$(M-6) \quad \forall p \in P, \forall s \in S: \quad -\sum_{t \in T} \varepsilon_{s,p,t} = - \sum_{e_{p,s,t} \in E_3} f_{e_{p,s,t}}^3$$

$$(M-7) \quad \forall e_{p,s,t} \in E_3: \quad f_{e_{p,s,t}}^3 \leq \varepsilon_{s,p,t}$$

$$(M-8) \quad \forall e \in E_i, \forall i \in \{1, 2, \dots, 5\}: \quad f_e^i \in \mathbb{R}_0^+$$

Gegeben sei eine zulässige Lösung  $\pi^* = (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^*, z^*)$  für  $\mathfrak{B}_2$ . Durch Fixierung der Produktion  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  kann ein zulässiger Fluss  $F^* = (f^{1*}, f^{2*}, f^{3*}, f^{4*}, f^{5*})$  für  $\mathfrak{B}_{MCF}$  aus dem Anteil  $(u^*, z^*)$  folgendermaßen abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} \forall e_{p,s} \in E_1: \quad f_{e_{p,s}}^{1*} &= \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* \\ \forall e_{p,s} \in E_2: \quad f_{e_{p,s}}^{2*} &= \sum_{t=1}^{|T|-1} X_{s,p,t} - \sum_{t \in T} \varepsilon_{s,p,t} + \sum_{t \in T} \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^* + \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* \\ &\quad - \sum_{t=1}^{|T|-1} \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^* + \phi'_{s,p} \\ \forall e_{p,s,t} \in E_3: \quad f_{e_{p,s,t}}^{3*} &= \varepsilon_{s,p,t} \\ \forall e_{p,s,t} \in E_4: \quad f_{e_{p,s,t}}^{4*} &= - \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l} - \sum_{k=1}^t \sum_{l \in S} z_{s,l,p,k}^* + \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* + \phi'_{s,p} + \sum_{l=1}^{t-1} X_{s,p,l} \\ &\quad + \sum_{k=1}^t \sum_{l \in S} z_{l,s,p,k-\xi_{l,s}}^* \\ \forall e_{p,s_1,s_2,t} \in E_5: \quad f_{e_{p,s_1,s_2,t}}^{5*} &= z_{s_1,s_2,p,t}^* \end{aligned}$$

Offensichtlich gelten mit diesen Zuweisungen die Nebenbedingungen (M-1), (M-6) und (M-7). Weiter wird im Folgenden für  $\mathfrak{B}_{MCF}$  angenommen, dass keine Aktivität hinsichtlich Bauteildistribution in der Vergangenheit vor dem betrachteten Zeithorizont stattgefunden habe. Diese Annahme ist für  $\mathfrak{B}_{MCF}$  zulässig, da Beiträge von in der Vergangenheit beauftragten Bauteiltransporten einfach der Produktionsmenge an den entsprechenden Standorten zugerechnet werden können, sobald die Standorte erreicht würden.

Einsetzen von  $F^*$  in (M-2) für  $p \in P$  und  $s \in S$ :

$$\begin{aligned} \phi'_{s,p} &= \sum_{e_{p,s,1} \in E_3} f_{e_{p,s,1}}^{3*} + \sum_{e_{p,s,1} \in E_4} f_{e_{p,s,1}}^{4*} + \sum_{e_{p,s,1,1} \in E_5} f_{e_{p,s,1,1}}^{5*} - \sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^{1*} \\ &= \varepsilon_{s,p,1} - \varepsilon_{s,p,1} - \sum_{l \in S} z_{s,l,p,1}^* + \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* + \phi'_{s,p} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,1}^* - \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* = \phi'_{s,p} \end{aligned}$$

Einsetzen von  $F^*$  in (M-3) für  $p \in P$ ,  $s \in S$  und  $t \in T \setminus \{0, |T|\}$ :

$$\begin{aligned} X_{s,p,t-1} &= \sum_{e_{p,s,t} \in E_3} f_{e_{p,s,t}}^{3*} + \sum_{e_{p,s,t} \in E_4} f_{e_{p,s,t}}^{4*} + \sum_{e_{p,s,l,t} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t}}^{5*} - \sum_{e_{p,s,t-1} \in E_4} f_{e_{p,s,t-1}}^{4*} \\ &\quad - \sum_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}}}^{5*} \\ &= \varepsilon_{s,p,t} - \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l} - \sum_{k=1}^t \sum_{l \in S} z_{s,l,p,k}^* + \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* + \phi'_{s,p} + \sum_{l=1}^{t-1} X_{s,p,l} + \sum_{k=1}^t \sum_{l \in S} z_{l,s,p,k-\xi_{l,s}}^* \\ &\quad + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^* + \sum_{l=1}^{t-1} \varepsilon_{s,p,l} + \sum_{k=1}^{t-1} \sum_{l \in S} z_{s,l,p,k}^* - \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* - \phi'_{s,p} - \sum_{l=1}^{t-2} X_{s,p,l} \\ &\quad - \sum_{k=1}^{t-1} \sum_{l \in S} z_{l,s,p,k-\xi_{l,s}}^* - \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^* = X_{s,p,t-1} \end{aligned}$$

Einsetzen von  $F^*$  in (M-4) für  $p \in P$  und  $s \in S$ :

$$\begin{aligned}
X_{s,p,|T|-1} &= \sum_{e_{p,s,|T|} \in E_3} f_{e_{p,s,|T|}}^3 + \sum_{e_{p,s} \in E_2} f_{e_{p,s}}^2 - \sum_{e_{p,s,|T|-1} \in E_4} f_{e_{p,s,|T|-1}}^4 - \sum_{e_{p,s,l,|T|-\xi_{s,l}} \in E_5} f_{e_{p,s,l,|T|-\xi_{s,l}}}^5 \\
&= \varepsilon_{s,p,|T|} + \sum_{t=1}^{|T|-1} X_{s,p,t} - \sum_{t \in T} \varepsilon_{s,p,t} + \sum_{t \in T} \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^* + \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* - \sum_{t=1}^{|T|-1} \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^* \\
&\quad + \phi'_{s,p} + \sum_{l=1}^{|T|-1} \varepsilon_{s,p,l} + \sum_{k=1}^{|T|-1} \sum_{l \in S} z_{s,l,p,k}^* - \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* - \phi'_{s,p} - \sum_{l=1}^{|T|-2} X_{s,p,l} \\
&\quad - \sum_{k=1}^{|T|-1} \sum_{l \in S} z_{l,s,p,k-\xi_{l,s}}^* - \sum_{l \in S} z_{l,s,p,|T|-\xi_{l,s}}^* \\
&= X_{s,p,|T|-1}
\end{aligned}$$

Einsetzen von  $F^*$  in (M-5) für  $p \in P$ :

$$\begin{aligned}
-\Delta_p &= - \sum_{e_{p,s} \in E_2} f_{e_{p,s}}^2 \\
&= - \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{|T|-1} X_{s,p,t} + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \varepsilon_{s,p,t} - \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^* - \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* \\
&\quad + \sum_{s \in S} \sum_{t=1}^{|T|-1} \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^* - \sum_{s \in S} \phi'_{s,p} \\
&= -\Delta_p - \sum_{s \in S} \sum_{l \in S} \left[ \sum_{t \in T} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^* - \sum_{t=1}^{|T|-1} z_{s,l,p,t}^* \right] \\
&= -\Delta_p - \sum_{s \in S} \sum_{l \in S} \left[ \underbrace{\sum_{t=1-\xi_{l,s}}^0 z_{l,s,p,t}^*}_{=0} - \underbrace{\sum_{t=|T|-\xi_{s,l}+1}^{|T|-1} z_{s,l,p,t}^*}_{=0} \right] \\
&= -\Delta_p
\end{aligned}$$

Im letzten Schritt wurde erneut verwendet, dass Bauteiledistribution in der Vergangenheit vor dem betrachteten Zeithorizont nicht stattgefunden hat. Zudem erreichen zu spät angeordnete Verlagerungen das Ziel nicht mehr innerhalb des Zeithorizonts und können daher vernachlässigt werden.

Mit diesen Ausführungen ist insgesamt die Gültigkeit von (M-2), (M-3), (M-4) und (M-5) gezeigt. Aufgrund von (C-11) und nach Konstruktion von  $F^*$  gilt trivialerweise auch (M-8), wodurch insgesamt die Zulässigkeit von  $F^*$  für  $\mathfrak{P}_{MCF}$  bewiesen ist. Außerdem kann sehr einfach nachvollzogen werden, dass der Zielfunktionswert  $\mathfrak{P}_{MCF}(F^*)$  offensichtlich exakt dem Zielfunktionsanteil  $\mathfrak{P}_2(\pi^*)|_{u^*,z^*}$  von  $\mathfrak{P}_2(\pi^*)$  entspricht, welcher die Bauteilelogistik- und Fehlteilekosten beschreibt.

Andererseits seien nun ein zulässiger Fluss  $F^+ = (f^{1+}, f^{2+}, f^{3+}, f^{4+}, f^{5+})$  für  $\mathfrak{P}_{MCF}$  zu gegebener Produktion  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  für  $\mathfrak{P}_2$  und folgende Zuweisungen gegeben:

$$\begin{aligned} \forall e_{p,s_1,s_2,t} \in E_5: \quad & z_{s_1,s_2,p,t}^+ = f_{e_{p,s_1,s_2,t}}^{5+} \\ \forall e_{p,s} \in E_1: \quad & u_{s,p,t}^+ = \begin{cases} f_{e_{p,s,t}}^{1+}, & \text{für } t = 1 \\ 0, & \text{für } t > 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Es soll gezeigt werden, dass mit  $\pi^+ = (x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*, u^+, z^+)$  eine zulässige Lösung für  $\mathfrak{P}_2$  vorliegt. (C-1)–(C-10) gelten trivialerweise, da  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  eine zulässige Produktion für  $\mathfrak{P}_2$  darstellt. Somit bleibt lediglich die Gültigkeit von (C-11) zu beweisen, welche durch einen Induktionsbeweis über  $t$  gezeigt werden soll.

Dazu prüfe man zu Beginn als Induktionsanfang (C-11) für  $t = 1$  sowie für  $s \in S$  und  $p \in P$ :

$$\varphi'_{s,p} + u_{s,p,1}^+ \geq \varepsilon_{s,p,1} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,1}^+$$

Aus (M-2) und mit der Eigenschaft, dass auf den Bedarfskanten der maximal zulässige Fluss in jedem Zeitslot vorliegen muss, ergibt sich:

$$\begin{aligned} \varphi'_{s,p} &= \sum_{e_{p,s,1} \in E_3} f_{e_{p,s,1}}^{3+} + \sum_{e_{p,s,1} \in E_4} f_{e_{p,s,1}}^{4+} + \sum_{e_{p,s,l,1} \in E_5} f_{e_{p,s,l,1}}^{5+} - \sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^{1+} \\ &= \varepsilon_{s,p,1} + \underbrace{\sum_{e_{p,s,1} \in E_4} f_{e_{p,s,1}}^{4+}}_{\geq 0 \text{ (Schlupf)}} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,1}^+ - u_{s,p,1}^+ \\ &\geq \varepsilon_{s,p,1} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,1}^+ - u_{s,p,1}^+ \end{aligned}$$

Demnach hat (C-11) Gültigkeit für  $t = 1$ . Im Folgenden betrachte man daher (C-11) für  $s \in S$  und  $p \in P$  sowie für  $t > 1$  ( $t \neq |T|$ ):

$$\varphi'_{s,p} + \sum_{l=1}^{t-1} X_{s,p,l} + \sum_{l \in S} \sum_{k=1-\xi_{l,s}}^{t-\xi_{l,s}} z_{l,s,p,k}^+ + \sum_{l=1}^t u_{s,p,l}^+ \geq \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l} + \sum_{l \in S} \sum_{k=1}^t z_{s,l,p,k}^+$$

An dieser Stelle wird der Induktionsschritt durchgeführt mit der Induktionsannahme, dass die Lagerkante  $f_{e_{p,s,t-1}}^{4+}$  genau dem Schlupf aus der Ungleichung für  $t-1$  entspricht und somit entsprechend aus (C-11) abgeleitet werden kann:

$$f_{e_{p,s,t-1}}^{4+} = \varphi'_{s,p} + \sum_{l=1}^{t-2} X_{s,p,l} + \sum_{l \in S} \sum_{k=1-\xi_{l,s}}^{t-\xi_{l,s}-1} z_{l,s,p,k}^+ + \sum_{l=1}^{t-1} u_{s,p,l}^+ - \sum_{l=1}^{t-1} \varepsilon_{s,p,l} - \sum_{l \in S} \sum_{k=1}^{t-1} z_{s,l,p,k}^+$$



Nach (M-3) und mit diesem Zusammenhang gilt somit:

$$\begin{aligned}
X_{s,p,t-1} &= \sum_{e_{p,s,t} \in E_3} f_{e_{p,s,t}}^3 + \sum_{e_{p,s,t} \in E_4} f_{e_{p,s,t}}^4 + \sum_{e_{p,s,l,t} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t}}^5 - \sum_{e_{p,s,t-1} \in E_4} f_{e_{p,s,t-1}}^4 + \\
&\quad - \sum_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}} \in E_5} f_{e_{p,s,l,t-\xi_{s,l}}}^5 + \\
&= \varepsilon_{s,p,t} + \underbrace{\sum_{e_{p,s,t} \in E_4} f_{e_{p,s,t}}^4}_{\geq 0 \text{ (Schlupf)}} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^+ - \sum_{e_{p,s,t-1} \in E_4} f_{e_{p,s,t-1}}^4 - \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^+ \\
&\geq \varepsilon_{s,p,t} + \sum_{l \in S} z_{s,l,p,t}^+ - \varphi'_{s,p} - \sum_{l=1}^{t-2} X_{s,p,l} - \sum_{l \in S, k=1-\xi_{l,s}}^{t-\xi_{l,s}-1} z_{l,s,p,k}^+ - \sum_{l=1}^{t-1} u_{s,p,l}^+ + \sum_{l=1}^{t-1} \varepsilon_{s,p,l} \\
&\quad + \sum_{l \in S, k=1}^{t-1} z_{s,l,p,k}^+ - \sum_{l \in S} z_{l,s,p,t-\xi_{l,s}}^+ \\
&= -\varphi'_{s,p} - \sum_{l=1}^{t-2} X_{s,p,l} - \sum_{l \in S, k=1-\xi_{l,s}}^{t-\xi_{l,s}} z_{l,s,p,k}^+ - \underbrace{\sum_{l=1}^{t-1} u_{s,p,l}^+}_{=\sum_{l=1}^t u_{s,p,l}^+} + \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l} + \sum_{l \in S, k=1}^t z_{s,l,p,k}^+
\end{aligned}$$

Damit ist die Gültigkeit von (C-11) für  $t > 1$  nachgewiesen, wobei im letzten Schritt verwendet wurde, dass sämtliche Fehlteile aufgrund der zeitinvarianten Strafkosten initial dem ersten Zeitslot zugeschlagen werden können.

Der Nachweis von (C-11) für  $t = |T|$  lässt sich analog führen, mit dem Unterschied, dass hier der Überlauf  $\sum_{e_{p,s} \in E_2} f_{e_{p,s}}^2 \geq 0$  den Schlupf darstellt, womit (C-11) im Allgemeinen gültig und  $\pi^+$  zulässige Lösung für  $\mathfrak{P}_2$  ist. Zudem gilt nach Konstruktion Gleichheit zwischen dem Zielfunktionswert  $\mathfrak{P}_{MCF}(F^*)$  und dem Zielfunktionsanteil  $\mathfrak{P}_2(\pi^+) |_{u^+, z^+}$  aus dem Modell  $\mathfrak{P}_2$ .

Dies lässt nun folgenden Schluss zu: Für jede zulässige Lösung  $\pi^*$  für  $\mathfrak{P}_2$  lässt sich, sofern dies nicht bereits der Fall ist, in polynomieller Zeit eine optimale Belegung für die Variablen zur Bauteildistribution und für die Fehlteilermengen zu gegebener Produktion  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  berechnen. Dies ist möglich, weil das Teilproblem als lineares Programm mit kontinuierlichen Variablen zu lösen ist und damit effizient behandelt werden kann. Der Zielfunktionsanteil  $\mathfrak{P}_2(\pi^*) |_{u^*, z^*}$  ist somit ebenfalls optimal für die gegebenen Anteile  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$ . Dieser eventuell nötige zusätzliche Optimierungsschritt wird im Folgenden vorausgesetzt, da dieser effizient durchzuführen ist. Somit können wir mit dieser Eigenschaft für das relaxierte Minimierungsproblem ohne Einschränkung annehmen, dass gilt:

$$\text{opt}(\mathfrak{P}_2 |_{u,z}) \leq \text{opt}(\mathfrak{P}_1 |_{u,z})$$

Sei im Weiteren  $F^*$  eine aus den Lösungsanteilen  $(u^*, z^*)$  abgeleitete Lösung für  $\mathfrak{P}_{MCF}$ , welche, wie bereits gezeigt wurde, zulässig für das Programm ist.

Im Folgenden soll der Nachweis erbracht werden, dass  $\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  ganzzahlig ist. Dazu rufe man sich erneut das Problem  $\mathfrak{P}_{MCF}$  vor Augen und ergänze dieses um die Kantenmenge  $E_6 = \{e_p = (U_p^+, U_p^-) \mid p \in P\}$  und die zugehörige Variablenklasse  $f_{e_p}^6$ , welche die Flüsse über diese Kanten beschreiben. Zudem wird die Liefermenge für  $U_p^-$  um  $\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  auf Null reduziert und für  $U_p^+$  entsprechend um  $\sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  auf  $-\Delta_p + \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  erhöht. Selbstverständlich sind die betroffenen Nebenbedingungsklassen (M-1), (M-5) und (M-8) entsprechend anzupassen.

In dem aus  $\mathfrak{P}_{MCF}$  auf diese Weise hervorgegangenen Problem  $\mathfrak{P}_{mod}$  muss für eine optimale Lösung der Fluss auf einer Kante  $f_{e_p}^6 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  betragen. Denn zum einen geht aus den Vorbetrachtungen zu  $\mathfrak{P}_{MCF}$  hervor, dass  $f_{e_p}^6 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  zulässig für  $\mathfrak{P}_{mod}$  ist. Weiterhin sei zu Beginn für ein beliebiges  $p \in P$  der zugehörige Fluss  $f_{e_p}^6 < \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$ . Zugleich ist aus den Bedingungen (M-1) in den Versorgungsknoten bekannt, dass  $\sum_{e_{p,s} \in E_1} f_{e_{p,s}}^1 = f_{e_p}^6 < \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  gilt. Damit muss  $f_{e_{p,s_i}}^1 < \sum_{t \in T} u_{s_i,p,t}^*$  für mindestens ein  $s_i \in S$  gelten. Betrachtet man nun die Bedingungen (M-3), welche für  $\mathfrak{P}_{MCF}$  und  $\mathfrak{P}_{mod}$  identisch sind, so folgt induktiv:

$$f_{e_{p,s_i,t}}^4 = \sum_{l=1}^{t-1} X_{s_i,p,l} - \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s_i,p,l} - \sum_{s \in S} \sum_{l=1}^t f_{e_{p,s_i,s,l}}^5 + \sum_{s \in S} \sum_{l=1}^{t-\xi_{s,s_i}} f_{e_{p,s,s_i,l}}^5 + \varphi'_{s_i,p} + \underbrace{f_{e_{s_i,p}}^1}_{< \sum_{t \in T} u_{s_i,p,t}^*}$$

Damit lässt sich jedoch folgern, dass mit anfallenden Fehlteilen für mindestens ein  $t_j \in T$  gelten muss  $f_{e_{p,s_i,t}}^4 < 0$ . Denn in der oben angegebenen Beziehung findet sich exakt die Struktur der Restriktionen (C-11) aus  $\mathfrak{P}_2$  wieder, welche in einer optimalen Lösung für mindestens ein  $t_j \in T$  mit Gleichheit erfüllt sind. Eine weitere Reduzierung von  $\sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  führt unweigerlich zur Unzulässigkeit. Für den Fall, dass sämtliche Bedarfe gedeckt werden können und somit keine Fehlteile anfallen, gilt  $\sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* = 0$  und somit ebenfalls Unzulässigkeit, da  $f_{e_p}^6 < \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* = 0$ . Aus der Zulässigkeit von  $f_{e_p}^6 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  kann andererseits gefolgert werden, dass für das gegebene, gerichtete Netzwerk, in dem sämtliche Kantenkosten nicht-negativ sind, eine Lösung  $f_{e_p}^6 > \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^*$  mit erhöhten Kosten einhergeht und damit nicht optimal sein kann.

Gleichzeitig weist die gegebene *MCFP*-Netzwerkinstanz  $\mathfrak{P}_{mod}$  spezielle Eigenschaften auf. So gilt Ganzzahligkeit für sämtliche Liefermengen in den Knoten des Netzwerk-Fluss-Problems und zudem liegen alle Kapazitäten bzw. Beschränkungen an Flüssen über Kanten in  $\mathbb{N}_0^+ \cup \{\infty\}$ , womit eine hinreichende Bedingung für eine ganzzahlige Lösung existiert (Ahuja, Magnanti und Orlin, 1993, S. 318), (Murota, 2003, S. 252f). Für eine solch ganzzahlige Lösung gilt demnach  $f_{e_p}^6 = \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} u_{s,p,t}^* \in \mathbb{N}_0$ .

Damit weist auch  $\mathfrak{P}_{MCF}$  die spezielle Eigenschaft der Ganzzahligkeit für sämtliche Liefermengen in den Knoten des Netzwerks und alle Kapazitäten bzw. Beschränkungen an Flüssen über Kanten

auf, womit ebenfalls eine hinreichende Bedingung für eine ganzzahlige Lösung  $F^*$  existiert, die effizient bestimmt werden kann (Ahuja, Magnanti und Orlin, 1993, S. 318), (Murota, 2003, S. 252f). Aus einer solch ganzzahligen Lösung kann, wie ebenfalls bereits gezeigt wurde, mit gegebener Produktion  $(x^*, \tilde{x}^*, y^*, \tilde{y}^*)$  eine zulässige Lösung  $\pi^+$  für  $\mathfrak{P}_2$  konstruiert werden, womit folgender Zusammenhang für die Zielfunktionswerte bzw. -anteile notiert werden kann:

$$\text{opt}(\mathfrak{P}_1|_{u,z}) = \mathfrak{P}_{MCF}(F^+) \leq \mathfrak{P}_{MCF}(F^*) = \text{opt}(\mathfrak{P}_2|_{u,z})$$

Sofern der verwendete Solver nicht bereits diese spezielle Problemstruktur erkennt und ausnutzt, kann demnach effizient aus jeder Lösung für  $\mathfrak{P}_2$  eine Lösung für  $\mathfrak{P}_1$  mit gleichem Zielfunktionswert konstruiert werden, womit sich eine Äquivalenz der Probleme ergibt.

Neben der eingangs gegebenen, operationellen Begründung der Plausibilität einer Relaxierung von  $\mathfrak{P}_1$  zu  $\mathfrak{P}_2$ , lässt sich damit also auch die Äquivalenz in der Lösung und damit die mathematisch uneingeschränkte Zulässigkeit dieser Relaxierung zeigen, welche insbesondere hinsichtlich Laufzeiten zur Lösungsfindung eine Beschleunigung verspricht.

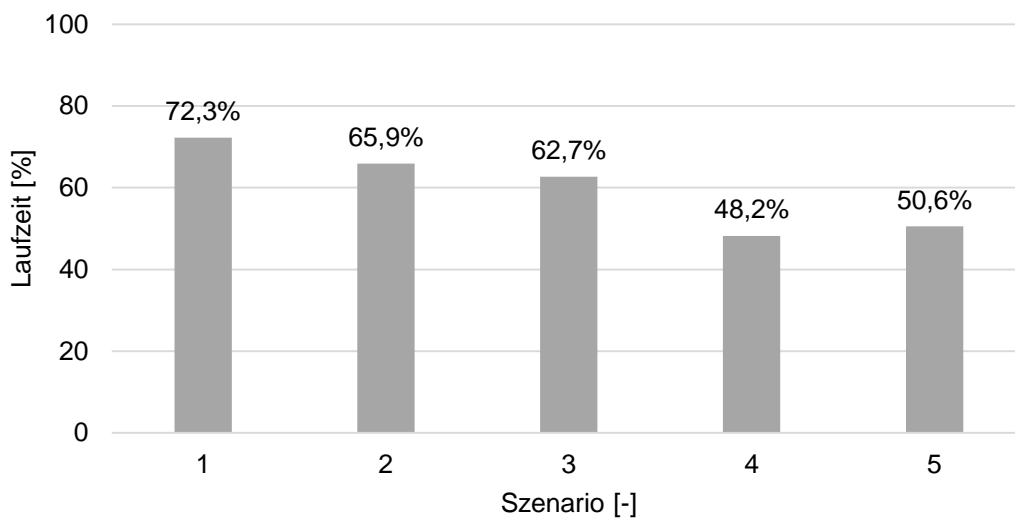


Abbildung 7.7: Laufzeitverhalten des Programms  $\mathfrak{P}_2$  im relativen Vergleich zu  $\mathfrak{P}_1$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_2$  geht gegenüber  $\mathfrak{P}_1$  mit deutlichen Laufzeitverbesserungen einher; die Laufzeiten einer exakten Lösung für  $\mathfrak{P}_2$  sind relativ zu denen für  $\mathfrak{P}_1$  dargestellt

In Abbildung 7.7 sind die Laufzeiten zur Berechnung des Programms  $\mathfrak{P}_2$  im relativen Vergleich zu denen für  $\mathfrak{P}_1$  erneut für die Testszenarien  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  dargestellt. In sämtlichen Berechnungen für  $\mathfrak{P}_2$  wurden vom verwendeten Solver stets Lösungen berechnet, welche einen ganzzahligen Lösungsanteil  $(u^*, z^*)$  aufwiesen, sodass es scheint, als ob die Struktur des Programms wie beschrieben ausgenutzt wurde. Nichtsdestotrotz ergibt sich eine deutliche Laufzeitreduktion, welche wohl einem modifizierten Suchbaum während der Lösungsfindung zuzuschreiben ist.

Für die Modelle  $\mathfrak{P}_1$  und  $\mathfrak{P}_2$  gibt Abbildung 7.8 den Lösungsfortschritt während der Berechnung der Testinstanzen wieder. Auch hier zeigt sich eine deutlich verbesserte und beschleunigte GAP-Propagation, womit die relaxierte Formulierung  $\mathfrak{P}_2$  aufgrund der zuvor gezeigten Äquivalenz zu  $\mathfrak{P}_1$  und mit den signifikanten Verbesserungen bezüglich Laufzeiten und Lösungsfortschritt im Weiteren als Grundlage zur numerischen Behandlung des Problems herangezogen wird.

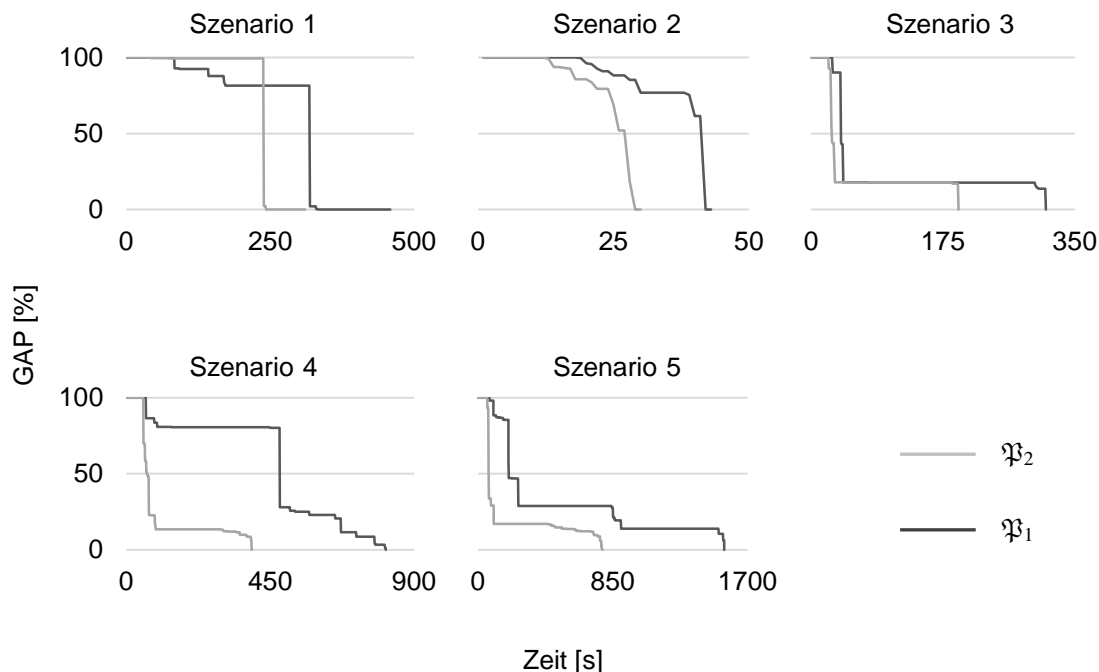


Abbildung 7.8: GAP-Propagation während der Lösungsfindung für  $\mathfrak{P}_1$  und  $\mathfrak{P}_2$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_2$  weist gegenüber  $\mathfrak{P}_1$  eine deutliche Verbesserung im Lösungsfortschritt auf

Auf Basis von  $\mathfrak{P}_2$  kann nun einerseits die Bauteildistribution innerhalb des Netzwerks als just in time angenommen werden. Diese Annahme ist an die realbetriebliche Prozedur angelehnt und ermöglicht eine signifikante Reduzierung der Anzahl an Entscheidungsvariablen der entsprechenden Klasse bzw. eine erhebliche Anzahl an Variablen kann vorab zu Null gesetzt werden. Andererseits sind Distribution von Bauteilen sowie Werkzeugverlagerungen von einem Standort zu exakt demselben nicht sinnvoll. Derartige degenerierte Transporte können daher im Voraus durch folgende zusätzliche Restriktionen (D-1) und (D-2) ausgeschlossen werden:

$$(D-1) \quad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \tilde{y}_{s,s,w,t} = 0$$

$$(D-1) \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T : \\ \tilde{z}_{s,s,p,t} = 0$$

Des Weiteren ist es möglich, durch die Einführung sinnvoller Schnitte die Symmetrie im Problem stärker zu fokussieren. Die Nebenbedingungen (S-1), welche eine Installationsphase im direkten Anschluss an einer Produktionsphase für ein und dasselbe Werkzeug auf einer bestimmten Maschine verhindern, können als sogenannte Symmetriebrecher dienen und die Laufzeiten verkürzen sowie die Lösungsentwicklung verbessern:

$$(S-1) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \tilde{x}_{m,w,t} \leq 1 - x_{m,w,t-1}$$

Ebenso können die zusätzlichen Symmetriebrecher (S-2) eingeführt werden, welche sicherstellen, dass auf eine Bauteilewechselphase stets eine produktive Phase folgt:

$$(S-2) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ x_{m,w,t} + \tilde{x}_{m,w,t} \geq \tilde{x}_{m,w,t-1}$$

Schließlich kann im Anwendungsfall auch die Struktur der Bedarfe  $\varepsilon_{s,p,t}$  genutzt werden. Über den gesamten Zeithorizont sind in der Regel nur wenige Bedarfe für bestimmte Produkte und Standorte ungleich Null, sodass lediglich die zugehörigen Variablen zur Beschreibung von Fehlteilen berücksichtigt werden müssen. Variablen  $u_{s,p,t}$ , welche zu Bedarfen  $\varepsilon_{s,p,t} = 0$  in Beziehung stehen, können a priori zu Null gesetzt werden und die zugehörigen Nebenbedingungen in (C-11) müssen nicht erzeugt werden.

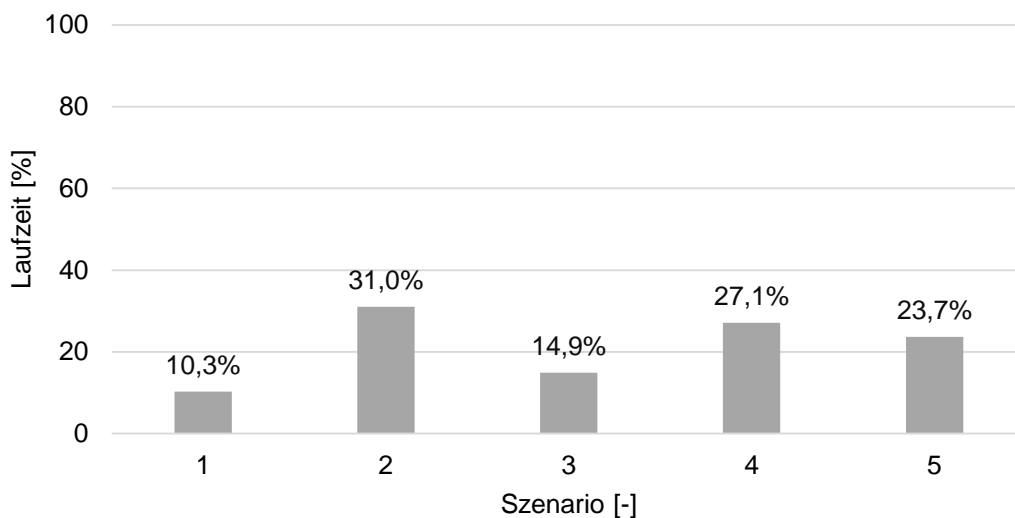


Abbildung 7.9: Laufzeitverhalten des Programms  $\mathfrak{P}_3$  im relativen Vergleich zu  $\mathfrak{P}_2$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_3$  geht gegenüber  $\mathfrak{P}_2$  mit signifikanten Laufzeitverbesserungen einher; die Laufzeiten einer exakten Lösung für  $\mathfrak{P}_3$  sind relativ zu denen für  $\mathfrak{P}_2$  dargestellt

Insgesamt kann auf die soeben geschilderte Weise das vorhandene Wissen um die Realprozesse und deren praktische Umsetzung integriert werden, um eine restriktivere Formulierung  $\mathfrak{P}_3$  des Problems  $\mathfrak{P}_2$  zu ermöglichen, ohne dabei das Optimum zu verändern. Dies ermöglicht eine Eingrenzung des Lösungsraums und damit einhergehend eine Verringerung der Komplexität des zugrunde liegenden Programms, was sich insbesondere in den Rechenzeiten zur Lösungsfindung widerspiegelt. In Abbildung 7.9 sind dazu wiederum für die Testszenarien  $\{1, 2, 3, 4, 5\}$  die entsprechenden Laufzeiten für das Programm  $\mathfrak{P}_3$  im relativen Vergleich zu den Laufzeiten für  $\mathfrak{P}_2$  dargestellt und verdeutlichen auch hier die erheblich verringerten Laufzeiten für  $\mathfrak{P}_3$ .

Ebenfalls deutlich schneller erfolgt für  $\mathfrak{P}_3$  der Lösungsfortschritt während der Berechnung der Testinstanzen, welcher in Abbildung 7.10 mit der verbesserten GAP-Propagation gegenüber  $\mathfrak{P}_2$  erkennbar ist.

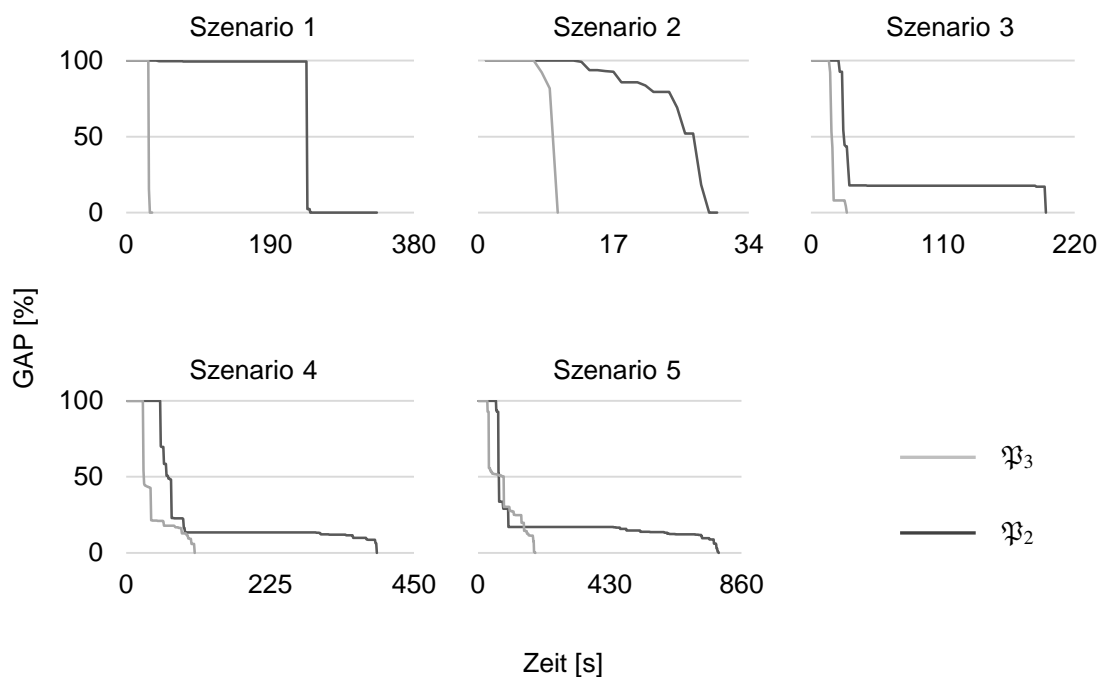


Abbildung 7.10: GAP-Propagation während der Lösungsfindung für  $\mathfrak{P}_2$  und  $\mathfrak{P}_3$ : die Formulierung  $\mathfrak{P}_3$  weist gegenüber  $\mathfrak{P}_2$  eine deutliche Verbesserung im Lösungsfortschritt auf

Abschließend kann damit festgehalten werden, dass durch die Ausnutzung realer Sachverhalte und der Struktur der vorliegenden Problemstellung eine Reformulierung des initialen Programms  $\mathfrak{P}_n$  zur modifizierten Version  $\mathfrak{P}_3$  vollzogen werden konnte. Diese Formulierung geht mit signifikanten Laufzeitverbesserungen einher und ermöglicht damit die Lösung realbetrieblicher Anwendungsfälle für kurze Zeithorizonte bei annehmbaren Rechenzeiten.

### 7.3 Rollierende Planung für realbetriebliche Störfallszenarien

Im vorangegangenen Abschnitt lag der Schwerpunkt in der numerischen Behandlung des Optimierungsansatzes zur Überbrückung von Kapazitätsengpässen und im Speziellen auf der Reduzierung der benötigten Laufzeiten zur Programmlösung. Während eine nicht unerhebliche Beschleunigung in der Lösungsfindung erarbeitet werden konnte und damit das Programm für den Einsatz in der Betriebspraxis als Planungsinstrument für kurze Zeithorizonte somit bereits anwendbar ist, sei an dieser Stelle nichtsdestotrotz erneut auf die Komplexität des Problems hingewiesen. Sofern  $\mathbb{P} \neq \mathbb{NP}$ , existiert kein effizienter Lösungsalgorithmus für das Programm und in der Praxis bleibt damit die Größe der Probleminstanz hinsichtlich Berechenbarkeit bzw. Laufzeit der limitierende Faktor.

Dieser Abschnitt widmet sich daher einer rollierenden Planung, welche für den Anwender eine praktikable Behandlung des Optimierungsmodells selbst für den Fall großer Eingabeinstanzen aufgrund längerer Zeithorizonte sicherstellt, wobei die Ermittlung von zulässigen Lösungen ausreichender Güte in akzeptablen Laufzeiten im Mittelpunkt steht. Die Grundidee eines rollierenden Ansatzes liegt darin, Entscheidungen für eine begrenzte Anzahl aktueller Planungsperioden vorzunehmen und im zeitlichen Verlauf sukzessive eine Aktualisierung bzw. Überarbeitung der Planung für die späteren Zeitperioden vorzunehmen. Ein solches Vorgehen lässt sich folgendermaßen motivieren: Die für die Programme benötigten Parameter stammen aus Schätzungen, welche zeitlichen Schwankungen unterliegen und fehlerbehaftet sind. Insbesondere mit Blick auf die Produktionskennzahlen sind weiter in die Zukunft reichende Daten und deren Entwicklungen kaum oder nur sehr inakkurat vorherzusagen. Es ist somit offensichtlich nicht möglich, sämtliche Daten bis in eine beliebige Zukunft in ausreichender Güte bereitzustellen. Zudem muss in der Praxis mit Blick auf Eingabegröße und Problemkomplexität der Modelle eine Eingrenzung hinsichtlich der zu berücksichtigenden Informationen vorgenommen werden, um eine Lösungsfindung zu gewährleisten. Die Planung muss sich damit zwingend auf einen endlichen Zeithorizont beschränken. (Baker, 1977), (Baker und Peterson, 1979) Zudem kann der Einfluss von kurzfristigen Störungen auf lang- bzw. mittelfristige Planungszeiträume als vernachlässigbar angenommen werden, sodass eine rollierende Planung im Sinne einer strikten Trennung von taktisch-strategischer und operativer Ebene sinnvoll erscheint.

In der vorliegenden Arbeit wurde eine gleitende Variante eines solchen Ansatzes mit überlappenden Teilhorizonten implementiert. Als Grundlage dient die Dekomposition des Zeithorizonts  $T$  in  $m$  ( $m \geq 2$ ) in der zeitlichen Abfolge geordnete Teilhorizonte  $\{T_1, T_2, \dots, T_m\} \subsetneq T$  mit  $\bigcup_{k=1}^m T_k = T$ , welche wiederum jeweils aus  $\{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  ( $\forall i \in \{1, 2, \dots, m\} : l_i \geq 2$ ) Zeitslots bestehen. Die aufeinanderfolgenden Intervalle  $T_j$  und  $T_{j+1}$  weisen stets eine nicht-verschwindende Überlappung

von  $o_j$  Zeitslots auf, womit sich die Teilhorizonte als eine Verschiebung eines (variierenden) Zeitfensters auffassen lassen. Zusätzlich gilt  $\forall j \in \{1, 2, \dots, m-1\} : l_j > o_j < l_{j+1}$ .

Grundsätzlich lässt sich ein derartiger Ansatz auch mit disjunkten Teilhorizonten umsetzen, für die vorliegende Problemstellung ist dies jedoch nicht zielführend. Liegen in einem Zeitfenster ab einem bestimmten Zeitpunkt bspw. keine Bedarfe mehr vor, so wäre dem Programm folgend für die entsprechende Zeitspanne bis zum Ende des Zeitfensters kein produktiver Werkzeugeinsatz mehr notwendig, da sich dadurch kein Mehrwert erreichen ließe. Es ist jedoch zwingend notwendig, bereits in früheren Zeitfenstern für spätere Bedarfe zu fertigen, womit aus den disjunkten Zeitfenstern etwaige unnötige Fehlmengen resultieren. Abhilfe könnte dabei durch eine Art nachfolgenden Filter geschaffen werden, welcher auf eventuell temporär ungenutzten Maschinen anschließend entsprechend Aufträge zur Minimierung der aufgetretenen Fehlteilemengen einsteuert. Mit den bereits fixierten Leerzeiten wäre die Losbildung jedoch erheblich eingeschränkt. Die Effektivität dieser Maßnahme ist daher mehr als fraglich, sodass für den vorliegenden Fall eine Umsetzung der rollierenden Planung mit überlappenden Zeitfenstern vorzuziehen ist.

Zu Beginn wird also eine Lösung für das initiale Zeitintervall  $T_1$  errechnet. Ein im zeitlichen Ablauf erster Anteil dieser Lösung wird anschließend fixiert, was einer Fixierung der Variablenbelegungen für die ersten  $n_1 = l_1 - o_1$  Zeitslots des Zeitfensters  $T_1$  bedeutet. In einem nächsten Schritt erfolgt die Lösungsfindung für das Zeitfenster  $T_2$  unter Berücksichtigung der bereits fixierten Entscheidungsvariablen der  $n_1$  ersten Zeitslots von  $T_1$ , gefolgt von der Fixierung der Variablenbelegungen für die ersten  $n_2 = l_2 - o_2$  Zeitslots des Zeitfensters  $T_2$ . Schließlich kann auf diese Weise durch Iteration mit der Berechnung für das letzte Zeitfenster  $T_m$  eine zulässige Lösung für das zugrundeliegende Problem auf dem Gesamtzeithorizont  $T$  abgeleitet werden. Der schematische Ablauf für diesen Lösungsansatz ist in Abbildung 7.11 skizziert.

Des Weiteren ist bei der Wahl der Zeitfensterlängen darauf zu achten, dass diese nicht bereits vorab die Lösungsmenge stark einschränken. Hinsichtlich ihrer zeitlichen Ausdehnung müssen Bauteiltransporte und Werkzeugverlagerungen prinzipiell innerhalb eines Zeitfensters ermöglicht werden. Vielmehr ist jedoch sicherzustellen, dass eine vollständige Produktionsverlagerung, im Sinne einer Werkzeugverlagerung mit anschließender Bauteiledistribution vom neuen Produktionsstandort aus, innerhalb eines Zeitfensters realisierbar bleibt und damit für das Modell erst als Option ökonomisch sinnvoll erscheint. In der konkreten Implementierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Längen sämtlicher Zeitfenster auf drei Tage (72 Zeitslots) fixiert bei einer ebenfalls festen Überlappung von einem Tag (24 Zeitslots) für die sequentiellen Iterationsschritte. Dabei ist zu beachten, dass das letzte Zeitintervall  $T_m$  eine zur Komplettierung der Ausdehnung des Zeithorizonts  $T$  angepasste Anzahl an Zeitslots umfasst.



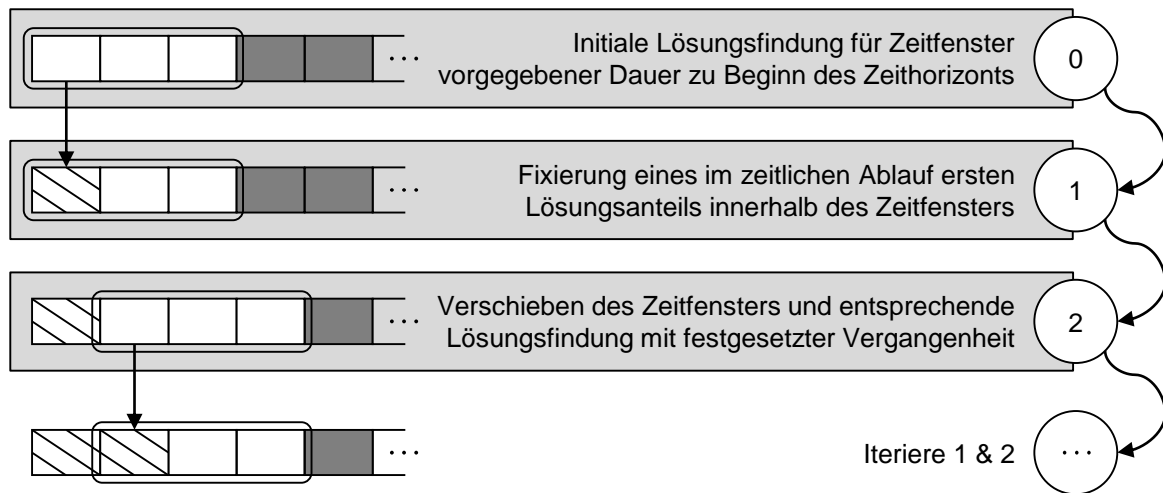


Abbildung 7.11: *Ablaufschema der Rollierenden Planung: die iterative Lösung eines fortschreitend gleitenden Zeitfensters begrenzter Ausdehnung mit entsprechender Fixierung zeitlich vorgelagerter Lösungsanteile ermöglicht eine sukzessive Lösung des ursprünglichen Problems über dem gesamten Zeithorizont*

Um die Effektivität des Ansatzes bewerten zu können, wurden verschiedene Testszenarienfolgen mit einer Implementierung des Programms  $\mathfrak{P}_3$  als Optimallösungsansatz und mit dem beschriebenen gleitend rollierenden Ansatz gelöst, wobei jedes Zeitfenster der rollierenden Planung ebenfalls mit dem Modell  $\mathfrak{P}_3$  berechnet wurde. Eine Szenarienfolge beschreibt dabei einen Testdatensatz mit einem Maschinenausfall über den gesamten betrachteten Zeithorizont, welcher für eine Menge an Zeithorizonten unterschiedlicher Dauer abgebildet wurde. In Abbildung 7.12 sind die Ergebnisse zu den Berechnungen der Szenarienfolgen  $\{1, 2, 3, 4\}$  dargestellt, wobei die Folgen jeweils Szenarien mit einer Zeithorizontausdehnung von 3, 5, 7 und 9 Tagen enthalten.

Eingedenk der Tatsache, dass manche Szenarien aufgrund der Problemkomplexität nicht in annehmbaren Zeiten zur Optimalität gelöst werden können, wurde für den rollierenden Ansatz eine maximale Laufzeit von 3600 s zur Berechnung eines Zeitfensters vorgegeben. Nach Ablauf dieser Zeit wird die beste vorliegende zulässige Lösung übernommen und mit der nächsten Iteration fortgeföhren. Entsprechend wurde dem exakten Programm die maximale Zeit, welche der rollierende Ansatz abrufen kann, zur Verfügung gestellt, sodass der Optimalansatz nicht weniger Zeit als der heuristische zur Verfügung hat. Als Vergleichsmaß der Ergebnisse wurde die zum Abbruchzeitpunkt beste vorliegende untere Schranke aus der Berechnung des exakten Modells verwendet. Zur einheitlichen Darstellung sind die Zielfunktionswerte des Optimalansatzes und der rollierenden Planung als Vielfaches der normierten unteren Schranke aufgetragen.

Wie zu erwarten, liegen identische Ergebnisse für die 3-Tages-Szenarien vor, da hier der rollierende Ansatz mit Zeitfensterlänge von 3 Tagen äquivalent zum exakten Programm ist. Für längere

Zeithorizonte ist jedoch zu beobachten, dass der Optimallösungsansatz mit der zunehmenden Komplexität kaum Ergebnisse von ausreichender Güte innerhalb der gegebenen Rechenzeit ableiten kann. Demgegenüber übertrifft der rollierende Ansatz in der Ergebnisgüte das exakte Verfahren ausnahmslos und trotz seiner heuristischen Natur liefert dieser nahezu unabhängig vom betrachteten Planungshorizont in aller Regel sogar sehr gute Ergebnisse nahe am Optimum.

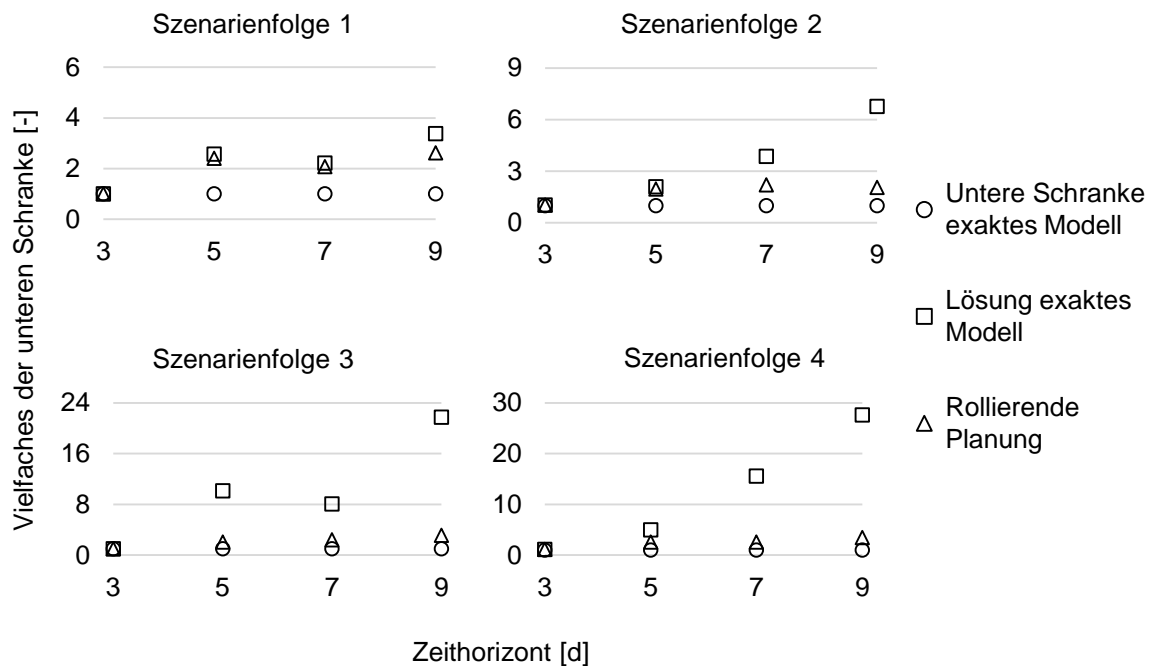


Abbildung 7.12: Lösungsgüte der Rollierenden Planung im Vergleich zum Optimalansatz  $\mathfrak{P}_3$ : innerhalb der vorgegebenen Rechenzeit nimmt mit zunehmendem Planungshorizont die Lösungsgüte des Programms  $\mathfrak{P}_3$  im Allgemeinen signifikant ab, wohingegen der heuristische, rollierende Ansatz nahezu unabhängig vom Zeithorizont sogar sehr gute Lösungen nahe am Optimum bereitstellt

Ein weiterer Vorteil der rollierenden Planung liegt darin, dass, sobald ein Ergebnis von ausreichender Güte in einem Iterationsschritt vorliegt und mit der Berechnung des nächsten Zeitfensters begonnen wird, aus dem festgesetzten Lösungsanteil direkt Handlungsoptionen ab- und damit verbundene Handlungsanweisungen eingeleitet werden können. Die Gesamtlaufzeit der Heuristik ist daher nicht weiter ausschlaggebend, vielmehr können die Teilergebnisse nach Verfügbarkeit umgehend bewertet und angewendet werden. Je nach Bedarf können auch zu gegebener Zeit bestehende Zeitpläne gänzlich verworfen und ein Neuaufwurf vorgenommen werden.

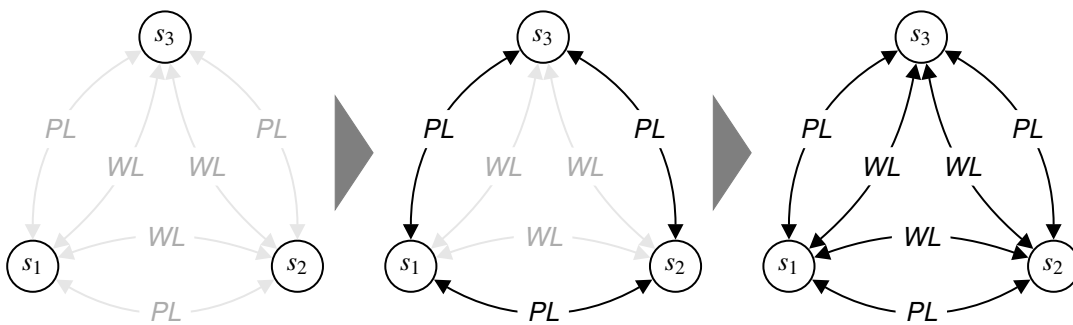
Mit dem heuristischen Ansatz einer rollierenden Planung liegt damit ein Verfahren vor, welches die Möglichkeit zur effektiven Problembehandlung im realbetrieblichen Umfeld bei auftretenden Kapazitätsengpässen mit den vorgestellten Programmen selbst über längere Zeithorizonte hinweg eröffnet, wodurch Spielraum im Entscheidungsfindungsprozess geschaffen wird.

## 7.4 Ansätze zur Beschleunigung der Lösungsfindung

Im Folgenden werden drei Möglichkeiten vorgestellt, welche zur Unterstützung der Lösungsfindung in den einzelnen Schritten der im Abschnitt 7.3 vorgestellten rollierenden Planungsmethode eingesetzt werden können. Eine explizite numerische Untersuchung der Ansätze erfolgt jedoch nicht, da derartige Verfahren in der Regel eine hohe Abhängigkeit von der Struktur der zugrunde liegenden Probleminstanzen aufweisen, womit signifikante Unterschiede in der Performanz einhergehen. Presswerks- und im Allgemeinen Produktionsverbände stellen sich in Realität in ihren Ausprägungen vielschichtig und verschiedenartig dar, sodass kaum ein einziges numerisches Verfahren für beliebige Szenarien ausgewiesen werden kann. Vielmehr sollen daher mit den folgenden Ansätzen dem Anwender Möglichkeiten aufgezeigt und zur Problembearbeitung an die Hand gegeben werden.

### Stufenweise Aggregation

Ein aus der Betriebspraxis heraus motivierter Ansatz zur Lösung des Problems liegt in einer operationellen Dekomposition des Verbunds und der anschließenden, stufenweisen Aggregation zum Ursprungsproblem. Die Lösungen niedrigerer Aggregationsstufen liefern dabei sukzessive primale Lösungen für die folgenden Stufen und helfen somit deren Lösung zu beschleunigen, wie dies in Abbildung 7.13 schematisch skizziert ist.



PL: Bauteilelogistik zwischen Standorten      WL: Werkzeuglogistik zwischen Standorten

Abbildung 7.13: Ablaufschema der Stufenweisen Aggregation: nach einer operationellen Dekomposition des Verbunds erfolgt die stufenweise Aggregation zum originären Problem, wobei Lösungen niedrigerer Aggregationsstufen primale Lösungen für Stufen höheren Aggregationsgrades liefern und damit jeweils die Lösungsfindung verbessern

Als initialer Schritt erfolgt eine vollständige Isolation der Standorte des Verbunds. Dabei werden sowohl Werkzeug- als auch Bauteilelogistik ausgeschlossen, sodass die Produktion eines jeden Standorts ausschließlich für die Bedarfsdeckung vor Ort verwendet werden kann. Hierfür sind

vom Standort entkoppelte Teilprobleme zu lösen. Durch das komplette Vernachlässigen der logistischen Operationen erfolgt eine wesentliche Reduzierung in der Variablenanzahl, sodass relativ schnell unabhängige Einzellösungen für die Teilprobleme abgeleitet werden können.

In einer ersten Aggregationsstufe wird eine De-Isolation der Standorte vorgenommen, indem zusätzlich die Bauteiledistribution innerhalb des Produktionsnetzwerks erlaubt wird. Dies entspricht im Grundsatz der gängigen Praxis autonom agierender Standorte gemäß der heterarchischen Betriebsorganisation. Zwar kann das Problem nun nicht mehr wie im initialen Schritt vom Standort entkoppelt betrachtet werden, sondern muss aufgrund der zulässigen Bauteilelogistik geschlossen gelöst werden, jedoch kann durch Komposition der Lösungen zu den unabhängigen Subproblemen eine zulässige Startlösung für diesen Schritt des Verfahrens bereitgestellt werden.

Schließlich findet im finalen Schritt die Werkzeuglogistik im Presswerksverbund ebenfalls Berücksichtigung, wodurch eine vollständige Aggregation bzw. De-Isolation der Verbundpartner vorgenommen wird und damit die Lösung des originären Problems erfolgt. Die Lösung des vorangegangenen Aggregationsschritts ist für dieses Programm selbstverständlich ebenfalls zulässig und kann daher zumindest als primale Startlösung herangezogen werden. Der Algorithmus terminiert, sobald eine Lösung ausreichender Güte für die finale Aggregationsstufe vorliegt.

Die Güte der Lösungen in den verschiedenen Aggregationsstufen hängt dabei wesentlich von der Struktur des Produktionsverbunds ab. Angenommen ein Verbund besteht aus lokal isolierten Partnern, welche jeweils nur eine Maschine zur exklusiven Produktion jeweils eines Bauteiletypen betreiben, für den ausschließlich Bedarfe vor Ort bestehen. Tritt nun an einem Standort dieses Netzwerks ein Kapazitätsengpass durch den vollständigen Ausfall der entsprechenden Maschine auf, so ist dieser vom betroffenen Standort offensichtlich nicht autonom zu überbrücken. Für ein derartig extremes Szenario liefern die vorgelagerten Aggregationsstufen des beschriebenen Lösungsansatzes keinen sinnvollen Mehrwert, da der Standort den Engpass nicht autonom zu überbrücken vermag und selbst Bauteilelieferungen von den Verbundpartnern keinen hilfreichen Beitrag darstellen, da die Verbundpartner nicht in die Möglichkeit versetzt wären, die benötigten Bauteiletypen zu liefern. Erst durch in Betracht ziehen entsprechender Werkzeugverlagerungen könnten die benötigten Bauteiletypen für den vom Engpass betroffenen Standort überhaupt anderweitig gefertigt werden und gesamtheitlich günstigere Alternativen als die triviale und risikoreiche Lösung, nämlich den Standort sich selbst zu überlassen, sind möglich.

Bei einem zunehmenden Umfang der Maschinenpools der Verbundpartner sowie einer zunehmenden Interdependenz innerhalb des Netzwerks hingegen verbessert sich die Güte der mit dem vorgestellten Ansatz einer schrittweisen Aggregation ermittelten Startlösungen.

### Schrittweise Zeitauflösung

Eine schrittweise Verfeinerung der Zeitdiskretisierung liefert einen technischen Ansatzpunkt zur sukzessiven Erzeugung von Lösungen für das zugrunde liegende Problem. Hierbei werden Lösungen auf gröberen Zeitrastern als primale Initiallösungen für die Suche nach Lösungen auf feineren Zeitrastern verwendet.

Zu Beginn wird das Optimierungsprogramm initial auf einem gegebenen Zeitraster  $D_n$  gelöst. Anschließend erfolgt eine Verfeinerung der Auflösung der Diskretisierung des Zeithorizonts zu  $D_{n+1}$ . Jeder Zeitslot  $t_i \in D_n$  geht hierbei vollständig auf in eine fest vorgegebene Anzahl  $m$  ( $m \geq 2$ ) disjunkter, in der zeitlichen Abfolge geordneter Zeitslots  $\{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\} \subsetneq D_{n+1}$  gleicher Länge mit  $\cup_{k=1}^m t_{i_k} = t_i$ . Aus der zuvor ermittelten initialen Lösung lässt sich in einem nachfolgenden Schritt eine zulässige Lösung für das Problem auf dem feineren Zeitraster konstruieren, welche als heuristische Startlösung für den Berechnungsprozess auf dem Zeithorizont höherer Auflösung verwendet wird. Dieses Vorgehen wird nun iteriert bis eine Lösung ausreichender Güte auf einem Zeitraster vorgegebener Feinheit ermittelt werden konnte, womit der Algorithmus terminiert (vgl. Abbildungen 7.14 und 7.15).

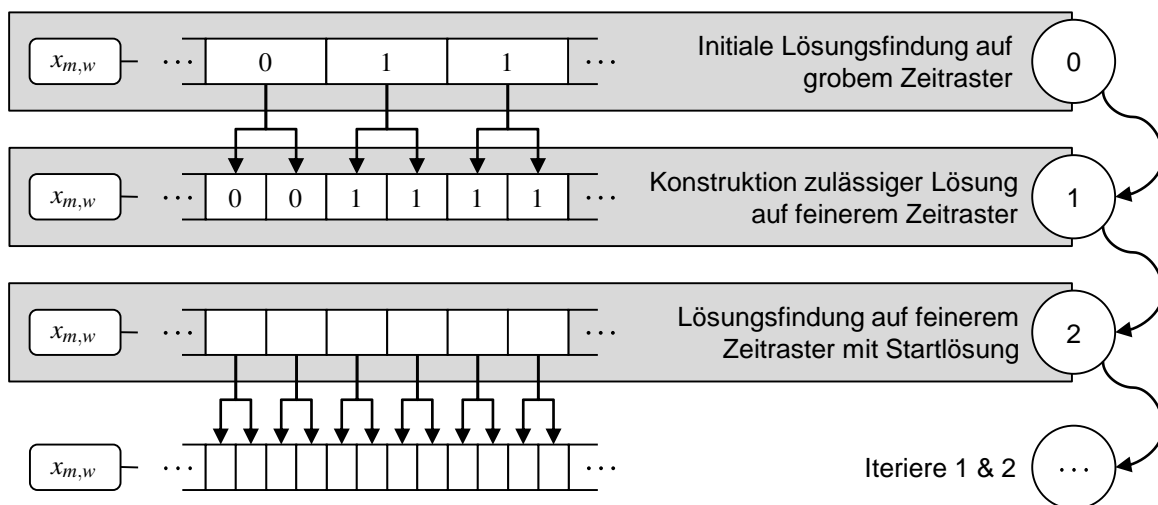


Abbildung 7.14: Produktionsphase in der Schrittweisen Zeitauflösung: iterativ können aus Lösungen auf gröberen Zeitrastern primale Initiallösungen zur Verbesserung der Lösungsfindung auf feineren Zeitrastern für die Variablen zur Beschreibung der Produktionsphasen von Werkzeugen und Maschinen für das zugrunde liegende Problem konstruiert werden

Wie in Abbildung 7.14 schematisch dargestellt, kann die auf dem gröberen Zeitraster ermittelte Belegung der Variablen zur Beschreibung der Produktionsphasen bei der Ableitung einer zulässigen Lösung für das Problem auf dem feineren Zeitraster unverändert auf die dem Zeit-

slot  $t_i$  entsprechenden Zeitintervalle  $\{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\}$  vererbt werden. Analog kann eine zulässige Belegung für die Variablen zur Modellierung der Bauteilewechselphasen bestimmt werden.

Die Konstruktionsvorschrift kann für die restlichen Variablenklassen jedoch so nicht übernommen werden, sondern erfordert eine leichte Anpassung. Bspw. erscheint es wenig sinnvoll, die Belegung für Transportaufträge zu Werkzeugverlagerungen unverändert in die nachfolgende Diskretisierungsstufe auf sämtliche Zeitslots entsprechend zu vererben. Die Vergabe eines Auftrags zum Zeitslot  $t_i$  würde sich durch die unmittelbare Vererbung auf  $\{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\}$  entsprechend vervielfältigen und eine unsinnige Mehrfachvergabe in aufeinanderfolgenden Slots zur Folge haben. Daher muss eine Auftragsvergabe im Zeitslot  $t_i$  genau einem Zeitslot  $t_{i_j} \in \{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\}$  der nachfolgenden Diskretisierungsstufe zugeordnet und für die Slots  $\{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\} \setminus \{t_{i_j}\}$  ein entsprechender Auftrag ausgeschlossen werden. Dabei ist aber zusätzlich sicherzustellen, dass Werkzeugverlagerungen tatsächlich der Lösung auf dem größeren Zeitraster entsprechend vollzogen und abgeschlossen werden können. Entsprechend der exemplarischen Darstellung in Abbildung 7.15 muss deswegen die Vererbung eines Werkzeugtransportauftrags aus dem Zeitslot  $t_i \in D_n$  auf den entsprechend frühest möglichen Zeitslot  $t_{i_1} \in \{t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_m}\} \subsetneq D_{n+1}$  aus der nachfolgenden Diskretisierungsstufe erfolgen.

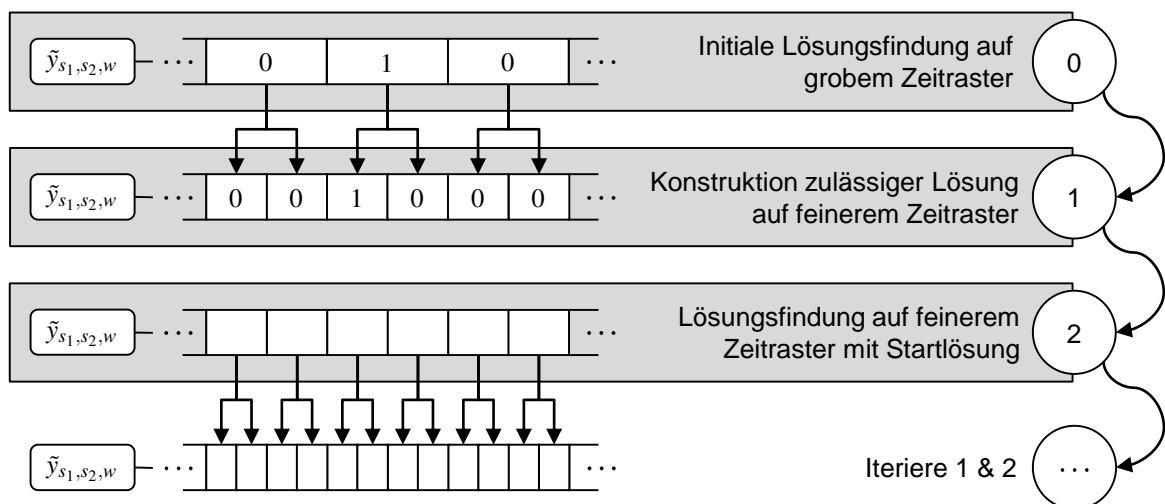


Abbildung 7.15: *Werkzeugverlagerungen in der Schrittweisen Zeitauflösung: iterativ können aus Lösungen auf größeren Zeitrastern primale Initiallösungen zur Verbesserung der Lösungsfindung auf feineren Zeitrastern für die Variablen zur Beschreibung von Werkzeugverlagerungen für das zugrunde liegende Problem konstruiert werden*

Analog kann mit derselben Argumentation eine Belegung für die Variablen zur Bauteiledistribution festgesetzt werden, ebenso wie die Fehlteilermengen entsprechend frühestmöglich zu kompensieren sind, um eine Bedarfsdeckung zu gewährleisten. Die Klasse an Entscheidungsva-

riablen, welche den Aufenthaltsort von Werkzeugen repräsentiert, steht hingegen in direktem Zusammenhang zu den Werkzeugtransportaufträgen und ist dementsprechend mit Kenntnis des initialen Werkzeugstandorts durch die Belegung der Auftragsvariablen determiniert.

### Zeitliche Quasi-Sukzessivplanung

Eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung der Lösungsfindung liegt in einem Planungsansatz, welcher iterativ Lösungen für begrenzte Teilbereiche des zu betrachtenden Zeithorizonts als Startlösungen zur Berechnung des Programms auf erweiterten Zeitintervallen verwendet und im Grundsatz in Abbildung 7.16 beschrieben ist.

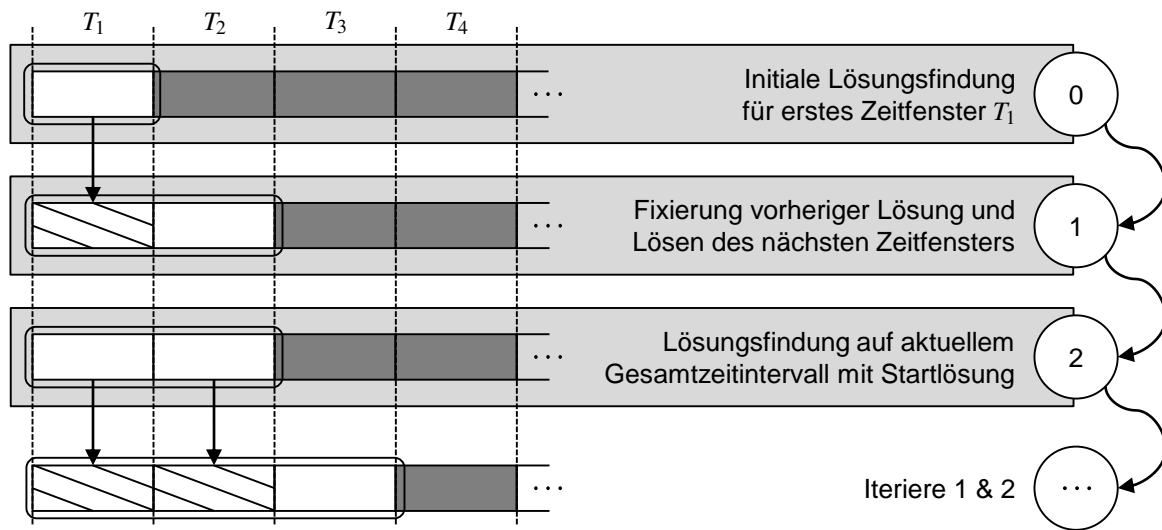


Abbildung 7.16: Ablaufschema der Zeitlichen Quasi-Sukzessivplanung: iterativ werden Lösungen auf begrenzten Zeithorizonten zu zulässigen Lösungen für erweiterte Zeitintervalle ausgebaut, womit sukzessive das ursprüngliche Problem angegangen wird

In einem ersten Schritt wird der Zeithorizont  $T$  in eine vorgegebene Anzahl  $m$  ( $m \geq 2$ ) disjunkter, in der zeitlichen Abfolge geordneter Teilhorizonte  $\{T_1, T_2, \dots, T_m\} \subsetneq T$  mit  $\bigcup_{k=1}^m T_k = T$  aufgeteilt. Die Lösung des Problems für den ersten Teilhorizont  $T_1$  dient als Initialisierungsphase. Im Anschluss daran wird das Problem auf dem erweiterten Zeithorizont  $T_{\leq 2} = T_1 \cup T_2$  betrachtet, wobei die ermittelte Lösung für  $T_1$  festgesetzt wird. Es folgt die Berechnung einer Lösung für den Teilzeithorizont  $T_2$  unter Berücksichtigung der fixierten Zeitspanne  $T_1$ . Durch Komposition einer derartigen Lösung für den Horizont  $T_2$  und der Lösung für  $T_1$  ergibt sich eine zulässige primale Lösung, die bei der Lösungsermittlung für den erweiterten Zeithorizont  $T_{\leq 2}$  genutzt wird. Dieses Vorgehen kann nun iterativ für zunehmende Zeitintervalle  $T_{\leq (n+1)} = T_{\leq n} \cup T_{n+1}$  ( $n < m$ ) fortgesetzt werden, wodurch sich ein quasi-sukzessiver Planungsansatz ergibt. In der finalen

Iterationsschleife, in welcher das ursprüngliche Problem über den gesamten zu betrachtenden Zeithorizont  $T = T_{\leq m}$  zu berechnen ist, terminiert der Ansatz mit der Ermittlung einer Lösung von ausreichender Güte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es sich bei den drei vorgestellten Algorithmen prinzipiell um exakte Verfahren handelt, welche sukzessive zulässige Lösungen für den jeweiligen nächsten Iterationsschritt erzeugen und damit die Laufzeiten zu verbessern suchen. Jedoch gilt, dass sowohl bei der *Stufenweisen Aggregation* als auch bei der *Schrittweisen Zeitauflösung* jede während der einzelnen Iterationsschritte ermittelte Lösung auch für das Gesamtproblem zulässig ist und somit als heuristische Lösung entsprechend zur Anwendung kommen kann. Einzig die *Zeitliche Quasi-Sukzessivplanung* liefert ausschließlich in der finalen Iteration für das Gesamtproblem zulässige Lösungen, da es zuvor an zulässigen Belegungen für die Variablen der noch nicht involvierten Teilzeitintervalle ermangelt. Nichtsdestotrotz liefert dieses Verfahren für sämtliche bis zum aktuellen Zeitpunkt involvierten Zeitspannen zulässige Lösungen.

## 7.5 Alternative und erweiterte Modellierungsansätze

Mit den entwickelten Modellen und den beschriebenen Ansätzen aus den vorhergehenden Abschnitten ist in der Praxis die Möglichkeit gegeben, im Störfall die Produktionsprogramme kurzfristig effektiv anzupassen bzw. neu zu erstellen, um eine risikominimale Überbrückung eines auftretenden Engpasses zu gewährleisten. In den bisherigen Betrachtungen war es möglich, jedes Werkzeug auf jeder Maschine einzusetzen. Für die Testdatensätze war diese Annahme zulässig, da die hinterlegten Maschinen nahezu baugleich sind und daher werkzeug- und maschinenseitig keine Hindernisse bei Verlagerungen zu erwarten sind. In der Realität gilt diese Annahme nicht zwangsläufig. Durchaus existieren Werkzeug-Maschine-Kombinationen, die nicht produktiv verwendbar sind, wie bspw. der Betrieb eines sechsstufigen Werkzeugsatzes auf einer Pressenlinie mit nur fünf Anlagen. Diverse Kombinationen sind somit in den Berechnungen auszuschließen. Dies kann durch zusätzliche Nebenbedingungen bzw. durch eine A-priori-Belegung der entsprechenden Entscheidungsvariablen im Modell berücksichtigt werden. Häufig tritt zudem der Fall auf, dass Werkzeuge für den Serienbetrieb auf einer bestimmten Presse ertüchtigt werden müssen. Dabei sind neben dem Tryoutprozess eventuell nötige Maßnahmen zur Sicherstellung des Betriebs durchzuführen. Nicht selten müssen Anpassungen an den Handlings- und Transfereinrichtungen vorgesehen oder diese sogar vollständig in einer neuen Ausführung zur Verfügung gestellt werden. Es zeigt sich, dass selbst bei baugleichen Anlagen keineswegs eine Ertüchtigung entfallen darf. Eine durchgängige Ertüchtigung aller Werkzeuge auf allen Anlagen ist wünschenswert, um eine schnelle Hilfeleistung im Notfall sicherzustellen. In der Regel



müssen Werkzeugsätze jedoch direkt auf den Produktionsanlagen ertüchtigt werden, sodass der Aufwand sehr groß ist. Zudem sind damit die Fertigungslinien temporär für die Produktion nicht nutzbar, wodurch Ertüchtigungen lediglich im alternativlosen Notfall vorgenommen werden.

Daher waren derartige Maßnahmen in den bisherigen Formulierungen nicht vorgesehen und nur bereits ertüchtigte Werkzeug-Maschine-Kombinationen wurden berücksichtigt. Im Einzelfall kann es jedoch dienlich sein, zur Überbrückung von Kapazitätsengpässen die potentielle Werkzeugverlagerung einschließlich etwaiger nötiger Ertüchtigungsmaßnahmen in die Planungen einzubeziehen. Dies soll im Folgenden anhand einer Erweiterung des Modells  $\mathfrak{P}_n$  geschehen. Dabei bleibt das Zielfunktional (O) unberührt, da die Zielsetzung auch hier in der Minimierung der Kosten für nicht gedeckte Bauteilebedarfsmengen bei minimalen Aufwendungen für Logistikprozesse liegt, und die Nebenbedingungen (C-1)–(C-11) werden ebenfalls unverändert übernommen. Zusätzlich sei an dieser Stelle folgende Klasse an Entscheidungsvariablen eingeführt:

$$w_{m,w,t} \in \{0, 1\} \quad \text{Ertüchtigung – das Werkzeug } w \in W \text{ wird ab Zeitslot } t \in T \text{ auf der Maschine } m \in M \text{ für den Produktionsbetrieb ertüchtigt (1 - ja | 0 - nein)}$$

Sei mit  $\vartheta_{m,w} \in \{0, 1\}$  der Status zur Ertüchtigung der entsprechenden Werkzeug-Maschine-Kombination gegeben.  $\vartheta_{m,w} = 1$  bedeutet dabei, dass das Werkzeug  $w$  für den Einsatz auf der Maschine  $m$  noch nicht ertüchtigt ist, wohingegen  $\vartheta_{m,w} = 0$  zulässige und bereits erprobte Kombinationen beschreibt. Damit können direkt folgende Restriktionen abgeleitet werden:

$$(E-1) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \sum_{l=1}^t \left( w_{m,w,l} + \sum_{k \in W_w} w_{m,k,l} \right) \geq \vartheta_{m,w} (\tilde{x}_{m,w,t} + x_{m,w,t})$$

Die Bedingungen (E-1) stellen sicher, dass ein Werkzeug nur dann auf einer Maschine verwendet werden darf, sofern zuvor ein Ertüchtigungsauftrag für diese Kombination eingesteuert wurde. Die Ertüchtigung eines Werkzeugs vererbt sich in diesem Zuge gleichzeitig auf alle Werkzeuge mit physischer Abhängigkeit, sodass für die Betrachtungen stets die Menge  $W_w$  einbezogen werden muss.

Unter zeitlichen und ablauforganisatorischen Gesichtspunkten seien für den Rahmen der kurzfristigen Neuplanung zusammenhängende Ertüchtigungsphasen angenommen. Dies deckt sich mit dem Vorgehen in der Betriebspraxis. Mit  $\iota_{m,w} \in \mathbb{N}_0$  einer sinnvollen Abschätzung für die Dauer der Ertüchtigung des Werkzeugs  $w$  auf der Maschine  $m$  in Zeitslots kann diese Forderung folgendermaßen gewährleistet werden:

$$(E-2) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \text{FOR } l = t \text{ TO } \min\{t + \vartheta_{m,w} - 1; \Phi\} \text{ DO} \\ w_{m,w,t} \leq \tilde{x}_{m,w,l}$$

Dabei ist durch die Beauftragung einer Ertüchtigung die entsprechende Maschine für die Dauer der Ertüchtigungsmaßnahmen für keine sonstigen produktiven Leistungen verfügbar. Dieser Status wird durch die Restriktionen (E-2) erzwungen, welche diesen Sachverhalt analog zu den Bauteilwechselzeiten als unproduktive Phase im Belegungsplan festsetzen.

Schließlich ist die Charakteristik einer Ertüchtigung als einmalig notwendige Maßnahme in das Modell zu integrieren und die Anzahl etwaiger Ertüchtigungsphasen für jede Werkzeug-Maschine-Kombination auf höchstens eine zu beschränken. Dies wird durch die Einführung der folgenden Nebenbedingungen (E-3) bewirkt:

$$(E-3) \quad \forall m \in M, \forall w \in W : \\ \sum_{t \in T} \left( w_{m,w,t} + \sum_{k \in W_w} w_{m,k,t} \right) \leq 1$$

Erweitert man das Programm  $\mathfrak{P}_n$  um die soeben beschriebenen Bedingungen (E-1)–(E-3), so ist damit also eine Berücksichtigung und der konkrete Ablauf von Ertüchtigungen sichergestellt. Der erweiterte Blickwinkel und die sich dadurch ergebenden zusätzlichen Entscheidungsoptionen ermöglichen, das vorhandene Potenzial des Presswerksverbunds noch weiter auszuschöpfen bzw. im konkreten Anwendungsfall zusätzliche Handlungsalternativen aufzuzeigen.

Dahingehend soll ein weiterer Punkt aufgegriffen werden. Das Modell  $\mathfrak{P}_n$  und alle daraus hervorgegangenen Programme berücksichtigen die unproduktive Bauteilwechselphase durch eine explizite Modellierung. Hierbei werden mit der diskreten Zeitdarstellung stets ganze Zeitslots entsprechend der Dauer der Installationsphase geblockt. Bauteilwechselphasen müssen somit gerundet werden, wodurch eine Abweichung zwischen Realproduktion und numerischer Berechnung einhergeht. Je nach Rundung wird damit die Produktivität bei der Bearbeitung von Aufträgen über- oder unterschätzt. Dies wiederum beeinträchtigt u. U. erheblich die Qualität der Abbildung des Realprozesses im virtuellen Umfeld. Bei ausreichender Feinheit der Zeitdiskretisierung ist diese Art der Formulierung unproblematisch, da die Werkzeugwechseldauer in ausreichender Güte abgebildet werden kann. Muss jedoch bspw. aus Gründen der Laufzeit die Zeitslotlänge erhöht werden, so können die zunehmenden Rundungsfehler das Planungsergebnis derart verfälschen, dass die berechneten Alternativen eventuell unbrauchbar sind und von deren Verwendung abzusehen ist. Für die verwendeten Testdaten war diese Unschärfe zwar nicht weiter von Bedeutung, da die Bauteilwechselzeiten als vernachlässigbar gering im Vergleich

zur Zeitslotlänge gegeben waren. Nichtsdestotrotz soll für den Anwender eine Möglichkeit aufgezeigt werden, diese Problematik durch eine fehlerfreie Abbildung von Installationsphasen im Modell zu umgehen. Hierfür wird eine Reformulierung von  $\mathfrak{P}_n$  vorgenommen, wofür jedoch zunächst folgende Entscheidungsvariablen einzuführen sind:

$v_{m,w,t} \in \{0,1\}$       *Werkzeugaktivität* – das Werkzeug  $w \in W$  wird ab Zeitslot  $t \in T$  auf der Maschine  $m \in M$  eingesetzt bei unmittelbar vorheriger Nicht-Verwendung auf derselben Maschine (1 - ja | 0 - nein)

Unter Verwendung dieser Variablen ist es nun möglich, die explizite Formulierung der Bauteilwechsel durch deren indirekte Berücksichtigung zu umgehen. Dabei wird die Modellierung der Bauteilproduktion neu gefasst, wie diese in Abbildung 7.17 schematisch dargestellt ist.

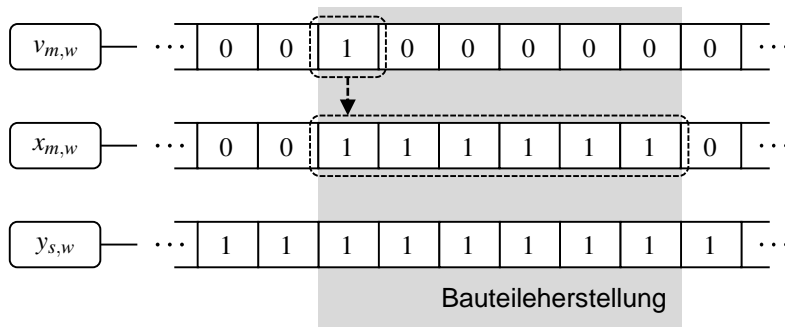


Abbildung 7.17: *Modifizierte formale Pressteileherstellung: mit einem Statuswechsel eines Werkzeugs  $w$ , welcher durch die Variablen zur Werkzeugaktivität angezeigt wird, kann dessen Einsatz auf der Maschine  $m$  umgehend aus der Passivität heraus produktiv erfolgen; die durch Vernachlässigen der unproduktiven Anteile in der Belegungszeit begründete Überbewertung der Bauteileausbringung ist entsprechend in den reformulierten Gleichgewichtsbedingungen zu berücksichtigen*

Der Einsatz des Werkzeugs  $w$  auf der Maschine  $m$  wird dabei nicht mehr weiter in die zwei sich gegenseitig ausschließenden Betriebsphasen Bauteilwechsel und Produktion aufgeteilt, sondern das Werkzeug ist umgehend produktiv im Einsatz. Dies hat einen Statuswechsel des entsprechenden Werkzeugs von Passivität zu Aktivität auf der Maschine zur Folge, welcher in den Variablen zur Werkzeugaktivität berücksichtigt wird. Hierdurch entsteht nun in den Gleichgewichtsbedingungen (C-11) eine Überbewertung der produzierten Bauteilemenge. Mit  $\tau_{m,w}$  der benötigten Dauer einer Installationsphase für das Werkzeug  $w$  auf der Maschine  $m$  in Zeiteinheiten kann aber die Menge an nicht produzierten Bauteilen der Art  $p$  aufgrund von

unproduktiven Bauteilwechseln am Standort  $s$  ab Beginn des betrachteten Zeithorizonts bis zum Beginn des Zeitslots  $t$  folgendermaßen bestimmt werden:

$$(R-4) \quad \Upsilon(s, p, t) := \sum_{m \in M_s} \sum_{w \in W_p} \sum_{l=1}^{t-1} \rho_{m,w} \tau_{m,w} v_{m,w,l}$$

Damit ist eine Reformulierung der Gleichgewichtsbedingungen (C-11) zur Beseitigung der Produktionsüberbewertung wie folgt möglich:

$$(C-11') \quad \forall s \in S, \forall p \in P, \forall t \in T :$$

$$\varphi'_{s,p} + \Gamma(s, p, t) + \Omega(s, p, t) + \sum_{l=1}^t u_{s,p,l} \geq \Upsilon(s, p, t) + \Psi(s, p, t) + \sum_{l=1}^t \varepsilon_{s,p,l}$$

In den neuen Gleichgewichtsbedingungen (C-11') werden die nicht-produktiven Belegungszeiten für die geplanten Lose entsprechend berücksichtigt, sodass eine exakte Verrechnung unproduktiver Anteile erfolgen kann. Mit den expliziten Installationsphasen, entfallen auch die Nebenbedingungen (C-3), welche diese Phasen im Modell sicherstellten. Gleichzeitig müssen aber die Entscheidungsvariablen zur expliziten Modellierung der Bauteilwechselphase sukzessive aus dem Modell eliminiert und gegebenenfalls stellenweise Anpassungen der Restriktionsklassen unter Berücksichtigung der Variablen zur Werkzeugaktivität vorgenommen werden. Damit ergeben sich z. B. folgende Reformulierungen (C-4')–(C-6') der Nebenbedingungen (C-4)–(C-6):

$$(C-4') \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T :$$

$$\sum_{l=t}^{\min\{t+\mu-1\}} x_{m,w,l} \geq \min\{\mu; \Phi - t + 1\} v_{m,w,t}$$

$$(C-5a') \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T :$$

$$\sum_{l=t+1}^{\min\{t+\lambda; \Phi\}} \left( \sum_{h \in M_{s(m)} \setminus \{m\}} (v_{h,w,l} + x_{h,w,l}) + \sum_{h \in M_{s(m)}} \sum_{k \in W_w} (v_{h,k,l} + x_{h,k,l}) \right) \leq 2\lambda (1 - x_{m,w,t})$$

$$(C-5b') \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T :$$

$$\sum_{l=t}^{\min\{t+\lambda-1; \Phi\}} (v_{m,w,l} + x_{m,w,l}) \leq 2\lambda (1 - x_{m,w,t-1} + x_{m,w,t})$$

$$(C-5c') \quad \forall s \in S, \forall w \in W, \forall t \in T :$$

$$\sum_{l=t}^{\min\{t+\lambda-1; \Phi\}} \sum_{h \in M_s} \left( v_{h,w,l} + x_{h,w,l} + \sum_{k \in W_w} (v_{h,k,l} + x_{h,k,l}) \right) \leq 2\lambda \left( 1 - \sum_{l \in S \setminus \{s\}} \tilde{y}_{l,s,w,t} - \eta_{l,s,w} \right)$$

$$(C-6') \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ x_{m,w,t} \leq y_{s(m),w,t}$$

Die Restriktionen (C-1), (C-2) sowie (C-7), (C-8), (C-9) und (C-10) bleiben unverändert erhalten. Gleichzeitig werden folgende zusätzliche Bedingungen eingeführt:

$$(C-12) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ v_{m,w,t} \geq x_{m,w,t} - x_{m,w,t-1}$$

Sobald die Aktivität eines Werkzeugs  $w$  auf der Maschine  $m$  nach unmittelbar vorheriger Passivität des Werkzeugs auf derselben Anlage verzeichnet wird, ist dies durch die Nebenbedingungen (C-12) in den Variablen zur Werkzeugaktivität berücksichtigt.

Des Weiteren kann die Lösungsfindung erleichtert werden, indem für die Praxis irrelevante Optionen durch Restriktionen ausgeschlossen werden. Grundsätzlich ist eine Installation von Werkzeugen auf Maschinen ohne anschließende reale produktive Phase nicht sinnvoll. Über folgende Bedingungen (C-13) kann diesbezüglich erzwungen werden, dass sich das entsprechende Werkzeug  $w$  mit dem Auftreten einer Werkzeugaktivität auf der Maschine  $m$  tatsächlich mindestens für eine Zeitperiode, welche die Dauer  $\tau_{m,w}$  der Installationsphase übersteigt, im Einsatz befindet:

$$(C-13) \quad \forall m \in M, \forall w \in W, \forall t \in T : \\ \text{FOR } l = t \text{ TO } \min\{t + \lfloor \frac{\tau_{m,w}}{\tau} \rfloor; \Phi\} \text{ DO} \\ x_{m,w,l} \geq v_{m,w,t}$$

Die Einführung von Variablen zur Anzeige von Werkzeugwechselaktivitäten erlauben eine indirekte Einbindung von Installationsphasen in das Modell. Die soeben dargestellte Reformulierung des Programms  $\mathfrak{P}_n$  behebt somit die eingangs erwähnte Unschärfe, welche durch die diskrete Zeitdarstellung hinsichtlich Bauteilwechselzeiten einhergeht. Die Zeitdiskretisierung stellt in diesem Fall lediglich eine Einschränkung für die Belegungszeit und für die Losbildung dar. Die berechneten Produktionsprogramme sind jedoch auf den zugrunde liegenden Daten korrekt und können direkt Verwendung finden.

Selbstverständlich ist es möglich, diese Modellvariante durch das Einbeziehen von Ertüchtigungsmaßnahmen zu ergänzen und den Planungsspielraum damit zu erweitern. An dieser Stelle sei jedoch an die Komplexität des Problems erinnert. Grundsätzlich können verschiedenste Sachverhalte und Aspekte in einem Programm berücksichtigt werden. Dies geht in der Regel

jedoch zu Lasten der numerischen Lösbarkeit des Problems. Daher sollten im Vorfeld einer etwaigen Integration der Modelle in die betrieblichen Planungsabläufe die Systemgrenzen explizit festgesetzt werden, um eine zielorientierte und effektive Anwendung zu ermöglichen. Die Umsetzung im realbetrieblichen Umfeld unter Berücksichtigung betriebs- und ablauforganisatorischen Gesichtspunkte ist hingegen inhaltlicher Schwerpunkt des folgenden Kapitels.



## 8 Umsetzung im realbetrieblichen Umfeld

Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln die Modellierung und die Entwicklung eines numerischen Lösungsansatzes im Vordergrund stand, soll im Folgenden der Fokus auf der Umsetzung der erarbeiteten Methode im realbetrieblichen Umfeld liegen. Hierzu wird zu Beginn das Prinzip eines entsprechenden Assistenzsystems erläutert und schließlich dessen Einbettung in ein ganzheitliches, reaktives Konzept zum Störfallmanagement vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird auch kritisch auf Aspekte innerbetrieblicher Rahmenbedingungen für eine Realisierung eingegangen.

### 8.1 Technische Konzeption

Die entwickelten Modelle mit ihren Lösungsalgorithmen können direkt in der Produktionsfeinplanung verwendet werden. Im Sinne eines Assistenzsystems ist ein Einsatz als Planungsinstrument oder aber als Werkzeug zur Alternativengenerierung möglich, um die Entscheidungsfindung zu unterstützen und signifikant zu beschleunigen.

Ein technisches Konzept, wie sich ein solches Assistenzsystem realisieren lässt, ist in Abbildung 8.1 dargestellt. Neben dem konkreten Modell, welches auf Grundlage verfügbarer Parameter Entscheidungen auf operativer Ebene hinsichtlich einer Produktionsfeinplanung inklusive der zugehörigen logistischen Prozesse abzuleiten hilft und an dieser Stelle vorausgesetzt wird, ist ein existenzieller Baustein dieses Ansatzes die Datenbasis des Unternehmens mit seiner Informationsfülle, welche die Versorgung mit sämtlichen benötigten Stamm- sowie Betriebsdaten auf Abruf sicherstellt.

Wird der eingetretene Störfall mit seiner entsprechenden Spezifikation an das System übergeben, so wird im *PreProcessor* die Eingabe in die Modellstruktur eingebunden und ein Störfallszenario generiert. Dieses Szenario wird mit den verfügbaren Stammdaten und den aktuellen Betriebsdaten aus der Datenbasis versorgt, womit sich ein realitätsgetreues, virtuelles Abbild des Produktionsverbunds aufbereiten lässt. Im Anschluss wird das erstellte Störfallszenario an den *Solver* übergeben, welcher das hinterlegte Optimierungsprogramm löst und das berechnete Ergebnis an den *PostProcessor* übergibt. In dieser Stufe werden aus den Ergebnissen des Optimierers Handlungsalternativen abgeleitet, welche eine Risikobewertung u. a. anhand der prognostizierten Kosten erlauben. Die auf diese Weise bereitgestellten Optionen können je nach Bedarf direkt oder in eventuell abgeänderter Form als Handlungsempfehlungen für die Einleitung von Maßnahmen zur risikominimierten Überbrückung des Störfalls in der Produktion herangezogen werden. Hierfür werden die errechneten Einsatzzeiten der Werkzeuge auf den verfügbaren



Maschinen über den betrachteten Zeithorizont in entsprechende Maschinenbelegungspläne bspw. in Form von Gantt-Diagrammen überführt und zusammen mit den Aufstellungen der logistischen Operationen und ihrer zeitlichen Freigabetermine an die zuständigen Abteilungen weitergeleitet. Gleichzeitig können die während der Überbrückung des Kapazitätsengpasses gewonnenen Erkenntnisse und neuen Erfahrungen im Nachhinein in die Datenbasis eingespielt werden. Durch eine solche Rückkopplung mit der Datenbank ist das Update bzw. eine Erweiterung der zugrundeliegenden Informationsquelle gewährleistet.

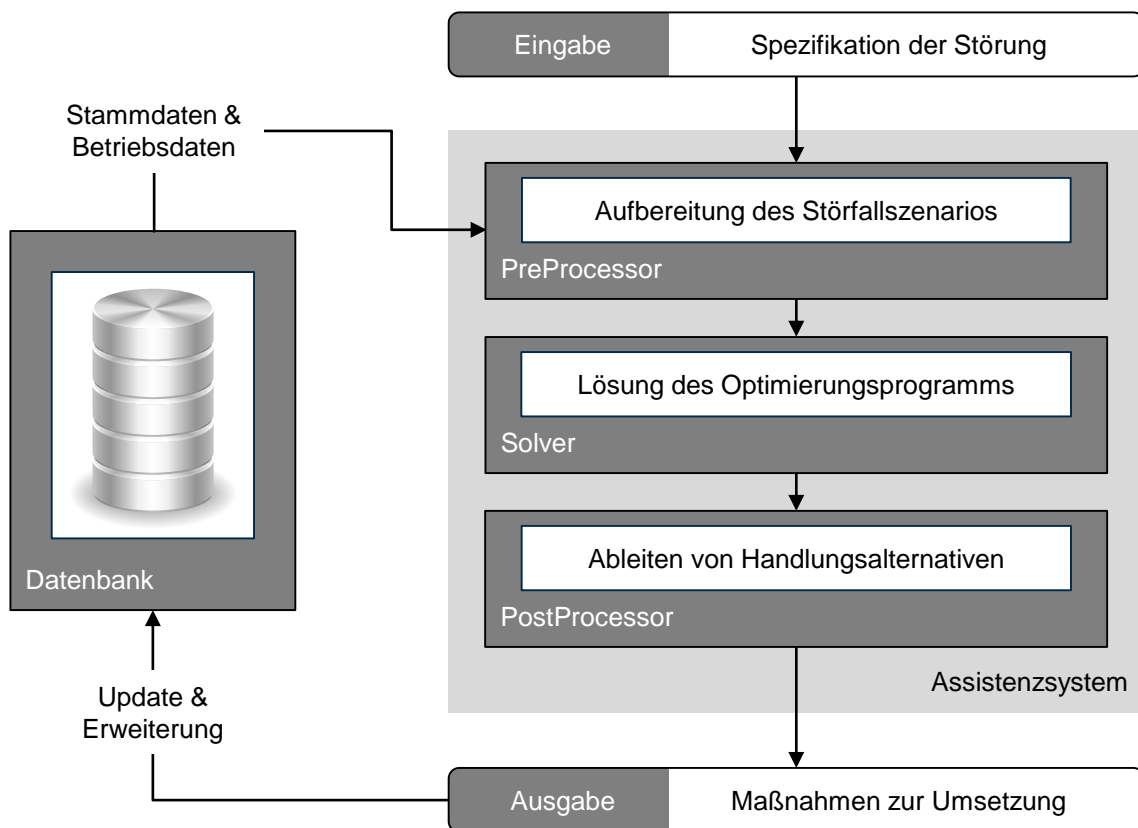


Abbildung 8.1: Assistenzsystem zur kurzfristigen, reaktiven Produktionsfeinplanung: nach der Meldung eines Störfalls an das System wird mit der aktuellen Datenbasis und der hinterlegten Modellstruktur ein virtuelles Störfallszenario generiert; aus dessen Lösung können logistikintegrierte Handlungsalternativen für die Realproduktion errechnet werden, welche direkt als Maßnahmen zur Umsetzung oder als Entscheidungshilfe dienen; eine Rückkopplung erlaubt ein Update bzw. eine Erweiterung der Datenbasis

Im Anschluss steht mit einem funktionierenden Assistenzsystem für die reaktive Feinplanung dessen Einbettung in ein umfassendes Konzept zum risikoarmen Störfallmanagement im Produktionsverbund im Mittelpunkt.

In Abbildung 8.2 ist dazu ein ganzheitlicher Ansatz schematisch dargestellt, in dem durch den Anwender oder durch Sensoren dem System über entsprechende Kanäle der Eintritt eines Störfalls gemeldet wird. Anhand der im Unternehmen vorhandenen Wissensbasis, welche durch Analysetechniken (BMI & BVA, 2016, S. 279ff) koordiniert und erweitert wird, erfolgt im Einzelfall eine Klassifizierung des Störfalls und des damit einhergehenden Risikos (DIN EN ISO 12100, 2011, S. 8) für den Prozess. Mittels Methoden der Zuverlässigkeitstechnik im Allgemeinen und einer Fehlermöglichkeiten- und -influssanalyse (FMEA) im Speziellen (DIN EN 60812, 2006, S. 6ff), (Tietjen, Decker und Müller, 2011, S. 15ff), (Werdich, 2012) kann u. a. eine Abschätzung hinsichtlich der prognostizierten Dauer des Kapazitätsengpasses direkt weitergeleitet werden, wodurch der betrachtete Horizont für den Planungszeitraum festgelegt werden kann.

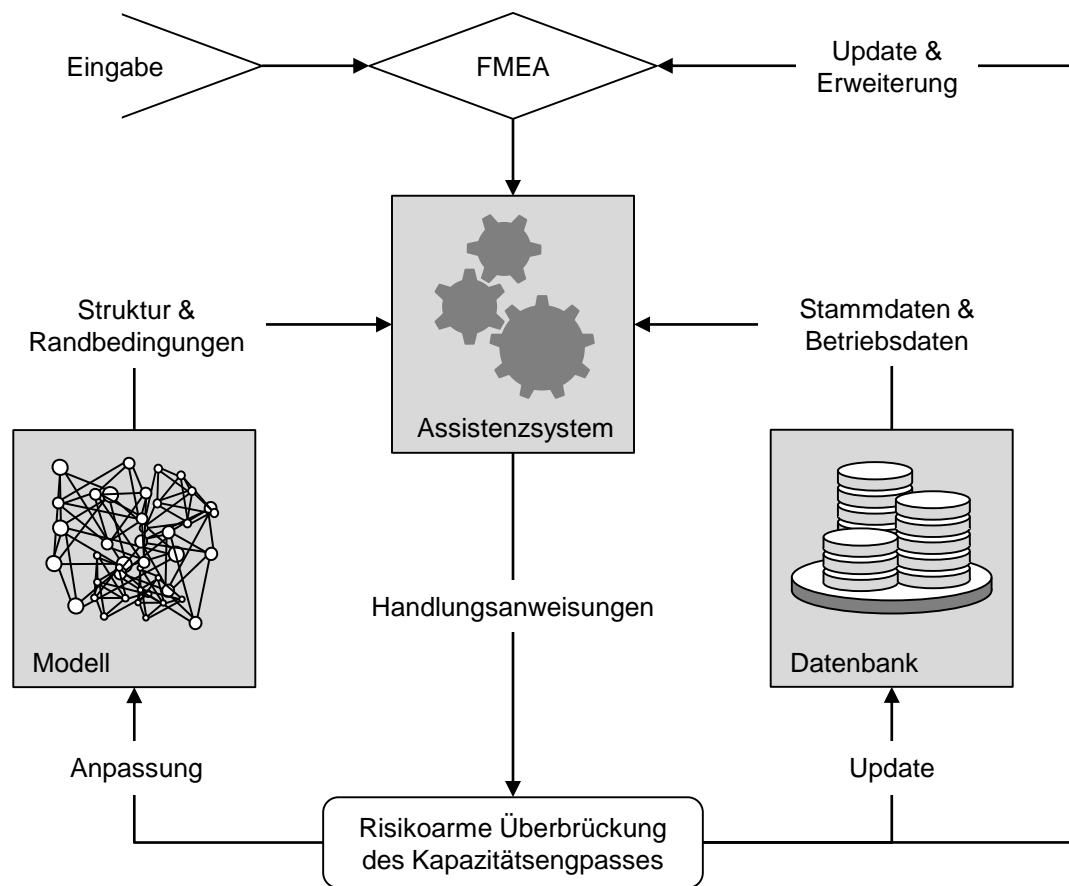


Abbildung 8.2: *Ganzheitliches Konzept eines reaktiven betrieblichen Störfallmanagements: nach dem Auftreten eines Störfalls wird dieser klassifiziert und an das Assistenzsystem weitergeleitet; das zugrundeliegende Störfallszenario wird realitätsnah erzeugt und aus seiner Lösung Handlungsalternativen zur risikoarmen Überbrückung des Engpasses in der Produktion abgeleitet; eine Rückkopplung dient zur Aktualisierung bzw. Erweiterung der Wissens- und Datenbasis sowie gegebenenfalls zur Modifikation des hinterlegten Modells*

Das hinterlegte Modell des Produktionssystems Presswerksverbund mit seiner anwendungsspezifischen Problemstruktur und den Randbedingungen wird im Assistenzsystem geladen. Der Abruf von aktuellen Daten aus dem betrieblichen Informationssystem, welche gegebenenfalls eine vorgelagerte Phase der Filterung und Datenstrukturierung durchlaufen, zusammen mit der übermittelten Störanzeige und der Wissensbasis aus der Eingabeeinheit werden zu einem virtuellen Störfallszenario aufbereitet und gewährleisten eine realitätsnahe Initialisierung des Programms. An dieser Stelle können u. U. die Systemgrenzen angepasst oder weitere Charakteristika für Maschinen, Werkzeuge, Bauteile oder Logistikprozesse berücksichtigt werden. So ist die Beschränkung auf eine bestimmte Teilmenge des Verbunds, das Einbeziehen gegebener Maschineneignungsrestriktionen oder auch gesetzlicher Vorgaben zu Arbeitszeiten und Betriebsregelungen denkbar.

Das generierte Szenario wird vom Assistenzsystem numerisch gelöst und die Lösung bedarfsgerecht zu expliziten Handlungsempfehlungen aufbereitet. Wie bereits in der Erläuterung zum Konzept des Assistenzsystems beschrieben, werden diese den an der Produktionssteuerung beteiligten Abteilungen übermittelt. Dort können die vorgeschlagenen Maßnahmen direkt zur Anpassung bzw. Neuerstellung der Produktionsprogramme übernommen werden oder durch ihren approximativen Charakter bei der Beurteilung diverser Szenarien mit ihren zugehörigen Konsequenzen dienlich sein. Somit ist eine effektive Unterstützung bei der Ableitung einer logistikintegrierten Maschinenbelegungsplanung unter realen Produktionsrandbedingungen und bei gleichzeitiger Einhaltung betriebswirtschaftlicher Zielsetzungen für eine optimale Überbrückung des Kapazitätsengpasses gegeben.

Sobald nach der Behebung des Störfalls der vorgesehene Normalbetrieb im operativen Produktionsbereich wiederhergestellt ist, wird durch Rückkopplung über entsprechende Schnittstellen ein Update und gegebenenfalls eine Erweiterung der Wissensbasis zur Aktualisierung des FMEA-Moduls eingespielt. Selbiges erfolgt für die Datenbasis, wodurch neben den anlagen- und standortabhängigen Daten auch potentielle Konfigurationen im Produktionsbetrieb auf Verbundebene für künftige Anwendungen hinterlegt werden können. Durch adäquate Anpassungen kann im Bedarfsfall selbstverständlich eine Modifikation des hinterlegten Modells vorgenommen werden.

Des Weiteren ermöglicht die allgemeingültige Formulierung der logistischen Komponenten in den Modellen eine Ausweitung des Ansatzes durch die Integration der sogenannten verlängerten Werkbank. Damit ist die Möglichkeit beschrieben, außerbetriebliche Produktionskapazitäten zur Leistungserstellung in Anspruch zu nehmen. Wie in Abbildung 8.3 skizziert sind derartige externe Ressourcen wie bspw. von Zulieferern als separate formale Standorte im Modell umsetzbar.

Selbstverständlich können in einem solchen Ansatz ausschließlich externe Kapazitäten Berücksichtigung finden, welche durch den Zulieferbetrieb explizit zur Verbundnutzung über den betrachteten Planungshorizont freigegeben sind. Hierzu sind umfassende, überbetriebliche Rahmenbedingungen zur systematischen, flächendeckenden Integration von beanspruchbaren Ressourcen im Sinne einer partnerschaftlichen Kollaboration zwischen den Unternehmen zu schaffen. Es sei angemerkt, dass im Falle einer solchen Netzwerkerweiterung die Verfügbarkeit und Bereitstellung der zur Initialisierung der Programme benötigten Stamm- und Betriebsdaten sichergestellt werden muss. Darüberhinaus muss die Bauteileherstellung auf der verlängerten Werkbank eingepreist werden. Dazu existieren in der Regel jedoch in vielen Fällen bereits Pauschalkosten für ausgelagerte Anlagenhübe, welche gemäß der Inanspruchnahme von Belegungszeiten im Zielfunktional zu verrechnen sind. Unter dem Gesichtspunkt des Subsidiaritätsprinzips kann damit analysiert werden, ob der Presswerksverbund einen auftretenden Störfall autonom zu überbrücken im Stande ist oder ob teure externe Kapazitäten für die Planungen in Betracht gezogen werden müssen.

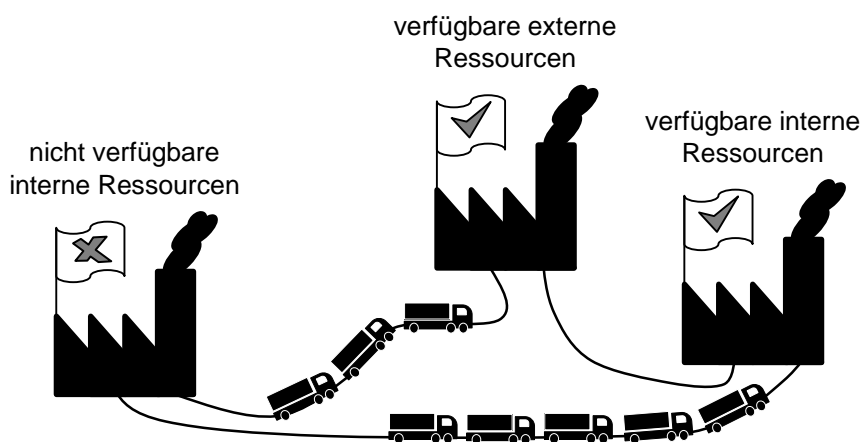


Abbildung 8.3: Ausweitung des Produktionsnetzwerks durch Integration externer Kapazitäten: das Einbeziehen von externen Ressourcen wie Produktionskapazitäten von Zulieferern ist durch deren Berücksichtigung als separate Standorte mit im Verwendungsfall anfallenden Produktionskosten möglich

## 8.2 Rahmenbedingungen einer Umsetzung

Mit den entwickelten Programmen und Konzepten aus den vorangegangenen Abschnitten sind die Grundlagen geschaffen für eine effektive Zusammenarbeit in den Presswerksverbänden der Automobilindustrie, um auftretende temporäre Kapazitätsengpässe bestmöglich zu überbrücken. Die geschaffenen Möglichkeiten sind jedoch vorerst theoretischer Natur und müssen in die Betriebspraxis transferiert werden. Erst hier zeigt sich, ob Potenziale vollumfänglich ausgeschöpft

und synergetische Effekte des Produktionsnetzwerks entsprechend gehoben werden können. Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen, dass genau der Schritt in die Realanwendung oftmals nicht erfolgreich vollzogen werden kann. Dabei existieren etliche Ursachen, die ein Scheitern bedingen können und welche somit vorab zu beachten sind.

Einerseits müssen vor der Implementierung bereits in der Planungsphase betriebsorganisatorische Aspekte in Erwägung gezogen und etwaige strukturelle Veränderungen angestoßen werden, welche von allen Netzwerkpartnern bei eintretendem Kapazitätsengpass getragen werden. Die Unternehmen sind in aller Regel heterarchisch organisiert und somit ist durch Dezentralisierung eine Autonomie hinsichtlich der Führungs- und Lenkungsfunktionen etabliert. Sollen die Vorteile des Produktionsverbunds gänzlich zur Entfaltung kommen, so müssen jedoch die beteiligten autonomen Unternehmensbereiche zumindest temporär einen Teil ihrer vorliegenden Macht und Selbstbestimmtheit im Anwendungsfall zum Wohle des Gesamtbetriebs abgeben. Der etablierte Polyzentrismus muss reaktionsschnell und kurzfristig auf eine zentrale Instanz komprimierbar sein. Eine effektive und zweckorientierte Kollaboration setzt die Institutionalisierung angepasster Rollen- und Ordnungsbeziehungen voraus. Durch Vereinbarungen und Absprachen sind u. a. Verantwortlichkeiten oder die Leistungsverrechnung zu gestalten. (Jäger und Boucke, 1999)

Andererseits ist darauf zu achten, dass die etablierte heterarchische Organisationsstruktur nicht ständig im Sinne einer temporären Netzwerkkoordination ausgehebelt wird. Um eine größtmögliche Kontinuität für die involvierten Planungsbereiche zu gewährleisten, müssen Störungen zuallererst mit Blick auf das Subsidiaritätsprinzip bewertet werden. Ist das Störfallszenario für das einzelne Presswerk überschaubar und kann es in Eigenregie mit den verfügbaren Ressourcen problemlos überbrückt werden, so sollte auf einen Abruf der Verbundkapazitäten verzichtet werden. Damit werden nicht nur die planerischen Mehraufwände begrenzt, sondern auch die Akzeptanz bei der Belegschaft nicht durch zu häufige Umplanungen unnötig strapaziert. Denn unter soziologischen Gesichtspunkten verlangt ein derartig zentral gesteuerter Ansatz dem Arbeitspersonal in gewisser Weise eine Anpassung oder Neuorientierung ab. Das System greift im Anwendungsfall direkt in die Entscheidungskompetenzen der Verantwortlichen ein und beschneidet deren Deutungshoheit, sodass häufig insbesondere in unteren Organisationsebenen eine Demotivation des Personals und eine ablehnende Haltung zu beobachten sind. Es werden oftmals Vorgaben des Systems ignoriert und es fehlt schlicht die nötige Akzeptanz für die Methodik und daher die Grundlage für eine erfolgreiche Nutzung. (Bitran und Tirupati, 1993), (Reed, 1996, S. 68ff), (Adam, 1998, S. 63f), (Kistner und Steven, 2001, S. 272ff)

Malhotra und Galletta (2004) gehen in ihrem Beitrag detailliert auf die Probleme ein, welche im Zusammenhang mit dem Einsatz neuer Systeme auftreten. Insbesondere verweisen Sie darauf,

dass bereits in der Planungsphase auf die späteren Anwender sowie deren Bedürfnisse eingegangen werden muss und Aspekte der Selbstbestimmtheit nicht unberücksichtigt bleiben dürfen. Bei der Umsetzung sind wirtschaftliche aber eben auch soziologische und verhaltenstheoretische Gesichtspunkte zu verbinden. Nicht selten werden diese Zusammenhänge auf die zentrale Aussage reduziert, dass gerade nicht die Systeme die unternehmerische Leistungsfähigkeit erhöhen sondern die Anwender und ihre Manager (Markus und Keil, 1994). Derzeit geht der Trend sogar dahin, Anwender direkt in die Entwicklung einzubinden, um mögliche Vorbehalte grundsätzlich zu vermeiden. Des Weiteren ist hierdurch die Möglichkeit geschaffen, die Kenntnisse und Erfahrungen der Anwender direkt in die zu schaffenden Systeme einfließen zu lassen sowie die Systeme auf den Nutzerbedarf auszurichten (Sanders, 2002), sodass der theoretische Mehrwert für den Anwender tatsächlich geschaffen werden kann und sich folglich auch eine Steigerung der Leistungsfähigkeit aus unternehmerischen Blickwinkel einstellt (Cain, 1998).

Nicht zuletzt ist eine erfolgreiche Kollaboration im Netzwerk in signifikanter Weise abhängig von der Kommunikation der beteiligten Partner. Jakobs (2002) stellt diesbezüglich eine direkte Beziehung zwischen Kooperations- und Kommunikationskompetenz her. Möller und Seiter (2008) kommen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass der Kommunikation in Netzwerken zwar eine zentrale Bedeutung zukommt, aber diese dabei eine mediierende Rolle einnimmt. Direkte Auswirkungen auf den Erfolg existieren demnach nicht, jedoch kann Kommunikation erfolgssteigernd sein, sofern dadurch Egoismen reduziert werden.

Zudem sind die Nutzer und die miteinander im Sinne von Kommunikation in Kontakt stehenden Personen stets neuen Herausforderungen ausgesetzt. Während sich Kommunikation bisher auf persönlicher Ebene vollzog, müssen in der heutigen Zeit des digitalen Wandels auch neuartige, digitale Medien eingebunden werden. In diesem Zusammenhang erscheint es sinnvoll, Kommunikationsarten und -medien gezielt hinsichtlich der ursprünglichen Bestimmung sowie ihrer Verwendung und Eignung kontinuierlich zu hinterfragen, um ein hohes Maß an Zweckgebundenheit und Effektivität zu gewährleisten (Rice, 1993). Gleichzeitig bedarf es Regularien zur Zusammenarbeit und ein gemeinsames Mediennutzungskonzept für den vorliegenden Fall des Arbeitskontexts (Jakobs, 2002). Eine dialogische Kommunikation in einem wertschätzenden Miteinander ist an dieser Stelle sicherlich förderlich und kann helfen, gegenseitige Vorbehalte und Barrieren für die Kooperation zu überwinden (von Meibom, 2012). Gegebenenfalls kann in diesem Zusammenhang durch das Etablieren von Rollen und Institutionen im Sinne der soziologischen Theorie wie u. a. nach Linton (1936, S. 113ff) oder Merton (1957) eine symbolische Ordnung vorgenommen werden, durch welche sich eine Reduktion kommunikativer Unsicherheiten realisieren lässt (Fuhse, 2012).

Außerdem ist zu beachten, dass in Netzwerken Zusammenarbeit häufig in Teams ohne physischen Kontakt erfolgt bzw. in Kooperation, bei der persönliche Treffen aus Kosten- und Effizienzgründen auf ein Minimum reduziert sind. Keil (2010) legt in ihrem Beitrag zwar den Fokus auf die Zusammenarbeit in virtuellen, internationalen Teams, diese Ergebnisse sind aufgrund ähnlicher Ausprägungen aber auch auf die Netzwerkaspekte im Presswerksverbund übertragbar. Neben der rapiden Zunahme der Kommunikationserfordernisse und des damit einhergehenden Bedarfs die Mitarbeiter darauf vorzubereiten, müssen auch Management und Führungspersonal geschult werden, die entstehenden Bedürfnisse dieser kollaborativen Teams zu erkennen und gezielt darauf einzugehen. Dahingehend beschreiben Schuh und Friedli (1999) zum einen die Notwendigkeit einer stabilen Plattform für die Zusammenarbeit im Netzwerk, welche strukturelle, kulturelle sowie aktivitätsbasierte Aspekte einschließt. Darüber hinaus sind verschiedene Managementrollen von Wichtigkeit, welche konstituierend für eine virtuelle Fabrik sind, hier aber auch auf die Problemstellung im Presswerksverbund übertragen werden können.

Die Bedeutung von Informationen als Produktionsfaktor wurde spät erkannt, sie nimmt im heutigen wirtschaftlichen Umfeld jedoch eine immer gewichtigere Rolle ein. Nach Picot, Reichwald und Wigand (1998, S. 65ff) ist jedoch die Überwindung der Leistungsgrenzen im Unternehmen durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien sowie ihre Einbindung in die bestehende Organisationsstruktur möglich. Zugleich können mit diesen neuen Möglichkeiten aber auch neue Herausforderungen in der Verständigung entstehen oder sie führen eventuell zu einer Verschärfung bestehender Probleme. In Zusammenhang mit der Einführung des vorgeschlagenen Planungsinstruments ist gesamtheitlich auf den Entscheidungsprozess bezogen eine erhöhte Transparenz verwirklicht. Dabei ist nach Hofmann (2007) jedoch der grundsätzliche Unterschied zwischen Transparenz und Information zu beachten: Transparenz bezeichnet einen Zustand, der durch das Medium Information und dessen Austausch durch Kommunikation erreicht sowie erhalten wird. Eine solche Offenlegung kann aufgrund unterschiedlicher Bewertungen und Wahrnehmungen durch die einzelnen Mitarbeiter verschiedene Auswirkungen nach sich ziehen. Durchaus besteht neben dem erhofften Leistungsanreiz mit einhergehender Leistungssteigerung oder Kompromissbereitschaft auch die Möglichkeit, dass Transparenz als Leistungsbremse wirkt und u. a. Blockade, Boykott oder Resignation nach sich zieht.

Nichtsdestotrotz muss Wert gelegt werden auf die Kommunikation und den Austausch von Informationen, um einen bestmöglichen Erfahrungsaustausch als unternehmensweite Kompetenzgrundlage und Wettbewerbsvorteil zu gewährleisten. Somit müssen Medienkompetenz sowie Kommunikation in und zwischen Einheiten unter der Zielsetzung eines fundierten, nachhaltigen Wissenstransfers adressiert werden. Eine ausgeprägte Befähigung des Personals muss durch

Schulungen oder Weiterbildungen sichergestellt sein bzw. vorab bereits in die Ausbildung integriert werden (Jakobs, 2002). Unter Anbetracht der Geschwindigkeit und der zunehmenden Beschleunigung, mit denen Geschäfts- und Koordinationsprozesse von Menschen im Allgemeinen ablaufen und vom Personal in industriellen Unternehmen überblickt und koordiniert werden müssen, eignen sich für die Belegschaft wie auch für das Führungspersonal Coaching-Methoden als Instrument zur Bewältigung der Komplexität im Betriebsalltag (Böning, 2015, S. 54ff). Der Mensch muss im Kontext moderner Infrastrukturen als zentrales Element erkannt und auf die anstehenden Herausforderungen in einer digitalen, vernetzten Produktion vorbereitet werden (Bock und Zillessen, 1996).

Schließlich müssen als Grundlage einer rechnergestützten Planung Daten bereitgestellt werden. Die benötigten Stamm- und Betriebsdaten müssen hinsichtlich Qualität, Detaillierungsgrad und Verfügbarkeit sowie Aktualität in hinreichender Form verfügbar sein. Wie bereits in 6.5 angemerkt, stellt dies die Unternehmen heutzutage in der Regel vor keine größeren Herausforderungen. Die digitalen Mittel und Werkzeuge erleichtern zudem die Beschaffung von externen Daten. Die Dauer von Transporten kann z. B. mittels Routenplanern nahezu in Echtzeit bestimmt werden und Schätzungen für logistische Operationen sind damit mit hoher Genauigkeit möglich. Sicherzustellen ist in diesem Zusammenhang also viel mehr die Datenpflege als die Datenerhebung. Um dieser Problematik Herr zu werden, ist an den entsprechenden Stellen eine Implementierung von Schnittstellen mit automatisiertem Online-Datenabruf in Betracht zu ziehen. In Ergänzung zur Aufzeichnung und kontinuierlichen Aktualisierung der konkreten Daten aus der Produktion muss die Datenbasis um Erfahrungswerte erweitert werden. Sinnvolle Abschätzungen für die Dauer von Transporten oder auch benötigte Zeiten für Ertüchtigungsmaßnahmen von Werkzeug-Maschine-Kombinationen müssen in die Datenbank aufgenommen werden.

Bei der Implementierung neuer informationstechnologischer Systeme im Bereich der industriellen Planung müssen nach Runde (2007, S. 61ff) im Wesentlichen aufbau- und ablauforganisatorische Fragestellungen für die zu etablierende Arbeitsweise geklärt und strukturiert werden. Außerdem ist der kulturelle Rahmen zu berücksichtigen, der sich den soziologischen Aspekten widmen muss, und gleichzeitig sind Anpassungen vorzunehmen, sodass das neue System aus technischer Sicht mit den laufenden Prozessen harmoniert und umgekehrt. Bei der Einführung ist eine zeitlich gestufte Umsetzung mit sukzessiver Ausweitung vorzuziehen. Auf diese Weise lassen sich zu Beginn im reduzierten System einfacher rasche Erfolge erzielen und zu installierende Neuerungen auf einen überschaubaren sowie beherrschbaren Umfang für die Anwender begrenzen, womit eine Erhöhung der Akzeptanz im Unternehmen erzielbar ist. Bspw. besteht



für das Assistenzsystem zur reaktiven Feinplanung die Möglichkeit, zu Beginn das Störfallmanagement nicht auf den gesamten Presswerksverbund auszurollen. Um Akzeptanzprobleme zu umgehen und nah an der etablierten, dezentralen Struktur zu bleiben, kann vom betroffenen Standort aus gezielt jeweils nur eine begrenzte Anzahl an Partnern für die gemeinschaftliche Planung einbezogen werden.

Ähnlich fassen Bracht, Geckler und Wenzel (2011, S. 219ff) die hinsichtlich der Einführung und Organisation zu beachtenden Punkte in ihren Ausführungen zur *Digitalen Fabrik* zusammen, welche sich übertragen lassen auf die Umsetzung des Konzepts zum risikoarmen Störfallmanagement im Presswerksverbund, wie es in dieser Arbeit vorgestellt wurde. Insbesondere sei darauf hingewiesen, dass die Entscheidung zur Einführung durch die Unternehmensführung erfolgen muss. Wird die Umsetzung auf oberster Lenkungebene nicht mitgetragen, so sind die strukturellen und organisatorischen Änderungen, die im Rahmen der Implementierung erforderlich werden, kaum konsequent zu realisieren.

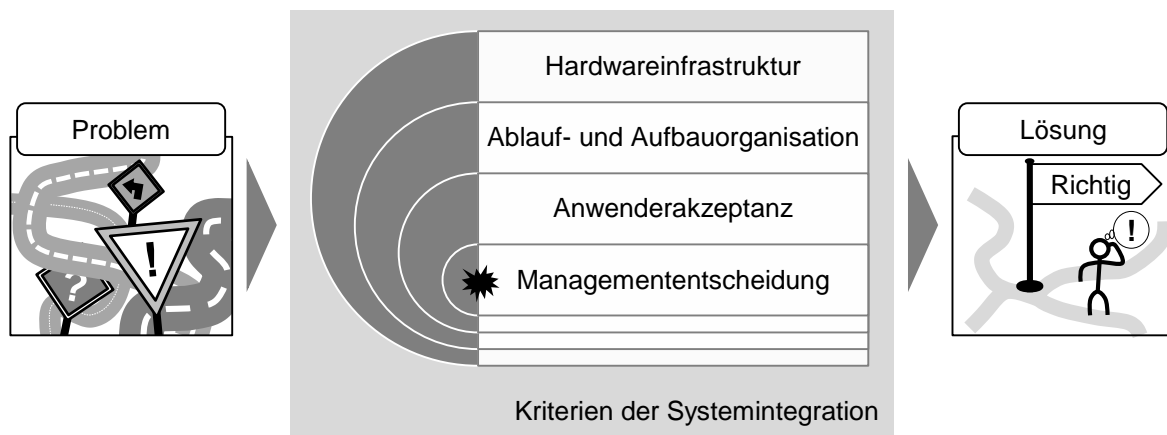


Abbildung 8.4: Kriterien einer erfolgreichen Systemintegration: soll ein neues System zur Lösung strategischer Probleme eingesetzt werden, so muss vorab dessen Umsetzung auf höchster Führungsebene entschieden und erst im Anschluss die Implementierung angestoßen werden; dabei sind ablauforganisatorische Fragen zu klären sowie Anpassungen an der Aufbaustruktur vorzunehmen und Anforderungen an Hardware und Infrastruktur sicherzustellen; gleichzeitig müssen soziologische Aspekte berücksichtigt werden, um eine bestmögliche Anwenderakzeptanz als Grundlage einer erfolgreichen Integration zu erwirken

In Abbildung 8.4 ist zu den gesamten Aspekten, die für eine erfolgreiche Systemintegration zu berücksichtigen sind, ein komprimierter Überblick gegeben. Soll das vorgeschlagene Assistenzsystem zur Lösung des bestehenden Problems erfolgreich in die Planungsprozesse integriert werden, so muss dies initial auf strategischer Managementebene gewollt sein und folglich ent-

schieden werden. Sodann sind möglichst früh die betroffenen Mitarbeiter über die anstehenden Änderungen zu informieren und nach Möglichkeit in die Planungsphase und die Integrationsprozesse einzubeziehen, um eine bestmögliche Anwenderakzeptanz zu erwirken. Neben etwaigen Anpassungen der Aufbaustruktur und Klärung von Fragestellungen der Ablauforganisation, muss die Rechnerausstattung und Netzinfrastruktur überprüft und gegebenenfalls modernisiert werden, um den neuen Anforderungen zu genügen.



## 9 Zusammenfassung

Produktionsnetzwerke industrieller Unternehmen schöpfen häufig nicht die gesamten Ressourcen des Verbunds aus, sodass selbst kurzfristige Störfallszenarien an einzelnen Standorten unkalulierbare Risiken für das Gesamtunternehmen bergen. In der vorliegenden Arbeit wurde der Presswerksverbund der Automobilindustrie einer eingehenden Betrachtung unterzogen, von welchem bei Maschinenausfällen und Anlagenstörungen erhebliche Gefahr für die übergeordnete Wertschöpfungs- und Versorgungskette der automobilen Fertigung ausgeht.

Das Produktionssystem Presswerk wurde formalisiert und ein abstraktes kostenbasiertes Optimierungsmodell für die kurzfristige Produktionssteuerung in einer verteilten und hochgradig interdependenten Netzwerkstruktur abgeleitet. Der Ansatz berücksichtigt logistische Aspekte im Rahmen einer integrierten Losgrößen- und Reihenfolgeplanung und gewährleistet mit der Zielsetzung minimaler finanzieller Gesamtbelastung, eine optimale Kapazitätsauslastung durch die Einbindung der gesamten verfügbaren Netzwerkressourcen. Das Programm eröffnet die Möglichkeit einer kurzfristigen, effektiven Anpassung der Produktionsfeinplanung und unterstützt somit eine risikominimale Überbrückung von temporären Kapazitätsengpässen. Zusätzlich ist die vorgeschlagene Formulierung erweiterbar und erlaubt eine Integration externer Produktionskapazitäten und -ressourcen. Eine Umsetzung im realbetrieblichen Umfeld eingebettet in ein ganzheitliches, reaktives Konzept zum Störfallmanagement ist unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen für eine Implementierung realistisch.

Der zentrale Mehrwert für das Unternehmen durch den Einsatz des entwickelten Planungsinstruments liegt in der optimalen Ausschöpfung und Koordination vorhandener Netzwerkkapazitäten, um ein Abreißen in den Produktionshauptlinien bestmöglich zu vermeiden. Als Assistenzsystem zur Generierung von Handlungsalternativen unterstützt der Ansatz im Einzelfall bei der Abschätzung und Bewertung von Risiken für die Wertschöpfungskette. Ein weiterer Punkt liegt in der umfassenden, prognostischen Transparenz hinsichtlich der Versorgung der internen Wertschöpfungsstrukturen durch den Presswerksverbund, welche nicht zuletzt eine Überprüfung laufender Produktionsprogramme und zugehöriger Logistikprozesse erlaubt und damit die mittel- und langfristigen Produktionsstrategien abzusichern hilft.



## A Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Makrostruktur eines Produktionssystems .....	8
Abbildung 2.2:	Aggregationsgrad eines Produktionssystems .....	9
Abbildung 2.3:	Typologie der Produktion.....	10
Abbildung 2.4:	Logische Ebenen des Managements .....	12
Abbildung 2.5:	Dimension industrieller Führungssysteme .....	13
Abbildung 2.6:	Entscheidungsfeld der Managementebenen .....	14
Abbildung 2.7:	Modelltyp Integrationsgrad .....	16
Abbildung 2.8:	Aufgabensicht der Aachener-PPS .....	18
Abbildung 2.9:	Zielsystem und Spannungsfeld der Produktionslogistik .....	19
Abbildung 3.1:	Wertschöpfungskette in der automobilen Karosseriefertigung .....	22
Abbildung 3.2:	Fertigungsfaktor .....	23
Abbildung 3.3:	Variantenfertigung.....	24
Abbildung 3.4:	Schema Bauteilefertigungsprozess .....	25
Abbildung 3.5:	Aufbau eines Presswerks .....	26
Abbildung 5.1:	Arbeitsplan .....	42
Abbildung 6.1:	Gantt-Diagramm zur Veranschaulichung der Produktion.....	48
Abbildung 6.2:	Formale Pressteileherstellung .....	51
Abbildung 6.3:	Formale Werkzeugverlagerung.....	51
Abbildung 6.4:	Formaler Bauteiletransport .....	52
Abbildung 7.1:	Laufzeitverhalten des Programms $\mathfrak{P}_1$ im relativen Vergleich zu $\mathfrak{P}_n$ .....	68
Abbildung 7.2:	<i>GAP</i> -Propagation während der Lösungsfindung für $\mathfrak{P}_n$ und $\mathfrak{P}_1$ .....	70
Abbildung 7.3:	Unterschied in den Zielfunktionswerten des Programms $\mathfrak{P}_1$ relativ zu $\mathfrak{P}_n$	72
Abbildung 7.4:	Auftretender Fehler zwischen den Programmen $\mathfrak{P}_1$ und $\mathfrak{P}_n$ in Relation zum theoretischen Fehler $\varepsilon$ .....	73
Abbildung 7.5:	Netzwerk-Fluss-Instanz $G_{\mathfrak{S}_1}(V_{\mathfrak{S}_1}, E_{\mathfrak{S}_1})$ zur zulässigen Lösung $\pi^*$ von $\mathfrak{P}_2$ für das Szenario $\mathfrak{S}_1$ .....	75

Abbildung 7.6: Netzwerk-Fluss-Instanz $G_{\mathfrak{S}_2}(V_{\mathfrak{S}_2}, E_{\mathfrak{S}_2})$ zur zulässigen Lösung $\pi^*$ von $\mathfrak{P}_2$ für das Szenario $\mathfrak{S}_2$ .....	77
Abbildung 7.7: Laufzeitverhalten des Programms $\mathfrak{P}_2$ im relativen Vergleich zu $\mathfrak{P}_1$ .....	84
Abbildung 7.8: <i>GAP</i> -Propagation während der Lösungsfindung für $\mathfrak{P}_1$ und $\mathfrak{P}_2$ .....	85
Abbildung 7.9: Laufzeitverhalten des Programms $\mathfrak{P}_3$ im relativen Vergleich zu $\mathfrak{P}_2$ .....	86
Abbildung 7.10: <i>GAP</i> -Propagation während der Lösungsfindung für $\mathfrak{P}_2$ und $\mathfrak{P}_3$ .....	87
Abbildung 7.11: Ablaufschema der <i>Rollierenden Planung</i> .....	90
Abbildung 7.12: Lösungsgüte der Rollierenden Planung im Vergleich zum Optimalansatz $\mathfrak{P}_3$ .....	91
Abbildung 7.13: Ablaufschema der <i>Stufenweisen Aggregation</i> .....	92
Abbildung 7.14: Produktionsphase in der <i>Schrittweisen Zeitauflösung</i> .....	94
Abbildung 7.15: Werkzeugverlagerungen in der <i>Schrittweisen Zeitauflösung</i> .....	95
Abbildung 7.16: Ablaufschema der <i>Zeitlichen Quasi-Sukzessivplanung</i> .....	96
Abbildung 7.17: Modifizierte formale Pressteileherstellung .....	100
Abbildung 8.1: Assistenzsystem zur kurzfristigen reaktiven Produktionsfeinplanung .....	106
Abbildung 8.2: Ganzheitliches Konzept eines reaktiven betrieblichen Störfallmanagements .....	107
Abbildung 8.3: Ausweitung des Produktionsnetzwerks durch Integration externer Kapazitäten .....	109
Abbildung 8.4: Kriterien einer erfolgreichen Systemintegration .....	114

## B Literaturverzeichnis

- ABELE, E., G. REINHART (2011). *Zukunft der Produktion*. München: Carl Hanser Verlag.
- ACHTERBERG, T., T. KOCH, A. MARTIN (2005). Branching rules revisited. In: *Operations Research Letters* **33**, 42–54.
- ADAM, D. (1998). *Produktions-Management*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- AFZALIRAD, M., J. REZAEIAN (2016). Resource-constrained unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times, precedence constraints and machine eligibility restrictions. In: *Computers & Industrial Engineering* **98**, 40–52.
- AHUJA, R., T. MAGNANTI, J. ORLIN (1993). *Network Flows – Theory, Algorithms, and Applications*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
- AISSANI, N., A. BEKRAR, D. TRENTESAUX, B. BELDJILALI (2012). Dynamic scheduling for multi-site companies: a decisional approach based on reinforcement multi-agent learning. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* **23**, 2513–2529.
- ALBERS, S., G. SCHMIDT (2001). Scheduling with unexpected machine breakdowns. In: *Discrete Applied Mathematics* **110**, 85–99.
- ALISCH, K., U. ARENTZEN, E. WINTER (2004). *Gabler Wirtschaftslexikon*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- ARMSTRONG, R., S. GAO, L. LEI (2008). A zero-inventory production and distribution problem with a fixed customer sequence. In: *Annals of Operations Research* **159**, 395–414.
- ASBJØRNSLETT, B. (2009). Assessing the Vulnerability of Supply Chains. In: *Supply Chain Risks*. Hrsg. von G. ZSIDISIN, B. RITCHIE. New York: Springer Science + Business Media.
- BACH, N., C. BREHM, W. BUCHHOLZ, T. PETRY (2012). *Wertschöpfungsorientierte Organisation – Architekturen, Prozesse, Strukturen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- BAKER, K. (1977). An experimental study of the effectiveness of rolling horizon schedules in production planning. In: *Decision Sciences* **8**, 19–27.
- BAKER, K., D. PETERSON (1979). An Analytic Framework for Evaluating Rolling Schedules. In: *Management Science* **25**, 341–351.
- BAUERNHANSL, T. (2014). Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*. Hrsg. von T. BAUERNHANSL, M. TEN HOMPEL, B. VOGEL-HEUSER. Wiesbaden: Springer Fachmedien.



- BEHNAMIAN, J., S. FATEMI GHOMI (2016). A survey of multi-factory scheduling. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* **27**, 231–249.
- BEHRBOHM, P. (1985). *Flexibilität in der industriellen Produktion – Grundüberlegungen zur Systematisierung und Gestaltung der produktionswirtschaftlichen Flexibilität*. Frankfurt/Main: Verlag Peter Lang.
- BELLMANN, R. (1957). *Dynamic Programming*. Princeton: Princeton University Press.
- BITRAN, G., D. TIRUPATI (1993). Hierarchical production planning. In: *Handbooks in Operations Research and Management Science 4 – Logistics of Production and Inventory*. Hrsg. von S. GRAVES, A. RINNOOY KAN, P. ZIPKIN. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- BLACKSTONE, J. (2008). *APICS dictionary – the standard for excellence in the operations management profession*. Chicago: The Association for Operations Management.
- BLAZEWICZ, J., J. LENSTRA, A. RINNOOY KAN (1983). Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity: A Survey. In: *Discrete Applied Mathematics* **5**, 11–24.
- BLECKER, T., B. KALUZA (2004). Heterarchische Hierarchie: Ein Organisationsprinzip flexibler Produktionssysteme. In: *Personal und Organisation*. Hrsg. von H. WILDEMANN. München: Transfer-Centrum-Verlag.
- BLEHER, N. (2013). *Produktionssysteme erfolgreich einführen*. Universität Hohenheim: Dissertation.
- BLEICHER, K. (1999). *Das Konzept Integriertes Management*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- BOCK, F., W. ZILLESSEN (1996). Unternehmen müssen Informationstechnologie radikal anders einsetzen. In: *Management im vernetzten Unternehmen*. Hrsg. von ARTUHR D. LITTLE. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- BÖNING, U. (2015). *Coaching jenseits von Tools und Techniken – Philosophie und Psychologie des Coaching aus systemischer Sicht*. Berlin: Springer-Verlag.
- BOUGERET, M., P.-F. DUTOT, K. JANSEN, C. ROBENEK, D. TRYSTRAM (2011). Scheduling jobs on heterogeneous platforms. In: *Proceedings of the seventeenth International Computing & Combinatorics Conference*, 271–283.
- BOVET, D., P. CRESCENZI (1994). *Introduction to the Theory of Complexity*. New York: Prentice Hall.

- BRACHT, U., D. GECKLER, S. WENZEL (2011). *Digitale Fabrik – Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin: Springer-Verlag.
- BRUCKER, P. (2007). *Scheduling Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag.
- BRÜGGEMANN, W. (1995). *Ausgewählte Probleme der Produktionsplanung – Modellierung, Komplexität und neuere Lösungsmöglichkeiten*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- BRÜGGEMANN, W., H. JAHNKE (2000). The discrete lot-sizing and scheduling problem: Complexity and modification for batch availability. In: *European Journal of Operational Research* **124**, 511–528.
- BUCK, H. (2003). Aktuelle Unternehmenskonzepte und die Entwicklung der Arbeitsorganisation – Visionen und Leitbilder. In: *Neue Organisationsformen im Unternehmen*. Hrsg. von H.-J. BULLINGER, H.-J. WARNECKE, E. WESTKÄMPER. Berlin: Springer-Verlag.
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN & BUNDESVERWALTUNGSSAMT (2016). *Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung*.
- BURKARD, R., U. ZIMMERMANN (2012). *Einführung in die Mathematische Optimierung*. Berlin: Springer-Verlag.
- BUSSE VON COLBE, W., G. LASSMANN (1991). *Betriebswirtschaftstheorie – Band 1: Grundlagen, Produktions- und Kostentheorie*. Berlin: Springer-Verlag.
- CAIN, J. (1998). Experience-Based Design: Toward a Science of Artful Business Innovation. In: *Design Management Journal* **9**, 10–16.
- CERIA, S., C. CORDIER, H. MARCHAND, L. WOLSEY (1998). Cutting plane algorithms for integer programs with general integer variables. In: *Mathematical Programming* **81**, 201–214.
- CHEN, B., C. POTTS, G. WOEGINGER (1998). A Review of Machine Scheduling: Complexity, Algorithms and Approximability. In: *Handbook of Combinatorial Optimization (Volume 3)*. Hrsg. von D.-Z. DU, P. PARDALOS. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- CHEN, J.-F. (2005). Unrelated parallel machine scheduling with secondary resource constraints. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **26**, 285–292.
- COLLETTE, Y., P. SIARRY (2004). *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Berlin: Springer-Verlag.
- COLORNI, A., M. DORIGO, F. MAFFIOLI, V. MANIEZZO, G. RIGHINI, M. TRUBIAN (1996). Heuristics from Nature for Hard Combinatorial Optimization Problems. In: *International Transactions in Operational Research* **3**, 1–21.

- COOK, S. (1971). The complexity of theorem-proving procedures. In: *Proceedings of the third annual ACM symposium on Theory of computing*, 151–158.
- COPIEL, K., M. WÖRBELEAUER, H. MEYER, H. TEMPELMEIER (2017). Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. In: *OR Spectrum* **39**, 1–64.
- CORSTEN, H., R. GÖSSINGER (2012). *Produktionswirtschaft: Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- COWLING, P., M. JOHANSSON (2002). Using real time information for effective dynamic scheduling. In: *European Journal of Operational Research* **139**, 230–244.
- CRUZ, J. (2009). The Effects of Network Relationships on Global Supply Chain Vulnerability. In: *Managing Supply Chain Risk and Vulnerability*. Hrsg. von T. WU, J. BLACKHURST. London: Springer-Verlag.
- DAKIN, R. (1965). A tree-search algorithm for mixed integer programming problems. In: *The Computer Journal* **8**, 250–255.
- DANGELMAIER, W. (2009). *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung – Im Sommer keine Kirschpralinen?* Berlin: Springer-Verlag.
- DANTZIG, G. (1963). *Linear Programming and Extensions*. Princeton: Princeton University Press.
- DANTZIG, G., R. FULKERSON, S. JOHNSON (1954). Solution of a Large-Scale Traveling Salesman Problem. In: *Journal of the Operations Research Society of America* **2**, 393–410.
- DARVISH, M., H. LARRAIN, L. COELHO (2016). A dynamic multi-plant lot-sizing and distribution problem. In: *International Journal of Production Research* **54**, 6707–6717.
- DE MATTA, R., T. MILLER (2004). Production and inter-facility transportation scheduling for a process industry. In: *European Journal of Operational Research* **158**, 72–88.
- DIETZ, W. (2012). *Die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Automobilindustrie: Herausforderungen und Perspektiven*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- DITTMANN, J. (2014). Produktionsflexibilität und Effizienz im BMW Presswerk mit Highspeed Servopressen – ein Rückblick nach vier Jahren Serienbetrieb. In: *EFB-Kolloquium Blechverarbeitung* **38**, 23–39.
- DOEGE, E., B.-A. BEHRENS (2010). *Handbuch Umformtechnik*. Berlin: Springer-Verlag.
- DOMBROWSKI, U., T. MIELKE (2015). Einleitung und historische Entwicklung. In: *Ganzheitliche Produktionssysteme*. Hrsg. von U. DOMBROWSKI, T. MIELKE. Berlin: Springer-Verlag.

- DOMSCHKE, W., A. DREXL, R. KLEIN, A. SCHOLL (2015). *Einführung in Operations Research*. Berlin: Springer-Verlag.
- DOMSCHKE, W., A. SCHOLL (2006). Heuristische Verfahren. In: *Jenaer Schriften zur Wirtschaftswissenschaft*. Hrsg. von H.-W. LORENZ, A. SCHOLL. Jena: Friedrich-Schiller Universität Jena.
- DOMSCHKE, W., A. SCHOLL, S. VOSS (1997). *Produktionsplanung – Ablauforganisatorische Aspekte*. Berlin: Springer-Verlag.
- DREHER, F. (2014). *Simulationsgestützte Auslastungs- und Ressourcenplanung in der Umformtechnik*. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover: Dissertation.
- DREXL, A., A. KIMMS (1997). Lot sizing and scheduling – Survey and extensions. In: *European Journal of Operational Research* **99**, 221–235.
- DYCKHOFF, H. (1994). *Betriebliche Produktion – Theoretische Grundlagen einer umweltorientierten Produktionswirtschaft*. Berlin: Springer-Verlag.
- DYCKHOFF, H., T. SPENGLER (2010). *Produktionswirtschaft – Eine Einführung*. Berlin: Springer-Verlag.
- EHM, J., M. FREITAG (2016). The benefit of integrating production and transport scheduling. In: *Procedia CIRP* **41**, 585–590.
- EHRGOTT, M. (2005). *Multicriteria Optimization*. Berlin: Springer-Verlag.
- ELMARAGHY, H., H.-P. WIENDAHL (2009). Changeability – An Introduction. In: *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Hrsg. von H. ELMARAGHY. London: Springer-Verlag.
- EQUI, L., G. GALLO, S. MARZIALE, A. WEINTRAUB (1997). A combined transportation and scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* **97**, 94–104.
- EUROSTAT (2008). *Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft*.
- EVERSHEIM, W. (1999). Planung von Produktionssystemen. In: *Produktion und Management 3 – Gestaltung von Produktionssystemen*. Hrsg. von W. EVERSHEIM, G. SCHUH. Berlin: Springer-Verlag.
- FAIR ISAAC CORPORATION (2015). *Xpress-Mosel – Reference manual, Release 4.0*.
- (2016a). *Getting Started with Xpress, Release 8.0*.
- (2016b). *Xpress-Mosel – User guide, Release 4.0*.

- FAIR ISAAC CORPORATION (2016c). *Xpress-Optimizer – Reference manual, Release 29.01*.
- FANDEL, G., A. FISTEK, S. STÜTZ (2011). *Produktionsmanagement*. Berlin: Springer-Verlag.
- FIEBIG, S. (2012). Die flexible Fabrik unter dem Fokus der Steuer- und Fördertechnik. In: *Trends in der Automobilindustrie*. Hrsg. von W. NEUBAUER, B. RUDOW. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- FLEISCHMANN, B. (1990). The discrete lot-sizing and scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* **44**, 337–348.
- (1994). The discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs. In: *European Journal of Operational Research* **75**, 395–404.
- FLOUDAS, C., X. LIN (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review. In: *Computers and Chemical Engineering* **28**, 2109–2129.
- FORSTNER, L., M. DÜMMLER (2014). Integrierte Wertschöpfungsnetzwerke – Chancen und Potenziale durch Industrie 4.0. In: *Elektrotechnik & Informationstechnik* **131**, 199–201.
- FOURASTIÉ, J. (1969). *Die große Hoffnung des zwanzigsten Jahrhunderts*. Im französischen Original erschienen als J. Fourastié: *Le Grand Espoir du XXe siècle*. Gallimard, Paris 1963. Köln: Bund-Verlag.
- FRIEDLI, T., F. LIEBETRAU (2016). Innovatives Management von Produktionsnetzwerken. In: *Business Innovation: Das St. Galler Modell*. Hrsg. von C. HOFFMANN, S. LENNERTS, C. SCHMITZ, W. STÖLZLE, F. UEBERNICKEL. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- FRIEDLI, T., G. SCHUH (2012). *Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnstandorten*. Berlin: Springer-Verlag.
- FU, B., Y. HUO, H. ZHAO (2011). Approximation schemes for parallel machine scheduling with availability constraints. In: *Discrete Applied Mathematics* **159**, 1555–1565.
- FUHSE, J. (2012). Rollen und Institutionen als symbolische Ordnung von Netzwerken. In: *Berliner Journal für Soziologie* **22**, 359–384.
- GÄLWEILER, A. (2005). *Strategische Unternehmensführung*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- GAREY, M., D. JOHNSON (1979). *Computers and Intractability – A Guide to the Theory of NP-Completeness*. New York: W. H. Freeman und Company.
- GEIGER, F., G. REINHART (2016). Knowledge-based machine scheduling under consideration of uncertainties in master data. In: *Production Engineering Research and Development* **10**, 197–207.

- GICQUEL, C. (2008). *MIP models and exact methods for the Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem with sequence-dependent changeover costs and times*. École Centrale Paris: Dissertation.
- GICQUEL, C., M. MINOUX, Y. DALLERY (2009). On the discrete lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent changeover time. In: *Operations Research Letters* **37**, 32–36.
- GOMORY, R. (1958). Outline of an algorithm for integer solutions to linear programs. In: *Bulletin of the American Mathematical Society* **64**, 275–278.
- GÖPFERT, A., R. NEHSE (1990). *Vektoroptimierung: Theorie, Verfahren und Anwendungen*. Leipzig: Teubner Verlag.
- GOTTSCHALK, L. (2005). *Flexibilitätsprofile – Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich: Dissertation.
- GRAHAM, R., E. LAWLER, J. LENSTRA, A. RINNOOY KAN (1979). Optimizations and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: A Survey. In: *Annals of Discrete Mathematics* **5**, 287–326.
- GRIFFEL, N. (1999). *Prozesskette Ablaufsimulation – Voraussetzung zur systematischen Planung komplexer Produktionssysteme mit hohem Nutzgrad*. Technische Universität München: Dissertation.
- GRITZMANN, P. (2013). *Grundlagen der Mathematischen Optimierung: Diskrete Strukturen, Komplexitätstheorie, Konvexitätstheorie, Lineare Optimierung, Simplex-Algorithmus, Dualität*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- GRÖTSCHEL, M., O. HOLLAND (1991). Solution of large-scale travelling salesman problems. In: *Mathematical Programming* **51**, 141–202.
- GUINET, A. (2001). Multi-site planning: A transshipment problem. In: *International Journal of Production Economics* **74**, 21–32.
- GÜNTHER, H.-O., H. TEMPELMEIER (2012). *Produktion und Logistik*. Berlin: Springer-Verlag.
- GUTENBERG, E. (1983). *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre 1 – Die Produktion*. Berlin: Springer-Verlag.
- H’MIDA, F., P. LOPEZ (2013). Multi-site scheduling under production and transportation constraints. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* **26**, 252–266.

HAASIS, H.-D. (2008). *Produktions- und Logistikmanagement – Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

HASHEMIAN, N., C. DIALLO, B. VIZVÁRI (2014). Makespan minimization for parallel machines scheduling with multiple availability constraints. In: *Annals of Operations Research* **213**, 173–186.

HELD, M., R. KARP (1962). A Dynamic Programming Approach to Sequencing Problems. In: *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics* **10**, 196–210.

HERLYN, W. (2012). *PPS im Automobilbau – Produktionsprogrammplanung und -steuerung von Fahrzeugen und Aggregaten*. München: Carl Hanser Verlag.

HOFMANN, Y. (2007). Transparenz in Unternehmen – Leistungsanreiz oder Leistungsbremse für ihre Mitglieder? In: *Zeitschrift für Management* **2**, 6–27.

HOPCROFT, J., R. MOTWANI, J. ULLMANN (2007). *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. Boston: Pearson.

HOPCROFT, J., J. ULLMANN (1969). *Formal Languages and their Relation to Automata*. Reading: Addison-Wesley.

HORVÁTH, P., B. MEYER-SCHWICKERATH, M. SEITER (2011). Risikomanagement in Produktionsnetzwerken – Die Rolle von Frühwarnindikatoren. In: *Management vernetzter Produktionssysteme*. Hrsg. von H.-G. KEMPER, B. PEDELL, H. SCHÄFER. München: Verlag Franz Vahlen.

HUBER, W. (2016). *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

HÜGLI, A., P. LÜBCKE (2003). *Philosophielexikon – Personen und Begriffe der abendländischen Philosophie von der Antike bis zur Gegenwart*. Reinbek bei Hamburg: Rowolth Taschenbuch Verlag.

INTERNATIONALE FORSCHUNGSGEMEINSCHAFT FÜR MECHANISCHE PRODUKTIONSTECHNIK (2004). *Wörterbuch der Fertigungstechnik 3 – Produktionssysteme*. Berlin: Springer-Verlag.

JÄGER, C., B. BOUCKE (1999). Strukturen und Typen – Ausrichtung der Organisationsstruktur. In: *Vom Fraktal zum Produktionsnetzwerk – Unternehmenskooperationen erfolgreich gestalten*. Hrsg. von H.-J. WARNECKE, J. BRAUN. Berlin: Springer-Verlag.

JAKOBS, E.-M. (2002). Kommunikation in Netzwerken. In: *Erfolg in Netzwerken*. Hrsg. von J. MILBERG, G. SCHUH. Berlin: Springer-Verlag.

- JAMMERNEGG, W., M. POIGER (2013). Produktion. In: *Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik*. Hrsg. von S. KUMMER, O. GRÜN, W. JAMMERNEGG. München: Pearson.
- JOHNSON, D., C. PAPADIMITRIOU (1985). Computational complexity. In: *The Traveling Salesman Problem – A Guided Tour of Combinatorial Optimization*. Hrsg. von E. LAWLER, J. LENSTRA, A. RINNOOY KAN, D. SHMOYS. Chichester: John Wiley & Sons.
- JORDAN, C., A. DREXL (1998). Discrete Lotsizing and Scheduling by Batch Sequencing. In: *Management Science* **44**, 698–713.
- JUNGNICKEL, D. (2015). *Optimierungsmethoden – Eine Einführung*. Berlin: Springer-Verlag.
- KÄMPF, R. (2007). Grundlagen des Produktionsmanagements. In: *Handbuch Produktion – Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling*. Hrsg. von H. GIENKE, R. KÄMPF. München: Carl Hanser Verlag.
- KARMARKAR, N. (1984). A new polynomial-time algorithm for linear programming. In: *Combinatorica* **4**, 373–395.
- KARP, R. (1972). Reducibility among Combinatorial Problems. In: *The IBM Research Symposia Series – Proceedings of a symposium on the Complexity of Computer Computations*, 85–103.
- KEIL, M. (2010). Netzwerk Management – im virtuellen globalen Raum effizient sein. In: *Gruppendynamik und Organisationsberatung* **41**, 145–156.
- KEMPER, H.-G., H. BAARS, H. LASI (2011). Business-Intelligence-Systeme in produzierenden Unternehmen – Neue Ansätze einer ganzheitlichen Informationsversorgung. In: *Management vernetzter Produktionssysteme*. Hrsg. von H.-G. KEMPER, B. PEDELL, H. SCHÄFER. München: Verlag Franz Vahlen.
- KERN, W. (1962). *Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung. Grundlagen und Verfahren*. Köln: Westdeutscher Verlag.
- KHACHIYAN, L. (1979). A polynomial algorithm for linear programming (In Russisch). In: *Doklady Akademii Nauk SSSR* **244**, 1093–1096.
- KIENER, S., N. MAIER-SCHEUBECK, R. OBERMAIER, M. WEISS (2006). *Produktionsmanagement – Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.



- KIM, D.-W., D.-G. NA, F. CHEN (2003). Unrelated parallel machine scheduling with setup times and a total weighted tardiness objective. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* **19**, 173–181.
- KISTNER, K.-P., M. STEVEN (2001). *Produktionsplanung*. Berlin: Springer-Verlag.
- KLEE, V., G. MINTY (1972). How good is the Simplex Algorithm? In: *Proceedings of the third Symposium on Inequalities*, 159–175.
- KOLLERER, H. (1978). *Die betriebswirtschaftliche Problematik von Betriebsunterbrechungen: Planungsgrundlagen zur Berücksichtigung von Betriebsunterbrechungen im Rahmen der Unternehmenspolitik*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.
- KORTE, B., J. VYGEN (2012). *Combinatorial Optimization – Theory and Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag.
- KRETH, U., H. HOFFMANN, P. DEMMEL, K. NOTHHAFT (2012). Werkzeugmaschinen zum Tiefziehen. In: *Handbuch Umformen*. Hrsg. von H. HOFFMANN, R. NEUGEBAUER, G. SPUR. München: Carl Hanser Verlag.
- KURBEL, K. (2016). *Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie*. Berlin: Walter de Gruyter.
- LAND, A., A. DOIG (1960). An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems. In: *Econometrica* **28**, 497–520.
- LASDON, L., R. TERJUNG (1971). An efficient algorithm for multi-item scheduling. In: *Operations Research* **19**, 946–969.
- LAWLER, E. (1983). Recent Results in the Theory of Machine Scheduling. In: *Mathematical Programming – The State of the Art*. Hrsg. von A. BACHEM, M. GRÖTSCHEL, B. KORTE. Berlin: Springer-Verlag.
- LAWLER, E., J. LENSTRA, A. RINOOY KAN, D. SHMOYS (1993). Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity. In: *Handbook in Operations Research and Management Science 4 – Logistics of Production and Inventory*. Hrsg. von S. GRAVES, A. RINOOY KAN, P. ZIPKIN. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- LENSTRA, J., A. RINOOY KAN, P. BRUCKER (1977). Complexity of Machine Scheduling Problems. In: *Annals of Discrete Mathematics* **1**, 343–362.

- LENSTRA, J., D. SHMOYS (1995). Computing Near-Optimal Schedules. In: *Scheduling Theory and its Applications*. Hrsg. von P. CHRÉTIENNE, E. COFFMANN JR., J. LENSTRA, Z. LIU. Chichester: John Wiley & Sons.
- LIAW, C.-F., Y.-K. LIN, C.-Y. CHENG, M. CHEN (2003). Scheduling unrelated parallel machines to minimize total weighted tardiness. In: *Computers & Operations Research* **30**, 1777–1789.
- LINTON, R. (1936). *The Study of Man – An Introduction*. New York: D. Appleton-Century Company.
- LIU, M., F. ZHENG (2013). Advances in Scheduling Problems. In: *Handbook of Combinatorial Optimization (Volume 1)*. Hrsg. von P. PARDALOS, D.-Z. DU, R. GRAHAM. New York: Springer Science + Business Media.
- LÖDDING, H. (2008). *Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. Berlin: Springer-Verlag.
- MALHOTRA, Y., D. GALLETTA (2004). Building Systems That Users Want to Use. In: *Communications of the ACM* **47**, 88–94.
- MARCHAND, H., A. MARTIN, R. WEISMANTEL, L. WOLSEY (2002). Cutting planes in integer and mixed integer programming. In: *Discrete Applied Mathematics* **123**, 397–446.
- MARKOWITZ, H., A. MANNE (1957). On the Solution of Discrete Programming Problems. In: *Econometrica* **25**, 84–110.
- MARKUS, L., M. KEIL (1994). If We Build It, They Will Come: Designing Information Systems That People Want to Use. In: *MIT Sloan Management Review* **35**, 11–25.
- MAY, C., A. KOCH (2008). Overall Equipment Effectiveness (OEE) – Werkzeug zur Produktivitätssteigerung. In: *Zeitschrift der Unternehmensberatung* **6**, 245–250.
- MCKINSEY & COMPANY (2016). *Making data analytics work for you – instead of the other way around*.
- MENNERICH, K. (2005). *Modell zur Optimierung der Kapazitäts- und Belegungsplanung im Presswerksverbund der Automobilindustrie*. Technische Universität München: Dissertation.
- MERTON, R. (1957). The Role-Set: Problems in Sociological Theory. In: *The British Journal of Sociology* **8**, 106–120.
- MILBERG, J. (2002). Erfolg in Netzwerken. In: *Erfolg in Netzwerken*. Hrsg. von J. MILBERG, G. SCHUH. Berlin: Springer-Verlag.

- MILBERG, J. (2004). Die agile Produktion. In: *Autonome Produktion*. Hrsg. von F. KLOCKE, G. PRITSCHOW. Berlin: Springer-Verlag.
- MÖLLER, K., M. SEITER (2008). Erfolgswirkungen von Kommunikation in Netzwerken – Eine empirische Analyse. In: *Zeitschrift für Management* **3**, 5–26.
- MONEMI, R., K. DANACH, W. KHALIL, S. GELAREH, F. LIMA, JR., D. ALOISE (2015). Solution methods for scheduling of heterogeneous parallel machines applied to the workover rig problem. In: *Expert Systems with Applications* **42**, 4493–4505.
- MOSER, R. (2014). *Strategische Planung globaler Produktionsnetzwerke – Bestimmung von Wandlungsbedarf und Wandlungszeitpunkt mittels multikriterieller Optimierung*. Karlsruher Institut für Technologie: Dissertation.
- MÜLLER-MERBACH, H. (1984). Optimierungsmodelle zur Ablaufplanung. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Hrsg. von W. KERN. Stuttgart: Carl Ernst Poeschel Verlag.
- MÜLLER-STEWENS, G., C. LECHNER (2011). *Strategisches Management – Wie strategische Initiativen zum Wandel führen*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.
- MUROTA, K. (2003). *Discrete Convex Analysis*. Philadelphia: Society for Industrial und Applied Mathematics.
- NAKAJIMA, S. (1988). *Introduction to TPM – Total Productive Maintenance*. Im japanischen Original erschienen als S. Nakajima: TPM Nyūmon. Japan Institute for Plant Maintenance, Tokyo 1984. Cambridge: Productivity Press.
- NASCIMENTO, M., M. RESENDE, F. TOLEDO (2010). GRASP heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. In: *European Journal of Operational Research* **200**, 747–754.
- NEMHAUSER, G., L. WOLSEY (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. Chichester: John Wiley & Sons.
- NEMIROVSKY, A., D. YUDIN (1979). Effective methods for solving convex programming problems of large size (In Russisch). In: *Ekonomika i Matematicheskie Metody* **15**, 135–152.
- NEUMANN, K. (1996). *Produktions- und Operations-Management*. Berlin: Springer-Verlag.
- NEUMANN, K., M. MORLOCK (2002). *Operations Research*. München: Carl Hanser Verlag.
- NYHUIS, P., H.-P. WIENDAHL (2009). *Fundamentals of Production Logistics – Theory, Tools and Applications*. Berlin: Springer-Verlag.

- OSAKADA, K., K. MORI, T. ALTAN, P. GROCHE (2011). Mechanical servo press technology for metal forming. In: *CIRP Annals of Manufacturing Technology* **60**, 651–672.
- PADBERG, M., G. RINALDI (1991). A Branch-and-Cut Algorithm for the Resolution of Large-Scale Symmetric Traveling Salesman Problems. In: *Society for Industrial and Applied Mathematics Review* **33**, 60–100.
- PAPADIMITRIOU, C., K. STEIGLITZ (1982). *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- PARK, Y. (2005). An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. In: *International Journal of Production Research* **43**, 1205–1224.
- PATIG, S., S. THORHAUER (2002). Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion: Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten. In: *Wirtschaftsinformatik* **44**, 355–366.
- PICOT, A., R. REICHWALD, R. WIGAND (1998). *Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management – Lehrbuch zur Unternehmensführung im Informationszeitalter*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- PINEDO, L. (2016). *Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems*. New York: Springer Science + Business Media.
- POHL, H.-J. (1970). Kritik der Drei-Sektoren-Theorie. In: *Mitteilungen aus der Arbeitsmarkt- und Berufsforschung* **4**, 313–325.
- POTTS, C., L. VAN WASSENHOVE (1992). Integrating Scheduling with Batching and Lot-Sizing: a Review of Algorithms and Complexity. In: *Journal of the Operational Research Society* **43**, 395–406.
- PRICEWATERHOUSECOOPERS (2014). *Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen der vierten industriellen Revolution*.
- (2016). *Industry 4.0 – Building the digital enterprise*.
- PROGNOS AG (2016). *Lage und Zukunft der deutschen Industrie (Perspektive 2030)*. Endbericht zum Projekt Nr. 19/15 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie.
- REDLICH, T. (2010). *Open Production – Gestaltungsmodell für die Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie*. Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg: Dissertation.
- REED, E. (1996). *The Necessity of Experience*. New Haven: Yale University Press.

- RICE, R. (1993). Media Appropriateness – Using Social Presence Theory to Compare Traditional and New Organizational Media. In: *Human Communication Research* **19**, 451–484.
- ROLL, K., P. BOGON, C. ZIEBERT (2007). Innovative Methoden zur Auslegung von Umformwerkzeugen im Fahrzeugbau. In: *Werkstattstechnik online* **97**, 753–759.
- RUNDE, C. (2007). *Konzeption und Einführung von Virtueller Realität als Komponente der Digitalen Fabrik in Industrieunternehmen*. Universität Stuttgart: Dissertation.
- SAHNI, S. (1977). General Techniques for Combinatorial Approximation. In: *Operations Research* **25**, 920–936.
- SAMBASIVAN, M., S. YAHYA (2005). A Lagrangean-based heuristic for multi-plant, multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers. In: *Computers & Operations Research* **32**, 537–555.
- SANDERS, E. (2002). From user-centered to participatory design approaches. In: *Design and the Social Sciences: Making connections*. Hrsg. von J. FRASCARA. London: Taylor & Francis.
- SAUER, J. (2002). *Multi-Site Scheduling – Hierarchisch koordinierte Ablaufplanung auf mehreren Ebenen*. Universität Oldenburg: Habilitation.
- (2006). Modeling and Solving Multisite Scheduling Problems. In: *Planning in Intelligent Systems – Aspects, Motivations, and Methods*. Hrsg. von W. VAN WEZEL, R. JORNA, A. MEYSTEL. Hoboken: John Wiley & Sons.
- (2010). Vertical Data Integration for Reactive Scheduling. In: *Künstliche Intelligenz* **24**, 123–129.
- SAWIK, T. (2007). Integer programming approach to reactive scheduling in make-to-order manufacturing. In: *Mathematical and Computer Modelling* **46**, 1373–1387.
- (2009). Monolithic versus hierarchical approach to integrated scheduling in a supply chain. In: *International Journal of Production Research* **47**, 5881–5910.
- SCHINDELE, S. (1996). *Entwicklungs- und Produktionsverbände in der deutschen Automobil- und -zulieferindustrie unter Berücksichtigung des Systemgedankens*. Technische Hochschule Darmstadt: Dissertation.
- SCHNEEWEISS, C. (1999). *Einführung in die Produktionswirtschaft*. Berlin: Springer-Verlag.
- SCHÖNSLEBEN, P., E. SCHERER (2009). Produktionssteuerung in dezentralisierten Leistungsprozessen. In: *Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung*.

Hrsg. von H.-J. BULLINGER, D. SPATH, H.-J. WARNECKE, E. WESTKÄMPER. Berlin: Springer-Verlag.

SCHRIJVER, A. (1998). *Theory of Linear and Integer Programming*. Chichester: John Wiley & Sons.

— (2003). *Combinatorial Optimization – Polyhedra and Efficiency*. Berlin: Springer-Verlag.

SCHUBERT, H. (2008). Netzwerkkooperation – Organisation und Koordination von professionellen Vernetzungen. In: *Netzwerkmanagement*. Hrsg. von H. SCHUBERT. Wiesbaden: Verlag für Sozialwissenschaften.

SCHUH, G., T. BROSZE, U. BRANDENBURG (2012). Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung – Aachener PPS-Modell. In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von G. SCHUH, V. STICH. Berlin: Springer-Verlag.

SCHUH, G., T. FRIEDLI (1999). Die Virtuelle Fabrik – Konzepte, Erfahrungen, Grenzen. In: *Produktionswirtschaft 2000 – Perspektiven für die Fabrik der Zukunft*. Hrsg. von K. NAGEL, R. ERBEN, Piller F. Wiesbaden: Gabler Verlag.

SCHUH, G., C. SCHMIDT (2014). Grundlagen des Produktionsmanagements. In: *Handbuch Produktion und Management 5 – Produktionsmanagement*. Hrsg. von G. SCHUH, C. SCHMIDT. Berlin: Springer-Verlag.

SCHUH, G., M. SCHÜRMEYER, N. HERING (2012). Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung – Funktionen. In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von G. SCHUH, V. STICH. Berlin: Springer-Verlag.

SCHUH, G., V. STICH, J. HELMIG (2009). Konzepte des Supply-Chain-Managements. In: *Handbuch Produktion und Management 6 – Logistikmanagement*. Hrsg. von G. SCHUH, V. STICH. Berlin: Springer-Verlag.

SCHULER GMBH (1998). *Metal Forming Handbook*. Berlin: Springer-Verlag.

SCHWANINGER, M. (2009). *Intelligent Organizations – Powerful Models for Systemic Management*. Berlin: Springer-Verlag.

SCHWANINGER, M., K. AMBROZ (2009). Plädoyer für Langfristorientierung. In: *Strategisches und operatives Produktionsmanagement*. Hrsg. von J. STROHHECKER, A. GRÖSSLER. Wiesbaden: Gabler Verlag.

SENCAR, A. (2001). *Methodische Optimierung des Produktentstehungs- und Produktionsprozesses von Großpressteilen*. Technische Universität München: Dissertation.

- SHOR, N. (1970). Convergence rate of the gradient descent method with dilatation of the space (In Russisch). In: *Kibernetika* **2**, 102–108.
- SIPSER, M. (2013). *Introduction to the Theory of Computation*. Boston: Cengage Learning.
- SODHI, M., C. TANG (2012). Supply Chain Risk Management. In: *Managing Supply Chain Risk*. Hrsg. von M. SODHI, C. TANG. New York: Springer Science + Business Media.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*.
- (2017). *Statistisches Jahrbuch 2017 – Deutschland und Internationales*.
- STEINRÜCKE, M. (2015). Integrated production, distribution and scheduling in the aluminium industry: a continuous-time MILP model and decomposition method. In: *International Journal of Production Research* **53**, 5912–5930.
- STEVEN, M. (1994). *Hierarchische Produktionsplanung*. Berlin: Springer-Verlag.
- SYSKA, A. (2006). *Produktionsmanagement*. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- TAYLOR, F. (1903). Shop Management. In: *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* **24**, 1337–1480.
- (1911). *The Principles of Scientific Management*. Norwood: The Plimpton Press.
- TERRAZAS-MORENO, S., I. GROSSMANN (2011). A multiscale decomposition method for the optimal planning and scheduling of multi-site continuous multiproduct plants. In: *Chemical Engineering Science* **66**, 4307–4318.
- THE BOSTON CONSULTING GROUP (2006). *Innovationsstandort Deutschland – quo vadis?*
- (2015). *Industry 4.0: The Future of Productivity and Growth in Manufacturing Industries*.
- THUN, J.-H., M. DRÜKE, D. HOENIG (2009). Fehlteilmanagement als Herausforderung für Industriebetriebe. In: *Strategisches und operatives Produktionsmanagement*. Hrsg. von J. STROHHECKER, A. GRÖSSLER. Wiesbaden: Gabler Verlag.
- TIETJEN, T., A. DECKER, D. MÜLLER (2011). *FMEA-Praxis – Das Komplettpaket für Training und Anwendung*. Wiesbaden: Carl Hanser Verlag.
- TIMPE, C., J. KALLRATH (2000). Optimal planning in large multi-site production networks. In: *European Journal of Operational Research* **126**, 422–435.
- TURING, A. (1936). On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem. In: *Proceedings of the London Mathematical Society* **42**, 230–265.

- ULICH, E. (2013). Arbeitssysteme als Soziotechnische Systeme – eine Erinnerung. In: *Journal Psychologie des Alltagshandelns* **6**, 4–12.
- ULRICH, H. (2001a). *Das St. Galler Management-Modell*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- (2001b). *Die Unternehmung als produktives soziales System*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- (2001c). *Systemorientiertes Management*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- ULRICH, H., E. FLURI (1995). *Management – eine konzentrierte Einführung*. Bern: Verlag Paul Haupt.
- UNITED NATIONS (2008). *International Standard Industrial Classification of All Economic Activities*.
- VAHRENKAMP, R. (2008). *Produktionsmanagement*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- VALLADA, E., R. RUIZ (2011). A genetic algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with sequence dependent setup times. In: *European Journal of Operational Research* **211**, 612–622.
- VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE E.V. (2015). *Jahresbericht 2015*.
- (2016). *Jahresbericht 2016*.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (1992). *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- VIEIRA, G., J. HERRMANN, E. LIN (2003). Rescheduling Manufacturing Systems: a Framework of Strategies, Policies, and Methods. In: *Journal of Scheduling* **6**, 39–62.
- VIERGUTZ, C. (2011). *Integrated Production and Distribution Scheduling*. Universität Osnabrück: Dissertation.
- VON MEIBOM, B. (2012). Wertschätzung in der Kommunikation: Verbundenheit – Alte und neue Sehnsucht. In: *SignsBook – Zeichen setzen in der Kommunikation*. Hrsg. von B. ANDA, S. ENDRÖS, J. KALKA, S. LOBO. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- WARNECKE, H.-J. (1995a). *Der Produktionsbetrieb 1 – Organisation, Produkt, Planung*. Berlin: Springer-Verlag.
- (1995b). *Der Produktionsbetrieb 2 – Produktion, Produktionssicherung*. Berlin: Springer-Verlag.



- WARNECKE, H.-J. (1999). Neue Wege zum Erfolg. In: *Vom Fraktal zum Produktionsnetzwerk – Unternehmenskooperationen erfolgreich gestalten*. Hrsg. von H.-J. WARNECKE, J. BRAUN. Berlin: Springer-Verlag.
- (2002). Agilität im Wettbewerb erreichen – das Fraktale Unternehmen. In: *Erfolg in Netzwerken*. Hrsg. von J. MILBERG, G. SCHUH. Berlin: Springer-Verlag.
- WEBER, H.-J. (1984). Produktionstechnik und -verfahren. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Hrsg. von W. KERN. Stuttgart: Carl Ernst Poeschel Verlag.
- WEGENER, I. (2005). *Complexity Theory – Exploring the Limits of Efficient Algorithms*. Berlin: Springer-Verlag.
- WERDICH, M. (2012). Einführung in das Thema. In: *FMEA – Einführung und Moderation*. Hrsg. von M. WERDICH. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- WESTKÄMPER, E. (1997). Produktion in Netzwerken. In: *Komplexität und Agilität*. Hrsg. von G. SCHUH, H. WIENDAHL. Berlin: Springer-Verlag.
- (2009). Turbulentes Umfeld von Unternehmen. In: *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen*. Hrsg. von E. WESTKÄMPER, E. ZAHN. Berlin: Springer-Verlag.
- WESTKÄMPER, E., C. LÖFFLER (2016). *Strategien der Produktion*. Berlin: Springer-Verlag.
- WIENDAHL, H.-H. (2006). Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld: Teil 1 – Anforderungen. In: *Werkstattstechnik online* **96**, 183–189.
- WIENDAHL, H.-P. (2014). *Betriebsorganisation für Ingenieure*. München: Carl Hanser Verlag.
- WIENDAHL, H.-P., H. ELMARAGHY, P. NYHUIS, M. ZÄH, H.-H. WIENDAHL, N. DUFFIE, M. BRIEKE (2007). Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* **56**, 783–809.
- WIENDAHL, H.-P., S. LUTZ (2002). Production in Networks. In: *CIRP Annals – Manufacturing Technology* **51**, 573–586.
- WILDEMANN, H. (1995). *Entstörmanagement als PPS-Funktion – Realisierung störungsrobuster Wertschöpfungsprozesse*. München: Transfer-Centrum-Verlag.
- WILLIAMSON, D., D. SHMOYS (2011). *The Design of Approximation Algorithms*. New York: Cambridge University Press.
- WOTZLAW, A. (2006). *Scheduling Unrelated Parallel Machines – Algorithms, Complexity, and Performance*. Universität Paderborn: Dissertation.

ZAHN, E., U. SCHMID (1996). *Produktionswirtschaft: Grundlagen und operatives Produktionsmanagement*. Stuttgart: Carl Ernst Poeschel Verlag.

ZANAKIS, S., J. EVANS (1981). Heuristic "Optimization": Why, When, and How to Use It. In: *Interfaces* **11**, 84–91.

ZÄPFEL, G. (1982). *Produktionswirtschaft – Operatives Produktions-Management*. Berlin: Walter de Gruyter.

— (1989). *Taktisches Produktions-Management*. Berlin: Walter de Gruyter.

— (2000). *Strategisches Produktions-Management*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

ZÄPFEL, G., R. BRAUNE (2005). *Moderne Heuristiken der Produktionsplanung*. München: Verlag Franz Vahlen.

ZENTRUM FÜR EUROPÄISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG GMBH & NIEDERSÄCHSISCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG E.V. (2009). *Die Bedeutung der Automobilindustrie für die deutsche Volkswirtschaft im europäischen Kontext*. Endbericht zum Projekt Nr. 29/08 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie.



## C Normenverzeichnis

DIN 8580 (2003). *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 8582 (2003). *Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 8588 (2013). *Fertigungsverfahren Zerteilen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 8593-0 (2003). *Fertigungsverfahren Fügen – Allgemeines: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 8593-3 (2003). *Fertigungsverfahren Fügen – Anpressen, Einpressen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 8593-5 (2003). *Fertigungsverfahren Fügen – Fügen durch Umformen: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 13306 (2018). *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN 60812 (2006). *Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen – Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

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

DIN EN ISO 12100 (2011). *Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN EN ISO 6385 (2016). *Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN IEC 60050-351 (2014). *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik*. Beuth Verlag, Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V.

VDI 2815 BLATT 1 (1978). *Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung – Einführung, Grundlagen*. Beuth Verlag, Berlin: Verein Deutscher Ingenieure e.V.

VDI 2870 BLATT 1 (2012). *Ganzheitliche Produktionssysteme – Grundlagen, Einführung und Bewertung*. Beuth Verlag, Berlin: Verein Deutscher Ingenieure e.V.



## **D Verzeichnis betreuter Studienleistungen**

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München nachfolgend aufgeführte studentische Arbeiten und Projekte betreut. Die Bearbeitung der Aufgabenstellung sowie die Auswertung, Interpretation und Darstellung von Ergebnissen erfolgten dabei unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors Daniel Marian Opritescu. Entstandene Erkenntnisse und Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen.

### **Studienarbeiten**

HUBER, S. (2016):

*Decomposition Methods with Application to a Multiple-Site Production Planning Problem*

Master's Thesis

QU, L. (2016):

*Numerische Produktionsplanung bei kurzfristigen Störungen*

Master's Thesis

SIEGMUND, M. (2016):

*Models and Algorithmic Approaches for Production Planning with Installation Times*

Master's Thesis

### **Studentische Projektarbeiten**

DILLMANN, D., L. FEICHT, S. TILLY, C. WOLF (2015):

*Integrated Scheduling and Logistics*

Case Studies Discrete Optimization - combined lecture and project work course

GRANGERAU, M., J. HÖNEN, P. MÜNCH (2016):

*Scheduling and Logistics in Automobile Production*

Case Studies Discrete Optimization - combined lecture and project work course



# Dissertationen des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

- 01 *Felix Zimmermann*  
Generierung von maßgeschneiderten Bauteileigenschaften in  
PHS-Bauteilen durch Anlassen mittels Flamme; 2014;  
ISBN: 978-3-95884-007-2
- 02 *Christopher Joseph Thoma*  
Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit in der  
Prozesskette Druckguss; 2015; ISBN: 978-3-73699-009-8
- 03 *Joung Sik Suh*  
Verbesserung der Kaltumformbarkeit von AZ31 Mg-Blech  
durch Equal Channel Angular Pressing (ECAP); 2015;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20151215-1271570-1-8>
- 04 *Robert Ramakrishnan*  
3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem; 2016;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160129-1276474-1-5>
- 05 *Patrick Saal*  
Quantitative Phasenanalyse von ausferritischem Gusseisen  
mithilfe der Neutronendiffraktometrie; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170125-1304161-1-8>
- 06 *Peter Sachnik*  
Methodik für gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160406-1304184-1-8>
- 07 *Thomas Martin Kopp*  
Einfluss der Werkzeugsteifigkeit auf Scherschneidprozess  
und Werkzeugverschleiß beim offenen Schnitt; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170426-1327352-1-7>
- 08 *Simon Josef Maier*  
Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente  
Nachfolgewerkzeuge; 2018; ISBN: 978-3-95884-004-1
- 09 *David Jocham*  
Bestimmung der lokalen Einschnürung nach linearer und  
nichtlinearer Umformhistorie sowie Ermittlung dehnungs-  
und geschwindigkeitsabhängiger Materialkennwerte; 2018;  
ISBN: 978-3-95884-012-6



- 10 *Christoph Kaiser*  
Effiziente Produkt- und Prozessabsicherung für  
gefaltete Karosseriebauteile durch ein metamodellbasiertes  
Assistenzsystem; 2018; ISBN: 978-3-95884-018-8
- 11 *Daniel Marian Opritescu*  
Risikominimale Überbrückung von Kapazitätsengpässen  
im Presswerksverbund der Automobilindustrie; 2018;  
ISBN: 978-3-95884-020-1