Schlussbericht - Kurzversion

zu IGF-Vorhaben Nr. 19683 N

Thema

Variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung für die kundenauftragsspezifische Produktion in KMU

Berichtszeitraum

01.09.2017 – 31.08.2019

Forschungsvereinigung

Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme

Dortmund, 28.02.2020	Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Ort, Datum	Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

IGF-Forschungsvorhaben 19683 N

Forschungsthema

Variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung für die kundenauftragsspezifische Produktion in KMU (VariPro)

Durchführende Forschungsstelle

Technische Universität Dortmund
Institut für Produktionssysteme
Leonhard-Euler-Straße 5
44227 Dortmund

Leiter der Forschungsstelle

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse

Projektleiter

Patrick Wolf, M. Sc.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben (19683 N) der Forschungsvereinigung Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik e.V. - GVB, Wiesenweg 2, 93352 Rohr wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Veröffentlichungen

Zeitschriften- und Buchbeiträge/Dissertationen/Internet

Wolf, Patrick; Deuse, Jochen; Richter, Ralph (2019): Einfluss und Ursachen von Variabilität in der kundenauftragsspezifischen Produktion. Definition und Integration von quantitativen Kriterien für die variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 114 (11), S. 730–733.

Vorträge

Wolf, P.:
VariPro – Einfluss und Ursachen von Variabilität auf die Maschinenbelegungsplanung. Vortrag auf dem dritten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 28.06.2019.

Wolf, P.:
VariPro – Einfluss und Ursachen von Variabilität auf die Maschinenbelegungsplanung. Vortrag auf dem zweiten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 22.11.2018.

Wolf, P.:
VariPro – Gestaltung einer Maschinenbelegungsplanung für die Auftragsfertigung. Vortrag auf dem ersten Kolloquium (Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses) zum IGF-Forschungsvorhaben an der Technischen Universität Dortmund am 21.02.2018.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den teilnehmenden Unternehmen und Verbänden der projektbegleitenden Ausschüsse: Albrecht Jung GmbH & Co. KG, BHTC, BMW AG, Bosch Rexroth AG, CleanControlling GmbH, Continental Automotive Czech Republics.r.o., Desoutter GmbH, EBGelectro, Gedore-Werkzeugfabrik, Heinz Zimmermann, Hella GmbH & Co. KGaA, Hengst SE, HJS Emission Technology, Industrieverband Blechumformung e. V., Keune&Lauber GmbH, KHS GmbH, lnfineon, N.P. Hardy + Co. L.L.P, SAC-Nederland b.v., Saltigo GmbH, Schaeffler Technologies AG & Co. KG, SCHMITZ u. Söhne GmbH & Co. KG, SEW-Eurodrive GmbH & Co. KG, Siemens AG, Sprick GmbH & Co., sprintBOX GmbH, TRUMPF, Völkmann, Vulkan GmbH & Co. KG, W&K Metallverarbeitung GmbH, Wilo AG, sowie den Referenten des projektbegleitenden Ausschusses am 21.02.2017:

Herr Burger	Clean Controlling GmbH
Herr Raab	sprintbox GmbH
Herr Schallow	IPS Engineers GmbH
Herr Willats	University of Buckingham

, am 22.11.2018:

Herr Gärtner	KHS GmbH
Herr Wocker	BMW AG

und am 28.06.2019:

Herr Ostermeier	BMW AG

Darüber hinaus sei allen Unternehmen, die im Rahmen von Expertengesprächen, Interviews oder Umfragen zum Projektfortschritt beigetragen haben, für ihre Kooperation gedankt.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis VI

1 Einleitung 1

1.1 Vorhabenbeschreibung und Arbeitspakete 3

2 Grundlagen von Variabilität und Maschinenbelegungsplanung 5

2.1 Differenzierung von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität 5

2.2 Quantifizierung von Variabilität 5

2.2.1 Statistische Kennzahl – Variationskoeffizient 5

2.2.2 Statistische Kennzahl – Jaccard-Koeffizient 6

2.3 Maschinenbelegungsplanung 7

3 Ansatz zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Variabilität 9

4 Konzept zur variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung 14

4.1 Mathematisches Optimierungsproblem zur variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung 14

4.1.1 Das Erkennen und Formulieren des Problems 15

4.1.2 Festlegen der Entscheidungsschranken für das Optimierungsmodell 16

4.1.3 Verifikation der Anwendbarkeit auf bestehende Optimierungsmodelle 18

4.1.4 Beschreibung des mathematischen Optimierungsproblems 22

4.2 Umsetzung des Optimierungsmodells in Form eines anwenderfreundlichen IT-Tools 32

5 Validierung des mathematischen Optimierungsmodells 35

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft 36

6.1 Bewertung des Ergebnistransfers in die Wirtschaft 38

7 Literatur 39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Klassifizierung nach Maschinenumgebung zur Maschinenbelegungsplanung 8

Abbildung 3.1: Kriterienbaum mit Arten von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität in der Produktion (Wolf et al. 2019) 12

Abbildung 4.1: Herleitung einer Lösung mittels Optimierungsmodell 14

Abbildung 4.2: Modulübersicht 33

Abbildung 4.3: Darstellung des Auftragseingangsmoduls 33

Abbildung 4.4: Konfigurations-Cockpit und Auftragsvorgangsfolge-Eingabemaske 34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens VariPro 3

Tabelle 2.1: Merkmalstabelle zweier Mengen 6

Tabelle 3.1: Daten und Quellen für die Variabilitätskriterien (Graham et al. 1979) 11

Tabelle 3.2: Beschreibung der Variabilitätskriterien aus Produktionssystemsicht 13

Tabelle 4.1: Paarweiser Vergleich der versch. Maschinenumgebungen 19

Tabelle 4.2: Paarweiser Vergleich der versch. Zielkriterien 20

Tabelle 4.3: Paarweiser Vergleich der versch. Auftragscharakteristika 21

1 Einleitung

Die industrielle Produktion ist geprägt von Globalisierung, die im Einklang mit individuellen Kundenwünschen eine nur wenig vorhandene Markentreue hervorruft (Schulz 2014). Demzufolge führt die weltweite Vernetzung zu einem steigenden Druck jüngerer Industrienationen, wodurch sich der Anbietermarkt zum Käufermarkt wandelt. Die Ausrichtung an immer individuelleren Kundenwünschen führte zu einer vielfältigeren Produktpalette im Angebot (Lotter et al. 2016). Die Unternehmen sind in der Pflicht eine zunehmend schnelle Abwicklung von komplexen, kundenspezifischen Aufträgen zu realisieren (Grimm 2011). Um weiterhin konkurrenzfähig zu bleiben und sich gewisse Wettbewerbsvorteile verschaffen zu können, sind Unternehmen gezwungen ihre betrieblichen Prozesse wirtschaftlich effizient zu gestalten. Jedoch herrscht in kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) weiterhin überwiegend die im letzten Jahrhundert entwickelte, vom Taylorismus geprägte Produktionsstruktur. Diese widerspricht in ihrer statischen Ausrichtung den heutigen Anforderungen nach einer schnellen Reaktions- und Anpassungsgeschwindigkeit (Koether und Meier 2017). Die Intention zur Wandlung weg von der klassischen Produktion ist zwar vorhanden, die aktive Umsetzung startet jedoch schleppend. Stärkere Investitionen in Forschung und Entwicklung (FuE) sind unumgänglich, um Innovationen im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung voranzutreiben. Gerade in KMU ist dabei auf Grund der hohen Kosten und langen Amortisationszeit wenig Engagement in diesem Bereich zu erkennen (Oliver Som, Christoph Zanker, Eva Kirner 2011). Das Adaptieren von erfolgreichen Umsetzungen aus dem Konzernbereich ist dabei ohne eine gewisse Anpassung nicht erfolgsversprechend.

Im Rahmen von Anpassungen und Verbesserungen der Prozesse im Produktionsumfeld sind Maßnahmen getreu der Schlanken Produktion nach Womack et al. (Womack et al. 1992) elementar. Das als Vorlage dienende Toyota Produktionssystem (TPS) agiert nach dem 3M-Modell, welches die Vermeidung von Muda (Verschwendung), Mura (Unausgeglichenheit) und Muri (Überbeanspruchung) anstrebt (Ōno 1988). Zusätzlich werden die in der Produktion prädominierenden Tätigkeiten in Hinblick auf ihre Wertschöpfung in die Kategorien der wertschöpfenden, sowie die als Muda bezeichneten nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten gegliedert (Ōno 1988). Diese Kategorisierung dient der Minimierung oder bestenfalls Eliminierung der nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten. Ferner lässt sich das TPS anhand von Maßnahmen der Prozessoptimierung, die generell vier Grundregeln unterliegen, definieren (Spear und Bowen 1999). Prinzipiell beinhalten diese Regeln (Lendzian 2014):

1) die Implementierung von Standardisierungen in jeglichen Bereichen,
2) die direkten Kunden-Zulieferer-Verbindungen,
3) unkomplizierte und direkte Ablaufwege der Produkte und

4) die Einhaltung von wissenschaftlichen Methoden zur zielführenden Ausführung.

Spätestens durch diese Regeln wird das Dilemma für die Adaption auf die kundenspezifische Auftragsfertigung in KMU verdeutlicht. Obwohl die Lean Production von der Automobilindustrie und anderen Großunternehmen vorgelebt wird, wird sie für den Untersuchungsbereich fast gänzlich ausgeklammert. Der Widerspruch zwischen einer kundenspezifischen Fertigung und die durch die Schlanke Produktion bzw. Lean Production angestrebte Vermeidung von Variabilität (Dombrowski und Mielke 2015) könnte nicht größer sein. Die in der ersten Regel definierte Standardisierung spricht im Grundsatz gegen die Kontrolle von Variabilität (Lendzian 2014), die einen hohen Stellenwert in der kundenspezifischen Auftragsfertigung zu verzeichnen hat (Corsten und Gabriel 2004). Bestätigt wird das durch das anfangs erläuterte 3M-Modell zur Minimierung von Mura, welches Variabilität ausschließlich als leistungshemmende Störgröße identifiziert (Lorentzen 2012). Der vorherrschende Trend zur Lean Production steht im Zielkonflikt zur Variabilität. Die traditionellen Grenzen der schlanken Produktion greifen aufgrund der vorherrschenden Individualität der Kunden und kurzfristigen Auftragseinlastung nicht bei KMU (Koether und Meier 2017).

Die Fachliteratur birgt jedoch einen Analyseansatz zur Förderung von Variabilität und derer Beherrschung. Demnach ist die schlanke Produktion als Basis für die Flexibilität eines Unternehmens zu betrachten (Koether und Meier 2017).

Die industrielle Produktion in Deutschland erlebt in den letzten Jahren einen Aufschwung innovativer Ansätze der Lean Production. Die vorherrschende Meinung, dass schlanke Prinzipien nur in Großunternehmen umsetzbar seien, ist nicht zutreffend. Insbesondere KMU sind aufgrund der ausgeprägten Flexibilität und geringen Hierarchietiefe Treiber von zukunftsweisenden Konzepten (Günthner und Boppert 2013).

In diesem Zuge sind die strategischen Methoden weiterzuentwickeln, um zukunftsorientiert dem Konkurrenzdruck gegenüber beständig zu bleiben (Kersten und Wittmann 2013). Ferner dürfen KMU sich dabei nicht auf die stärker ausgeprägte Kundenbindung verlassen (Huber 2016). Prozessoptimierung ist nicht den Großunternehmen vorbehalten, sondern muss von KMU weitsichtig aufgegriffen und sukzessiv adaptiert werden (Lotter et al. 2016). Auch weil gerade diese KMU in Deutschland 99 Prozent der gesamten Unternehmen ausmachen, ist der Forschungsbedarf zur Prozessoptimierung besonders in diesem Bereich als hoch einzuschätzen (Schenk 2015). Zusätzlich ist die Förderung von kundenspezifischer Auftragsfertigung in KMU von höchster Relevanz. Um den kundenindividuellen Anforderungen gerecht zu werden, müssen KMU eine flexible Produktionsplanung praktizieren, um mit höchster Reaktionsfähigkeit auf die kurzfristigen Nachfrageschwankungen reagieren zu können (Koether und Meier 2017). Die Assoziation von Schwankungen in der Nachfrage mittels dem vom

TPS geprägten Begriff der Wertschöpfung bietet neues Potential zur Adaption der schlanken Prinzipien auf KMU mit kundenspezifischer Auftragsfertigung. Dies ist begründet in dem Bedarf einer hohen Produktionsflexibilität zur Reaktion auf schwankende Nachfragesituationen. Die kundenindividuellen Nachfragen können heutzutage nicht mehr nach dem Prinzip von Henry Ford standardisiert werden. Durch den Blick auf die derzeitigen Prozessoptimierungsprojekte in KMU erhält die Frage, welcher Ansatzpunkt gewählt werden soll, eine essenzielle Bedeutung (Koether und Meier 2017).

So muss die Variabilität in zweierlei Maß gemessen werden: Zum einen existiert die dem TPS zugrundeliegende Sichtweise, die Variabilität als nicht-wertschöpfenden Faktor sieht, der daher vermieden werden sollte. Zum anderen existiert die vom Kunden ausgelöste Variabilität, auf die durch eine flexible Produktionsplanung reagiert werden muss. Dabei bieten KMU aufgrund der hohen Variabilitätsausprägungen, Entwicklungspotentiale und Flexibilität in Hinblick auf Fertigungsprinzipien die geeignete Plattform für die in Zukunft steigende kundenspezifische Auftragsfertigung.

1.1 Vorhabenbeschreibung und Arbeitspakete

Das Ziel des Forschungsvorhabens VariPro ist die Entwicklung einer variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung für die kundenauftragsspezifische Produktion. Dazu gliederte sich das Forschungsvorhaben in vier aufeinander aufbauende Arbeitspakete (s. Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Arbeitspakete des Forschungsvorhabens VariPro

Arbeitspaket		**Menschmonate**
1	Variabilitätsbeschreibung und Anforderungsdefinition an die Maschinenbelegungsplanung	
1.1	Ableitung von Kriterien zur qualitativen Beschreibung wertschöpfender Variabilität und Kaskadierung	3
1.2	Quantitative Abbildung der Variabilitätskriterien zur analytischen Beschreibung der Wirkzusammenhänge	3
1.3	Ableitung variabilitätsinduzierter Anforderungen an die Maschinenbelegungsplanung	2
2	Konzeption der variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung	
2.1	Entwicklung eines quantitativen, mathematischen Optimierungsproblems	6
2.2	Überführung des Optimierungsproblems in ein IT-Tool	6
3	Validierung der Forschungsergebnisse durch exemplarische Einführung	4
4	Dokumentation und Ergebnistransfer	-

Das Ziel des ersten Arbeitspakets war die Erarbeitung eines Ansatzes zur Beschreibung von Variabilität und die Ableitung von Anforderungen an die Maschinenbelegungsplanung. Diese Zielsetzung

wurde im Rahmen verschiedener Teilarbeitspakete gelöst, die im Folgenden insbesondere in Kapitel 3 näher beschrieben werden. Im Rahmen des ersten Teilarbeitspakets 1.1 erfolgte die Erarbeitung von Variabilitätskriterien zur qualitativen Beschreibung bzw. Abbildung der im Fokus stehenden wertschöpfenden sowie ebenfalls der nicht-wertschöpfenden Variabilität. Dies erfolgte im Rahmen der Definition weiterer den Stand der Technik erweiternden Variabilitätskriterien. Diese wurden weiterführend in Form einer Baumstruktur kaskadiert. In Teilarbeitspaket 1.2 wurden die erarbeiteten Kriterien weiterführend in Form statischer Kennzahlen quantifiziert und deren Wirkzusammenhänge erarbeitet. Darüber hinaus wurden Anforderungen (Teilarbeitspaket 1.3) an das im Weiteren formulierte mathematische Optimierungsproblem der Maschinenbelegungsplanung definiert, welches auf den in Teilarbeitspaket 1.1 sowie 1.2 erarbeiteten Erkenntnissen über Variabilität basiert.

Die Zielsetzung des zweiten Arbeitspakets war die Entwicklung eines Konzepts zur variabilitätsbasierten, die im Projekt erarbeiteten Kriterien und Kennzahlen berücksichtigenden, Maschinenbelegungsplanung. Diese Zielsetzung wurde im Rahmen von zwei Teilarbeitspaketen umgesetzt. In Teilarbeitspaket 2.1 erfolgte der Aufbau eines quantitativen Optimierungsproblems für die variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung. Im Rahmen des Teilarbeitspakets 2.2 wurde dieses Optimierungsproblem anschließend in ein zur operativen, variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung nutzbares IT-Tool überführt. Die Vorgehensweise und das Ergebnis der Validierung wird in Kapitel 5 beschrieben.

2 Grundlagen von Variabilität und Maschinenbelegungsplanung

In diesem Kapitel werden die Grundlagen zur Variabilität und zur Maschinenbelegungsplanung beschrieben. Vor diesem Hintergrund wird zunächst eine Definition der Variabilität erarbeitet sowie wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Variabilität werden voneinander abgegrenzt. Anschließend werden die Ziele, Aufgaben und Vorgehensweisen der Maschinenbelegungsplanung erörtert.

2.1 Differenzierung von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität

Die Basis dieser Einteilung der Variabilität bilden die von Maschek et al. definierten „Variabilitätskategorien in Produktionssystemen" sowie die von Lorentzen et al. entwickelte Variabilitätstypologie (Lorentzen et al. 2011).

Bei dieser Abgrenzung wird „grundsätzlich zwischen wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität unterschieden" (Maschek et al. 2014a). Diese Ausführungen bilden die Grundlage für die anschließende Entwicklung weiterer Variabilitätskriterien (s. Kapitel 3).

2.2 Quantifizierung von Variabilität

In diesem Abschnitt werden Grundlagen statistischer Kennzahlen beschrieben. Diese bilden die Basis für die in Arbeitspaket 1.2 erarbeiteten Ergebnisse. Statistische Kennzahlen stellen das Werkzeug zur quantitativen Abbildung der in Arbeitspaket 1.1 erarbeiteten Variabilitätskriterien dar. Daher ist ein tiefgreifendes Verständnis der Grundlagen der statistischen Kennzahlen erforderlich, um basierend auf diesem fundierten Verständnis in Arbeitspaket 1.2 diese Kennzahlen zielgerichtet einsetzen bzw. adaptieren zu können.

2.2.1 Statistische Kennzahl – Variationskoeffizient

Bei der Fragestellung, wie sich Parameterstreuungen miteinander vergleichen lassen, wenn sie verschiedene Einheiten haben, bietet der Variationskoeffizient eine gute Möglichkeit (Cleff 2015). Der Variationskoeffizient wird auch als Variabilitätskoeffizient (eng. coefficient of variation) oder auch relative Standardabweichung bezeichnet und gibt an, wie viel Prozent vom Mittelwert die Standardabweichung beträgt (Graefe 1970). Sein Wert ist nur in Ausnahmefällen kleiner als 0,5 (Kessler 2006). Der Variationskoeffizient hilft beim Vergleich der Variabilität von verschiedenen Verteilungen und Parametern unterschiedlicher Skalenniveaus. Dabei „standardisiert" dieser die Standardabweichung in Einheiten des Mittelwertes der Verteilung (Behnke und Behnke 2006). Er ist unabhängig von der gewählten Einheit bzw. Größenordnung des Mittelwertes, jedoch müssen die Messwerte in

der

Quotientenskala angegeben sein. Das Verhältnis der Standardabweichung zum Mittelwert wird als Variationskoeffizient V ausgedrückt (Cramer und Kamps 2020):

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \tag{2.1}$$

mit s Standardabweichung

$\bar{x}$ Mittelwert

2.2.2 Statistische Kennzahl – Jaccard-Koeffizient

Der *Jaccard-Koeffizient* ist eine Kennzahl, die zur Berechnung der Ähnlichkeit von Mengen herangezogen wird. Die Kennzahl berücksichtigt Gemeinsamkeiten von zwei Mengen und wird im Allgemeinen durch folgende Formel beschrieben (Bandyopadhyay und Saha 2013):

$$\mathrm{J(P,Q)} = \frac{\mathrm{P} \cap \mathrm{Q}}{\mathrm{P} \cup \mathrm{Q}} \tag{2.2}$$

Der Koeffizient gewichtet ausschließlich Übereinstimmungen, sodass Situationen, in denen beide Mengen ein Merkmal nicht aufweisen, nicht berücksichtigt werden. Um dies zu veranschaulichen, soll folgende Tabelle (s. Tabelle 2.1) mit Binärvariablen betrachtet werden. Dabei steht 0 für „*die Menge weist das Merkmal nicht auf“* und 1 für „*die Menge weist das Merkmal auf“*.

Tabelle 2.1: Merkmalstabelle zweier Mengen

Menge P / **Menge Q**	**0**	**1**
0	a	b
1	c	d

In der Tabelle stellt a die Situation dar, bei der die Mengen das Merkmal gleichermaßen nicht aufweisen. Der Wert a fällt somit aus der Rechnung heraus. Der *Jaccard-Koeffizient* für die Mengen in Tabelle 2.1 ist gegeben durch:

$$\mathrm{J(P,Q)} = \frac{d}{b + c + d} \tag{2.3}$$

Der Koeffizient ist auf verschiedene Situationen und Sachverhalte anwendbar. Auch auf solche, wo die Merkmale vorerst nicht in Zahlen erfasst werden können. Dies soll am folgenden qualitativen Beispiel verdeutlicht werden. Gegeben seien die Mengen P und Q:

Menge P:

Menge Q:

Der *Jaccard-Koeffizient* stellt auch hier das Verhältnis der Schnittmenge zur Vereinigungsmenge dar.

$$J(P,Q) = \frac{\blacksquare\ \hexagon\ \blacktriangle}{\blacksquare\ \hexagon\ \blacktriangle\ \square\ \hexagon\ \blacktriangle\ \hexagon} = \frac{3}{7} = 0{,}429 \qquad (2.4)$$

2.3 Maschinenbelegungsplanung

Die begrenzten Maschinenkapazitäten eines Unternehmens in Verbindung mit dem Aspekt, dass eine Erweiterung durch interne oder externe Ressourcen mit erheblichen Kosten verbunden ist, lässt eine sinnvolle Maschinenbelegung zu einer der wichtigsten Aufgaben der Produktionsplanung werden. Dabei wird unter dem Begriff Maschinenbelegung die Zuordnung einer Menge an eingelasteten Aufträgen auf den verfügbaren Maschinen verstanden. Die Belegungsplanung umfasst in diesem Sinne die Reihenfolgeplanung (Sequencing) und die Feinplanung (Scheduling). Erstere beschreibt die Planung der Bearbeitungsreihenfolge aller konkurrierenden Aufträge auf den einzelnen Maschinen. Werden den einzelnen Aufträgen noch spezifische Start- und Endzeitpunkte zugeordnet, so wird von der Feinplanung bzw. vom Scheduling gesprochen (Acker 2011, S. 12). Wichtige Eingangsdaten für die Planung sind die Menge der Aufträge, Menge der verfügbaren Maschinen, gewünschte Fertigstellungstermine der Aufträge, die Bearbeitungszeit eines Auftrages auf einer Maschine sowie die auftragsspezifische Anzahl der Arbeitsvorgänge und deren Abfolge (Schuh 2007). Diese Eingangsdaten werden in vielen Modellen als statisch und deterministisch angenommen. Dabei ist zu erwähnen, dass unvorhergesehene Schwankungen in der Nachfrage sowie kurzfristige Eilaufträge in der Auftragsfertigung von KMU keine Seltenheit sind. Demzufolge ist die Auftragsfertigung in KMU oft mit einem höheren Komplexitätsgrad verbunden, wodurch zwangsläufig mehr Variabilität entsteht. Bei diesen Rahmenbedingungen wird die Maschinenbelegungsplanung zu einem schwer zu lösenden Problem in der Produktion (Brandimarte 1993, S 160).

Für die Belegungsplanung wird i.d.R. das zugrundeliegende Produktionssystem betrachtet, wobei als erstes eine Differenzierung anhand der Produktstruktur in einstufig oder mehrstufig vorgenommen wird (s. Abbildung **2.1**) .

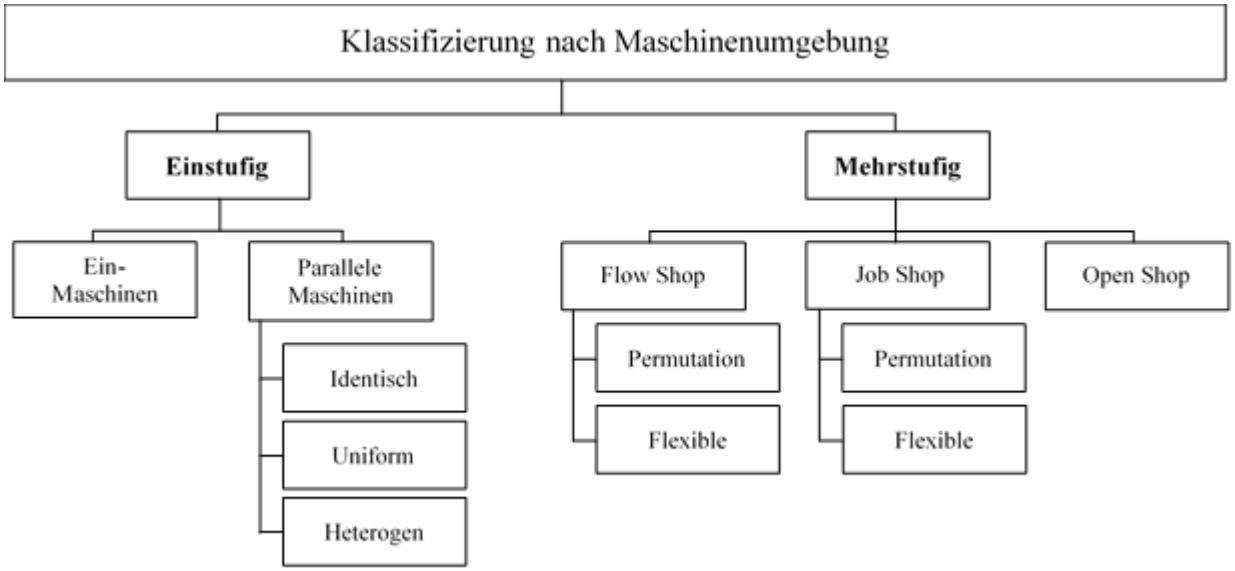

Abbildung 2.1: Klassifizierung nach Maschinenumgebung zur Maschinenbelegungsplanung

3 Ansatz zur qualitativen und quantitativen Beschreibung von Variabilität

Das folgende Kapitel umfasst die Zusammenfassung der Beschreibung der Ergebnisse des Arbeitspakets 1. Dabei handelt es sich einerseits um einen entwickelten Variabilitätskriterienkatalog (Arbeitspaket 1.1). Die darin enthaltenen Variabilitätskriterien dienen der qualitativen Abbildung der in der Produktion auftretenden Variabilität. Darauf aufbauend wurden den einzelnen Kriterien Kennzahlen zugeordnet, die der quantitativen Abbildung der durch die Variabilitätskriterien beschriebenen Variabilität dienen (Arbeitspaket 1.2).

Neben der Abgrenzung der Variabilität anhand des wertschöpfenden Charakters, existieren verschiedene Kriterien, welche die Variabilität in Produktionssystemen beschreiben. Dabei wird das Ausmaß der Variabilität durch die Streuung um einen Lageparameter bestimmt (Herrmann 2010). Variabilität ist grundsätzlich in allen Produktionsprozessen vorzufinden, wobei hervorzuheben ist, dass insbesondere die Einzel- und Kleinserienfertigung von einer hohen Variabilität geprägt sind (Pinedo 2016). Wiegand et al. (2014) definieren in ihrer Arbeit fünf Variabilitätskriterien, die die Unterkategorien der wertschöpfenden Variabilität darstellen. Diese sind folgend aufgeführt:

- Variabilität in der Arbeitsvorgangsfolge,
- Variabilität in der Prozessroute,
- Variabilität des Arbeitsinhaltes,
- Variabilität der Ziel-Durchlaufzeit und
- Variabilität der Nachfrage (Pinedo 2005).

Die Variabilität der Arbeitsvorgangsfolge beschreibt die Unterschiede bezüglich der Reihenfolge von Vorgängen über mehrere Aufträge. Die zentrale Frage ist, welchen Arbeitsinhalt ein Produktionsauftrag hat und in welcher Abfolge dieser bearbeitet werden muss. Dabei liegt die Ähnlichkeit der Vorranggraphen hinsichtlich des Produktionsprozesses im Fokus.

Die Variabilität der Prozessroute hingegen erläutert die Variation der Reihenfolge in Bezug auf die Ressourcen, die eine Produktvariante durchlaufen muss. Sie gibt Aufschluss darüber, durch welche Ressourcen ein Auftrag fließt und in welcher Reihenfolge die Fertigungsschritte durchlaufen werden. Dies ist ein entscheidender Aspekt, wenn beispielsweise mehrere Maschinen vom gleichen Typ in einem Produktionssystem vorhanden sind.

Die Variabilität des Arbeitsinhalts gibt die Streuung des ressourcenspezifischen Zeitbedarfs eines Auftrags an einer Ressource an. Dabei steigt die Komplexität des Abstimmungsbedarfs nachfolgender Ressourcen durch eine verstärkte Variabilität. Die Variabilität des Arbeitsinhalts wird anhand der unterschiedlichen Prozesszeiten der Aufträge an einer Ressource gemessen.

Mit der Variabilität der Ziel-Durchlaufzeit wird die Abweichung der geplanten Durchlaufzeit zwischen den Aufträgen bezeichnet.

Das fünfte und letzte Variabilitätskriterium ist die Variabilität der Nachfrage. Sie beschreibt die Streuung der als Aufträge eingehenden Arbeitsinhalte innerhalb einer bestimmten Periode. Diese Variabilitätsart hat entscheidenden Einfluss auf eine mögliche Engpassbildung im Produktionssystem (Blazewicz et al. 2007). (Wiegand 2014) et al. erwähnen des Weiteren die durch die zunehmende informationstechnische Vernetzung entstehenden Möglichkeiten zur Generierung unentdeckten Wissens (Framinan et al. 2014). Besonders in Zeiten von Industrie 4.0 und Big Data besteht die zentrale Herausforderung nicht in der Erhebung der Daten, sondern in der Auswahl geeigneter Datenquellen. Tabelle 3.1 verdeutlicht die zu erhebenden Daten sowie die geeigneten Datenquellen zur Quantifizierung der wertschöpfenden Variabilität bezüglich der genannten fünf Variabilitätskriterien.

Die in Tabelle 3.1 definierten Kriterien dienen als Ausgangspunkt für die Zielstellung, müssen jedoch für die MBP detailliert und an die Anforderungen der kundenauftragsspezifischen Produktion angepasst werden. Diese Anpassung resultiert im Rahmen des Forschungsprojekts in 14 weiteren Variabilitätskriterien, die die Einflüsse und Ursachen von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität erfassen und beschreiben. Diese werden im Folgenden näher erläutert.

Tabelle 3.1: Daten und Quellen für die Variabilitätskriterien (Graham et al. 1979)

	Daten	**Quelle**	**Bemerkung**
Arbeits-vorgangsfolge Arbeitsinhalt	• Plandaten • Bauteilinformationen • Produktinformationen • Ressourceninformationen	• Zeitwirtschafts-systeme • PDM-System • MES	Prozesse und Prozessinhalte werden während der Vorverarbeitung mit Bauteil und Ressource verknüpft. Die wichtigen Attribute sind dabei Prozesszeit und -ablauf sowie Bauteil-, Baugruppe-, Produkt und Ressourcenbezeichnung.
Ziel-Durchlaufzeit	• Prozesszeit • Wartezeit an der Station • Liegezeit • Lagerzeit • Transportzeit	• BDE • MES	BDE- und MES-Lösungen werden mit den Aufträgen aus dem ERP-System verknüpft.
Nachfrage	• Vorliegende Auftragsdaten • Plandaten • Kapazitäten und Belegungen der Ressource	• ERP • PDM • MES	Variabilitätsbestimmung erfolgt über: • Verbindung der Aufträge mit den Prozessen • Prozess-Ressourcen-Zuordnung • Kapazität der Stationen
Prozessroute	• Auftragsdaten • Produktdaten	• MES • BDE • ERP • PDM	Erfordert eine Zuordnung der Prozesse zu den Ressourcen

Um die wertschöpfende und nicht-wertschöpfende Variabilität zu formalisieren und geeignet zu beschreiben, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes in Arbeitspaket 1.1 qualitative, kaskadierte Kriterien entwickelt. Die Kaskadierung, d.h. die Übertragung der Kriterien in eine hierarchisierte Form (Kennzahlenbaum) ermöglicht eine Interpretation der Kriterien, was aufgrund ihres sonst hohen Aggregationsgrades nicht möglich bzw. sinnvoll ist. In Abbildung 3.1 ist der vollständige, in wertschöpfend und nicht-wertschöpfend klassifizierte, kaskadierte Kriterienbaum dargestellt. Der Aufbau orientiert sich an den drei Modellklassen der digitalen Fabrik (Produkt, Prozess, Ressource) (Klauke 2002; Jonas und Reinhart 2000).

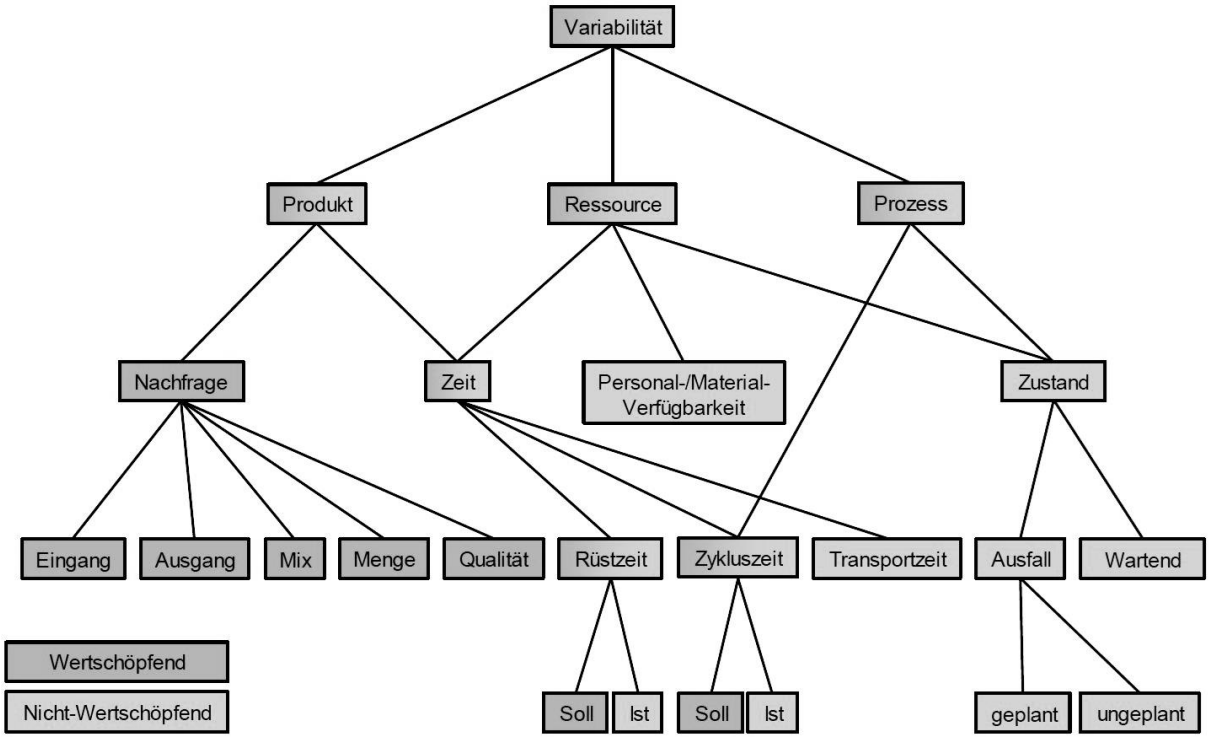

Abbildung 3.1: Kriterienbaum mit Arten von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität in der Produktion (Wolf et al. 2019)

Die Variabilität des Produkts kaskadiert sich in Kriterien, deren Variabilität sich gänzlich oder teilweise auf die zu fertigenden Produkte zurückführen lassen. Die Variabilität der Ressource umfasst die Variabilitätskriterien, die sich durch die verwendeten oder benötigten Ressourcen beschreiben lassen. Als letztes sind der Variabilität des Prozesses die Kriterien zugeordnet, deren Variabilität sich durch Prozessparameter bzw. -eigenschaften erklären lassen.

Die nächste Ebene des Kriterienbaums stellt die Variabilität detaillierter dar. Unter der Variabilität des Produkts fällt unter anderem die Variabilität der Nachfrage, welche die vom Kunden geforderte Flexibilität widerspiegelt und bereits von (Maschek et al. 2014b) definiert wurde. Durch den konkreten Kundennutzen trägt sie zur Wertschöpfung bei. Die Variabilität der Fertigung ist der Variabilität des Produkts und der Ressource untergeordnet. Die zugewiesenen Variabilitätskriterien beschreiben die notwendigen Vorgänge (Rüstung, Bearbeitung und Transport) der verrichtungsorientierten Fertigung. Der letzte Knoten dieser Stufe ist die Variabilität des Zustands. Sie ist mit der Variabilität der Ressource und des Prozesses verbunden und definiert die durch Unterbrechungen und Wartezeiten entstehende Variabilität.

Auf der untersten Ebene, den Blättern des Baumes, werden die 14 Variabilitätskriterien dargestellt. Die Tabelle 3.2 liefert eine Kurzzusammenfassung aller Kriterien. Dabei wird die Einteilung in die drei Modellkassen hervorgehoben und die Bedeutung der Variabilität gegeben. Anschließend werden die Kriterien im Einzelnen näher erläutert.

Tabelle 3.2: Beschreibung der Variabilitätskriterien aus Produktionssystemsicht

Variabilität …	**Beschreibung aus Produktionssystemsicht**	**Bedeutung (beispielhaft)**
… des Eingangs	**Produkt**spezifische Schwankung von Kundenauftrags-eingangszeiten.	Saisonale Trends
… des Ausgangs	**Produkt**spezifische Schwankung von Kundenwunsch-terminen.	Eilaufträge
… des Mixes	**Produkt**variantenspezifische Schwankung von Auf-tragsinhalten.	Unikatfertigung
… der Menge	**Produkt**mengenspezifische Schwankung von Auf-tragsinhalten.	unterschiedliche Kundenprofile (Großkunden vs. Kleinkunden)
… der Qualität	**Produkt**qualitätsspezifische Schwankung von Auf-tragsinhalten.	unterschiedliche Kundenprofile (Branchenanforderungen)
… der Soll-Rüstzeit	**Produkt**- und **ressourcen**spezifische Schwankung von geplanten Rüstzeiten.	Großes Produktspektrum
… der Ist-Rüstzeit	**Produkt**- und **ressourcen**spezifische Schwankung von tatsächlichen Rüstzeiten.	Fehlende Rüststandards
… der Soll-Zyklus-zeit	**Produkt-**, **ressourcen- und prozess**spezifische Schwankung von geplanten Zykluszeiten.	Großes Produktspektrum
… der Ist-Zyklus-zeit	**Produkt-**, **ressourcen- und prozess**spezifische Schwankung von tatsächlichen Zykluszeiten.	Schwankende Prozessqualität
… der Transportzeit	**Produkt**- und **ressourcen**spezifische Schwankung von Transportzeiten.	Unterschiedliche Produktdimensio-nen
… der Personal-/ Materialverfügbar-keit	**Ressourcen**spezifische Schwankung von Verfügbar-keiten.	Krankheit, Lieferprobleme
… der geplanten Ausfälle	**Ressourcen**- bzw. **prozess**spezifische Schwankungen von Instandhaltungszeiten.	Individuelles Instandhaltungsverhal-ten
… der ungeplanten Ausfälle	**Ressourcen**- bzw. **prozess**spezifische Schwankungen von Störungszeiten.	Schwierige Fehlererkennung
… der Wartezeit	**Ressourcen**- bzw. **prozess**spezifische Schwankungen von Wartezeiten.	Schwankende Maschinenauslastung

4 Konzept zur variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung

In diesem Kapitel wird das entwickelte Konzept zur variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung als Ergebnis des Arbeitspakets 2 vorgestellt. Dazu erfolgt in Unterkapitel 4.1 die Beschreibung des in Arbeitspaket 2.1 entwickelten quantitativen, mathematischen Optimierungsproblems. Darüber hinaus wird in Unterkapitel 4.2 das in Arbeitspaket 2.2 entwickelte zur operativen Maschinenbelegungsplanung nutzbare IT-Tool beschrieben, in welches das Optimierungsproblem aus Unterkapitel 4.1 implementiert wurde.

4.1 Mathematisches Optimierungsproblem zur variabilitätsbasierten Maschinenbelegungsplanung

Um ein zielführendes mathematisches Optimierungsmodell erarbeiten zu können, wird nach dem beschriebenen Vorgehensmodell aus Abbildung 4.1 vorgegangen.

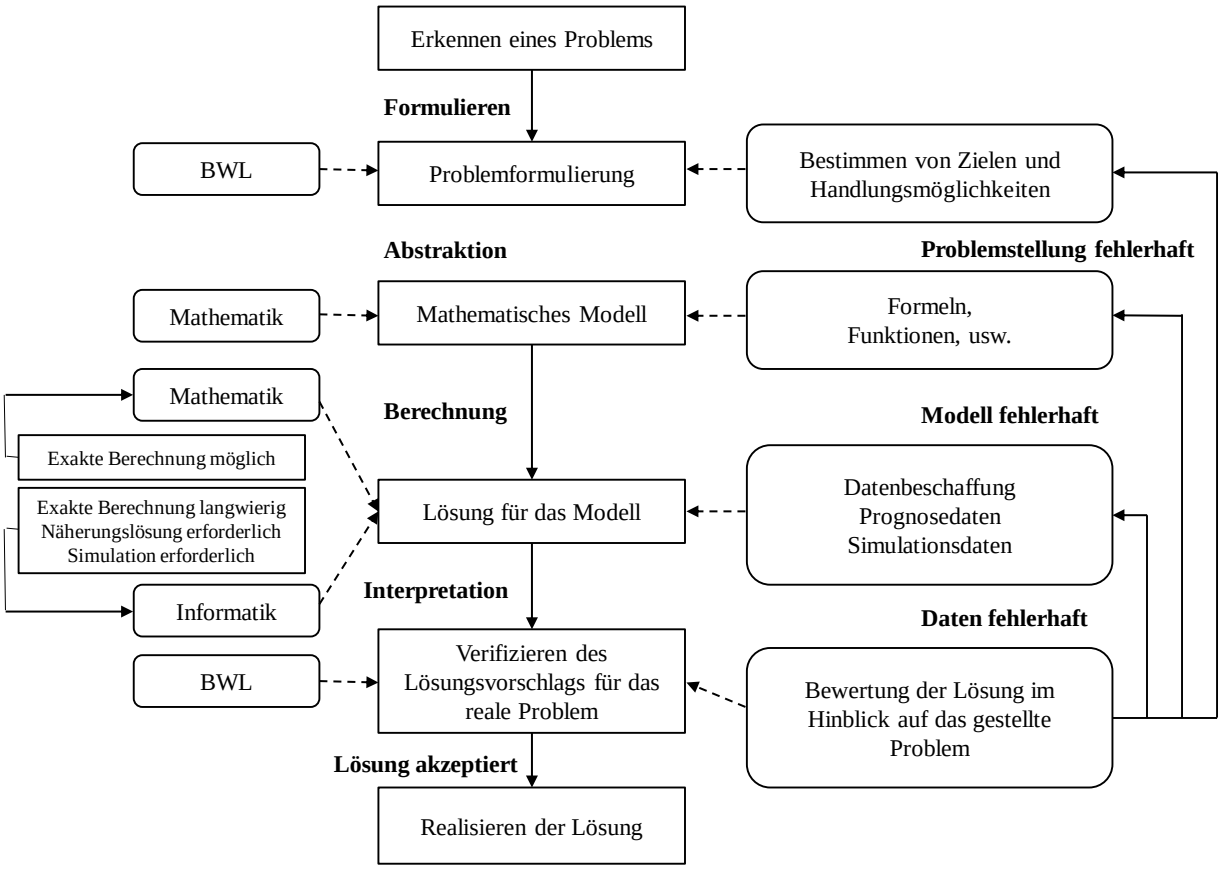

Abbildung 4.1**:** Herleitung einer Lösung mittels Optimierungsmodell

Die Anwendung dieses Vorgehens wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben und dargestellt. Ausgehend von diesem Vorgehen ist in einem ersten Schritt das Problem, welches behoben werden soll, zu erkennen und zu formulieren. Dies wird in Abschnitt 4.1.1 näher beschrieben. Hierauf aufbauend sind Entscheidungsschranken zu dem Modell zu verschriftlichen. Hierzu wird Abschnitt 4.1.2

in klassische und anforderungsgerechte Entscheidungsschranken für das Optimierungsmodell unterteilt. Im Anschluss an die Verschriftlichung der Entscheidungsschranken ist zu ermitteln, welche Bestandteile für das zu planende Optimierungsproblem wichtig sind und ob hierauf aufbauend eine Anwendbarkeit auf das bestehende Optimierungsmodell denkbar ist. Dies wird in Abschnitt 4.1.3 durchgeführt. Abschließend ist in Abschnitt 4.1.3 das Optimierungsmodell aufzustellen. Hierzu wird das aus Abschnitt 4.1.1 erkannte und formulierte Problem, samt Entscheidungsfrage, in mathematisch ausgedrückte Entscheidungsvariablen überführt, die verschriftlichten Entscheidungsschranken aus Abschnitt 4.1.2 in Nebenbedingungen für das Modell umgesetzt und die gewonnenen Erkenntnisse aus Abschnitt 4.1.3 angewendet.

4.1.1 Das Erkennen und Formulieren des Problems

Um ein Optimierungsmodell aufstellen zu können, wird als Grundlage hierfür das in Unterkapitel 4.1 erläuterte Vorgehen des Operations Research verwendet, für dessen Anwendung das Vorhandensein eines ausformulierten Entscheidungsproblems unverzichtbar ist. Hierzu ist wichtig, sich das vorhandene Problem in einem ersten Schritt vor Augen zu führen, um im nächsten Schritt die Formulierung des Problems vornehmen zu können. Das Problem, mit dem sich die vorliegende Arbeit befasst, ist aufgrund der wirtschaftlichen Veränderungen über die letzten Jahrzehnte entstanden. Veränderungen, wie z.B. die zunehmende Globalisierung, das neue Bewusstsein der Abnehmer für individuell gefertigte Waren sowie der Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt, sind verantwortlich für neue Anforderungen an Produktionssysteme u. a. hinsichtlich Flexibilität. Diese zeigen sich in Form von steigender Individualität der Produkte, sinkenden Losgrößen bis hin zur Losgröße 1 und einer daraus resultierenden steigenden Varianten- und Modellvielfalt, die angeboten werden muss. Dies hat zur Folge, dass die Produktion u. a. mit einer Unbeständigkeit der Nachfrage und einer in dieser begründeten Variabilitätssteigerung innerhalb der Produktion zu kämpfen hat. Herkömmliche Ansätze, wie bspw. Six Sigma oder Lean Management, sorgen für eine Eliminierung der Variabilität der Nachfrage durch Standardisierung. Diese Vorgehensweise ist jedoch in Unternehmen in denen ein hoher Grad wertschöpfender Variabilität vorherrscht nicht zielführend, da somit der Kundennutzen und damit direkt verbunden die Wertschöpfung reduziert werden. Vielmehr ist es das Ziel die wertschöpfende Variabilität zu erhalten und die negativen, leistungsreduzierenden Auswirkungen dieser bestmöglich zu beherrschen. Nachdem das Problem erkannt und erläutert wurde, ist mit der Formulierung des Entscheidungsproblems fortzufahren. Das für dieses Optimierungsproblem spezifizierte Entscheidungsproblem lautet: „Was muss berücksichtigt und in welcher Reihenfolge müssen die Aufträge bearbeitet werden, damit möglichst wertschöpfend, verspätungsfrei und durchlaufzeitoptimal produziert werden kann?“

Bei dem Begriff der Wertschöpfung im Kontext des Entscheidungsproblems geht es entgegen dem herkömmlichen Verständnis um die Frage, was zu tun und zu beachten ist, um die Variabilität weitestgehend zu erhalten und lediglich deren Auswirkungen bestmöglich zu beherrschen. Aufbauend auf diesem Entscheidungsproblem sind Entscheidungsfragen zu formulieren, welche im Nachgang als Entscheidungsvariablen mathematisch auszudrücken sind. Die Entscheidungsvariablen stellen Entscheidungsalternativen dar, welche eine Teilmenge der Handlungsalternativen abbilden. Zu beachten ist hierbei, dass die Entscheidungsalternativen nur dann zulässig sind, wenn diese den vorher festgelegten Nebenbedingungen nicht widersprechen. Entscheidend ist, dass immer die bessere Entscheidung getroffen werden soll. Ausschlaggebend für die Optimalität einer getroffenen Entscheidung ist die definierte Zielfunktion. Je genauer die gewählte Alternative den Vorgaben durch die Zielfunktion entspricht, desto „besser“ ist diese. Um die entstandene Frage, welche das Entscheidungsproblem darstellt, beantworten zu können, stellt sich die grundlegende Entscheidungsfrage: „Zu welchem Zeitpunkt muss welcher Auftrag, in welcher Fertigungsstufe, an welcher Maschine eingelastet werden?“ Mittels dieser Frage wird der Gedanke der Maschinenbelegungsplanung umgesetzt, da diese genau diese Parameter benötigt, um eine Aussage über die Reihenfolge der Aufträge treffen zu können. Um aus dieser übergeordneten Frage Entscheidungsvariablen ableiten zu können, ist es unerlässlich, die Frage in einem nächsten Schritt noch wesentlich differenzierter zu betrachten und in kleinere Fragen aufzuteilen. Zu diesem Zweck ist es ratsam eine Betrachtung des grundlegenden Systems vorzunehmen. Dies ist wichtig, um die grundsätzlichen Parameter festlegen zu können, welche vorgegebene und nicht beeinflussbare Daten darstellen. Bei dem zu entwickelnden Optimierungsmodell handelt es sich um ein flexibles Job-Shop Modell. Wie bereits in Unterkapitel 2.3 erläutert, zeichnet sich dieses durch eine Kombination des Job-Shop und Parallel-Shop aus. Charakteristisch für diese Art von Shop ist, dass er aus mehreren Fertigungsstufen besteht, welche als Werkstätten angeordnet sind. Jede Fertigungsstufe verfügt über mehrere parallel angeordnete Maschinen. Die parallele Anordnung mehrerer Maschinen je Fertigungsstufe ist kennzeichnend für den flexiblen Job-Shop. Allerdings steigt die Komplexität durch die zusätzliche Maschinenzuordnung beträchtlich. Nachdem das Entscheidungsproblem und die Entscheidungsfragen definiert wurden, sind abschließend die Entscheidungsschranken zu formulieren, welche als Nebenbedingungen in das mathematische Modell mit einfließen.

4.1.2 Festlegen der Entscheidungsschranken für das Optimierungsmodell

Grundsätzlich kann ein Optimierungsmodell lediglich aus Bearbeitungszeiten und Fälligkeitsterminen der verschiedenen Aufträge und den Bearbeitungsstationen bestehen, deren Bearbeitungsreihenfolge anhand von einfachen Prioritätsregeln optimiert wird. In der Ablaufplanung spielen viele wei-

tere Aspekte eine Rolle, die das Lösen eines solchen Optimierungsproblems umso komplizierter gestalten. Diese Aspekte, d.h. Nebenbedingungen, werden in diesem Abschnitt in die klassischen und weiterführenden Entscheidungsschranken des Optimierungsproblems unterteilt.

Der folgende Textabschnitt erläutert die klassischen Entscheidungsschranken des Optimierungsmodells. Dies sind Entscheidungsschranken, welche im späteren Optimierungsmodell die klassischen Nebenbedingungen widerspiegeln und das System und die Vorgänge begrenzen sollen. Hierzu gehören Entscheidungsschranken, welche sich neben den Freigabe- sowie Fälligkeitsterminen auch mit Vorrangbeziehungen und Zuordnungen befassen. Diese Schranken sind bspw. in der Literatur von Pinedo (Pinedo 2005; Pinedo 2016) oder Blazewicz (Blazewicz et al. 2007) zu finden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich entgegen der zumeist theoretischen Sachverhalte in der Literatur in diesem Fall um ein reales System handelt, das zugrunde gelegt wird. Dies hat zur Folge, dass eine Anwendbarkeit genauestens zu prüfen ist.

Die erste klassische Entscheidungsschranke lautet: Jeder Auftrag muss über die Maschinen bzw. Fertigungsstufen laufen, die für dessen Fertigung benötigt werden. Dieser Punkt bezieht sich auf die technologische Reihenfolge. Es ist sehr wichtig die technologische Reihenfolge einzuhalten, da ein Abweichen von ihr zu Produktionsproblemen führen kann. Wird bspw. eine Autotür zuerst lackiert und bekommt danach Aussparungen gefräst oder Löcher gebohrt, so müsste die Lackierung im Anschluss erneut durchgeführt werden. Dies würde zu Zusatzarbeit und -kosten führen. Daher ist es wichtig, dass die technologische Reihenfolge eingehalten und die Tür zuerst geformt, gefräst, gebohrt, entgratet, geschliffen und abschließend lackiert wird.

Die zweite klassische Entscheidungsschranke lautet: Die bestmögliche Reihenfolge, in der ein Auftrag die Fertigung zu durchlaufen hat, ist zu bestimmen. Diese Reihenfolge hat die technologische Reihenfolge einzuhalten, bezieht sich aber im Gegensatz dazu auf die zeitliche Reihenfolge der verschiedenen Aufträge auf der betrachteten Maschine und wird als organisatorische Reihenfolge bezeichnet.

Die dritte klassische Entscheidungsschranke lautet: Zu jedem Zeitpunkt t wird in jeder Fertigungsstufe i auf jeder Maschine e höchstens ein Auftrag j bearbeitet. Ein Teil kann erst zur Bearbeitung auf eine Maschine, wenn diese frei ist. Eine Maschine kann lediglich ein Teil zurzeit bearbeiten. Eine multiple Bearbeitung mehrerer Teile gleichzeitig ist nicht vorgesehen.

Die vierte klassische Entscheidungsschranke lautet: Zu jedem Zeitpunkt t kann jeder Auftrag j nur auf einer Maschine e bearbeitet werden. Es ist nicht möglich einen Auftrag zu teilen und auf mehreren Maschinen gleichzeitig zu bearbeiten.

Die fünfte klassische Entscheidungsschranke lautet: Unterbrechungen eines Arbeitsvorganges sind verboten, der Vorgang muss immer komplett durchgeführt werden. Ohne diese Entscheidungsschranke wäre es möglich, den Artikel, welcher sich aktuell auf der Maschine in Produktion befindet, anzuhalten, aus der Maschine zu nehmen und einen anderen gewünschten Artikel auf der Maschine weiterzubearbeiten, bevor mit der Bearbeitung des vorigen Artikels auf dieser oder einer anderen Maschine fortgefahren wird. Dies ist allerdings verboten, da es durch die Unterbrechung und Wiederaufnahme einer Bearbeitung zu Komplikationen und zu Qualitätsverlusten kommen kann, was beides unerwünscht und somit aufs strengste zu vermeiden ist. Diese Schranke ist entgegen der theoretischen Ausführung, welche eine Unterbrechung erlaubt, an das reale System angepasst worden.

Durch das Erarbeiten der oben erläuterten Entscheidungsschranken haben sich folgende Annahmen ergeben, welche einschränkend getroffen werden:

- Alle parallelen Maschinen, welche sich auf derselben Fertigungsstufe befinden, verfügen für denselben Auftrag über identische Bearbeitungszeiten.
- Ressourcen stehen grundsätzlich immer zur Verfügung. Dies bedeutet, dass davon auszugehen ist, dass die Disposition so gut arbeitet, dass sämtliche Rohmaterialien, abgesehen von fertigungsseitigen Einschränkungen, immer und zu jedem Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Den Mitarbeitern und Maschinen werden ebenfalls eine grundsätzlich dauerhafte Verfügbarkeit unterstellt, vorausgesetzt Mitarbeiter und Maschine sind nicht für eine Bearbeitung eingespannt oder anderweitig verhindert.
- Freigabetermine, Bearbeitungszeiten, Fälligkeitstermine von Instandsetzungen sowie Wartungen sind als bekannt vorauszusetzen.
- Es gibt keine Qualitätsunterschiede sowohl bei den Rohmaterialien, da davon ausgegangen wird, dass die Qualitätskontrolle eventuelle Schwankungen in der Güte der Materialien abfängt, als auch in der von den Kunden gewünschten Qualität ihrer Produkte.

4.1.3 Verifikation der Anwendbarkeit auf bestehende Optimierungsmodelle

Nachdem in Abschnitt 4.1.2 sämtliche Entscheidungsschranken, welche zur Erstellung eines zielführenden Optimierungsmodells benötigt werden, erarbeitet und erläutert wurden, geht es in diesem Abschnitt um die Überprüfung bestehender Optimierungsmodelle. Hierzu wurde über Jahrzehnte hinweg Forschung zum Thema Scheduling betrieben und in diverser Literatur veröffentlicht (Zimmermann 2008; Jaehn und Pesch 2014; Herrmann 2010; Pinedo 2005; Pinedo 2016; Brucker 2007). Auf Basis dieser Literatur lässt sich ableiten, dass eine rein logische Herangehensweise im Sinne eines paarweisen Vergleichs zu nutzen ist. Dieser dient lediglich als Entscheidungshilfe, d.h. die entstehende Rangfolge (je kleiner der Rang desto besser) ist nicht zwingend umzusetzen. Hierzu werden

die aus Kapitel 2 gewonnenen Erkenntnisse, die Veranschaulichung zu vorherrschenden Ablaufprinzipien in KMU sowie die oben erarbeiteten Entscheidungsschranken herangezogen und verwendet. Um einen paarweisen Vergleich durchführen zu können, werden die entsprechenden Kriterien paarweise gegenübergestellt und deren Wichtigkeit bewertet. Hierzu werden die Zahlen null bis zwei verwendet. Null bedeutet, dass der Zeilenwert weniger wichtig ist, Eins, dass der Zeilenwert ebenso wichtig ist und Zwei bedeutet, dass der Zeilenwert wichtiger ist als der Spaltenwert. Wichtig hierbei ist, die erarbeiteten Erkenntnisse mit in die Bewertung einfließen zu lassen.

Tabelle 4.1: Paarweiser Vergleich der versch. Maschinenumgebungen

	1	**P_m**	**Q_m**	**R_m**	**F_m**	**FF_c**	**J_m**	**FJ_c**	**O_m**	**Summe**	**Rang**
1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	3	7
P_m	2	0	1	1	2	2	0	0	2	10	3
Q_m	2	1	0	1	2	2	0	0	2	10	3
R_m	2	1	1	0	2	2	0	0	2	10	3
F_m	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	8
FF_c	1	0	0	0	2	0	1	0	2	6	6
J_m	2	2	2	2	2	1	0	1	2	14	2
FJ_c	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**2**	**1**	**0**	**2**	**15**	**1**
O_m	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2	8

Wie in Tabelle 4.1 am vorgehobenen Bereich der Rang-Spalte zu erkennen ist, ist FJ_c (Flexible Job-Shop) die vom Rang höchste Maschinenumgebung. Mit nur einem Punkt dahinter liegt direkt der J_m (Job-Shop), was sich zum einen dadurch begründen lässt, dass der FJ_c zu einem J_m wird, sobald die Zuordnung der Bearbeitungsmaschinen erfolgt ist und zum anderen anhand der erworbenen Erkenntnisse über das in KMU zur Anwendung kommende Ablaufprinzip. Somit fallen die rangschwächeren Maschinenumgebungen aus der weiteren Betrachtung heraus. Da die Wahl der Maschinenumgebung durch den paarweisen Vergleich eingegrenzt wurde, entsteht vorübergehend eines der beiden folgenden Klassifikationsschemata. Demnach ist die Zuordnung von Alpha erfolgt, wohingegen Beta (Auftragscharakteristika) und Gamma (Zielkriterium) noch ausstehen und im Weiteren eingegrenzt werden.

$$FJ_c \mid \beta \mid \gamma \tag{4.1}$$

Nach der Bestimmung der in Frage kommenden Maschinenumgebungen, werden im nächsten Schritt die Zielkriterien erörtert. Hierfür wird ebenfalls ein paarweiser Vergleich zurate gezogen, dessen Er-

gebnisse in Tabelle 4.2 veranschaulicht werden. Was gegenüber der Maschinenumgebung aus Tabelle 4.1 auffällt ist, dass zwei Zielkriterien hervorgehoben sind und somit die besten Ergebnisse erzielt haben. Diese werden in der Punktzahl direkt von ihrem jeweiligen ungewichteten Pendant gefolgt.

Tabelle 4.2: Paarweiser Vergleich der versch. Zielkriterien

	C_{max}	L_{max}	C_j	F_j	U_j	T_j	w_jC_j	w_jF_j	w_jU_j	w_jT_j	**Summe**	**Rang**
C_{max}	0	1	0	0	2	0	0	0	2	0	5	7
L_{max}	1	0	0	0	2	0	0	0	2	0	5	7
C_j	2	2	0	1	2	1	0	0	2	0	10	5
F_j	2	2	1	0	2	1	2	1	2	1	14	3
U_j	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	9
T_j	2	2	1	1	2	0	2	1	2	1	14	3
w_jC_j	2	2	2	0	2	0	0	0	2	0	10	5
w_jF_j	**2**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**0**	**2**	**1**	**15**	**1**
w_jU_j	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	9
w_jT_j	**2**	**2**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**1**	**2**	**0**	**15**	**1**

Wie auch bei der Maschinenumgebung, sind in die Punkteverteilung zur Bestimmung des geeignetsten Zielkriteriums die Kenntnisse aus dem Stand der Technik mit eingeflossen. Durch den Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt und das damit verbundene Überangebot von Gütern am Markt, sind die Unternehmen bestrebt den Kundenanforderungen gerecht zu werden. Dies ist bspw. über eine erhöhte Termintreue und infolgedessen mittels der Vermeidung von Verspätungen zu gewährleisten. Eine erhöhte Termintreue geht meist mit einer geringen Durchlaufzeit einher, weshalb genau diese beiden Zielkriterien die höchste Punktzahl aufweisen. Somit ist die Verwendung dieser beiden Zielkriterien im Sinne dieser Arbeit, woraus sich das folgende Klassifikationsschema entwickelt.

$$FJ_c \mid \beta \mid \sum w_j F_j \sum w_j T_j \tag{4.2}$$

Somit sind die Maschinenumgebung und die Zielfunktion, die das Klassifikationsschema und damit auch das Optimierungsproblem enthalten soll, bestimmt worden. Abschließend ist das Herzstück eines jeden Klassifikationsschemata zu erörtern: die Auftragscharakteristika.

Tabelle 4.3: Paarweiser Vergleich der versch. Auftragscharakteristika

	pmtn	**prmu**	**prec**	**r_j**	**p_{ij}**	**d_j**	**batch**	**fmls**	**s_{jk}**	**t_j**	**w_j**	**Summe**	**Rang**
pmtn	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10
prmu	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	10
prec	2	2	0	1	1	1	2	1	1	1	1	13	1
r_j	2	2	1	0	1	1	2	1	1	1	1	13	1
p_{ij}	2	2	1	1	0	1	2	1	1	1	1	13	1
d_j	2	2	1	1	1	0	2	1	1	1	1	13	1
batch	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	9
fmls	2	2	1	1	1	1	2	0	1	1	1	13	1
s_{jk}	2	2	1	1	1	1	2	1	0	1	1	13	1
t_j	2	2	1	1	1	1	2	1	1	0	1	13	1
w_j	2	2	1	1	1	1	2	1	1	1	0	13	1

Wie schon bei der Auswahl der Maschinenumgebung sowie der Auswahl des Zielkriteriums, wurden ebenso die erläuterten Charakteristika paarweise in Tabellenform gegenübergestellt und verglichen. Dieser Vergleich ist in Tabelle 4.3 zu sehen. Begründen lässt sich das zu erkennende Ergebnis dadurch, dass pmtn (Unterbrechungen) in diesem System, wie in Abschnitt 4.1.2 bereits erläutert, keine Anwendung finden, da es sich um ein reales System handelt, in dem von einer Unterbrechung der Bauteilfertigung abgesehen wird. Der Grund dafür ist, dass die Wiederaufnahme der Bearbeitung zu Komplikationen und Qualitätsverlusten führen kann. Permutationen (prmu) sind lediglich Gegenstand von Flow-Shops. Dies begründet sich dadurch, dass bei Job-Shops nicht davon ausgegangen werden kann, dass jedes Mal dieselbe Reihenfolge auf den unterschiedlichen Maschinen eingehalten wird. Eine Chargeneinteilung (batch) ist in der individuellen Fertigung nur schwer bis gar nicht umzusetzen, da durch die geringe Losgröße und die unterschiedlichen Produkte eine zu geringe Ähnlichkeit gegeben ist. Zudem sind durch die angesprochene Durchlaufzeitminimierung die Freigabetermine, Bearbeitungszeiten, Transportzeiten und Rüstzeiten bereits ein fester Bestandteil des Optimierungsmodells. Durch die Reduzierung bzw. Eliminierung von Verspätungen sind die Fälligkeitstermine ebenso von größter Wichtigkeit. Durch die Einteilung in Auftragsfamilien lassen sich Rüstzeiten minimieren, unterschiedliche Gewichtungen von Aufträgen nutzen, bspw. das Einlasten von Eilaufträgen, und Vorrangbeziehungen innerhalb des Modells verwenden.

$$FJ_c \mid prec, fmls, r_j, p_{ij}, d_j, s_{jk}, t_j, w_j \mid (\sum w_j F_j \sum w_j T_j) \tag{4.3}$$

Bei dem Optimierungsmodell handelt es sich um einen flexiblen Job-Shop. Dieser unterliegt Vorrangbeziehungen, dessen Aufträge in Familien eingeteilt sind. Jeder Auftrag besitzt unterschiedliche Freigabetermine, die Aufträge bestehen aus fertigungsstufenbasierten Bearbeitungszeiten und jeder Auftrag verfügt über unterschiedliche Fälligkeitstermine, die sich an den unterschiedlichen, kundenseitigen Lieferterminen orientieren. Zwischen den verschiedenen Aufträgen werden Rüstzeiten realisiert, Transportzeiten zugrunde gelegt und Gewichtungen vorgenommen. Minimiert wird das ganze Modell anhand einer Kombination zweier Summen-Zielfunktionen, welche aus gewichteter Durchlaufzeit und gewichteter Verspätung besteht. Aufgrund dieses sehr speziellen Klassifikationsschemas und nach eingehender Studie der vorliegenden Literatur zu diesem Themenbereich ist festzustellen, dass es aktuell kein Modell zu dem in der Einleitung dargelegten Sachverhalt gibt. Das Adaptieren, Kombinieren oder Erweitern unterschiedlicher Ansätze erweist sich hierbei ebenso wenig als zielführend. Dies lässt sich dadurch begründen, dass unterschiedliche Autoren unterschiedliche Herangehensweisen haben ein Modell zu beschreiben, dass das Lösen eines flexiblen Job-Shop Modells nicht sehr weit verbreitet ist, zumeist aufgrund anderer Zielkriterien optimiert wird oder andere Auftragscharakteristika Bestandteil des Modells sind.

4.1.4 Beschreibung des mathematischen Optimierungsproblems

Basierend auf der Problemformulierung aus Abschnitt 4.1.1 und der Formulierung der Entscheidungsschranken aus Abschnitt 4.1.2, ergibt sich das zu betrachtende System aus einer bestimmten Menge von parallel angeordneten Maschinen je Fertigungsstufe (Fräse, Dreherei, Lackiererei, …). Diese bilden sich aus einer definierten Menge von Fertigungsstufen und einer Anzahl an Aufträgen, die diese Maschinen zu durchlaufen haben. Aufbauend auf diesem Gedanken werden die ersten Indizes definiert. Maschinen werden definiert als (e = 1,…,M), Fertigungsstufen als (i = 1,…,O) und Aufträge als (j = 1,…,N). Zudem werden dem ganzen System Zeitperioden mit (t = 1,…,T) zugrunde gelegt. Um das System und die Fertigungsreihenfolge später beschreiben zu können, dienen die Entscheidungsvariablen als Statusmelder, weshalb sie als Binärvariablen formuliert werden müssen. Binärvariablen geben bloß zwei Werte aus. Dies kann entweder eine Eins sein, die gleichbedeutend mit einem Ja ist, oder eine Null, welche ein Nein verkörpert. Somit lässt sich die grundlegend formulierte Entscheidungsfrage als Binärvariable wie folgt definieren:

$$FJ_c \mid prec, fmls, r_j, p_{ij}, d_j, s_{jk}, t_j, w_j \mid (\sum w_j F_j \sum w_j T_j) \tag{4.4}$$

Demnach nimmt die Variable den Wert Eins an, wenn Auftrag j in Fertigungsstufe i zum Zeitpunkt t auf Maschine e bearbeitet wird. Findet zum Zeitpunkt t keine Bearbeitung des Auftrags j in Fertigungsstufe i auf Maschine e statt, gibt die Variable den Wert Null aus. Die Variable x_{ij} soll später

alle benötigten Informationen der Maschinenbelegungsplanung beinhalten. Diese Variable soll es ermöglichen, dass zu einem späteren Zeitpunkt erkannt werden kann, wann und wo eine Bearbeitung stattfindet. Um die Berechnungsdauer zu minimieren, werden zwei weitere Variablen eingeführt, die die x-Variable aufteilen und somit in späteren Nebenbedingungen durch die differenzierte Betrachtung geringere Iterationsdauern zufolge haben.

$$z_{ijt} = \begin{cases} 1, wenn\ Auftrag\ j\ in\ Fertigungsstufe\ i\ zum\ Zeitpunkt\ t\ beginnt \\ 0, sonst \end{cases} \tag{4.5}$$

$$a_{je} = \begin{cases} 1, wenn\ Auftrag\ j\ auf\ Maschine\ e\ startet \\ 0, sonst \end{cases} \tag{4.6}$$

Wie beschrieben, lässt sich durch genaueres Betrachten der Indizes erkennen, dass sich die x-Variable mittels z- und a-Variable ersetzen lässt. Die z-Variable dient der Statusmeldung, ob sich Auftrag j zum Zeitpunkt t in Fertigungsstufe i befindet. Anhand der a-Variable wird die Zuordnung des Auftrags zur Maschine abgefragt. Um auch hier eine Minimierung der Berechnungsdauer zu erhalten, wird bei der a-Variable auf die zusätzliche Zuordnung der Fertigungsstufe mittels Index i verzichtet und stattdessen eine Einteilung der Menge an Maschinen in Teilmengen vorgenommen. Somit werden die parallelen Maschinen einer Fertigungsstufe zur Teilmenge $M_i \subseteq M$ zusammengefasst. Aufgrund der bekannten technologischen Reihenfolge innerhalb der Aufträge wird diese mittels einer weiteren Binärvariablen ausgedrückt. Sie stellt allerdings keine Entscheidungsvariable dar, da die Reihenfolge der Fertigungsstufen eines jeden Auftrags bereits festgelegt ist. Durch die Betrachtung zweier aufeinanderfolgender Fertigungsstufen, ist die Inputbeschreibung um den Index l zu erweitern ($i,l = 1,\ldots,O$). Somit wird die technologische Reihenfolge auf folgende Weise ausgedrückt:

$$y_{ilj} = \begin{cases} 1, wenn\ Auftrag\ j\ zuerst\ in\ Fertigungsstufe\ i\ und\ danach\ in\ Fertigungsstufe\ l \\ 0, sonst \end{cases} \tag{4.7}$$

Im Anschluss an die Definition der groben Bestandteile des Systems, sind nun die Aufträge im Einzelnen zu betrachten. Hierfür muss berücksichtigt werden was einen Auftrag ausmacht und was mit diesem in einem System geschieht. Im Rahmen der Durchlaufzeitminimierung und der Reduzierung bzw. Eliminierung von Verspätungen werden die Freigabetermine, Fälligkeitstermine, Bearbeitungszeiten, Transportzeiten und Rüstzeiten benötigt. Somit ist festzuhalten, dass jeder Auftrag über einen festgelegten Fälligkeitstermin verfügt, welcher im Folgenden als

$$d_j = Fälligkeitstermin\ von\ Auftrag\ j\ (d_j > 0) \tag{4.8}$$

definiert ist. Dies ist ein auf Basis des vom Kunden gewünschten Liefertermins festgelegter Termin, welcher zur Erfüllung der Liefertreue einzuhalten ist. Kann dieser nicht eingehalten werden, so ist infolgedessen mit einer verspäteten Lieferung und somit mit einer Verletzung des rechtzeitigen Lieferversprechens, sowie einer Verschlechterung des Kundenservice zu rechnen. Zudem wäre ein

Nicht-Einhalten des Fälligkeitstermins mit einer Verspätung gleichzusetzen. Für die Bearbeitung der Aufträge werden Bearbeitungszeiten benötigt und festgelegt, welche den unterschiedlichen Fertigungsstufen des Auftrags zugeordnet sind. Es wird angenommen, dass die Bearbeitungszeiten aller parallelen Maschinen, welche sich auf derselben Fertigungsstufe befinden, identisch sind. Auf dieser Annahme beruhend ist daher keine Zuordnung der Bearbeitungszeit zu den jeweiligen Maschinen notwendig. Zudem kann die Bearbeitungszeit weder den Wert Null, noch als negativer Wert im System eingetragen werden. Daher wird diese wie folgt definiert:

$$p_{ij} = Bearbeitungszeit\ von\ Auftrag\ j\ in\ Fertigungsstufe\ i\ (p_{ij} > 0) \tag{4.9}$$

Basierend auf produktionsseitigen Einschränkungen werden neben Fälligkeitsterminen und Bearbeitungszeiten ebenso Freigabetermine festgelegt. Diese beziehen sich wie die Bearbeitungszeit auf die unterschiedlichen Aufträge und die verschiedenen Fertigungsstufen. Unter produktionsseitigen Einschränkungen ist in diesem Kontext zu verstehen, dass der Beginn einzelner Bearbeitungsvorgänge von weiteren produktionsbedingten Faktoren abhängt. Darunter ist bspw. die Bereitstellung für die Produktion benötigter Materialien oder die Terminierung des Bearbeitungsstarts eines Auftrags zu verstehen. Eine Größer-Null-Bedingung liegt auch den Fälligkeitsterminen zugrunde:

$$r_{ij} = Freigabetermin\ von\ Auftrag\ j\ in\ Fertigungsstufe\ i\ (r_{ij} > 0) \tag{4.10}$$

Ein weiterer zu definierender Inputparameter ist die Transportzeit. Diese beschreibt die von einem Auftrag benötigte Dauer, zwischen der aktuellen Maschine auf eine Maschine der nachfolgenden Fertigungsstufe transportiert zu werden. Auch hier gilt, dass eine Betrachtung der Fertigungsstufe durch die vorher definierte Teilmenge ($M_i \subseteq M$) nicht benötigt wird. Durch die Betrachtung zweier unterschiedlicher Maschinen ist das Verwenden eines zweiten Index für die Maschinen unerlässlich. Dadurch ergibt sich neben der Definition der Transportzeit auch eine Anpassung in der Inputbeschreibung durch die Erweiterung um den Index f ($e,f = 1,\ldots,M$).

$$t_{jef} = Transportzeit\ von\ Auftrag\ j\ auf\ Maschine\ e\ zu\ Maschine\ f\ (t_{jef} > 0) \tag{4.11}$$

Grundsätzlich besteht zwischen den einzelnen Aufträgen keinerlei Zusammenhang, da die bisher genannten Auftragsparameter, Fälligkeitstermine, Bearbeitungszeiten, Freigabetermine, Transportzeiten oder die technologische Reihenfolge immer nur auf einen Auftrag bezogen sind. Dennoch lässt sich durch die zuvor genannte technologische Reihenfolge ein Zusammenhang herstellen. Anhand dieser Reihenfolge kann eine Familienzugehörigkeit zugrunde gelegt werden, wenn weitestgehend die gleichen Prozessschritte benötigt werden, um einen Auftrag abzuarbeiten. Unterscheidungen in der Anzahl zu produzierender Produkte kann es innerhalb einer Familie dennoch geben. Werden Aufträge derselben Familie nacheinander auf derselben Maschine gefertigt, bedarf es zwischen diesen

keiner Maschinenrüstung. Die Bearbeitung familiengleicher Aufträge kann demnach ohne zusätzlichen Aufwand nacheinander erfolgen. Infolge dessen ist die Familienzugehörigkeit im weiteren Verlauf des Modells entscheidend. Dieser Vorteil wird innerhalb des Parameters Rüstzeit hinterlegt, welcher sich auf die Rüstzeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Aufträgen auf derselben Maschine bezieht und im Folgenden als

$$s_{jke} = R\text{üstzeit zwischen } Auftrag\ j \text{ und } Auftrag\ k \text{ auf } Maschine\ e\ (s_{jke} \geq 0) \tag{4.12}$$

definiert wird. Durch eine minimale Rüstzeit von null im Fall des fortlaufenden Fertigens mehrerer Aufträge derselben Familie auf derselben Maschine, wird nach eben diesem Zustand gestrebt. Angesichts dessen unterliegt die Rüstzeit einer Nicht-Negativitäts-Bedingung, welche den Wert null nicht ausschließt. Durch das Betrachten zweier unterschiedlicher Aufträge wird auch eine Indexanpassung der Aufträge vorgenommen, welche wie folgt aussieht: (j,k = 1,…,N).

Aufbauend auf den definierten Parametern und den festgelegten Entscheidungsschranken gilt es, die Verschriftlichungen in mathematische Ausdrücke zu überführen. Die erste Schranke, die an das Modell gestellt wird, besagt, dass jeder Auftrag über die Maschinen bzw. Fertigungsstufen laufen muss, die für dessen Fertigung benötigt werden. Hierfür wird auf die vorher definierte z- und a-Variable zurückgegriffen. Zudem wird die Teilmenge O_j eingeführt, welche die Fertigungsstufen definiert, die zur Bearbeitung von Auftrag j benötigt werden und eine Teilmenge der gesamten Anzahl an Fertigungsstufen darstellt ($O_j \subseteq O$). Somit sind in O_j die Maschinen, welche sich in der technologischen Reihenfolge zu Auftrag j befinden, hinterlegt.

$$\sum z_{ijt} = 1T, t = 1, \forall j, i \in Oj \tag{4.13}$$

$$\sum a_{je} = 1e \in M_i, \forall\, j, i \in= j \tag{4.14}$$

Durch die obere Nebenbedingung (4.13) wird eine Zuordnung des Auftrags zu einem Zeitpunkt erzwungen und mittels der unteren Nebenbedingung (4.14) erfolgt eine Maschinenzuordnung. Hierzu wird in (4.13) über die gesamte Anzahl Perioden, für alle Aufträge j und alle Fertigungsstufen i, die zur Bearbeitung von Auftrag j benötigt werden, iteriert und gleich eins gesetzt. Dies lässt sich dadurch begründen, dass im Falle einer nicht erfolgten Zuordnung sämtliche Variablen im Zuge der Optimierung gleich null gesetzt werden, da dies einer minimalen Durchlaufzeit entsprechen würde. Um dies zu vermeiden und zu gewährleisten, dass das spätere Modell ordnungsgemäß arbeitet, wird per Nebenbedingung (4.13) festgelegt, dass der Auftrag j in der Fertigungsstufe i über die Zeit einmal starten muss. Die vorherige Zuordnung des Auftrags zu der jeweiligen Fertigungsstufe ist mittels der

Binärvariable y_{ilj} hinterlegt worden. Nebenbedingung (4.14) hingegen iteriert über sämtliche Maschinen, welche zu Fertigungsstufe i gehören ($e \in M_i$). Der Grund hierfür ist mit dem für (4.13) gleichzusetzen. Erfolgt keine strickte Zuordnung, wird auch hier ohne Zuordnung optimiert und somit sämtliche Bearbeitungszeiten etc. nicht berücksichtigt. Somit wird mittels (4.14) gewährleistet, dass der Auftrag j auf einer Maschine e einmal starten muss. Zudem ist die Maschine e als Element der Fertigungsstufen von Auftrag j definiert. Da nicht jeder Auftrag über jede Fertigungsstufe zu laufen hat um fertiggestellt zu werden, muss somit nicht über die gesamte Menge von Maschinen und Fertigungsstufen iteriert werden. Die Folge ist die Gewährleistung einer generellen Zuordnung der Aufträge zu den Fertigungsstufen.
Die nächste Entscheidungsschranke besagt, dass die bestmögliche Reihenfolge der Fertigung für jeden Auftrag zu ermitteln ist. Damit wird die organisatorische Reihenfolge beschrieben, welche die zeitliche Reihenfolge der verschiedenen Aufträge j auf einer betrachteten Maschine i wiedergibt. Diese Schranke stellt die Zielfunktion dar, welche mittels Minimierung bestimmter Sachverhalte das bestmögliche Ergebnis und somit auch die bestmögliche Reihenfolge ermittelt.

Weitere Zuordnungsanforderungen werden mittels der nächsten beiden Nebenbedingungen erwirkt. Diese müssen gewährleisten, dass zu jedem Zeitpunkt t, in jeder Fertigungsstufe i auf jeder Maschine e höchstens ein Auftrag j bearbeitet wird, und dass zu jedem Zeitpunkt t jeder Auftrag j nur auf einer Maschine e bearbeitet werden kann. Zudem ist es wichtig, dass ein Teil erst bearbeitet werden kann, wenn die entsprechende Maschine frei ist.

$$\sum x_{ij\,et} \leq 1\; N\; j = 1, \forall\; i, e, t \tag{4.15}$$

$$\sum x_{ij\,et} \leq 1\; M_{i\,e} = 1, \forall\; j, i, t \tag{4.16}$$

Mittels Nebenbedingung (4.15) wird festgelegt, dass jede Maschine nur einen Auftrag gleichzeitig bearbeiten kann. Dies wird gewährleistet, indem über sämtliche Aufträge j, für alle Fertigungsstufen i, Maschinen e und Perioden t, iteriert wird. Befindet sich Auftrag j zum Zeitpunkt t auf der Maschine e, so nimmt die x-Variable den Wert Eins an. Ist dies nicht der Fall, so wird der x-Variable der Wert Null hinterlegt. Ist die Variable gleich eins, so bedeutet dies, dass die entsprechende Maschine belegt ist und die Bearbeitung eines anderen Auftrags erst stattfinden kann, sobald die vorherige Auftragsbearbeitung abgeschlossen ist und die Variable somit wieder auf null gesetzt wird. Mittels der Nebenbedingung (4.16) wird gewährleistet, dass jeder Auftrag zur selben Zeit nur auf einer Maschine bearbeitet werden kann. Hierzu wird über sämtliche Maschinen einer Fertigungsstufe iteriert. Diese Iteration geschieht für alle Aufträge j, für sämtliche Fertigungsstufen i und in allen Perioden t. Ist die entsprechende Maschine belegt, wird der x-Variable der Wert eins hinterlegt, ansonsten eine null.

Die letzte allgemein gestellte Entscheidungsschranke an das Modell besagt, dass die Bearbeitung eines Auftrags auf einer Maschine vollständig durchzuführen und nicht zu unterbrechen ist.

$$\sum x_{ij\,er} \geq p_{ijt} a_{jet} + p_{ij} - 1\ \tau = t, \forall\, j, i, e \in M_{it} \tag{4.17}$$

Wie bereits in Nebenbedingung (4.15) angedeutet wurde, ist für die Zeit der Bearbeitung diese Maschine belegt und erst wieder für einen Folgeauftrag nutzbar, wenn die Bearbeitung abgeschlossen und die Maschine infolgedessen wieder frei ist. Dieser Gedanke wird mittels Nebenbedingung (4.17) umgesetzt, welche eine unterbrechungsfreie Bearbeitung der Aufträge gewährleistet. Um diesen Gedanken umsetzen zu können, muss sichergestellt sein, dass für die gesamte Dauer, ab Start der Bearbeitung von Auftrag j zur Periode t, bis zum Ende der Bearbeitung des Auftrags, die x-Variable gleich der Dauer der Bearbeitung ist. Somit sorgt die linke Seite des Operators dafür, dass mittels eines zusätzlichen Laufindex τ für die Perioden (t,τ = 1,…,T) mit $\tau = t$, was den Beginn der Bearbeitung darstellt, bis $t + p_{ij} - 1$ iteriert, was das Ende der Bearbeitung darstellt. Diese Iteration läuft für alle Aufträge j, Fertigungsstufen i, Perioden t und Maschinen e, die Element der Teilmenge M_i sind.

Die Ausgangssituation ist wie folgt. Es wird eine Periode t = 3, eine Bearbeitungszeit p_{ij} = 4 und infolgedessen ein Belegungsstatus der z- und a-Variable von eins angenommen. Somit wird von dem Startzeitpunkt $\tau = t$, Periode drei, bis zum Endpunkt der Bearbeitung $t + p_{ij} - 1$, Periode sechs, iteriert. Dies bedeutet, dass die Bearbeitung des Auftrags von der dritten Periode bis hin zur sechsten Periode andauert und stellt eine Gesamtbearbeitungsdauer von vier Perioden dar. Durch die Multiplikation der Bearbeitungszeit mit den Zustandsvariablen auf der rechten Seite des Operators, wird ebenfalls eine vier als Ergebnis berechnet. Dieses Ergebnis steht für die Dauer der Belegung der Maschine mit dem entsprechenden Auftrag, weshalb die Zustandsvariable x für den Zeitraum von der dritten bis zur sechsten Periode den Wert eins annimmt, welcher für eine Belegung der Maschine mit einem Auftrag steht. Somit ist die Überführung der generellen Anforderungen in eine mathematisch beschreibende Nebenbedingung beendet, weshalb im Weiteren eine Überführung der aus dem Kriterienbaum von Wolf (siehe Abbildung 3.1) resultierenden anforderungsgerechten Einschränkungen zu erfolgen hat. Die erste abgeleitete Entscheidungsschranke gibt wieder, dass eine Rüstzeitminimierung zu verfolgen ist. Um eine Rüstzeitminimierung erreichen zu können, ist es unerlässlich zu wissen, welcher Auftrag dem sich auf der Maschine bereits befindlichen Auftrag folgt. Hierzu ist eine neue binäre Entscheidungsvariable einzuführen, welche diesen Sachverhalt darstellt. Dies bedeutet, dass, wenn Auftrag j vor Auftrag k auf Maschine e bearbeitet wird, diese Variable den Wert eins annehmen muss. Ist dies nicht der Fall, so gibt die Variable den Wert null aus. Sie wird im Folgenden als β-Variable bezeichnet.

$$\beta_{jk,e} = \begin{cases} 1, \text{wenn Auftrag j vor Auftrag k an derselben Maschine e bearbeitet wird} \\ 0, sonst \end{cases} \quad (4.18)$$

$$a_{je} + a_{ke} - 1 \leq \beta_{jke} + \beta_{kje}, \forall\, e, j, k \quad (4.19)$$

$$\sum_{t=1}^{T} \left(t \cdot z_{ij,t}\right) + p_{ij} + s_{jk,e} \leq \sum_{t=1}^{T} t \cdot z_{jk,t} + Z \cdot \left(1 - \beta_{jk,e}\right), \forall\, j, k, i, e \quad (4.20)$$

Nebenbedingung (4.18) dient der Reihenfolgenbestimmung der Aufträge auf einer bestimmten Maschine, da diese Reihenfolge, im Gegensatz zur technologischen Reihenfolge y_{ilj}, nicht bekannt ist, aber für die nachfolgende Nebenbedingung (4.19) zwingend benötigt wird. Befinden sich sowohl Auftrag j als auch Auftrag k auf Maschine e, so werden beide a-Variablen gleich eins. Treten Fall zwei und drei ein, in denen entweder nur eine der beiden a-Variablen gleich eins wird (einer der beiden Aufträge befindet sich auf der Maschine), oder keine der beiden, dann wird die linke Seite insgesamt null oder minus eins. Ist dies der Fall, kann die Nebenbedingung nicht erfüllt werden, da ohne beide Aufträge nacheinander auf derselben Maschine zu haben, keine Reihenfolgebestimmung benötigt wird. Sind wie im ersten Fall beide Variablen gleich eins, so würde auf der linken Seite insgesamt eins stehen, da zusätzlich zu der Addition der beiden a-Variablen auf der linken Seite noch eine minus eins steht. Nur wenn dies der Fall ist, ist ein Erfüllen der Nebenbedingung möglich, da sich nur dann beide Aufträge auf derselben Maschine befinden und nur dann die Reihenfolgezuordnung zwischen den beiden Aufträgen auf derselben Maschine zu optimieren ist. Je nachdem ob es optimaler ist zuerst Auftrag j und danach Auftrag k, oder umgekehrt, auf Maschine e zu bearbeiten, ist eine der beiden β-Variablen gleich eins und die jeweils andere null. Es kann immer nur eine der beiden β-Variablen gleich eins sein. Abschließend ist noch anzumerken, dass in dieser Nebenbedingung keine Berücksichtigung der Zeit stattfindet, da hier nur entscheidend ist, ob sich die Aufträge auf derselben Maschine befinden oder nicht. Der Faktor Zeit spielt erst in nachfolgender Nebenbedingung (4.20) eine Rolle. (4.20) dient der Bestimmung der Rüstzeit $s_{jk,e}$. Diese beschreibt die Dauer eines Rüstvorgangs zweier unterschiedlicher Aufträge j und k auf derselben Maschine e. Durch die Reihenfolgezuordnung der unterschiedlichen Aufträge auf derselben Maschine aus Nebenbedingung (4.18), welche in der β-Variablen hinterlegt ist, werden mittels Iteration über die gesamte Zeit die beiden Startzeitpunkte von Auftrag j und Auftrag k in der Fertigungsstufe i zum Zeitpunkt t bestimmt. Aufbauend auf den Startzeitpunkten und der Bearbeitungszeit von Auftrag j in Fertigungsstufe i wird die anforderungsgerechtere Reihenfolge und infolgedessen auch die anforderungsgerechtere Rüstzeit ermittelt. Eine weitere abgeleitete Anforderung stellt die Zykluszeitminimierung dar, welche gleichbedeutend mit einer Bearbeitungszeitminimierung von p_{ij} ist. Dis ist durch eine gleichzeitige Auslastung der Maschinen zu erreichen, was nicht durch eine einzelne Nebenbedingung umgesetzt werden kann, sondern durch die gesamte Formulierung des Optimierungsmodells gewährleistet wird. Eine

weitere Anforderung, welche sich durch das Ziel einer Durchlaufzeitminimierung ergeben hat, ist das Minimieren der Transportzeit. Diese stellt neben Rüstzeiten, Bearbeitungszeiten und Liegezeiten einen wichtigen Bestandteil der Durchlaufzeit dar. Deshalb wurde auf diesem Gedanken basierend die nachfolgende Nebenbedingung entwickelt.

$$\sum\sum_{t=1}^{T}(t \cdot z_{ij,t} \cdot a_{j,e} + \sum_{f}(t_{j,ef} \cdot a_{j,f})) \leq \sum_{t=1}^{T} t \cdot z_{lj,t} + Z \cdot (1 - y_{ilj}), \forall\, j, i, l \qquad (4.21)$$

Da die Transportzeit t_{jef} von den Maschinen e und f und somit auch von den Fertigungsstufen i und l abhängig ist, ist eine Berücksichtigung der technologischen Reihenfolge y_{ilj} in dieser Nebenbedingung unerlässlich. Um in einem ersten Schritt den einmaligen Startzeitpunkt von Auftrag j auf Maschine e bestimmen zu können, wird über alle Maschinen e, der zur Maschine zugehörigen Fertigungsstufe i und über alle Perioden summiert. Somit ist die erste Maschine, welche die Transportzeit zu berücksichtigen hat, ermittelt. Die Transportzeit bezieht sich dabei auf den Auftrag j, die bekannte Maschine e und eine bis dahin unbekannte Maschine f. Dadurch, dass zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt ist, welcher Maschine f der Auftrag j explizit zugeordnet ist, wird zu dessen Ermittlung eine Summe ($\sum(t_{jef} * a_{jf})$) über f mit der Transportzeit und der Zuordnungsvariable a genommen. Somit stehen der Startzeitpunkt der Bearbeitung, die Bearbeitungszeit und die Transportzeit fest. Aufbauend hierauf ist dann bekannt, ab wann der Auftrag in der nächsten Fertigungsstufe beginnen kann. Der definitive Startzeitpunkt wird dann über die Summe rechts des Operators in (4.21) ermittelt.

Nachdem die Formulierung der Transportzeit minimierenden Nebenbedingung mathematisch umgesetzt ist, wird in einem nächsten Schritt der Umgang mit geplanten sowie ungeplanten Ausfällen innerhalb des Modells beschrieben. Hierbei ist zu erwähnen, dass eventuelle Freigabetermine, Bearbeitungszeiten und Fälligkeitstermine für die Ausfallbehebung als bekannt vorausgesetzt werden. Da bei einem Ausfall, egal welcher Natur, eine bestimmte Maschine in einer bestimmten Fertigungsstufe betroffen ist, wird die Ausfallbehebung mittels eines Auftrags durchgeführt. Dies bedeutet, dass ein Auftrag j in das System eingespeist wird, welcher aus nur einer Fertigungsstufenzuordnung (Arbeitsvorgang) besteht und somit nur auf der einen betroffenen Maschine eingelastet wird. Der einzige Unterschied, der hierbei zwischen geplanten und ungeplanten Ausfällen gemacht wird, ist die Art der Gewichtung. Ungeplante Ausfälle, wie Instandsetzungen durch eine defekte Maschine oder IT-Ausfälle, werden mit einem sehr hohen Wert gewichtet, um sicherzustellen, dass die Bearbeitung so schnell wie möglich vorangetrieben wird. Im Gegensatz dazu unterliegen Wartungen nur einer normalen bis minimal erhöhten Gewichtung. Wie auch bei gewöhnlichen Aufträgen blockieren diese speziellen Aufträge die Maschinen komplett, wodurch die betroffene Maschine für den Zeitraum der Behebung für Fertigungsprozesse nicht zur Verfügung steht.

Ein vergleichbares Szenario ergibt sich aus Eilaufträgen, welche ebenfalls im Rahmen eines realen Systems berücksichtigt werden und somit eine weitere Anforderung darstellen. Der Umgang mit Eilaufträgen ist im Wesentlichen mit einer Kombination aus normalen Aufträgen und Instandsetzungen zu vergleichen. Hiermit ist gemeint, dass Eilaufträge aus normalen Aufträgen mit einer Vielzahl an Fertigungsstufen bestehen, die in der Bearbeitungsreihenfolge anderen Aufträgen allerdings vorzuziehen sind. Dies wird durch eine instandsetzungstypische, höhere Gewichtung des Auftrags umgesetzt.

Da es gilt, alle auftragsrelevanten Parameter zu berücksichtigen, basiert die nachstehende Nebenbedingung auf dem Freigabetermin von Auftrag j in Fertigungsstufe i.

$$\sum_{t=1}^{r_{ij}=1} x_{zj,et} \leq 0\,, \forall\, j, i, l \tag{4.22}$$

Somit dient Nebenbedingung (4.22) der unternehmensseitigen Bearbeitungseinschränkung mittels Freigabetermin r_{ij}. Das Unternehmen kann mit Hilfe von Freigabeterminen einzelne Aufträge erst zu einem bestimmten Zeitpunkt beginnen lassen. Dies ist sinnvoll, wenn bspw. bestimmte Materialien, die für die Produktion benötigt werden, erst später verfügbar sind. Hierzu wird die Fertigungsstufe festgelegt, in der die Materialien benötigt werden und die Periode, ab der die Materialien zur Verfügung stehen. In einem weiteren Beispiel darf die Bearbeitung des gesamten Auftrags erst zu einer bestimmten Periode stattfinden. Hierzu werden die erste Fertigungsstufe des Auftrags sowie die Periode, zu der die Bearbeitung starten darf, im Freigabetermin hinterlegt. Mittels einer Summe wird bis zu dem jeweilig angegebenen Zeitpunkt minus eins iteriert. Alle x-Variablen des zugehörigen Auftrags, welche vor dem angegebenen Freigabetermin liegen, sind gleich null und können ab diesem Zeitpunkt eins werden. Das bedeutet, dass der Auftrag ab diesem Zeitpunkt starten kann.

Wichtig ist, die Binärvariablen als Nebenbedingung zu definieren. Wie bereits weiter oben beschrieben wurde, können diese Variablen nur den Wert eins oder null annehmen, was durch die zugehörigen Nebenbedingungen (4.23), (4.24), (4.25), (4.26) und (4.27) definiert wird.

$$x_{ij,et} \in \{0,1\}, \forall\, j, i, e, t \tag{4.23}$$

$$z_{ij,t} \in \{0,1\}, \forall\, j, i, t \tag{4.24}$$

$$a_{j,e} \in \{0,1\}, \forall\, j, e \tag{4.25}$$

$$y_{ilj} \in \{0,1\}, \forall\, j, i, l \tag{4.26}$$

$$\beta_{jk,e} \in \{0,1\}, \forall\, j, k, e \tag{4.27}$$

Abschließend sind noch die zu minimierenden Zielfunktionsparameter wie Verspätung (4.28) und Durchlaufzeit (4.29) in Form von Nebenbedingungen und die Zielfunktion (4.30) selbst zu formulieren. Neben neuer Nebenbedingungen werden in diesem Zusammenhang zwei neue Indizes eingeführt. Der Index für die erste Fertigungsstufe (δ) innerhalb der technologischen Reihenfolge und die letzte Fertigungsstufe (ω) innerhalb der technologischen Reihenfolge.

$$\sum_{t=1}^{T} t \cdot z_{wj,t} + p_{wj} - d_j \leq T_j, \forall\, j \tag{4.28}$$

$$F_j = \sum_{t=1}^{T} t \cdot z_{wj,t} + p_{wj} - \sum_{t=1}^{T} t \cdot z_{\delta j}\,, \forall\, j \tag{4.29}$$

(4.28) beschreibt die Verspätung T_j des Auftrags j. Mittels einer Iteration über die Zeit t wird festgestellt, zu welchem Zeitpunkt t die Bearbeitung von Auftrag j in der letzten Fertigungsstufe ω beginnt. Hierzu wird die Entscheidungsvariable z verwendet, die mit dem Wert des Zeitpunktes t zu multiplizieren ist. Da es sich bei z lediglich um eine Binärvariable handelt, ist eine Multiplikation mit dem entsprechenden Wert notwendig. Ist der Zeitpunkt festgelegt, wird dieser mit der Bearbeitungszeit $p_{\omega j}$ von Auftrag j der letzten Fertigungsstufe ω addiert, um somit feststellen zu können, wann die Gesamtbearbeitung von Auftrag j beendet ist. Um hieraus eine Aussage über eine mögliche Verspätung treffen zu können, wird eine Differenz der Summe der beendeten Bearbeitung von Auftrag j und des Fälligkeitstermins d_j von Auftrag j gebildet. Ist das Ergebnis dieser Subtraktion negativ, bedeutet dies, dass der Fälligkeitstermin eingehalten wurde und infolgedessen keine Verspätung vorliegt. Ist das Ergebnis jedoch positiv, ist eine Überschreitung des Fälligkeitstermins die Folge, womit eine Verspätung vorliegen würde. Aufgrund der größer/gleich-Beziehung zwischen Ergebnis und Verspätung T_j, nimmt T_j bei einem negativen Ergebnis den Wert null an und bei einem positiven Ergebnis wird T_j gleich diesem Ergebnis gesetzt.

Mit Hilfe von Nebenbedingung (4.29) wird die Durchlaufzeit F_j des Auftrags j beschrieben. Wie in Nebenbedingung (4.28) wird rechnerisch bestimmt, wann die Bearbeitung von Auftrag j beendet ist. Im Anschluss daran wird auf dieselbe Art und Weise bestimmt, wann die Bearbeitung von Auftrag j begonnen hat. Hierzu wird erneut über die Zeit t iteriert, um den Zeitpunkt t festzustellen, zu dem die Bearbeitung von Auftrag j auf der ersten Fertigungsstufe δ, der hinterlegten technologischen Reihenfolge, begonnen hat. Um diesen Zeitpunkt t für die weitere Rechnung nutzen zu können, wird dieser mit dem Wert des Zeitpunktes t multipliziert. Um im Folgenden die exakte Durchlaufzeit F_j zu erhalten, wird die Gesamtbearbeitungszeit minus den Bearbeitungsbeginn gerechnet. Durch dieses Vorgehen wird gewährleistet, dass sämtliche Transport-, Rüst-, Bearbeitungs- und Liegezeiten von Auftrag j berücksichtigt werden, welche im Zuge der Durchlaufzeitminimierung benötigt werden.

Für die bereits angesprochene Zielfunktion (4.30) sind noch zusätzliche Parameter und Teilmengen zu definieren. Die zusätzlichen Inputparameter sind Gewichtungsparameter, welche es dem Planer ermöglichen auftragsspezifische Gewichtungen ($w_j/w´_j$) vorzunehmen. Je nachdem ob ein Auftrag eine minimale/keine Verspätung oder eine geringe Durchlaufzeit haben soll. Grundsätzlich gehen diese beiden Ziele allerdings miteinander einher. So sind die Gewichtungen für z.B. die Priorisierung von Eilaufträgen oder Instandsetzungen zu nutzen. Zudem gibt es noch eine Gewichtung für die Perioden, welche als Nachtperioden bezeichnet werden und dem Werker als Überstunden zur Verfügung stehen. Die Nachtperioden sind als Teilmenge der Gesamtzeit ($Nacht \subseteq T$) definiert und die Gewichtung für die Nachtperioden als c. Das c ist hierbei individuell für die einzelnen Perioden zu wählen. So ist es möglich, die gesamte Nacht mit einer Gewichtung zu belegen oder einzelne Intervalle mit unterschiedlichen Gewichtungsintensitäten zu definieren. So wäre es bspw. möglich, sich noch sehr nah an den eigentlichen Arbeitszeiten befindende Perioden mit einer geringen Gewichtung und die Perioden, welche sich mitten in der Nacht befinden, mit einer entsprechend höheren Gewichtung zu belegen.

$$min \sum_{t \in Nacht} \sum_{e=1}^{M} \sum_{i=1}^{O} \sum_{j=1}^{N} c \cdot x_{ij,et} + \sum_{j=1}^{N} w_j \cdot T_j + \sum_{j=1}^{N} w'_j \cdot F_j \tag{4.30}$$

Mit Hilfe dieser minimierenden Zielfunktion (4.30) kann verspätungsminimierend, durchlaufzeitenminimierend oder in der Gesamtheit minimierend agiert werden, je nach den Bedürfnissen des Unternehmens.

4.2 Umsetzung des Optimierungsmodells in Form eines anwenderfreundlichen IT-Tools

In diesem Unterkapitel wird das in Arbeitspaket 2.2 entwickelte IT-Tool beschrieben. Dabei erfolgt eine Erläuterung der Bestandteile bzw. Module sowie eine kurze Erläuterung der Anwendung des IT-Tools.

Das IT-Tool setzt sich aus drei grundlegenden Modulen zusammen. Das Erste dieser Module bietet dem Anwender die Möglichkeit, den aktuellen Auftragseingang einzuspielen. Darüber hinaus existiert ein Konfigurations-Cockpit, welches der Parametrierung des Optimierungsmodells dient sowie ein letztes Modul zum Ergebnisexport. Die Verknüpfung dieser drei Module erfolgt über eine übergreifende Anwender- bzw. Anwendungsoberfläche. Diese ist in der folgenden Abbildung x.x dargestellt.

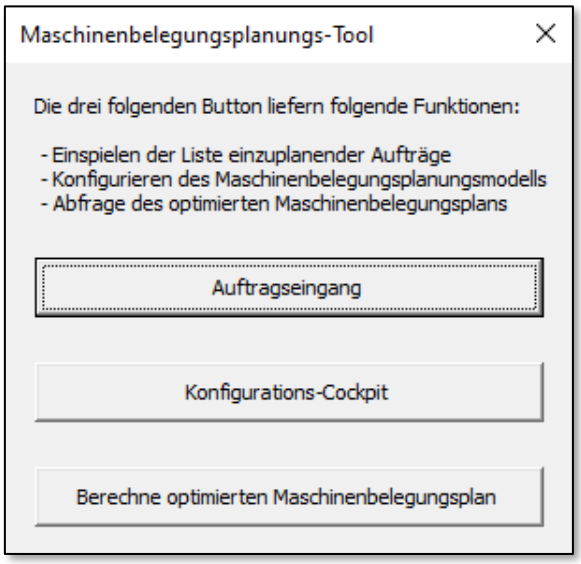

Abbildung 4.2: Modulübersicht

Im ersten Schritt der Anwendung des Maschinenbelegungsplanungs-Tools ist über das Auftragseingangsmodul eine aktuelle Auftragseingangsliste einzuspielen. Dabei ist neben der Auftragsnummer, dem Auftragseingangsdatum sowie dem gewünschten Fertigstellungsdatum die Auftragszusammensetzung zu definieren. Dabei sind die angebotenen Produkte hinsichtlich der angefragten Quantität zu definieren. Die folgende Abbildung 4.3 zeigt eine beispielhafte Darstellung des Auftragseingangsmoduls.

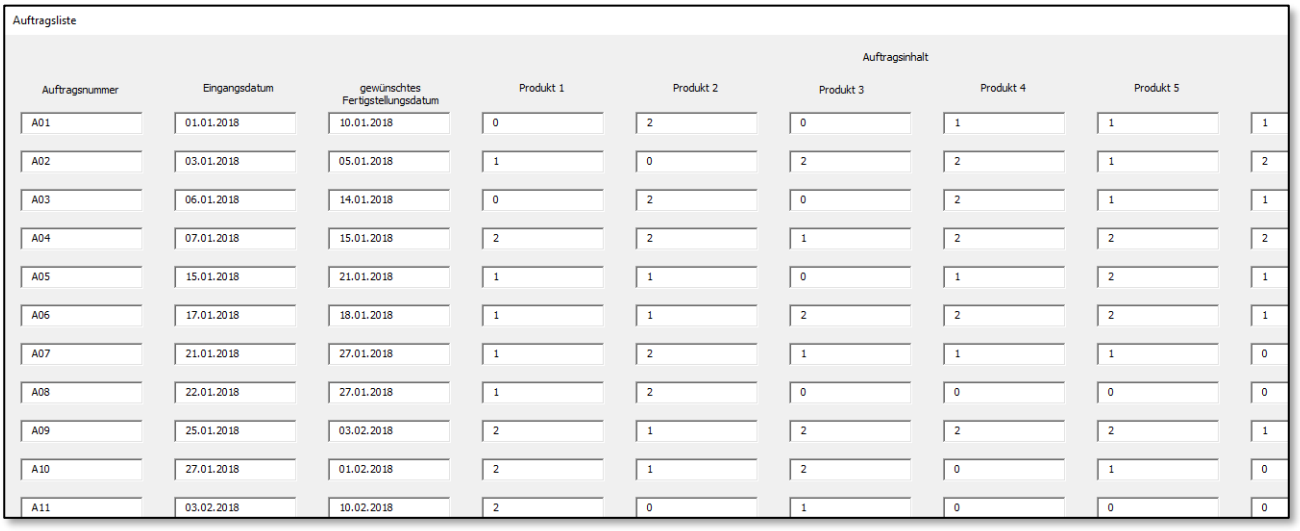

Abbildung 4.3: Darstellung des Auftragseingangsmoduls

Aufbauend auf der über das Auftragseingangsmodul integrierten Datenbasis ist im Weiteren die Parametrisierung des hinterlegten Optimierungsmodells mittels dem zweiten Modul mit der Bezeichnung Konfigurations-Cockpit erforderlich. Dabei sind zum einen Informationen hinsichtlich der im Produktionssystem zu fertigenden Produkte zu hinterlegen. Zum anderen sind die im betrachteten

Produktionssystem existenten Ressourcen bzw. Maschinen zu hinterlegen. Ebenfalls sind die auf diesen Ressourcen durchführbaren Prozesse zu definieren. Basierend auf diesen Daten sind anschließend Zuordnungsinformationen zu hinterlegen. Dabei sind zum einen die Arbeitsvorgangsfolgen, d. h. die produktbezogenen Prozessreihenfolgen, zu hinterlegen. Zum anderen sind die bestehenden Prozesse auf die hinterlegten Ressourcen zu beziehen. Zum Abschluss der Parametrisierung des Optimierungsmodells ist zwangsläufig eine Soll-Datenbasis zu hinterlegen, die sowohl Soll-Rüst- als auch Soll-Zykluszeiten umfasst. Ergänzend zur Integration der Soll-Datenbasis liefert das Tool die Möglichkeit einer Ist-Datenbasis. Im Falle der Implementierung dieser erfolgt die Substitution der Soll-Zeiten durch aus der Ist-Datenbasis ermittelte Datensätze. Die folgende Abbildung 4.4 zeigt das Konfigurations-Cockpit sowie die Eingabemaske der Auftragsvorgangsfolgen zur Verdeutlichung der Eingabemöglichkeiten über das Konfigurations-Cockpit.

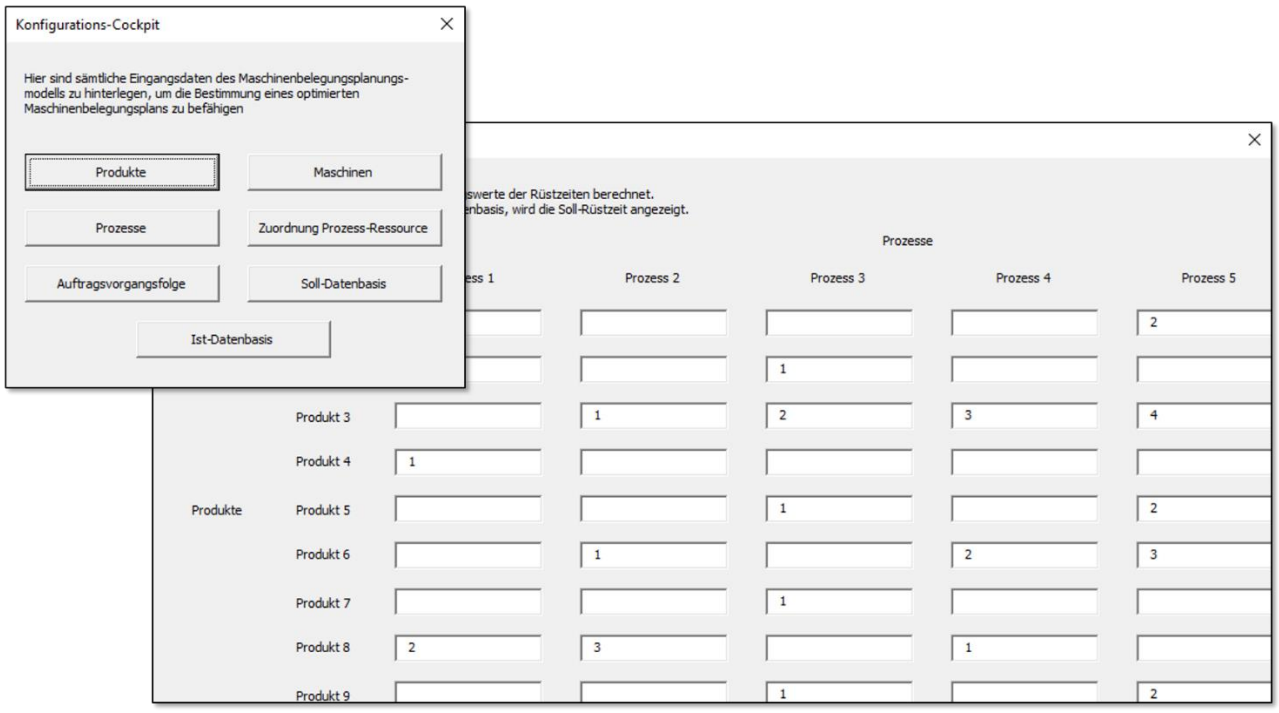

Abbildung **4.4**: Konfigurations-Cockpit und Auftragsvorgangsfolge-Eingabemaske

Nach Abschluss der Parametrierung des Optimierungsmodells ist durch die Auswahl der dritten Schaltfläche „Berechne optimierten Maschinenbelegungsplan“ die Lösung des aufgestellten Optimierungsmodells zu initiieren. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt im Anschluss nach Lösung des Modells im Rahmen eines abschließenden Dialogfelds.

5 Validierung des mathematischen Optimierungsmodells

In diesem Kapitel werden die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Validierung des erstellten Optimierungsmodells kurz zusammengefasst. Die Validierung erfolgt zweischrittig. Im ersten Validierungsschritt wird die mathematische Korrektheit des Optimierungsmodells geprüft. Hierbei ist eine sehr geringe Menge an Input zu wählen, damit kurze Berechnungsphasen erzielt und somit die Funktionalität zielführender validiert werden kann. Im zweiten Schritt wird die Güte des entwickelten Optimierungsmodells gegenüber herkömmlichen Prioritätsregeln, wie der Regel „Earliest-Due-Date“, bestätigt.

In den Ergebnissen des ersten Validierungsschritts zeigt sich, dass das entwickelte Optimierungsmodell keine Konflikte unter den aufgestellten Nebenbedingungen aufweist. Somit kann das Modell in seiner Funktion als voll funktionsfähig angesehen werden. Anmerkungen, im Sinne von Verbesserungen, lassen sich nur basierend auf einer Funktion, welche die Validierung der Nebenbedingung fünf zufolge hat, machen. Festzustellen ist hier, dass eine doppelte Zuordnung desselben Auftrags in der β-Variable nicht zulässig und somit auch nicht zielführend ist. Daher ist eine Anpassung der zu betrachtenden Aufträge in dieser Nebenbedingung angebracht. Aufbauend auf diesem Gedanken hat sich die folgende Auftragseinschränkung für diese Nebenbedingung ergeben (siehe Formel (5.1)).

$$\forall e, j, k \neq j: a_{j\,e} + a_{k\,e} - 1 \leq \beta_{jk,e} + \beta_{kj,e} \tag{5.1}$$

Die angesprochene Einschränkung der Aufträge bezieht sich auf die Ungleichheit von Auftrag j und Auftrag k, welche gefordert wird.

Im zweiten Validierungsschritt ergibt sich eine Kombination als die „optimale“ und gleichzeitig einzige Lösung des dargestellten Szenarios. Hinsichtlich dieser Kombination ist das eigens erstellte Modell unter der gegebenen Datengrundlage gegenüber der EDD-Prioritätsregel als vorteilhaft zu bewerten. Es optimiert die Maschinenbelegungsplanung so, dass alle Fälligkeitstermine eingehalten werden und infolgedessen keine Verspätungen eintreten.

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Entsprechend des Projektantrags wurde der untenstehende Plan (fett gedruckt) zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft aufgestellt. Die jeweils durchgeführten Maßnahmen werden darunter kurz erläutert, bevor ein abschließendes Fazit gezogen wird.

- **Projektinformation im Internet über den aktuellen Stand der Arbeiten**
  Aktuelle Projektinformationen über den aktuellen Stand der Arbeiten wurden kontinuierlich auf der Institutseigenen Internetseite (www.IPS.DO) veröffentlicht.

- **Sitzung des Projektbegleitenden Ausschusses**
  Insgesamt wurden drei Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses ausgerichtet:
  1. PA: 21.02.2018
  2. PA: 22.11.2018
  3. PA: 28.06.2019

- **Veröffentlichungen in Fachzeitschriften**
  Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die entwickelten Ergebnisse in einer Veröffentlichung publiziert. Als Publikationsmedium wurde, aufgrund der hohen Praxisrelevanz, die Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ausgewählt:

  1. Wolf, Patrick; Deuse, Jochen; Richter, Ralph (2019): Einfluss und Ursachen von Variabilität in der kundenauftragsspezifischen Produktion. Definition und Integration von quantitativen Kriterien für die variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 114 (11), S. 730–733.

- **Projekt-, Bachelor- und Masterarbeiten zum Themenfeld des Forschungsvorhabens**
  Insgesamt wurden zum Themenfeld des Forschungsvorhabens acht studentische Arbeiten ausgeschrieben und bearbeitet. Auf diese Weise wurde eine dauerhafte Einbindung des Forschungsthemas in die universitäre Lehre und Ausbildung der Studierenden sichergestellt.

  Masterarbeiten

  1. Quantitative Abbildung der Variabilitätskriterien zur analytischen Beschreibung der Wirkzusammenhänge für eine variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung
  2. Variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung als kombinatorisches Optimierungsproblem einer kundenauftragsspezifischen Produktion am Beispiel der Hengst SE

3. Entwicklung eines quantitativen, mathematischen Optimierungsproblems in Hinblick auf die variabilitätsbasierte Maschinenbelegungsplanung für die kundenauftragsspezifische Produktion in KMU
4. Prozessoptimierung am Beispiel einer Kaschieranlage in der Wellpapierproduktion unter Berücksichtigung von wertschöpfender und nicht-wertschöpfender Variabilität

Bachelorarbeiten

1. Klassifikation und Operationalisierung von Variabilität in der kundenspezifischen Auftragsfertigung – Konzeption einer Methodik zur Beherrschung von Variabilität durch Produktionsplanung in KMU am Beispiel W&K Metallverarbeitung GmbH
2. Entwicklung eines variabilitätsfokussierten Anforderungskataloges für die Maschinenbelegungsplanung kundenauftragsspezifischer produzierender kleiner und mittelständischer Unternehmen
3. Quantitative Analyse der wertschöpfenden Variabilität und deren Wirkzusammenhängen in der kundenspezifischen Auftragsfertigung

Projektarbeiten

1. Erstellung eines Anforderungskatalogs zur Auswahl von Softwaresystemen im Fokus der Variabilität in Produktionssystemen

- **Ergebnispräsentation auf Wissensplattformen**

  Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden regelmäßig im Rahmen von Erfahrungsaustauschen mit interessierten Unternehmen geteilt und diskutiert (z. B. NIRO e.V.). Auf diese Weise wurde ein Austausch und Ergebnistransfer in die (regionale) Wirtschaft sichergestellt.

- **Zwischen- und Abschlussberichte**

  Während der Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurden die Ergebnisse in zwei Zwischenberichten und einem Abschlussbericht veröffentlicht:

  - Zwischenbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 19683 N vom 09.04.2018 für den Berichtszeitraum vom 01.09.2017 bis 31.12.2017
  - Zwischenbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 19683 N vom 15.04.2019 für den Berichtszeitraum vom 01.01.2018 bis 31.12.2018
  - Abschlussbericht zum IGF-Vorhaben Nr. 19683 N

6.1 Bewertung des Ergebnistransfers in die Wirtschaft

Der in Kapitel 6 aufgeführte Ergebnistransfers in die Wirtschaft zeigt auf, dass der angestrebte Transfer in die Wirtschaft nahezu vollständig realisiert werden konnte. Die Ergebnisse wurden interessierten Wirtschaftsunternehmen bereitgestellt und ebenfalls in die universitäre Lehre übernommen. Die Anfertigung einer Dissertation, im Rahmen des Forschungsvorhabens wird weiterhin angestrebt und die Maschinenbelegungsplanung als Element der Produktionsplanung stellt ein Forschungsfeld am Institut für Produktionssysteme dar. Das angestrebte Transferkonzept wurde somit erfolgreich umgesetzt.

7 Literatur

1. Acker IJ (2011) Methoden zur mehrstufigen Ablaufplanung in der Halbleiterindustrie. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
2. Bandyopadhyay S, Saha S (2013) Unsupervised Classification: Similarity Measures, Classical and Metaheuristic Approaches, and Applications. Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Behnke J, Behnke N (2006) Grundlagen der statistischen Datenanalyse: Eine Einführung für Politikwissenschaftler. VS Verlag für Sozialwissenschaften | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
4. Blazewicz J, Ecker KH, Pesch E, Schmidt G, Weglarz J (2007) Handbook on Scheduling: From Theory to Applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
5. Brandimarte P (1993) Routing and scheduling in a flexible job shop by tabu search. Ann Oper Res 41:157–183.
6. Brucker P (2007) Scheduling Algorithms. Springer, Dordrecht.
7. Cleff T (2015) Deskriptive Statistik und Explorative Datenanalyse: Eine computergestützte Einführung mit Excel, SPSS und STATA. Gabler Verlag, Wiesbaden.
8. Corsten D, Gabriel C (2004) Supply Chain Management erfolgreich umsetzen: Grundlagen, Realisierung und Fallstudien. Springer, Berlin, Heidelberg.
9. Cramer E, Kamps U (2020) Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Eine Einführung für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. Springer Berlin; Springer Spektrum, Berlin.
10. Dombrowski U, Mielke T (Hrsg) (2015) Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen. Springer Vieweg, Berlin.
11. Framinan JM, Leisten R, Ruiz García R (2014) Manufacturing Scheduling Systems: An Integrated View on Models, Methods and Tools. Springer London, London, s.l.
12. Graefe G (1970) Sachs, L.: Statistische Methoden, ein Soforthelfer. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York 1970. 103 Seiten, mit 5 Abbildungen, 25 Tabellen und einer Klapptafel. Preis gebunden DM 8,80, US-$ 2,50. Starch/Stärke 22:448.
13. Graham RL, Lawler EL, Lenstra JK, Kan AHGR (1979) Optimization and Approximation in Deterministic Sequencing and Scheduling: a Survey. In: Hammer PL, Johnson EL, Korte BH

(Hrsg) Discrete optimization: Proceedings of the Advanced Research Institute on Discrete Optimization and Systems Applications of the Systems Science Panel of NATO and of the Discrete Optimization Symposium, co-sponsored by IBM Canada and SIAM, Banff, Alta. and Vancouver, B.C., Canada, August 1977. North-Holland Pub. Co.; Sole distributors for the U.S.A. and Canada, Elsevier North-Holland, Amsterdam, New York, New York, S 287–326.

14. Grimm A (2011) Prozessorientierter Umgang mit Anforderungen für die kundenspezifische Auftragsabwicklung. Gabler Verlag, Wiesbaden.
15. Günthner WA, Boppert J (Hrsg) (2013) Lean Logistics: Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.
16. Herrmann J (2010) Supply Chain Scheduling. Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, Wiesbaden.
17. Huber W (2016) Industrie 4.0 in der Automobilproduktion: Ein Praxisbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden.
18. Jaehn F, Pesch E (2014) Ablaufplanung: Einführung in Scheduling. Springer Gabler, Berlin.
19. Jonas C, Reinhart G (Hrsg) (2000) Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Utz, München.
20. Kersten W, Wittmann J (2013) Kompetenz, Interdisziplinarität und Komplexität in der Betriebswirtschaftslehre. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
21. Kessler RW (2006) Prozessanalytik: Strategien und Fallbeispiele aus der industriellen Praxis. Wiley-VCH, Weinheim.
22. Klauke S (2002) Methoden und Datenmodell der "Offenen Virtuellen Fabrik" zur Optimierung simultaner Produktionsprozesse. VDI-Verl., Düssdeldorf.
23. Koether R, Meier K-J (2017) Lean Production für die variantenreiche Einzelfertigung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
24. Lendzian H (2014) Einführung von Standardisierter Arbeit in der Einzel- und Kleinserienproduktion. Shaker, Aachen.
25. Lorentzen K (2012) Systematische Variabilitätsreduktion zur kontinuierlichen Verbesserung von Fließlinien. Shaker, Aachen.
26. Lorentzen K, Maschek T, Richter R, Deuse J (2011) Entwicklung einer Variabilitätstypologie. ZWF 106:214–218.

27. Lotter B, Deuse J, Lotter E (2016) Die Primäre Produktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

28. Maschek T, Heuser C, Hasselmann V-R, Deuse J, Willats P (2014a) Variabilitätsbasierte Klassifizierung von Produktionssystemen. ZWF 109:591–594.

29. Maschek T, Heuser C, Hasselmann V-R, Deuse J, Willats P (2014b) Variabilitätsbasierte Klassifizierung von Produktionssystemen: Grundlage für passgenaue Gestaltungs- und Managementkonzepte. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 109:591–594.

30. Oliver Som, Christoph Zanker, Eva Kirner (2011) 2011_1_207.indd. Betriebspraxis & Forschung 2011.

31. Ōno T (1988) Toyota production system: Beyond large-scale production. Productivity Press, Cambridge, Mass.

32. Pinedo ML (2005) Planning and Scheduling in Manufacturing and Services. Springer Science+Business Media Inc, New York, NY.

33. Pinedo ML (2016) Scheduling. Springer International Publishing, Cham.

34. Schenk M (Hrsg) (2015) Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

35. Schuh G (2007) Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte. Springer, Dordrecht.

36. Schulz MD (2014) Der Produktentstehungsprozess in der Automobilindustrie. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

37. Spear S, Bowen HK (1999) Decoding the DNA of the Toyota Production System.

38. Wiegand (2014) Quantifizierung von Variabilität durch Big Data Technologien. Productivity Management.

39. Womack JP, Jones DT, Roos D (1992) Die zweite Revolution in der Autoindustrie: Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology. Campus-Verl., Frankfurt/Main.

40. Zimmermann H-J (2008) Operations Research: Methoden und Modelle ; für Wirtschaftsingenieure, Betriebswirte, Informatiker. Vieweg, Wiesbaden.