



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Diplomarbeit

Planungsmethoden der Produktion in der metallverarbeitenden Industrie im Kontext der Digitalisierung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c.

Wilfried Sihh

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung)

Dipl.-Ing. Matthias Karner

(Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Ing. Thomas Mastalir BSc

Mat.Nr.: 01328823 (066 482)

2135 Kottlingneusiedl

Kottlingneusiedl, im Februar 2019

Thomas Mastalir



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe. Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Kottingneusiedl, im Februar 2019

Thomas Mastalir

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen, die mich im Laufe meines Studiums begleitet und unterstützt haben, herzlich bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, vor allem meinen Eltern, die mir mein Studium ermöglicht haben und mir stets mit Rat und Tat zur Seite standen. Zudem bedanke ich mich bei meiner Schwester für die hilfreichen Anregungen und die konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Weiters möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Matthias Karner für seine ausgezeichnete Betreuung und gute Abstimmung zu jedem Zeitpunkt der Diplomarbeitserstellung danken.

Kurzfassung

Die Produktionsplanung und -steuerung ist ein zentraler Bestandteil eines jeden Unternehmens. Im Lauf der Zeit haben sich verschiedene Planungsmethoden etabliert und stetig weiterentwickelt. Die industriellen Revolutionen haben maßgeblich dazu beigetragen.

Eine systematische Literaturanalyse im Bereich der metallverarbeitenden Industrie zeigt, dass die Grenzen zwischen Grob- und Feinplanung zusehends verschwimmen. Das bevorzugte Flussprinzip ist die Chargenfertigung. Die Produktionssysteme sind größtenteils auf einen kontinuierlichen Fluss ausgelegt. Die Planungserstellung ist ein äußerst komplexer Prozess, in dem eine Vielzahl an Kriterien berücksichtigt werden müssen. Der Fokus liegt dabei insbesondere auf den Faktoren Kosten, Durchlaufzeit und Liefertreue.

Die moderne Informationstechnik fließt zunehmend in den Planungsprozess mit ein. Die Einführung und die Entwicklung von künstlicher Intelligenz nimmt in der aktuellen Literatur eine besondere Stellung ein. Die weitgehende Entkoppelung menschlicher Tätigkeiten, hin zu einer automatisierten Vorgehensweise, ist ein zentrales Thema zukünftiger Weiterentwicklungen.

Eine Fallstudie am Beispiel einer variantenreichen Fertigung stellt verschiedene Prioritätsregeln gegenüber. Die Aufgabenstellung umfasst ein Anlagenbelegungsproblem oder auch Job-Shop-Problem genannt. Keine der angewandten elementaren Planungsvorschriften liefert durchgängig brauchbare Resultate.

Der erstellte Programmcode zur Bearbeitung der Problemstellung ermöglicht die Implementierung neuer Lösungsmethoden. Der modulare Aufbau ermöglicht eine einfache Erweiterung der Aufgabenstellung. Infolgedessen kann die Funktion zur Testung von hochkomplexen Algorithmen verwendet werden.

Die Behandlung der Fallstudie verdeutlicht das hohe Potential von Optimierungsalgorithmen. Durch deren Einsatz könnte der Personalaufwand im Planungsprozess erheblich reduziert bzw. die Planer essentiell in ihrer Entscheidungsfindung entlastet werden.

Abstract

Production planning and control is an essential part of every company. Over time, various planning methods have been established and continuously developed. The industrial revolutions have contributed significantly to this.

A systematic review of the literature in the field of the metalworking industry shows that the boundaries between long and short term planning are becoming appreciably blurred. The preferred flow principle is the batch production. The production systems are mainly designed for a continuous flow. Planning is an extremely complex process in which a variety of criteria has to be considered. The essential factors are costs, cycle time and on-time delivery.

Modern information technology is increasingly being included in the planning process. The introduction and development of artificial intelligence occupies a special position in the current literature. The decoupling of human activities, towards an automated procedure, to a large extent is a key issue for future developments.

A case study of a multi-variant production compares different priority rules. The task comprises a so-called job-shop problem. None of the applied elementary planning rules provides consistently useful results.

The established program code enables the implementation of novel planning methods. The modular design of the code allows an easy expansion of the task. As a result, the function can be used to test highly complex algorithms.

The treatment of the case study demonstrates the high potential of optimization algorithms. Their use could significantly reduce personnel deployment in the planning process or the planners could be essentially relieved in their decision-making.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld	1
1.2 Problemstellung und -definition	1
1.3 Verwendete Methodik und Vorgehensweise	2
1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Grundlagen Forschungsfeld - Produktionsplanung und -steuerung (PPS)	5
2.1.1 Aachener PPS-Modell	5
2.2 Historische Entwicklungen der Produktionsplanung	8
3 Literaturanalyse	13
3.1 Methodenbeschreibung der Literaturrecherche	13
3.1.1 Formulierung der Forschungsfrage	14
3.1.2 Festlegung der Suchparameter	14
3.1.3 Entwicklung einer Suchstrategie	17
3.1.4 Artikelauswahl	17
3.1.5 Datenextraktion	18
3.1.5.1 Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung	19
3.1.5.2 Grobplanung	20
3.1.5.3 Feinplanung	21
3.2 Existierende Lösungsansätze für die Problemstellung	23
3.2.1 Erscheinungsdatum	27
3.2.2 Differenzierung zwischen den Planungsarten	27
3.2.3 Charakteristiken der Grobplanung	30
3.2.4 Besonderheiten der Feinplanung	32

3.2.5	Weitere gewonnene Erkenntnisse	35
3.3	Sonstige relevante Arbeiten zur Problemstellung	36
3.4	Zusammenfassung	37
4	Fallstudie	39
4.1	Beschreibung der Problemstellung	39
4.1.1	Modellierung eines Produktionssystems	40
4.1.1.1	Anlagenbelegung	41
4.1.1.2	Bearbeitungszeiten	42
4.1.2	Rüstzeiten	44
4.1.3	Zustand des Produktionssystems	44
4.2	Methodenbeschreibung	48
4.2.1	Job Shop-Problem	48
4.2.2	ausgewählte Prioritätsregeln	50
4.3	Beschreibung der Methodenanwendung	52
4.3.1	Implementierung der Planungsregeln	53
4.3.2	Die Produktionssimulation	54
4.4	Resultate der angewendeten Methode	60
4.5	Resultate bezüglich der Forschungsfrage	69
4.5.1	Gesamtdurchlaufzeit	69
4.5.2	Wartezeit	71
4.5.3	Liefertreue	72
4.5.4	Abweichung des Liefertermins	73
4.5.5	Bestand vor den Anlagen	74
4.5.6	Zusammenfassung	76
5	Diskussion und Ausblick	79
5.1	Diskussion der Ergebnisse	79
5.2	Gegenüberstellung der Ergebnisse	80
5.3	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	80
5.4	Mögliche Schritte zur Weiterentwicklung	81

Literaturverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	91
Tabellenverzeichnis	93
Abkürzungsverzeichnis	95
Legende	97
A Anhang	99
A.1 Programmcode	99
A.1.1 Erzeugung eines fiktiven Fallbeispiels	99
A.1.1.1 Erstellung einer zufälligen Ablaufmatrix	99
A.1.1.2 Erstellung zweier Zeitmatrizen in verschiedenen Ausführungen	99
A.1.1.3 Erzeugung einer Rüstmatrix	100
A.1.1.4 Zusammenstellung einer Auftragsliste	101
A.1.1.5 Berechnung der Gesamtoperationszeiten	102
A.1.1.6 Auflistung aller Prozesszeiten an den verschiedenen Anlagen	103
A.1.2 Konstruktion einer Produktionssimulation	104
A.1.2.1 Implementierung des Planungsprinzips FIFO	104
A.1.2.2 Verschiedene Sortierfunktionen	105
A.1.2.3 Funktion - Frozen Zone	106
A.1.2.4 Implementierung weiterer Planungsvorschriften	107
A.1.2.5 Aufteilungsfunktion	108
A.1.2.6 Zählerfunktion	110
A.1.2.7 Rüstfunktion	111
A.1.2.8 Reihenfolgenfunktionen	113
A.1.2.9 Funktion zur Ermittlung des Bestandes vor den Anlagen . .	115
A.1.2.10 Produktionssimulation - Funktion	116
A.1.3 Ausführung der Simulationsfunktion	122
A.2 Querschnitt der Produktion nach Beendigung der Simulation nach FIFO . .	124

1 Einleitung

1.1 Allgemeine Einleitung in das Themenfeld

Die Produktionsplanung hat sich im Laufe der Zeit kontinuierlich weiterentwickelt, um mit der stetig wachsenden Komplexität der industriellen Produktion Schritt zu halten. Unternehmen sind zusehends mit neuen Herausforderungen konfrontiert. Aktuell fließt das Thema Digitalisierung immer stärker auch in die Planungsparadigmen mit ein, das zu einem weiteren Entwicklungssprung führt.

1.2 Problemstellung und -definition

Ziel der wissenschaftlichen Arbeit ist eine systematische Literaturanalyse zur Abbildung der Produktionsplanung in der metallverarbeitenden Industrie. Eine selektive Zusammenfassung soll einen kurzen Überblick der historischen Entwicklung der Produktionsplanung aufzeigen. Der Fokus liegt auf den Entwicklungssprüngen, die durch die industriellen Revolutionen angestoßen wurden.

Darauf aufbauend gilt es den aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich der Produktionsgrob- und Feinplanung abzubilden. Dabei soll folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

„Wie erfolgt die Aufteilung in Grob- und Feinplanung der Produktion in der metallverarbeitenden Industrie?“

Von großem Interesse sind auch die verschiedenen Arten der Grob- und Feinplanung. Dabei sind vor allem Faktoren, wie der zeitliche Horizont, die Flussprinzipien, die Organisationsformen und die Kriterien für die Planungserstellung, ausschlaggebend.

Im Praxisteil der Arbeit sollen die gewonnenen Erkenntnisse der Literaturrecherche in ein Grobplanungskonzept am Beispiel der metallverarbeitenden Industrie entwickelt werden. Ziel des Praxisteils ist es, eine theoretische Fallstudie zur Produktionsgrobplanung zu erarbeiten. Auf deren Basis sollen unterschiedliche Planungsregeln veranschaulicht und gegenübergestellt werden. Der Schwerpunkt dieses Abschnittes liegt in der Konstruktion eines

geeigneten Simulationsablaufes und im Aufzeigen der Unterschiede zwischen den ausgewählten Prioritätsregeln.

Die daraus abgeleitete zweite Forschungsfrage lautet:

„Welche Auswirkungen hat die Anwendung grundlegender Planungsregeln in der variantenreichen Fertigung auf zeitbezogene Key Performance Indikatoren (KPI)?“

1.3 Verwendete Methodik und Vorgehensweise

Wie eingangs beschrieben, besteht diese Arbeit aus mehreren Teilen, mit dem Fokus in ihrer Gesamtheit einen Überblick über die Produktionsplanung und -steuerung zu liefern.

Den Grundstein bildet ein kurzer Literaturüberblick, dieser wird auf einer selektiven Basis erstellt. Darin soll die historische Entwicklung der Produktionsplanung der letzten 100 Jahre abgebildet werden.

Im zweiten Abschnitt des Theorieteils wird mittels einer systematischen Literaturanalyse die in der Wissenschaft verwendeten Grob- und Feinplanungsmethoden aufgezeigt. Durch die gezielte Auswahl geeigneter Kategorien wird ein ganzheitliches Bild über die Aufteilung und die verschiedenen Arten von Planungsmethoden in der Produktion dargestellt.

Den Abschluss des Literaturteils bildet eine detaillierte Aufarbeitung der Ergebnisse der kategorischen Literaturanalyse. Die gewonnen Daten werden mit statistischen und grafischen Methoden aufbereitet und anschaulich gezeigt.

Der Praxisteil bedient sich einer fiktiven Fallstudie. Diese wird anfangs durch verschiedene, mittels eines Zufallsgenerators erzeugter, Variablen erstellt. Es wird nicht nur die Auftragsliste auf diese Weise modelliert, sondern auch die Produktion selbst und deren Bestand innerhalb der Produktionslinie erfasst.

Um die Differenzen zwischen den vorab bestimmten Planungsprinzipien der Grobplanung aufzuzeigen, durchlaufen alle Aufträge der Fallstudie eine Simulation der kompletten Produktion. Zu diesem Zweck wird ein Programmcode angefertigt, der die Aufteilung der Aufträge auf die verschiedenen Anlagen übernimmt und zugleich in Echtzeit die

unterschiedlichen Operationen ausführt. Dieser Code ist in differente Funktionen unterteilt, wodurch sich mit abweichenden Kombinationen diverse heterogene Lösungen erarbeiten lassen.

Den Abschluss des praktischen Teils bildet die Aufarbeitung der gewonnenen Erkenntnisse sowie deren grafische Aufbereitung. Diesbezüglich werden verschiedene logistische Größen berechnet und miteinander verglichen. Daraus resultiert die Eignung der unterschiedlichen Planungsprinzipien für die vorhandene Problemstellung.

1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit

Die Teile der Aufgabenstellung werden in den nachfolgenden Kapiteln schrittweise behandelt. Zu Beginn wird im Kapitel 2 auf die Grundlagen und die historische Entwicklung der Produktionsplanung eingegangen. Nachfolgend wird im Kapitel 3 der restliche theoretische Abschnitt mit einer Literaturanalyse und deren Aufarbeitung behandelt.

Im Anschluss umfasst das Kapitel 4 die praktische Komponente dieser Arbeit. Den Abschluss bildet das Kapitel 5. In diesem finalen Passus wird die Publikation in ihrer Gesamtheit einer kritischen Betrachtung unterzogen und mögliche Weiterentwicklungen angeführt.

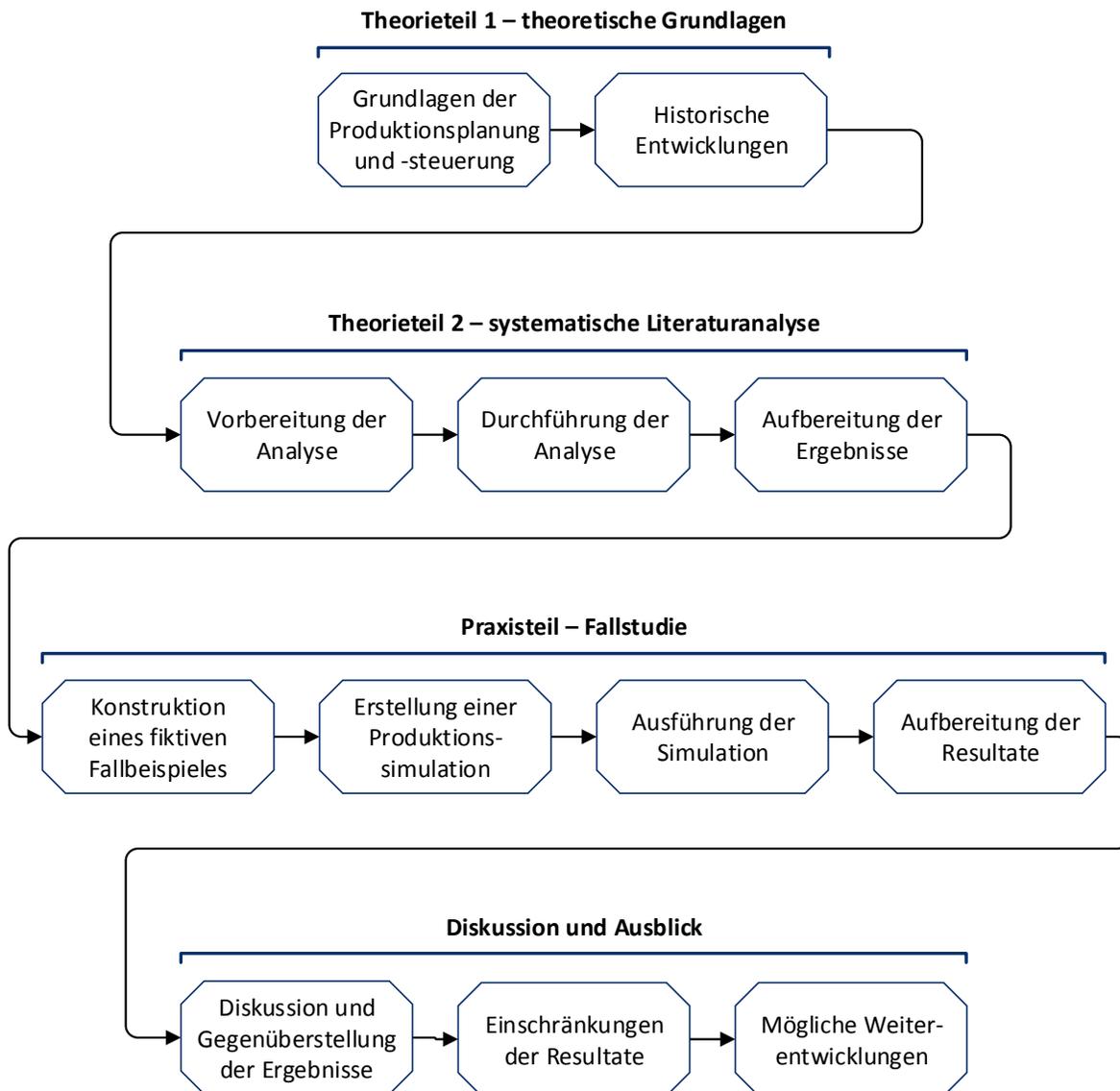


Abbildung 1.1: Struktur der Arbeit

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen Forschungsfeld - Produktionsplanung und -steuerung (PPS)¹

Das Themengebiet Produktionsplanung und -steuerung ist weitreichend. Es stellt einen der Schlüsselfaktoren für ein erfolgreiches Unternehmen dar. Die Aufgaben dieses Bereiches sind vielfältig. Der Kern der PPS umfasst die innerbetriebliche Planung. Mit der zunehmenden Internationalisierung, Dezentralisierung und Vernetzung steigt der Stellenwert der überbetrieblichen Kooperation. Infolgedessen sind die Organisation und Steuerung von Produktionsnetzwerken ein wichtiger Bestandteil der Produktionsplanung und -steuerung geworden.

Die Planung orientiert sich dementsprechend am gesamten Wertstrom eines Produktes. Die Wertschöpfung vom Lieferanten bis zum (End-)Kunden wird dabei betrachtet.

2.1.1 Aachener PPS-Modell²

Das Aachener PPS-Modell liefert eine theoretische Unterstützung für die betriebliche Praxis. Dessen Anwendung ist sowohl im praktischen als auch im wissenschaftlichen Einsatz durch eine präzise Fundierung möglich.

Das vorgestellte Modell entstand unter dem Gesichtspunkt, durch Abstraktion bzw. Vereinfachung alle relevanten Zusammenhänge in der PPS zu modellieren. Das Aachener Modell soll zur Unterstützung bei den nachfolgenden Herausforderungen der PPS dienen:³

- Selektion und Implementation von PPS-Systemen
- Reorganisation
- Konstruktion von PPS-Konzepten bzw. Systemen
- Prozessharmonisierung

¹vgl. Schuh (2012), Kap. 1

²vgl. Schuh (2012), Kap. 1, 2.1 und 4

³vgl. Schuh (2012), S.12

In einer projektbezogenen Darstellung behandelt das PPS-Modell die nachfolgenden Probleme:⁴

- Deskription der Teilaspekten der PPS
- Hilfestellung bei der Eruiierung von PPS-Zielausprägungen
- Assistenz bei der Benützung von Gestaltungs- bzw. Optimierungsmethoden

Das Aachener PPS-Modell besteht aus mehreren sogenannten „Referenzsichten“. Die Sichten stellen die Betrachtung der netzwerkweiten Produktionsplanung und -steuerung aus unterschiedlichen Blickwinkeln dar.

Die aktuelle Version des Modells umfasst folgende vier Referenzsichten:⁵

- Aufgabensicht
- Prozessarchitektursicht
- Prozesssicht
- Funktionssicht

Die Zusammenhänge zwischen den Sichten und deren Funktionen sind in Abbildung 2.1 dargestellt.

Die Referenzsicht der Aufgaben bildet die Basis des Modells. Sie beschreibt hierarchisch alle anfallenden Aufgaben und Teilaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung. Die anderen Sichten leiten sich von deren Zusammensetzung ab. Die Prozessschritte der einzelnen Aufgaben werden in der Prozessarchitektur-Referenzsicht verteilt. Die Grundlage für die Verteilung der Aufgaben bilden speziell entwickelte unterschiedliche Typen von Produktionsnetzwerken. Sie fungieren gewissermaßen als Vorlagen. In weiterer Folge bildet die Prozessebene den kompletten Auftragsabwicklungsprozess in zeitlogischer Abfolge ab.

Die einzelnen Sichten sind nur durch lose Zusammenhänge miteinander verknüpft. Ein effizientes anwendungsorientiertes Modell kann nur durch die gemeinsame Betrachtung der Referenzsichten und deren Anwendungsformen in Projekten erstellt werden.

⁴vgl. Schuh (2012), S.12

⁵vgl. Schuh (2012), S.18

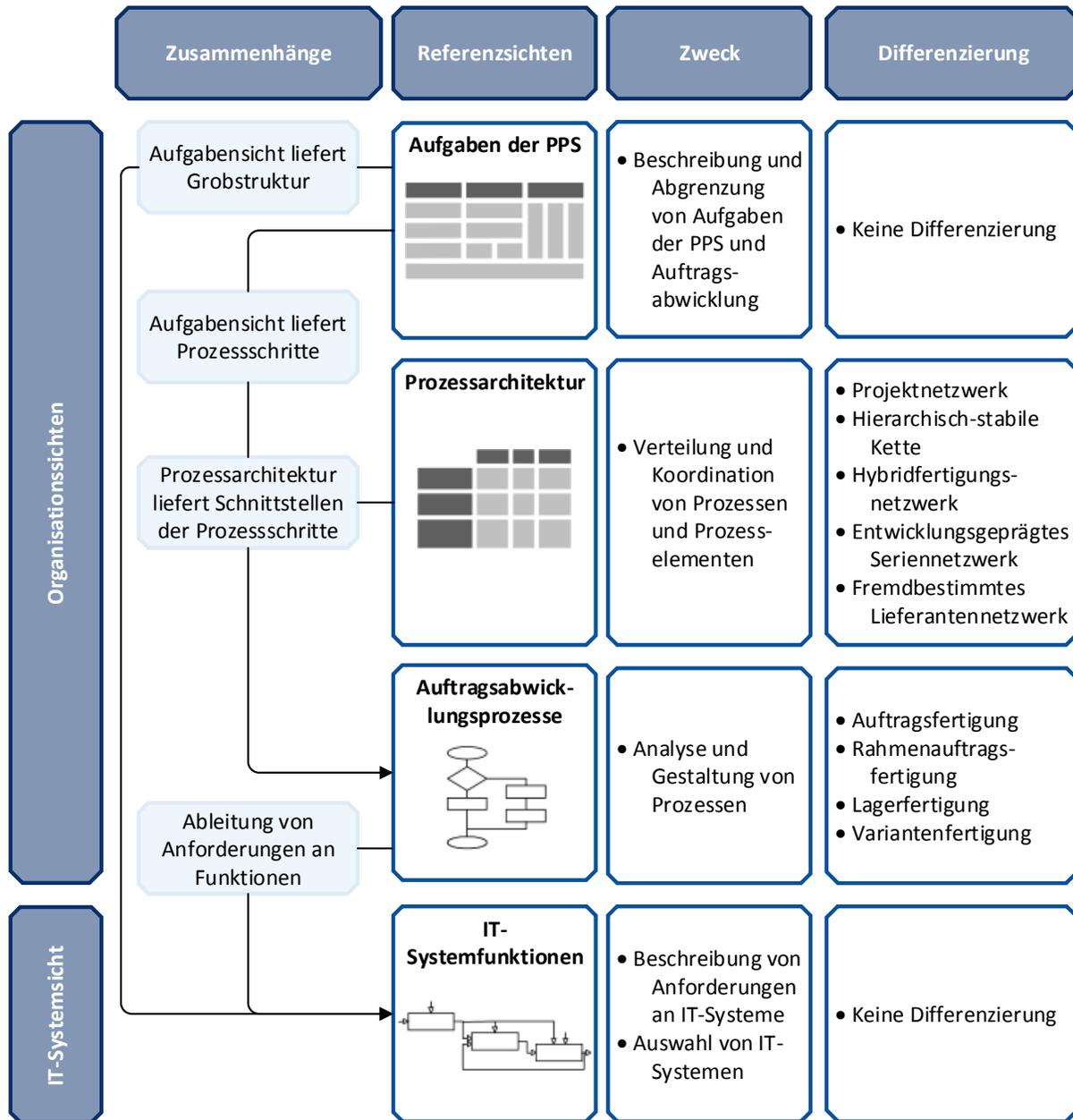


Abbildung 2.1: Referenzsichten des Aachener PPS-Modells ⁶

⁶vgl. Schuh (2012), S.19

2.2 Historische Entwicklungen der Produktionsplanung

Im Laufe der Zeit hat sich die Produktion stetig weiterentwickelt. In den letzten Jahrhunderten fanden diese Entwicklungen nicht sukzessive statt, sondern diskontinuierlich. Diese Entwicklungssprünge werden auch als industrielle Revolutionen bezeichnet. Bis dato haben sich die Produktionssysteme dreimal maßgeblich verändert.

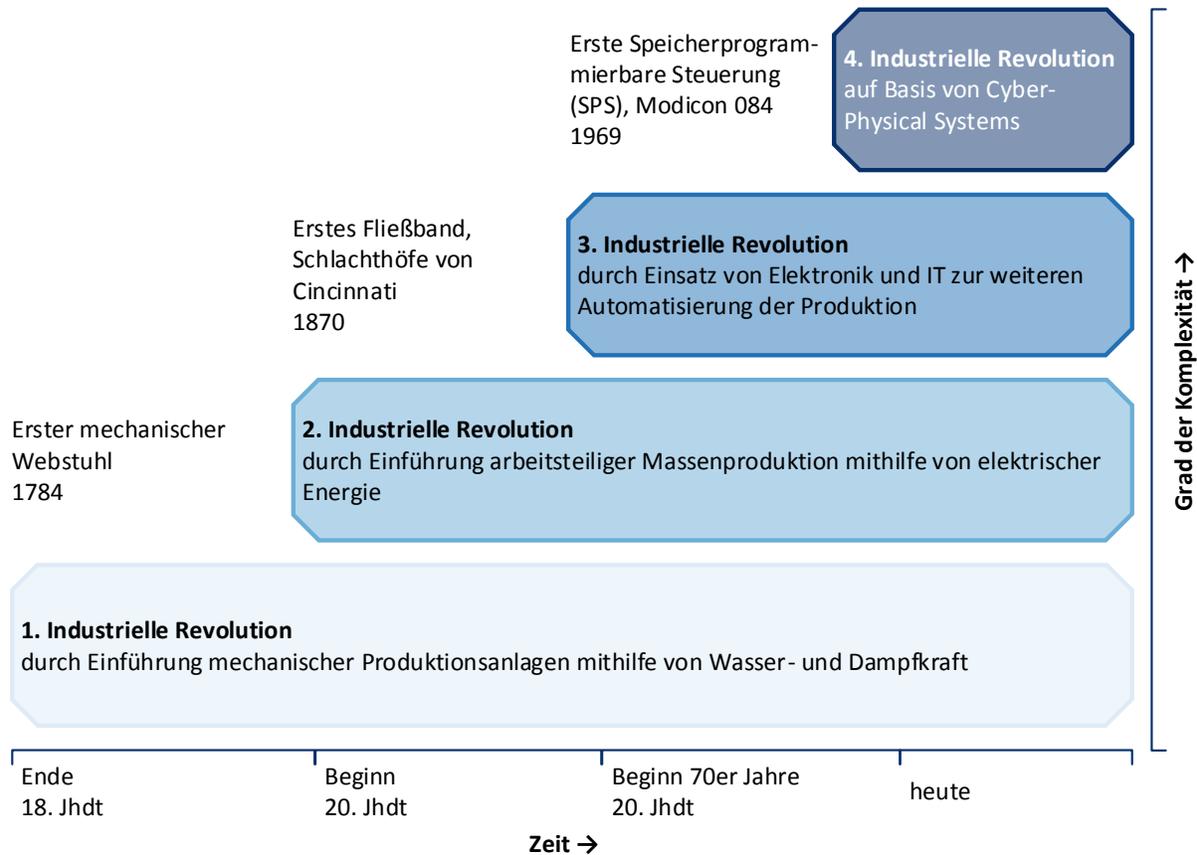


Abbildung 2.2: Stufendiagramm der industriellen Revolution ⁷

Angestoßen wurde die 1. Industrielle Revolution durch die Erfindung der Dampfmaschine durch James Watt um 1750. Ausgehend von Großbritannien breitete sich diese Entwicklung bis 1830 in ganz Europa und den Vereinigten Staaten von Amerika aus. Die neue Arbeitsmaschine ermöglichte eine generelle Mechanisierung. Zudem wurden bisherige Brennstoffe wie Holz

⁷vgl. Deutsches Forschungszentrum für künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), 2011

durch Kohle ersetzt.

Im Zuge der Mechanisierung konnten elementare Bedürfnisse, wie Kleidung und Nahrung, zusehends befriedigt werden. Die dezentralen Antriebe eröffneten immer mehr Möglichkeiten. Beispiele dafür sind landwirtschaftliche Geräte oder der mechanische Webstuhl.⁸

Als Konsequenz der ersten industriellen Revolution haben das klassische Handwerk und die Landwirtschaft erheblich an Bedeutung verloren. Im Gegenzug entstanden Arbeiterschaft und Fabrikbesitzer. Diese Schichtbildung führte zur Ausbeutung der Arbeiterschicht und mündete gemeinsam mit der 2. Industriellen in einer bürgerlichen Revolution. Mit zunehmender Bedeutung der Gewerkschaften entstand die Sozialdemokratie.⁹

Die 2. Industrielle Revolution (ab 1870) wurde gekennzeichnet durch die Einführung von Arbeitsteilung in der Produktion. Durch die Aufschlüsselung der Arbeit in kleine Pakete konnten auch minderqualifizierte Personen an der Produktionslinie eingesetzt werden. Diese Entwicklung wurde durch die Veröffentlichung der ersten modernen Managementtheorie durch Frederick Taylor in „The Principle of Scientific Management“ angestoßen. Daraufhin wurden Bewegungs- und Zeitstudien durchgeführt und das Fachgebiet Industrial Engineering ins Leben gerufen. Technische Errungenschaften dieser Epoche waren auszugsweise die Elektrizität, Elektronik, mechanische Geräte und nicht zuletzt das Auto.

Henry Ford fasste Taylors Lehren auf und nahm um 1910 die erste Fließbandautomobilfertigung in Highland Park, Michigan, in den Vereinigten Staaten von Amerika, in Betrieb. Die Massenfertigung seiner Fahrzeuge wurde ermöglicht, durch Einheitlichkeit, Komponenten- und Arbeitsstandardisierung, kleine Arbeitspakete und einem einheitlichen Takt. Mithilfe dieser Entwicklung war es möglich, den Preis eines „Model T“ von \$850 im Jahre 1908 auf lediglich \$250 in 1924 zu reduzieren. Das Fahrzeug wurde damit massentauglich, jedoch gab es dieses Auto nur in einer Variante.

Auch die Gesellschaft mit ihren Werten hat sich angepasst. Geprägt durch den gewonnen Wohlstand durchlief sie den Wandel von einer Arbeiter- zu einer Konsumgesellschaft. Massenproduzierte Ware verlor an Attraktivität. Der Fokus der Bevölkerung lag nun auch

⁸vgl. Duarte et al. (2017), S.381f

⁹vgl. Bauernhansl (2017), S.5

auf der Produktvielfalt. Taiichi Ohno entwickelte, aufbauend auf Taylors Theorie, das Toyota Produktionssystem (TPS), ein integriertes Produktionssystem. Das Konzept wurde erstmals im Jahr 1978 veröffentlicht. Toyota schaffte es mit diesem Ansatz beide Bedürfnisse bei gleichzeitiger minimaler Ressourcenverschwendung zu befriedigen und den Grundstein für das Lean Management zu legen.¹⁰

Durch die Entwicklung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen wurde das Zeitalter der Informationstechnologie und damit der 3. Industriellen Revolution, auch digitale Revolution genannt, eingeläutet. Die analoge Technik wurde zusehends durch digitale Produkte verdrängt. Größte Errungenschaften dieser Zeit sind Mikroprozessoren, rechnerunterstützte Konstruktion (CAD) und Herstellung, Lichtleitertechnik, Biogenetik etc.¹¹

Die entstandene Automatisierung der Produktionsprozesse ermöglichte eine variantenreiche Serienproduktion. Dieser Fortschritt führte allerdings auch zu einer Rationalisierung. Der Trend entwickelte sich immer weiter bis zur sogenannten Mass Customization. Durch die Globalisierung und die zunehmende Arbeitsteilung verteilte sich die Produktion über den ganzen Globus.¹²

Produktvolumen, -vielfalt und Lieferzeit sind ausschlaggebende Faktoren für den Markt der 3. Industriellen Revolution. Der Productlifecycle von elektronischen Produkten hat sich erheblich reduziert. Ein Beispiel hierfür ist, dass in Japan der durchschnittliche Wert lediglich bei etwa einem halben Jahr liegt. Der Produktlebenszyklus von Automobilen beläuft sich zwischen 4 bis 6 Jahren, wohingegen die Planungs- und Steuerungsperiode der Produktion rund zwei Monate beträgt. Dadurch können lange Wartezeiten für den Kunden entstehen. Diese Veränderung stellte besondere Anforderungen an die Produktionssysteme, wobei diese Entwicklung noch nicht abgeschlossen ist.¹³

Im Gegensatz zu den bisherigen tief greifenden Wandlungen verkörpert die 4. Industrielle Revolution eine Vorhersage über die Zukunft der Produktion. Der Begriff Industrie 4.0 stellt ein erstmals von der deutschen Regierung 2013 vorgestelltes Synonym dar. Konträr zu

¹⁰vgl. Yin, Stecke und Li (2018), S.849ff

¹¹vgl. Duarte et al. (2017), S.382f

¹²vgl. Bauernhansl (2017), S.7

¹³vgl. Yin, Stecke und Li (2018), S.851

den Entwicklungen der letzten Jahrhunderte soll der nächste Entwicklungssprung zu einer größeren Mensch-Maschine Integration und nicht zu einer Verdrängung der menschlichen Arbeitskraft durch Maschinen führen. Mit Hilfe von Cyber-Physical Systems wird das Ziel verfolgt, die individuellen Fähigkeiten zu unterstützen. Zudem sollen durch den Einsatz von intelligenten Maschinen Fehler und Qualitätsprobleme prophezeit, sowie Entscheidungs- und Optimierungsprozesse selbstständig durchgeführt werden. Zwei Merkmale der 4. Industriellen Revolution sind die Betrachtung des vollständigen Produktlebenszyklus und die bedeutende Rolle des Themas Nachhaltigkeit.¹⁴

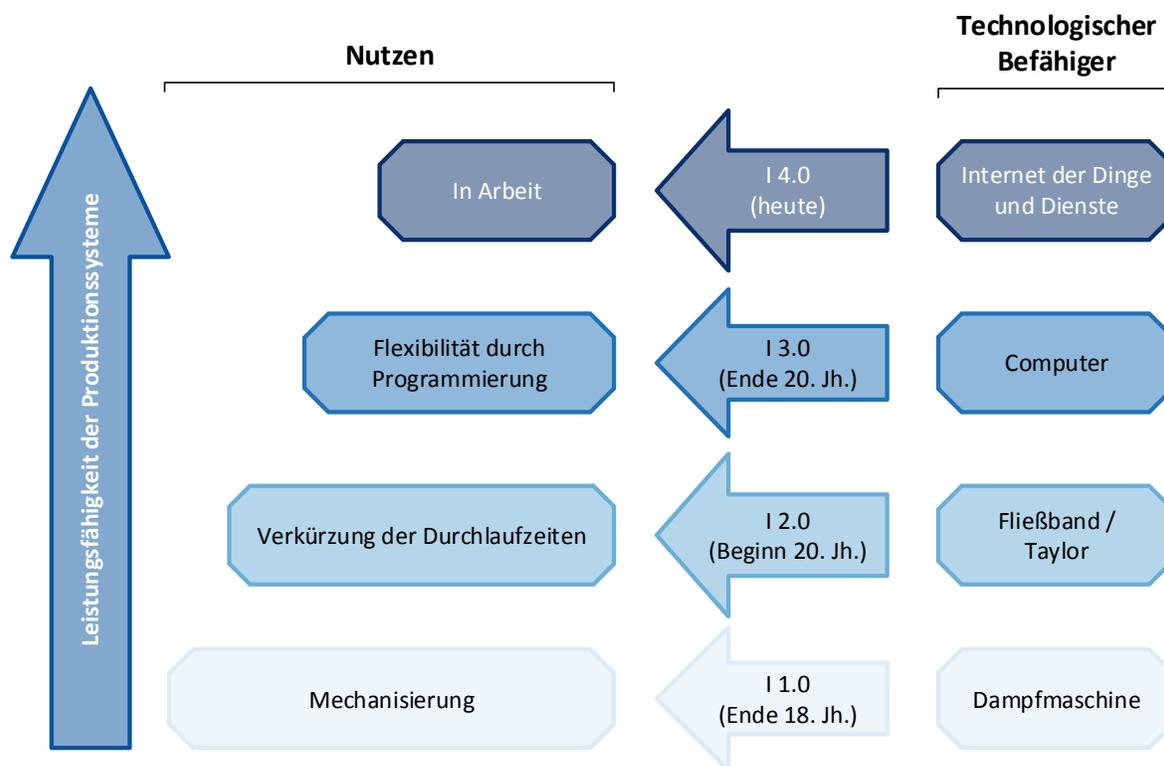


Abbildung 2.3: Einflüsse auf die Produktion ¹⁵

Vernetzung und miteinander kommunizierende Maschinen stellen einen wichtigen Schritt in Richtung Industrie 4.0 dar. Dementsprechend werden auch immer häufiger Begriffe wie

¹⁴Duarte et al. (2017), S.384f

¹⁵vgl. 27. Deutscher Montagekongress Prof. J. Franke

Big Data, das Internet der Dinge (IoT) und künstliche Intelligenz (KI) in diesem Kontext genannt.

Um den Veränderungen der Märkte nachzukommen, stehen Unternehmen zusehends unter Druck. Losgrößen werden kleiner und der Wunsch nach Personalisierung größer, wodurch die Komplexität der Märkte steigt. Betriebe müssen sich zukünftig schnell anpassen können, sodass Flexibilität und Wandlungsfähigkeit essentielle Eigenschaften einnehmen werden. Die Abbildung 2.4 zeigt die Herausforderungen der Unternehmen im Ablauf der Zeit.

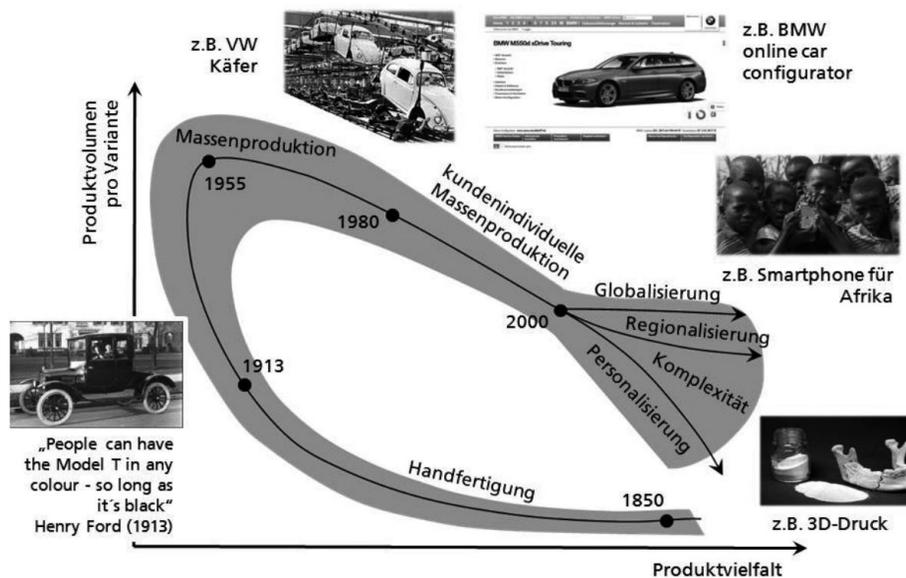


Abbildung 2.4: Geschichte der Produktion ¹⁶

¹⁶Bauernhansl (2017), S.13

3 Literaturanalyse

Das Herzstück jeder wissenschaftlichen Arbeit ist eine fundierte Literaturanalyse. In Hinblick darauf existieren verschiedene Vorgangsweisen. Die traditionelle Literaturanalyse fokussiert sich auf das Ermitteln geeigneter Literatur, die als Fundament für die weitere Arbeit dient. Darauf aufbauend werden ähnliche Quellen eruiert, welche ebenfalls dieses Thema behandeln und in die Bewältigung der Aufgabenstellung einfließen. Diese Vorgangsweise ist vergleichsweise simpel und liefert auch für ein bestimmtes Thema häufig zufriedenstellende Ergebnisse. Allerdings ist eine solche Analyse nicht reproduzierbar und konzentriert sich nur auf ein bestimmtes Themengebiet bzw. bekommt der Verfasser keine differenzierte Sichtweise auf die Aufgabenstellung. Versucht man hingegen, einen Überblick über die gesamte Literatur in einem Themengebiet zu erhalten, hat sich eine andere Methode etabliert.

Für die Bewältigung der Aufgaben in dieser Arbeit wurde der zweite Modus gewählt. Dieser wird als systematische oder auch kategorische Literaturanalyse bezeichnet. Klar definierte Regeln und Kriterien stellen das Grundgerüst dieser Recherche dar. Dadurch entsteht ein reproduzierbares Ergebnis, welches Quellen aus dem gesamten Themengebiet umfasst. Eine detaillierte Beschreibung findet sich im nachfolgenden Kapitel.

Die Vorzüge der gewählten Methode sind in Denyer et al. (2003) und Denyer und Tranfield (2006) angeführt. Weiters stellt das PRISMA-Statement in Moher et al. (2009) ein gutes Fundament für Meta-Analysen und systematischen Reviews dar.

3.1 Methodenbeschreibung der Literaturrecherche

In dieser Arbeit wird die Literaturanalyse anhand von 6 Stufen durchgeführt. Diese werden sukzessive abgearbeitet, um eine größtmögliche Transparenz und Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten. Eine Übersicht der Vorgangsweise ist in Abbildung 3.1 einzusehen.

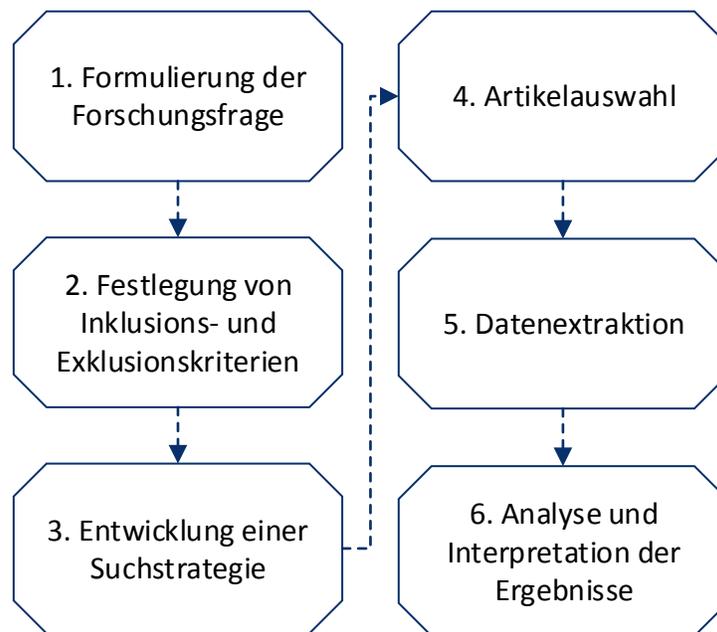


Abbildung 3.1: Die Schritte einer systematischen Literaturanalyse¹⁷

3.1.1 Formulierung der Forschungsfrage

Die Definition der Forschungsfrage ist dem Kapitel Einleitung zu entnehmen. Zur Wiederholung ist sie an dieser Stelle abermals angeführt: „Wie erfolgt die Aufteilung in Grob- und Feinplanung der Produktion in der metallverarbeitenden Industrie?“ Um diesen Sachverhalt zu klären, muss auf die verschiedenen Arten der Grob- und Feinplanung eingegangen werden.

3.1.2 Festlegung der Suchparameter

Um die Anzahl an wissenschaftlichen Artikeln zu reduzieren und auf eine überschaubare Menge einzuschränken, sind verschiedene Parameter festzulegen. Anhand dieser erfolgt die spätere Auswahl der Artikel. Eine erfolgreiche Literaturrecherche ist durch die korrekte Auswahl

¹⁷vgl. Uman (2011)

von geeigneten Inklusions- und Exklusionskriterien gekennzeichnet. Damit sollen geeignete Quellen aufgespürt und unpassende herausgefiltert werden. Vor allem die Themenrelevanz nimmt eine wichtige Rolle ein.

Die betrachtete Forschungsfrage lässt bereits einige Spezifikationen identifizieren. Im Laufe der letzten Jahrzehnte hat sich Englisch immer mehr zur weltweiten Forschungssprache etabliert. Dementsprechend sind auch die Kriterien für die nachfolgende Literaturrecherche in dieser Sprache verfasst. Weiters wurden in der Auswahl nur englisch- und deutschsprachige Veröffentlichungen berücksichtigt.

Die wichtigsten Suchparameter finden sich üblicherweise im Titel, der Kurzfassung oder auch in den Schlüsselbegriffen der Publikationen wieder. Passend zu dieser Thematik sind in Abbildung 3.2 die gewählten Schlagwörter aufgelistet. Zusätzlich sind sie mit AND- und OR-Operatoren verknüpft, um eine optimale Kombination zu gewährleisten. Eine detaillierte Legende ist auf Seite 97 zu finden.

In der nachfolgenden Recherche wurde die Literatur auf Publikationen nach dem Jahr 1989 eingeschränkt.

Neben der Suche in Titel, Abstract und Schlüsselwörter wurde noch eine Volltextsuche durchgeführt, um eine möglichst hohe Themenrelevanz zu gewährleisten. Die nachfolgend gewählten Begriffe stammen aus dem Bereich Produktionsplanung und -steuerung. Diese finden in der Standardliteratur häufig Verwendung.

- lot design
- lot plan
- flow production
- assembly
- short run
- limited-lot
- small serien
- variants
- validity period
- time flow
- time frame
- job shop
- batch
- mass production
- serial processing
- flow shop
- line production
- series production

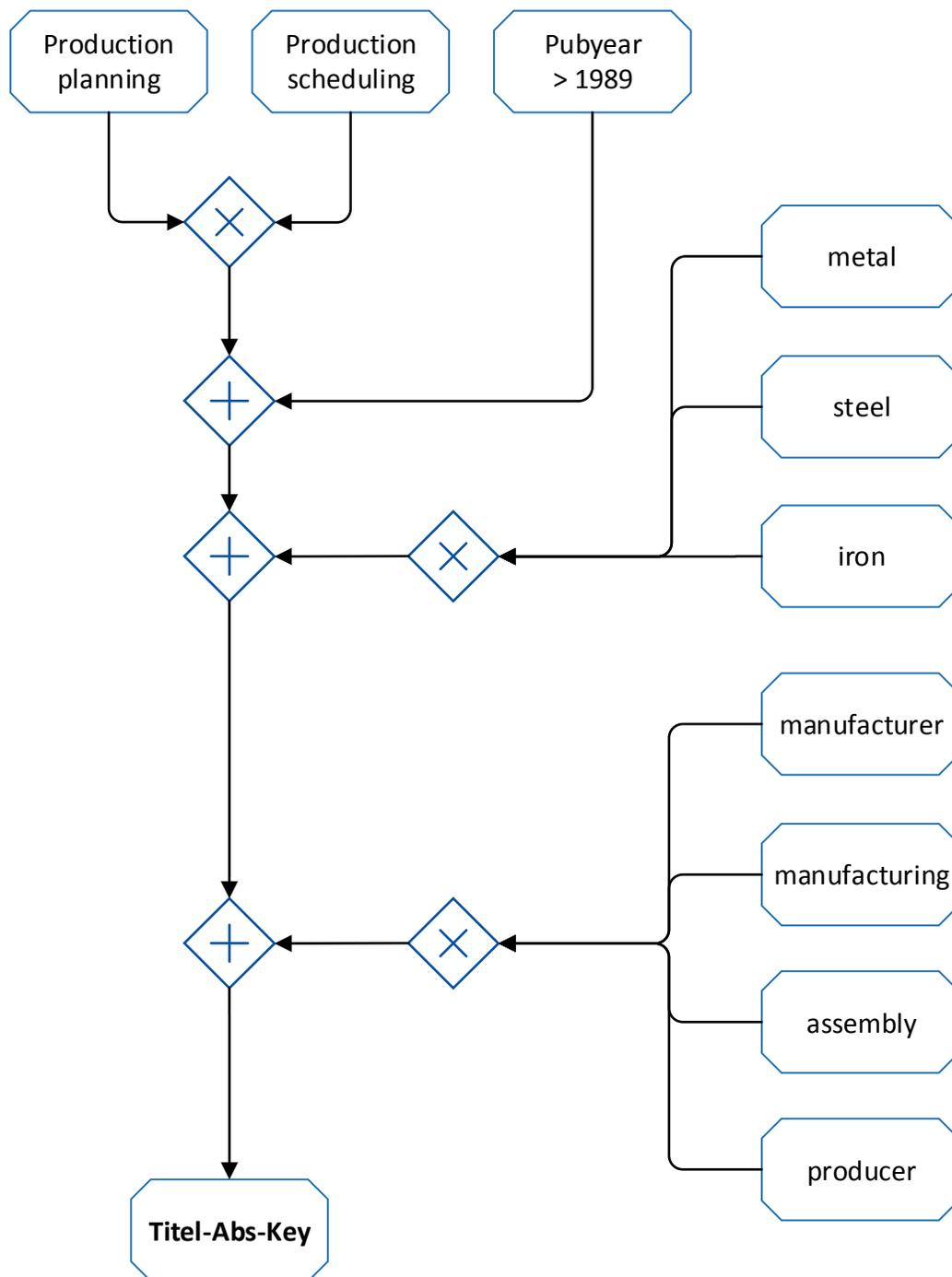


Abbildung 3.2: Hauptsuchbegriffe

- material flow
- lot sizing
- shop fabrication
- lead time
- utilization
- utilisation
- set-up time
- set up
- lot size

Ein entscheidendes Kriterium für die Güte einer Literaturrecherche ist die Auswahl der zulässigen Dokumenttypen. Vorab geprüfte Veröffentlichungen sind dementsprechend präferiert. Infolgedessen sind Umfragen, Bücher und Buchkapitel von der Literaturanalyse ausgeschlossen.

3.1.3 Entwicklung einer Suchstrategie

Dieser Unterpunkt behandelt die Thematik der Literaturbeschaffung. Zur einfacheren Eingrenzung und Auswahl der Dokumente erfolgt die Recherche über Onlinemedien.

Für diesen Zweck wird die Plattform Scopus¹⁸ verwendet. Scopus liefert je nach Einschränkungen ein angepasstes Suchergebnis über eine Vielzahl an Journal- und Konferenzschriften.

Zum Auffinden der Volltexte wird auf die Datenbank der TU-Wien Bibliothek¹⁹ und deren Partnerportalen zugegriffen.

3.1.4 Artikelauswahl

Die Artikelauswahl ist stark mit der Suchstrategie verflochten. Mit Hilfe der Suchplattform Scopus werden die im Vorfeld getroffenen Ex- und Inklusionen zur Literatursuche verwendet. Dadurch lässt sich die Artikelanzahl auf ein bewältigbares und inhaltlich angepasstes Maß reduzieren. Zusätzlich werden die übrig gebliebenen Publikationen noch auf inhaltliche Übereinstimmungen mit den Suchparametern und der Thematik, sowie auf Duplikate, mittels Abstract- und zum Teil Volltextbegutachtungen überprüft.

¹⁸siehe <https://www.scopus.com/>

¹⁹siehe <http://www.ub.tuwien.ac.at/>

Der Stichtag für die letzte Aktualisierung der Literatursuche ist der 31.12.2018. Die behandelten wissenschaftlichen Artikel umfassen demgemäß einen Zeitrahmen von 29 Jahren. Nur jene Literaturquellen, welche nach dieser Prozedur nicht aussortiert wurden, werden in der tieferen Analyse berücksichtigt. Die Abbildung 3.3 verdeutlicht die Eingrenzung der wissenschaftlichen Artikel.

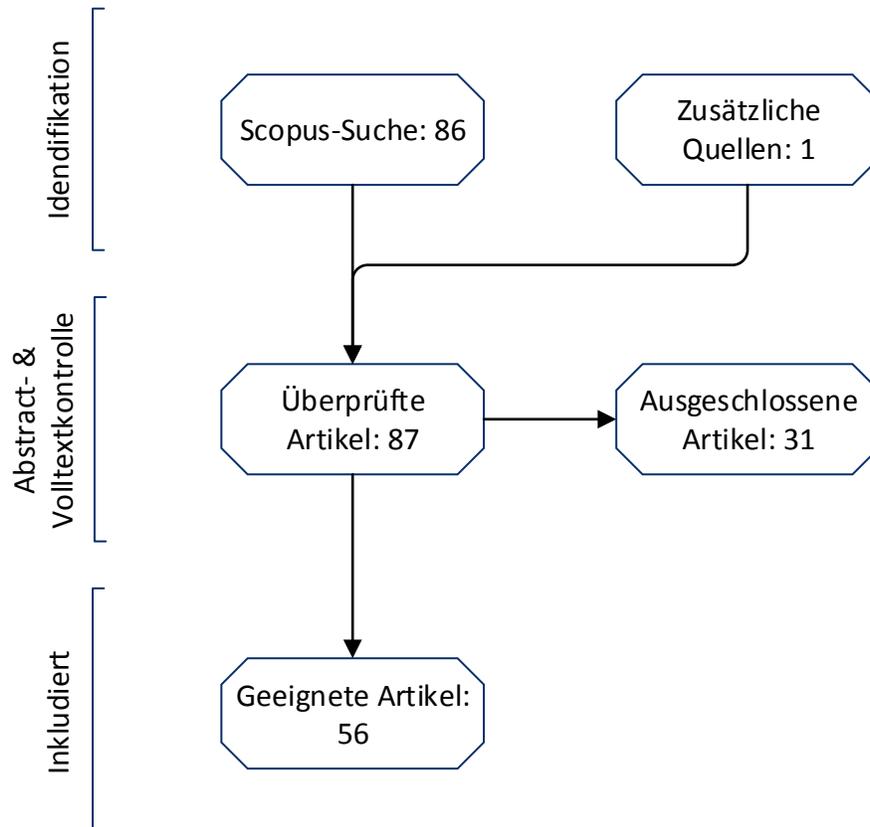


Abbildung 3.3: Ablauf der Artikelauswahl²⁰

3.1.5 Datenextraktion

Die systematische Literaturanalyse wird zur Erstellung einer Übersicht von einer Vielzahl an Publikationen verwendet. Vorab gewählte Kategorien dienen zur Klassifizierung der einzelnen

²⁰vgl. Liberati et al. (2009)

Literaturstücke. Die richtige Wahl stellt ein ausschlaggebendes Kriterium für eine erfolgreiche Recherche dar.

Die ausgewählten Artikel werden auf die verschiedenen Sachverhalte geprüft. Im Anschluss werden die extrahierten Daten in eine Tabelle eingetragen.

3.1.5.1 Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung

In dieser Arbeit wird der aktuelle Stand der Forschung in Hinblick auf Produktionsgrob- und Feinplanung abgebildet. Zu Beginn gilt es, den Unterschied zwischen den beiden Planungsarten darzustellen. Die dezidierte Trennung der Planung in Grob- und Feinplanung und der Hinweis darauf nehmen eine Position mit hohem Informationsgehalt ein.

Die Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung in der Wissenschaft und im industriellen Alltag ist ein schwieriges Unterfangen. In der Literatur werden diese beiden Planungsweisen auf verschiedene Arten interpretiert. Allgemein nimmt beim Übergang von Grob- zu Feinplanung der Detaillierungsgrad bei abnehmendem Planungshorizont zu.²¹

Die Grobplanung befasst sich im Allgemeinen mit den materiellen Faktoren der Produktion. Dies beinhaltet auszugsweise die Produktpalette, die Anzahl der zu produzierenden Einheiten, das Material und die Maschinen. Wohingegen die Feinplanung sich mit der zeitlichen Komponente auseinandersetzt, wie beispielsweise die Reihenfolgenplanung der Produktionsprozesse an einer Maschine oder die Maschinenauslastung.²²

Diese Aussage unterstreicht die Ausführungen in Schuh (2012), wobei sich die Ressourcenfeinplanung mit der Verwaltung der Kapazitäten beschäftigt.

Allerdings kommt diese Sukzessivplanung in der behandelten Literatur eher selten vor. Die Grenzen zwischen Grob- und Feinplanung verschwinden zusehends und es kommt zu einem fließenden Übergang. Diese Tatsache führt dazu, dass selbst eindeutig zuordenbare Methoden in beiden Fällen Verwendung finden. Dieser Umstand stellt ein erhebliches Problem bei der korrekten Einordnung der Publikationen dar.

²¹vgl. Schuh (2012), S.111f

²²vgl. Slak, Tavcar und Duhovnik (2011), S.110

Ein guter Indikator für die Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung ist der zeitliche Horizont der Planung. Kurze Planungszeiträume weisen direkt auf die Feinplanung hin. Wohingegen Planungen über Monate und Jahre klar auf die Grobplanung hindeuten. Da jedoch nicht in sämtlichen Publikationen auf den Planungshorizont verwiesen wird, stellt die Einteilung ein äußerst schwieriges Unterfangen dar. In diesem Fall entscheiden subjektive Einschätzungen des Begutachters, wodurch allerdings variierende nicht reproduzierbare Resultate entstehen.

Die Produktionsplanung kann auftragsbezogen bzw. -anonym erfolgen. Letztere Planungsvariante wirkt als Indikation für die Grobplanung. Die Berechnung der optimalen Losgröße wird häufig ohne bestehenden Kundenauftrag und in Hinblick auf einen größeren Planungshorizont durchgeführt. Durch das Verschwinden der Grenzen zwischen Grob- und Feinplanung wird die Produktionslosgröße in der behandelten Literatur häufig mit bereits bestehenden Aufträgen bestimmt. Zusätzlich erfolgt die Festlegung des Loses nur für einen kurzen Zeitrahmen im Bereich von Minuten bis maximal Wochen. Durch diesen Umstand werden solche wissenschaftlichen Arbeiten in die Kategorie Feinplanung eingestuft.

3.1.5.2 Grobplanung

Flussprinzip

Jede Fertigung eines Produktes geschieht auf eine spezielle Art und Weise. Die Ausprägungen der Fertigung sind die Einzelstück-, Chargen-, Serien- und Massenfertigung. Die Kriterien sind die durchschnittliche Auflagenhöhe der Erzeugnisse und Wiederholbarkeit pro Jahr.²³

Organisationsform

Die Beschreibung der verschiedenen Organisationsformen findet sich häufig in der allgemeingültigen Standardliteratur. Die üblichen Ablaufarten in der Teilefertigung sind die Werkstatt-, die Insel-, die Reihen- und die Fließfertigung. Eine gesonderte Definition der unterschiedlichen Fertigungsabläufe befindet sich in Schuh (2012), S.130ff.

²³vgl. Schuh (2012), S.130f

Tabelle 3.1: Beispiel Grobplanung

erster Autor	Jahr	deutl. Unterscheidung Feinplanung Grobplanung	Grobplanung												
			zeitl. Horizont			Flussprinzip			Organisationsf.						
			kurzfristig	mittelfristig	langfristig	Monate	Jahre	Einzelstückfertigung	Chargenfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	Werkstattfertigung	Insselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung
Beispiel 1	2001	X						X							X
Beispiel 2	1995	X						X							X
...	...														

3.1.5.3 Feinplanung

Die Feinplanung in der Wissenschaft bzw. in einem Unternehmen kann auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Es hat sich herausgestellt, dass es nicht sinnvoll ist, dies gesondert darzustellen. Sämtliche Planungsarten besitzen allerdings eine spezielle Zielsetzung, bei der oftmals logistische Kennwerte mit den Zielen der PPS vermischt sind.

Die Ziele der Produktionsplanung und -steuerung sind je nach Schwerpunktsetzung verschieden. Die populärsten sind folgende:²⁴

- Termintreue
- hohe und gleichmäßige Kapazitätsauslastung
- kurze Durchlaufzeiten
- geringe Bestände
- hohe Flexibilität

Eine allgemein gebräuchliche Zieldefinition der Logistik lautet:

²⁴vgl. Schuh (2012), S.29

Die Logistik besitzt die Aufgabe, die richtige Ware zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Zusammensetzung und der richtigen Qualität am richtigen Ort zum richtigen Preis bereitzustellen.²⁵

Aus diesen beiden Explikationen werden die Kriterien für die Feinplanung in der Produktion abgeleitet, nach denen die Publikationen untersucht werden. Bei der Analyse werden die folgenden Punkte in Betracht gezogen:

- Auslastung
- Durchlaufzeit
- Liefertreue
- Ausschuss
- Flexibilität
- Materialfluss
- Bestand
- Kosten
- Rüstzeit

Bei der Auswahl der Kriterien sind auch Mehrfachbelegungen möglich. In dieser Arbeit wird nicht auf den daraus folgenden Zielgrößenkonflikt eingegangen, da diese Thematik nicht zur Beantwortung der Forschungsfrage dient.

Um weitere Informationen zu gewinnen, wird auch in der Feinplanung, wie bei der Grobplanung, der zeitliche Horizont, welcher in der Literatur Anwendung findet, erfasst. Eine Mehrfachauswahl ist in diesem Bereich nur möglich, wenn in der Publikation mehrere Planungsmethoden bzw. Fallbeispiele behandelt werden, wie beispielsweise in einem Review. In allen anderen Fällen wird lediglich die zur Planung verwendete Zeiteinheit hervorgehoben. Wobei es irrelevant ist, ob es sich exemplarisch um 1h oder 12h handelt. Erst bei Erreichen der nächstgrößeren Einheit wird diese ausgewählt, wie z.B.: 25h werden in die Rubrik „Tag“ eingeordnet. Somit wird hier auf eine sukzessive Vorgangsweise zurückgegriffen.

Zusammenfassend sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 sämtliche für die Analyse gewählten Kategorien dargestellt.

²⁵vgl. Hompel und Schmidt (2013), S.16

Tabelle 3.2: Beispiel Feinplanung

		Feinplanung													
erster Autor	Jahr	zeitl. Horizont					Kriterien								
		Minuten	Stunden	Tage	Wochen	Monate	Auslastung	Ausschuss	Bestand	Durchlaufzeit	Flexibilität	Kosten	Liefertreue	Materialfluss	Rüstzeiten
Beispiel 1	2001						X		X				X		
Beispiel 2	1995				X				X	X					X
..	..														

3.2 Existierende Lösungsansätze für die Problemstellung

Das Ergebnis der Literaturrecherche stellt die Tabelle 3.3 dar. Die darin enthaltenen Publikationen wurden, wie entsprechend im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, analysiert. Diese Auswertung stellt die Grundlage für sämtliche weitergehenden Interpretationen und Aufarbeitungen der Daten dar.

Tabelle 3.3: Literaturanalyse

erster Autor	Jahr	deutl. Unterscheidung	Grobplanung													Feinplanung																		
			zeitl. Horizont					Flussprinzip			Organisationsf.					zeitl. Horizont					Kriterien													
			Feinplanung	Grobplanung	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	Monate	Jahre	Einzelstückfertigung	Chargenfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	Minuten	Stunden	Tage	Wochen	Monate	Auslastung	Ausschuss	Bestand	Durchlaufzeit	Flexibilität	Kosten	Liefertreue	Materialfluss	Rüstzeiten			
Abe	1997	X										X	X	X					X													X		
Akhavei	2016	X										X												X								X		
Akhoondi	2016	X										X	X							X	X			X	X	X								
Al-Aomar	2013	X														X							X	X		X								
As Ad	2011	X	X									X		X					X		X	X	X	X		X						X		
Auer	2012	X	X	X	X	X	X	X	X									X	X						X									
Avecilla	2015																																X	
Azab	2014	X														X	X				X			X										
Bal	2011	X													X						X			X						X				
Balakvishnan	2003	X																	X				X	X	X									
Bausch	1992	X										X									X													
Bicheno	2001	X										X							X				X										X	
Bowers	1995	X										X		X					X	X	X	X		X	X									
Chan	2006	X	X															X			X					X	X							
Chen	2012	X													X																			X
Chen	2008	X								X	X																				X	X		
Cheng	2001	X	X						X			X								X	X				X									
Da Silva Etges	2018	X	X	X				X										X	X			X		X										

Tabelle 3.3: Literaturanalyse (Fortsetzung)

erster Autor	Jahr	deutl. Unterscheidung	Grobplanung													Feinplanung														
			zeitl. Horizont					Flussprinzip			Organisationsf.					zeitl. Horizont					Kriterien									
			Feinplanung	Grobplanung	kurzfristig	mittelfristig	langfristig	Monate	Jahre	Einzelstückfertigung	Chargenfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung	Werkstattfertigung	Inselfertigung	Reihenfertigung	Fließfertigung	Minuten	Stunden	Tage	Wochen	Monate	Auslastung	Ausschuss	Bestand	Durchlaufzeit	Flexibilität	Kosten	Liefertreue	Materialfluss
Deckers	2018	X	X						X	X			X											X	X	X				
Dellaert	1995		X																								X	X		X
Duffie	2017		X						X				X						X	X				X		X	X			
Geiger	1997			X									X									X		X					X	
Iannino	2018		X													X						X				X				
Jacobi	2008	X	X	X	X				X									X						X		X				
Jiang	2013		X						X						X											X				
Karmakas	2012					X																				X				
Kim	2010		X						X														X							
Kingsmen	1993		X	X																			X	X		X	X			
Krishnamurty	2013		X	X					X				X					X								X				X
Lu	2015a		X															X					X			X				X
Lu	2015b		X																				X			X				X
Mariano	2015		X															X								X	X			
Maticcevic	2008		X															X									X			
McGee	1996		X	X				X	X										X				X			X	X			X
Metaxiotis	2002												X												X	X				
Miltenburg	2001		X	X				X	X					X								X		X		X				
Moengin	2015		X																	X			X			X	X			

3.2.1 Erscheinungsdatum

Zu Beginn der Analyse der Daten spielt das Erscheinungsdatum der Publikationen eine wichtige Rolle. Daraus kann eruiert werden, ob für die Aufbereitung aktuelle oder ältere Daten verwendet wurden. In Abbildung 3.4 ist zu erkennen, dass die wissenschaftlichen Arbeiten in diesem Themenbereich seit dem Jahre 2008 zunahmen. Über den gesamten untersuchten Zeitraum wurden insgesamt 56 wissenschaftliche Artikel zu diesem Themengebiet veröffentlicht.

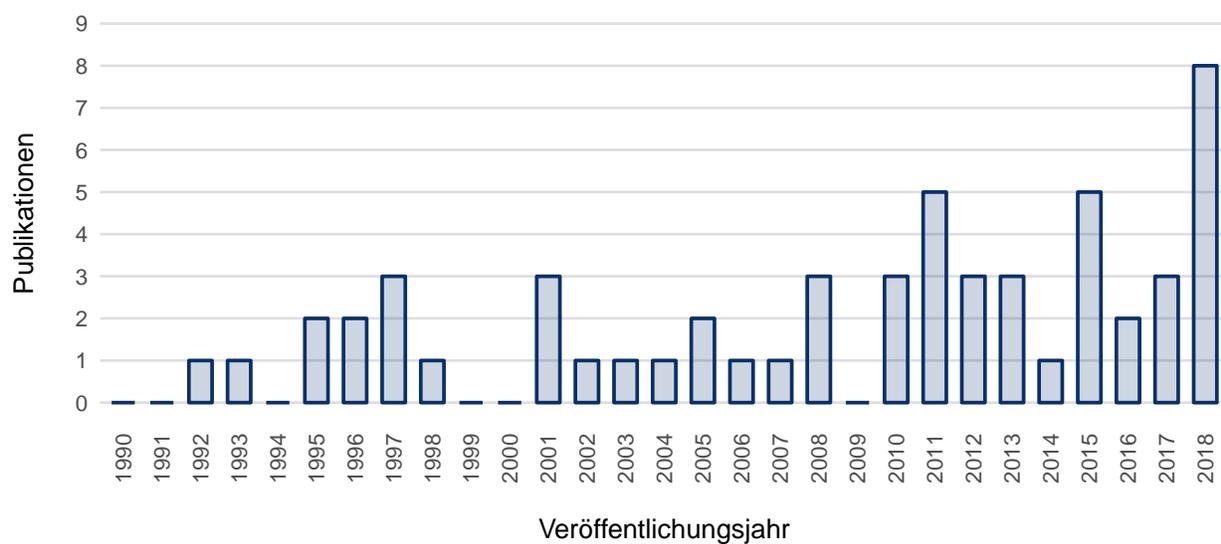


Abbildung 3.4: Publikationen pro Jahr

Bis zum Jahrtausendwechsel im Jahr 2001 wurden insgesamt 10 Werke veröffentlicht. Dementsprechend entstammen 82,14 % der in die Analyse eingeflossenen Literatur dem 21. Jahrhundert. In der näheren Betrachtung haben seit 2008 36 wissenschaftliche Arbeiten die Problematik der Produktionsplanung und -steuerung in der metallverarbeitenden Industrie behandelt. Das entspricht 58,93 % aller Publikationen.

3.2.2 Differenzierung zwischen den Planungsarten

Wie im Kapitel 3.1.5.1 erwähnt, hat die dezidierte Trennung von Grob- und Feinplanung in der Literatur einen hohen Informationscharakter. Das Vorhandensein einer eindeutigen

Unterscheidung erleichtert die weitere Analyse und vermindert das mögliche Auftreten von unterschiedlichen Interpretationen durch subjektive Betrachtungen.

Es hat sich herausgestellt, dass es in der englischen Sprache kaum Differenzierungen zwischen den Begriffen „Production planning“ und „Production scheduling“ gibt und der Eindruck vermittelt wird, dass diese als Synonym verwendbar sind. Zudem liefert kaum eine der wissenschaftlichen Arbeiten eine Erläuterung der Planungsarten. Einzig in Slak, Tavcar und Duhovnik (2011) auf S.110 findet sich eine ausführliche Erläuterung der beiden Begriffe. Wobei keine einheitliche Verwendung der Bezeichnungen von den verschiedenen Autoren vorgenommen wurde.

Lediglich 9 von 56 Publikationen weisen eine deutliche Unterscheidung auf. Wie die Abbildung 3.5 widerspiegelt, nimmt diese Menge einen geringen prozentuellen Anteil der behandelten Literatur ein. In weiterer Folge erschwert sich auch die genaue Zuteilung auf die beiden Planungsarten erheblich.

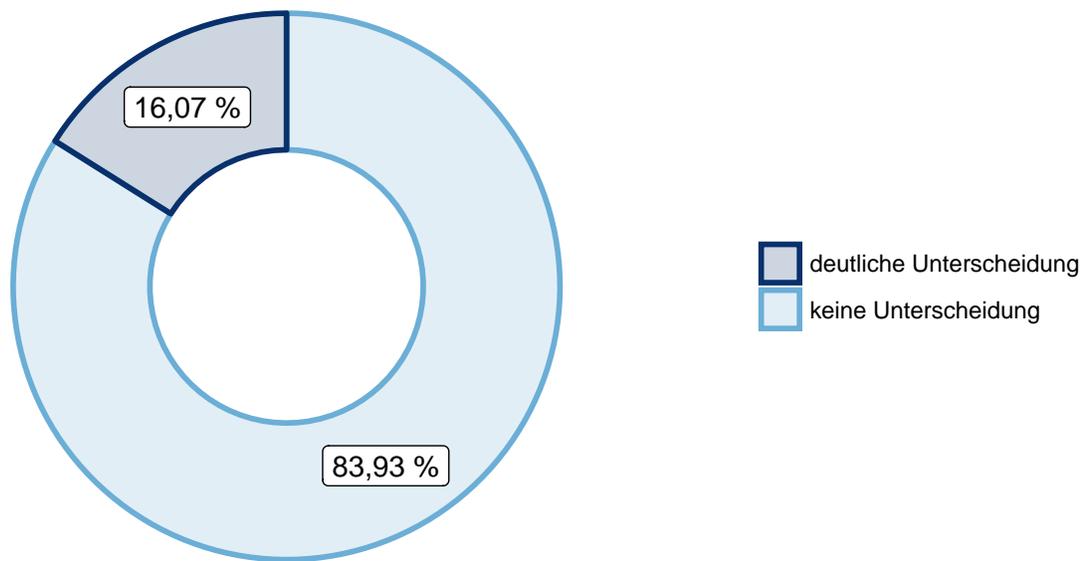


Abbildung 3.5: Vorliegen einer deutlichen Unterscheidung zwischen den Planungsarten

Eine Abgrenzung zwischen Grob- und Feinplanung ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Das Diagramm ist nur bedingt aussagekräftig, da diese Einteilung, wie bereits erwähnt, oftmals im Ermessen des Begutachters liegt. Dadurch können je nach Person unterschiedliche Auslegungen

zustande kommen. Zusätzlich ist anzumerken, dass bei eindeutigem Vorliegen von beiden Merkmalen Mehrfachauswahlen möglich sind.

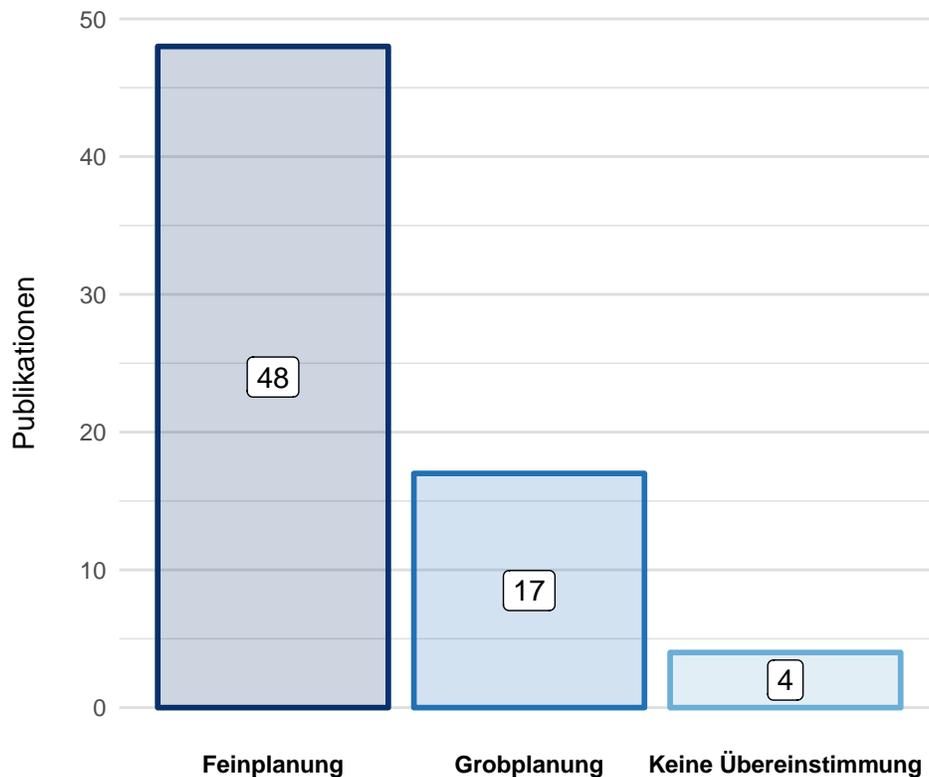


Abbildung 3.6: Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung

Die verwendeten Planungsmethoden sind überwiegend im Bereich der Feinplanung angesiedelt. Dies zeichnet sich hauptsächlich durch einen kurzen Planungshorizont aus, wie noch nachfolgend ausführlich aufgezeigt wird. Viele Methoden der Grobplanung wurden anhand von kundenspezifischen Aufträgen mit kurzem Planungsintervall simuliert, wodurch diese in die Kategorie Feinplanung eingegliedert wurden.

Die 4 Veröffentlichungen, welche in keine Kategorie einzuordnen sind, besitzen nur mäßigen Informationsgehalt. Für die weitere Aufbereitung der Daten werden diese jedoch weiterhin miteinbezogen, da diese Arbeiten den Suchparametern eindeutig entsprechen. Zudem beinhalten sie zusätzliche Auskünfte.

Um die Forschungsfrage betreffend der Aufteilung in Grob- und Feinplanung in der

metallverarbeitenden Industrie zu beantworten, hat sich bei Durchsicht der gesamten Literatur ein deutliches Bild abgezeichnet. Die Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung wurde im Laufe der Jahre immer mehr obsolet. Die Grenzen zwischen den beiden Planungsarten sind zusehends verschwommen. Die Literatur zeigt mittlerweile einen fließenden Übergang zwischen diesen beiden bzw. wird darauf gänzlich verzichtet. Allerdings liegt der Fokus der verwendeten Planungsmethoden häufig im Bereich der Feinplanung. Ein weiteres Indiz dieser Betrachtung ist, dass sich kurze Planungshorizonte im Laufe der Zeit etabliert haben.

3.2.3 Charakteristiken der Grobplanung

Der Informationsgehalt in der Literatur variiert je nach Publikation. Nicht selten liefern Veröffentlichungen neben dem Hauptfokus auch Hinweise über andere Planungsmethoden und Planungsarten. Aus diesem Grund erfolgen die nachfolgenden Einstufungen in die Kategorien ungeachtet der vorhergegangenen Einordnung der Planungsarten.

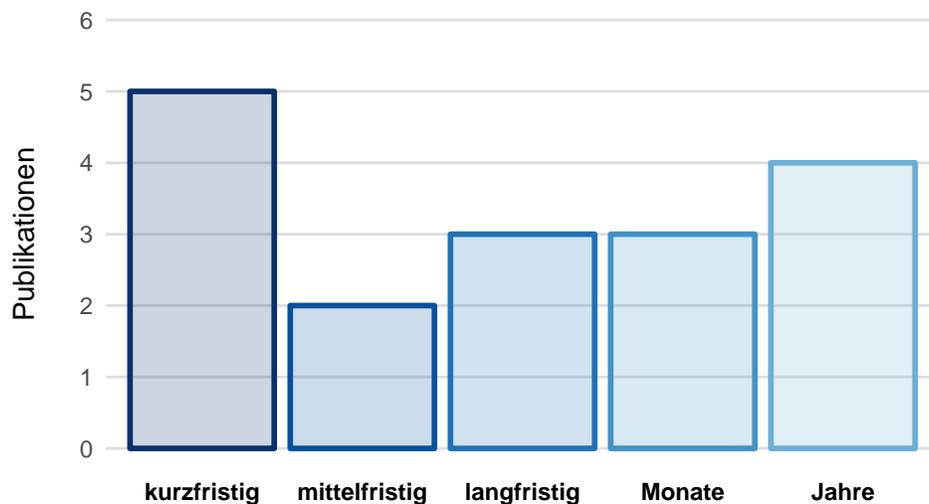


Abbildung 3.7: zeitlicher Horizont der Grobplanung

Trotz der relativ hohen Informationsdichte in den Bereichen Flussprinzip und Organisationsform ist die Anzahl von lediglich 17 Erwähnungen des zeitlichen Planungshorizontes in den wissenschaftlichen Artikeln überschaubar.

Wie in Abbildung 3.7 aufgezeigt, stellen die Maßnahmen, die während der Grobplanung getroffen werden, zumeist ein längerfristiges Unterfangen dar. Allerdings reicht die kleine Stichprobe nicht aus, damit diese Aussage Allgemeingültigkeit erlangt.

Die Abbildung 3.8 veranschaulicht die Ausprägungen der Merkmale in Bezug auf den Produktionsablauf. Der Großteil der wissenschaftlichen Artikel, das sind 23 Stück, befasst sich mit Aufgaben im Bereich der Chargenfertigung.

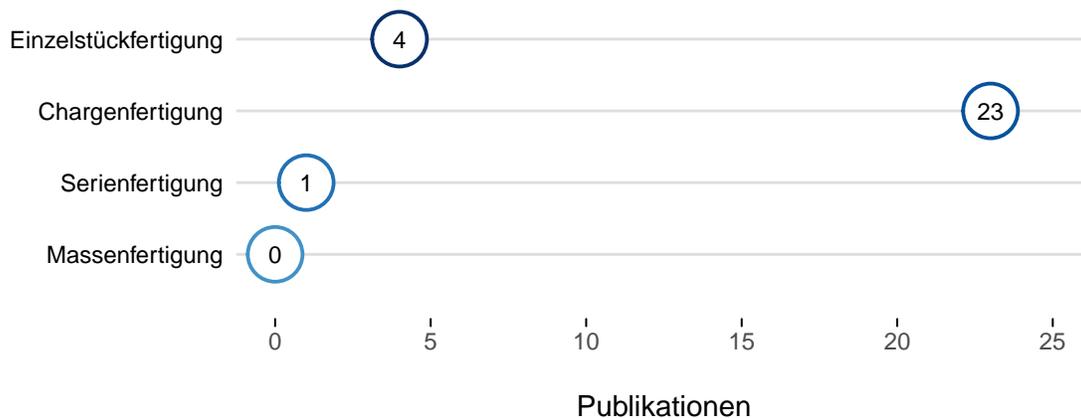


Abbildung 3.8: Flussprinzipien in der Produktion

In dieser Abbildung ist zu sehen, dass die Massenfertigung in dieser Branche in der Bedeutungslosigkeit versinkt. Aus der Analyse der Tabelle 3.3 ist erkennbar, dass der Großteil der 4 Werke aus der Kategorie Einzelstückfertigung ein aktuelleres Erscheinungsdatum aufweist.

Die Chargenfertigung hat in der Wissenschaft am meisten Bedeutung. Eine weitere Erkenntnis ist, dass die Einzelstückfertigung an Zustimmung gewinnt. Diese beiden Fakten sind damit begründbar, dass Variantenreichtum und der Begriff „Losgröße 1“, also eine Produktion mit Fokus auf individuell gefertigte Produkte, zusehends an Relevanz gewinnen.

Die Produktion in der metallverarbeitenden Industrie ist sehr vielfältig. Sie erstreckt sich von der Stahlproduktion bis hin zur Verarbeitung von einzelnen Bauteilen aus metallischen Werkstoffen. Genau dieses Bild spiegelt die Abbildung 3.9 wider. Eine eindeutige Präferenz in der Literatur wird nur im Bereich der Fließfertigung gezeigt. Die Ursache für das relativ

hohe Vorkommen in der behandelten Wissenschaft in der Höhe von 12 Malen liegt darin, dass die Stahlproduktion einen kontinuierlichen Prozess mit einem aufrechten Fluss darstellt und in den 56 Publikationen dieser Literaturanalyse häufig als Fallbeispiel dient.

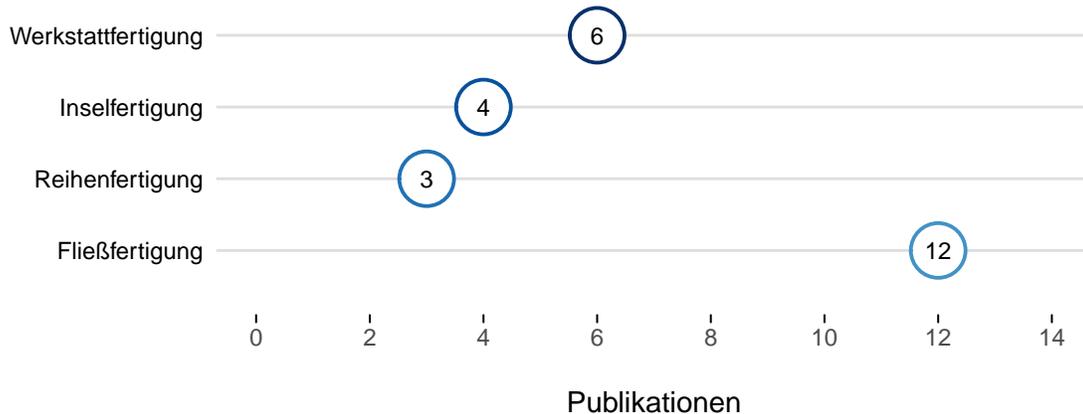


Abbildung 3.9: Organisationsformen der Produktion

3.2.4 Besonderheiten der Feinplanung

Die Feinplanung wird üblicherweise in häufig wiederkehrenden kurzen Planungsintervallen durchgeführt. Der Fokus liegt, wie bereits erwähnt, auf der zeitlichen Abfolge von Produktionsprozessen an den einzelnen Maschinen.²⁶

Diese Aussage bestätigt die Abbildung 3.10 zum Teil. So wird deutlich, dass in der Produktionsplanung der wissenschaftlichen Literatur die Zeiteinheiten Minuten, Stunden und Tage eine wichtige Rolle spielen. 17 von 38 Publikationen handeln in diesen Zeitbereichen.

Die langen Zeithorizonte von Wochen und Monate beruhen darauf, dass die Losgrößen in der Stahlproduktion sehr hoch sind und oftmals lange Prozesszeiten, hervorgerufen durch zeitaufwändige Fertigungsschritte, wie beispielsweise Härten oder Weichglühen, auftreten. Die verschiedenen Fallbeispiele beruhen auf kundenbezogenen Aufträgen. Dementsprechend erfolgt auch deren Eingliederung in die Kategorie Feinplanung.

²⁶vgl. Schuh (2012), S.165

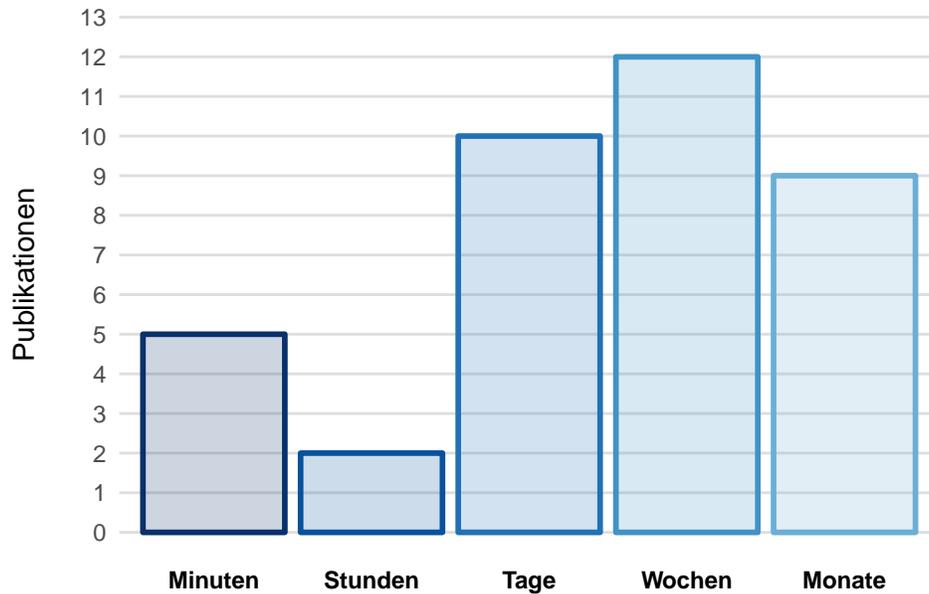


Abbildung 3.10: zeitlicher Horizont der Feinplanung

Die Feinplanung erfolgt augenscheinlich in der Literatur jeweils nach mehreren Gesichtspunkten. Bei Betrachtung der Tabellen 3.3 und 3.4, sowie der Abbildung 3.11, hebt sich deutlich hervor, dass bei der Erstellung der Planung auf eine Vielzahl von Kriterien zugleich Rücksicht genommen wird.

Dies führt häufig zu einem Zielgrößenkonflikt. Als konträre Zieldefinition ist ein niedriger Bestand innerhalb des Produktionssystems in Verbindung mit einer kurzen Durchlaufzeit zu erwähnen.

Die Kosten und die Durchlaufzeit sind Faktoren, die sich gegenseitig beeinflussen. Dementsprechend ist es auch nicht überraschend, dass diese beiden Kriterien am häufigsten in absoluten Zahlen angeführt werden.

Für die Kunden sind pünktliche Lieferungen und die Einhaltung vereinbarter Liefermengen ein ausschlaggebendes Kriterium für die Kaufentscheidung geworden.²⁷ Demzufolge hat sich die Produktion der metallverarbeitenden Industrie auch in diese Richtung entwickelt.

²⁷vgl. Chan, Au und Chan (2006), S.731

Tabelle 3.4: Häufigkeit von Mehrfachauswahlen

zugleich gewählte Kriterien	Häufigkeit
1	11
2	16
3	15
4	4
5	2

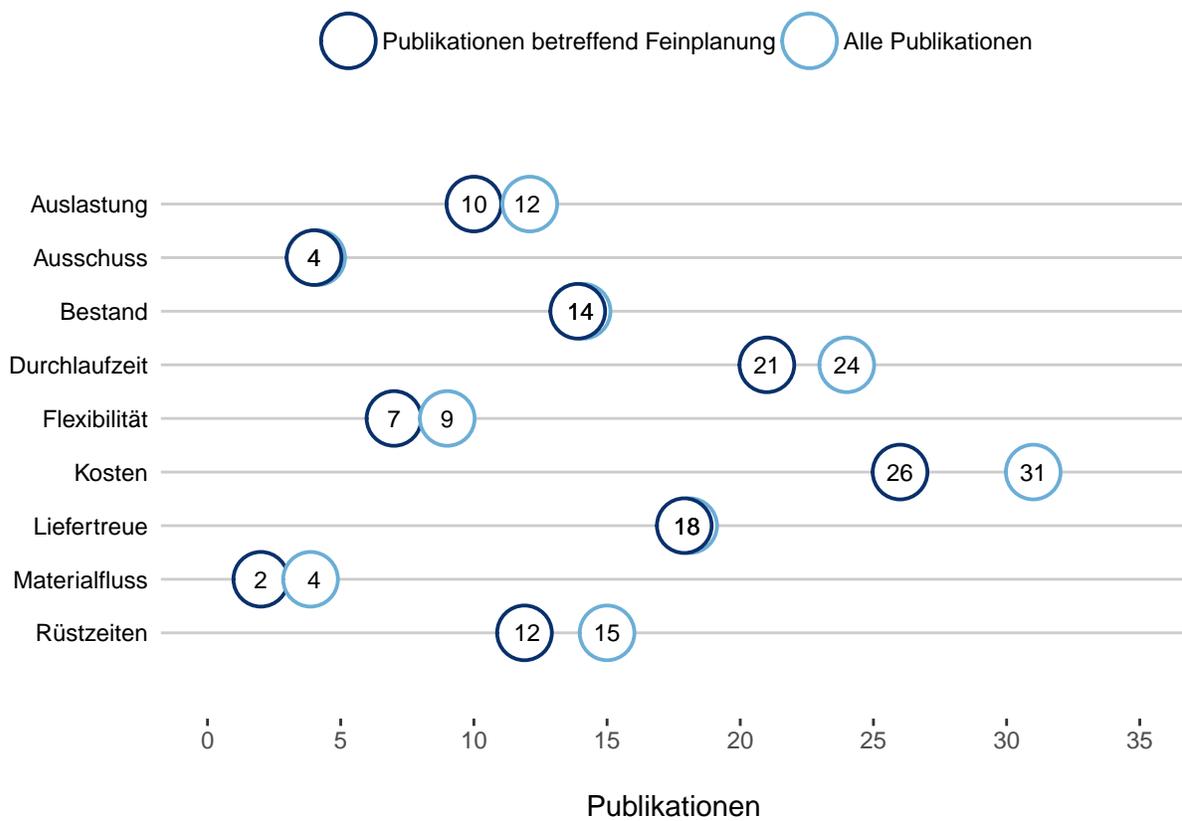


Abbildung 3.11: Kriterien der Planungserstellung

Als Zusatzinformation ist in Abbildung 3.11 ein Überblick über die Kriterien der generellen Planungserstellung dargestellt. Darin sind auch jene Arbeiten inkludiert, die zur Kategorie Grobplanung gehören oder in keine der beiden Planungsarten zuordenbar sind.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Produktionsplanung im Feinbereich häufig mit dem Hintergrund durchgeführt wird, die Kosten, Durchlaufzeit, Rüstzeit und/oder den Bestand im Lager oder in der Produktionslinie zu reduzieren und vorgegebene Lieferzeiten einzuhalten. Letzteres wird oft in den Computermodellen mit einer Strafzahlung bei Überschreitung des Liefertermins miteinkalkuliert.²⁸

3.2.5 Weitere gewonnene Erkenntnisse

In der für die Analyse relevanten Literatur wird oftmals die Produktionsplanung mittels Computeralgorithmen beschrieben. Diese basieren auf verschiedenen mathematischen Modellen und werden anschließend in eine für den Computer bearbeitbare Form umgewandelt.

Diese Tatsache wird dadurch unterstrichen, dass im Titel von 13 Publikationen das Wort Algorithmus genannt wird. Eine Volltextsuche in den Publikationen zeigt ein Ergebnis von 43 Erwähnungen.

Es ist deutlich zu erkennen, dass eines der Ziele in der heutigen Produktionsplanung und -steuerung eine möglichst weitgehende Entkoppelung menschlicher Tätigkeiten hin zu einer automatisierten Vorgehensweise ist. Die Vernetzung mit moderner Informationstechnik stellt den Schlüsselfaktor in diesem Bereich dar.

In den unterschiedlichen Literaturquellen wird auf verschiedene Berechnungsmodelle zurückgegriffen. Genetische Algorithmen und Heuristiken stellen nur einen Auszug an möglichen Varianten dar.

Eine selbstständige Entscheidungsfindung durch die Informationstechnik spielt in diesem Bereich eine zentrale Rolle. Die Implementierung von künstlicher Intelligenz (KI) stellt den nächsten Entwicklungsschritt dar. Eine Form von KI sind sogenannte Expertensysteme. Dies

²⁸vgl. Akhoondi und Lotfi (2016), S.3662

sind Programme mit einem umfassenden Wissen in einem begrenzten Gebiet, welche komplexe Aufgaben lösen können. Der Vorteil darin liegt, dass diese Systeme im Gegensatz zu humanen Ressourcen niemals müde werden und die Erlangung eines gewissen Wissensstandes keinen langen Zeitraum, wie Jahre, beansprucht. Zudem ist deren Entscheidungsfindung in ihrer Vorgangsweise bei richtiger Programmierung stets konsistent.²⁹

Durch die Rechnerunterstützung wird es möglich, auf auftretende Abweichungen rasch zu reagieren. So können auch minimale Planungshorizonte realisiert bzw. auch eine Planung in Echtzeit ermöglicht werden.³⁰

3.3 Sonstige relevante Arbeiten zur Problemstellung

Zusätzlich zur Implementierung von künstlicher Intelligenz in der Produktionsplanung und -steuerung erlangt auch die explizite Vorhersage bestimmter Ereignisse zusehends an Bedeutung. Reaktive Planungsmethoden bilden im Großteil der Fälle den aktuellen Stand ab. Proaktive Systeme gewinnen jedoch immer mehr an Attraktivität.³¹

Bei den zu prognostizierenden Ereignissen handelt es sich vordergründig nicht nur um die zukünftigen Auftragsvolumina. Die Einbindung von moderner Sensortechnik und deren Datenverarbeitung wird zukünftig in der Prognose von qualitativen und produktiven Problemen eine wichtige Rolle spielen. Krumeich, Werth und Loos (2016) befassen sich explizit mit verschiedenen Ansätzen in diesem Bereich und den damit verbundenen Schwierigkeiten. Eine Fallstudie liefert Einblicke in die Industrie und in die verschiedenen Ausprägungen der Sensorimplementierung. Beispiele der sensorgestützten Qualitätsprüfung und Trackingsysteme werden darin kurz erläutert.

In Chung et al. (2017) wird die Möglichkeit des Materialflusstrackings mit Hilfe der Radio frequency identification (RFID) Technologie erläutert. In dieser Publikation werden auf die Vorteile in Bezug auf schnellere und akkuratere Datenerfassung und mit der Anwendung dieser Technik einhergehenden Problematiken eingegangen.

²⁹vgl. Metaxiotis, Askounis und Psarras (2002) S.254f

³⁰vgl. Tanizaki, Katagiri und René (2018), S. 297

³¹vgl. Krumeich, Werth und Loos (2016), S.261f

3.4 Zusammenfassung

Zum Abschluss der Literaturanalyse sind an dieser Stelle nochmals die wichtigsten Erkenntnisse angeführt.

Die Begutachtung der Literatur im Bereich der metallverarbeitenden Industrie hat deutlich gezeigt, dass eine Abgrenzung zwischen der Grob- und Feinplanung in der Wissenschaft und in den darin behandelten Fallstudien nur selten vorhanden ist. Vielmehr tendiert die Produktionsplanung hin zu einem ganzheitlichen und kontinuierlichen Prozess.

Die Produktionsplanung erfolgt in den Publikationen nach verschiedenen Gesichtspunkten. Vorrangig liegt dabei der Mittelpunkt auf den Kriterien Kosten, Durchlaufzeit und Liefertreue. Besonders die Kombination mehrerer Faktoren miteinander hat eine wichtige Rolle eingenommen.

Der Begriff Massenfertigung hat in diesem Industriezweig an Bedeutung verloren. Vielmehr liegt der Fokus auf einer variantenreichen Produktion in Form der Chargen- und der Einzelstückfertigung.

Das Thema Digitalisierung hat in der Produktionsplanung einen wichtigen Stellenwert eingenommen. Der Einsatz moderner Informationstechnik ist ein essentieller Bestandteil des Planungsprozesses geworden. Die Entwicklung von geeigneten Algorithmen hat sich zu einem maßgeblichen Faktor in diesem Forschungsbereich entwickelt. Anstelle von einfachen Heuristiken haben sich vermehrt die Verwendung von Metaheuristen und künstlicher Intelligenz etabliert. In diesem Zusammenhang sind die Begriffe Variable Neighbourhood Search, genetische Algorithmen und Expertensysteme zu nennen.

4 Fallstudie

In diesem Kapitel wird die nachfolgende Frage behandelt: „Welche Auswirkungen hat die Anwendung grundlegender Planungsregeln in der variantenreichen Fertigung auf zeitbezogene Key Performance Indikatoren (KPI)?“

Die vorangegangene Literaturanalyse hat ergeben, dass die Kriterien Kosten, Durchlaufzeit und Liefertreue maßgebend im Planungsprozess sind. Demzufolge ist die zeitliche Komponente von fundamentaler Bedeutung. Einige wichtige Key Performance Indikatoren in diesem Bereich sind folgende:

- Gesamtdurchlaufzeit
- Wartezeit
- Liefertreue
- Abweichung des Liefertermins
- Bestand

Die Bearbeitung erfolgt anhand einer fiktiven praktischen Aufgabenstellung. Nachfolgend wird genauer auf die Erstellung eines theoretischen Beispiels, sowie dessen Problemstellung eingegangen.

Die Behandlung der Fallstudie hat zum Ziel, die Unterschiede und die Eignung elementarer Prioritätsregeln für den Einsatz in der Planung einer variantenreichen Fertigung aufzuzeigen. Zudem soll eruiert werden, ob diese simplen Heuristiken zufriedenstellende Resultate liefern oder ob komplexere Methoden im Planungsprozess notwendig sind.

4.1 Beschreibung der Problemstellung

Jedes Produktionsunternehmen besitzt einen einzigartigen Aufbau. In der weiteren Problemstellung wird eine solche Produktion mithilfe eines Zufallsgenerators erzeugt. Zu diesem Zweck wird die Programmiersprache **R** in der Version 3.5.1 verwendet. Hervorgehobene Textstellen weisen auf Teile oder Funktionen des Programmcodes hin.

Der vollständige Programmcode zu diesem Kapitel ist im Anhang im Abschnitt A.1.1 ersichtlich.

Vor dem Hintergrund der Reproduzierbarkeit des Fallbeispiels sind an den verschiedenen Stellen `set.seed()`-Funktionen implementiert, die den Zufallsgenerator auf einen bestimmten Wert einstellen.

4.1.1 Modellierung eines Produktionssystems

Ein Produktionssystem, das eine variantenreiche Fertigung mit unterschiedlichen Fertigungsrouten erlaubt, muss folgende Vorgaben erfüllen:³²

- Die Produktion besteht aus m unterschiedlichen Anlagen bzw. Maschinen (A_1, A_2, \dots, A_m)
- In der Produktion gibt es n Produkttypen (P_1, P_2, \dots, P_n), die verschiedene Fertigungsrouten aufweisen.

Eine Anlage stellt eine Arbeitsstation in der Produktion dar. Der Begriff umfasst Maschinen, Produktionseinheiten und menschliche Tätigkeiten.

Zur Begrenzung der Daten auf ein geeignetes Maß umfasst dieses theoretische Beispiel eine Produktion mit maximal 10 Produktionsstufen. Dementsprechend kann ein Erzeugnis zwischen einem und zehn Produktionsschritten durchlaufen. Wobei die Produktvielfalt auf 5 verschiedene Enderzeugnissen beschränkt ist.

Transportvorgänge zwischen den Anlagen werden nicht berücksichtigt. Infolgedessen ist die Layoutplanung nebensächlich für die Bearbeitung der Fallstudie.

Diese Konstellation erlaubt es, die Daten ressourcenschonend und zügig zu verarbeiten und zugleich eine adäquate Stichprobe zu erhalten. Für die Erzeugung des Beispiels kommt die Funktion `sample()` mehrmals zur Anwendung.

³²vgl. Błazewicz, Domschke und Pesch (1996), S.2

4.1.1.1 Anlagenbelegung

Durch Verwendung einer simplen Münzwurfsimulation entscheidet sich, welche Produktionsschritte ein Erzeugnis durchläuft. Der Generator liefert entweder eine Null oder eine Eins. Somit entsteht ein gänzlich zufälliges Produktionssystem. Allerdings ist hier eine Ausnahme eingebaut und wird auf die Anlage 10 angewendet. Diese Arbeitsstation kann die Kommissionierstation oder auch die Qualitätsprüfung darstellen, welche jeder Artikel vor dem Verlassen der Produktionslinie passieren muss. Pro Produktionsstufe steht eine verwendbare Anlage bzw. Maschine zur Verfügung. Bei der letzten Abteilung würde dementsprechend ein Engpass entstehen. Um diesem Umstand entgegenzuwirken, wird an dieser Stelle eine redundante Produktionseinheit (A11) installiert. Somit können Aufträge in der letzten Produktionsstufe an den Anlagen A10 und A11 simultan abgearbeitet werden.

Tabelle 4.1: Ablaufmatrix

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
P1	X	X			X					X
P2	X	X	X		X		X			X
P3	X			X		X	X	X	X	X
P4	X		X	X		X	X			X
P5		X		X						X

Das Ergebnis wird in der Tabelle 4.1 verdeutlicht. Zusätzlich sind die unterschiedlichen Produktionsabläufe in Abbildung 4.1 durch einen Gozintographen dargestellt.

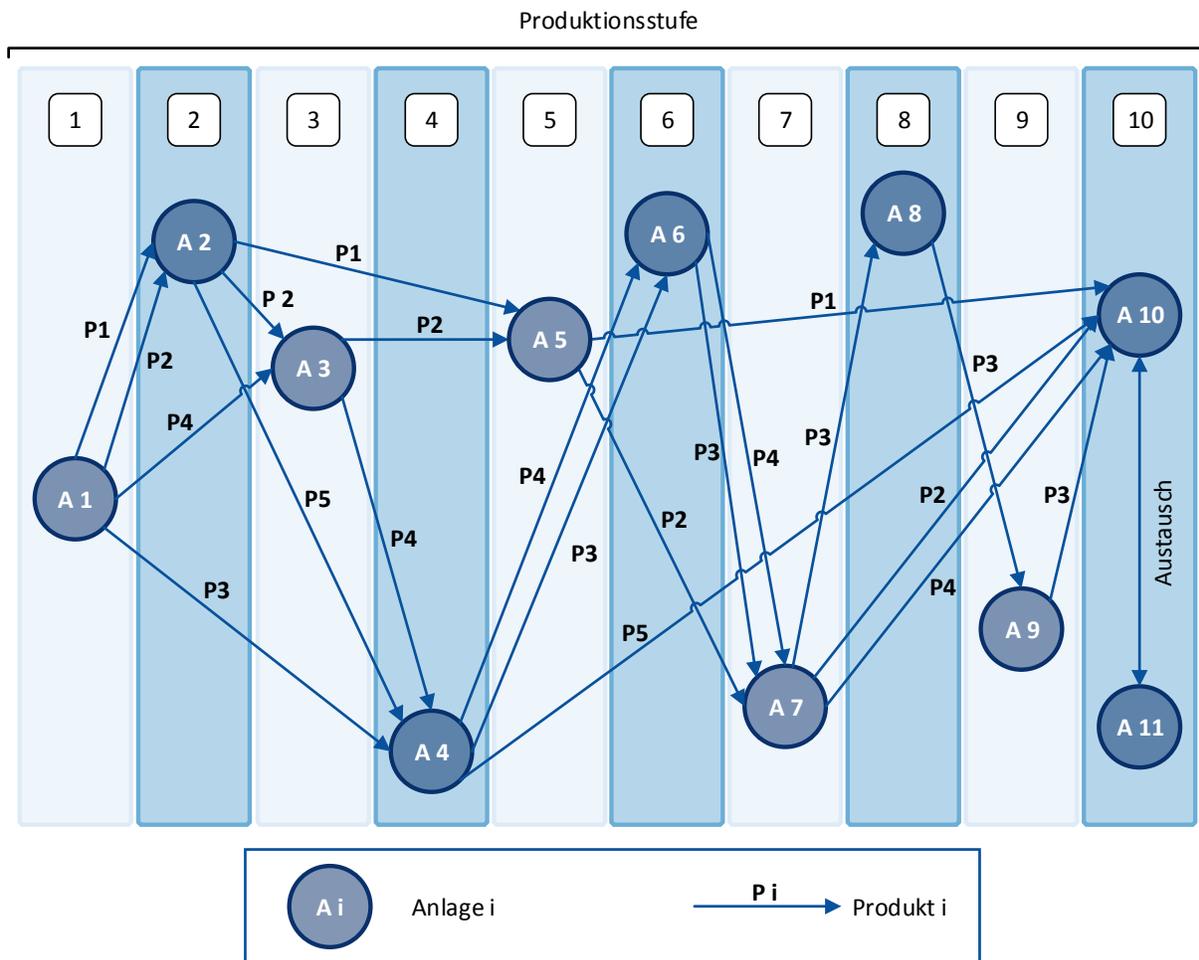


Abbildung 4.1: Gozintograph

4.1.1.2 Bearbeitungszeiten

Im nächsten Schritt werden die Prozesszeiten, die ein Stück eines bestimmten Produktes an einer Anlage benötigt, bestimmt. Dieses Beispiel wird vereinfacht dargestellt, daher besitzen die nachfolgenden Werte keine expliziten Maßeinheiten. Sämtliche in diesem Abschnitt verwendeten Zeiten beziehen sich auf das fiktive Maß „Zeiteinheiten“.

Die Produkt-Anlagen-Zeitmatrix wird in zwei verschiedenen Varianten ausgeführt. Eine Version ist mit zufällig ermittelten Variablen und eine zweite mit getakteten Werten gefüllt.

In der ersten Matrix stehen 3 verschiedene Zahlen zur Auswahl:

- 12
- 17
- 21

Die Wahrscheinlichkeit einen dieser Werte zu ziehen, liegt bei 33,33 %. Der befüllte Funktionsaufruf lautet dementsprechend: `sample(c(12,17,21), 1, prob=c(1/3,1/3,1/3), replace=TRUE)}`

In der zweiten Version besitzen sämtliche Produkte an jeder Anlage die gleiche Bearbeitungsdauer von 15 Zeiteinheiten (ZE).

Die befüllten Matrizen sind in den Tabellen 4.2 und 4.3 ersichtlich.

Tabelle 4.2: Zeitmatrix mit zufälligen Werten

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
P1	12	12	0	0	21	0	0	0	0	21
P2	17	21	21	0	21	0	17	0	0	12
P3	21	0	0	17	0	21	21	21	17	17
P4	12	0	17	17	0	12	17	0	0	12
P5	0	12	0	17	0	0	0	0	0	21

Tabelle 4.3: Zeitmatrix in getakteter Ausführung

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
P1	15	15	0	0	15	0	0	0	0	15
P2	15	15	15	0	15	0	15	0	0	15
P3	15	0	0	15	0	15	15	15	15	15
P4	15	0	15	15	0	15	15	0	0	15
P5	0	15	0	15	0	0	0	0	0	15

4.1.2 Rüstzeiten

Um diese Produktion realitätsnahe zu gestalten, muss an einer Anlage bei einem Wechsel des produzierten Artikels ein Rüstvorgang eingelegt werden. Diese Tätigkeit kann beispielsweise ein Werkzeugwechsel oder auch eine Säuberung der Maschine sein.

Die Vorgangsweise entspricht derselben wie im Punkt 4.1.1.2. Für die Rüstzeiten stehen folgende Werte zur Auswahl:

- 0
- 120
- 150

Tabelle 4.4: Rüstmatrix an Anlage 5

	P1	P2	P3	P4	P5
P1	0	120	150	150	0
P2	120	0	120	0	0
P3	150	120	0	150	150
P4	150	0	150	0	120
P5	0	0	150	120	0

Um die Einfachheit des Versuchsaufbaues zu bewahren, wird die Rüstmatrix in symmetrischer Ausführung befüllt. Diese entstandene Matrix kommt an der Anlage 5 zum Einsatz, wobei diese Entscheidung willkürlich getroffen wurde.

4.1.3 Zustand des Produktionssystems

Der Zustand des Produktionssystems ist durch die Belastung mit Aufträgen definiert. Die Produktion befindet sich in einem „eingeschwungenen“ Zustand. Das bedeutet, dass sich ein Anfangsbestand an den jeweiligen Anlagen befindet. Die Belastung setzt sich somit aus den bereits bestehenden Bestellungen und dem Auftragspool zusammen. Die Auftragsliste beinhaltet die folgenden Informationen:

- Produkttyp
- Stückzahl
- Auftragseingangsdatum
- (Wunsch-)Lieferdatum

Mehrere Funktionsaufrufe der Funktion `sample()` bilden zusammengesetzt die Auftragsliste. Der Produkttyp muss aus einem der 5 Produkte des Produktionssystems bestehen. Für die Stückzahl kann der Zufallsgenerator einen Wert zwischen 10 und 50 auswählen. Das Auftragseingangsdatum kann eine Nummer zwischen dem Zeitpunkt 0 und 1.000 annehmen. Im Anschluss werden die Daten aufsteigend sortiert.

Als Vereinfachung werden in diesem Beispiel das Auftragseingangsdatum und das geforderte Lieferdatum ebenfalls mit keinen speziellen Einheiten genannt. Das hat den Vorteil, dass Umrechnungsfehler ausgeschlossen werden können und auf arbeitsfreie Zeit keine Rücksicht genommen werden muss. Es vermindert zudem die notwendige Rechenzeit.

Das gewünschte Lieferdatum setzt sich aus dem Zeitpunkt des Auftragseinganges und der gesamten Prozesszeit für den Auftrag zuzüglich einer Zufallszahl zwischen 2.500 und 4.000 zusammen. Die beiden Schranken der Zufallsvariablen wurden willkürlich festgelegt. Der Aufschlag wird zur Berücksichtigung der wahrscheinlichen Abweichung von Prozesszeit und der tatsächlichen Durchlaufzeit eines Auftrages miteinkalkuliert.

Das Resultat der verschiedenen Funktionsaufrufe ist in Tabelle 4.5 dargestellt.

Die Tabelle 4.6 basiert auf den Daten der Auftragsliste und der Zeitmatrizen. Die Prozesszeiten des entsprechenden Produktes werden summiert und mit der Stückzahl des jeweiligen Auftrages multipliziert. Dieser Vorgang wird für die getaktete als auch ungetaktete Variante simultan durchgeführt. Abschließend ist noch die Gesamtsumme angeführt, welche das Produktionsvolumen der Auftragsliste in Zeiteinheiten darstellt. Dieser Wert verkörpert auch jene Zeit, die benötigt wird, würde jeder Prozess erst nach Abschluss des vorhergegangenen ausgelöst werden.

Zur Erlangung eines eingeschwungenen Zustandes werden die Aufträge aus dem Bestand und die Auftragsliste mit einer beliebig gewählten Zeitversetzung von 5.000 Zeiteinheiten in das

Tabelle 4.5: Auftragsliste

Auftrag	Produkt	Stückzahl	Auftragseingang	gefordertes Lieferdatum
1	2	48	20	9.122
2	2	18	70	4.972
3	3	36	95	8.144
4	5	15	245	3.993
5	2	20	315	5.971
6	5	25	405	4.542
7	5	10	440	4.158
8	4	25	475	6.300
9	4	45	480	7.021
10	1	23	520	5.851
11	2	29	530	6.699
12	1	34	555	6.558
13	4	30	650	6.280
14	2	17	665	5.518
15	4	43	695	7.651
16	3	37	735	9.569
17	4	42	785	8.236
18	5	14	790	4.575
19	2	39	825	8.742
20	4	26	865	7.068

Tabelle 4.6: Gesamtoperationszeiten

Auftrag	Gesamtoperationszeit		Auftrag	Gesamtoperationszeit	
	zufällig	getaktet		zufällig	getaktet
1	5.232	4.320	11	3.161	2.610
2	1.962	1.620	12	2.244	2.040
3	4.860	3.780	13	2.610	2.700
4	750	675	14	1.853	1.530
5	2.180	1.800	15	3.741	3.870
6	1.250	1.125	16	4.995	3.885
7	500	450	17	3.654	3.780
8	2.175	2.250	18	700	630
9	3.915	4.050	19	4.251	3.510
10	1.518	1.380	20	2.262	2.340
			Summe:	53.813	48.345

System eingespielt. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt -5.000 die Bestandsliste aktiviert wird und zum Zeitpunkt 0 die Auftragsliste eingelesen wird. Bis dahin werden alle Aufträge im Produktionssystem entsprechend der Prioritätsregel FIFO gereiht. Diese Planungsvorschrift wird im weiteren Verlauf detailliert beschrieben. Jene Aufträge, die als Bestand an den Anlagen fungieren, besitzen negative Auftragsnummern. Diese Vorgangsweise gewährleistet stets einen einheitlichen Anfangsbestand. Die Unterscheidung zwischen Bestand und Testaufträgen ist damit klar ersichtlich. Weitere Details finden sich in Tabelle 4.7.

Die Auflistung der Operationszeiten der einzelnen Bestandsaufträge ist für die Bearbeitung der Fallstudie redundant. Die Auftrags- und Bestandsliste stimmen in den bestellten Produkten und der Stückzahl überein. Dieser Sachverhalt ist in den Tabellen 4.5 und 4.7 ersichtlich. Die Gesamtoperationszeiten in der Tabelle 4.6 entsprechen somit auch jenen der Bestandsliste, jedoch mit abgeänderter Auftragsnummer.

Tabelle 4.7: Bestand

Auftrag	Produkt	Stück	Startzeit	Auftrag	Produkt	Stück	Startzeit
-20	2	48	-4.980	-10	2	29	-4.470
-19	2	18	-4.930	-9	1	34	-4.445
-18	3	36	-4.905	-8	4	30	-4.350
-17	5	15	-4.755	-7	2	17	-4.335
-16	2	20	-4.685	-6	4	43	-4.305
-15	5	25	-4.595	-5	3	37	-4.265
-14	5	10	-4.560	-4	4	42	-4.215
-13	4	25	-4.525	-3	5	14	-4.210
-12	4	45	-4.520	-2	2	39	-4.175
-11	1	23	-4.480	-1	4	26	-4.135

4.2 Methodenbeschreibung

4.2.1 Job Shop-Problem

Das vorgestellte theoretische Beispiel stellt ein klassisches Job Shop-Problem dar. Es verkörpert ein Problem der Anlagenbelegungsplanung bzw. der Kombinatorik.

Bei einem Job Shop handelt es sich um die klassische Werkstattfertigung. Die Produktion besteht aus mehreren verschiedenen Maschinen, die Operationen am Produkt ausführen. Pro Auftrag (bzw. Job) existiert eine spezifisch vorgegebene Ablaufplanung, die die Reihenfolge und die Prozesszeiten an den jeweiligen Anlagen vorgibt.³³

Die Aufträge und Maschinen unterliegen mehreren Einschränkungen:³⁴

1. Es existieren keine Prioritätsbedingungen zwischen den verschiedenen Aufträgen.
2. Nach dem Start eines Prozesses an einer Anlage kann dieser nicht mehr unterbrochen werden.

³³vgl. Blazewicz, Domschke und Pesch (1996), S.1

³⁴vgl. Blazewicz, Domschke und Pesch (1996), S.1

3. Jede Maschine kann nur einen einzigen Auftrag zu einem gewissen Zeitpunkt bearbeiten. Folglich kann eine Order nicht simultan an zwei Anlagen ausgeführt werden.
4. Jeder Job kann zu einem bestimmten Zeitpunkt nur an einer Anlage verrichtet werden.

Zusätzlich zu diesen Einschränkungen ergeben sich auch daraus einige Nebenbedingungen:

1. Erst nach Abschluss eines Prozesses wird der Folgeprozess an der nachfolgenden Anlage ausgelöst.
2. Bis zur vollständigen Beendigung eines Auftrages befinden sich sämtliche Erzeugnisse innerhalb des Produktionssystems, also entweder als Bestand oder in Bearbeitung.
3. Die Transporteinheit entspricht der Auftragsgröße. Das bedeutet, dass an einer Anlage fertig bearbeitete Artikel erst nach der Erledigung des kompletten Prozesses, zur nächsten Anlage weitertransportiert werden.

Folgende Restriktionen ergeben sich direkt aus dem Fallbeispiel:

1. Bei jedem Produktionswechsel an Anlage 5 muss auf etwaige Rüstungszeiten entsprechend der zugehörigen Rüstmatrix Rücksicht genommen werden.
2. Für die letzte Produktionsmaschine existiert eine zweite identische Anlage. In diesem speziellen Fall besteht die letzte Produktionsstufe aus zwei gleichen Versandstationen.
3. Pro Auftrag kann nur eine Produktvariante produziert werden. Bei mehreren verschiedenen Produkten in einem Auftrag muss dieser in einzelne Subaufträge zerlegt werden. Diese Bedingung ist mit einer deutlichen und unverwechselbaren Ergebnisdarstellung verknüpft.

Das vorgestellte Optimierungsproblem zählt zu der Klasse der „NP-vollständigen“-Aufgaben der Informatik. Um in diese Gruppe eingeordnet zu werden, müssen folgende Konditionen erfüllt sein:³⁵

- Zur Lösung der Aufgabe ist kein effizienter Algorithmus bekannt. Das bedeutet, dass innerhalb polynomieller Zeit keiner ein Ergebnis liefert.
- Würde nur eines der Probleme in dieser Kategorie auf diese Art und Weise lösbar sein, so wäre jedes bewältigbar.

³⁵vgl. Garey, Johnson und Sethi (1976), S.118

Die detaillierte Beweisführung ist, dass kein optimales Resultat für eine Anlagenbelegungsplanung mit mehr als 2 Anlagen existiert. Dieser Sachverhalt ist in Garey, Johnson und Sethi (1976) beschrieben.

Ein Problem mit ≥ 3 Maschinen, wie im vorgestellten Fallbeispiel, kann dementsprechend nur mit Einsatz von Heuristiken, wie Prioritätsregeln und Metaheuristiken (z. B. genetischer Algorithmus) zu einem adäquaten Resultat führen. Beispiele für heuristische Planungsregeln sind die nachfolgend beschriebenen Reihenfolgenregeln.

4.2.2 ausgewählte Prioritätsregeln

Die an dieser Stelle angeführten Prioritätsregeln stellen grundlegende Vertreter dieser Art dar. Um einen guten Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten zu erhalten, wurden jeweils zwei Regeln mit und ohne Berücksichtigung des Lieferdatums gewählt.

First-in/First-out (FIFO)

FIFO stellt eine der am häufigsten genutzten Planungsvorschriften dar. Sie sticht vor allem durch ihre einfache Definition und deren simplen praktischen Anwendung im Unternehmen hervor. Weiters wird sie auch häufig als rollierende Planung bezeichnet.³⁶

Die Aufträge werden zum jeweiligen Eingangsdatum eingeplant. An den Anlagen werden jene Aufträge, die als erstes an einer Maschine ankommen, als erstes bearbeitet und in dieser Reihenfolge abgearbeitet.

In mehreren Studien wurde eine Vielzahl an Messkriterien begutachtet. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Prioritätsregel dieselben mittleren Ergebnisse liefert, wie eine zufällige Auswahl der Aufträge. Allerdings weisen die Messwerte eine geringere Streuung auf.³⁷

Kürzeste Operationszeit (KOZ)

Jener Auftrag vor einer Anlage, der die kürzeste Prozesszeit aufweist, wird als erstes abgearbeitet. Die Warteschlange wird infolgedessen nach aufsteigender Größe sortiert. Diese

³⁶vgl. Blackstone, Phillips und Hogg (1982), S.36f

³⁷vgl. Blackstone, Phillips und Hogg (1982), S.36f

Variante bietet den Vorteil von geringen mittleren Durchlaufzeiten, Verspätungen und Wartezeiten.³⁸

KOZ liefert die besten Resultate im Bereich der Pünktlichkeit. Die Anzahl an säumigen Aufträgen ist sehr gering. Allerdings treten bei dieser Planungsregel auch die höchsten zeitlichen Verspätungen auf.³⁹

Frühester Liefertermin (FLT)

Die Reihung der Aufträge erfolgt nach aufsteigendem Liefertermin. Diese Priorisierung findet vor Auslösung der Aufträge und an den Anlagen statt. Diese Regel minimiert die maximale Verspätung.⁴⁰

Schlupfzeit (SZ)

Die eingelangten Bestellungen werden nach aufsteigender Schlupfzeit sortiert. Jener Auftrag mit der geringsten Schlupfzeit wird als nächster bearbeitet.⁴¹

Die Berechnung der Schlupfzeit erfolgt nach folgender Gleichung:⁴²

$$\text{Schlupfzeit}_i = (\text{Liefertermin}_i - \text{Zeitpunkt}) - \sum^j \text{Bearbeitungszeit}_j \quad (1)$$

Bei Verwendung einer Frozen Zone wird die Planungsvorschrift global berechnet. Das bedeutet, dass die Kalkulation vor Auftragsauslösung über den gesamten bevorstehenden Fertigungsprozess durchgeführt wird.

Die Schlupfzeit muss fortlaufend mit den entsprechenden Prozesszeiten und dem aktuellen Zeitpunkt berechnet werden, um die wartenden Aufträge zu reihen. Die bereits abgeschlossenen Prozessschritte und deren -zeiten werden dafür nicht berücksichtigt.

³⁸vgl. Geiger, Uzsoy und Aytuğ (2006), S.15

³⁹vgl. Grabot und Geneste (1994), S.907

⁴⁰vgl. Geiger, Uzsoy und Aytuğ (2006), S.15

⁴¹vgl. Geiger, Uzsoy und Aytuğ (2006), S.15

⁴²vgl. Grabot und Geneste (1994), S.905

Frozen Zone (FZ)

Dieser Begriff definiert keine Reihenfolgenregelung. Nach dem Auftragseingang werden für eine bestimmte Zeitdauer sämtliche neuen Bestellungen gesammelt. Im Anschluss werden diese nach einer ausgewählten Prioritätsregel sortiert.

Diese Vorgangsweise wird in Kombination mit den lieferdatumsabhängigen Planungsvorschriften FLT und SZ verwendet. Die Notation lautet dementsprechend FZ-FLT bzw. FZ-SZ.

Studien haben ergeben, dass sich die Planungsregeln in zwei Gruppen einteilen lassen. Einerseits besitzen FIFO, FLT, SZ in der Regel eine hohe Anzahl an säumigen Aufträgen mit einer geringen Verspätung. Andererseits kann mit KOZ eine Großzahl an Lieferterminen eingehalten werden, wobei allerdings in einzelnen Fällen größere Überschreitungen auftreten können.⁴³

4.3 Beschreibung der Methodenanwendung

Die Bearbeitung der Fallstudie erfolgt unter Berücksichtigung der vorgestellten Planungsvorschriften. Die vollständige Konstruktion einer Planungssimulation ist als Funktion in der Programmiersprache R gestaltet. In dieser Methode sind die Prioritätsregeln implementiert.

Das virtuelle Produktionssystem besteht aus mehreren Matrizen (Tabellen). Jede davon stellt eine Anlage dar. Die Benennung lautet von „A1“ bis „A10.1“. Die Zeilen in den Tabellen stellen jeweils einen Teil eines Auftrages dar. Die Funktion `Simulation()` und die dabei aufgerufenen Funktionsblöcke führen Manipulationen an den Einträgen durch. Diese Vorgangsweise bildet den Ablauf einer Produktion ab.

Durch den Aufbau der Simulation aus mehreren Funktionen kann sie in einer Modulbauweise zusammengestellt und nach Belieben erweitert werden.

Die genaue Methodenumsetzung kann im Anhang in den Abschnitten A.1.2 und A.1.3 eingesehen werden.

⁴³vgl. Mebarki und Shahzad (2013), S.3695

4.3.1 Implementierung der Planungsregeln

Den Anfang stellt die Erstellung einer Produktionsliste dar. Diese Matrix kombiniert die Bestands- und Auftragsliste unter dem Gesichtspunkt der jeweiligen Prioritätsregel.

Infolgedessen werden jeweils 4 Produktionslisten für die ungetaktete und die getaktete Variante erstellt. Zur Unterscheidung sind sämtliche Listen mit `.zuf` bzw. `.takt` gekennzeichnet.

FIFO

Für First-in/First-out müssen lediglich die Bestands- und Auftragslisten aneinandergelinkt werden und die Aufträge aufsteigend nummeriert werden. Das Resultat sind die Listen `FIFO.zuf` und `FIFO.takt`.

Die Reihung an den Anlagen erfolgt selbstständig, da jeder neue Auftrag an das Ende der Warteliste gestellt wird.

KOZ

Die Implementierung dieser Prioritätsregel erfolgt direkt in der Simulation. Eine Sortierfunktion wird speziell für die Reihenfolge an der jeweiligen Anlage verwendet.

Die Funktion dazu lautet `Reihenfolge.KOZ()`. Sie sortiert die wartenden Prozesse nach zunehmenden Prozesszeiten.

Frozen Zone mit FLT bzw. SZ

Die Order werden mittels der Funktion `Frozen.Zone()` in der Auftragsliste entsprechend ihrem Auftragseingang bis zu den Zeitpunkten 330, 660 und 1.000 gesammelt. In diesen Momenten kommen die Regeln FLT oder SZ, die die Reihung der Aufträge bestimmen und entsprechende Rangnummern vergeben, zum Einsatz.

Je nach Vorauswahl ruft `Frozen.Zone()` eine der beiden Sortierfunktionen `Sortieren.FLT()` oder `Sortieren.SZ()` auf. Die daraus resultierende Bearbeitungsliste ist als `FZ.FLT` bzw. `FZ.SZ` benannt, wie in Abbildung 4.2 ersichtlich ist.

Die Reihung an den jeweiligen Maschinen übernimmt im Falle von FLT die Funktion

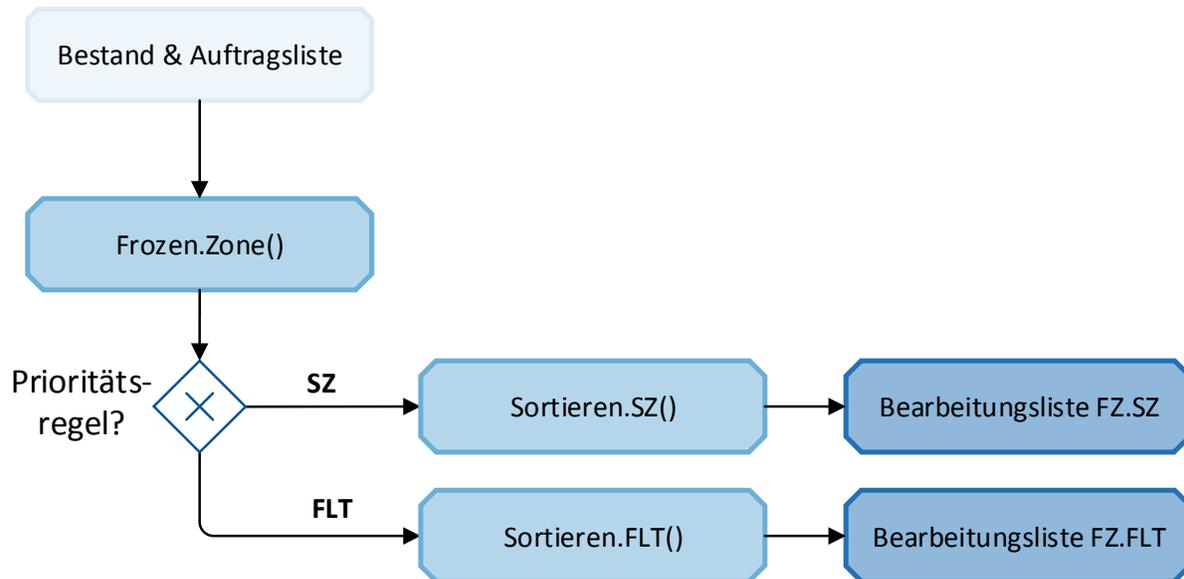


Abbildung 4.2: Implementierung der Frozen Zone in Kombination mit SZ bzw. FLT

`Reihenfolge()`. Diese orientiert sich an der vorgegebenen Sequenz der Produktionsliste.

Die Funktion `Reihenfolge.SZ()` ordnet die wartenden Aufträge an den Anlagen unabhängig von der zu Beginn vorgegebenen Abfolge nach aufsteigender Schlupfzeit.

4.3.2 Die Produktionssimulation

Die in diesem Abschnitt beschriebene Funktion ist so aufgebaut, dass die Zugabe bzw. Wegnahme von bestimmten Teilen auf einfache Weise möglich ist. Es lässt sich dadurch eine beliebige Erweiterung bzw. Reduzierung realisieren.

Sämtliche für einen ordnungsgemäßen Ablauf notwendigen Funktionen sind in der Abbildung 4.3 dargestellt.

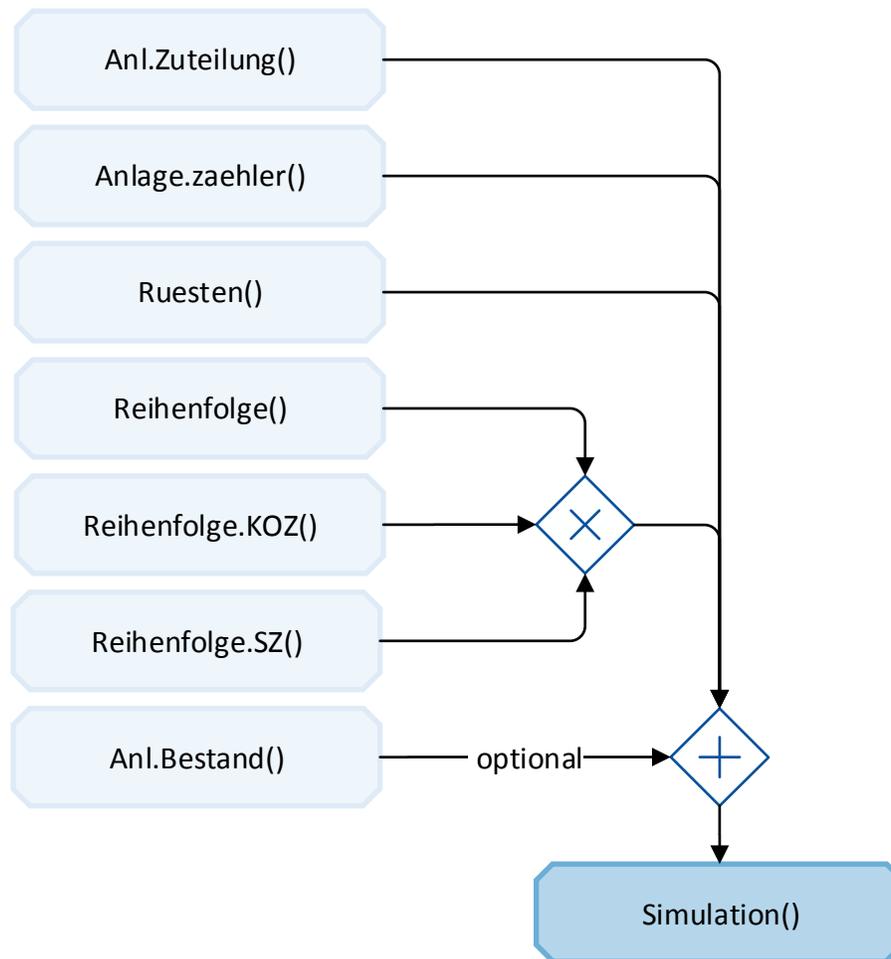


Abbildung 4.3: Zusammensetzung der Simulationsfunktion

Auftragszuteilung - Anl.Zuteilung()

Die Zuteilung der Aufträge zu den jeweiligen Anlagen erfolgt durch die Funktion `Anl.Zuteilung()`. Um eine fehlerfreie Ausführung zu erzielen, ist es essentiell, dass jede Auftragsnummer einzigartig ist.

Entsprechend der Rangnummer eruiert die Funktion, welche Arbeitsstation als Nächste angefahren wird. Zum Abschluss werden der Rang, die Auftragsnummer sowie die Bearbeitungszeit der Warteliste der jeweiligen Anlage übergeben.

Zählerfunktion - Anlage.zaehler()

Der Befehl `Anlage.zaehler()` besitzt nachfolgende Aufgaben.

Zu Beginn eines neuen Prozesses erhält dieser einen Startzeitpunkt, gemäß der Laufvariable `ZEIT`. In weiterer Folge reduziert sich bei jedem Aufruf der Funktion die Bearbeitungszeit um eine Zeiteinheit. Nach dem vollständigen Ablauf dieses Wertes bekommt der Prozess einen Endzeitpunkt entsprechend der aktuellen Zeit vergeben.

Rüstfunktion - Ruesten()

Wie in der Fallstudie beschrieben, muss an Anlage 5 ein Rüstvorgang berücksichtigt werden. In der Produktionssimulation wird dies durch die Funktion `Ruesten()` realisiert.

Die Funktion benötigt zwei Inputvariablen, die die jeweilige Maschine und die dazugehörige Rüstmatrix darstellen.

Wird ein Prozess an dieser Anlage beendet, werden dessen Auftragsnummer und die des nachfolgenden Tasks ausgelesen und mit der Rüstmatrix verglichen. Bei Vorliegen eines notwendigen Rüstprozesses wird eine zusätzliche Operation mit der Auftragsnummer 99 eingeschoben. Der Auftrag 99 stellt den eigentlichen Rüstvorgang dar und dessen Bearbeitungszeit entspricht der notwendigen Rüstdauer.

Reihenfolge an den Anlagen - Reihenfolge(), Reihenfolge.KOZ() und Reihenfolge.SZ()

Die Einhaltung der korrekten Abfolge stellt ein wichtiges Kriterium für eine korrekte Anwendung der Prioritätsregeln dar.

Die Reihenfolgennummer, welche jeder Auftrag als Prädikat erhalten hat, entscheidet während der Produktionssimulation bei den Planungsvorschriften `SZ` und `FLT` in welcher Abfolge die Warteliste abgearbeitet wird. Dementsprechend werden die wartenden Prozesse der Anlage bei Aufruf der Funktion `Reihenfolge()` entsprechend ihrer Chronologie in der Bearbeitungsliste sortiert.

Die Produktionssequenz im Falle einer `KOZ`-Priorisierung wird durch die Funktion `Reihenfolge.KOZ()` festgelegt. Die Prozesse werden bei der Ausführung entsprechend der

Größe ihrer Operationszeit geordnet.

In simultaner Weise reiht die Funktion `Reihenfolge.SZ()` die Aufträge an den Anlagen entsprechend ihrer Schlupfzeit zum Zeitpunkt des Funktionsaufrufes.

Ermittlung des Bestandes vor der Anlage - `Anl.Bestand()`

Die optionale Funktion `Anl.Bestand()` summiert bei jedem Aufruf die Bearbeitungszeiten aller noch nicht vollständig erledigten Aufträge. Dieser Vorgang wird für jede Anlage separat durchgeführt.

Aufbau der Funktion `Simulation()`

Die Funktion beginnt zu dem Zeitpunkt -5.000. In diesem Moment gelangen die vollständige Bearbeitungsliste und die 11 Anlagen als Input in die Produktionssimulation. Durch den frühen Beginn der Zählervariable wird auf den Aufbau eines Anfangsbestandes im Produktionssystem Rücksicht genommen. Die Aufträge werden entsprechend der angewandten Planungsvorschrift zu den jeweiligen Eingängen bzw. zum Auslösezeitpunkt sukzessiv in das System eingespielt. Bis zum Zeitpunkt 0 werden die Order an den Anlagen nach der Prioritätsregel FIFO gereiht.

Eine For-Schleife dient als Zeitzähler und ermöglicht einen realitätsnahen Ablauf der Produktion. Wird der Endwert der Schleife exemplarisch auf 1.000 eingestellt, würde der Output einen Querschnitt über die gesamte Produktionslinie und deren internen Warteschleifen umfassen, wie in einem echten Produktionsbetrieb.

Die Abbildungen 4.4 und 4.5 geben einen groben Überblick über die Funktionsweise. Jene Bestandteile der Funktion, die zur Aufbereitung der Ergebnisse dienen, sind darin nicht aufgelistet und können im Anhang genauer betrachtet werden.

Als Output liefert die Funktion `Simulation()` die Arbeitsprotokolle der Anlagen des Systems und die vollständig abgearbeitete Bearbeitungsliste mit eingetragenen Endzeitpunkten.

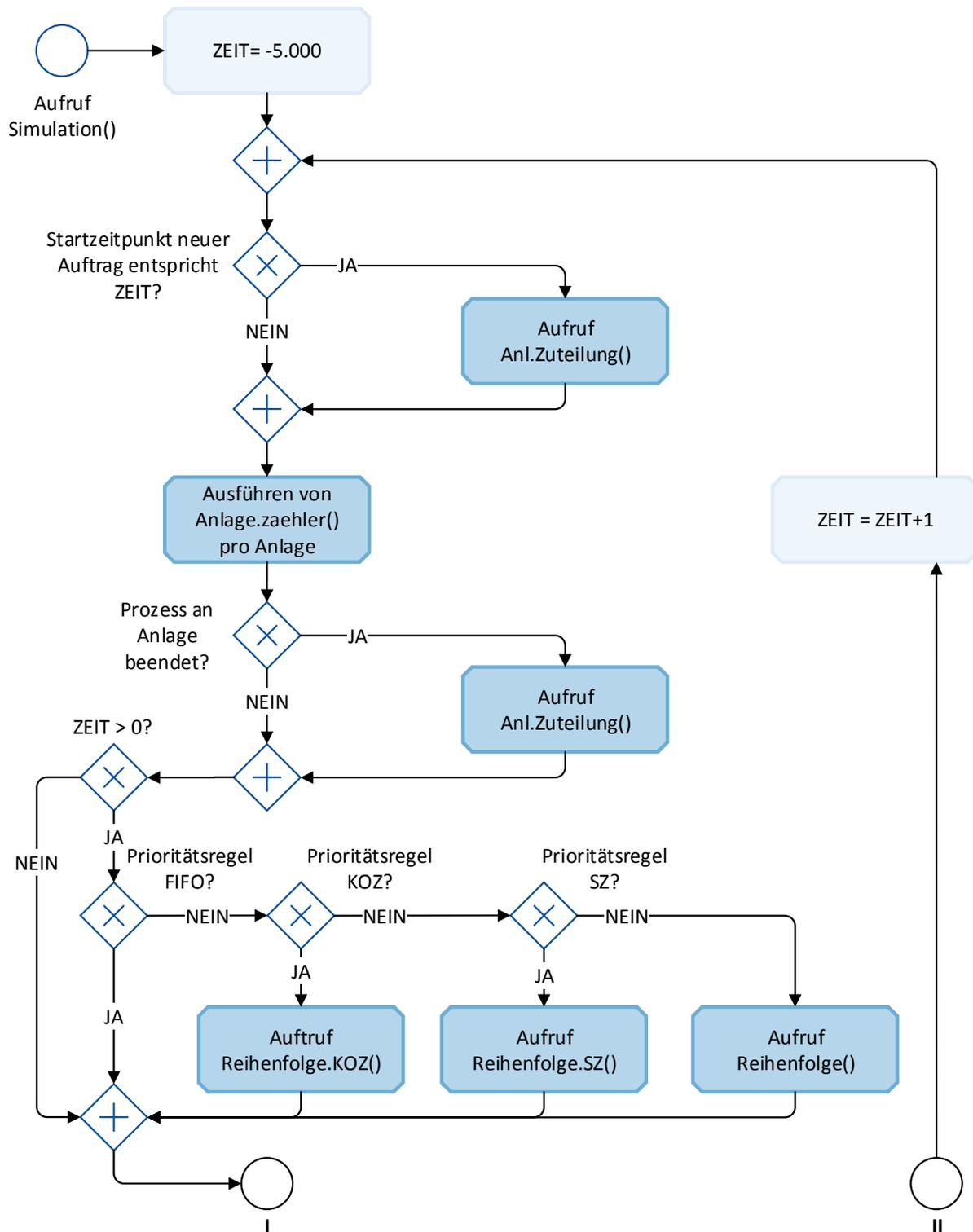


Abbildung 4.4: Aufbau der Simulation - erster Teil

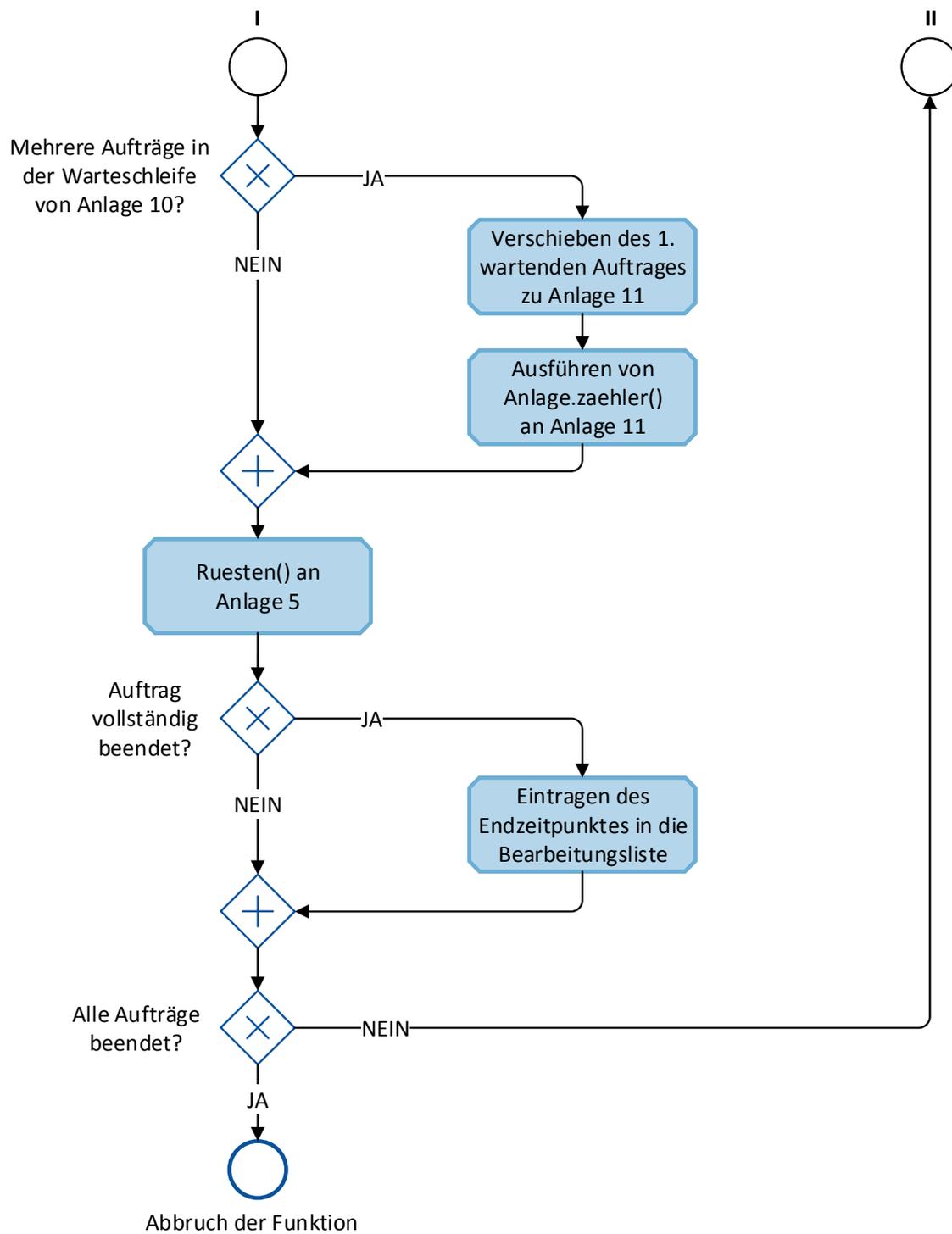


Abbildung 4.5: Aufbau der Simulation - zweiter Teil

4.4 Resultate der angewendeten Methode

In den Abbildungen 4.6 bis 4.13 ist der Output der unterschiedlichen Funktionsaufrufe grafisch auf kompakte Weise dargestellt. Die Gantt-Charts stellen die Verbindung zwischen den einzelnen Produktionsanlagen und der Bearbeitungsliste her. Die Wirkungsweisen der verschiedenen Prioritätsregeln sind darin gut ersichtlich. Die Aufträge mit negativer Nummerierung stellen dabei den Bestand dar. Ein Rüstvorgang besitzt die Auftragsnummer 99.

Bei der Priorisierung nach der Regel „Kürzeste Operationszeit“ in Abbildung 4.7 bzw. 4.11 ist der Vorzug von Aufträgen mit kürzeren Prozesszeiten besonders deutlich zu erkennen.

Im Anhang, Abschnitt A.2, sind die detaillierten Ergebnisse der Simulationsdurchführung mit der Planungsregel FIFO dargestellt. Die darin aufgelisteten Tabellen geben die Bearbeitungsliste und die Anlagenbelegung wieder.

Ohne einer weiteren kalkulatorischen Analyse ist eine deutlich geringe Auslastung der Anlagen 8 und 9 unabhängig von den verschiedenen Planungsregeln zu erkennen. Diese Tatsache beruht darauf, dass diese Maschinen lediglich für die Fertigung des Produktes 3 erforderlich sind. Dieser Aspekt ist in der Tabelle 4.1 ersichtlich.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass die redundante Anlage 11 deutlich zur Auslastung der Maschine 10 beiträgt und die Bildung eines Engpasses verhindert.

Im nachfolgenden Kapitel 4.5 sind die vertiefende Aufbereitung der Datensätze und die Ermittlung der unterschiedlichen Metriken angeführt.

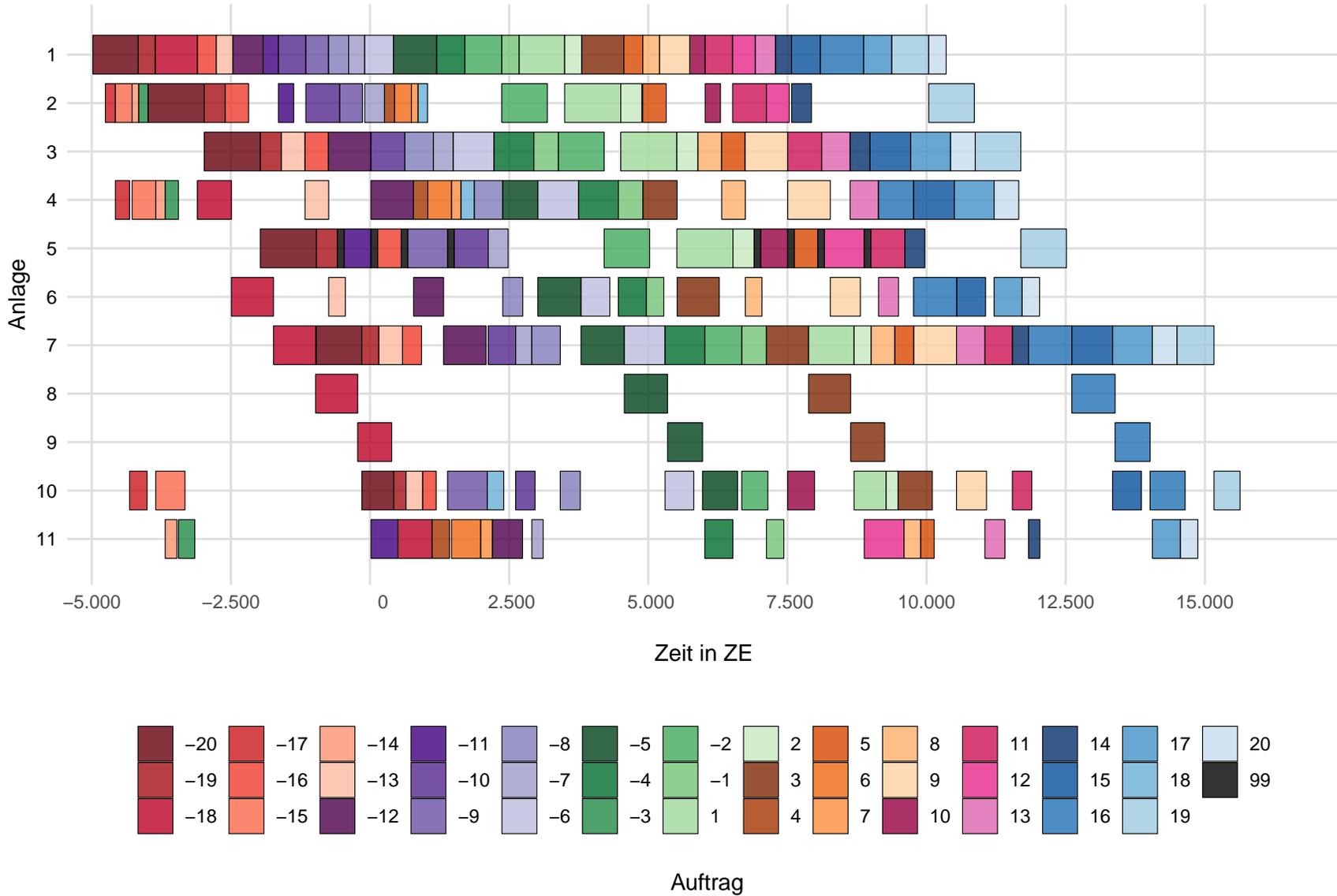


Abbildung 4.6: Gantt Chart - FIFO zufällig

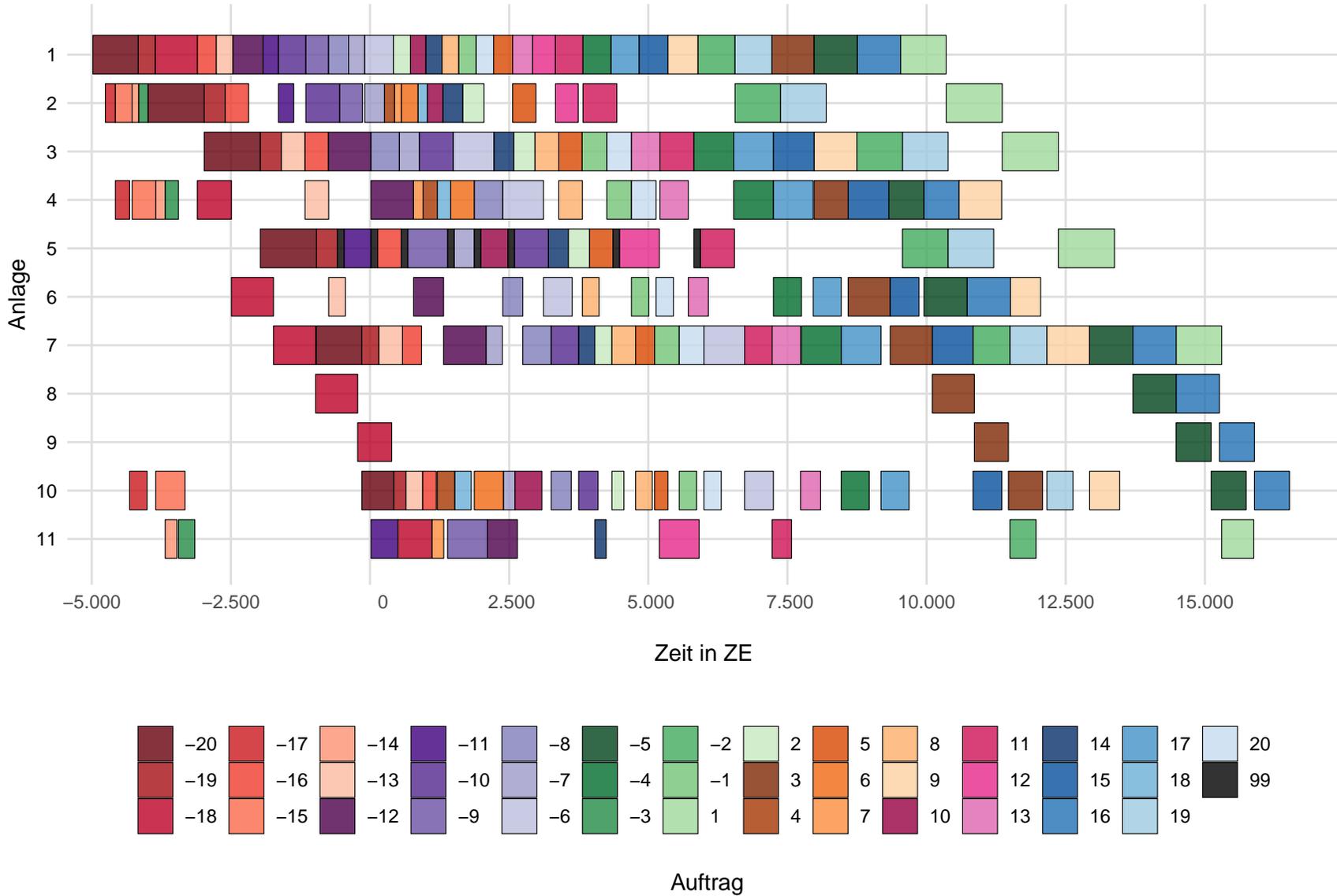


Abbildung 4.7: Gantt Chart - KOZ zufällig

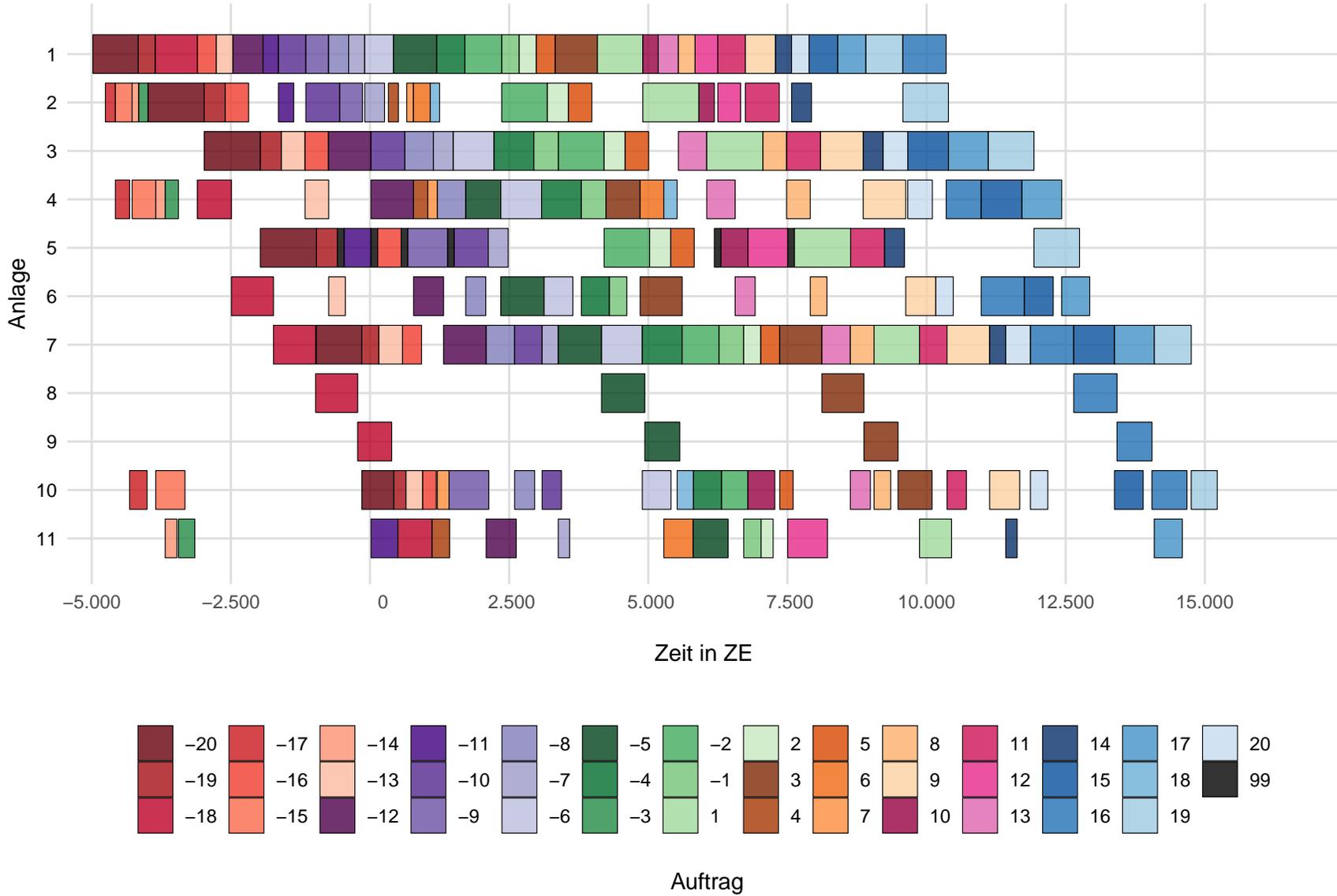


Abbildung 4.8: Gantt Chart - Frozen Zone/Lieferdatum zufällig

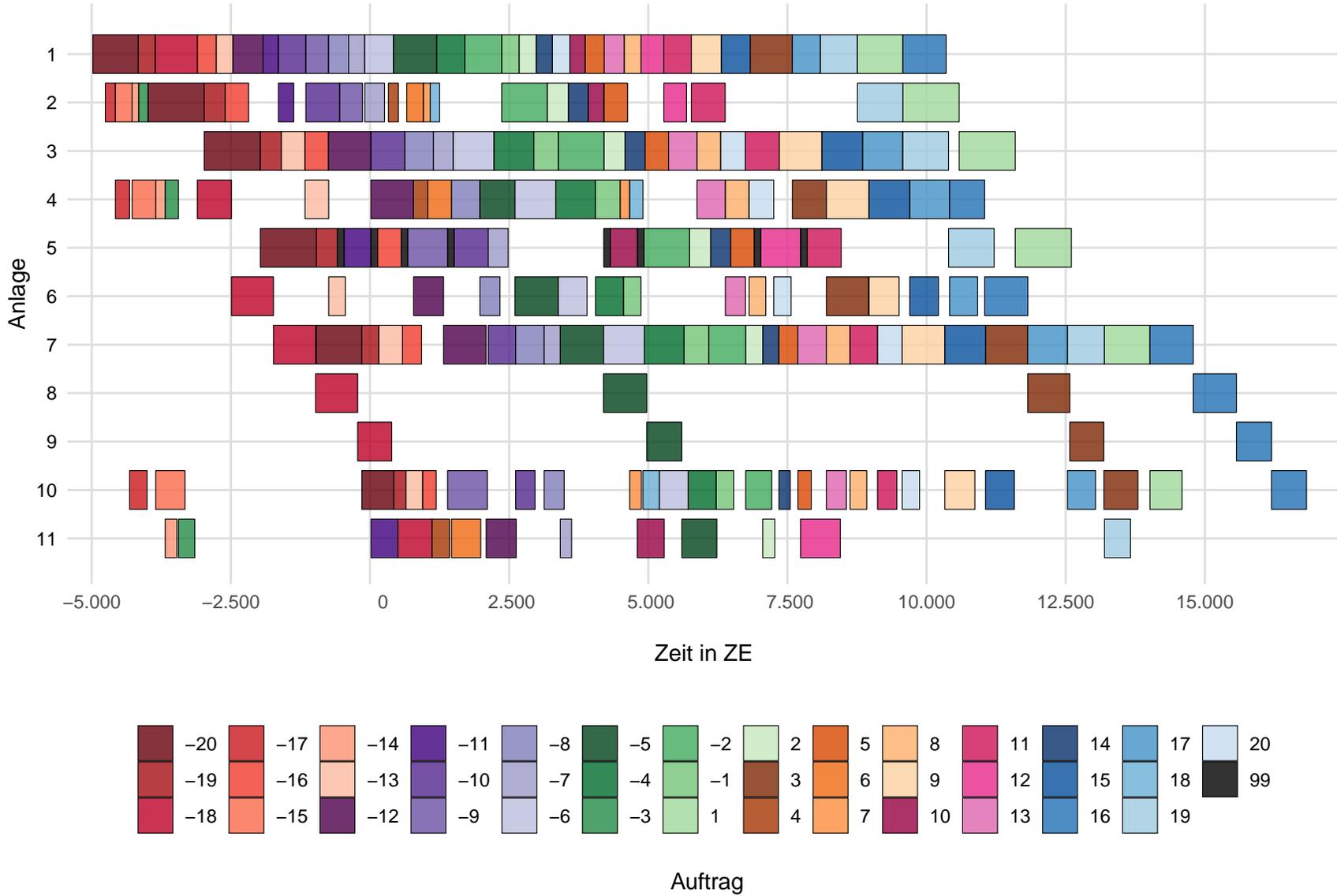


Abbildung 4.9: Gantt Chart - Frozen Zone/Schlupfzeit zufällig

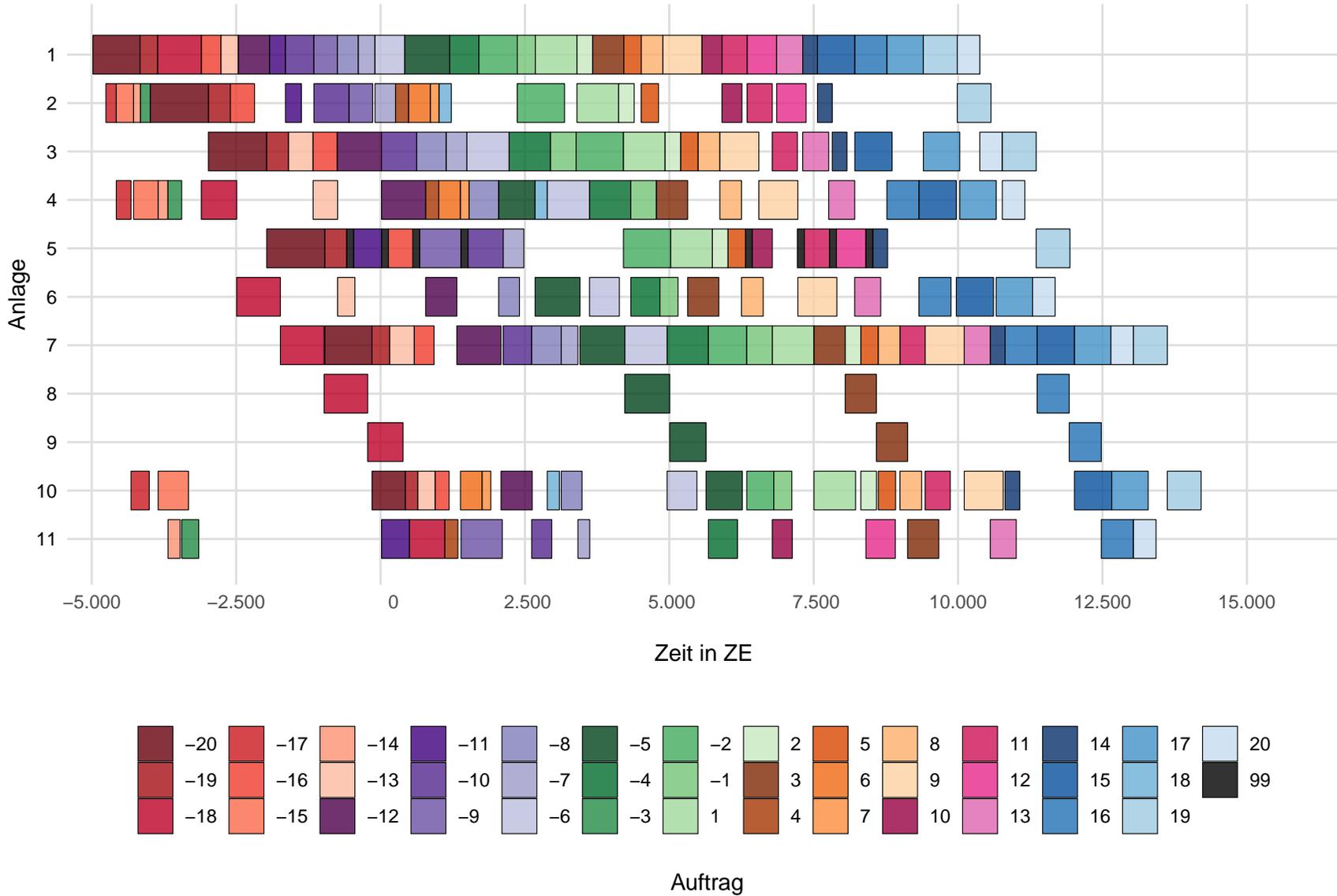


Abbildung 4.10: Gantt Chart - FIFO getaktet

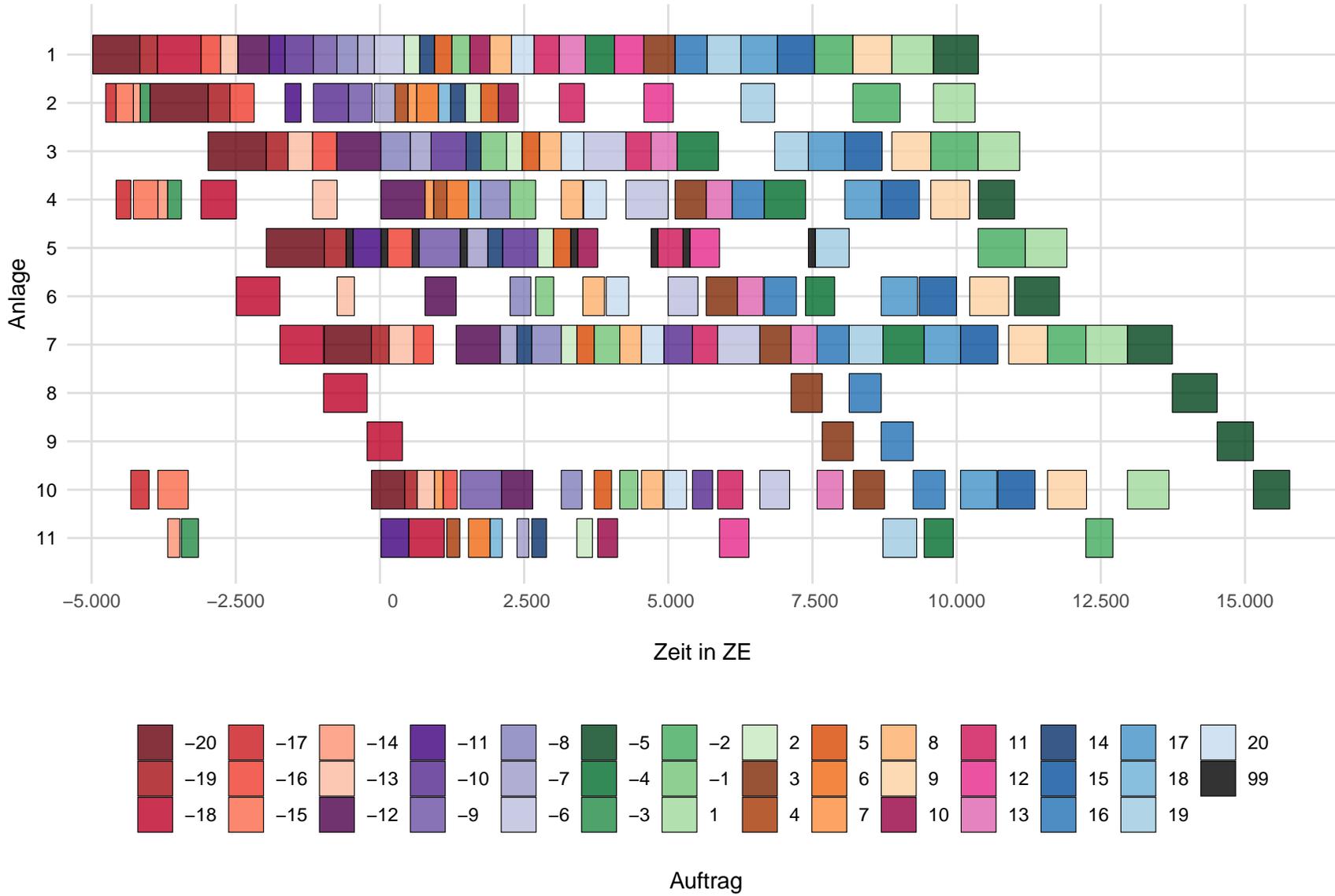


Abbildung 4.11: Gantt Chart - KOZ getaktet

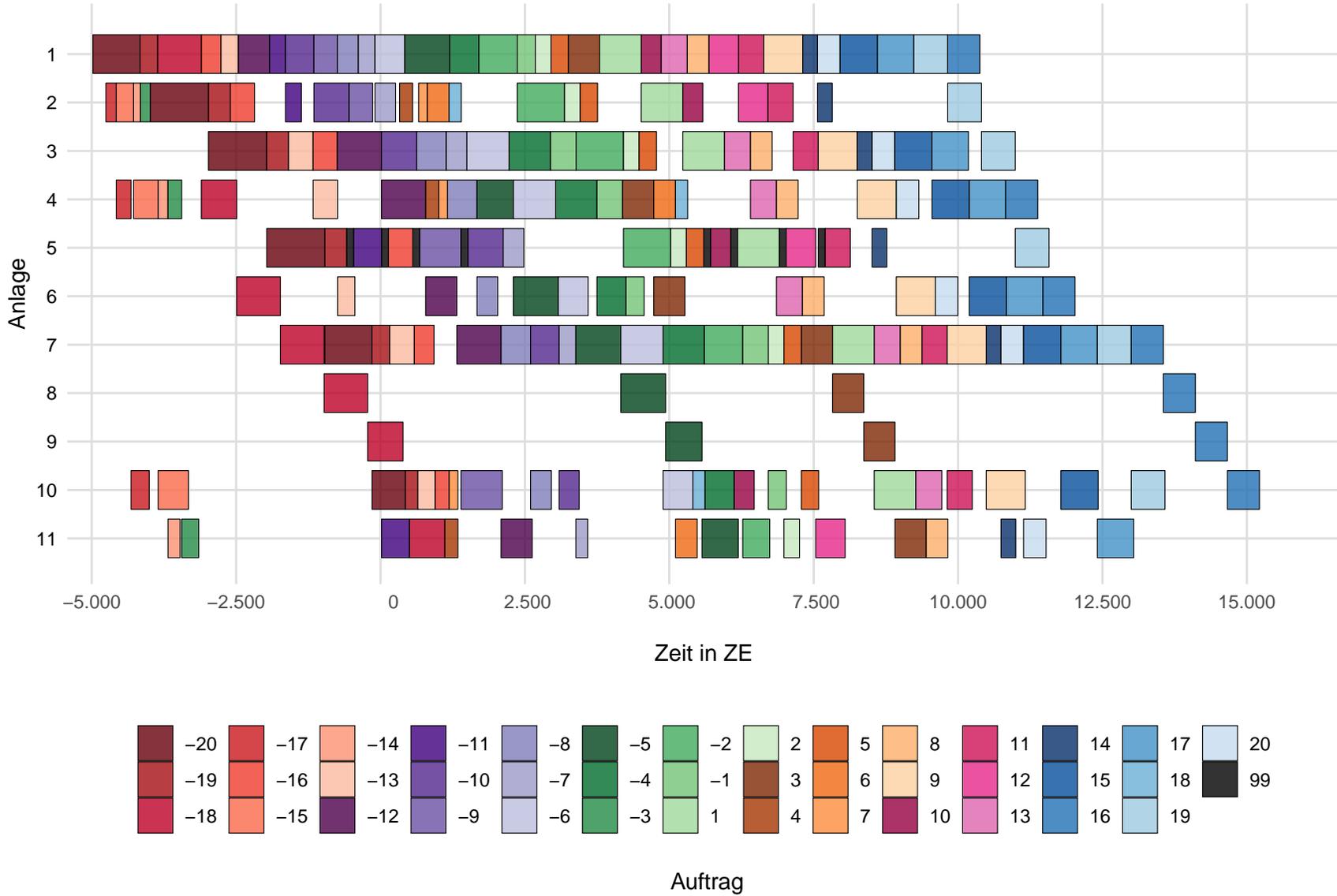


Abbildung 4.12: Gantt Chart - Frozen Zone/Lieferdatum getaktet

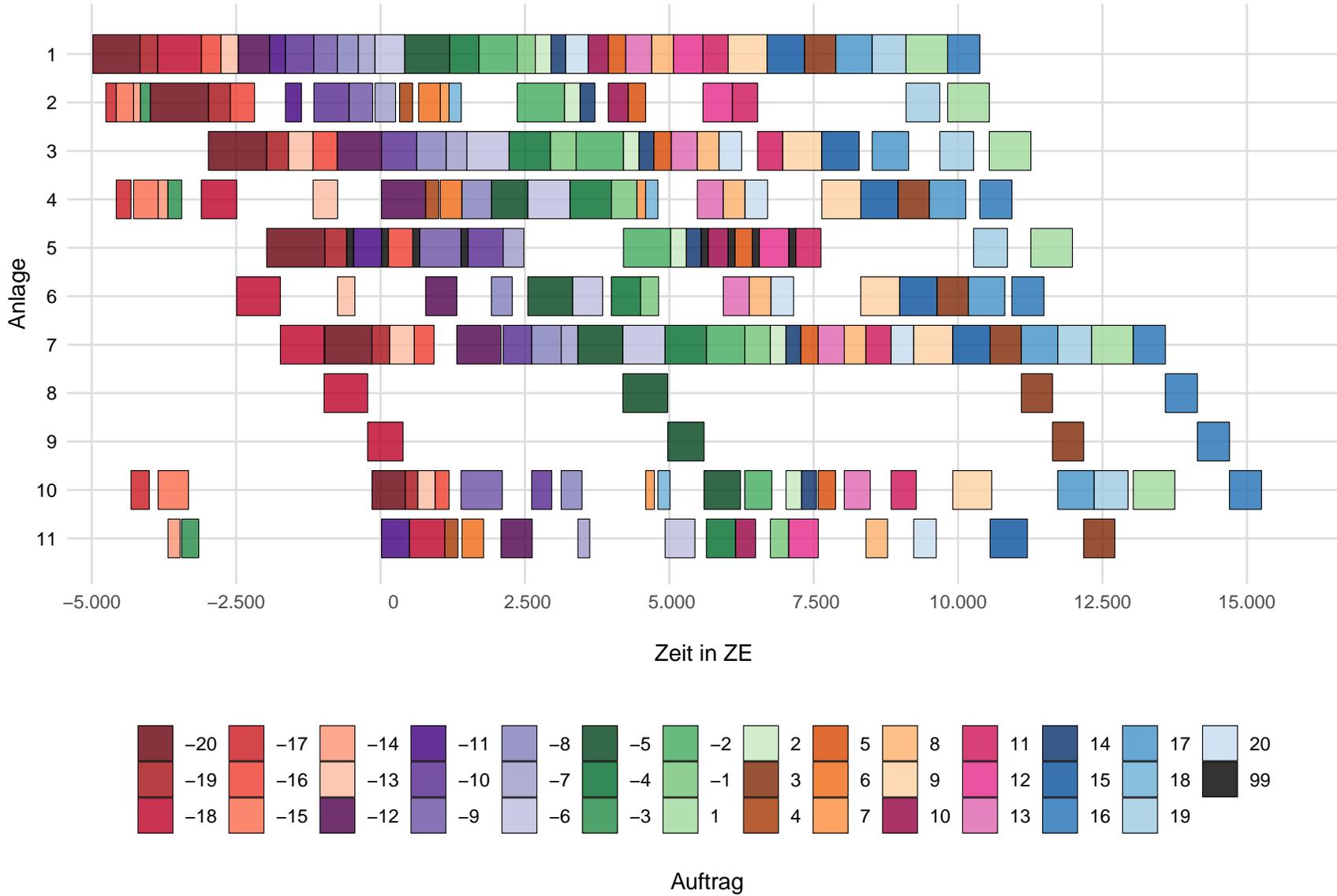


Abbildung 4.13: Gantt Chart - Frozen Zone/Schlupfzeit getaktet

4.5 Resultate bezüglich der Forschungsfrage

Dieser Abschnitt behandelt die Beantwortung der Frage, welche Auswirkungen die Anwendung verschiedener Prioritätsregeln in der variantenreichen Fertigung auf zeitbezogene Key Performance Indikatoren hat.

Eine Produktionssimulation kann auf verschiedene Weisen ausgewertet werden. In Kapitel 3.2.4 hat sich herausgestellt, dass die Faktoren Kosten, Durchlaufzeit und Liefertreue die richtungsweisenden Elemente in der Feinplanung sind. Die fehlende Unabhängigkeit zwischen diesen Variablen gewährleistet, dass eine Fokussierung auf die bloße zeitliche Komponente genügend Aussagekraft besitzt. Die vorgestellte Fallstudie und die zur Lösung des Problems entwickelte Simulation besitzen einen dementsprechend auf Zeit ausgerichteten Aufbau.

Bei der Auswertung der Resultate liegt der Schwerpunkt auf den Bestellungen 1 - 20 der Auftragsliste. Die Gesamtauftragsanzahl der Analyse entspricht demnach 20 Stück.

Zur Aufbereitung der Ergebnisse wurde speziell die Darstellung als Boxplot ausgewählt. Diese Grafiken bieten den Vorteil einer hohen Informationsdichte. Die Abbildungen zeigen Minimal-, Maximalwerte, Quartilen und Mediane. Zusätzlich sind die Mittelwerte als weiße Punkte dargestellt.

Aufgrund der geringen Anzahl an Parametern können schon einzelne Ausreißer die Berechnung des Mittelwertes bzw. der Standardabweichung enorm beeinflussen. Der Mittelwert wird immer in Richtung der Ausreißer gelenkt, wohingegen der Median die Daten halbiert. Das ist auch der Grund für die häufigen Abweichungen zwischen Medianen und Mittelwerten in den verschiedenen Grafiken.

4.5.1 Gesamtdurchlaufzeit

Ein Key Performance Indikator (KPI) ist die Durchlaufzeit. Sie gibt an, wie lange ein Produkt für die gesamte Fertigung von der Auftragsauslösung bis zum endgültigen Versand benötigt.

Die Durchlaufzeit (DLZ) eines Produktes berechnet sich folgendermaßen:

$$DLZ_i = \text{Endzeitpunkt}_i - \text{Startzeitpunkt}_i \quad (2)$$

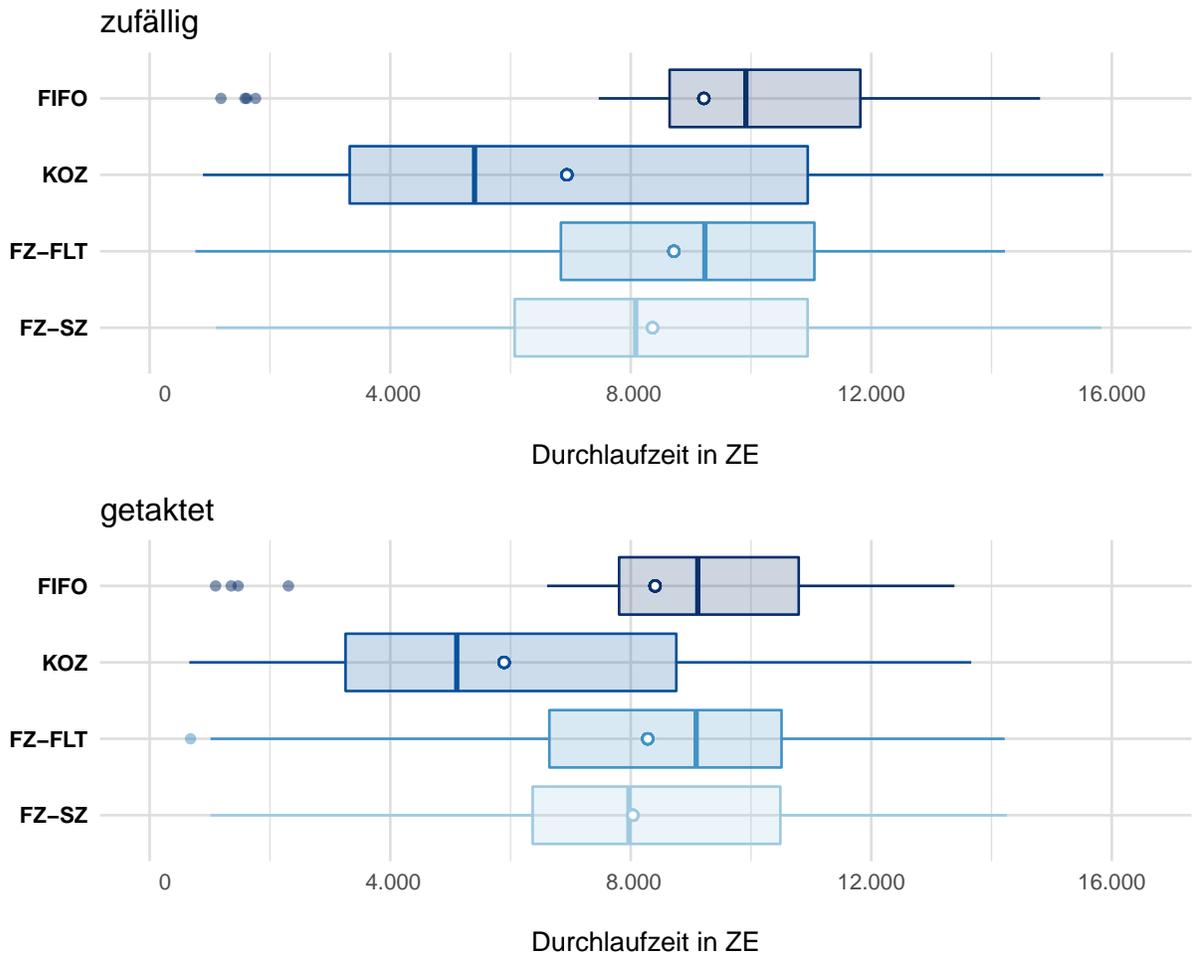


Abbildung 4.14: Durchlaufzeitenvergleich

In Abbildung 4.14 besteht die Prioritätsregel KOZ mit einem deutlich geringeren Mittelwert. Allerdings besitzt diese Variante eine gleichmäßige Streuung über einen großen Zeitraum. Im Gegensatz dazu befinden sich bei Anwendung der Regel FIFO 50 % der Werte in einem geringen Streubereich.

In der getakteten Variante liefert die Priorisierung nach dem frühesten Liefertermin und nach der Schlupfzeit ähnliche Werte. Lediglich in der Produktionssimulation mit zufälligen

Prozesszeiten weist FLT eine deutlich kleinere Streuung als SZ auf und der Maximalwert an auftretenden Durchlaufzeiten ist um 1.603 Zeiteinheiten geringer.

4.5.2 Wartezeit

Die Wartezeit ist ein Bestandteil der Durchlaufzeit. Diese Komponente gibt die Dauer an, welche ein Produkt in der Produktionslinie verweilt, ohne einer Bearbeitung unterzogen zu werden. Die Kalkulation sieht folgendermaßen aus:

$$Wartezeit_i = DLZ_i - \sum^j Prozesszeit_j \quad (3)$$

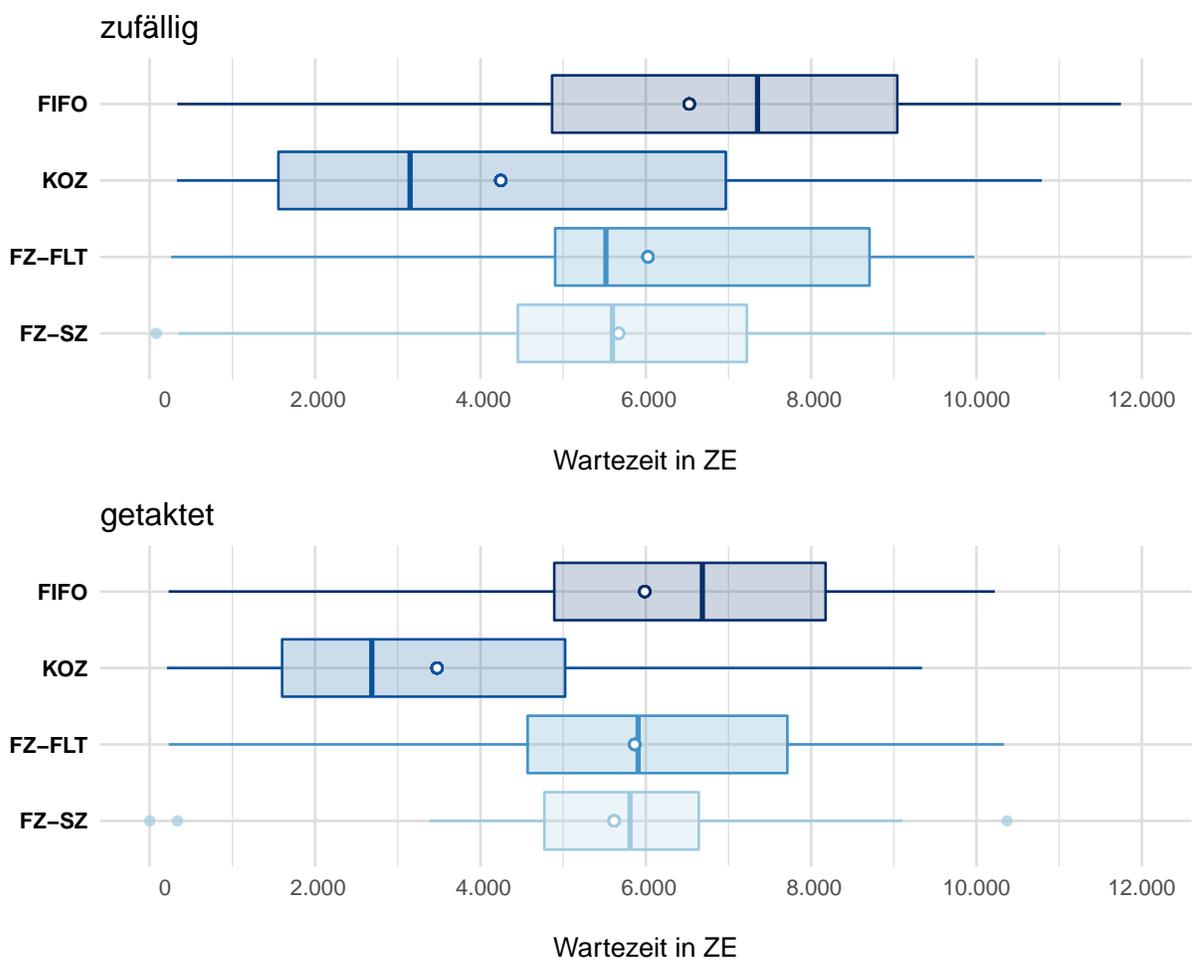


Abbildung 4.15: Vergleich der Wartezeiten

Die Betrachtung der Wartezeit zeigt im Vergleich zur Durchlaufzeit nur ein minimal differenziertes Bild. Zwei Prioritätsregeln stechen in Abbildung 4.15 heraus. Durch Verwendung der Regel „Kürzeste Operationszeit“ besitzt dieser Simulationsdurchgang die höchste Anzahl an Aufträgen mit kurzen Wartezeiten. Sogar im Vergleich der Mittelwerte hängt diese Variante alle anderen deutlich ab.

Die zweite Besonderheit zeigt die Planungsregel „Schlupfzeit“ in Kombination mit einer Frozen Zone. Sie zeichnet sich durch den geringsten Interquartilsabstand aus. Das ist jene Spanne, in der die mittleren 50 % der Aufträge liegen. Infolgedessen weisen die Hälfte aller Aufträge mit der Planungsregel SZ eine Wartezeit in der Nähe des Medians auf. Die Tabelle 4.8 verdeutlicht den Unterschied der verschiedenen Regeln bezüglich dieser Eigenschaft.

Tabelle 4.8: Interquartilsabstand der Wartezeiten

	FIFO	KOZ	FZ-FLT	FZ-SZ
zufällig	4.175,5	5.412,0	3.803,0	2.769,2
getaktet	3.281,8	3.423,2	3.141,2	1.867,5

4.5.3 Liefertreue

Die Einhaltung von Lieferverbindlichkeiten ist ein Erfolgsfaktor eines jeden Unternehmens. Die Prioritätsregel KOZ besticht in diesem Bereich vor allem durch eine vergleichsweise hohe Erfüllungsquote von 55 % bzw. 60 %. Hingegen liefern die Reihungen nach dem frühesten Liefertermin bzw. der Schlupfzeit entsprechend Tabelle 4.9 nicht zufriedenstellende Ergebnisse.

Tabelle 4.9: Anzahl der pünktlichen Lieferungen

	FIFO	KOZ	FZ-FLT	FZ-SZ
zufällig	4	11	2	3
getaktet	5	12	2	2

4.5.4 Abweichung des Liefertermins

Die alleinige Betrachtung der Pünktlichkeit liefert allerdings keinen Aufschluss über die Güte der Prioritätsregeln.

$$\text{Abweichung des Liefertermins}_i = \text{Endzeitpunkt}_i - \text{gefordertes Lieferdatum}_i \quad (4)$$

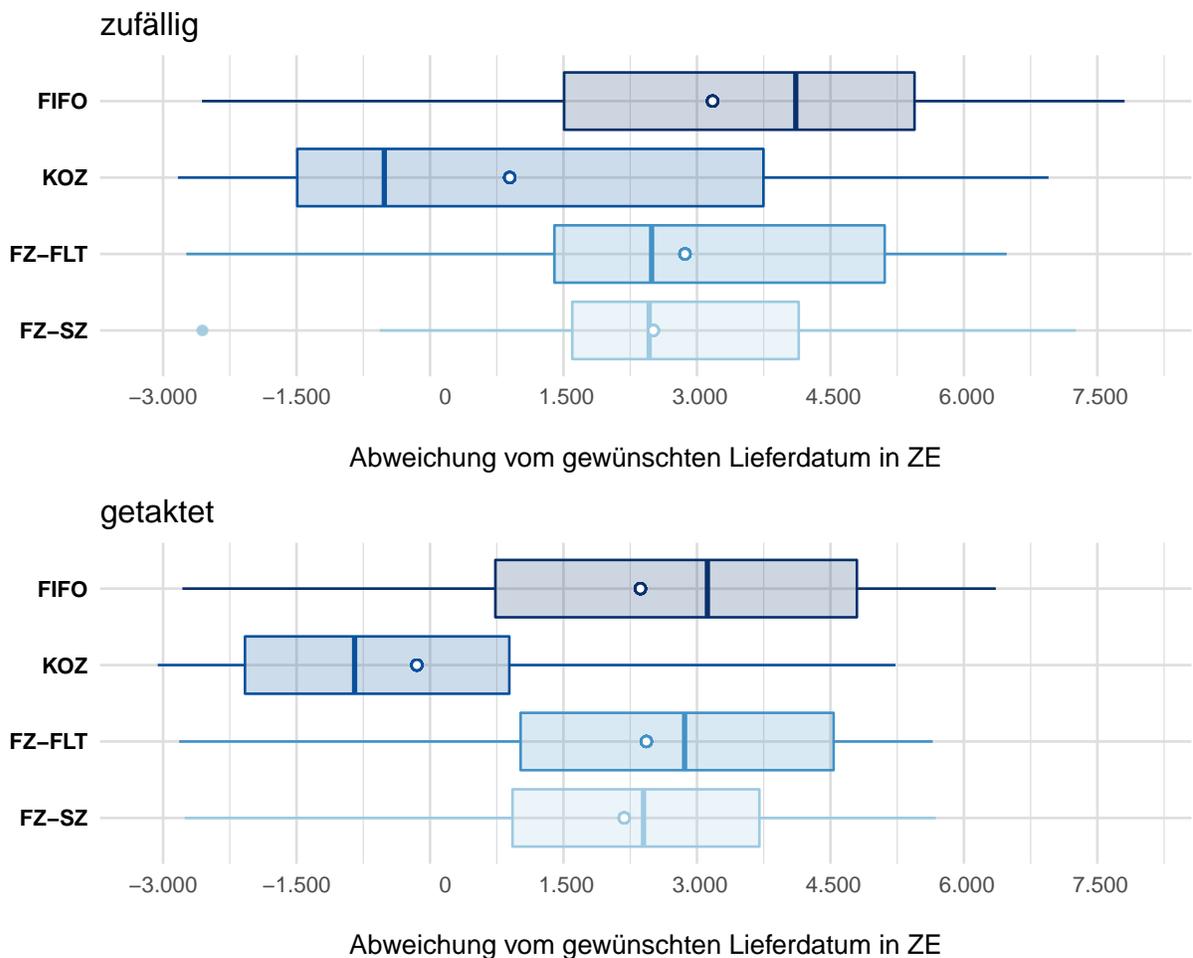


Abbildung 4.16: Lieferdatumsabweichungen im Vergleich

FIFO performte in diesem Bereich am schlechtesten. Die Abweichungen vom gewünschten Liefertermin sind im Mittel und bezüglich der Streuung am höchsten. Zudem treten die höchsten Verspätungen auf. Im Kontrast dazu liefert KOZ herausstechende Ergebnisse bei

der Einhaltung von Lieferterminen. Zwar werden die meisten Aufträge rechtzeitig vor dem Liefertermin abgeschlossen, allerdings besitzen die verspäteten Bestellungen oftmals den größten Verzug.

Die Regel „Frühester Liefertermin“ generiert teils bessere Ergebnisse als FIFO. Die Reihung der Aufträge nach der jeweiligen Schlupfzeit besitzt als charakteristisches Merkmal eine geringe Streuung. Wenige Bestellungen werden rechtzeitig vor Ablauf der Lieferfrist abgeschlossen. Die überfälligen Order weisen hingegen einen ähnlich großen Rückstand auf.

4.5.5 Bestand vor den Anlagen

Bestände können in einem Unternehmen erhebliche Probleme darstellen. Zum einen benötigen Rohmaterialien und Halberzeugnisse innerhalb der Produktionslinie große Lagerkapazitäten und zum anderen sind damit eine hohe Menge an monetären Einheiten in der Produktion gebunden.

Üblicherweise setzt sich der Bestand aus der Anzahl der Komponenten bzw. deren Materialwert zusammen. Zur einfacheren Aufbereitung der Ergebnisse der Produktionssimulation wird der Bestand in Zeiteinheiten umgerechnet.

Die Kalkulation des Bestandes vor den jeweiligen Anlagen erfolgt durch die Summierung der Bearbeitungszeiten zu jedem positiven Zeitpunkt und anschließend durch eine Division mit dem Endwert der Variable ZEIT.

Tabelle 4.10: durchschnittlicher Bestand vor den Anlagen

	FIFO	KOZ	FZ-FLT	FZ-SZ
zufällig	581,3	557,6	567,7	517,5
getaktet	563,6	490,9	519,6	512,6

Besonders die Reihung nach der Schlupfzeit sticht durch konstant geringe Werte beim mittleren Bestand an den Anlagen hervor. Eine weitere Prüfung der Abbildung 4.17 zeigt, dass die Unterschiede an den einzelnen Maschinen meist nur minimal sind und nur

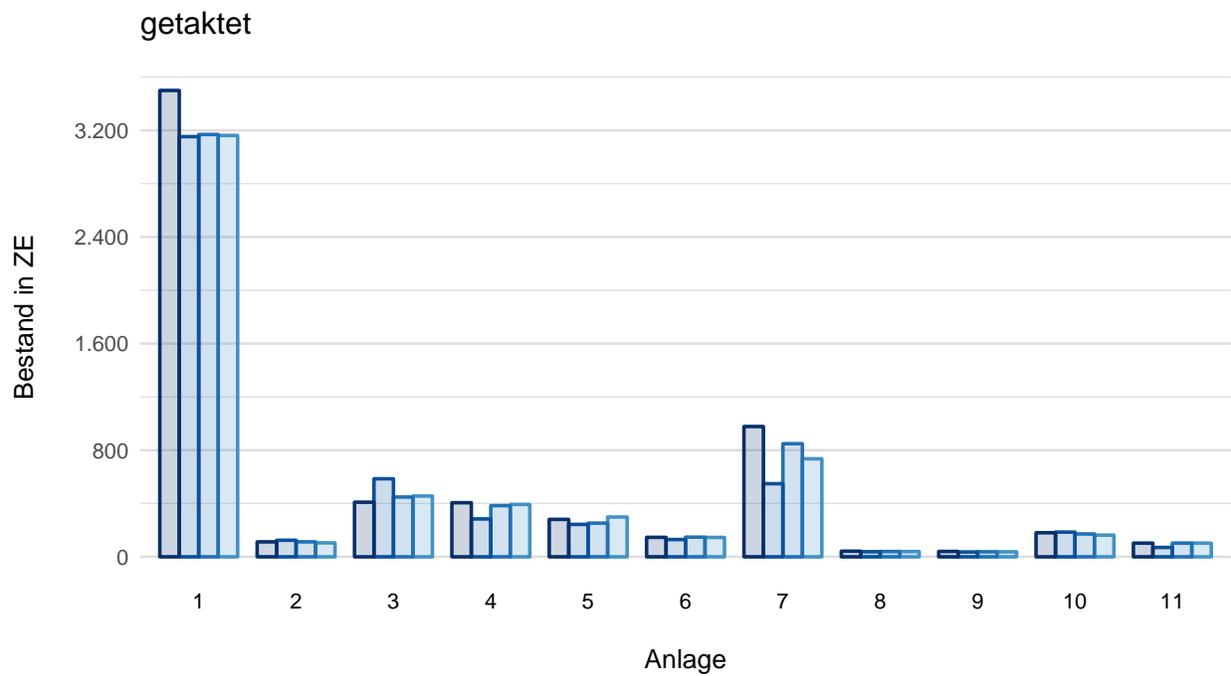
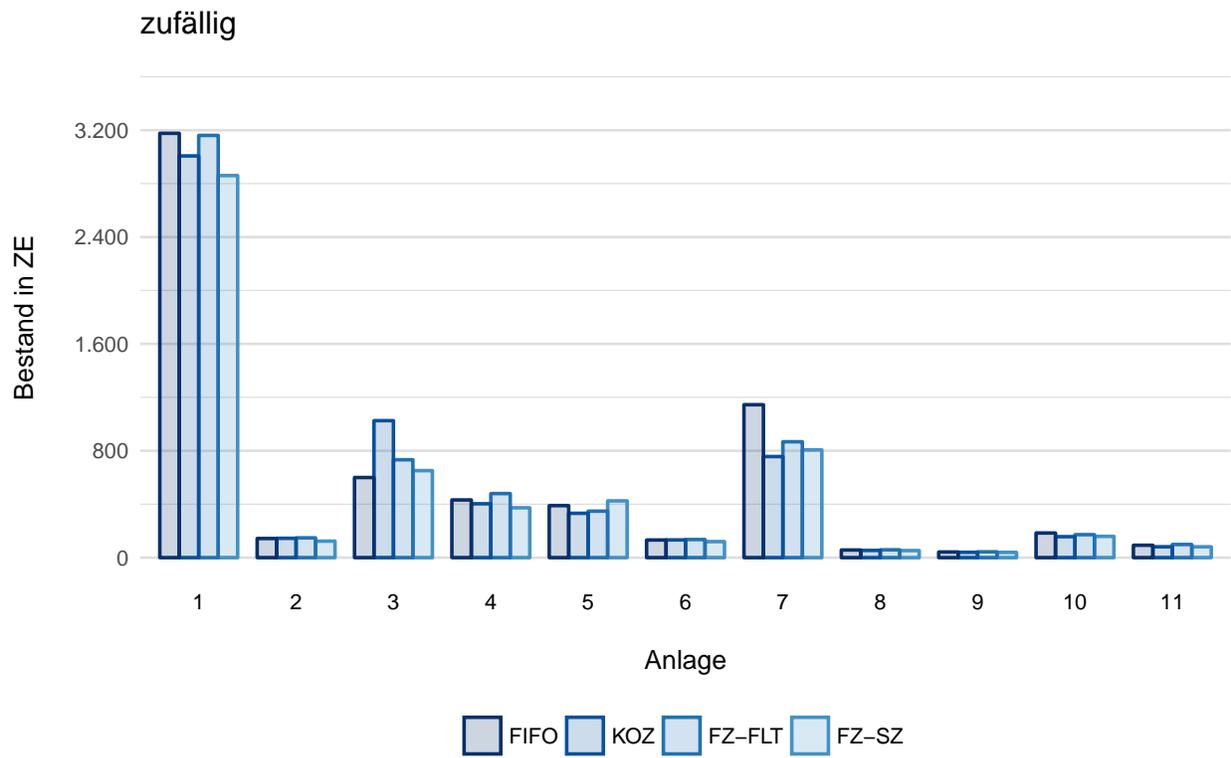


Abbildung 4.17: durchschnittlicher Bestand vor den Anlagen

wenige ausschlaggebende Ausreißer auftreten. Ein Indiz für die hohen Bestände an den Produktionsanlagen 1, 3 und 7 ist, dass diese die Engpässe der Produktion darstellen. Diese Tatsache lässt sich durch die Betrachtung der Abbildungen 4.6 bis 4.13 vor allem für Anlage 1 bestätigen.

Die Anlage 1 ist für die meisten Aufträge die erste Bearbeitungsstation. Zudem finden die Auftragsauslösungen in kurz aufeinanderfolgenden Intervallen statt. Diese beiden Tatsachen sind die Ursachen für die hohen durchschnittlichen Bestände an dieser Arbeitsstation.

Bei Verwendung der Planungsvorschrift KOZ zeigt die Einführung einer getakteten Prozesszeit in der behandelten Fallstudie eine hohe Wirkung auf den Bestand im Produktionssystem.

4.5.6 Zusammenfassung

Die aufbereiteten Resultate der Fallstudie zeigen, dass sich die verwendeten elementaren Planungsregeln größtenteils grundlegend voneinander unterscheiden. Ein kurzer Vergleich der wichtigsten Parametern ist in Tabelle 4.11 dargestellt.

Die Prioritätsregel „First-in/First-out“ besitzt den Vorteil einer einfachen Implementierung und einer simplen Umsetzung in der Praxis. Die Analyse der verschiedenen Indikatoren zeigt, dass die Planungsvorschrift in keinem Bereich durch gute Ergebnisse hervorsteicht. Diese Methode eignet sich infolgedessen nicht zur Anwendung in einem pünktlichkeitsorientierten Unternehmen.

Die Verwendung der Regel „Kürzeste Operationszeit“ liefert gute Ergebnisse bei der Pünktlichkeit, der Durchlaufzeit und der Wartezeit. Die verspäteten Aufträge weisen allerdings einen hohen Verzug auf. Die Standardabweichung, ein Maß für die Streuung der Stichprobenwerte, ist zudem durchgängig auf einem hohen Level. Inhomogene Prozesszeiten führen dazu, dass ein Auftrag mit einem großen Volumen erst zum Simulationsende ausgeführt wird. Dieser Sachverhalt ist in den Abbildungen 4.7 und 4.11 ersichtlich.

Die Priorisierungen nach dem „Frühesten Liefertermin“ und der „Schlupfzeit“ resultieren in ähnlichen Ergebnissen. Bei beiden Varianten werden nur wenige Aufträge rechtzeitig

Tabelle 4.11: Auszug von wichtigen Parametern

	FIFO	KOZ	FZ-FLT	FZ-SZ
Durchlaufzeit				
<i>zufällig</i>				
Mittel	9.216,0	6.936,8	8.717,4	8.361,6
Stdabw.	4.391,8	4.811,2	3.815,7	4.068,0
<i>getaktet</i>				
Mittel	8.404,8	5.892,8	8.283,0	8.034,9
Stdabw.	3.922,5	3.862,5	3.559,5	3.702,8
Wartezeit				
<i>zufällig</i>				
Mittel	6.525,4	4.246,1	6.026,8	5.671,0
Stdabw.	3.485,4	3.388,9	2.767,3	2.719,5
<i>getaktet</i>				
Mittel	5.987,5	3.475,6	5.865,7	5.617,6
Stdabw.	3.052,7	2.654,0	2.607,0	2.591,8
Abweichung vom Liefertermin				
<i>zufällig</i>				
Mittel	3.175,6	896,2	2.865,4	2.509,7
Stdabw.	4.647,2	4.461,9	4.366,0	4.331,0
<i>getaktet</i>				
Mittel	2.364,2	-147,7	2.430,9	2.182,9
Stdabw.	2.919,8	2.523,9	2.470,6	2.214,3

fertiggestellt. Die Mittelwerte der verschiedenen Parameter variieren nur minimal. Diese beiden Planungsvorschriften besitzen größtenteils die niedrigste Standardabweichung. Zudem ist die Reihung nach der Schlupfzeit durch geringe Interquartilsabstände gekennzeichnet.

Die oben genannten Eigenschaften werden den Prioritätsregeln ebenfalls in der Literatur zugeschrieben. Eine detaillierte Beschreibung dieser Sachlage und die Quellenverweise sind in Kapitel 4.2.2 angeführt.

Keine der vorgestellten Methoden liefert durchgängig optimale Ergebnisse. Im Vergleich zu lernenden Algorithmen stellen die Regeln eine simple und schnelle Variante für die Implementierung in einem Unternehmen dar. Die Anwendung von nur einer Methode reicht nicht zur Erzielung besserer Resultate aus. Eine Möglichkeit wäre die Kombination von KOZ mit SZ. Vorrangig sollen dabei die Aufträge an den Anlagen nach der kürzesten Operationszeit priorisiert werden, jedoch bei Unterschreiten einer voreingestellten Schlupfzeit ein größerer Prozessblock vorgezogen werden. Die Verknüpfung der elementaren Prioritätsregeln mit einem heuristischen Prozess kann eine adäquatere Näherung zum optimalen Ergebnis als die eingeschränkte Verwendung einer einzigen Regel erzielen.

Eine zusätzliche Erkenntnis stellt der Sachverhalt dar, dass die Wahl von getakteten Prozesszeiten nur geringe Auswirkungen auf die ausgewählten Kennzahlen hat.

Die Verwendung von komplexen Heuristiken und Metaheuristiken, wie genetische Algorithmen, stellen weitere Alternativen zur Lösungsgenerierung des Anlagenbelegungs- bzw. Job-Shop-Problems dar.

5 Diskussion und Ausblick

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die sorgfältige Aufbereitung der unterschiedlichen Publikationen im Themengebiet der Produktionsplanung der metallverarbeitenden Industrie hat gezeigt, dass eine Trennung zwischen Grob- und Feinplanung nur in wenigen Fällen vorkommt. Die Grenzen zwischen diesen Planungsarten verschwimmen zusehends. Es zeigt sich der Trend hin zu einem kontinuierlichen Planungsprozess.

Die metallverarbeitende Industrie ist geprägt, durch eine Chargenfertigung mit dem Fokus auf eine fließende Produktion. Die Zielsetzung der Planung ist sehr vielfältig. Vor allem die Kriterien Kosten, Durchlaufzeit, Liefertreue, Rüstzeiten und Bestand sind wichtige Faktoren bei der Planungserstellung.

Die Bearbeitung der Fallstudie hat ergeben, dass durch die alleinige Anwendung von einzelnen Methoden keine durchgängig brauchbaren Resultate erreicht werden können. Die Priorisierung nach der kürzesten Operationszeit generiert im Bereich der Pünktlichkeit die besten Ergebnisse. Es treten allerdings auch Fälle mit sehr hohen Verspätungen auf. Die Reihung durch die Schlupfzeit ergibt eine geringe Streuung der Kennzahlen. Die Planungsregel weist eine hohe Auftragsanzahl mit einem einheitlichen Verzug auf.

Die Prioritätsregeln unterscheiden sich maßgeblich in ihrer Komplexität und in der Schwierigkeit ihrer Anwendung. Die Planungsregeln FIFO, KOZ und FLT sind einfach zu implementieren. Die Berechnung der Schlupfzeit ist verhältnismäßig etwas aufwendiger. Die Reihung nach dieser Methode benötigt vergleichsweise viele Rechenoperationen. Die vorgestellten Planungsvorschriften stellen lediglich simple Heuristiken dar, die eine geringe Komplexität aufweisen. Im Gegensatz dazu wäre die Implementierung einer Metaheuristik um ein Vielfaches aufwändiger.

Das Potential für Optimierungsalgorithmen ist sehr hoch. Die Verwendung von Metaheuristiken oder von künstlicher Intelligenz ermöglicht den Einsatz einer situationsabhängigen Reihenfolgenplanung. Dadurch könnte der Personaleinsatz im

Planungsprozess erheblich reduziert bzw. die Planer essentiell in ihrer Entscheidungsfindung entlastet werden.

5.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Literaturanalyse zeigt, dass der Trend in Richtung einer wachsenden Variantenvielfalt geht und damit unweigerlich eine Zunahme der Komplexität in der Produktionsplanung hervorruft. Dieser Sachverhalt stellt diesen Bereich zusehends vor neuen Herausforderungen. Insbesondere immer kürzere Planungshorizonte und eine Vielzahl an kundenspezifischen Aufträgen erhöhen den Arbeitsaufwand enorm. Besonders die möglichst weitgehende Entkoppelung menschlicher Tätigkeit hin zu einer automatisierten Vorgangsweise hat an Bedeutung dazugewonnen. Aus diesem Grund beschäftigt sich die Forschung zu einem großen Teil mit der Implementierung und korrekten Anwendung von Algorithmen. Zum Einsatz kommen neben Heuristiken und Metaheuristiken auch künstliche Intelligenz.

Bei der Planungserstellung werden in den wissenschaftlichen Arbeiten mehrere Ziele zugleich verfolgt. Diese Tatsache erhöht den Schwierigkeitsgrad erheblich. Die aufbereitete Fallstudie hat deutlich gezeigt, dass die Anwendung von einzelnen Prioritätsregeln nicht zur adäquaten Erfüllung der Zielparameter ausreicht. Infolgedessen kristallisiert sich die Notwendigkeit von moderner Informationstechnik im Planungsprozess heraus.

Resümierend lässt sich daraus schließen, dass sowohl die Literaturanalyse als auch die Fallstudie zum selben Resultat gelangen. Demzufolge wird eine stärkere Integration der Informationstechnik in den Planungsprozess zukünftig eine wichtige Rolle spielen.

5.3 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

In der Literaturanalyse wurde nur ein Reviewprozess durchgeführt. Das bedeutet, dass die Publikationen nur von einer Einzelperson geprüft und eingeordnet wurden. Infolgedessen besteht die Möglichkeit, dass Abweichungen in der Kategorisierung auftreten.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den wissenschaftlichen Publikationen beziehen sich auf den

Bereich der metallverarbeitenden Industrie. Die Resultate der Literaturanalyse können nur auf diese Materie angewendet werden.

Die angrenzenden Themengebiete und die verwandten Industrien, wie die Automobilbranche, werden keiner gesonderten Betrachtung unterzogen. Zur Berücksichtigung der jeweiligen Arbeiten spielt lediglich die Themenrelevanz eine Rolle.

Die behandelte Fallstudie stellt eine Stichprobe mit zwei verschiedenen Prozesszeiten dar. Die Resultate sind demnach nur begrenzt aussagekräftig. Die getätigten Äußerungen beziehen sich nur auf den konkreten Fall. Um eine allgemeine Feststellung für die variantenreiche Fertigung treffen zu können, müsste eine Vielzahl an Samples behandelt werden. Durch einen größeren Stichprobenumfang würden auftretende Ausreißer nicht mehr so stark gewichtet.

5.4 Mögliche Schritte zur Weiterentwicklung

Wie bereits erwähnt, ist die Literaturanalyse nur für ein abgegrenztes Themengebiet aussagekräftig. Die Ausweitung der Analyse auf andere Industrien und die Gegenüberstellung der Resultate würden weitere Erkenntnisse über die Produktionsplanung liefern. Dadurch könnten Rückschlüsse auf die Spezifikationen der verschiedenen Fertigungen gemacht werden.

Der Programmcode der Produktionssimulation wurde nicht mit dem Ziel, ressourcenschonend zu arbeiten, konstruiert. Ein Optimierungsbedarf besteht trotz beachtlich kurzen Rechenlaufzeiten von ca. 16 Sekunden pro Simulationsdurchlauf. Funktionen werden teils ohne einer Datenmanipulation aufgerufen. Durch Verbesserungsmaßnahmen im Bereich Geschwindigkeit könnten einige Rechenoperationen eingespart werden. Als Zusatzinformation ist an dieser Stelle noch anzuführen, dass der Programmcode auf einem Computer mit einem Intel Core i7 2670QM-Prozessor mit einer Grundtaktfrequenz von 2,20 GHz ausgeführt wurde.

Der modulare Aufbau der Produktionssimulation ermöglicht eine Berücksichtigung von Rüstprozessen an allen Maschinen. Die Funktion könnte auch zur Rüstzeitenoptimierung genutzt werden. Für die Reihenfolgenplanung würden sich dadurch neue Möglichkeiten eröffnen.

Ein Funktionsblock müsste noch zur Berücksichtigung der Transportvorgänge in den Programmablauf integriert werden, um einen realitätsnahen Produktionsablauf abzubilden.

Der simple Aufbau der Funktionen erlaubt es, diese in einer Monte-Carlo-Simulation einzusetzen. Durch die zufällige Generierung einer Vielzahl an Bearbeitungslisten und deren Behandlung in der Produktionssimulation würde ein stochastisch unabhängiges Resultat erzeugt werden.

Die Verwendung moderner Informationstechnik in der Produktionsplanung resultiert in vielen Opportunitäten. Lernende Algorithmen und künstliche Intelligenzen benötigen für eine situationsgerechte Entscheidungsfindung eine riesige Datenmenge. Das Computerprogramm, das zur Lösung der Problemstellung erzeugt wurde, kann als Basis zur Verarbeitung von historischen Daten dienen. Auf dieser Grundlage könnten verschiedene und in ihrer Komplexität variierende Prioritätsregeln getestet und für zukünftige Entscheidungen situationsbedingt angewendet werden.

Die Überwachung der einzelnen Prozessschritte mit moderner Sensortechnik in Kombination mit einer künstlichen Intelligenz würde eine Entscheidung der anzuwendenden Prioritätsregel in Echtzeit ermöglichen.

Literaturverzeichnis

Abe, A., T. Maeda, T. Shimada und G. Nakano. 1998. A lot sizing combined scheduling method for plastic molding process. *Systems and Computers in Japan* 28, Nr. 2: 73–84.

Akhavei, Farhang, Arameh Khallaghi und Friedrich Bleicher. 2016. Development of a Knowledge-based Predictive Model to Estimate the Welding Process Time in Single Part Production Systems. In: *Procedia CIRP*, 55:212–217.

Akhoondi, Fateme und M. M. Lotfi. 2016. A heuristic algorithm for master production scheduling problem with controllable processing times and scenario-based demands. *International Journal of Production Research* 54, Nr. 12: 3659–3676.

Al-Aomar, Raid, Bashar El-Khasawneh und Sinan Obaidat. 2013. Incorporating time standards into generative CAPP: A construction steel case study. *Journal of Manufacturing Technology Management* 24, Nr. 1: 95–112.

As'Ad, Rami und Kudret Demirli. 2011. A bilinear programming model and a modified branch-and-bound algorithm for production planning in steel rolling mills with substitutable demand. *International Journal of Production Research* 49, Nr. 12: 3731–3749.

Auer, S., W. Mayrhofer und W. Sihn. 2012. Implementation of a comprehensive production planning approach in special purpose vehicle production. *Procedia CIRP* 3, Nr. 1 (Januar): 43–48.

Avecilla, Frenzel, Jannine Fameronag, Nida Polled, Alfred Gatdula und Rachel Villanueva. 2015. Set-up time reduction at Stamping Station 1 of Tri-R Allied Industries Incorporated. In: *IEOM 2015 - 5th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Proceeding*.

Azab, Ahmed und B. Naderi. 2014. A variable neighborhood search metaheuristic for cellular manufacturing with multitask machine tools. In: *Procedia CIRP*, 20:50–55. C.

Bal, Mert und Majid Hashemipour. 2011. Implementation of holonic scheduling and control in flow-line manufacturing systems: Die-casting case study. *Production Planning and Control*

22, Nr. 2: 108–123.

Balakrishnan, Anantaram und Joseph Geunes. 2003. Production Planning with Flexible Product Specifications: An Application to Specialty Steel Manufacturing. *Operations Research* 51, Nr. 1: 94–112.

Bauernhansl, Thomas. 2017. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*, hg. von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 1–31. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bausch, Raymond. 1992. A multicriteria scheduling tool using a branch-and-bound algorithm. *European Journal of Operational Research* 61, Nr. 1-2: 215–218.

Bicheno, John, Matthias Holweg und Jens Niessmann. 2001. Constraint batch sizing in a lean environment. *International Journal of Production Economics* 73, Nr. 1: 41–49.

Blackstone, John H., Don T. Phillips und Gary L. Hogg. 1982. A state-of-the-art survey of dispatching rules for manufacturing job shop operations. *International Journal of Production Research* 20, Nr. 1: 27–45.

Bowers, M. R., L. A. Kaplan und T. L. Hooker. 1995. A two-phase model for planning the production of aluminum ingot. *European Journal of Operational Research* 81, Nr. 1: 105–114.

Błazewicz, Jacek, Wolfgang Domschke und Erwin Pesch. 1996. The job shop scheduling problem: Conventional and new solution techniques. *European Journal of Operational Research* 93, Nr. 1 (August): 1–33.

Chan, Felix T S, K. C. Au und P. L Y Chan. 2006. A decision support system for production scheduling in an ion plating cell. *Expert Systems with Applications* 30, Nr. 4: 727–738.

Chen, Yu Wang, Yong Zai Lu, Ming Ge, Gen Ke Yang und Chang Chun Pan. 2012. Development of hybrid evolutionary algorithms for production scheduling of hot strip mill. *Computers and Operations Research* 39, Nr. 2: 339–349.

Chen, Yu-Wang, Yong-Zai Lu und Gen-Ke Yang. 2008. Hybrid evolutionary algorithm with marriage of genetic algorithm and extremal optimization for production scheduling. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology 36, Nr. 9-10: 959–968.

Cheng, Chun Hung und John Miltenburg. 2001. A Lagrangian relaxation algorithm for a production planning problem where products have alternate routings. *Infor* 39, Nr. 4: 333–350.

Chung, Huong Yu, Zamberi Jamaludin, Lokman Abdullah und Mohd Hisham Nordin. 2017. Implementation of RFID based tracking system for metal transport Items in an automotive industry. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering* 17, Nr. 3: 82–87.

Da Silva Etges, B.M.B., B.B. Pereira und T.J.S. Da Silveira. 2018. A lean approach to improve productivity in a coke oven refurbishment project: A case study. In: *IGLC 2018 - Proceedings of the 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction: Evolving Lean Construction Towards Mature Production Management Across Cultures and Frontiers*, 2:1111–1121.

Dekkers, Rob. 2018. Group technology: Amalgamation with design of organisational structures. *International Journal of Production Economics* 200: 262–277.

Dellaert, N. P. und M. T. Melo. 1995. Heuristic procedures for a stochastic lot-sizing problem in make-to-order manufacturing. *Annals of Operations Research* 59, Nr. 1: 227–258.

Denyer, David und David Tranfield. 2006. Using qualitative research synthesis to build an actionable knowledge base. *Management Decision* 44, Nr. 2: 213–227.

Denyer, David, David Tranfield, David Denyer und Palminder Smart. 2003. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review * 14, Nr. September 2016: 207–222.

Duarte, A, F Dedini, R Sanches und R Anderl. 2017. Technological forecasting in textile industry: From first to fourth industrial revolution. In: *Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future*, 381–386.

Duffie, N., J. Bendul und M. Knollmann. 2017. An analytical approach to improving due-date and lead-time dynamics in production systems. *Journal of Manufacturing Systems* 45:

273–285.

Garey, M. R., D. S. Johnson und Ravi Sethi. 1976. The Complexity of Flowshop and Jobshop Scheduling. *Mathematics of Operations Research* 1, Nr. 2: 117–129.

Geiger, Christopher D., Rieko Hase, Christos G. Takoudis und Reha Uzsoy. 1997. Alternative facility layouts for semiconductor wafer fabrication facilities. *IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology. Part C. Manufacturing* 20, Nr. 2: 152–163.

Geiger, Christopher D., Reha Uzsoy und Haldun Aytuğ. 2006. Rapid modeling and discovery of priority dispatching rules: An autonomous learning approach. *Journal of Scheduling* 9, Nr. 1 (Februar): 7–34.

Grabot, B. und M. L. Geneste. 1994. Dispatching rules in scheduling: A fuzzy approach. *International Journal of Production Research* 32, Nr. 4: 903–905.

Hompel, Michael und Thorsten Schmidt. 2013. *Warehouse Management: Automatisierung und Organisation von Lager*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Iannino, Vincenzo, Marco Vannocci, Marco Vannucci, Valentina Colla und Marcus Neuer. 2018. A multi-agent approach for the self-optimization of steel production. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology* 19, Nr. 5: 20.1–20.7.

Jacobi, Sven, Esteban Leon-Soto, Cristian Madrigal-Mora und Klaus Fischer. 2008. MasDISPO-xt: Annealing furnace planning inside the supply chain of steel production. In: *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, 17: 1 PART 1.

Jiang, Zeyi, Xinxin Zhang, Peng Jin, Fushan Tian und Yejian Yang. 2013. Energy-saving potential and process optimization of iron and steel manufacturing system. *International Journal of Energy Research* 37, Nr. 15: 2009–2018.

Karmarkar, Uday S. und Kumar Rajaram. 2012. Aggregate production planning for process industries under oligopolistic competition. *European Journal of Operational Research* 223, Nr. 3: 680–689.

Kim, H.-W., J.-S. Kim, J.-M. Yu, H.-H. Doh, D.-H. Lee und S.-H. Nam. 2010. Loading

algorithms for flexible manufacturing systems with partially grouped unrelated machines and tooling constraints. In: *3CA 2010 - 2010 International Symposium on Computer, Communication, Control and Automation*, 1:326–329.

Kingsman, Brian, Lee Worden, Linda Hendry, Alan Mercer und Elaine Wilson. 1993. Integrating marketing and production planning in make-to-order companies. *International Journal of Production Economics* 30-31, Nr. C: 53–66.

Krishnamurthy, A. und W.K.V. Chand. 2013. Evaluation of production orders split inelectrostatic painting company. In: *IIE Annual Conference and Expo 2013*.

Krumeich, Julian, Dirk Werth und Peter Loos. 2016. Prescriptive Control of Business Processes. *Business & Information Systems Engineering* 58, Nr. 4: 261–280.

Liberati, Alessandro, Douglas G. Altman, Jennifer Tetzlaff, Cynthia Mulrow, Peter C. Gøtzsche, John P.A. Ioannidis, Mike Clarke, P. J. Devereaux, Jos Kleijnen und David Moher. 2009. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: Explanation and elaboration. *PLoS Medicine* 6, Nr. 7.

Lu, Shan, Hongye Su, Charlotta Johnsson, Yue Wang und Lei Xie. 2015. Modeling and optimization methods of integrated production planning for steel plate mill with flexible customization. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 23, Nr. 12: 2037–2047 (zit. 2015a).

Lu, Shan, Hongye Su, Lian Xiao und Li Zhu. 2015. Application of Two-Phase Fuzzy Optimization Approach to Multiproduct Multistage Integrated Production Planning with Linguistic Preference under Uncertainty. *Mathematical Problems in Engineering* 2015: (zit. 2015b).

Mariano, E, F Nucci, A D Prete und A Grieco. 2015. *Minimization of energy consumptions by means of an intelligent production scheduling*. Bd. 639.

Matičević, G., N. Majdandžić und T. Lovrić. 2008. Production scheduling model in aluminium foundry. *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 54, Nr. 1: 37–48.

McGee, Victor E. und David F. Pyke. 1996. Periodic production scheduling at a fastener

manufacturer. *International Journal of Production Economics* 46-47: 65–87.

Mebarki, Nasser und Atif Shahzad. 2013. Correlation among tardiness-based measures for scheduling using priority dispatching rules. *International Journal of Production Research* 51, Nr. 12: 3688–3697.

Metaxiotis, K. S., Dimitris Askounis und John Psarras. 2002. Expert systems in production planning and scheduling: A state-of-the-art survey. *Journal of Intelligent Manufacturing* 13, Nr. 4: 253–260.

Miltenburg, J. 2001. Production planning problem where products have alternative routings and bills-of-material. *International Journal of Production Research* 39, Nr. 8: 1755–1775.

Moengin, P. und R. Fitriana. 2015. Model of integrated production-inventory-distribution system: The case of billet steel manufacturing. In: *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 2218:791–795.

Moher, D., A. Liberati, J. Tetzlaff, D.G. Altman, D. Altman, G. Antes, D. Atkins, et al. 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine* 6, Nr. 7.

Navon, Ronie, Ya'acov Rubinovitz und Mendi Coffler. 1998. Reinforcement-bar manufacture: From design to optimized production. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 11, Nr. 4: 326–333.

Okano, Hiroyuki, Andrew J. Davenport, Mark Trumbo, Chandra Reddy, Kunikazu Yoda und Masami Amano. 2004. Finishing line scheduling in the steel industry. *IBM Journal of Research and Development* 48, Nr. 5-6: 811–830.

Ong, Nan Shing. 1997. Productivity improvements for a small „made-to-order“ manufacturing environment. *Industrial Management & Data Systems* 97, Nr. 7: 251–258.

Qi, Dezhong, Sanqiang Zhang, Mingyong Liu und Yakuo Lei. 2017. An improved hierarchical genetic algorithm for collaborative optimization of manufacturing processes in metal structure manufacturing systems. *Advances in Mechanical Engineering* 9, Nr. 3.

Sambasivan, Murali und Salleh Yahya. 2005. A Lagrangean-based heuristic for multi-plant,

multi-item, multi-period capacitated lot-sizing problems with inter-plant transfers. *Computers and Operations Research* 32, Nr. 3: 537–555.

Schuh, Günther. 2012. *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hg. von Günther Schuh und Volker Stich. Springer Berlin Heidelberg.

Seidel, Stephan, Matthias Franke, Frank Baumann, Heike Wilson und Ulrike Gromnitza. 2018. Enhancing the energy-efficient production of tempered glass by using simulation-based optimisation. In: *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA*, 1–4.

Slak, Aleš, Jože Tavcar und Jože Duhovnik. 2011. Application of genetic algorithm into multicriteria batch manufacturing scheduling. *Strojnikski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 57, Nr. 2: 110–124.

Su, Ling Huey und Hui Mei Wang. 2017. Minimizing total absolute deviation of job completion times on a single machine with cleaning activities. *Computers and Industrial Engineering* 103: 242–249.

Tang, Lixin, Jiyin Liu, Aiying Rong und Zihou Yang. 2001. A review of planning and scheduling systems and methods for integrated steel production. *European Journal of Operational Research* 133, Nr. 1: 1–20.

Tanizaki, T., H. Katagiri und A.O.N. René. 2018. Scheduling algorithms using metaheuristics for production processes with crane interference. *International Journal of Automation Technology* 12, Nr. 3: 297–307.

Tu, Yiliu. 1996. Automatic scheduling and control of a ship web welding assembly line. *Computers in Industry* 29, Nr. 3: 169–177.

Uman, Lindsay S. 2011. Information management for the busy practitioner: Systematic reviews and meta-analyses. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry* 20, Nr. 1: 57–59.

Vasudevan, Karthik, Eric J. Lammers, Edward J. Williams und Onur M. Ülgen. 2010. Application of simulation to design and operation of steel mill devoted to manufacture of

- line pipes. In: *Proceedings - 2nd International Conference on Advances in System Simulation, SIMUL 2010*, 1–6.
- Wang, Hong Bing, An Jun Xu, Lin Yao, Nai Yuan Tian und Xi Du. 2010. Applying an improved genetic algorithm for solving the production scheduling problem of steelmaking and continuous casting. *Beijing Keji Daxue Xuebao/Journal of University of Science and Technology Beijing* 32, Nr. 9: 1232–1237.
- Witt, Andreas und Stefan Voss. 2011. Application of a mathematical model to an intermediate-to long-term real-world steel production planning problem based on standard software. *European J. of Industrial Engineering* 5, Nr. 1: 81.
- Witt, Andreas und Stefan Voß. 2007. Simple heuristics for scheduling with limited intermediate storage. *Computers and Operations Research* 34, Nr. 8: 2293–2309.
- Won, S., H. Bae und R.A. Sutrisnowati. 2018. Production scheduling in steel manufacturing with cutting and parallel operations. *ICIC Express Letters, Part B: Applications* 9, Nr. 8: 869–877.
- Yang, J., B. Wang, C. Zou, X. Li, T. Li und Q. Liu. 2018. Optimal charge planning model of steelmaking based on multi-objective evolutionary algorithm. *Metals* 8, Nr. 7.
- Yin, Yong, Kathryn E. Stecke und Dongni Li. 2018. The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0. *International Journal of Production Research* 56, Nr. 1-2: 848–861.
- Zanoni, Simone und Lucio Zavanella. 2005. Model and analysis of integrated production-inventory system: The case of steel production. *International Journal of Production Economics* 93-94, Nr. SPEC.ISS.: 197–205.
- Zhang, Tao, Yue-Jie Zhang, Qipeng Zheng und P. Pardalos. 2011. A hybrid particle swarm optimization and tabu search algorithm for order planning problems of steel factories based on the Make-To-Stock and Make-To-Order management architecture. *Journal of Industrial and Management Optimization* 7, Nr. 1: 31–51.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Struktur der Arbeit	4
2.1	Referenzsichten des Aachener PPS-Modells	7
2.2	Stufendiagramm der Industriellen Revolutionen	8
2.3	Einflüsse auf die Produktion	11
2.4	Geschichte der Produktion	12
3.1	Die Schritte einer systematischen Literaturanalyse	14
3.2	Hauptsuchbegriffe	16
3.3	Ablauf der Artikelauswahl	18
3.4	Publikationen pro Jahr	27
3.5	Vorliegen einer deutlichen Unterscheidung zwischen den Planungsarten	28
3.6	Unterscheidung zwischen Grob- und Feinplanung	29
3.7	zeitlicher Horizont der Grobplanung	30
3.8	Flussprinzipien in der Produktion	31
3.9	Organisationsformen der Produktion	32
3.10	zeitlicher Horizont der Feinplanung	33
3.11	Kriterien der Planungerstellung	34
4.1	Gozintograph	42
4.2	Implementierung der Frozen Zone in Kombination mit SZ bzw. FLT	54
4.3	Zusammensetzung der Simulationsfunktion	55
4.4	Aufbau der Simulation - erster Teil	58
4.5	Aufbau der Simulation - zweiter Teil	59
4.6	Gantt Chart - FIFO zufällig	61
4.7	Gantt Chart - KOZ zufällig	62
4.8	Gantt Chart - Frozen Zone/Lieferdatum zufällig	63
4.9	Gantt Chart - Frozen Zone/Schlupfzeit zufällig	64
4.10	Gantt Chart - FIFO getaktet	65
4.11	Gantt Chart - KOZ getaktet	66
4.12	Gantt Chart - Frozen Zone/Lieferdatum getaktet	67

4.13 Gantt Chart - Frozen Zone/Schlupfzeit getaktet	68
4.14 Durchlaufzeitenvergleich	70
4.15 Vergleich der Wartezeiten	71
4.16 Lieferdatumsabweichungen im Vergleich	73
4.17 durchschnittlicher Bestand vor den Anlagen	75

Tabellenverzeichnis

3.1	Beispiel Grobplanung	21
3.2	Beispiel Feinplanung	23
3.3	Literaturanalyse	24
3.4	Häufigkeit von Mehrfachauswahlen	34
4.1	Ablaufmatrix	41
4.2	Zeitmatrix mit zufälligen Werten	43
4.3	Zeitmatrix in getakteter Ausführung	43
4.4	Rüstmatrix an Anlage 5	44
4.5	Auftragsliste	46
4.6	Gesamtoperationszeiten	47
4.7	Bestand	48
4.8	Interquartilsabstand der Wartezeiten	72
4.9	Anzahl der pünktlichen Lieferungen	72
4.10	durchschnittlicher Bestand vor den Anlagen	74
4.11	Auszug von wichtigen Parametern	77
A.1	Produktionsliste	124
A.2	Anlage 1	126
A.3	Anlage 2	128
A.4	Anlage 3	129
A.5	Anlage 4	130
A.6	Anlage 5	131
A.7	Anlage 6	132
A.8	Anlage 7	132
A.9	Anlage 8	134
A.10	Anlage 9	134
A.11	Anlage 10	135
A.12	Anlage 11	136

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
KPI	Key Performance Indikator
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TPS	Toyota Produktionssystem
CAD	Computer Aided Design
IoT	Internet der Dinge
KI	Künstliche Intelligenz
RFID	Radio frequency identification
A	Anlage
P	Produkt
ZE	Zeiteinheit
FIFO	First-in/First-out
KOZ	Kürzeste Operationszeit
FLT	Frühester Liefertermin
SZ	Schlupfzeit
FZ	Frozen Zone
DLZ	Durchlaufzeit

Legende

Symbol	Definition
	Startereignis
	Endereignis
	Logischer Operator (OR)
	Logischer Operator (AND)
 	Aufgabe, Tätigkeit, Faktor
	Aktivitäts-/Informationsfluss

A Anhang

A.1 Programmcode

A.1.1 Erzeugung eines fiktiven Fallbeispiels

A.1.1.1 Erstellung einer zufälligen Ablaufmatrix

```
1 Ablaufm=c()
2 set.seed(1)
3 for(i in 1:5){
4   Ablaufm=rbind(Ablaufm,sample(c(0,1),9,prob=c(0.5,(1-0.5)),replace=TRUE))
5 }
6 Ablaufm=cbind(Ablaufm,1)
7
8 rownames(Ablaufm)=c("P1","P2","P3","P4","P5")
9 colnames(Ablaufm)=c("A1","A2","A3","A4","A5","A6","A7","A8","A9","A10")
10 Ablaufm2=Ablaufm
11 Ablaufm2[Ablaufm2[,]==1]="X"
12 Ablaufm2[Ablaufm2[,]==0]=""
```

A.1.1.2 Erstellung zweier Zeitmatrizen in verschiedenen Ausführungen

```
13 Zeitm.zuf=Ablaufm
14 a=which(Zeitm.zuf[,]==1)
15
16 for(i in a){Zeitm.zuf[i]=sample(c(12,17,21),1,prob=c(1/3,1/3,1/3),replace=
   TRUE)}
17
18 Zeitm.takt=Ablaufm
19 Zeitm.takt[Zeitm.takt[]==1]=15
```

A.1.1.3 Erzeugung einer Rüstmatrix

```
20 Ruestm=matrix(NA,5,5)
21 set.seed(1)
22 Ruestm[lower.tri(Ruestm)]=sample(c(0,120,150),10,prob=c(1/3,1/3,1/3),
  replace=TRUE)
23 Ruestm[upper.tri(Ruestm)]=t(Ruestm)[upper.tri(Ruestm)]
24 diag(Ruestm)=0
25 rownames(Ruestm)=c("P1","P2","P3","P4","P5")
26 colnames(Ruestm)=rownames(Ruestm)
27 #Ruestm
```

A.1.1.4 Zusammenstellung einer Auftragsliste

```
28 set.seed(1)
29 Auftrag=c(1:20)
30 Auftrag=sort(Auftrag)
31 Produkt=c(sample(1:5,length(Auftrag), replace = T))
32 #Produkt
33 Stueckzahl=c(sample(10:50,length(Auftrag), replace = T))
34 #Stueckzahl
35 Auftragseingang=sort(c(sample(seq(0,1000,by = 5),length(Auftrag), replace
    = T)))
36 #Auftragseingang
37 Lieferdatum=c()
38 Zaehler=1
39 for (element in Produkt) {
40   Lieferdatum=rbind(Lieferdatum,Auftragseingang[Zaehler]+rowSums(Zeitm.zuf
    ) [element]*Stueckzahl[Zaehler]+sample(2500:4000,size = 1))
41   Zaehler=Zaehler+1
42 }
43 colnames(Lieferdatum)="Lieferdatum"
44 #Lieferdatum
45
46 Auftragsliste=data.frame(Auftrag, Produkt, Stueckzahl, Auftragseingang,
    Lieferdatum)
47
48 colnames(Auftragsliste)[3]="Stückzahl"
49 colnames(Auftragsliste)[5]="gefordertes Lieferdatum"
50 #Auftragsliste
```

A.1.1.5 Berechnung der Gesamtoperationszeiten

```
51 GesamttopZeit.zuf=c()
52 Zaehler=1
53 for (element in Produkt) {
54   GesamttopZeit.zuf=rbind(GesamttopZeit.zuf,rowSums(Zeitm.zuf)[element]*
55     Stueckzahl[Zaehler])
56   Zaehler=Zaehler+1
57 }
58
59 GesamttopZeit.takt=c()
60 Zaehler=1
61 for (element in Produkt) {
62   GesamttopZeit.takt=rbind(GesamttopZeit.takt,rowSums(Zeitm.takt)[element]*
63     Stueckzahl[Zaehler])
64   Zaehler=Zaehler+1
65 }
66
67 GesamttopZeit=data.frame(Auftrag, GesamttopZeit.zuf, GesamttopZeit.takt)
68
69 GesamttopZeit=rbind(GesamttopZeit, colSums(GesamttopZeit))
70 GesamttopZeit[ nrow(GesamttopZeit),1]="Summe:"
71 colnames(GesamttopZeit)=c("Auftrag", "Gesamtopoperationszeit\nzufällig", "
72   Gesamtopoperationszeit\ngetaktet")
73 #GesamttopZeit
```

A.1.1.6 Auflistung aller Prozesszeiten an den verschiedenen Anlagen

```
73 Zaehler=1
74 Operationszeit.zuf=c()
75 for (i in Produkt) {
76   Operationszeit.zuf=rbind(Operationszeit.zuf,Zeitm.zuf[i,]*Stueckzahl[
       Zaehler])
77   Zaehler=Zaehler+1
78
79 }
80 #Operationszeit.zuf
81
82 Zaehler=1
83 Operationszeit.takt=c()
84 for (i in Produkt) {
85   Operationszeit.takt=rbind(Operationszeit.takt,Zeitm.takt[i,]*Stueckzahl[
       Zaehler])
86   Zaehler=Zaehler+1
87 }
88
89 #Operationszeit.takt
```

A.1.2 Konstruktion einer Produktionssimulation

A.1.2.1 Implementierung des Planungsprinzips FIFO

```
90 Anl.Bez=c("Reihenfolge","Auftrag","Produkt", "Startzeitpunkt", "  
      Endzeitpunkt", "Bearbeitungszeit")  
91 A1=matrix(ncol = 6,nrow = 0)  
92 colnames(A1)=Anl.Bez  
93 A2=A3=A4=A5=A6=A7=A8=A9=A10=A10.1=A1  
94  
95 Endzeitpunkt=0  
96 Bestand=cbind(Reihenfolge=c(1:20),Auftrag=c(-20:-1),Produkt,  
      Startzeitpunkt=Auftragseingang-5000,Endzeitpunkt,Operationszeit.zuf)  
97 #Bestand  
98  
99  
100 FIFO.zuf=rbind(Bestand,cbind(Reihenfolge=c(21:40),Auftrag=c(1:20),Produkt,  
      Startzeitpunkt=Auftragseingang,Endzeitpunkt,Operationszeit.zuf))  
101 #FIFO.zuf  
102  
103 FIFO.takt=rbind(Bestand,cbind(Reihenfolge=c(21:40),Auftrag=c(1:20),Produkt  
      ,Startzeitpunkt=Auftragseingang,Endzeitpunkt,Operationszeit.takt))  
104 #FIFO.takt
```

A.1.2.2 Verschiedene Sortierfunktionen

```
105 Sortieren.FLT=function(Auftraege,Zeitpunkt){
106   if (length(which((Auftraege[, "Startzeitpunkt"]==Zeitpunkt)))>1){
107     Auftraege.min=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]<Zeitpunkt)
108       ,]
109     Auftraege.Zeitp=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]==
110       Zeitpunkt),]
111     Auftraege.Zeitp=Auftraege.Zeitp[order(Auftraege.Zeitp[, "Lieferdatum"])
112       ,]
113     Auftraege.max=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]>Zeitpunkt)
114       ,]
115     Auftraege=c()
116     Auftraege=rbind(Auftraege.min,Auftraege.Zeitp,Auftraege.max)
117   }
118   return(Auftraege)
119 }
120
121 Sortieren.SZ=function(Auftraege,Zeitpunkt){
122   if (length(which((Auftraege[, "Startzeitpunkt"]==Zeitpunkt)))>1){
123     Auftraege.min=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]<Zeitpunkt)
124       ,]
125     Auftraege.Zeitp=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]==
126       Zeitpunkt),]
127     Auftraege.Zeitp[, "Lieferdatum"]=Auftraege.Zeitp[, "Lieferdatum"]-
128       rowSums(Auftraege.Zeitp[, which(colnames(Auftraege.Zeitp)=="A1"):
129         which(colnames(Auftraege.Zeitp)=="A10")]) - Zeitpunkt
130     Auftraege.Zeitp=Auftraege.Zeitp[order(Auftraege.Zeitp[, "Lieferdatum"])
131       ,]
132     Auftraege.max=Auftraege[which(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]>Zeitpunkt)
```

```
    ,]  
125   Auftraege=c()  
126   Auftraege=rbind(Auftraege.min,Auftraege.Zeitp,Auftraege.max)  
127  
128   }  
129   return(Auftraege)  
130 }
```

A.1.2.3 Funktion - Frozen Zone

```
131 Frozen.Zone=function(Auftraege, Zeitabschnitte, FLT=F , SZ=F){  
132   for (i in 2:length(Zeitabschnitte)){  
133     if (length(which((Auftraege[, "Startzeitpunkt"]<=Zeitabschnitte[i])&(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]>Zeitabschnitte[i-1]))))!=Zeitabschnitte[i-1]){  
134       Auftraege[which((Auftraege[, "Startzeitpunkt"]<=Zeitabschnitte[i])&(Auftraege[, "Startzeitpunkt"]>Zeitabschnitte[i-1])), "Startzeitpunkt"]=Zeitabschnitte[i]  
135     }  
136     if (FLT==TRUE){Auftraege=Sortieren.FLT(Auftraege, Zeitabschnitte[i])}  
137     if (SZ==TRUE){Auftraege=Sortieren.SZ(Auftraege, Zeitabschnitte[i])}  
138  
139   }  
140   if (((FLT==TRUE)&(SZ==TRUE)) | ((FLT==FALSE)&(SZ==FALSE))){print("FLT oder SZ muss ausgewählt werden!")}  
141   return(Auftraege)  
142 }
```

A.1.2.4 Implementierung weiterer Planungsvorschriften

```
143 #Lieferdatum
144 FZ.SZ.zuf=cbind(FIFO.zuf,rbind(Lieferdatum-5000,Lieferdatum))
145 Zeitabschnitte=c(0,330,660,1000)
146 FZ.SZ.zuf=Frozen.Zone(FZ.SZ.zuf,Zeitabschnitte, SZ = TRUE)
147 FZ.SZ.zuf=FZ.SZ.zuf[, -ncol(FZ.SZ.zuf)]
148 FZ.SZ.zuf[, "Reihenfolge"]=c(1:nrow(FZ.SZ.zuf))
149 #FZ.SZ.zuf[21:40,]
150
151 FZ.FLT.zuf=cbind(FIFO.zuf,rbind(Lieferdatum-5000,Lieferdatum))
152 FZ.FLT.zuf=Frozen.Zone(FZ.FLT.zuf,Zeitabschnitte, FLT=TRUE)
153 FZ.FLT.zuf=FZ.FLT.zuf[, -ncol(FZ.FLT.zuf)]
154 FZ.FLT.zuf[, "Reihenfolge"]=c(1:nrow(FZ.FLT.zuf))
155 #FZ.FLT.zuf[21:40,]
156
157 ##getaktet
158 FZ.SZ.takt=cbind(FIFO.takt,rbind(Lieferdatum-5000,Lieferdatum))
159 Zeitabschnitte=c(0,330,660,1000)
160 FZ.SZ.takt=Frozen.Zone(FZ.SZ.takt,Zeitabschnitte, SZ = TRUE)
161 FZ.SZ.takt=FZ.SZ.takt[, -ncol(FZ.SZ.takt)]
162 FZ.SZ.takt[, "Reihenfolge"]=c(1:nrow(FZ.SZ.takt))
163 #FZ.SZ.takt[21:40,]
164
165 FZ.FLT.takt=cbind(FIFO.takt,rbind(Lieferdatum-5000,Lieferdatum))
166 FZ.FLT.takt=Frozen.Zone(FZ.FLT.takt,Zeitabschnitte, FLT=TRUE)
167 FZ.FLT.takt=FZ.FLT.takt[, -ncol(FZ.FLT.takt)]
168 FZ.FLT.takt[, "Reihenfolge"]=c(1:nrow(FZ.FLT.takt))
169 #FZ.FLT.takt[21:40,]
```

A.1.2.5 Aufteilungsfunktion

```
170 Anl.Zuteilung = function(Auftraege,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,
    Auftragsnr){
171   if (Auftragsnr%in%Auftraege[,"Auftrag"]) {
172     row=which(Auftraege[,"Auftrag"]==Auftragsnr)
173     for (col in 6:ncol(Auftraege)) {
174       if ((col==6)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A1=rbind(A1,c(Auftraege[row
          ,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
175       Auftraege[row,col]=0; break}
176     else{
177       if ((col==7)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A2=rbind(A2,c(Auftraege[row
          ,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
178       Auftraege[row,col]=0; break}
179     else{
180       if ((col==8)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A3=rbind(A3,c(Auftraege[
          row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
181       Auftraege[row,col]=0; break}
182     else{
183       if ((col==9)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A4=rbind(A4,c(Auftraege
          [row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
184       Auftraege[row,col]=0; break}
185     else{
186       if ((col==10)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A5=rbind(A5,c(
          Auftraege[row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
187       Auftraege[row,col]=0; break}
188     else{
189       if ((col==11)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A6=rbind(A6,c(
          Auftraege[row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
190       Auftraege[row,col]=0; break}
191     else{
```

```
192     if ((col==12)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A7=rbind(A7,c(
193         Auftraege[row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
194     }
195     else{
196         if ((col==13)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A8=rbind(A8,c(
197             Auftraege[row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
198         }
199         Auftraege[row,col]=0; break}
200     else{
201         if ((col==14)&(Auftraege[row,col]!=0)) {A9=rbind(A9,
202             c(Auftraege[row,1:3],NA,0,Auftraege[row,col]));
203         }
204         Auftraege[row,col]=0; break}
205     }
206 }
207 }
208 }
209 }
210 }
211 }
212 }
213 }
214 return(list(Auftraege,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10))
215 }
```

A.1.2.6 Zählerfunktion

```
216 Anlage.zaehler=function(Anlage, Zeit){
217   Auftrag.fertig=0
218   Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Bearbeitungszeit"]=
      Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Bearbeitungszeit"
219     ]-1
220   if(is.na(Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Startzeitpunkt
      "])){
221     Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Startzeitpunkt"]=Zeit
222     if(nrow(Anlage)==1){
223       Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Bearbeitungszeit"]=
          Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "
224         Bearbeitungszeit"]+1}
225     if ((length(which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0)) !=0)&(length(which(
      Anlage[, "Bearbeitungszeit"] ==0)) !=0)){
226       if (Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Startzeitpunkt"
          ]>Anlage[max(which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] ==0)), "
227         Endzeitpunkt"]){
228         Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "Bearbeitungszeit"
          ]=Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"] !=0) [1], "
229         Bearbeitungszeit"]+1
230       }
231     }
232   }
233 }
234 }
235 }
236 }
237 }
238 }
239 }
240 }
241 }
242 }
243 }
244 }
245 }
246 }
247 }
248 }
249 }
250 }
251 }
252 }
253 }
254 }
255 }
256 }
257 }
258 }
259 }
260 }
261 }
262 }
263 }
264 }
265 }
266 }
267 }
268 }
269 }
270 }
271 }
272 }
273 }
274 }
275 }
276 }
277 }
278 }
279 }
280 }
281 }
282 }
283 }
284 }
285 }
286 }
287 }
288 }
289 }
290 }
291 }
292 }
293 }
294 }
295 }
296 }
297 }
298 }
299 }
300 }
301 }
302 }
303 }
304 }
305 }
306 }
307 }
308 }
309 }
310 }
311 }
312 }
313 }
314 }
315 }
316 }
317 }
318 }
319 }
320 }
321 }
322 }
323 }
324 }
325 }
326 }
327 }
328 }
329 }
330 }
331 }
332 }
333 }
334 }
335 }
336 }
337 }
338 }
339 }
340 }
341 }
342 }
343 }
344 }
345 }
346 }
347 }
348 }
349 }
350 }
351 }
352 }
353 }
354 }
355 }
356 }
357 }
358 }
359 }
360 }
361 }
362 }
363 }
364 }
365 }
366 }
367 }
368 }
369 }
370 }
371 }
372 }
373 }
374 }
375 }
376 }
377 }
378 }
379 }
380 }
381 }
382 }
383 }
384 }
385 }
386 }
387 }
388 }
389 }
390 }
391 }
392 }
393 }
394 }
395 }
396 }
397 }
398 }
399 }
400 }
```

```

    Bearbeitungszeit"]==0))], "Endzeitpunkt"]==0)) {
233 Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"]==0)[length(which(Anlage[, "
    Bearbeitungszeit"]==0))], "Endzeitpunkt"]=Zeit;
234 Auftrag.fertig=as.integer(Anlage[which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"
    ]==0)[length(which(Anlage[, "Bearbeitungszeit"]==0))], "Auftrag"])
235 }
236 }
237
238 return(list(Anlage, Auftrag.fertig))
239 }
```

A.1.2.7 Rüstfunktion

```

240 Ruesten=function(Anlage, Ruestmatrix){
241
242
243 if (which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1]!=1) {
244     Auftrag.ruest=Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1], "Produkt"];
245
246     Auftrag.v.ruest=Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1]-1, "Produkt
        "];
247     if ((Auftrag.v.ruest!=99)) {
248         Ruestdauer=Ruestm[Auftrag.ruest, Auftrag.v.ruest]
249     }
250     else{Ruestdauer=0}
251
252
253
254     if (Ruestdauer!=0){
255
```

```
256 Anlage=rbind(Anlage[1:(which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1]-1), ],
257               c(Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1], 1],
258                 99,
259                 99,
260                 Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1], "
                Startzeitpunkt"],
261                 0,
262                 Ruestdauer),
263                 Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[1]:nrow(Anlage)
                ,])
264 Anlage[which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[2], "Startzeitpunkt"]=Anlage
                [which(Anlage[, "Endzeitpunkt"]==0)[2], "Startzeitpunkt"]+
                Ruestdauer}
265 }
266 return(Anlage)
267 }
```

A.1.2.8 Reihenfolgenfunktionen

```
268 Reihenfolge=function(Anlage){
269   if(length(which(is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])))>1){
270     Anlage.o.na=list(Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])==F,])
271     Anlage.m.na=Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"]),]
272     Anlage.m.na=Anlage.m.na[order(Anlage.m.na[, "Reihenfolge"]),]
273     Anlage=rbind(Anlage.o.na[[1]],Anlage.m.na)
274
275   }
276   return(Anlage)
277 }
278
279
280 Reihenfolge.KOZ=function(Anlage){
281   if(length(which(is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])))>1){
282     Anlage.o.na=list(Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])==F,])
283     Anlage.m.na=Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"]),]
284     Anlage.m.na=Anlage.m.na[order(Anlage.m.na[, "Bearbeitungszeit"]),]
285     Anlage=rbind(Anlage.o.na[[1]],Anlage.m.na)
286
287   }
288   return(Anlage)
289 }
290
291
292 Reihenfolge.SZ=function(Anlage, Liste, Zeitpunkt, Lieferdatum){
293   if(length(which(is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])))>1){
294     Anlage.o.na=list(Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"])==F,])
295     Anlage.m.na=Anlage[is.na(Anlage[, "Startzeitpunkt"]),]
296     Anlage.m.na=Anlage.m.na[order(Anlage.m.na[, "Reihenfolge"]),]
```

```
297 Anlage=rbind(Anlage.o.na[[1]],Anlage.m.na)
298 if(length(which(Anlage.m.na[,"Reihenfolge"]>20))>1){
299     SZ=cbind(Anlage.m.na[which(Anlage.m.na[,"Reihenfolge"]>20)[1]:nrow(
        Anlage.m.na),],NA)
300     SZ[,ncol(SZ)]=Lieferdatum[SZ[,"Auftrag"]-rowSums(Liste[SZ[,"Auftrag
        "],which(colnames(Liste)== "A1"):which(colnames(Liste)== "A10"))]-
        SZ[,"Bearbeitungszeit"]-Zeitpunkt
301     SZ=SZ[order(SZ[,ncol(SZ)]),]
302     SZ=SZ[, -ncol(SZ)]
303     if(nrow(Anlage.m.na)==nrow(SZ)){
304         Anlage=rbind(Anlage.o.na[[1]],SZ)
305     }
306     else{Anlage=rbind(Anlage.o.na[[1]],Anlage.m.na[1:(min(which(Anlage.m
        .na[,"Reihenfolge"]>20))-1),],SZ)}
307 }
308
309 }
310 return(Anlage)
311 }
```

A.1.2.9 Funktion zur Ermittlung des Bestandes vor den Anlagen

```
312 Anl.Bestand=function(A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1, Anlagen.Bestand
    ){
313   A=list(A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1)
314
315   for (i in 1:11) {
316     Anlagen.Bestand[i]=Anlagen.Bestand[i]+sum(A[[i]][, "Bearbeitungszeit"])
317
318   }
319   return(Anlagen.Bestand)
320 }
```

A.1.2.10 Produktionssimulation - Funktion

```
321 Simulation=function(Liste,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1, Ruestm,
    Lieferdatum, FIFO=FALSE, KOZ=FALSE, SZ=FALSE){
322
323   Prozesszeiten=rowSums(Liste[which(Liste[, "Auftrag"]>0)[1]:nrow(Liste),6:
       ncol(Liste)])
324   Bestand.Anl=matrix(0,ncol=11,nrow=1)
325   colnames(Bestand.Anl)=c("A1", "A2", "A3", "A4", "A5", "A6", "A7", "A8", "A9", "
       A10", "A10.1")
326
327   for (Zeit in -5000:30000) {
328     A=list(Liste,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10)
329     ##Startzeitpunkt=Auftragseingang
330     if (length(which(Liste[, "Startzeitpunkt"]==Zeit))!=0) {
331       for (row2 in which(Liste[, "Startzeitpunkt"]==Zeit)) {
332         A=Anl.Zuteilung(A[[1]],A[[2]],A[[3]],A[[4]],A[[5]],A[[6]],A[[7]],A
           [[8]],A[[9]],A[[10]],A[[11]],Auftragsnr = Liste[row2, "Auftrag"
           ])
333       }
334     }
335
336     for (i in 2:11) {
337       B=Anlage.zaehler(A[[i]],Zeit)
338       A[[i]]=B[[1]]
339       Auftrag.fertig=B[[2]]
340       A=Anl.Zuteilung(A[[1]],A[[2]],A[[3]],A[[4]],A[[5]],A[[6]],A[[7]],A
           [[8]],A[[9]],A[[10]],A[[11]],Auftrag.fertig)
341     }
342
343     Liste=A[[1]]
```

```
344     A1=A[[2]]
345     A2=A[[3]]
346     A3=A[[4]]
347     A4=A[[5]]
348     A5=A[[6]]
349     A6=A[[7]]
350     A7=A[[8]]
351     A8=A[[9]]
352     A9=A[[10]]
353     A10=A[[11]]
354
355     if (Auftrag.fertig!=0) {
356         Liste[which(Liste[,"Auftrag"]==Auftrag.fertig),"Endzeitpunkt"]=A10[
357             which(A10[,"Auftrag"]==Auftrag.fertig),"Endzeitpunkt"]
358     }
359
360     if (Zeit>0){
361         if ((FIFO==FALSE)&(KOZ==FALSE)&(SZ==FALSE)) {
362             A1=Reihenfolge(A1)
363             A2=Reihenfolge(A2)
364             A3=Reihenfolge(A3)
365             A4=Reihenfolge(A4)
366             A5=Reihenfolge(A5)
367             A6=Reihenfolge(A6)
368             A7=Reihenfolge(A7)
369             A8=Reihenfolge(A8)
370             A9=Reihenfolge(A9)
371             A10=Reihenfolge(A10)
372         }
```

```
373     if ((FIFO==FALSE)&(KOZ==TRUE)&(SZ==FALSE)){
374         A1=Reihenfolge.KOZ(A1)
375         A2=Reihenfolge.KOZ(A2)
376         A3=Reihenfolge.KOZ(A3)
377         A4=Reihenfolge.KOZ(A4)
378         A5=Reihenfolge.KOZ(A5)
379         A6=Reihenfolge.KOZ(A6)
380         A7=Reihenfolge.KOZ(A7)
381         A8=Reihenfolge.KOZ(A8)
382         A9=Reihenfolge.KOZ(A9)
383         A10=Reihenfolge.KOZ(A10)
384     }
385
386     if ((FIFO==FALSE)&(KOZ==FALSE)&(SZ==TRUE)){
387         A1=Reihenfolge.SZ(A1,Liste,Zeitpunkt = Zeit,Lieferdatum)
388         A2=Reihenfolge.SZ(A2,Liste,Zeit,Lieferdatum)
389         A3=Reihenfolge.SZ(A3,Liste,Zeit,Lieferdatum)
390         A4=Reihenfolge.SZ(A4,Liste,Zeit,Lieferdatum)
391         A5=Reihenfolge.SZ(A5,Liste,Zeit,Lieferdatum)
392         A6=Reihenfolge.SZ(A6,Liste,Zeit,Lieferdatum)
393         A7=Reihenfolge.SZ(A7,Liste,Zeit,Lieferdatum)
394         A8=Reihenfolge.SZ(A8,Liste,Zeit,Lieferdatum)
395         A9=Reihenfolge.SZ(A9,Liste,Zeit,Lieferdatum)
396         A10=Reihenfolge.SZ(A10,Liste,Zeit,Lieferdatum)
397     }
398 }
399
400 #Verteilung der Aufträge auf A10 und redundante Anlage A10.1
401     if ((length(which(A10.1[, "Bearbeitungszeit"] !=0)) ==0)&(length(which(is
        .na(A10[, "Startzeitpunkt"]))) !=0)){
```

```
402     A10.1=rbind(A10.1,A10[which(is.na(A10[, "Startzeitpunkt"]))[1],])
403     A10=A10[-which(is.na(A10[, "Startzeitpunkt"]))[1],]
404 }
405
406 B10.1=Anlage.zaehler(A10.1,Zeit)
407 A10.1=B10.1[[1]]
408 Auftrag.fertig=B10.1[[2]]
409 if (Auftrag.fertig!=0) {
410     Liste[which(Liste[, "Auftrag"]==Auftrag.fertig), "Endzeitpunkt"]=A10
411         .1[which(A10.1[, "Auftrag"]==Auftrag.fertig), "Endzeitpunkt"]
412 }
413 #Rüsten
414 if (length(which(A5[, "Startzeitpunkt"]==Zeit))==1) {
415     A5=Ruesten(A5,Ruestm)
416 }
417
418 ##Bestand vor der Anlage
419 if (Zeit>0){
420     Bestand.Anl=Anl.Bestand(A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1,
421         Bestand.Anl)
422 }
423 ##Break der For-Schleife
424 if (length(which(Liste[, "Endzeitpunkt"]==0))==0){
425     break
426 }
427 }
428
429 ##Auswertungen
```

```
430 DLZ=abs(Liste[which(Liste[, "Auftrag"]>0)[1]:nrow(Liste), "Endzeitpunkt"]-
      Liste[which(Liste[, "Auftrag"]>0)[1]:nrow(Liste), "Startzeitpunkt"])
431 Wartezeit=(DLZ-Prozesszeiten)
432 Wartezeit.Auswertung=c(mean(abs(Wartezeit)), min(abs(Wartezeit)), max(abs
      (Wartezeit)))
433 names(Wartezeit.Auswertung)=c("mittlere Wartezeit", "minimale Wartezeit"
      , "maximale Wartezeit")
434 DLZ.Auswertung=c(mean(DLZ), min(DLZ), max(DLZ))
435 names(DLZ.Auswertung)=c("mittlere DLZ", "minimale DLZ", "maximale DLZ")
436 Bestand.Anl=Bestand.Anl/Zeit
437 Durchschnitt=rowSums(Bestand.Anl)/length(Bestand.Anl)
438 Bestand.Anl=cbind(Bestand.Anl, Durchschnitt)
439 Liste=Liste[order(Liste[, "Auftrag"]),]
440
441 Abweichung.LT=cbind(
442   Liste[which(Liste[, "Auftrag"]==1):nrow(Liste), "Auftrag"],
443   Liste[which(Liste[, "Auftrag"]==1):nrow(Liste), "Endzeitpunkt"],
444   Lieferdatum
445 )
446
447 colnames(Abweichung.LT)=c("Auftrag", "Endzeitpunkt", "Lieferdatum")
448
449 Abweichung.LT=cbind(
450   Abweichung.LT,
451   Abweichung=Abweichung.LT[, "Endzeitpunkt"]-Abweichung.LT[, "Lieferdatum"
      ])
452
453 Abweichung.LT.Auswertung=c(mean(Abweichung.LT[, "Abweichung"]), min(
      Abweichung.LT[, "Abweichung"]), max(Abweichung.LT[, "Abweichung"]))
454 names(Abweichung.LT.Auswertung)=c("mittlere Abweichung", "minimale
```

```
    Abweichung", "maximale Abweichung")
455
456 Gantt=data.frame(rbind(
457   cbind(A1[,2:5],1),
458   cbind(A2[,2:5],2),
459   cbind(A3[,2:5],3),
460   cbind(A4[,2:5],4),
461   cbind(A5[,2:5],5),
462   cbind(A6[,2:5],6),
463   cbind(A7[,2:5],7),
464   cbind(A8[,2:5],8),
465   cbind(A9[,2:5],9),
466   cbind(A10[,2:5],10),
467   cbind(A10.1[,2:5],11)
468   ))
469 Gantt=Gantt[,-2]
470 Gantt[, "Auftrag"]=as.factor(Gantt[, "Auftrag"])
471 colnames(Gantt)=c("Auftrag", "Startzeitpunkt", "Endzeitpunkt", "Anlage")
472
473 ##Funktionsrückgabe
474 Ergebnis=list(Liste,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1, Bestand.Anl,
    DLZ, DLZ.Auswertung,Wartezeit, Wartezeit.Auswertung, Abweichung.LT,
    Abweichung.LT.Auswertung, Gantt)
475 names(Ergebnis)=c("Liste", "A1", "A2", "A3", "A4", "A5", "A6", "A7", "A8", "A9", "
    A10", "A10.1", "Bestand.Anl", "DLZ", "DLZ-Auswertung", "Wartezeit", "
    Wartezeit-Auswertung", "Abweichung Lieferdatum", "Abweichung LD
    Auswertung", "Gantt")
476 return(Ergebnis)
477 }
```

A.1.3 Ausführung der Simulationsfunktion

```
478 #FIFO zufällig
479 ErgebnisFIFO.zuf=(Simulation(FIFO.zuf,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10
    .1, Ruestm, Lieferdatum,FIFO = TRUE))
480
481 #KOZ zufällig
482 ErgebnisKOZ.zuf=(Simulation(FIFO.zuf,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10.1,
    Ruestm, Lieferdatum,KOZ = TRUE))
483
484 #FZ LD zufällig
485 ErgebnisFZ.FLT.zuf=Simulation(FZ.FLT.zuf,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,
    A10.1, Ruestm,Lieferdatum)
486
487 #FZ SZ zufällig
488 ErgebnisFZ.SZ.zuf=Simulation(FZ.SZ.zuf,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10
    .1, Ruestm,Lieferdatum)
489
490 #FIFO getaktet
491 ErgebnisFIFO.takt=(Simulation(FIFO.takt,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10
    .1, Ruestm, Lieferdatum,FIFO = TRUE))
492
493 #KOZ getaktet
494 ErgebnisKOZ.takt=(Simulation(FIFO.takt,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,A10
    .1, Ruestm, Lieferdatum,KOZ = TRUE))
495
496 #FZ LD getaktet
497 ErgebnisFZ.FLT.takt=Simulation(FZ.FLT.takt,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,
    A10.1, Ruestm,Lieferdatum)
498
```

499 *#FZ SZ getaktet*

500 ErgebnisFZ.SZ.takt=Simulation(FZ.SZ.takt,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7,A8,A9,A10,
A10.1, Ruestm,Lieferdatum)

A.2 Querschnitt der Produktion nach Beendigung der Simulation nach FIFO

Tabelle A.1: Produktionsliste

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
1	-20	2	-4.980	429
2	-19	2	-4.930	646
3	-18	3	-4.905	1.114
4	-17	5	-4.755	-4.005
5	-16	2	-4.685	1.188
6	-15	5	-4.595	-3.325
7	-14	5	-4.560	-3.470
8	-13	4	-4.525	947
9	-12	4	-4.520	2.741
10	-11	1	-4.480	501
11	-10	2	-4.470	2.965
12	-9	1	-4.445	2.108
13	-8	4	-4.350	3.778
14	-7	2	-4.335	3.111
15	-6	4	-4.305	5.817
16	-5	3	-4.265	6.604
17	-4	4	-4.215	6.520
18	-3	5	-4.210	-3.148
19	-2	2	-4.175	7.148
20	-1	4	-4.135	7.435
21	1	2	20	9.273
22	2	2	70	9.490
23	3	3	95	10.103

Tabelle A.1: Produktionsliste (Fortsetzung)

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
24	4	5	245	1.430
25	5	2	315	10.136
26	6	5	405	1.989
27	7	5	440	2.200
28	8	4	475	9.895
29	9	4	480	11.077
30	10	1	520	7.987
31	11	2	530	11.890
32	12	1	555	9.594
33	13	4	650	11.408
34	14	2	665	12.036
35	15	4	695	13.858
36	16	3	735	14.645
37	17	4	785	14.561
38	18	5	790	2.403
39	19	2	825	15.632
40	20	4	865	14.874

Tabelle A.2: Anlage 1

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
1	-20	2	-4.980	-4.164
2	-19	2	-4.164	-3.858
3	-18	3	-3.858	-3.102
5	-16	2	-3.102	-2.762
8	-13	4	-2.762	-2.462
9	-12	4	-2.462	-1.922
10	-11	1	-1.922	-1.646
11	-10	2	-1.646	-1.153
12	-9	1	-1.153	-745
13	-8	4	-745	-385
14	-7	2	-385	-96
15	-6	4	-96	420
16	-5	3	420	1.198
17	-4	4	1.198	1.703
19	-2	2	1.703	2.367
20	-1	4	2.367	2.680
21	1	2	2.680	3.497
22	2	2	3.497	3.804
23	3	3	3.804	4.561
25	5	2	4.561	4.902
28	8	4	4.902	5.203
29	9	4	5.203	5.744
30	10	1	5.744	6.021
31	11	2	6.021	6.515
32	12	1	6.515	6.924

Tabelle A.2: Anlage 1 (Fortsetzung)

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
33	13	4	6.924	7.285
34	14	2	7.285	7.575
35	15	4	7.575	8.092
36	16	3	8.092	8.870
37	17	4	8.870	9.375
39	19	2	9.375	10.039
40	20	4	10.039	10.352

Tabelle A.3: Anlage 2

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
4	-17	5	-4.755	-4.575
6	-15	5	-4.575	-4.275
7	-14	5	-4.275	-4.155
18	-3	5	-4.155	-3.987
1	-20	2	-3.987	-2.979
2	-19	2	-2.979	-2.601
5	-16	2	-2.601	-2.181
10	-11	1	-1.646	-1.370
11	-10	2	-1.153	-544
12	-9	1	-544	-136
14	-7	2	-96	261
24	4	5	261	442
26	6	5	442	743
27	7	5	743	864
38	18	5	864	1.033
19	-2	2	2.367	3.186
21	1	2	3.497	4.505
22	2	2	4.505	4.884
25	5	2	4.902	5.322
30	10	1	6.021	6.297
31	11	2	6.515	7.124
32	12	1	7.124	7.533
34	14	2	7.575	7.932
39	19	2	10.039	10.858

Tabelle A.4: Anlage 3

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
1	-20	2	-2.979	-1.971
2	-19	2	-1.971	-1.593
8	-13	4	-1.593	-1.168
5	-16	2	-1.168	-748
9	-12	4	-748	17
11	-10	2	17	627
13	-8	4	627	1.138
14	-7	2	1.138	1.496
15	-6	4	1.496	2.228
17	-4	4	2.228	2.943
20	-1	4	2.943	3.386
19	-2	2	3.386	4.206
21	1	2	4.505	5.513
22	2	2	5.513	5.892
28	8	4	5.892	6.318
25	5	2	6.318	6.739
29	9	4	6.739	7.505
31	11	2	7.505	8.115
33	13	4	8.115	8.626
34	14	2	8.626	8.984
35	15	4	8.984	9.716
37	17	4	9.716	10.431
40	20	4	10.431	10.874
39	19	2	10.874	11.694

Tabelle A.5: Anlage 4

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
4	-17	5	-4.575	-4.320
6	-15	5	-4.275	-3.850
7	-14	5	-3.850	-3.680
18	-3	5	-3.680	-3.442
3	-18	3	-3.102	-2.490
8	-13	4	-1.168	-743
9	-12	4	17	782
24	4	5	782	1.038
26	6	5	1.038	1.464
27	7	5	1.464	1.635
38	18	5	1.635	1.874
13	-8	4	1.874	2.385
16	-5	3	2.385	3.015
15	-6	4	3.015	3.747
17	-4	4	3.747	4.462
20	-1	4	4.462	4.905
23	3	3	4.905	5.518
28	8	4	6.318	6.743
29	9	4	7.505	8.270
33	13	4	8.626	9.136
36	16	3	9.136	9.766
35	15	4	9.766	10.498
37	17	4	10.498	11.213
40	20	4	11.213	11.656

Tabelle A.6: Anlage 5

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
1	-20	2	-1.971	-963
2	-19	2	-963	-585
10	99	99	-585	-465
10	-11	1	-465	18
5	99	99	18	138
5	-16	2	138	559
12	99	99	559	679
12	-9	1	679	1.394
11	99	99	1.394	1.514
11	-10	2	1.514	2.124
14	-7	2	2.124	2.482
19	-2	2	4.206	5.025
21	1	2	5.513	6.521
22	2	2	6.521	6.900
30	99	99	6.900	7.020
30	10	1	7.020	7.504
25	99	99	7.504	7.624
25	5	2	7.624	8.045
32	99	99	8.045	8.165
32	12	1	8.165	8.880
31	99	99	8.880	9.000
31	11	2	9.000	9.610
34	14	2	9.610	9.968
39	19	2	11.694	12.513

Tabelle A.7: Anlage 6

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
3	-18	3	-2.490	-1.734
8	-13	4	-743	-443
9	-12	4	782	1.322
13	-8	4	2.385	2.745
16	-5	3	3.015	3.792
15	-6	4	3.792	4.309
17	-4	4	4.462	4.966
20	-1	4	4.966	5.279
23	3	3	5.518	6.274
28	8	4	6.743	7.043
29	9	4	8.270	8.810
33	13	4	9.136	9.496
36	16	3	9.766	10.543
35	15	4	10.543	11.060
37	17	4	11.213	11.717
40	20	4	11.717	12.030

Tabelle A.8: Anlage 7

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
3	-18	3	-1.734	-978
1	-20	2	-963	-147
2	-19	2	-147	159
8	-13	4	159	585
5	-16	2	585	926

Tabelle A.8: Anlage 7 (Fortsetzung)

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
9	-12	4	1.322	2.087
11	-10	2	2.124	2.617
14	-7	2	2.617	2.907
13	-8	4	2.907	3.418
16	-5	3	3.792	4.569
15	-6	4	4.569	5.301
17	-4	4	5.301	6.016
19	-2	2	6.016	6.680
20	-1	4	6.680	7.123
23	3	3	7.123	7.880
21	1	2	7.880	8.697
22	2	2	8.697	9.004
28	8	4	9.004	9.430
25	5	2	9.430	9.771
29	9	4	9.771	10.537
33	13	4	10.537	11.048
31	11	2	11.048	11.542
34	14	2	11.542	11.832
36	16	3	11.832	12.610
35	15	4	12.610	13.342
37	17	4	13.342	14.057
40	20	4	14.057	14.500
39	19	2	14.500	15.164

Tabelle A.9: Anlage 8

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
3	-18	3	-978	-222
16	-5	3	4.569	5.346
23	3	3	7.880	8.636
36	16	3	12.610	13.387

Tabelle A.10: Anlage 9

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
3	-18	3	-222	390
16	-5	3	5.346	5.975
23	3	3	8.636	9.248
36	16	3	13.387	14.016

Tabelle A.11: Anlage 10

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
4	-17	5	-4.320	-4.005
6	-15	5	-3.850	-3.325
1	-20	2	-147	429
2	-19	2	429	646
8	-13	4	646	947
5	-16	2	947	1.188
12	-9	1	1.394	2.108
38	18	5	2.108	2.403
11	-10	2	2.617	2.965
13	-8	4	3.418	3.778
15	-6	4	5.301	5.817
16	-5	3	5.975	6.604
19	-2	2	6.680	7.148
30	10	1	7.504	7.987
21	1	2	8.697	9.273
22	2	2	9.273	9.490
23	3	3	9.490	10.103
29	9	4	10.537	11.077
31	11	2	11.542	11.890
35	15	4	13.342	13.858
36	16	3	14.016	14.645
39	19	2	15.164	15.632

Tabelle A.12: Anlage 11

Reihenfolge	Auftrag	Produkt	Startzeitpunkt	Endzeitpunkt
7	-14	5	-3.680	-3.470
18	-3	5	-3.442	-3.148
10	-11	1	18	501
3	-18	3	502	1.114
24	4	5	1.115	1.430
26	6	5	1.464	1.989
27	7	5	1.990	2.200
9	-12	4	2.201	2.741
14	-7	2	2.907	3.111
17	-4	4	6.016	6.520
20	-1	4	7.123	7.435
32	12	1	8.880	9.594
28	8	4	9.595	9.895
25	5	2	9.896	10.136
33	13	4	11.048	11.408
34	14	2	11.832	12.036
37	17	4	14.057	14.561
40	20	4	14.562	14.874