



Lehrstuhl für Industrielogistik

Masterarbeit



Systematischer Vergleich verschiedener
Produktionssteuerungsverfahren im
Bereich einer mechanischen Fertigung
mittels Discrete Event Simulation

Michael Johannes Kuster, BSc

September 2024



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 01.09.2024

Unterschrift Verfasser/in
Michael Johannes Kuster

Danksagung

In erster Linie danken möchte ich Herrn Priv.-Doz. Dr. Manuel Woschank für die hervorragende Betreuung bei meinen beiden Abschlussarbeiten im Rahmen meines Studiums. Gerade in Zeiten wie diesen, in denen jedermann rund um die Uhr beschäftigt ist, habe ich es immer sehr geschätzt, wie kurzfristig Termine vereinbart werden konnten. In diesen Besprechungen selbst war der Fokus immer sehr klar. Die Meetings waren so straight-forward gehalten, dass das Feedback und die Abstimmung nächster Schritte stets sehr effizient waren und keinen großen Zeitaufwand in Anspruch genommen haben. Danke für alle Ratschläge, von der Themenfindung bis zum Abschluss der Arbeiten, während der letzten Jahre, in welchen ich Herrn Woschank auch als Lehrkraft in den Lehrveranstaltungen immer genossen habe.

Bedanken möchte ich mich auch beim Team der Firma WILD GmbH für das Zurverfügungstellen ihrer Unternehmensdaten für das in der Masterarbeit behandelte Simulationsprogramm. Hier besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr. Rabitsch, der meiner Ambition, eine Masterarbeit in Kooperation mit dem Unternehmen zu schreiben, sofort positiv gegenübergestanden ist, meinen Hauptansprechpartner Herrn Obertautsch, mit dem ich mich immer wieder austauschen konnte, sowie die Herren Tazoll und Blassnig für einige operative Hilfestellungen im Rahmen der Datenerfassung.

Sehr dankbar bin ich auch für die Unterstützung meiner gesamten Familie, hier besonders jener meiner Eltern, während der gesamten fünfjährigen Studienzeit. Gleiches gilt für meine Studienkollegen und Freunde, die ich im Rahmen meines Studiums kennenlernen durfte. Ich bin mir sicher, dass ich mein Studium ohne diesem wertvollen Beistand von Familie und Freunden nicht in so kurzer Zeit abschließen hätte können.

Kurzfassung

Die Entwicklungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass sich der Großteil der Industrieunternehmen in einer Situation des Kosten- und Konkurrenzdruckes sowie eines volatilen Umfeldes befindet. Um sich hier etablieren zu können, wird gegenüber den Kunden eine Maximierung der Logistikleistung angestrebt und intern eine Minimierung der anfallenden Kosten. Gemessen werden können diese Zielgrößen anhand der Durchlaufzeit und der Liefertreue der Aufträge einerseits sowie an der Auslastung der betrieblichen Maschinen und der Höhe der sich im Umlauf der Fertigung befindlichen Bestände andererseits. Als essenzieller Faktor für die finanzielle Stabilität und den Erfolg von Industriebetrieben hinsichtlich der oben genannten Kennzahlen entpuppt sich dabei die Auswahl des „richtigen“ Produktionssteuerungsverfahrens.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ausgeführt, welche Produktionssteuerungsverfahren in der heutigen Zeit die größten theoretischen Potenziale aufweisen und welche Resultate diese in wissenschaftlichen Studien bereits erzielt haben. Näher eingegangen wurde dabei auf die fünf Verfahren KANBAN, POLCA, CONWIP, COBACABANA und LUMSCOR. Zudem wurde ein Simulationsexperiment anhand der mechanischen Fertigung eines mittelständischen Make-To-Order Betriebes aufgesetzt, welches die Auswirkungen der Anwendung der beschriebenen Verfahren in Bezug auf die erwähnten Kennzahlen veranschaulicht.

Mithilfe einer Varianzanalyse (ANOVA) basierend auf der Anwendung einer Discrete Event Simulation konnten signifikante Unterschiede innerhalb und zwischen den jeweiligen Verfahren aufgezeigt werden. Generell erreicht im vorliegenden Fallbeispiel das Verfahren LUMSCOR (Lancaster University Management School Corrected Order Release) die besten Resultate. Demnach zeigt diese Fertigungssteuerungsmethode im Vergleich zu den anderen betrachteten Verfahren um bis zu 20% reduzierte Durchlaufzeiten sowie Umlaufbestände. Während die Liefertreue mit 96% konstant auf hohem Niveau gehalten werden kann, wird LUMSCOR in Bezug auf die Maschinenauslastung nur um einen halben Prozentpunkt von POLCA übertroffen.

Abstract

Developments in recent years have shown that the majority of industrial companies find themselves in a situation of cost and competitive pressure as well as a volatile environment. In order to be able to establish themselves here, the aim is to maximize logistics performance vis-à-vis customers and to minimize the costs incurred internally. These target figures can be measured on the basis of lead time and delivery reliability of orders on the one hand and the capacity utilization of operational machinery and the amount of stock in circulation in production on the other. The selection of the "right" production control method turns out to be an essential factor for the financial stability and success of industrial companies with regard to the above-mentioned key figures.

In this thesis, it was explained which production control methods have the greatest theoretical potential today and which results have already been achieved in scientific studies. The five methods KANBAN, POLCA, CONWIP, COBACABANA and LUMSCOR were discussed in more detail. In addition, a simulation experiment was set up based on the mechanical production of a medium-sized make-to-order company, which illustrates the effects of applying the described processes in relation to the aforementioned key figures.

Using an analysis of variance (ANOVA) based on the application of a Discrete Event Simulation, significant differences within and between the respective processes were identified. In general, the LUMSCOR (Lancaster University Management School Corrected Order Release) method achieved the best results in this case study. Accordingly, this production control method shows up to a 20% reduction in lead times and work in progress compared to the other methods considered. While delivery reliability can be maintained at a consistently high level of 96%, LUMSCOR is only outperformed by POLCA by half a percentage point in terms of machine utilization.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Kurzfassung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis.....	VI
Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....	IX
1 Einleitung	11
1.1 Motivation und Problemstellung.....	11
1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung	12
1.3 Aufbau der Arbeit.....	12
2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung in Industrieunternehmen ..	14
2.1 Begriffsdefinitionen	14
2.1.1 Aufgaben der Produktionsplanung.....	14
2.1.2 Aufgaben der Produktionssteuerung.....	15
2.1.3 Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungs-Systeme	17
2.2 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung	19
2.2.1 Maximierung Logistikleistung.....	21
2.2.2 Minimierung Logistikkosten.....	21
2.2.3 Dilemma der Ablaufplanung.....	22
2.3 Zentralisierungsgrad.....	23
2.3.1 Push-Systeme.....	23
2.3.2 Pull-Systeme.....	25
2.3.3 Hybride Ansätze	26
2.4 Trends und Neuigkeiten der heutigen Produktionsplanung und -steuerung.	27
3 Ausgewählte Verfahren der Fertigungssteuerung	29

3.1	Kartenbasierte Verfahren.....	29
3.1.1	KANBAN	29
3.1.2	POLCA	31
3.2	Karten- und workloadbasierte Verfahren.....	34
3.2.1	CONWIP	34
3.2.2	COBACABANA.....	37
3.3	LUMSCOR	39
3.4	Systematische Literaturrecherche zum Stand der Forschung hinsichtlich der genannten Verfahren	43
3.4.1	Vorgehensweise.....	43
3.4.2	Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche	45
4	Beschreibung der Fallstudie im Industriebetrieb.....	50
4.1	Grundlegende Firmeninformationen	50
4.2	IST-Situation der mechanischen Fertigung	51
5	Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens	53
5.1	Relevanz von Simulationsmodellen.....	53
5.2	Modellerstellung	54
5.2.1	Datenaufbereitung.....	55
5.2.2	Zusätzlich getroffene Annahmen	57
5.3	Festlegung von Parametern	57
5.3.1	Fixierte Parameter	57
5.3.2	Variierte Parameter	59
6	Ergebnisse und Auswertungen der Simulationsstudie	60
6.1	Aufstellung der Hypothesen	60
6.2	Konzeption der Datenauswertung.....	60
6.3	Evaluierung der Hypothesen	62

7	Ableitbare Handlungsempfehlungen für das Industrieunternehmen	71
	Conclusio	73
	Literaturverzeichnis.....	75
	Anhang	81

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Wechselwirkungen der logistischer Zielgrößen	22
Tabelle 2: Maschinen- und Arbeitsplatzstruktur mechanische Fertigung	52
Tabelle 3: Fixierte Modellparameter	58
Tabelle 4: Übersicht Varianzanalyse	61
Tabelle 5: Nutzwertanalyse Verfahren.....	66
Abbildung 1: Grundstruktur der Produktionsplanung und -steuerung	17
Abbildung 2: Hierarchischer Aufbau von Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungs-Systemen	19
Abbildung 3: Logistische Zielgrößen	20
Abbildung 4: Fehlerkreis der Fertigungssteuerung	23
Abbildung 5: Zentrales Steuerungssystem (Push)	24
Abbildung 6: Dezentrale Steuerungssystem (Pull)	26
Abbildung 7: Ablaufschema KANBAN	30
Abbildung 8: Kartenschleifen POLCA.....	32
Abbildung 9: Material- und Kartenfluss CONWIP.....	35
Abbildung 10: Plantafel COBACABANA	38
Abbildung 11: Periodische Auftragsfreigabe LUMSCOR.....	42
Abbildung 12: Publikationen pro Jahr	44
Abbildung 13: Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche	45
Abbildung 14: Fertigungslayout Simulationsmodell.....	55
Abbildung 15: Datenaufbereitungsprozess	56
Abbildung 16: Variablen Simulationsmodell	59
Abbildung 17: Ergebnisse Durchlaufzeit	62
Abbildung 18: Ergebnisse WIP	63
Abbildung 19: Ergebnisse Auslastung.....	64
Abbildung 20: Ergebnisse Liefertreue	65

Systematischer Vergleich verschiedener
Produktionssteuerungsverfahren im
Bereich einer mechanischen Fertigung
mittels Discrete Event Simulation

Abbildung 21: Standardabweichungen Durchlaufzeit.....	68
Abbildung 22: Standardabweichungen WIP.....	68
Abbildung 23: Standardabweichungen Liefertreue.....	69

1 Einleitung

Zu Beginn sollen die Relevanz und die Problemstellung des Themas erläutert werden. Anschließend wird darauf eingegangen, was die Struktur und die Zielsetzungen dieser Arbeit sind.

1.1 Motivation und Problemstellung

Um in der aktuellen Situation, in der Industrieunternehmen mit hohen Kundenanforderungen sowie Kosten- und Wettbewerbsdruck konfrontiert sind, am Markt bestehen zu können, ist es wesentlich für produzierende Betriebe, ihre logistischen Zielgrößen zu optimieren. Konkret angestrebt wird hierbei möglichst eine Minimierung von Durchlaufzeit und Umlaufbeständen bei gleichzeitiger Maximierung der Kapazitätsauslastung und Liefertreue.¹

Dabei kann vor allem die Auswahl des richtigen Produktionssteuerungsverfahrens eine essenzielle Rolle zur Verbesserung der genannten Kennzahlen spielen. Angefangen bei der Grobplanung der Aufträge, über die verschiedenen Varianten der Auftragserzeugung und -freigabe, bis hin zur Überwachung und Kontrolle der Prozessabläufe, bieten sich einige „Stellschrauben“, an denen gedreht werden kann, um die Organisation optimal auf die Unternehmenssituation zuzuschneiden.²

Demnach zeige sich, dass eine schlechte Fertigungssteuerung die logistischen Kennzahlen auch von jenen Unternehmen, welche sich in einem stabilen Umfeld mit sonst profitablen Rahmenbedingungen wiederfinden, negativ beeinflusst. Ein gutes Produktionssteuerungsverfahren ermöglicht hingegen auch unter Einfluss von Störfaktoren, wie Maschinenausfällen, Materialengpässen oder Personalnot, eine robuste Fertigung und die sichere Versorgung nachgelagerter Stellen in der Supply Chain, wie die Endkunden oder die Montage. Je volatiliter die Märkte und je komplexer und variantenreicher die Produktionsprogramme, desto stärker sei der Erfolg bzw. Misserfolg einer Produktionssteuerung erkennbar.³

¹ vgl. Schmidt et al. (2019), S. 276.; vgl. Wenzel et al. (2024), S. 240.

² vgl. Missbauer (2018), S. 646 ff.

³ vgl. Lödding (2016), S. 3.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Durch die mittlerweile hohe Komplexität der Unternehmensstrukturen und die verschiedensten, teils nicht unmittelbar sichtbaren, Abhängigkeiten innerhalb eines Produktionsprozesses, kann allerdings nicht pauschal und intuitiv entschieden werden, welches Fertigungssteuerungsverfahren für welchen Industriebetrieb am vorteilhaftesten erscheint. In der Vielzahl an Möglichkeiten von Fertigungssteuerungen, liegt die Herausforderung nämlich darin, all jene Ansätze herauszufiltern, welche theoretisch großes Potenzial für die Situation eines Unternehmens zeigen.

An dieser Stelle setzen die Zielsetzungen der Arbeit an. Einerseits soll erläutert werden, welche Ansätze laut Literatur für welche Fälle von Industriebetrieben in der heutigen Zeit passend sind und andererseits soll anhand eines Fallbeispiels und realen Unternehmensdaten untersucht werden, welche Wirkungen auf eine mechanische Fertigung durch die jeweilige Steuerungslogik erzeugt wird.

Insofern ergeben sich die folgenden Fragestellungen bzw. Forschungsfragen der Arbeit:

- (1) Welche Steuerungsverfahren haben heutzutage das theoretisch größte Potenzial, wie werden diese angewendet und welche Effekte werden durch diese erreicht?
- (2) Welche der angesprochenen Verfahren erzielen in der Simulation eines Fertigungsbereiches welche Ergebnisse hinsichtlich der logistischen Kennzahlen?

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn werden zur Erleichterung des Verständnisses im weiteren Verlauf der Arbeit einige Grundlagen und Begriffe aus dem Bereich der Produktionsplanung und Produktionssteuerung erklärt. Das umfasst die Erklärung der Aufgaben, Ziele und der Unterscheidungsmerkmale der Fertigungsorganisationen sowie einen kurzen Einblick in die heutigen Trends. Anschließend wird auf einige ausgewählte Verfahren, die in der heutigen Zeit besonders sinnvoll für Industriebetriebe erscheinen, näher eingegangen. Dabei werden zuerst die konkreten Verfahrensschritte und Regeln erklärt. Danach folgt eine systematische Literaturrecherche, welche die Ergebnisse, die die jeweiligen Verfahren in letzter Zeit in Industrieunternehmen geliefert haben, sammelt und somit einen Überblick über die Outputs der State-of-the-Art Ansätze liefert.

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen und Forschungsergebnissen wurde mit der Erstellung eines Python Simulationsmodelles begonnen, welches vergangene Auftragsdaten eines Fallbeispielunternehmens verarbeitet und anhand der jeweiligen Logik einiger Produktionssteuerungen Outputs hinsichtlich der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Liefertreue, Auslastung und Bestände liefert. In Kapitel 4 werden dabei kurz die Gegebenheiten des Zielunternehmens vorgestellt, ehe im darauffolgenden Teil der Arbeit auf die Entwicklung des Simulationsmodells und die Aufbereitung der Daten eingegangen wird.

Anhand der Simulationsergebnisse werden in weiterer Folge einige statistische Auswertungen und Analysen durchgeführt und abschließend anhand der erzielten Werte Handlungsempfehlungen für die Implementierung einer neuen Produktionssteuerungslogik im Fallbeispielunternehmen erläutert.

2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung in Industrieunternehmen

Zu Beginn dieser Arbeit sollen gewisse Grundlagen zum Themenkomplex der Produktionsplanung und -steuerung, im Fortlauf der Arbeit abgekürzt auch als PPS bezeichnet, behandelt werden. Nach einigen Basisinformationen werden die Ziele von Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungskonzepten sowie deren Unterscheidungsmerkmale erläutert.

2.1 Begriffsdefinitionen

Um ein Verständnis für die Grundsätze der Fertigungsplanung, -steuerung und eines PPS-Systems zu vermitteln, werden einige grundlegende Basics im Folgenden jeweils genauer erklärt.

2.1.1 Aufgaben der Produktionsplanung

Thommen et al. definieren die Produktionsplanung als möglichst zeitgerechte Bereitstellung von betrieblichen Ressourcen, um in zukünftigen Perioden die gewünschten Mengen an Zwischen- oder Fertigprodukten erzeugen zu können. Die betrieblichen Ressourcen umfassen dabei vor allem Material, Personal und Maschinen. Die Basis der Planung bilden in erster Linie Stücklisten der Materialien, Ablaufpläne zum Produktionsprozess der Produkte sowie Arbeitspläne für das entsprechende Teil auf den betreffenden Maschinen. Ausgehend von diesen Daten ist es Aufgabe der Fertigungsplanung, Material- und Kapazitätsrechnungen zu erstellen und die Aufträge dementsprechend zeit- und ortsmäßig einzuordnen.⁴

Arnold et al. verweisen in ihrer Aufstellung der Planungsaufgaben auf die Festlegung des VDI durch Hacker aus dem Jahr 1989. In dieser Definition unterscheidet man zwischen der eher langfristigen Erstellung eines Produktionsprogrammes und den mittelfristigen Tasks der Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanungen. Des Weiteren wird die Datenverwaltung, vor allem weil die aus den Daten ableitbaren Informationen als

⁴ vgl. Thommen et al. (2020), S. 190.

Kommunikationsmittel zwischen der Planung und Steuerung fungieren, als essenzielles Element der Produktionsplanung bezeichnet.⁵

2.1.2 Aufgaben der Produktionssteuerung

Nach Festlegung eines etwas gröberen Produktionsplanes gilt es in weiterer Folge, diesen auf operativer Ebene umzusetzen und diesen selbst unter Einfluss von Störfaktoren möglichst ordnungsgemäß durchzuführen. Eben diese Aufgaben der Feinplanung und der Reaktion auf kurzfristige Änderungen soll die Fertigungssteuerung übernehmen.⁶

Konkret werden in der Literatur bzgl. Fertigungssteuerungsaufgaben die beiden Teilbereiche der Auftragsveranlassung sowie der Kapazitäts- und Auftragsüberwachung innerhalb der Fertigung angesprochen.

Erstere besteht dabei aus den Aufgaben der Auftragserzeugung und der Auftragsfreigabe. Die Auftragserzeugung bildet die Schnittstelle zwischen Produktionsplanung und -steuerung. Anhand der vorliegenden Kundenbestellungen bzw. des geplanten Produktionsprogrammes werden Aufträge generiert, die den Zu- und Abgang des Fertigungssystems bestimmen. In der Auftragserzeugung wird festgelegt, ob für einen Kunden oder auf Lager produziert wird, ob die Aufträge periodisch (in fixen Zeitintervallen) oder ereignisorientiert (durch bestimmte Ereignisse angestoßen) ausgelöst werden und in welcher Reihenfolge sie in die Fertigung eingelastet werden sollten. Außerdem wird unterschieden, ob eine oder mehrere Stufen der Stückliste bedient werden müssen. Dabei werden die einzelnen Stationen bzw. notwendigen Ressourcen entlang der Prozesskette des zu erzeugenden Gutes durch Zuordnung der Aufträge zu den Arbeitsplätzen oder Ressourcengruppen sowie Bildung von passenden Losgrößen in Betracht gezogen. Im Rahmen der Durchlaufterminierung werden indes zeitliche Ecktermine für die einzelnen Aggregate/Ressourcengruppen festgelegt.

Die Auftragsfreigabe bezeichnet man als jenen Zeitpunkt, ab dem die Fertigung mit der Bearbeitung des Auftrages beginnen darf. Der Auftrag wird demnach eingelastet und bildet den IST-Zugang des Fertigungssystems. Dem voraus geht die positive

⁵ vgl. Arnold et al. (2008), S. 324.

⁶ vgl. Burggräf; Schuh (2020), S. 374.

Prüfung der Verfügbarkeit von Maschine, Personal und Material sowie die Erfüllung der Kriterien an den Umlaufbestand. Ist die kapazitive Grenze einer Maschine mit deren Pufferzonen oder die Belastungsgrenze des Gesamtsystems erreicht, muss mit der Freigabe weiterer Aufträge noch zugewartet werden. Charakterisieren lässt sich eine Auftragsfreigabe nach ihrem Kriterium, sprich dem Merkmal oder den Regeln, nach denen entschieden wird, dem Detaillierungsgrad, d.h. ob ein Auftrag als Ganzes mit all seinen Stufen eingelastet wird oder ob jede Fertigungsstufe einzeln ausgelöst werden muss und wieder nach der periodischen oder ereignisorientierten Auslösungslogik.⁷

Nach der Freigabe der Orders bedarf es im laufenden System einer ständigen Kapazitäts- und Auftragsüberwachung. Die Anpassung der Kapazitäten auf operativer Ebene bzw. das Umgehen mit Rückständen und Engpassituationen sollte jedenfalls so gestaltet sein, dass die Termintreue gegenüber dem Kunden hochgehalten werden kann. Daher bedarf es einer ausgeprägten Kapazitätsflexibilität, um Lieferverzögerungen zu umgehen. Konkret kann diese die Erweiterung bzw. Verkürzung der Arbeitszeiten der Mitarbeiter bei Über- oder Unterlast bedeuten sowie den Versuch, Betriebsmittel durch gleichwertige anstatt den ursprünglich eingeplanten zu ersetzen.⁸

⁷ vgl. Burggräf; Schuh (2020), S. 387. ff.; vgl. Arnold et al. (2008), S. 333 ff.

⁸ vgl. Lödding (2016), S. 531 ff.

Abschließend kann die Grundstruktur eines PPS-Systems mit den oben beschriebenen Aspekten der Planung und Steuerung, wie in der untenstehenden Abbildung 1 zusammengefasst werden:

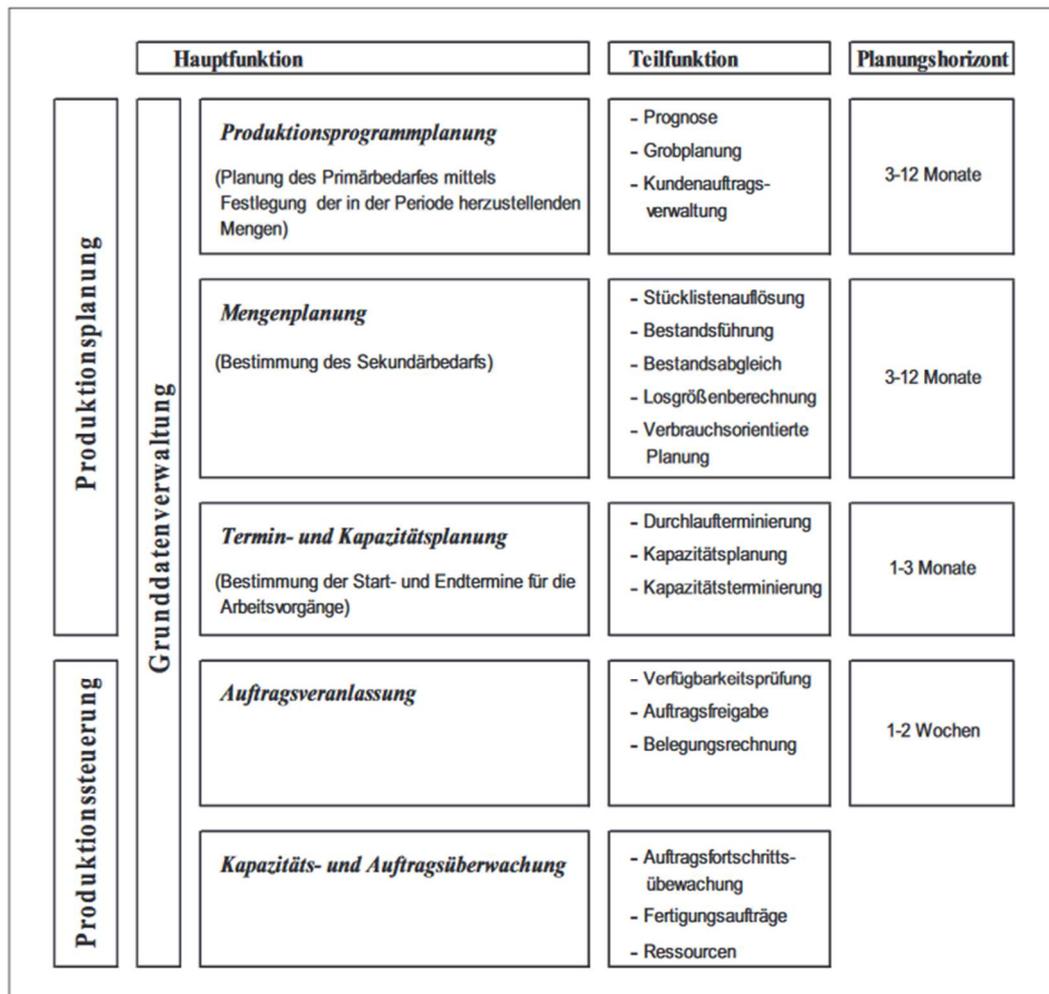


Abbildung 1: Grundstruktur der Produktionsplanung und -steuerung⁹

2.1.3 Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungs-Systeme

Wannewetsch bezeichnet PPS-Systeme als jene Softwareansätze, welche eine ganzheitliche Unterstützung der Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung umfassen. Dabei besteht die Hauptaufgabe darin, Fertigungsabläufe sowohl zeit- als auch mengenmäßig anhand der vorliegenden Kundenaufträge zu steuern.¹⁰

Diese computergestützten Informations- und Dispositionsinstrumente sollen aufbauend auf einer zentralen Datenbank Aufgaben aus der mittelfristig-taktisch orientierten

⁹ Wannewetsch (2021), S. 442.

¹⁰ vgl. Wannewetsch (2021), S. 439. ff.

Produktionsplanung bis hin zur kurzfristigen und operativen Kontrolle und Steuerung der Fertigung von Industrieunternehmen unterstützen. Außerdem werde der Einsatz von solchen Systemen umso vorteilhafter, je heterogener und wechselnder die Auftragszusammensetzungen innerhalb eines Industriebetriebes sind. Die Einführung von IBM PICS (Production Information and Control System) in den 1960er Jahren wird dabei als Pionierprogramm im Bereich der PPS-Systeme angesehen.¹¹

Während man in den folgenden Jahrzehnten noch an den Erfolg einer völlig rechnergestützten Fabrik glaubte, wurde die Vision bald insofern abgeschwächt, als dass der Faktor Mensch an Wichtigkeit unterschätzt wurde und nicht per se vernachlässigt werden darf. Die umfassende Mengen-, Termin und Kapazitätsplanung wurde allerdings je nach Reife und Realitätsnähe der Planung gut in diese Systeme integriert. Deswegen hat sich computergestützte Informationsverarbeitung in diesen Bereichen zu einem zentralen Element in sämtlichen Industriebetrieben entwickelt.¹²

Bei der Konzeption eines PPS-Systems sei es weiters wichtig, das komplexe Problem der Fertigungsplanung und -steuerung in modulartige Teilaufgaben zu zerlegen, dessen Lösungsansätze dann iterativ und rechnergestützt durchgeführt werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Methodiken der einzelnen Module ist zur Koordination und zum Austausch von Informationen die Verknüpfung der einzelnen Bereiche von großer Bedeutung.¹³ Die folgende Abbildung 2 zeigt eine beispielhafte Aufteilung der Module eines PPS-Systems entlang der Teilaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung.

¹¹ vgl. Kistner; Steven (2001), S. 254.

¹² vgl. Schuh (2014), S. 14 ff.

¹³ vgl. Fandel et al. (1994), S. 1.

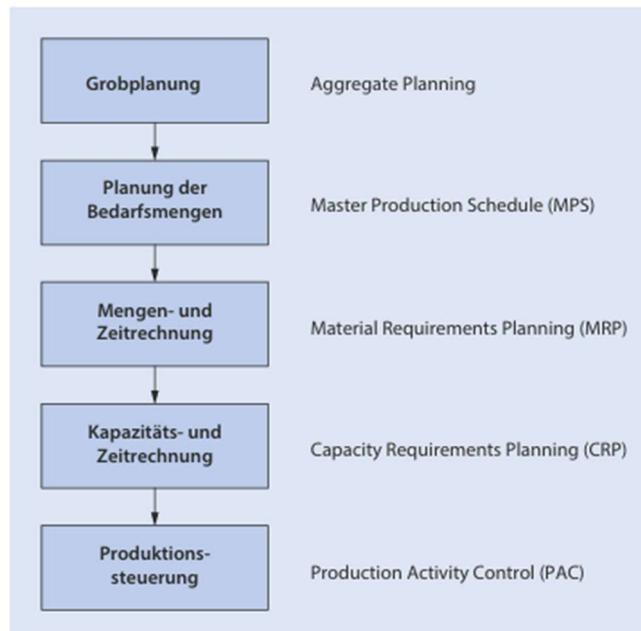


Abbildung 2: Hierarchischer Aufbau von Produktionsplanungs- und Produktionssteuerungs-Systemen¹⁴

Ausgehend von der übergeordneten Grobplanung werden im Master Production Schedule, auch als Produktionsprogramm bezeichnet, die genauen Bedarfsmengen ermittelt. Danach geht es beispielsweise über einen MRP-Lauf um die Planung von Mengen und Zeiten sowie der Feststellung der dafür notwendigen Kapazitäten. Nach tatsächlich geschehener Einlastung des Auftrages ist es auf operativer Ebene dann noch die Aufgabe eines Kontrollsystems, die Fertigung zu steuern.

2.2 Ziele der Produktionsplanung und -steuerung

Seit jeher gelten Prozesse der Produktionsplanung und -steuerung als wesentlicher Erfolgsfaktor in der Organisation von Industriebetrieben. Lödding unterstreicht, dass eine schlechte Fertigungssteuerung die logistischen Kennzahlen auch von jenen Unternehmen, welche sich in einem stabilen Umfeld mit sonst profitablen Rahmenbedingungen wiederfinden, negativ beeinflusst. Ein gutes Produktionssteuerungsverfahren ermöglicht hingegen auch bei Störeinflüssen, wie Maschinenausfällen, Materialengpässen oder Personalnot, eine robuste Fertigung und die sichere Versorgung nachgelagerter Stellen in der Supply Chain, wie die Endkunden oder die Montage. Des Weiteren nehme die Wichtigkeit einer ausgereiften Produktionssteuerung durch den Umstand volatiler Märkte, immer komplexerer und

¹⁴ Thommen et al. (2020), S. 206.

variantenreicherer werdender Produktionsprogramme und auch hinsichtlich der Optimierung der logistischen Kennzahlen, um im Wettbewerb am Markt bestehen zu können, zu.¹⁵

Umso wichtiger ist es demnach, die Zielgrößen der Fertigungssteuerung festzustellen. In sämtlichen Quellen stößt man hier immer wieder auf die gleichen Kennzahlen, welche die Performance eines Steuerungssystems messbar machen. Die untenstehende Abbildung 3 gibt einen Überblick über die zu beachtenden Aspekte hinsichtlich dieses Sachverhaltes.

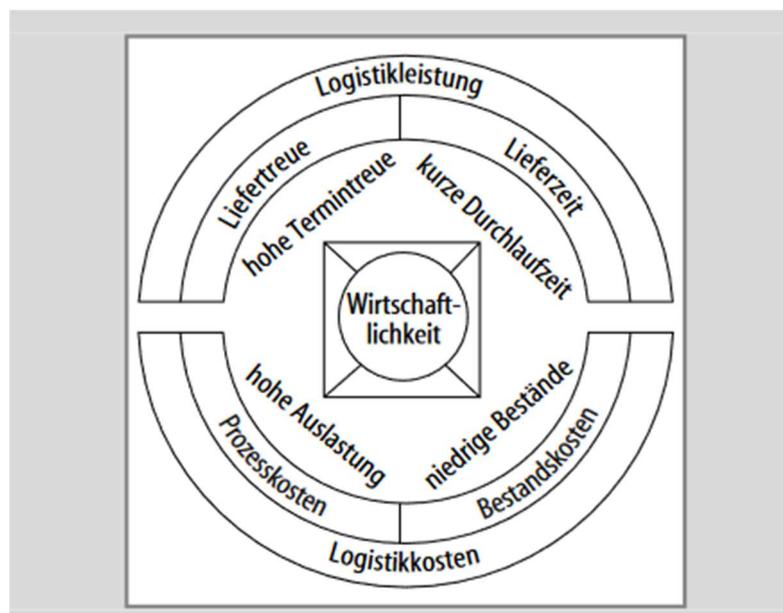


Abbildung 3: Logistische Zielgrößen¹⁶

Um sich im Wettbewerb am Markt zu etablieren und den langfristigen Erfolg eines Industriebetriebes zu garantieren, bedarf es hoher Wirtschaftlichkeit, welche durch die Optimierung zweier Überbegriffe gesteigert werden kann.

Einerseits sollten Industriebetriebe immer bestrebt sein, ihre Logistikleistung und den Servicegrad gegenüber ihren Kunden zu maximieren und andererseits die internen Prozesse so auszurichten, dass sich die Logistikkosten auf ein Minimum reduzieren. Diese beiden Faktoren spiegeln sich auch in der zu maximierenden Logistikeffizienz wider, welche den Quotienten aus Logistikleistung und Logistikkosten darstellt.

¹⁵ vgl. Lödding (2016), S. 3.

¹⁶ Arnold et al. (2008), S. 324.

2.2.1 Maximierung Logistikleistung

Die Logistikleistung steht in Zusammenhang mit den unternehmensexternen Abhängigkeiten zu den Kunden. Diese bevorzugen zum Ersten eine möglichst kurze Wartezeit, was aus Sicht des Industrieunternehmens eine kurze Durchlaufzeit bedeutet. Die Durchlaufzeit bildet nämlich die Zeitdauer zwischen Entnahme des Ausgangsmaterials bzw. der Auftragsfreigabe und der Ablieferung der Produkte.¹⁷

Zum zweiten erwartet sich der Kunde eine möglichst hohe Termintreue. Die Liefertreue kann als Maß, das die Einhaltung zugesagten Termine von Industrieunternehmen gegenüber den Abnehmern ihrer Produkte widerspiegelt, definiert werden.¹⁸

2.2.2 Minimierung Logistikkosten

Der zu maximierenden Logistikleistung stehen die unternehmensinternen Prozesse gegenüber, deren Kosten es möglichst gering zu halten gilt. Ein wesentlicher Faktor in diesem Zusammenhang ist die Auslastung der betrieblichen Ressourcen, allen voran jene der Maschinen. Um die Finanzierung der einzelnen Aggregate rechtfertigen zu können, ist der Anteil der Leerzeiten zu vermindern und eine hohe Auslastung dieser gewünscht. Die Maschinenauslastung errechnet sich als Quotient von mittlerer genutzter zu maximal möglicher Zeit eines Arbeitssystems.¹⁹

Außerdem kostenverursachend wirken sich die Umlaufbestände, auch Work in Process kurz WIP genannt, in der Fertigung aus. Als Umlaufbestände kann man die Mengen an Zwischenprodukten, die momentan auf den Maschinen in Bearbeitung stehen oder sich davor in der Warteschlange oder zwischen den Maschinen befinden, erklären. Bestände erweisen sich als vorteilhaft, wenn auf kurzfristige Änderungen der Absatzsituation flexibel reagiert werden muss. Allerdings bilden sie einen wesentlichen Teil des im Umlaufvermögen gebundenen Kapitals und somit eine Belastung der Unternehmen. Des Weiteren ist in Fertigungen mit hoher Variantenvielfalt und Absätzen in kleineren Mengen eine Aufrechterhaltung von Beständen an Zwischenprodukten wenig sinnvoll.²⁰

¹⁷ vgl. Burggräf; Schuh (2020), S. 399.

¹⁸ vgl. Nyhuis; Wiendahl (2012), S. 3.

¹⁹ vgl. Burggräf; Schuh (2020), S. 397.

²⁰ vgl. Kleeberg (1993), S. 10.

2.2.3 Dilemma der Ablaufplanung

Die oben erwähnten Ziele weisen zum Teil allerdings unterschiedliche Abhängigkeiten zueinander auf. So können Ziele komplementär, unabhängig oder konkurrierend sein, das heißt, eine Optimierung des einen Zieles unterstützt, hat keinen Einfluss oder behindert die Verbesserung einer anderen Zielgröße. Bauernhansl erläutert beispielsweise, dass es für eine niedrige Durchlaufzeit auch notwendig ist, die Bestände gering zu halten. Die Senkung der einen Kennzahl bewirke demnach auch eine Reduzierung der anderen. Wird der Work in Process allerdings vermindert, so steigt die Gefahr der Unterauslastung eines Arbeitssystems, was eine Verschlechterung der Gesamtauslastung der Fertigung zur Folge hat. Das unterstreicht, dass im Rahmen des Auftragsmanagements das gesamte Zielsystem und nicht nur einzelne Größen richtig positioniert werden müssen, um erfolgreiche Ergebnisse erzielen zu können. Dabei müssten bei Abänderung eines Teilzieles die Auswirkungen auf alle anderen Ziele in Betracht gezogen werden.²¹ In nachfolgender Tabelle 1 sind die einzelnen Abhängigkeiten überblicksmäßig zusammengefasst.

Ziel- Änderung	Einfluss auf...	DLZ	Termintreue	Auslastung	WIP
Senkung DLZ		-----	+	-	+
Steigerung Termintreue		+	-----	-	+
Steigerung Auslastung		-	-	-----	-
Senkung WIP		+	+	-	-----

Tabelle 1: Wechselwirkungen der logistischer Zielgrößen

In ungünstigen Konstellationen kann es demnach auch passieren, dass durch die Verbesserung eines Teilzieles eine Abfolge von Ereignissen erzeugt wird, die die Zielerreichung des Gesamtsystems und am Ende auch das zu verbessernde Teilziel verschlechtern. Die nachfolgende Abbildung 4 soll den sogenannten Fehlerkreis der Fertigungssteuerung verdeutlichen.

²¹ vgl. Bauernhansl (2020), S. 218.

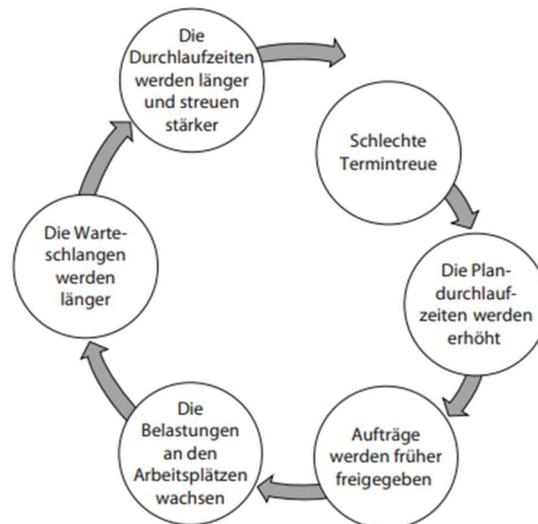


Abbildung 4: Fehlerkreis der Fertigungssteuerung²²

Anfangs ist man sich dem Problem der schlechten Termintreue bewusst und möchte dem durch Erhöhung der Plandurchlaufzeiten entgegenwirken. Dies bewirkt auch, dass Aufträge nun früher freigegeben werden dürfen, weshalb allerdings auch die Warteschlangen an Beständen vor den Maschinen größer werden. Größere Arbeitsbelastungen im Gesamtsystem führen in weiterer Folge wieder zu einer Verlängerung und größeren Varianz der Durchlaufzeiten, was in einer schlechteren Termintreue als zu Beginn der angedachten Optimierungsmaßnahme endet.

2.3 Zentralisierungsgrad

Bei der Konzeption eines Fertigungssteuerungsverfahrens gibt es unterschiedliche Herangehensweisen, wie die Organisation zwischen den einzelnen Prozessen stattfinden kann. Dies betrifft vor allem auch den Zentralisierungsgrad. Die groben Optionen zur Auslegung dieses Faktors sollen im Folgenden veranschaulicht werden.

2.3.1 Push-Systeme

Bei Push-orientierten PPS-Konzepten unterliegen alle Teile des Produktionssystems einer zentralen Planungsstelle. Meistens ist diese durch einen Leitstand realisiert, der dabei Überblick über alle Fertigungsbereiche behalten muss. Üblicherweise findet man eine derartige Organisation der Fertigungsplanung und -steuerung bei funktionsorientierten

²² Nyhuis; Wiendahl (2012), S. 5.

Produktionssystemen und dort, wo eine Vielzahl an Fertigungsinseln bzw. Arbeitsbereichen vorliegt, welche eine Dezentralisierung aufgrund der komplexeren Zusammenhänge nur erschwert möglich macht. Eine zentrale Organisation hat zur Folge, dass sich zwar die Leiter der einzelnen Bereiche auf ihre internen Aktivitäten konzentrieren können, der Koordinationsaufwand und der Verantwortungsbereich des übergeordneten Führungspersonales erhöhen sich jedoch merklich.

Eine weitere Herausforderung liegt in der oft fehlenden Übereinstimmung von Plan und Realität sowie einem Transparenzverlust in der Fertigung. Um diesen Faktoren entgegenzuwirken, ist ein ausführlicher Informationsaustausch zwischen den planenden und den ausführenden Stellen der Fertigung von wesentlicher Bedeutung für den Erfolg eines zentralen PPS-Systems. Damit der Leitstand die gewünschten Informationen auch verarbeiten kann, ist zudem auch ein höherer Grad an Formalität und Standardisierung der Mitteilungen erforderlich. Der Austausch der Mitteilungen nach einem gewissen Schema könnte z.B. durch ein ausgereifteres IT-System realisiert sein.²³ In Abbildung 5 sind die Informationsflüsse im Falle einer zentral organisierten PPS erkennbar.

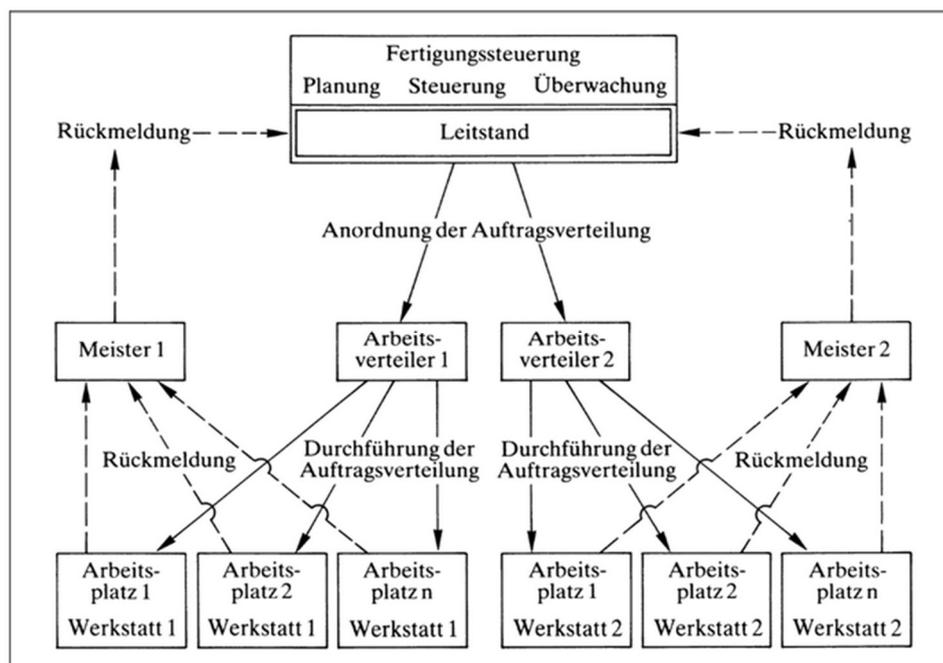


Abbildung 5: Zentrales Steuerungssystem (Push)²⁴

²³ vgl. Ramsauer (1997), S. 163.ff.; Wannewetsch (2021), S. 458.f.

²⁴ Schulte (2013), S. 422.

Man erkennt klar, dass alle Aufträge aus dem übergeordneten zentralen Leitstand ausgehen und über Arbeitsverteiler ihren Weg zu den einzelnen Arbeitsplätzen finden. Jegliche Informationen, die in den Werkstätten auftreten, werden, gegeben falls über die Bereichsleiter, nach oben in die Zentrale weitergeleitet und dort in neue Befehle verarbeitet. Die Basis für die Einlastungs- und Freigabeentscheidungen bildet dabei die vorangegangene exakte Planung der betrieblichen Ressourcen. Als bekanntestes Beispiel für Push-Systeme gilt wohl MRP (Material Requirements Planning).

2.3.2 Pull-Systeme

Im Gegensatz zu den Push-Ansätzen, bei denen die Aufträge durch die zentrale Planungsstelle in die Fertigung „gedrückt“ werden, basieren die Pull-basierten PPS-Konzepte auf dem Prinzip, die Produktion erst anhand konkreter Kundenaufträge zu starten. Nach Einlasten des Kundenauftrages wird die letzte Station des Herstellungsprozesses und in weiterer Folge auch alle vorgelagerten Arbeitssysteme angestoßen, die geforderten Mengen an Zwischen- und Endprodukten zu erzeugen. Demnach wird der Auftrag durch die einzelnen Stationen der Fertigung „gezogen“.

Durch diese Methodik soll vor allem die Problematik der Bestands- und Kapazitätsschwankungen der Push-Verfahren vermieden werden, da nur für konkrete Orders und nicht basierend auf Prognosen und auf Lager gefertigt wird. Hinsichtlich der Organisation bedeutet dies, dass die Planung zumeist nicht durch eine übergeordnete Stelle angeordnet wird, sondern dezentral über mehrere vermaschte Regelkreise zwischen den einzelnen Arbeitsstationen geschieht.²⁵

Durch den Umstand, dass erst bei Durchführung des Prozesses entschieden wird, wie die logistischen und fertigungstechnischen Tätigkeiten, die der betreffenden Maschine vorgelagert sind, zu starten sind, ergibt sich eine wesentlich größere Flexibilität im gesamten Fertigungsprozess. Mitarbeiter können nämlich sehr kurzfristig und flexibel auf Änderungen reagieren und operative Anpassungen des eigentlichen Produktionsplanes durchführen. Klug erläutert, dass einige Teile von eben diesem ursprünglichen Produktionsplan jedenfalls doch im Vorhinein und nicht dynamisch nach dem Pull-Prinzip erstellt werden sollten. Dabei werden vor allem die Aufgaben des Kapazitätsabgleiches und Nettobedarfsplanung angesprochen, deren zentrale

²⁵ vgl. Kellner et al. (2020), S. 321 f.

Grobplanung als Grundlage notwendig erscheint. Abseits dessen könne sich aber eine nahezu vollständige Pull-Steuerung durchaus umsetzen lassen.²⁶

Als Gegenstück zu den Informationsflüssen in der vorherigen Abbildung 5, bei denen die Aufgaben direkt aus dem Leitstand delegiert wurden, zeigt die untenstehende Abbildung 6 die dezentrale Anweisungsverteilung aus den Meisterbereichen. Diese Meisterbereiche stehen wieder untereinander in Verbindung und deren Informationsaustausch entspricht den schon vorher erwähnten, vom Leitstand entkoppelten, Regelkreisen. Die Zentrale überwacht in diesem Falle nur das Geschehen und greift ggf. ein.

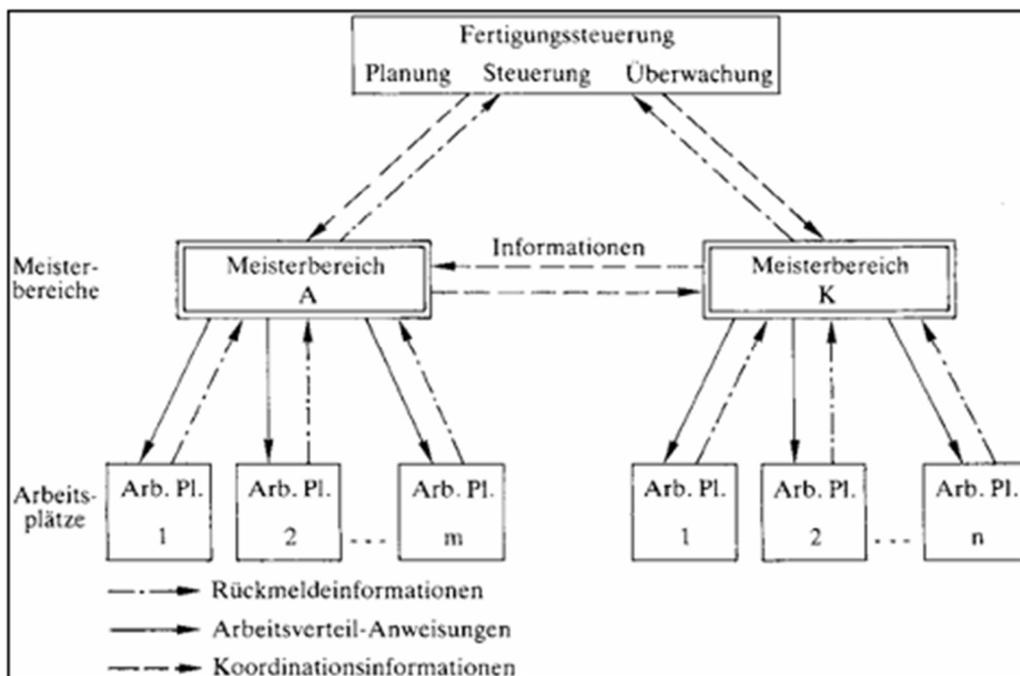


Abbildung 6: Dezentrale Steuerungssystem (Pull)²⁷

2.3.3 Hybride Ansätze

Da sowohl zentrale als auch dezentrale Ansätze ihre Vor- und Nachteile mit sich bringen, empfiehlt es sich, die unterschiedlichen Paradigmen so zu kombinieren und auf die jeweilige Unternehmensstruktur anzupassen, dass sich maximale Vorteilhaftigkeit ergibt. Eben diese Systeme, die Merkmale beider Konzepte verbinden, werden als hybride Ansätze zur Fertigungssteuerung bezeichnet. Als Beispiele für Verfahren, die Eigenschaften aus beiden vorher beschriebenen Optionen

²⁶ vgl. Klug (2013), S. 44 ff.

²⁷ Schulte (2013), S. 422 ff.

hinsichtlich der Zentralisierung und Steuerungslogik vereinen, sind beispielsweise das OPT- sowie das CONWIP- Verfahren.²⁸ Zweiteres wird im Laufe der Arbeit noch näher thematisiert.

In der Literatur finden sich einige Belege, welche die Sinnhaftigkeit und den Erfolg der hybriden Systeme hervorheben. So zeigt sich am Beispiel der Automobilindustrie bei Klug, dass ein hybrider Steuerungsansatz hinsichtlich der Performance den reinen push- oder pull-basierten Ansätzen in vielerlei Hinsicht überlegen ist.²⁹

2.4 Trends und Neuigkeiten der heutigen Produktionsplanung und -steuerung

Grundsätzlich lassen sich die heutzutage üblichen Steuerungslogiken am Shop-Floor in ein paar Kategorien gliedern. Zum einen erwähnen Autoren, wie beispielsweise Roy und Ravikumar, Steuerungspolitiken nach fix terminisierten Startzeitpunkten. Dies entspricht im Grunde genommen der Einlastung der Aufträge nach dem Push-Prinzip. Einerseits können alle Ressourcen im Vorhinein deterministisch anhand eines Material Requirement Plannings durchgeplant sein oder andererseits die Startzeitpunkte anhand von mathematischen Wahrscheinlichkeiten und Verteilungen, wie etwa der Poisson Verteilung, ermittelt und festgelegt werden.³⁰

In der Praxis zeigte sich aber, dass kartenbasierte Verfahren, also Produktionssteuerungen, bei denen der Fluss der Jobs durch Karten kontrolliert wird, wesentlich bessere Ergebnisse als mathematische Modelle erzielen.³¹ Neben den kartenbasierten Verfahren werden auch noch häufig Fertigungssteuerungen erwähnt, welche die Freigabeprozesse anhand einer Arbeitslastnorm für die gesamte oder Teilbereiche sowie Engpässe der Produktion regulieren. Diese werden auch als Workload Control Verfahren, kurz WLC, bezeichnet.

In Zusammenhang mit dem Industrie 4.0 Gedanken, welcher seit einiger Zeit in der Forschung und Wirtschaft Einzug hält, gibt es ebenfalls einiges an Forschungsarbeiten, die sich mit Produktionssteuerungsverfahren beschäftigen. Das Hauptaugenmerk

²⁸ vgl. Gstettner (1998), S. 9.

²⁹ vgl. Klug (2013), S. 62.

³⁰ vgl. Roy; Ravikumar (2019), S. 119.

³¹ vgl. Roy; Ravikumar (2019), S. 131.

dieser Konzepte der digitalen Transformation der operativen Prozesse liegt auch hier wieder auf der Digitalisierung karten- oder workloadbasierter Steuerungsmethoden.

Gosavi vergleicht in seinem Paper das traditionelle CONWIP-Verfahren mit einem neu entwickelten digitalen Ansatz anhand einiger Experimente. Es ergibt sich demnach, dass die moderne Lösung mithilfe von cyber-physischen Systemen und dem Internet of Things (IoT) resilienter gegenüber Störungen ist, schneller Ergebnisse liefert und keine menschliche Intervention benötigt.³²

Bei Ragazzini und Negri wird ebenfalls CONWIP als Grundkonzept herangezogen, um ein Produktionskontrollsystem basierend auf einem digitalen Zwilling plus einen Reinforcement Learning Algorithmus zu entwickeln. Das digitale Abbild der Produktion soll dabei vor allem kurzfristige Prognosen über das Systemverhalten liefern können. Die umfangreichen Tests hinsichtlich Fertigungsabläufen nach dem Job Shop oder Flow Shop Prinzip zeigten dabei vielversprechende Resultate.³³

Neue Informationstechnologiekonzepte für workloadbasierte Verfahren finden sich vor allem in Untersuchungen von Make-to-Order Fertigungen, wo die Variabilität an Produkten und Fertigungssequenzen sehr vielfältig ist. Ein häufig gewählter Ansatz ist dabei die Methode der Diskreten Event Simulation, welche heutzutage um autonome Komponenten, wie Feedback Loops oder dynamische Kontrollsysteme erweitert werden kann.³⁴

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass in der momentanen Forschung vor allem karten- und workloadbasierten Verfahren besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die Grundkonzepte der jeweiligen Verfahren fungieren dabei als Basis für digitale Weiterentwicklungen entlang des Industrie 4.0 Konzeptes. Deswegen werden im nächsten Abschnitt der Arbeit einige ausgewählte Verfahren eben dieser beiden Großbereiche näher untersucht.

³² vgl. Gosavi, Abhijit, Aparna A. (2024), S. 109.

³³ vgl. Ragazzini et al. (2021), S. 743.

³⁴ vgl. Sagawa et al. (2023), S. 286.

3 Ausgewählte Verfahren der Fertigungssteuerung

Bei der Entwicklung von Produktionssteuerungskonzepten haben sich in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von unterschiedlichen Verfahren ergeben, welche mit ihren Regeln und Ablauflogiken die Rahmenbedingungen einer der Produktionssteuerung bilden. Aufgrund der zuvor erläuterten besonderen Relevanz von karten- und workloadbasierten Verfahren in der heutigen Forschung sollen in diesem Kapitel einige dieser Konzepte näher thematisiert werden. Dabei soll zuerst auf ein paar kartenbasierte und im Anschluss auf einen Auszug von karten- und workloadbasierten Verfahren eingegangen werden.

3.1 Kartenbasierte Verfahren

Ein häufig gewählter Ansatz innerhalb eines Produktionssteuerungsverfahrens ist die Verwendung von Karten durch deren Kreislauf die Prozesse entlang der Produktionssequenz eines Auftrages angestoßen oder angehalten werden. Im Rahmen dieses Abschnittes werden die beiden kartenbasierten Verfahren KANBAN und POLCA thematisiert.

3.1.1 KANBAN

Eines der wohl bekanntesten Produktionssteuerungsverfahren der letzten Jahrzehnte und Grundlage für einige andere Verfahren ist das von Ohno im Rahmen des Toyota Production System eingeführte KANBAN. Von der Grundidee entspricht dieses Konzept dem Supermarktprinzip. Das bedeutet, dass nur nachproduziert wird, was aus einem Ausgangslager durch den Kunden konsumiert wurde. Aufträge werden demnach rein verbrauchsgesteuert erzeugt und durchlaufen die Fertigung nach dem Pull-Prinzip.³⁵

Denn ungleich zu diversen anderen Fertigungssteuerungen erfolgt bei KANBAN die Auftragserzeugung an der letzten Station der Herstellungskette, wo Fertigprodukte aus einem Pufferlager entnommen werden. Unterschreitet das Lager einen gewissen Meldebestand oder ist es leer, so wird die Produktion aufgenommen und die benötigten Teile an der vorgelagerten Station angefordert. Das ermöglicht, dass

³⁵ vgl. Bauernhansl (2020), S. 258 f.

immer nur eine bestimmt definierte Menge an Zwischenprodukten als Umlaufbestand vorliegt, bedingt aber einen regelmäßigen Teilebedarf und eine stabile Produktion nach dem Fließprinzip. Als optimale Einsatzgebiete werden die Großserien- und Massenfertigung angesehen.³⁶

KANBAN gilt dabei als Pioniersystem mit dezentral abgestimmten selbststeuernden Regelkreisen zwischen den einzelnen Fertigungsstufen basierend auf Karten. Diese Karten regeln den Informationsfluss und enthalten Informationen bzgl. der Teile, deren Mengen im Behälter und der Transportwege. Dabei wird zwischen einem Produktionskanban, welche zwischen Pufferlager und Quelle, also der produzierenden Arbeitsstation, zirkuliert und einem Transportkanban zwischen Senke, also der nachfolgenden Fertigungsstelle, und dem Pufferlager unterschieden.

Sobald ein Behälter zu wenig Stück enthält, geht ein Mitarbeiter mit dem Behälter samt einer Karte zum Pufferlager der vorherigen Station, tauscht dort den leeren gegen einen vollen Behälter und hinterlässt die Karte in einer Sammelbox oder Plantafel. Die dort enthaltenen Karten dienen als Produktionsaufträge der Vorstationen, um für die Pufferlager entsprechende Mengen nachzuproduzieren. Dieses Schema wiederholt sich zwischen allen Paaren der Fertigungslinie für alle Produkttypen bis hin zur ersten Arbeitsstation der Prozesskette.³⁷

Untenstehende Abbildung 7 visualisiert den soeben beschriebenen Ablauf:

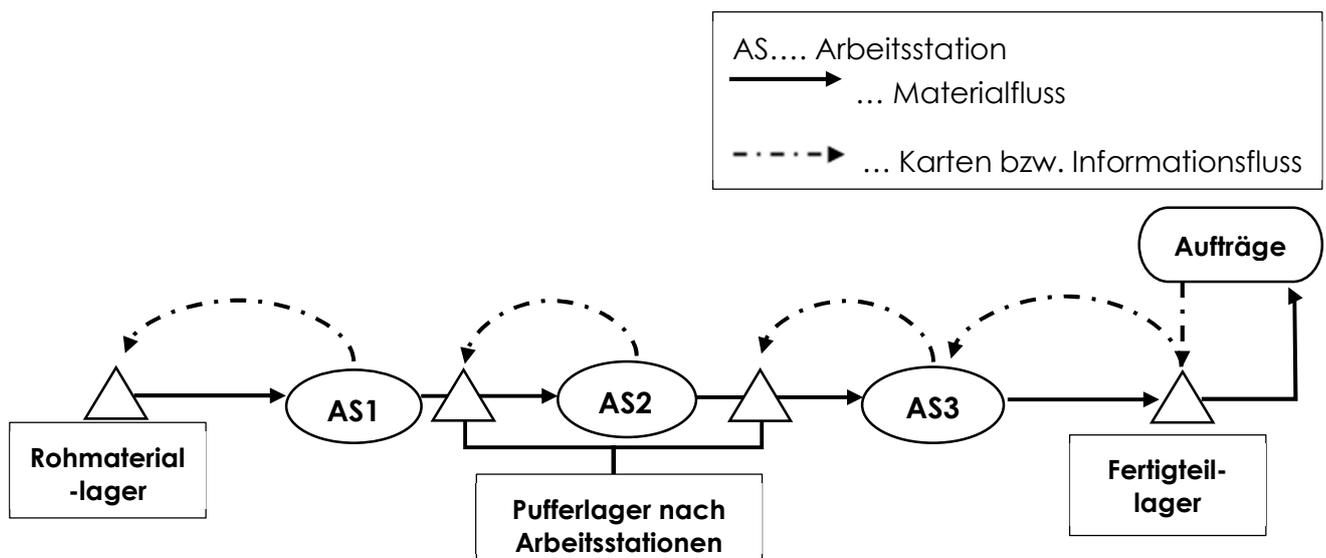


Abbildung 7: Ablaufschema KANBAN³⁸

³⁶ vgl. Schotten (1998), S. 66 f.

³⁷ vgl. Niemann et al. (2021), S. 141 ff.

³⁸ eigene Darstellung in Anlehnung an Adam (1992), S. 192.

Zur Regulierung des Umlaufbestandes kann demnach bei zwei Aspekten variiert werden. Zum einen bei den Behältern, deren Typ und Fassungsvermögen unterschiedlich sein kann, und zum anderen in der Anzahl von Karten bzw. Behältern. Für zweiten Faktor kann man schlussfolgern, dass eine zunehmende Kartenanzahl großzügigere Pufferlager verursacht.³⁹

3.1.2 POLCA

In Fertigungsumgebungen, welche eine hohe Anzahl von Produktvarianten in niedrigeren Stückzahlen produzieren, stößt das vorher beschriebene KANBAN-Konzept an seine Grenzen. Den Hauptgrund dafür bildet die Tatsache, dass KANBAN-Karten auftrags- und produktspezifisch sind und so bei einem breiten Produktprogramm einen hohen Bestand an Zwischenprodukten in der Fertigung verursachen.

Ein Verfahren, welches eine solche WIP-Überlastung vermeiden soll, ist der Ansatz der Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization, kurz POLCA. Dieses System wurde in den 1990er- Jahren von Rajan Suri entwickelt und dient als Entscheidungssystem in der Produktionssteuerung, welches die üblichen Probleme eines Industriebetriebes mit einem hohen Produktmix und variablen Fertigungswegen umgeht und somit effiziente Kleinserien- oder kundenindividuelle Fertigung ermöglicht. Dabei gelten die Verkürzung der Durchlaufzeit und das Halten eines konstanten Umlaufbestandes als Hauptziele. POLCA wurde als Teil der Quick Response Manufacturing Philosophie eingeführt und soll durch seine kurzen Vorlaufzeiten eine schnelle Reaktion auf Kundenanforderungen zu Stande bringen.

Analog zu KANBAN basiert auch dieses Schema auf einer kartenbasierten Steuerung. Der Informationsinhalt einer Karte besteht hier allerdings aus einem Paar von Arbeitsplätzen oder Fertigungsinseln, nämlich immer aus der produzierenden Station und deren Nachfolgearbeitsplatz. Die Karten rotieren in dezentralen Regelkreisen zwischen diesen. Mit diesen Feedbackschleifen wird signalisiert, wieviel freie Kapazität auf der nachfolgenden Station der Prozesskette vorhanden ist. Anhand dessen wird entschieden, ob auf der momentanen Arbeitsstation A mit der Bearbeitung des Auftrages begonnen werden darf. Dies ist nämlich nur erlaubt, wenn eine

³⁹ vgl. Kistner; Steven (op. 2001), S. 305.

entsprechende Polca-Karte A-B vorhanden ist, wobei B die nachgelagerte Fertigungszelle ist.⁴⁰ Abbildung 8 sollte diese Thematik verdeutlichen.

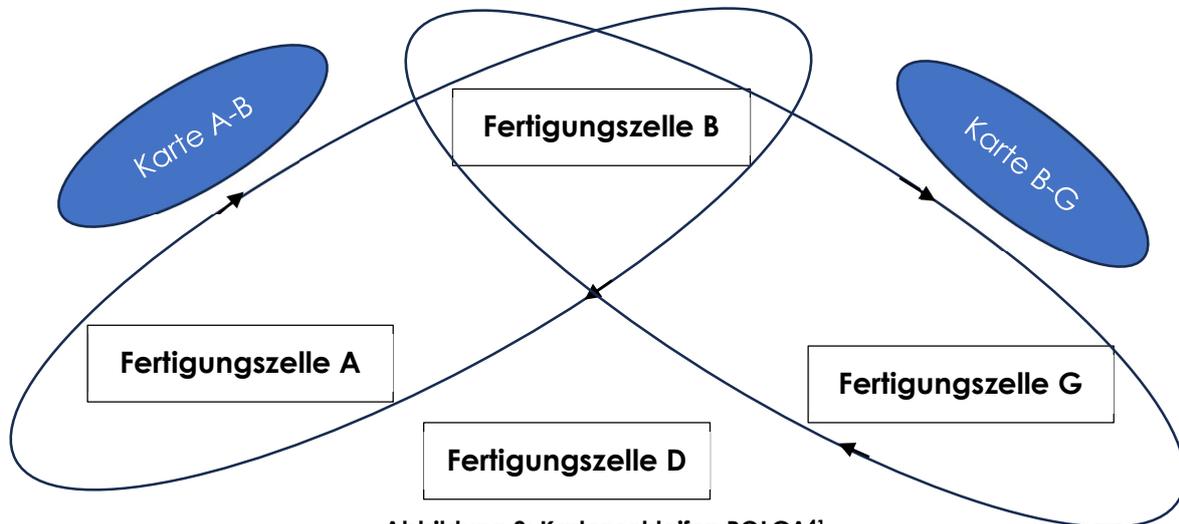


Abbildung 8: Kartenschleifen POLCA⁴¹

Station A ist also nur berechtigt, mit dem Auftrag zu beginnen, wenn die Karte A-B vorliegt. Nach Abarbeitung auf A verbleibt die Karte allerdings noch beim Auftrag und wandert gemeinsam mit diesem in die Warteschlange der Station B. Dort wartet man auf die Auftragsfreigabe, welche das Vorhandensein der Karte B-G bedingt. Erst wenn diese auf der Plantafel vorhanden ist, der Auftrag auf B abgeschlossen ist und nun zur Fertigungszelle G weitergeht, wandert die Karte A-B letztlich wieder zurück zur Maschine A, während bei KANBAN die Karte schon bei Tätigkeitsaufnahme auf B frei werden würde. Wie in der obigen Abbildung ersichtlich, „überlappen“ sich auf Station B demnach die Schleifen der beiden Regelkreise. Auf der letzten Station einer Produktionssequenz bedarf es aufgrund des fehlenden Nachfolgers keinem Vorhandensein einer Karte mehr, um mit der Bearbeitung beginnen zu dürfen.

Zur Auftragsfreigabe muss des Weiteren auch gewährleistet sein, dass der frühestmögliche Freigabetermin bereits erreicht ist. Dieser ist bestimmt aus den Kalkulationen eines übergeordneten MRP oder PPS-Systems und legt fest, ab wann eine Tätigkeit auf der Station aufgenommen werden kann, an der sie ausgeführt

⁴⁰ vgl. Olaitan et al. (2017a), S. 522 ff; vgl. Fernandes et al. (2020), S. 1491 f.

⁴¹ eigene Darstellung in Anlehnung an Suri (2018).

werden soll. Bei Polca ist für jedes Teil auf jedem Aggregat ein solcher Termin im Vorhinein geplant.⁴²

Lödning nennt dies ebenfalls als eines der drei Elemente, welche nötig sind, um die Polca-Steuerung umzusetzen. Weitere Kernthemen sind die Liste dringender Aufträge, gleichzusetzen mit einer nach nächstem Fertigstellungstermin geordnete Liste, und die Karten sowie die Anzahl dieser zwischen den Stationen.

Bezüglich der Anzahl von Karten gibt es in der Literatur Formeln, die anhand des Durchsatzes eine genaue Kalkulation der Kartenanzahl zwischen zwei Aggregaten ermöglichen. In der Praxis zeigt sich aber, dass solche Berechnungen mit Vorsicht zu genießen sind, dass aber eine gute Abschätzung des Bedarfes an Karten zwischen den Fertigungsinseln jedenfalls essenziell ist.

Denn ist die Menge der Karten über alle Regelkreise zu hoch gewählt, führt dies zu großzügiger Autorisierung von Aufträgen und somit zu steigenden Bestandsmengen und -schwankungen. Wird im Gegensatz dazu die Anzahl der Polca-Karten zu niedrig angesetzt, kann es zu Auslastungsverlusten und zu Blockierungen kommen. Um Auslastungsverlusten vorzubeugen, empfiehlt es sich mindestens zwei Karten in einem Regelkreis einzuführen. Die Blockierungen ergeben sich vor allem in Systemen mit ungerichteten Materialflüssen in jenem Fall, wenn Stationen gegenseitig auf Karten voneinander warten.

Ein Beispiel für diese Pattsituation: Es gibt ein Produkt A, welches zuerst Fertigungsinsel 2, dann Fertigungsinsel 1 und abschließend wieder Station 2 durchläuft, und ein Produkt B, welches die umgekehrte Reihenfolge durchläuft. In diesem Fall bleibt die Autorisierung beider Arbeitsstationen aus, da Fertigungszelle 1 für Produkt A eine Karte 1-2 braucht, die von Produkt B in Anspruch genommen wird, und Fertigungszelle 2 für Produkt B eine Karte 2-1 benötigt, die von Produkt A gehalten wird. Demnach kann keine der beiden Stationen mit der Bearbeitung beginnen. Eine höhere Anzahl an Karten würde diese Problematik allerdings umgehen.

Polca reguliert also über die Begrenzung der Kartenzahl den Umlaufbestand und ermöglicht eine gut ausgeglichene Belastung der Fertigungskapazitäten. Ganz generell kann außerdem noch festgehalten werden, dass dies umso besser gelingt, je

⁴² vgl. Thüerer; Stevenson (2016), S. 117 ff.

geringer die Anzahl der Ursprunginseln ist und je kürzer die Zeitspanne zwischen Freiwerden und neuerlicher Entnahme der Karte gehalten wird.⁴³

3.2 Karten- und workloadbasierte Verfahren

Neben den rein kartenbasierten Steuerungslogiken haben sich im Laufe der Zeit auch Konzepte entwickelt, welche zusätzlich den Begriff eines Arbeitslimits einführen. Damit soll in erster Linie die übermäßige Einlastung von Aufträgen verhindert werden. Im Folgenden werden die beiden Steuerungsverfahren CONWIP und COBACABANA näher erläutert.

3.2.1 CONWIP

Eine hybride Produktionssteuerungslogik, die sich in vielen Industriebetrieben etablieren konnte, ist das CONWIP (Constant Work in Process) Verfahren. Von der Grundidee her ist dieser Ansatz mit jener von KANBAN verwandt, da auch hier die Auftragsauslösung durch Entnahme von Teilen aus dem Fertiglager geschieht.

Den wesentlichen Unterschied bildet allerdings der Umstand, dass nicht die Fertigung der in der Prozesskette letzten, sondern jener der ersten Arbeitsstation des Systems dadurch angestoßen wird. Mit der Herstellung des entsprechenden Auftrages darf aber auch in diesem Verfahren erst nach Vorliegen der entsprechenden Karte gestartet werden.⁴⁴ Das Ablaufschema von CONWIP wird in Abbildung 9 veranschaulicht:

⁴³ vgl. Lödding (2016), S. 472 ff.

⁴⁴ vgl. Arnold et al. (2008), S. 339.

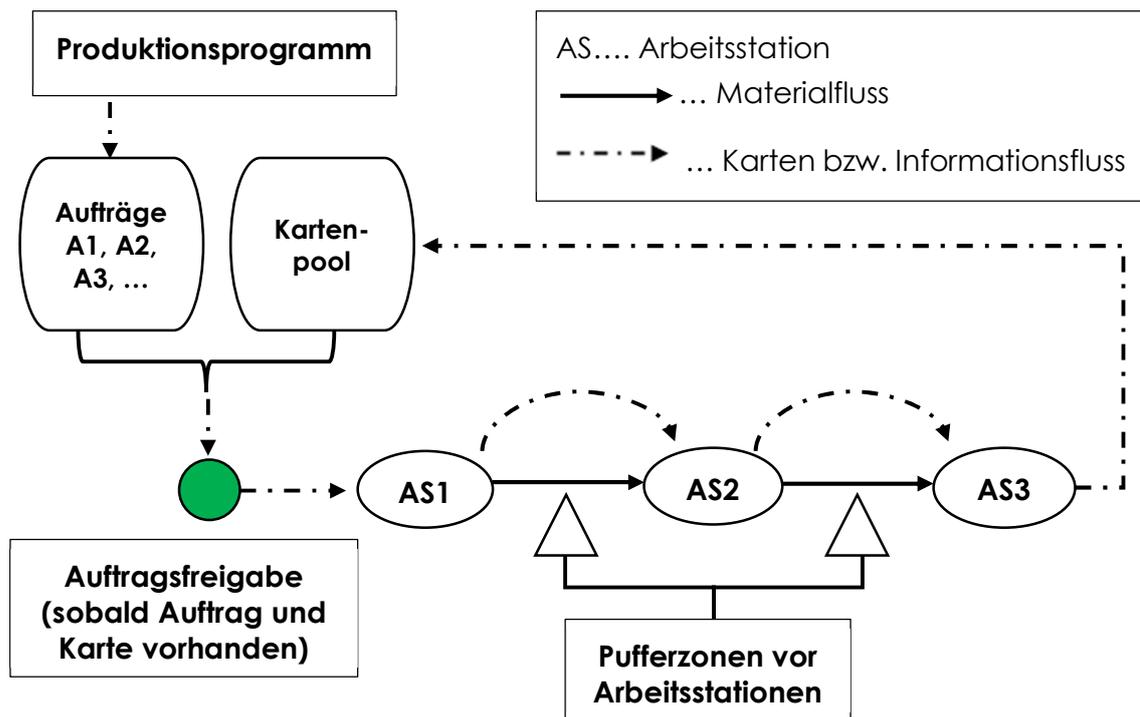


Abbildung 9: Material- und Kartenfluss CONWIP⁴⁵

CONWIP basiert demnach auf einem einzigen Steuerungskreis, bei welchem die Aufträge an der ersten Arbeitsstation eingelastet werden, wenn die entsprechende Karte verfügbar ist. In mehrstufigen Produktionsprozessen kann es sinnvoll sein, die Arbeitsstationen so zu gliedern, sodass die einzelnen Bereiche sich mit deren jeweils eigenen Kartenkreisläufen regulieren. Die Extremform, also wenn jede Arbeitsstation eigens organisiert ist, entspricht dann schlussendlich dem KANBAN-Ablauf.

Während bei KANBAN die Karten aber teilespezifisch erzeugt werden, nutzt CONWIP die Karten rein zur Kontrolle des Arbeitsinhaltes auf den Arbeitsstationen. Dadurch werden keine großen variantenspezifischen Puffer an jeder Maschine von jedem Zwischenprodukt erzeugt, was die Fertigung einer heterogeneren Produktpalette nicht in Erhöhung der Umlaufbestände ausarten lässt. Die Einlastung der Aufträge geschieht nach einer Backlog- oder Rückstandsliste, welche die zu fertigenden Orders sammelt und nach deren Priorität ordnet. Je besser die Sortierung der Einträge in dieser Liste nach den geplanten Fertigstellungsterminen geplant ist, desto höher ist auch der Lieferservice gegenüber den Kunden.

Zudem gibt es immer ein limitierendes Element, welches eine unbegrenzte Auftragsfreigabe unterbindet und somit den Arbeitsinhalt des Gesamtsystems konstant

⁴⁵ eigene Darstellung in Anlehnung an Kistner; Steven (2001), S. 311.

halten soll. Spearman et al. vergleichen dies mit der Kontrolle des Flugverkehrs. Im Falle einer bekannten Verspätung am Zielflughafen sei es ressourcenschonender mit einem Flugzeug am Startflughafen noch zuzuwarten, anstatt es über dem Zielflughafen kreisen zu lassen, bis die Landebahn frei wird. Dieses Verhalten ist in einer Fertigung analog zum Warten vor der Auftragsfreigabe und zum Warten vor einer Maschine, die gerade einen anderen Auftrag bearbeitet. Ein nach dem limitierten Umlaufbestand reguliertes Fertigungssystem weise einen konstanteren Bestand und daraus resultierend eine kürzere und besser vorhersehbarere Durchlaufzeit auf, als es bei Push-Verfahren der Fall ist.⁴⁶

In der ursprünglichen Version basiert das Freigabelimit auf der Anzahl von Karten. Je höher diese ist, desto mehr Aufträge dürfen gleichzeitig in das System eingelastet werden. Die Karten entsprechen in dieser Definition der Anzahl von Aufträgen in Bearbeitung. Dieser Gedanke kann auch durch die Anzahl der Aufträge, welche im Fertigteilager liegen und auf die Auslieferung warten, erweitert werden.

Außerdem beeinflusst wird der Ablauf der Fertigung durch das Work-Ahead-Window, also jener Zeitspanne, für die Aufträge vorgezogen werden dürfen, wenn Kapazitäten frei sind und deren geplanter Starttermin minus die Zeitdauer des Vorausschauens bereits erreicht ist.⁴⁷

Für dieses Arbeitslimit, auch als WIP-Cap bezeichnet, hat sich gezeigt, dass es vorteilhafter für Industriebetriebe ist, es nicht anhand der Auftragsanzahl, sondern durch den tatsächlichen Workload anhand von Mengen oder Zeiten, die zur Herstellung der Güter benötigt werden, auszudrücken. Beispielsweise wäre es denkbar, dass ein Auftrag das zeitliche Volumen von zehn anderen kleineren Aufträgen hat, was die Sinnhaftigkeit einer Betrachtung der absoluten Anzahl nach dem ursprünglichen Kartensystem sicherlich hinterfragt.

Außerdem sei durch die Einfachheit eines einzigen globalen Arbeitslimits keine Notwendigkeit gegeben, im Vorhinein genaue Daten zur Produktionsstruktur und Teilestammdaten zu bestimmen. Entlang dieses Ansatzes habe sich vor allem für Make-To-Order Fertigungen ein hohes Potenzial zur Reduzierung von Verspätungen und ein

⁴⁶ vgl. Spearman et al. (1990), S. 883.f.; vgl. Arnold et al. (2008), S. 339.

⁴⁷ vgl. Hübl (2018), S. 87 ff.

effektives Management des Work in Process bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer hohen Auslastung gezeigt.⁴⁸

3.2.2 COBACABANA

Ein weiteres Verfahren, welches karten- und workloadbasierte Elemente vereint, ist COBACABANA, diese Abkürzung steht für COntrol of BALance by CArd-BASed Navigation. Dieses wurde von Martin J. Land entwickelt und in seinem Paper aus dem Jahr 2009 genau erläutert.

In den Grundzügen gleicht diese Steuerungsmethodik jener der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe, kurz BOA. Für jeden Arbeitsplatz eines Fertigungskomplexes gibt es ein Belastungskonto auf welchem Zu- und Abgänge an Teilen aufgezeichnet werden. Wichtig ist auch hier die Einführung eines WIP-Caps bzw. einer Belastungsgrenze der jeweiligen Station. Es wird nämlich angenommen, dass nur durch eine gleichmäßige Einstellung des mittleren Bestandes die Erreichung der geplanten Durchlaufzeit eingehalten werden kann.

Enthält ein Auftrag im Zuge seiner Prozesskette einen Arbeitsplatz, bei dem zum momentanen Zeitpunkt die Belastungsgrenze bereits erreicht ist, muss mit dem Start dieser Order gewartet werden. Dieses Prinzip hat sich vor allem bei variantenreichen Fertigungen von Einzelteilen oder Kleinserien als besonders vorteilhaft herausgestellt.⁴⁹

Zusätzlich zu dieser Arbeitslastnorm gibt es zweierlei Typen von Karten, die zum Zeitpunkt der Auftragseinlastung für eine jede Arbeitsstation des Auftrages erzeugt werden.

Einerseits gibt es für jede Tätigkeit eine Freigabekarte, welche nach der Einlastung des Auftrages an einer zentralen Verwaltungsstelle, der Plantafel, für die Arbeitsstation hinterlegt wird. Die Größe der Karte veranschaulicht dabei das Volumen des Auftrages und visualisiert so die direkte und indirekte Arbeitslast des Arbeitsplatzes. Unter der direkten Last versteht man alle jene Aufträge, die momentan auf der betreffenden Arbeitsstation in Bearbeitung stehen oder vor dieser warten. Bereits nach der Freigabe einer Order werden aber alle Stationen der Prozesskette, und nicht nur die aktuelle, in Betracht gezogen. Alle weiteren zukünftig auftretenden Zeiten werden als indirekte

⁴⁸ vgl. Bokor; Altendorfer (2024), S. 1 ff.

⁴⁹ vgl. Schotten (1998), S. 68 f.

Last einer Arbeitsstation bezeichnet. Arbeitsstationen, die in der Maschinensequenz einer Bestellung eher gegen Ende angesiedelt sind, werden demnach mit einer tendenziell etwas höheren Arbeitslastnorm versehen.

Andererseits erzeugt man im ständig mitlaufenden Auftragsleitblatt Tätigkeitskarten für jede Aktivität eines Auftrages in der ganzen Bearbeitungsreihenfolge. Nach Abschluss einer Tätigkeit wandert diese zur Plantafel und löscht dort die zugehörige Freigabekarte. Nun wurde demnach der Workload der Arbeitsstation aktualisiert und eventuell Platz für neue Freigabekarten bzw. neue Aufträge geschaffen.

Aufträge dürfen auf ihrer ersten Station nämlich nur gestartet werden, wenn es genügend Kapazität auf allen Maschinen der Prozesskette gibt. Ein Auftragsstart hätte die Erzeugung von Freigabekarten zur Folge, welche in dem Workload Limit bleiben müssen. Abbildung 10 verdeutlicht diesen Sachverhalt.⁵⁰

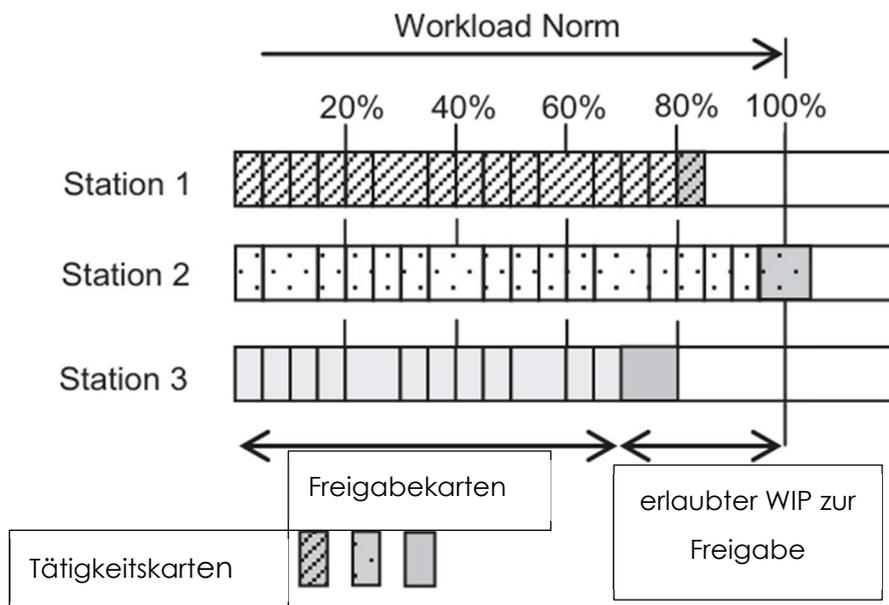


Abbildung 10: Plantafel COBACABANA⁵¹

Im Falle des Ausbleibens der Erlaubnis zum Auftragsstart wird dieser Auftrag nach hinten verschoben und nach der Reihe alle weiteren in der Rückstandliste evaluiert. Diese Liste sammelt alle Aufgaben der Fertigung, deren Starttermin bereits erreicht ist, und wird auch als Pre-Shop-Pool bezeichnet. Die Wiederholung der Prüfung, ob das Einlastungskriterium erfüllt ist, kann indes entweder periodisch oder kontinuierlich

⁵⁰ vgl. Land (2009), S. 98 ff.

⁵¹ Thüerer et al. (2015), S. 146. leicht modifiziert.

erfolgen. Periodisch bedeutet in fixen Zeitintervallen und kontinuierlich eine Prüfung unmittelbar, sobald sich etwas an den Gegebenheiten der Plantafel, z.B. Entfernen einer Freigabekarte, ändert.⁵²

Die Karten stehen in diesem Konzept stellvertretend für die Arbeitsmengen je Station und COBACABANA steuert nach diesen und nicht wie KANBAN beispielsweise nach der Anzahl an Karten. Die Kartenschleifen passieren ebenfalls nicht zwischen den Stationen, sondern zwischen der zentralen Planungsinstanz und eines einzelnen Arbeitssystems. Dieser Umstand habe auch weniger Probleme in der Informationsweiterleitung zur Folge.

Mithilfe der Freigabekarten werden die Arbeitsbelastungen errechnet und die Grundlage für eine Auftragsfreigabe geschaffen, bei der keine Station das WIP-Limit überschreitet. Dem gegenüber stehen die Tätigkeitskarten, welche als Feedbackschleifen Rückmeldungen über den Status der Abarbeitung eines Auftrages geben und die Belastungen an der Plantafel nach jedem Schritt überschreiben.⁵³

3.3 LUMSCOR

Als vielversprechende Weiterentwicklung im Bereich der rein Workload basierten Verfahren ohne die Verwendung von Karten zeigte sich in der Literatur seit geraumer Zeit die Steuerungslogik LUMSCOR (Lancaster University Management School Corrected Order Release).

Onay, Stampfer et al. bezeichnen workloadbasierte Verfahren ohnehin als optimal für Industriebetriebe, welche rein nach Kundenauftrag fertigen, da bei richtiger Implementierung der Work in Process und auch die Durchlaufzeiten stabil gehalten werden können, was die Robustheit von Unternehmen mit hoher Variabilität und Unsicherheit wesentlich steigert.⁵⁴

Mehrere Quellen belegen den Erfolg des LUMSCOR Verfahrens. So sei es laut zweier Studien von Thüerer und Yan aus dem Jahr 2016 die „best solution in practice“, liefere also nur die besten Ergebnisse und übertrumpfe dabei andere bereits bewährte

⁵² vgl. Bagni et al. (2021), S. 6 f.

⁵³ vgl. Thüerer; Stevenson (2016), S. 131 ff.

⁵⁴ vgl. Onay et al. (2023), S. 1.

Verfahren wie etwa CONWIP.⁵⁵ Yuan, Ma et al. erklären, dass LUMSCOR so konzipiert sei, dass sowohl ein konstanter Umlaufbestand wie auch effiziente Kapazitätsausnutzung bei Auftragsfertigern gewährleistet sei. So ist es entgegen des in Abschnitt 2 beschriebenen Dilemmas der Ablaufplanung mit konkurrierenden Zielgrößen möglich, jegliche betriebliche Outputkennzahlen auf eine neue, produktivere Ebene heben zu können und somit wesentlich wirtschaftlicher zu agieren.⁵⁶

Während KANBAN und CONWIP als Verfahren eher für repetitive Fertigungen gelten, sind Steuerungskonzepte wie POLCA und LUMSCOR auf Make-To-Order Unternehmen mit einer hohen Variabilität in der Fertigung prädestiniert. Als mitverantwortlich für den Erfolg dieser Steuerung gilt die hybride Vereinigung aus periodischer und kontinuierlicher Auftragsfreigabe.

Wie die meisten üblichen Steuerungsverfahren verwendet auch LUMSCOR zunächst die periodische Variante. Das bedeutet, dass in fixen Zeitintervallen der Pool von Orders vor der Fertigung auf die Einlastungsbedingung überprüft und ggf. freigegeben werden kann. Das entscheidende Kriterium bildet hier analog zu COBACABANA ein vorher definiertes Arbeitslimit je Station. Erfüllt eine Order das Kriterium nicht, so wird sie in der Auftragsliste übersprungen und nach Ablauf der Periode wieder neu evaluiert.

Bei der kontinuierlichen Auftragsfreigabe wird im Rahmen von LUMSCOR ständig überprüft, ob es Arbeitsstationen gibt, welche leerlaufen, aber mit Aufträgen beschickt werden könnten. Sobald nämlich ein Auftrag gefunden wird, dessen erste Fertigungsstation in seiner Prozesskette unbesetzt ist, wird dieser ungeachtet von jeglicher Workload Norm auf den weiteren Arbeitsplätzen auf dieser Station eingelastet. Nach jeder abgeschlossenen Teilaufgabe des Auftrages wird der Status des Systems evaluiert und eventuell die kontinuierliche Auftragseinlastung durch den sogenannten Workload Trigger angestoßen.⁵⁷

In der Vergangenheit wurden kontinuierliche Ansätze in der Wissenschaft immer etwas vernachlässigt und man beschränkte sich auf die Betrachtung der periodischen Einlastung.⁵⁸ Zweitens erleichtert zwar die Einteilung für den Planer und das

⁵⁵ vgl. Chen et al. (2022), S. 3.

⁵⁶ vgl. Yuan et al. (2023), S. 3.

⁵⁷ vgl. Kasper et al. (2023), S. 1 ff.

⁵⁸ vgl. Fernandes; Carmo-Silva (2011), S. 258 f.

Gesamtsystem, denn je kurzweiliger die Abstände zwischen den Überprüfungen, desto höher werden auch die Anforderungen an den Materialfluss und die IT-Systeme eingeschätzt, kontinuierliche Paradigmen dürften aber keinesfalls vernachlässigt werden. In der von Hendry und Kingsman 1991 entwickelten Vorgängerversion von LUMSCOR, nämlich LUMSOR, wurde der kontinuierliche Part ebenso eher ignoriert und es konnten kaum Verbesserungen zu den klassischen workloadbasierten Verfahren aufgezeigt werden.

Durch Neuauffassung der bereits beschriebenen kontinuierlichen Auftragsfreigabe anhand eines Workload Triggers konnte in einer Simulationsstudie mit sechs einzigartigen Arbeitsstationen und verschiedenen Materialflussrichtungen folgendes gezeigt werden: Selbst, wenn das Arbeitslimit im rein periodischen Fall komplett entfällt, also alle Aufträge gleich zu Beginn freigegeben werden, zeigt LUMSCOR eine um 10 % niedrigere Durchlaufzeit und 20 % weniger Leerlauf auf den Maschinen.⁵⁹

Die zweite vielversprechende Neuerung, welche das Corrected Lancaster University Management School Order Release im Gegensatz zu ihrer Vorgängerversion brachte, war jenes der Einführung einer korrigierten aggregierten Arbeitslast. Die beiden Begriffe der direkten und indirekten Arbeitslast wurden bereits in dem Unterkapitel von COBACABANA näher erklärt. Verfahren, wie eben dieses, machen hierbei aber keinen Unterschied zwischen den Arbeitslasten und aggregieren diese direkt zu einer Summe, welche entscheidend für die schlussendliche Auftragsfreigabe ist. Dadurch werden allerdings Stationen, die spät in der Produktionssequenz liegen, unnötig streng limitiert, da es lange dauert, bis der Auftrag wirklich dort angelangt, die volle Kapazität aber über den gesamten Zeitraum bereitgehalten wird. Dieses Phänomen der „premature idleness“ wird bei dem LUMSCOR-Verfahren einerseits ohnehin durch die kontinuierliche Einlastungsmethodik und andererseits auch durch die korrigierte aggregierte Workloadberechnung wesentlich abgeschwächt.

Denn in diesem von Land und Gaalman entwickelten Ansatz wird die indirekte Arbeitslast der nachfolgenden Fertigungsinseln umso stärker abgeschwächt, je weiter sie in der Prozesskette hinten liegen. Der eingeplante aber noch nicht vorhandene Arbeitsaufwand auf den Stationen der Fertigungskette wird nämlich durch die Anzahl

⁵⁹ vgl. Thüerer et al. (2012), S. 940 ff.

der noch vorher zu durchlaufenden Arbeitsplätze dividiert.⁶⁰ Oosterman et al. bezeichnen diese Vorgehensweise beispielsweise als die effizienteste aller bekannten Varianten in Bezug auf die Berechnung von Arbeitslasten auf den Produktionsstationen.⁶¹

Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 11 ein kleines Beispiel für die Berechnung der korrigierten aggregierten Arbeitslast, welche das Hauptkriterium der periodische Auftragsfreigabe von LUMSCOR bildet, angeführt:

Produkt A: AS1(3) → AS2(5) → AS3(3)	AS.... Arbeitsstation
Produkt B: AS3(2) → AS4(2) → AS1(2)	WL.... Workload der Station
Produkt C: AS1(3) → AS4(2) → AS2(3) → AS3(1)	→ Materialfluss
Workload Limit aller Stationen = 50 Zeiteinheiten	(x)....Arbeitszeit pro Station
Grüne Orders werden eingelastet, rote nicht	

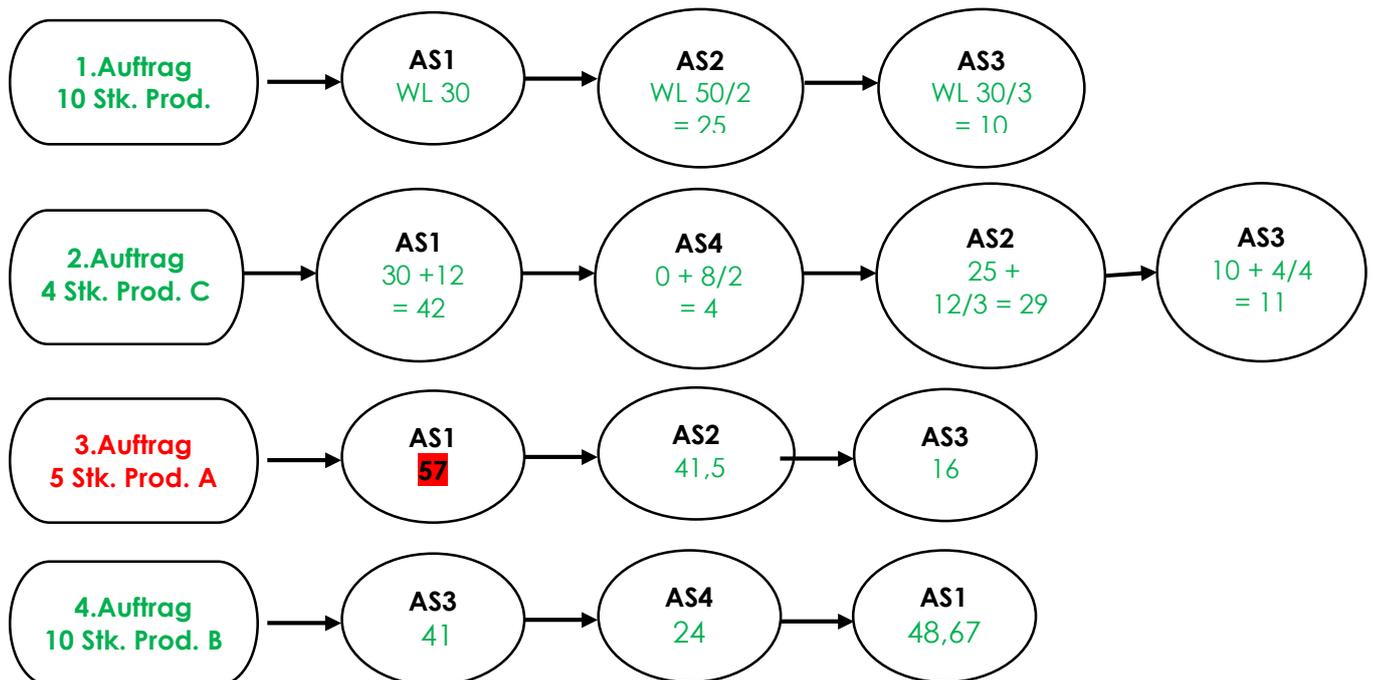


Abbildung 11: Periodische Auftragsfreigabe LUMSCOR

⁶⁰ vgl. Yuan et al. (2023), S. 3.; vgl. Chen et al. (2022), S. 2 f.

⁶¹ vgl. Oosterman et al. (2000), S. 107 ff.

3.4 Systematische Literaturrecherche zum Stand der Forschung hinsichtlich der genannten Verfahren

Um die momentanen Forschungsergebnisse zu den soeben beschriebenen Verfahren festzustellen und deren Resultate aus wissenschaftlichen Beiträgen miteinander in Relation zu setzen, wird im Folgenden eine systematische Literaturrecherche durchgeführt. Der Hauptfokus dieser Untersuchung liegt in der Analyse, welche Verfahren hinsichtlich welcher Merkmale und Kennzahlen in den Studien gegenübergestellt werden, welche Differenzen in den zahlenmäßigen Ergebnissen vorliegen und welche Innovationen und Weiterentwicklungen der bestehenden Verfahren aktuell bereits existieren.

3.4.1 Vorgehensweise

Die systematische Literaturrecherche wurde Anfang August 2024 durchgeführt. Als Datenbank wurde dabei die wissenschaftlichen Plattform Science Direct des Wissenschaftsverlages Elsevier ausgewählt, da diese insbesondere zum untersuchten Themengebiet eine Vielzahl von qualitativ hochwertigen Beiträgen aufweisen konnte, was Science Direct vorteilhafter gegenüber anderen renommierten Datenbanken erscheinen ließ. Aufgrund der Mehrheit der englischsprachigen Literatur auf dieser Plattform wurden auch die Suchbegriffe und Schlagwörter dementsprechend in englischer Sprache gewählt. Dabei wurde folgender Suchstring mit der Suchoption "Articles with these terms" verwendet: "(KANBAN OR CONWIP OR COBACABANA OR LUMS COR OR POLCA) AND Comparison" Des Weiteren wurde das Veröffentlichungsdatum der Publikationen auf die Jahre letzten zehn Jahre, also von 2014 bis 2024, beschränkt. Die Suche nach Studien, welche die fünf Verfahren miteinander vergleichen, lieferte in der ersten Phase 1.374 Suchergebnisse.

Führt man diese Suche ohne Eingrenzung des Veröffentlichungsjahres durch und wertet man anschließend die Anzahl der zum Sachverhalt erschienenen Publikationen pro Jahr aus, kann man die klare Tendenz erkennen, dass die Anzahl der Publikationen zu diesem Themengebiet innerhalb der letzten paar Jahrzehnte gestiegen ist, wie Abbildung 12 von 2001 bis 2024 eindrucksvoll unter Beweis stellt.

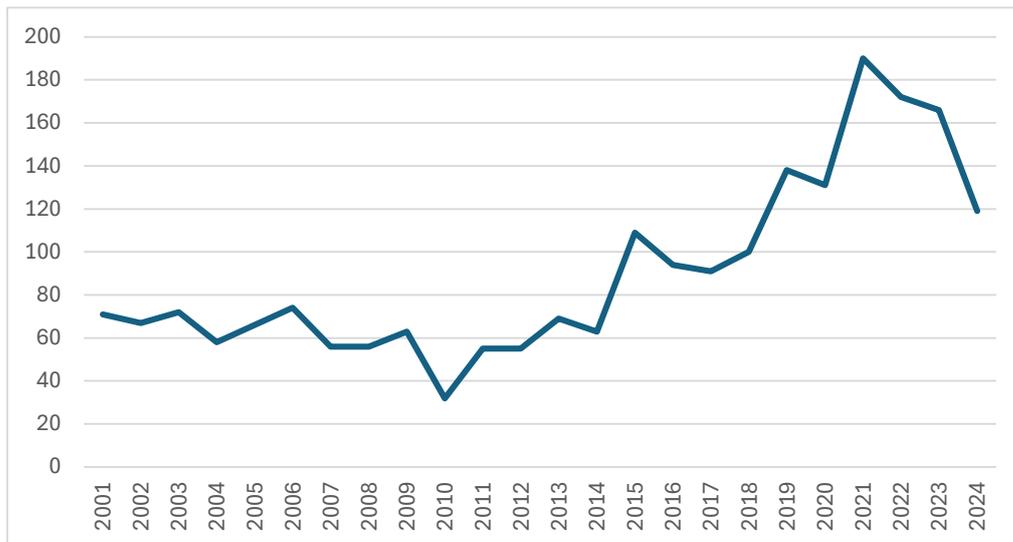


Abbildung 12: Publikationen pro Jahr⁶²

Der zu erkennende Anstieg von durchschnittlich 50-70 Publikationen bis 2014 auf ein höheres Durchschnittsniveau und einer Spitze von nahezu 200 im Jahr 2021, ist demnach ein Indiz dafür, dass dem behandelten Themengebiet in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung in Wissenschaft und Wirtschaft zugekommen ist.

Nach Screening der Titel und Durchsicht der Kurzfassungen im Falle eines interessanten Titels wurde beurteilt, inwiefern die gefundenen Papers für die Schaffung eines Mehrwerts für die Arbeit geeignet sind.

Nach genauerer inhaltlicher Prüfung dieser 33 wissenschaftlichen Dokumente wurden schließlich 17 für die tatsächliche Ausarbeitung des Themenkomplexes, welche im nächsten Unterabschnitt folgt, verwendet. Die beschriebene Vorgehensweise in Anlehnung an das PRISMA-Modell ist in nachfolgender Abbildung 13 noch einmal übersichtlich visualisiert zusammengefasst.

⁶² eigene Darstellung in Anlehnung an sciencedirect.com, (Zugriff 13.08.2024).

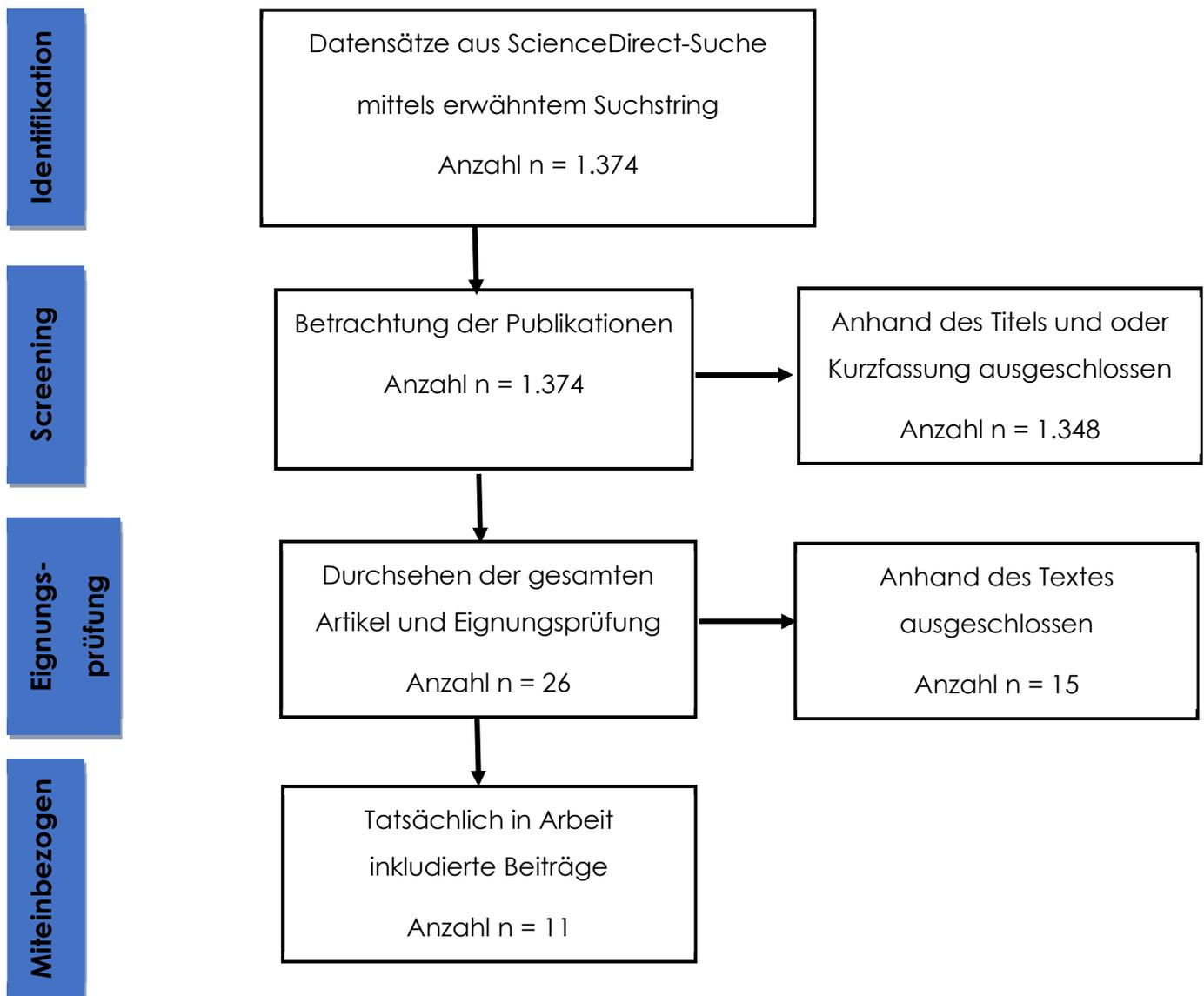


Abbildung 13: Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche⁶³

3.4.2 Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche

Wie bereits beschrieben, war es das Ziel, Studien zu finden, welche vor allem die in dieser Arbeit genauer thematisierten Verfahren miteinander in Vergleich setzen. In diesem Zusammenhang weisen alle der elf als sehr relevant eingestuft Beiträge eine Gemeinsamkeit auf, und zwar das Verwenden eines simulationsbasierten Ansatzes zur Analyse. Dabei gibt es je nach Beitrag die unterschiedlichsten Konfigurationen von untersuchten Verfahren und Kennzahlen. Es ließen sich aber drei größere Überkategorien bilden.

⁶³ eigene Darstellung in Anlehnung an Page et al. (2021).

- **Kategorie 1: Vergleiche der Verfahren untereinander hinsichtlich üblicher Kennzahlen (siehe Kapitel 2.3.)**

Molenda, Mezger et al. beispielsweise stellen das CONWIP Verfahren mit einem Workload Control Ansatz, nämlich LUMSCOR, und mit einer Auftragsfreigabe unmittelbar nach Auftragserzeugung gegenüber. Analysiert wurden diese Verfahren nach dem Anteil der zeitgerecht ausgelieferten Orders, der mittleren Verspätung dieser und der mittleren Durchsatzzeit eines Auftrages. Es ergab sich, dass in einer Flow-Shop-Umgebung, das bedeutet, dass die Reihenfolge der Maschinen, auf denen die Aufträge bearbeitet werden müssen, für jeden Auftrag ident ist, sowohl CONWIP als auch LUMSCOR sehr gut als Verfahren in Frage kommen, da sie in ihren Simulationsergebnissen beide über der unmittelbaren Auftragsfreigabe liegen.⁶⁴

Silva und Reis wiederum legen in ihrem Paper den Schwerpunkt auf die Untersuchung des POLCA-Verfahrens in Relation zu anderen Steuerungsmethoden. Der Hauptfokus der Betrachtungen liegt hierbei auf der Feststellung der Unterschiede in den „on time deliveries“, sprich den pünktlich ausgelieferten Aufträgen.⁶⁵

Eine andere Studie diskutiert die Vorteilhaftigkeit der COBACABANA Steuerung gegenüber KANBAN. Zweitere sei zwar weit verbreitet, liefert aber sowohl hinsichtlich Durchlaufzeit als auch Maschinenauslastung deutlich schlechtere Resultate als COBACABANA. Dieses Ergebnis bleibt unabhängig von der Priorisierungsmethode der Aufträge auf den jeweiligen Produktionsaggregaten bestehen. Der Fokus dieser in Python realisierten Simulation lag dabei in einer reinen Flow-Shop Fertigung mit hoher Nachfrage und schwankenden Bearbeitungszeiten die Performance zu steigern.⁶⁶

Nach den Forschungen von Lee und Seo wird KANBAN auch hinsichtlich der Höhe der Umlaufbestände und der minimal notwendigen Pufferkapazitäten von Steuerungslogiken, wie CONWIP oder dem engpassorientierten Drum-Buffer-Rope Prinzip outperformt, wobei CONWIP zweiterem Ansatz ebenfalls zumeist überlegen ist. In ihrem eher mathematischen und numerischen Rechenmodell zeigte sich des Weiteren, dass eine Variation der Position des Engpasses in der Prozesskette des Herstellungsprozesses einen Effekt auf die Umlaufbestände der einzelnen Verfahren zur Folge hat. Während ein Engpass weiter vorne in der Produktion eines Gutes bessere

⁶⁴ vgl. Molenda et al. (2020), S. 666 ff.

⁶⁵ vgl. Silva et al. (2017), S. 1090.

⁶⁶ vgl. Thürer et al. (2015), S. 143 ff.

Effekte für KANBAN zeigt, so ist ein sich spät in der Erzeugung befindlicher Engpass für die WIP-Reduzierung in einem Drum-Buffer-Rope Modell vorteilhaft.⁶⁷

Woschank et al. unterstreichen, in ihrem Experiment mittels dem von Einsatz Diskreter Event Simulation allerdings herausgefunden zu haben, dass KANBAN zumindest für die einfachste Form einer Produktionslinie mit nur einigen wenigen Arbeitsstationen und Produkten die besten Resultate hinsichtlich Durchlaufzeit, Termintreue, Kapazitätsauslastung und Höhe der Umlaufbestände geliefert hat, nämlich eine Durchlaufzeitreduktion um 30 % und eine WIP Reduktion um sogar 56,5 % zum MRP-Ansatz und rund 5 % bzw. 48 % zu einer CONWIP-Steuerung.⁶⁸

- **Kategorie 2: Vergleiche vom hybriden Steuerungsansatz CONWIP mit Push und Pull-basierten Verfahren**

Ebenfalls auf Basis einer Diskreten Event Simulation wurde von Arteaga und Calvo analysiert, ob rein Push-basierte, rein Pull-orientierte oder hybride Verfahren, wie in diesem Beispiel CONWIP, die erfolgreichsten Resultate erzielen. Es wurde nachgewiesen, dass letztere Methodik den anderen beiden Paradigmen in vielerlei Hinsicht überlegen ist. So zeige CONWIP die beste Kombination von Reduktion der Umlaufbestände und hohen Produktionsraten bei konventioneller Organisation der Fertigung. Durch Einführung eines semi-automatischen Steuerungsmechanismus könnte diese Effizienz der Maschine weiter gesteigert werden.⁶⁹

Ein anderer wissenschaftlicher Beitrag konzentriert sich auf den Vergleich von CONWIP und eines Push-basierten Konzeptes in einer Fertigungsumgebung mit großer Variantenvielfalt. Die sechs Szenarien der Simulation brachten das Ergebnis hervor, dass der Push-orientierte Ansatz zwar eine etwas höhere Durchsatzrate aufweist, dass aber gleichzeitig auch der Work in Process wesentlich höher ausfällt und eine gesteigerte und stärker schwankende Durchlaufzeit als Auswirkung mit sich bringt.⁷⁰

Ein ähnliches Forschungsziel verfolgten Yang, Hung et al. in ihrem Artikel. Die besagte Studie sollte die Effektivität von CONWIP gegenüber Push-Verfahren in der Fertigung eines Fahrradherstellers unter Beweis stellen. Als Zielgrößen wurden hier in erster Linie die Durchlaufzeit und der Work in Process betrachtet. Nach durchgeführter Simulation

⁶⁷ vgl. Lee; Seo (2016), S. 1 ff.

⁶⁸ vgl. Woschank et al. (2020), S. 1506.

⁶⁹ vgl. Arteaga; Calvo (2019), S. 89.

⁷⁰ vgl. Olaitan et al. (2017b), S. 277.

konnte man erkennen, dass CONWIP dabei die Interessen der Kunden weitaus besser bedienen kann. Im Gegensatz zum einfachen CONWIP-Verfahren, bei dem der Kartenkreislauf zwischen erster und letzter und somit über der gesamten Fertigung liegt, bietet sich, wie bereits in 3.2.1 erklärt, die Möglichkeit zur Einführung mehrerer Steuerungskreise nach geclusterten Fertigungsgruppen. Diese wurde mit einer Hand voll Methoden ausprobiert und vervielfacht dabei die Stärke von CONWIP gegenüber dem Push-basierten Ansatz. So erzielt ersteres Steuerungsverfahren einen um 40-50 % geringeren Umlaufbestand und eine 30-40 % besseren Durchlaufzeit.⁷¹

- **Kategorie 3: Andere Untersuchungsgegenstände und Weiterentwicklungen der erwähnten Verfahren**

Der letztgenannte Ansatz, im Paper auch multi-CONWIP genannt, kann definitiv auch als Teil dieser Kategorie genannt werden. Es unterstreichen auch Bertolini, Braglia et al., dass ein CONWIP-System, welches mit mehreren Kartenkreisläufen, aber dennoch nicht so vielen, wie KANBAN sie benötigt, sehr effiziente Ergebnisse erreichen kann. Lediglich im Design und in der Optimierung ist die Methode mit multiplen Kartenkreisläufen etwas komplexer im Vergleich zum originalen CONWIP. Schwerpunkt der Betrachtungen war in diesem Fall eine Make-To-Order Fertigung mit sieben verschiedenen Produkten entlang von vier verschiedenen Herstellrouten.⁷²

Ein anderes ebenso wichtiges Performancekriterium wird in der Arbeit von Gong et al. beschrieben, und zwar werden hier Produktionssteuerungsverfahren nach deren Verzögerungszeiten in den Entscheidungsprozessen gegenübergestellt. Konkret betrachtet wurden dabei die Fertigungssteuerungen KANBAN, MRP und CONWIP anhand eines Information Entropy Modells, welches zur Messung der benötigten Informationsmengen je Verfahren genutzt wurde. Es stellte sich heraus, dass MRP aufgrund seiner Push-Logik mit der zentralen Verwaltung und der hohen Umlaufbestände und Chargengrößen, am meisten Informationsflüsse benötigt. Gefolgt von KANBAN zeigt CONWIP in diesen Belangen die größten Vorteile und kann, da am wenigsten an Informationen transportiert werden muss, die Verzögerung in den Entscheidungsprozessen am besten von allen Verfahren minimieren.⁷³

⁷¹ vgl. Yang et al. (2019), S. 2477 ff.

⁷² vgl. Bertolini et al. (2020), S. 1.

⁷³ vgl. Gong et al. (2014), S. 208 ff.

Zuletzt sei noch die Studie von Kasper et al. erwähnt, welche die bekannten Verfahren KANBAN, CONWIP, POLCA und LUMSCOR mit ihrem neu entwickelten Ansatz namens DRACO in Relation setzt. Die ersten vier Steuerungslogiken basieren auf einem hierarchischen Aufbau. Das bedeutet, dass zuerst entschieden wird, ob die Order freigegeben wird und erst später, welcher Auftrag versendet wird. Heutzutage, in Zeiten, in denen die Option der Nutzung von Echtzeitdaten vorliegt, sahen die Autoren dieses Konzept als veraltet an und entwickelten eine nicht hierarchisch aufgebaute Auftragssteuerung. Als Resultat ihrer Studie zeigte sich, dass nicht hierarchische Verfahren die bewährten Steuerungsmethoden in den Ergebnissen klar übertreffen, was einen Gewinn an Relevanz solcher Konzepte in der näheren Zukunft bedeuten könnte.⁷⁴

⁷⁴ vgl. Kasper et al. (2023), S. 1.

4 Beschreibung der Fallstudie im Industriebetrieb

Um die unterschiedlichen Wirkungen der im vorherigen Abschnitt diskutierten Verfahren gegenüberzustellen und zu analysieren, sollte eine Fertigung eines Beispielunternehmens mithilfe eines Simulationsmodells untersucht werden.

Als Input des Modells sollten dabei die Fertigungsstruktur und Aufträge dienen und als Output war es geplant, je Verfahren eine Aufstellung der betrieblichen Kennzahlen zu erlangen. Diese Ergebnisse lassen in weiterer Folge für das Zielunternehmen Schlüsse über die bevorzugte Wahl oder Anpassung des zukünftigen Steuerungskonzeptes ziehen.

4.1 Grundlegende Firmeninformationen

Als zu untersuchendes Industrieunternehmen wurde schließlich die WILD GmbH ausgewählt. Die Schwerpunkte des Unternehmens liegen im Bereich der feinelektronischen und optischen Komponenten sowie in der mechanischen Präzisionsfertigung und der Oberflächentechnik. Die Firma WILD fertigt dabei nicht in Massen, sondern entwickelt, produziert und montiert nach Kundenwunsch im Sinne eines Auftragsfertigers nach dem Prinzip High Mix-Low Volume. Die Entwicklungsabteilung designt Teile nach Kundenwunsch, welche nach erfolgreicher Prototypenphase zumeist für einige Jahre in eine Kleinserienfertigung gehen.

Zu den Kunden zählen beispielsweise Firmen aus den Branchen Medizintechnik und optische Messsysteme. Typische Produkte, welche von WILD hergestellt werden, sind beispielsweise Dialysesysteme, Blutanalysegeräte, Medizinrobotik, Mikroskope sowie optische Mess- und Lasersysteme. Das mittelständische Unternehmen verfügt über insgesamt vier Standorte, einem in der Slowakei und drei in Österreich und beschäftigt über 400 Mitarbeiter, die meisten davon am Hauptsitz in Völkermarkt, auf den das Hauptaugenmerk der Betrachtungen in dieser Arbeit liegt.

Entlang der Herstellungskette innerhalb des Unternehmens werden zwei grobe Bereiche unterschieden. Das ist zum Ersten die mechanische Fertigung, welche mit ihren Tätigkeiten aus Rohmaterial die Teile für den zweiten Teilbereich, nämlich die Montage der Baugruppen, bereitstellt. Zusätzlich werden auch Fremdteile für andere

Unternehmen gefertigt, aber auch Komponenten für die Montageabteilung zugekauft.

Aufgrund dessen, dass die Prozessabläufe einer mechanischen Fertigung als Teil dieser Arbeit evaluiert werden sollten, wurden in Folge nur die Gegebenheiten dieses Unternehmensteiles näher betrachtet.

4.2 IST-Situation der mechanischen Fertigung

Einen weiteren Grund für die Wahl dieses Bereiches bildete der Umstand, dass das Zielunternehmen wesentliches Optimierungspotenzial in der Konzeption des Fertigungssteuerungsverfahrens gesehen hat. Bislang war es geplant sich an einem Ansatz zu orientieren, der dem Verfahren CONWIP entspricht. In der näheren Vergangenheit gab es allerdings keine Umstellung der Gegebenheiten bzgl. der Steuerung der Produktionsprozesse. Nach wie vor werden Aufträge von der Produktionsplanung grob eingeplant und terminisiert, die Feinplanung und genaue Einteilung der Aufträge auf den einzelnen Arbeitsplätzen obliegt dabei den Bereichsleitern und entspricht somit einer Art der Meistersteuerung. Durch die Intransparenz in den Abläufen der einzelnen Bereiche sowie einer fehlenden übergreifenden Steuerungslogik nach gewissen Regeln entstanden auch zunehmend Probleme.

Innerhalb der mechanischen Fertigung werden grob fünf Ressourcengruppen unterschieden, welche wiederum über eine gewisse Anzahl von Maschinen bzw. Arbeitsplätzen verfügen. In Summe handelt es sich dabei um 25 Ressourcen, die unterschiedlich häufig als idente Versionen vorkommen, insgesamt umfasst die Fertigung 58 Arbeitssysteme. Tabelle 2 fasst die einzelnen Gruppen mit der Anzahl ihrer Ressourcenpools und konkreten Anzahl von Maschinen zusammen:

Ressourcen- gruppe	Anzahl an diskreten Maschinen- bzw. Arbeitsplatztypen	Anzahl an Maschinen bzw. Arbeitsplätzen gesamt
Drehen	6	7
Fräsen	7	17
Schleifen	4	6
Oberfläche	2	14
Galvanik	6	14
Summe	25	58

Tabelle 2: Maschinen- und Arbeitsplatzstruktur mechanische Fertigung

5 Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens

Zur näheren Analyse der vorliegenden Fertigung wird auf die Methode einer Diskreten Event Simulation zurückgegriffen. In diesem Abschnitt sollen die Wichtigkeit dieses Instrumentes, der Erstellungsprozess des Simulationsmodells und dabei vor allem die getroffenen Annahmen sowie festgelegten Parameter erläutert werden. Die Zielsetzung der Simulationssoftware liegt darin, anhand der Unternehmensdaten als Input als Output die Kennzahlen Liefertreue, Durchlaufzeit, Umlaufbestandshöhe und Kapazitätsauslastung je Konfiguration des Modells zu bestimmen. Anhand dieser Ergebnisse werden in Abschnitt 6 weitere Analysen durchgeführt und in Abschnitt 7 Handlungsmöglichkeiten für den Industriebetrieb erläutert.

5.1 Relevanz von Simulationsmodellen

Im Rahmen der Literaturrecherche zu den Fertigungssteuerungsverfahren stößt man auf sehr viele Erwähnungen der Diskreten Event Simulation. Zahlreiche Studien, wie etwa, um nur einige Beispiele zu nennen, jene von Pergher et al., Chen et al. oder Yang et al. im Bereich der Simulation von Fertigungssteuerungen, unterstreichen die Präsenz des Einsatzes dieser Methodik in der Wissenschaft dieses Teilbereiches.⁷⁵

Kleeberg bezeichnet Simulation als die Entwicklung eines Modells für ein reales System, mit dem in weiterer Folge Experimente durchgeführt werden können. Eben dieses zielgerechte Experimentieren sei immer dann äußerst sinnvoll, wenn die Problemstellung für analytische Modelle zu komplex ist, um eine optimale Lösung mithilfe von Algorithmen zu errechnen.

Eine Fertigung sei dabei perfekt als Verbund von Werkstätten und Arbeitsplätzen im Laufe bzw. Abhängigkeit der Zeit als Systemmodell darstellbar. Durch gezielte Abänderung bestimmter Kombinationen von Einflussfaktoren werden demnach unterschiedliche Auswirkungen erwartet.

In diesem Fall helfen Simulationsmodelle bei der Untersuchung von Fertigungssteuerungsverfahren sogar in zweierlei Hinsicht. Einerseits ist es möglich

⁷⁵ vgl. Pergher et al. (2020), S. 2.; vgl. Chen et al. (2022), S. 3.; vgl. Yang et al. (2019), S. 2479.

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation

Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens

durch Untersuchung des Systemverhaltens eine neue Steuerungsstrategie zu entwickeln, und andererseits durch Variation gewisser Parameter das vorteilhafte Verhalten des neuen Konzeptes zu validieren und gegebenenfalls sogar weiter zu steigern.⁷⁶

Denn erst die ereignisorientierte Modellierung, also eine Beschreibung von Systemzuständen zu diskreten Zeitpunkten, ermöglicht in dem dynamischen Unternehmensumfeld eine Planung und Steuerung von Prozessabläufen. Es lassen sich demnach viele Faktoren, denkbar wären hier etwa die Priorisierung von Aufträgen oder der Einfluss von Störfaktoren, wie Maschinen- oder Personalausfällen, in ein Rechenprogramm bringen, welches auch in seinem Umfang an Daten für normale Zettelrechnungen zu intuitiv wäre. In den letzten Jahrzehnten entwickelten sich leistungsstarke Rechensysteme, in welche sich auch die kompliziertesten Ablaufregeln relativ einfach berücksichtigen lassen, was die Diskrete Ereignisorientierte Simulation zu einer Schlüsseltechnologie in diesem Bereich macht.⁷⁷

Das Instrument der Simulation ermöglicht nämlich auch, unterschiedlichste Praktiken in diversen Fertigungssysteme auszutesten, ohne das Risiko eines realen Trial and Errors. Beispielsweise muss die Implementierung eines Auftragsfreigabeverfahrens immer vorsichtig durchgeführt werden, da es sowohl in der technischen Struktur als auch in der Arbeitskultur des Unternehmens kosten- und zeitintensiv ist, auf ein neues Konzept umzustellen. Durch das virtuelle Abbild der Fertigung bleibt allerdings Spielraum für die Variation verschiedenster produktionsrelevanter Aspekte, wie etwa Losgrößen, Engpassregulierungen und vor allem auch für Steuerungsverfahren. So können unterschiedliche Ansätze in kurzer Zeit ohne Kosten, die mit physischen Materialien verbunden sind, getestet werden.⁷⁸

5.2 Modellerstellung

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde entschieden, eine Python-Simulationssoftware, konkret das Programm PyCharm, auszuwählen. Dabei konnte auf ein bereits vorliegendes Modell des Institutes für Industrielogistik in Leoben, erstellt von Herrn Dr. König

⁷⁶ vgl. Kleeberg (1993), S. 149.

⁷⁷ vgl. Burggräf et al. (2020), S. 402 f.

⁷⁸ vgl. Molenda et al. (2020), S. 664.; vgl. Roderick et al. (1994), S. 237.

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation

Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens

zurückgegriffen werden, welches im Grundgedanken dieselbe Thematik behandelt. Dieses wurde in einigen Aspekten weiterentwickelt und erweitert.

Während in der Ursprungsversion von einer strikten Linienfertigung mit nur einer Hand voll Arbeitsstationen und Produkten ausgegangen wurde, war es zunächst wichtig, das Modell so umzuschreiben, dass die Gegebenheiten des betrachteten Auftragsfertigers abgebildet werden konnten. Im Modell wurden außerdem die Faktoren der Personalverfügbarkeit und der Priorisierung von Aufträgen ergänzt.

Hinsichtlich der Verfahren wurde aufgrund der Uneignung für einen Industriebetrieb mit einem sehr heterogenen Produktionsprogramm auf die Untersuchung von KANBAN verzichtet. Im Gegenzug wurde das Modell um das vielversprechende, bereits erwähnte Verfahren LUMSCOR mit all seinen Regeln und Logiken erweitert.

5.2.1 Datenaufbereitung

Die Grundlage für die Erstellung des Produktionslayouts innerhalb des Modells bieten dabei die Daten aus Tabelle 2. Gegliedert nach den jeweiligen Maschinenpools veranschaulicht die folgende Abbildung 14 die Struktur der Fertigung:

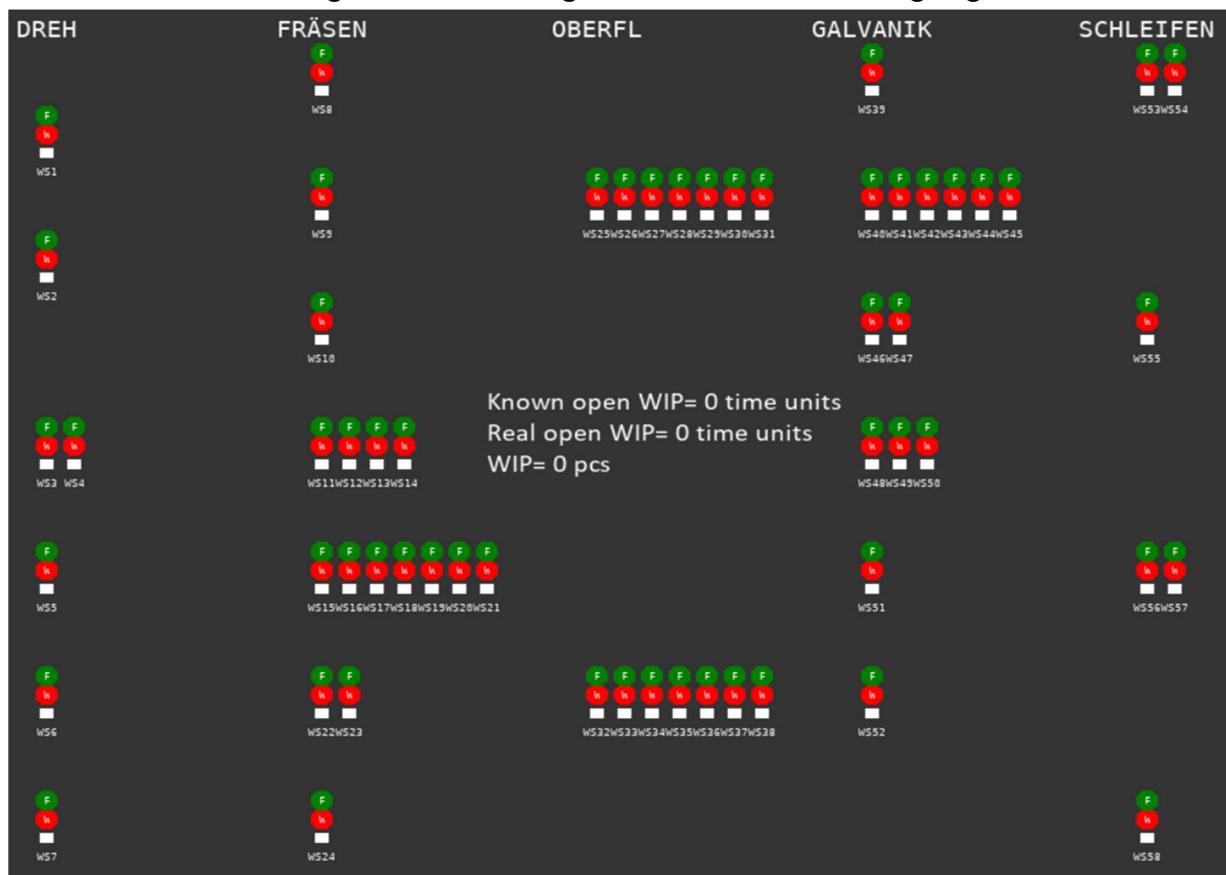


Abbildung 14: Fertigungslayout Simulationsmodell

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation

Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens

Neben der Aufnahme der korrekten Anordnung der Arbeitsstationen wurden seitens WILD alle Fertigungsrückmeldungen, Mitarbeiterlisten und Störungsdaten aus dem Jahr 2023 bereitgestellt.

Die Auflistung, welche Mitarbeiter auf welchen Arbeitsstationen fähig sind, wurden als Worker mit Kompetenzen nach Pools in das Modell übernommen. Weiters wurden Störungsdaten für jeden Bereich vom Unternehmen zur Verfügung gestellt, die dementsprechend die Errechnung von MTBF (Mean Time Between Failure) und MTTR (Mean Time to Repair) je Aggregat ermöglichten.

Nach der Festlegung der Maschinen(gruppen) mussten auftrags- und produktspezifische Informationen aus den Daten abgeleitet werden. Der Prozess der Aufbereitung der Fertigungsrückmeldungen erfolgte dabei dem in Abbildung 15 dargestellten Schema:

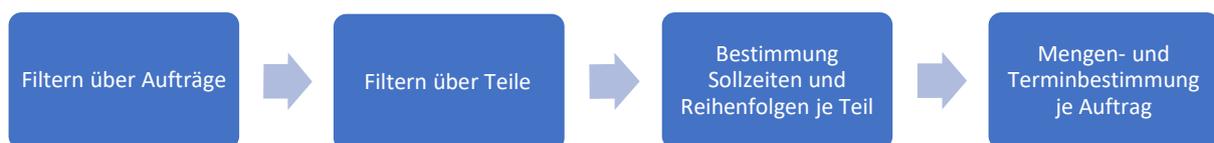


Abbildung 15: Datenaufbereitungsprozess

Zunächst wurden alle Auftragsrückmeldungen, deren Mengen oder Zeiten 0 betragen, aus der Betrachtung entfernt. Im zweiten Schritt wurden nur jene Teile herausgefiltert, die sieben oder mehr Aufträge im Jahr 2023 zählten. Somit ergab sich eine Produktpalette von insgesamt 207 Teilen. Für diese mussten anschließend die Sequenz von Arbeitsstationen sowie die damit verbundenen Rüst- und Bearbeitungszeiten bestimmt werden. Für jedes Teil wurde eine Aufstellung nach Aktivitätspositionen erstellt, aus welcher die Reihenfolge an Ressourcen samt durchschnittlichen Sollzeiten entnommen werden konnte. Für jedes vorhandene diskrete Paar an Maschinenabfolgen wurden außerdem die dementsprechenden Polca-Karten erzeugt. Abschließend wurden aus den Auftragsstart- und endzeitpunkten sowie den enthaltenen Mengen im Modell Orders mit Start- und Endterminen im Wochentakt übernommen.

5.2.2 Zusätzlich getroffene Annahmen

Im Erstellungsprozess des Simulationsmodells war es nötig, einige Annahmen zu treffen:

1. Verfügbarkeit von Materialien ist stets gegeben.
2. Lagerbestände von (End-)Erzeugnissen werden nicht beachtet.
3. Theoretische Arbeitszeit von 7.200 Minuten pro Woche aufgrund des Dreischichtbetriebes des Zielunternehmens an Werktagen (Fünf Tage je 24 Stunden je 60 min)
4. Anzahl der Simulationsdurchläufe für eine jede Konfiguration wurde mit sieben gewählt.
5. Der Bereich der Prototypenfertigung wurde vernachlässigt.
6. Dadurch und durch den Umstand der überdimensionierten Anzahl einiger Handarbeitsplätze ohne Maschinen kann eine Fertigungsauslastung im eher niedrigen Bereich angenommen werden.
7. Die Input-Daten entsprechen den Gegebenheiten aus dem Jahr 2023 und garantieren keinen Erfolg des besten Simulationsergebnisses bei dynamischen Änderungen der Situationen im Industriebetrieb.

5.3 Festlegung von Parametern

Vor dem Durchlauf des Simulationsexperimentes war es schließlich auch notwendig, einige Stellgrößen festzulegen. Aufgrund der Vielzahl von vorhandenen Parametern wurde der Großteil dieser auf realistische Werte fixiert und nur einige wenige variiert.

5.3.1 Fixierte Parameter

Um die Anzahl von unterschiedlichen Modellkonfigurationen nicht übermäßig ansteigen zu lassen, wurde entschieden, folgende Größen auf die in Tabelle 3 ersichtlichen Werte zu fixieren.

Parameter	Wert
Simulationsdauer	240.000 Minuten
Eintakten der Aufträge	7.500 Minuten (Wochenrhythmus)
Intervall zwischen Worker Checks	500 Minuten
Anwesenheitswahrscheinlichkeit eines Mitarbeiters	40 %
Intervall zwischen Polca Card Checks	20 Minuten
Anzahl von Polca-Karten je Stationenpaar	üblicherweise 2 Stück
Update Frequency	20 Minuten
Intervall Periodischer Release LUMSCOR	200 Minuten

Tabelle 3: Fixierte Modellparameter

Die Simulationsdauer wurde mit circa einem halben Jahr (30 Wochen und zwei Wochen Nachlauf) angenommen, wobei das Eintakten der Aufträge durch die Grobplanung sowie die geplanten Liefertermine im Wochenrhythmus stattfindet.

Die Bearbeitung eines Auftrages darf auf einer Maschine erst begonnen werden, wenn ein Worker und, im Falle des Verfahrens POLCA, eine dementsprechende Karte vorhanden ist. Wenn auf einen Arbeiter gewartet wird, so überprüft das Modell alle 500 Minuten neu, ob in der Zwischenzeit ein Mitarbeiter mit entsprechender Kompetenz zur Verfügung steht. Dieses Intervall entspricht in etwa acht Stunden und somit einer Arbeitsschicht. Aufgrund des Dreischichtbetriebes mit kurzfristiger Möglichkeit des Umdisponierens in Ausnahmefällen wurde pro Mitarbeiter eine Anwesenheitswahrscheinlichkeit von 40 % angenommen.

Wartet man auf eine Polca-Karte, so wird alle 20 Minuten gecheckt, ob eine dieser in der Zwischenzeit erhältlich ist. Die Anzahl der Polca-Karten je vorhandenem Paar von Fertigungsinseln ist mit zwei Stück festgelegt. Allein die Polca-Karten einer Station zu sich selbst wurde mit drei angenommen, um etwaige Blockierungen, wie sie im Theorieteil zum Verfahren Polca bereits beschrieben wurden, zu umgehen.

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation

Entwicklung des Simulationsmodelles basierend auf den Realdaten des Industrieunternehmens

Die Update Frequency, also die Zeitdauer zwischen den Aktualisierungen des Status der Systemgrößen, wie beispielsweise jene der Umlaufbestandshöhe zur kontinuierlichen Auftragsfreigabe, beträgt 20 Minuten. Im Verfahren LUMSCOR gibt es neben der kontinuierlichen auch eine Auftragsfreigabe in periodischen Zeitintervallen, wobei hier eine Periode von 200 Minuten fixiert wurde.

5.3.2 Variierte Parameter

Den erwähnten fixen Größen stehen die Variablen des Simulationsmodells gegenüber. Um innerhalb der Steuerungsverfahren Unterschiede ausarbeiten zu können, wurden drei Veränderlichkeiten in jeweils drei Ausprägungen angedacht. Die Details sind in Abbildung 16 ersichtlich.

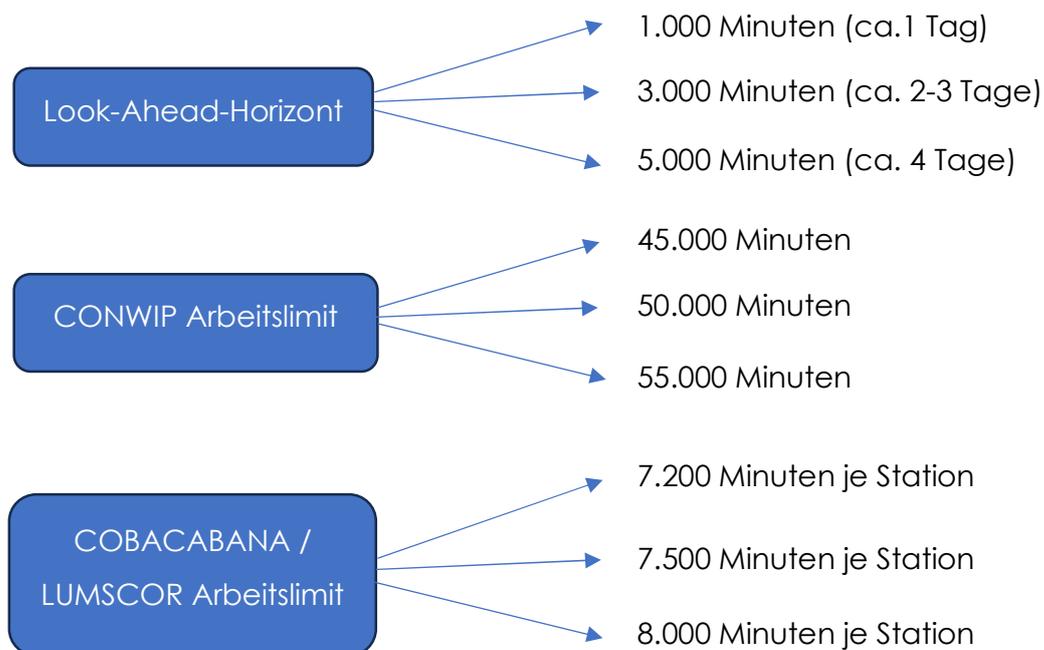


Abbildung 16: Variablen Simulationsmodell

Der Look-Ahead-Horizont bezeichnet in diesem Fall die Zeitspanne, für die es erlaubt ist, einen Auftrag bereits vor dem eigentlich geplanten Auftragsstart vorzuziehen. Das CONWIP Arbeitslimit errechnet sich aus der Summe der restlichen Produktionszeiten aller sich momentan in der Fertigung befindlichen Teile, während das zweite Arbeitslimit, welches die Verfahren COBACABANA und LUMSCOR beeinflusst, die zeitliche Obergrenze für die Aufträge auf und vor einer einzelnen Arbeitsstation bildet.

6 Ergebnisse und Auswertungen der Simulationsstudie

All jene, in Abschnitt 5 diskutierten Annahmen und Konfigurationen wurden in das Modell eingebracht und anschließend die Simulationsläufe in der Software gestartet. In diesem Teil der Arbeit werden die erhaltenen Resultate präsentiert, statistisch ausgewertet und aufgestellte Hypothesen im Rahmen einer Varianzanalyse beleuchtet. Zur Ermittlung der Mittelwerte und Durchführung der Varianzanalyse (ANOVA) wurde das Tool PSPP von GNU verwendet.

6.1 Aufstellung der Hypothesen

Im Vorfeld der Simulation wurden einige Behauptungen formuliert, die den Gegenstand der Mittelwert- und Varianzanalyse bilden sollten. Dabei wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Verfahren existiert.
2. Das Steuerungsverfahren LUMSCOR übertrumpft andere Verfahren.
3. Ein signifikanter Unterschied innerhalb der einzelnen Verfahren bzgl. des Look-Ahead Horizontes existiert.
4. Ein signifikanter Unterschied bzgl. des Arbeitslimits im Verfahren CONWIP existiert.
5. Ein signifikanter Unterschied bzgl. des Arbeitslimits in den Verfahren COBACABANA und LUMSCOR existiert.

6.2 Konzeption der Datenauswertung

Die obenstehenden Behauptungen sollten nun mithilfe einer Varianzanalyse auf ihre Korrektheit geprüft werden. Dieses Instrument vergleicht einzelne Datengruppen anhand eines bestimmten Kriteriums und stellt fest, ob es einen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen gibt oder nicht. Wie in der Praxis üblich, wurde auch im Rahmen dieser Arbeit angenommen, dass ein signifikanter Unterschied besteht, sofern der errechnete Signifikanzwert kleiner oder gleich 5 % beträgt.

Die Varianzanalysen wurden im Rahmen der Arbeit dabei nach 3 Vorgehensweisen bzw. Kriterien zur Unterscheidung der Datengruppen durchgeführt:

- Schema „Work Limit“ bedeutet, dass drei unterschiedliche Varianten von Work Limits bei einem gleichbleibenden Steuerungsverfahren und einem konstanten, nämlich dem mittleren aus drei Look Ahead Zeiträumen (3.000 Minuten), durchgeführt wurden.
- Schema „Look Ahead“ bedeutet, dass drei unterschiedliche Varianten von Look Ahead Zeiträumen bei einem gleichbleibenden Steuerungsverfahren und einem konstanten, nämlich dem mittleren aus drei Work Limits (50.000 bzw. 7.500 Minuten), durchgeführt wurden.
- Schema „Zwischen Verfahren“ bedeutet, dass vier unterschiedliche Varianten von Steuerungsverfahren bei konstantem Work Limit (50.000 bzw. 7.500 Minuten) und konstantem Look Ahead Zeitraum (5.000 Minuten), durchgeführt wurden.

Nach Durchführung der statistischen Auswertung wurde anhand des Signifikanzniveaus von 5 % entschieden, ob ein signifikanter Unterschied besteht oder nicht. (JA entspricht Signifikanzwert kleiner oder gleich 5 %, NEIN entspricht Signifikanzwert größer 5 %). Die genauen Auswertungen lassen sich im Anhang nachlesen, die Ergebnisse wurden in untenstehender Tabelle 4 zusammengefasst:

Verfahren	Variationsschema	DLZ	WIP	Auslast.	Liefertreue
COBACABANA	Work Limit	JA	JA	NEIN	JA
COBACABANA	Look Ahead	JA	JA	NEIN	JA
LUMSCOR	Work Limit	NEIN	NEIN	NEIN	NEIN
LUMSCOR	Look Ahead	NEIN	NEIN	JA	JA
CONWIP	Work Limit	JA	JA	NEIN	JA
CONWIP	Look Ahead	NEIN	NEIN	JA	JA
POLCA	Look Ahead	NEIN	NEIN	JA	JA
Allgemein	Zwischen Verfahren	JA	JA	JA	JA

Tabelle 4: Übersicht Varianzanalyse

6.3 Evaluierung der Hypothesen

Anhand dieser Ergebnisse und den errechneten Mittelwerten konnten nun die Hypothesen auf ihre Richtigkeit geprüft und die Ergebnisse interpretiert werden:

1. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Verfahren existiert.

Es zeigt sich, dass merkliche Unterschiede zwischen allen Verfahren in allen untersuchten Kennzahlen existieren. Im Folgenden werden die Mittelwerte jedes Verfahren für jede Kennzahl grafisch dargestellt und die Unterschiede diskutiert.

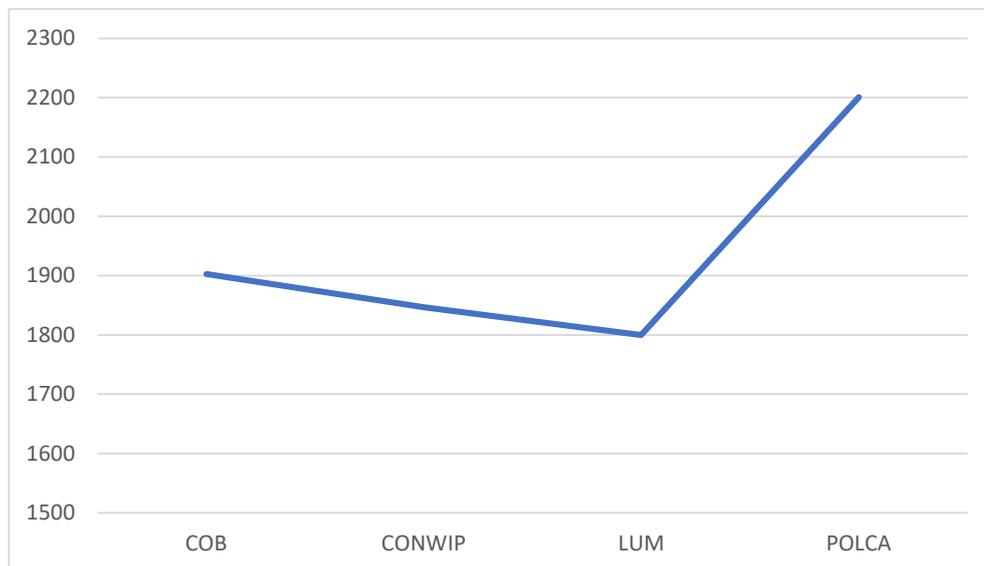


Abbildung 17: Ergebnisse Durchlaufzeit

Wie in Abbildung 17 dargestellt, zeigt LUMSCOR mit in etwa 1.800 Minuten die niedrigste Durchlaufzeit aller Ansätze, gefolgt von den anderen beiden workloadbasierten Verfahren CONWIP und COBACABANA, die um etwa 50 bis 100 Zeiteinheiten länger innerhalb der Fertigung verblieben. Bei POLCA fällt diese jedoch um einiges höher aus, und zwar um über 20 % höher als beim Ansatz LUMSCOR.

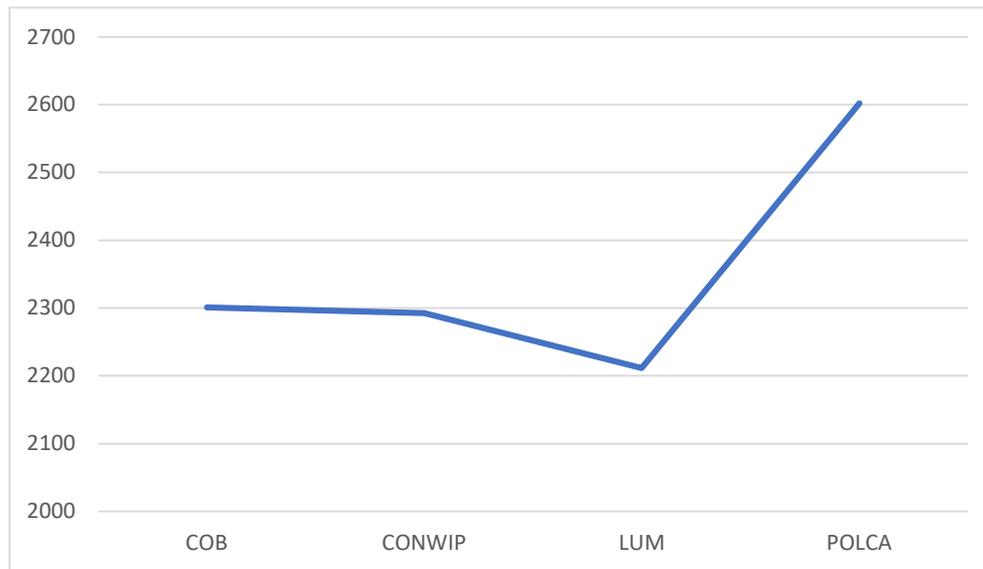


Abbildung 18: Ergebnisse WIP

Die gleiche Rangordnung wie zuvor zeigt sich beim Work in Process. Anhand von Abbildung 18 erkennt man, dass LUMSCOR mit einer durchschnittlichen Stückzahl von 2.212 auch hier den niedrigsten Wert bildet, gefolgt von den gleichauf um circa 100 Stück höheren Durchschnittsbestand von COBACABANA und CONWIP. POLCA weicht auch hier um 17,6 % von den Ergebnissen von LUMSCOR ab.

Die erhaltene Rangordnung hinsichtlich Durchlaufzeit und Umlaufbestandshöhe ist deswegen ident, weil diese beiden Kennzahlen in direktem Zusammenhang zueinanderstehen. Erhöht man nämlich die Bestände, führt dies zu längeren Warteschlangen vor den Stationen und somit zu erhöhter Durchlaufzeit.

Die workloadbasierten Verfahren haben als übergeordnetes Ziel die Arbeitslast des Systems bzw. der einzelnen Stationen zu regulieren und schneiden demnach in dieser Betrachtung am besten ab. POLCA hingegen regelt die Arbeitslast des Systems allerdings nur indirekt über die Anzahl der Karten. Diese konnte mit 2 Karten je Stationenpaar aber gar nicht mehr niedriger gewählt werden, sofern man Blockierungen der Arbeitsstationen untereinander vermeiden will. Es kann angenommen werden, dass bei einer gesteigerten Kartenanzahl die Durchlaufzeit und der Work in Process wesentlich höher ausfallen würden.

In Hinblick auf die Kennzahl der Arbeitsstationenauslastung zeigt sich aufgrund des Zielkonfliktes mit Durchlaufzeit und Beständen jedoch das umgekehrte Bild, was die untenstehende Abbildung 19 veranschaulicht.

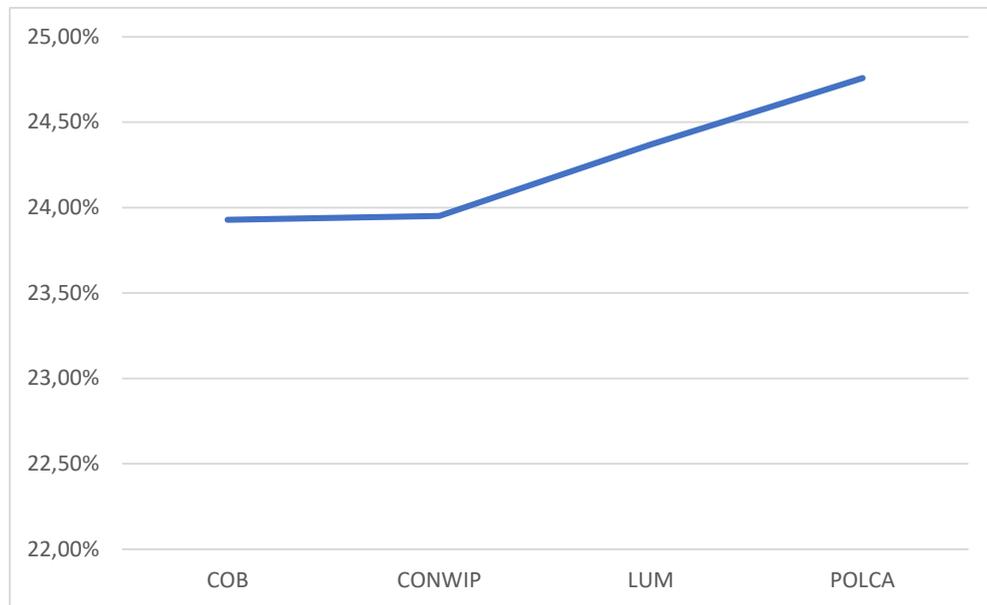


Abbildung 19: Ergebnisse Auslastung

Nun weist POLCA den höchsten Auslastungsgrad aller Verfahren mit 24,76 % auf und die anderen Steuerungslogiken erzielen um ca. einen Prozentpunkt schlechtere Werte. Es gilt allerdings festzuhalten, dass LUMSCOR diesen Effekt mit einer mittleren Auslastung von 24,37 % noch am stärksten kompensieren kann.

Hinsichtlich der Liefertreue würde es der Industriebetrieb mit LUMSCOR und POLCA schaffen, die Abnehmer mit einer hohen Verlässlichkeit von ca. 96 % zu bedienen. Diese Vorteilhaftigkeit gegenüber den anderen beiden Verfahren könnte man sich durch die bessere Ablauflogik für Aufträge in großer Anzahl mit kleinem Volumen erklären. Durch die Einführung eines Arbeitslimits können einige wenige große Aufträge eine Vielzahl von Orders, mit weitaus kürzeren Durchführungszeiten, vor der Freigabe blockieren. POLCA beachtet allerdings nicht die geplante Arbeitsbelastung, sondern rein die Anzahl der Aufträge auf einer Station. LUMSCOR arbeitet zwar workloadorientiert, umgeht den soeben beschriebenen Nachteil allerdings durch seine kontinuierliche Einlastung von Aufträgen, falls die ersten Aggregate der Prozesskette leerlaufen. Dadurch

können parallel zu umfangreichen und langandauernden Großaufträgen Aufträge mit kleineren Mengen bedient werden.

Bei der COBACABANA-Steuerung zeigt sich sogar ein wesentlicher Abfall bei der Liefertreue auf unter 85%, welcher sich dadurch erklären lässt, dass sich das System nach dem Eintritt in einen Terminverzug nur schwer von diesem erholen kann. Durch die Abarbeitung einer Verspätung, entsteht bereits ein neuer Verzug, den man als Fertigung immer mit sich mitzieht. Die genauen Zahlen sind in Abbildung 20 ersichtlich.

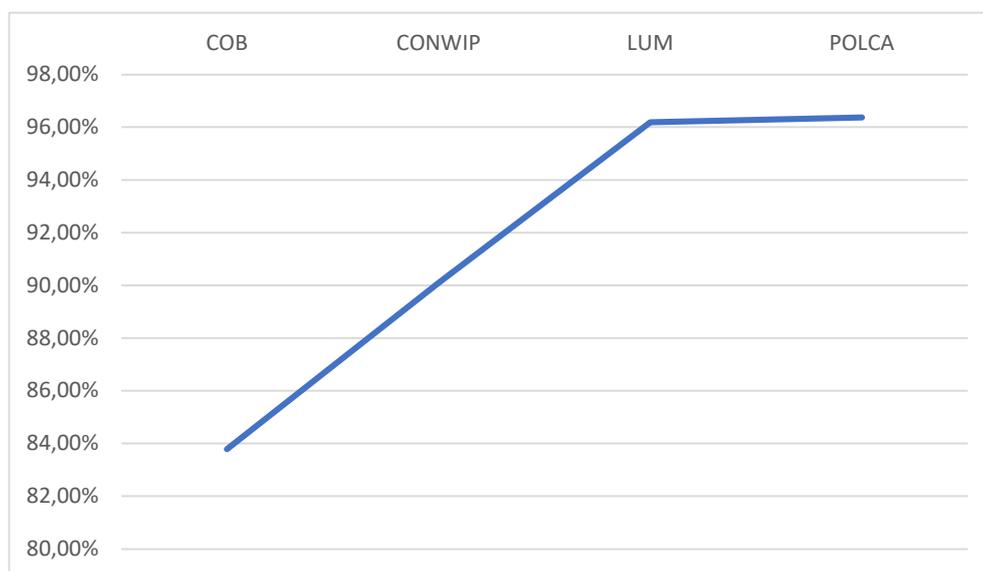


Abbildung 20: Ergebnisse Liefertreue

2. Das Steuerungsverfahren LUMSCOR übertrumpft andere Verfahren.

Aus den errechneten Mittelwerten lässt sich eindeutig die Tendenz erkennen, dass das Steuerungsverfahren LUMSCOR in der gesamtheitlichen Betrachtung das beste Resultat erzielt. Entgegen dem Dilemma der Ablaufplanung mit konkurrierenden Zielgrößen zeigt LUMSCOR nämlich sehr gute Ergebnisse in allen betrachteten Kennzahlen zugleich.

Die in Tabelle 5 erstellte Rangordnung der einzelnen Verfahren belegt dies. Die Einordnung geschieht dabei nach einem Punktesystem ähnlich einer Nutzwertanalyse. Jenes Verfahren, welches in der Situation des Zielunternehmens in der jeweiligen Outputkennzahl den besten Mittelwert hatte, wurde mit vier Punkten gewertet, jenes mit dem zweitbesten Ergebnis mit

drei Punkten, das drittbeste mit zwei Punkten und das schlechteste Verfahren hinsichtlich jener Kennzahl mit einem Punkt.

	Liefertreue	WIP	Auslastung	DLZ	Gesamt	Rang
COBACABANA	1	2	1	2	6	4.
CONWIP	2	3	2	3	10	2.
LUMSCOR	3	4	3	4	14	1.
POLCA	4	1	4	1	10	2.

Tabelle 5: Nutzwertanalyse Verfahren

Diese Aufstellung sieht eine idente Gewichtung der 4 Outputwerte vor (25 %). Das bedeutet, dass keiner der Faktoren aus Sicht des Unternehmens von der Wichtigkeit über einen anderen gestellt wird.

Es zeigt sich, dass LUMSCOR immer unter den erfolgreichsten zwei Verfahren liegt und somit auch die geeignetste Wahl für das Unternehmen darstellt. Dahinter liegen die Ansätze CONWIP und POLCA gleichauf auf Platz 2. Hier kann man festhalten, dass POLCA in zwei Bereichen die besten und in den anderen zwei Kennzahlen die schlechtesten Ergebnisse liefert, während CONWIP bei allen Zielgrößen kontinuierlich im Mittelfeld liegt. Die niedrigste Gesamtpunktzahl und somit auch den niedrigsten Nutzwert zeigt das Verfahren COBACABANA.

Die Behauptungen aus der Literatur, dass LUMSCOR für die Gegebenheiten eines Auftragsfertigers mit einem hohen Produktmix bei niedrigen Stückzahlen die besten Ergebnisse liefert, lassen sich also bestätigen. Zurückzuführen ist diese Tatsache, wie bereits erwähnt, auf die Kombination von periodischer und kontinuierlicher Auftragsfreigabe sowie der korrigiert aggregierten Berechnung der Arbeitslastnorm durch Unterscheidung von direkter und indirekter Last eines Auftrages.

3. Ein signifikanter Unterschied innerhalb der einzelnen Verfahren bzgl. des Look-Ahead Horizontes existiert.

Abgeleitet aus den Ergebnissen aus Tabelle 5 kann diese Hypothese nicht vollständig, aber doch für einige Kennzahlen je Verfahren teilweise, bestätigt werden.

Ein wesentlicher Unterschied durch Variation des Look-Ahead- Zeitraumes bei allen Verfahren zeigt sich hinsichtlich der Liefertreue. Die Auslastungsergebnisse wurden bei allen Verfahren außer bei COBACABANA signifikant stark beeinflusst.

In den meisten Steuerungslogiken ließ sich kein signifikanter Unterschied durch unterschiedliche Look-Ahead-Zeiträume bezüglich der Kennzahlen Durchlaufzeit und Umlaufbestände erkennen. Eine Ausnahme bildet hier abermals COBACABANA, bei dem doch ein etwas größerer Effekt beobachtet werden konnte.

Durch Steigerung des Look-Ahead-Horizontes konnte in allen beobachteten Fällen eine Verbesserung der Liefertreue beobachtet werden. Des Weiteren ist durch die großzügigere Einlastung der Aufträge auch die Auslastung bei allen Verfahren gestiegen, bei COBACABANA allerdings nicht signifikant. Durchlaufzeit und Work in Process zeigen bei drei von vier Verfahren keine wesentlichen Änderungen durch Steigerung des Horizontes.

Demnach würde man bei einer stärkeren Erhöhung dieses Zeitraumes weitere Verbesserungen der Auslastung und Liefertreue annehmen. Allerdings zeigt sich bereits in den vorliegenden Daten, dass ein Vorgriffshorizont von 5.000 Minuten stärkere Standardabweichungen in den Kennzahlen Durchlaufzeit, WIP und Liefertreue aufweist. Diese Inkonstanz des Systems würde bei noch größerem Look Ahead Horizont demnach wohl weiter zunehmen.

Die größten Standardabweichungen und Differenzen zwischen den Gruppen zeigt, abgesehen von der Liefertreue, das POLCA Verfahren. Dahinter folgen CONWIP und COBACABANA mit etwas schwächeren aber untereinander ähnlichen Effekten. Allein das LUMSCOR Verfahren zeigt deutlich geringere

Schwankungen als die übrigen, was die nachfolgenden Abbildungen 21, 22
und 23 darstellen.

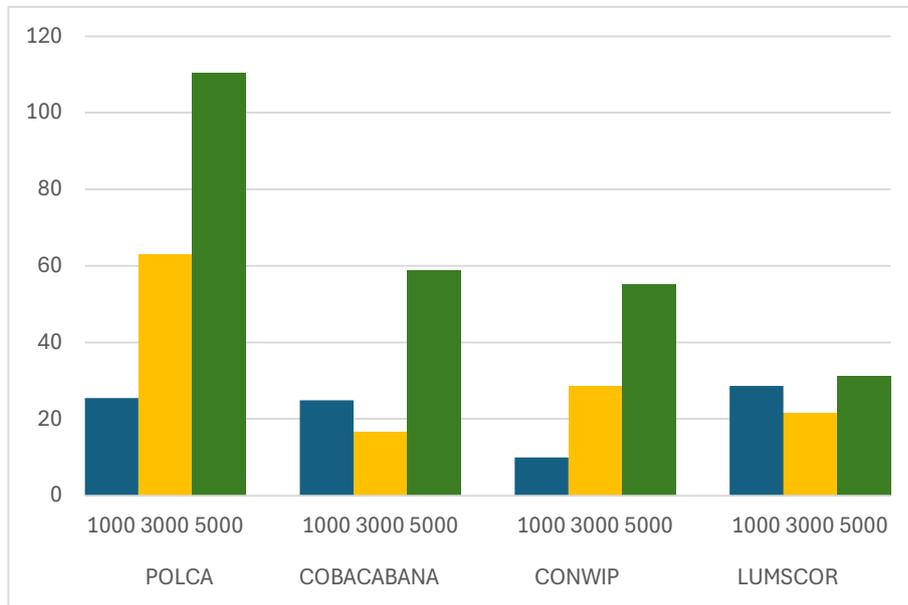


Abbildung 21: Standardabweichungen Durchlaufzeit

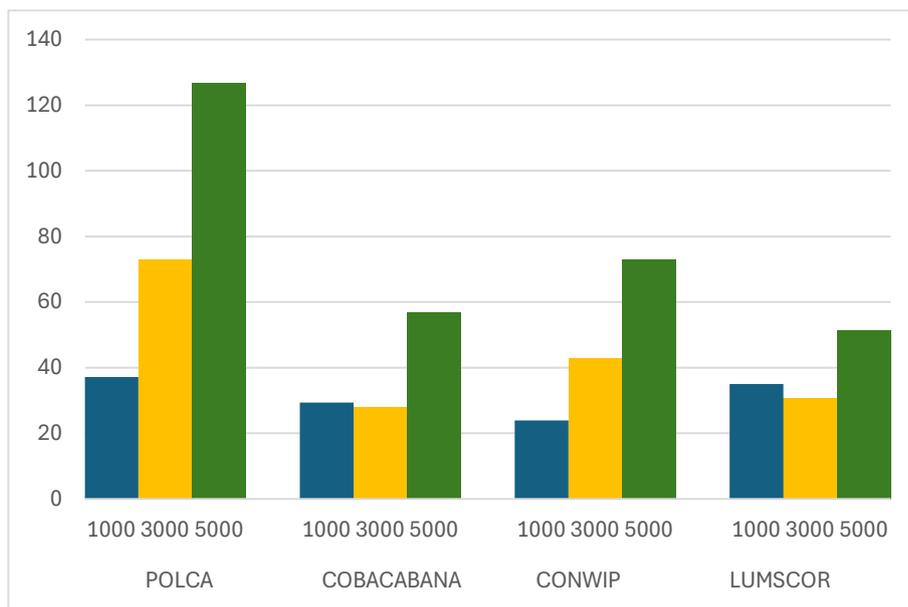


Abbildung 22: Standardabweichungen WIP

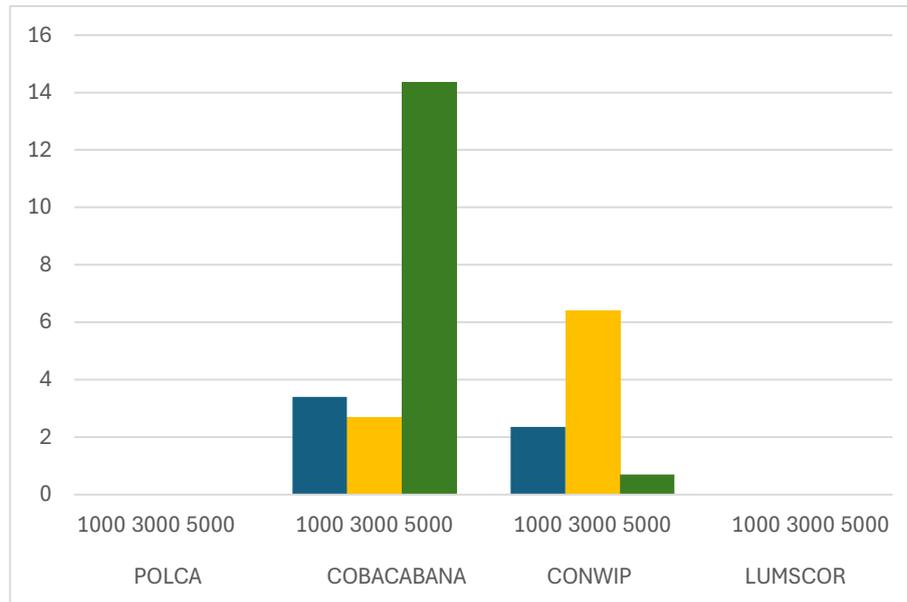


Abbildung 23: Standardabweichungen Liefertreue

4. Ein signifikanter Unterschied bzgl. des Arbeitslimits im Verfahren CONWIP existiert.

Diese Behauptung lässt sich für drei der vier betrachteten Outputkennzahlen bestätigen. Es waren demnach signifikante Unterschiede in den Aspekten Durchlaufzeit, Work in Process und Liefertreue erkennbar. Allein für die Maschinenauslastung lässt sich diese Hypothese widerlegen, da hier keine ausreichend großen Unterschiede beobachtet werden konnten.

Interpretieren lässt sich dieses Ergebnis auf folgende Weise: Je höher man die Arbeitslast des Gesamtsystems zulässt, desto mehr Aufträge dürfen generell in das System eingelastet werden. Je mehr Aufträge wiederum zur Freigabe zugelassen werden, desto eher wird man die Order rechtzeitig fertigstellen können. Dieser Umstand sollte die beobachtete zunehmende Liefertreue erklären. Allerdings erhöht sich im gleichen Zug durch die Mehrzahl der Aufträge innerhalb der Fertigung der Umlaufbestand und verursacht aufgrund des direkten Zusammenhanges mit der Durchlaufzeit, dass auch diese länger wird.

Die Mittelwerte der Auslastung nehmen zwar mit steigendem Work Limit leicht zu, der Unterschied ist aber zu gering für das festgelegte Signifikanzniveau.

5. Ein signifikanter Unterschied bzgl. des Arbeitslimits in den Verfahren COBACABANA und LUMSCOR existiert.

Auch diese Hypothese kann teilweise unterstützt werden. Einerseits lassen sich ident zu CONWIP zuvor bei dem COBACABANA-Verfahren signifikante Unterschiede in drei der vier Kennzahlen beobachten. Allein die Auslastungsdifferenz bleibt auch hier trotz leicht steigender Tendenz bei Zunahme des Arbeitslimits von zu geringer Bedeutung.

Die erhaltenen Ergebnisse lassen sich analog zu dem CONWIP Verfahren erklären. Denn je höher man Work Limit zulässt, desto stärker zeigt sich aus bereits genannten Gründen eine verbesserte Liefertreue, aber umso höhere Durchlaufzeiten und Umlaufbestände ergeben sich dadurch.

Völlig unbeeinflusst von der Variation der Arbeitslastobergrenzen zeigt sich das LUMSCOR Verfahren. Es gibt hier nämlich in keiner der vier Outputwerte einen merklichen Unterschied.

Die Vorteilhaftigkeiten in der Ablauflogik dieses Verfahren lassen vermuten, dass dieses Verfahren dermaßen stabil und robust arbeitet, dass es durch Änderungen des Work Limits zur Gänze unberührt bleibt.

7 Ableitbare Handlungsempfehlungen für das Industrieunternehmen

Abschließend wird in diesem Abschnitt der Arbeit noch kurz diskutiert, wie die Resultate aus den durchgeführten Untersuchungen auf die zukünftige Fertigung des Fallbeispielunternehmens umgelegt werden könnten.

Zu Beginn sei festgehalten, dass aus der Vielzahl der existierenden Steuerungsverfahren nur vier Verfahren im Rahmen des Simulationsmodelles mit seinen in Abschnitt 5 erwähnten Limitationen eingebunden werden konnten. Dadurch kann eine noch optimalere Lösung nicht ausgeschlossen werden. Ebenfalls war es nicht geplant, die Implementierung eines neuen oder angepassten Steuerungsmodelles in der WILD GmbH mitzugestalten und dessen etwaige Erfolge zu beobachten oder nötige Anpassungen zu entwickeln.

Jedoch können anhand des Simulationsexperimentes mit dem Produktionsprogramm von 2023 als Input einige Handlungsempfehlungen getroffen werden. Jedenfalls als essenziell angesehen werden kann die Einführung einer klar definierten Ablauflogik. Aus den Ausführungen aus Kapitel 2 kann man folgern, dass nur durch eine klar strukturierte Organisationsform der Fertigung Erfolg erzielt werden kann. Es scheint daher sinnvoll, das bestehende intuitive und heuristische System der Auftragssteuerung, bei dem die meisten Entscheidungen den Meistern an den Arbeitsstationen vor Ort obliegen, zu hinterfragen und durch eine klare Fertigungssteuerungsmethode zu ersetzen.

Die in der Arbeit behandelte Simulationsstudie zeigt hierfür einen klaren Favoriten. Wie in der Literatur bereits in einigen Quellen angeführt, bringt LUMSCOR die größte Vorteilhaftigkeit aller Verfahren für heutige Make-To-Order Industrieunternehmen mit großer Auftragsanzahl und kleinen Stückzahlen. Die Outputwerte des Simulationsexperimentes haben diese These ganz klar bestätigt, wie die Ergebnisse aus Tabelle 5 zeigen. Während POLCA eher geeignet wäre, wenn man den Hauptfokus auf die Optimierung der Liefertreue setzt, würden die beiden workloadbasierten Verfahren CONWIP und COBACABANA in puncto Durchlaufzeit und Work in Process empfehlenswerter sein. LUMSCOR hingegen überzeugt in allen Kennzahlen zugleich, ist dermaßen stabil, dass es sich nicht von Faktoren wie der Variation der Work Limits

beeinflussen lässt, und die geringste Standardabweichung im Bereich des Look-Ahead-Zeitraumes aufweist. Deswegen empfiehlt es sich für die Fertigung von WILD ein Konzept umzusetzen, welches auf diesem Steuerungsverfahren basiert.

Die Implementierung einer LUMSCOR Steuerung würde sowohl eine periodische als auch eine kontinuierliche Komponente zur Auftragsfreigabe erfordern. Sowohl die periodische Prüfung zur Neufreigabe von Aufträgen, welche im Rahmen der Simulation mit 200 Minuten angenommen wurde, als auch die kontinuierliche Prüfung mit 20 Minuten Zeitabstand zwischen den Evaluierungen müssten demnach als Teil der IT-Struktur, optimalerweise in Zusammenhang mit dem vorhandenen ERP-System, installiert werden.

Die Anschaffung neuerer Technologien und Sensorik bzw. einer IT-Infrastruktur, die Datenübertragung in Echtzeit möglich macht, würde das Zeitintervall zwischen den Überprüfungen verkürzen und die kontinuierliche Freigabe wesentlich optimieren. Ob dieser Nutzen die Kosten für die Neuanschaffung übersteigen würde, muss jedenfalls auch hinterfragt werden.

Conclusio

Um in der heutigen Zeit als Industrieunternehmen den Kundenanforderungen besser gerecht zu werden und sich langfristig gegenüber den Mitbewerbern am Markt etablieren zu können, hat sich die Optimierung der operativen Prozesse und Kennzahlen zu einem essenziellen Kernthema entwickelt. Dabei erwies sich, dass vor allem die Konzeptionierung eines passenden Produktionssteuerungsverfahrens einen wesentlichen Hebel auf die betriebliche Logistikleistung sowie Logistikkosten und somit auch auf die Wirtschaftlichkeit eines Industriebetriebes hat.

Angesichts der vielfältigen und teils nicht unmittelbar ersichtlichen Zusammenhänge in einer Produktion ist es aber eine Herausforderung für Industriebetriebe, den für ihre Fertigung vorteilhaftesten Steuerungsansatz zu finden. Aufgrund der enormen Relevanz dieses Themenfeldes einerseits und der Komplexität der Fertigungszusammenhänge andererseits, bedarf es seitens der Wissenschaft zusätzlicher Forschungsstudien, weswegen entschieden wurde, einen systematischen Vergleich von Produktionssteuerungsverfahren mittels einer Discrete Event Simulation durchzuführen.

Die Ziele der Arbeit waren dabei zuerst festzustellen, was die aktuellen Standards und Forschungen in diesem Bereich sind und welche Ansätze theoretisch besonders hohes Potenzial in heutigen Fertigungsumgebungen aufweisen. Ausgehend davon war es geplant, für besonders relevante Verfahren ein Simulationsexperiment anhand eines realen Fallbeispiels einer mechanischen Fertigung durchzuführen, welches die unterschiedlichen Ansätze anhand der logistischen Kennzahlen Durchlaufzeit, Umlaufbestände, Maschinenauslastung und Liefertreue gegenüberstellt.

Nach der Erläuterung einiger Grundlagen zum Themenkomplex der Produktionsplanung und -steuerung wurde nach momentan vorherrschenden Trends in diesem Bereich recherchiert. Hier konnte man erkennen, dass heutzutage vor allem karten- und workloadbasierte Fertigungssteuerungen besondere Aufmerksamkeit genießen.

Deswegen wurde im Rahmen des Abschnittes 3 dieser Arbeit auf fünf relevante karten- sowie workloadbasierte Methoden, nämlich KANBAN, POLCA, CONWIP, COBACABANA und LUMSCOR, näher eingegangen und deren Funktionsweise genau

beschrieben. Die systematische Literaturrecherche zu diesen Verfahren konnte einen Einblick in die Ergebnisse momentaner State-of-the-Art Forschungsstudien auf diesem Gebiet geben. Dabei zeigte sich je nach untersuchten Kennzahlen, verglichenen Verfahren und Unternehmensformen eine differenzierte Wahl des bevorzugten Fertigungssteuerungsverfahrens. Ein merklicher Anstieg der Publikationen im Laufe der letzten 20 Jahre unterstreicht zudem, dass immer mehr Interesse an dieser Thematik in Forschung und Wirtschaft vorherrscht.

Die Wirksamkeit dieser ausgewählten Verfahren wurde anhand eines realen Unternehmensbeispiels eines mittelständischen Auftragsfertigers analysiert. Aufgrund der in der Literatur häufig erwähnten Relevanz von Simulationsmodellen wurde das Instrument der Discrete Event Simulation ausgewählt. So wurde schließlich ein Python-Simulationsmodell, welches die Daten der Fertigung aus dem Zielunternehmen als Input verwendete sowie die Ablauflogiken der Verfahren und die Fertigungsgegebenheiten des Zielunternehmens implementiert hatte, entwickelt.

Nach Festlegung der fixen und variablen Parameter sowie der übrigen Modellannahmen ergaben sich je Steuerungsverfahren unterschiedliche Ergebnisse hinsichtlich der Kennzahlen Durchlaufzeit, Umlaufbestand, Maschinenauslastung und Liefertreue. Diese erhaltenen Daten wurden im Rahmen einer Varianzanalyse ausgewertet und zeigten mehrheitlich signifikante Unterschiede (Ergebnisse siehe Tabelle 4). Abgeleitet aus der Performance der Verfahren konnte abschließend dem Zielunternehmen die Empfehlung ausgestellt werden, im Falle einer starken Orientierung auf Liefertreue, auf das Verfahren POLCA, oder im Falle eines Fokus auf Durchlaufzeit und Work-in-Process Reduzierungen, auf ein workloadbasiertes Verfahren zu setzen. Global gesehen, erwies sich allerdings das innovativere LUMSCOR Verfahren als deutlich stärkste Steuerungsmethode.

Allein an der Vielzahl von wissenschaftlichen Artikeln und Beiträgen im Bereich der Einführung neuer Verfahren und vor allem der Optimierung bzw. Weiterentwicklung bestehender Ansätze erkennt man bereits, dass dem Entwicklungsprozess von modernen Fertigungssteuerungen aktuell hohe Aufmerksamkeit geschenkt wird. Deswegen und nicht zuletzt aufgrund eines sich im Laufe der Jahre ständig ändernden Unternehmensumfeldes und Anforderungen an die Fertigung, kann in diesem Themenkomplex von einem großen Forschungspotenzial für Wissenschaft und Wirtschaft in den nächsten Jahren ausgegangen werden.

Literaturverzeichnis

- Adam, Dietrich (1992): Fertigungssteuerung: Grundlagen und Systeme, Gabler Verlag. ISBN 9783322891419.
- Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (2008): Handbuch Logistik, Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-72928-0.
- Arteaga, A. G.; Calvo, Roque (2019): Experimental analysis of alternative production flow controls for high variety product manufacturing, in: Procedia Manufacturing, Jg. 41, S. 82–89. 10.1016/j.promfg.2019.07.032.
- Bagni, Gustavo; Godinho Filho, Moacir; Thüerer, Matthias; Stevenson, Mark (2021): Systematic review and discussion of production control systems that emerged between 1999 and 2018, in: Production Planning & Control, Jg. 32, Nr. 7, S. 511–525. 10.1080/09537287.2020.1742398.
- Bauernhansl, Thomas (2020): Fabrikbetriebslehre Management in der Produktion, Springer Vieweg. ISBN 978-3-662-44537-2.
- Bertolini, M.; Braglia, M.; Frosolini, M.; Marrazzini, L. (2020): Work In Next Queue CONWIP, in: Computers & Industrial Engineering, Jg. 143, S. 106437. 10.1016/j.cie.2020.106437.
- Bokor, Balwin; Altendorfer, Klaus (2024): Extending ConWIP by flexible capacity and WIP-Cap adjustment for a make-to-order multi-item multi-stage production system, in: Flexible Services and Manufacturing Journal. 10.1007/s10696-024-09547-9.
- Burggräf, Peter; Schuh, Günther (2020): PRODUKTION UND MANAGEMENT Handbuch produktion und management, MORGAN KAUFMANN. ISBN 978-3-662-61968-1.
- Burggräf, Peter; Schuh, Günther; Dannapfel, Matthias; Potente, Till; Pulz, Christian; Swist, Mateusz; Welter, Tobias; Ebade Esfahani, Matthias (2020): Gestaltung der Produktionssteuerung, in: Burggräf, Peter; Schuh, Günther: PRODUKTION UND MANAGEMENT: Handbuch produktion und management, MORGAN KAUFMANN, S. 365–407.
- Chen, Yarong; Zhou, Hongming; Huang, Peiyu; Chou, FuhDer; Huang, Shenquan (2022): A refined order release method for achieving robustness of non-repetitive dynamic manufacturing system performance, in: Annals of Operations Research, Jg. 311, Nr. 1, S. 65–79. 10.1007/s10479-019-03484-9.

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich
einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation

Literaturverzeichnis

- Fandel, Günter; Francois, Peter; Gubitz, Klaus Martin (1994): PPS-Systeme, Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-09395-5.
- Fernandes, Nuno O.; Carmo-Silva, S. (2011): Workload control under continuous order release, in: International Journal of Production Economics, Jg. 131, Nr. 1, S. 257–262. 10.1016/j.ijpe.2010.09.026.
- Fernandes, Nuno O.; Thüerer, Matthias; Mirzaei, Nima; Ferreira, Luis Pinto; Silva, Francisco J.G.; Carmo-Silva, Sílvia (2020): POLCA Control in Two-Stage Production Systems, in: Procedia Manufacturing, Jg. 51, S. 1491–1496. 10.1016/j.promfg.2020.10.207.
- Gong, Qiguo; Yang, Yuru; Wang, Shouyang (2014): Information and decision-making delays in MRP, KANBAN, and CONWIP, in: International Journal of Production Economics, Jg. 156, S. 208–213. 10.1016/j.ijpe.2014.06.010.
- Gosavi, Abhijit, Aparna A. (2024): CONWIP control in the digitized world: The case of the cyber-physical jobshop, in: International Journal of Production Economics, Jg. 270, S. 109169. 10.1016/j.ijpe.2024.109169.
- Gstettner (1998): Leistungsanalyse von Produktionssteuerungssystemen, Physica-Verlag HD. ISBN 978-3-7908-1074-5.
- Hübl, Alexander (2018): Conwip, in: Hübl, Alexander: Stochastic Modelling in Production Planning: Methods for Improvement and Investigations on Production System Behaviour, Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint; Springer Gabler, S. 87–107.
- Kasper, T. ArnoA.; Land, Martin J.; Teunter, Ruud H. (2023): Non-hierarchical work-in-progress control in manufacturing, in: International Journal of Production Economics, Jg. 257, S. 108768. 10.1016/j.ijpe.2022.108768.
- Kellner, Florian; Lienland, Bernhard; Lukesch, Maximilian (2020): Produktionsplanung und -steuerung (PPS), in: Kellner, Florian: PRODUKTIONSWIRTSCHAFT: Planung, steuerung und industrie 4.0 - includes digital flashcards, GABLER, S. 161–343.
- Kistner, Klaus-Peter; Steven, Marion (op. 2001): Produktionsplanung: Mit 71 Abbildungen und 3 Tabellen, Physica-Verlag; Springer-Verlag. ISBN 978-3-7908-1426-2.
- Kleeberg, Kai (1993): Kapazitätsorientierte Produktionssteuerung, Gabler Verlag. ISBN 9783663132714.,
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6601751>.

- Klug, Florian (2013): Optimaler Push/Pull-Mix bei der Produktionsplanung und -steuerung mit stabiler Auftragsfolge, in: Göpfert, Ingrid; Braun, David; Schulz, Matthias: *Automobillogistik: Stand und Zukunftstrends*, Springer Gabler, S. 41–65.
- Land, Martin J. (2009): Cobacabana (control of balance by card-based navigation): A card-based system for job shop control, in: *International Journal of Production Economics*, Jg. 117, Nr. 1, S. 97–103. 10.1016/j.ijpe.2008.08.057.
- Lee, Hochang; Seo, Dong-Won (2016): Performance evaluation of WIP-controlled line production systems with constant processing times, in: *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 94, S. 138–146. 10.1016/j.cie.2016.02.006.
- Lödding, Hermann (2016): *Verfahren der Fertigungssteuerung*, Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-48458-6.
- Missbauer, Hubert (2018): Auftragsfreigabe und Produktionssteuerung, in: Spengler, Thomas S.; Gössinger, Ralf; Corsten, Hans: *Handbuch Produktions- und Logistikmanagement in Wertschöpfungsnetzwerken*, De Gruyter, S. 646–675.
- Molenda, Paul; Mezger, Tizian; Oechsle, Oliver; Koller, Jan; Döpfer, Frank (2020): Backlog-Sequencing: A Comparison between Workload Control and ConWIP using a simulation approach, in: *Procedia CIRP*, Jg. 93, S. 664–669. 10.1016/j.procir.2020.04.097.
- Niemann, Jörg; Stöhr, Carsten; Reich, Bedendikt (2021): *Lean Six Sigma: Methoden zur Produktionsoptimierung*, Springer Berlin; Springer Vieweg. ISBN 978-3-662-63007-5.
- Nyhuis, Peter; Wiendahl, Hans-Peter (2012): *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*, Springer Vieweg. ISBN 978-3-540-92838-6.
- Olaitan, Oladipupo; Fragapane, Giuseppe; Alfnes, Erlend; Strandhagen, Jan Ola (2017a): A Nested Configuration of POLCA and Generic Kanban in a High Product Mix Manufacturing System, in: Lödding, Hermann; Riedel, Ralph; Thoben, Klaus-Dieter; Cieminski, Gregor von; Kiritsis, Dimitris: *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing*, Springer International Publishing, S. 518–526.
- Olaitan, Oladipupo; Yu, Quan; Alfnes, Erlend (2017b): Work In Process Control for a High Product Mix Manufacturing System, in: *Procedia CIRP*, Jg. 63, S. 277–282. 10.1016/j.procir.2017.03.352.

Onay, Anita; Stampfer, Christina; Missbauer, Hubert (2023): A behavioral perspective on workload control concepts: The influence of order release on operators' reaction behavior, in: *International Journal of Production Economics*, Jg. 264, S. 108956.

10.1016/j.ijpe.2023.108956.

Oosterman, Bas; Land, Martin; Gaalman, Gerard (2000): The influence of shop characteristics on workload control, in: *International Journal of Production Economics*, Jg. 68, Nr. 1, S. 107–119. 10.1016/S0925-5273(99)00141-3.

Page, Matthew J.; McKenzie, Joanne E.; Bossuyt, Patrick M.; Boutron, Isabelle; Hoffmann, Tammy C.; Mulrow, Cynthia D.; Shamseer, Larissa; Tetzlaff, Jennifer M.; Akl, Elie A.; Brennan, Sue E.; Chou, Roger; Glanville, Julie; Grimshaw, Jeremy M.; Hróbjartsson, Asbjørn; Lalu, Manoj M.; Li, Tianjing; Loder, Elizabeth W.; Mayo-Wilson, Evan; McDonald, Steve; McGuinness, Luke A.; Stewart, Lesley A.; Thomas, James; Tricco, Andrea C.; Welch, Vivian A.; Whiting, Penny; Moher, David (2021): The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews, in: *BMJ (Clinical research ed.)*, Jg. 372, n71. 10.1136/bmj.n71.

Pergher, Isaac; Frej, Eduarda Asfora; Roselli, Lucia Reis Peixoto; Almeida, Adiel Teixeira de (2020): Integrating simulation and FITradeoff method for scheduling rules selection in job-shop production systems, in: *International Journal of Production Economics*, Jg. 227, S. 107669. 10.1016/j.ijpe.2020.107669.

Ragazzini, Lorenzo; Negri, Elisa; Macchi, Marco (2021): A Digital Twin-based Predictive Strategy for Workload Control, in: *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 54, Nr. 1, S. 743–748. 10.1016/j.ifacol.2021.08.183.

Ramsauer (1997): *Dezentrale PPS-Systeme*, Gabler Verlag. ISBN 978-3-409-12231-3.

Roderick, Larry M.; Toland, Joel; Rodriguez, Francisco P. (1994): A simulation study of conwip versus MRP at Westinghouse, in: *Computers & Industrial Engineering*, Jg. 26, Nr. 2, S. 237–242. 10.1016/0360-8352(94)90058-2.

Roy, Debjit; Ravikumaran, Vasudha (2019): An extensive evaluation of CONWIP-card controlled and scheduled start time based production system designs, in: *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 50, S. 119–134. 10.1016/j.jmsy.2018.12.006.

Sagawa, Juliana Keiko; Oliveira, Allan Freitas; Mušič, Gašper; Land, Martin J.; Maluf, Arthur Sarro (2023): Smart workload input-output control of production systems: A proof of concept, in: *European Journal of Operational Research*, Jg. 309, Nr. 1, S. 286–305. 10.1016/j.ejor.2022.12.034.

- Schmidt, Matthias; Maier, Janine Tatjana; Härtel, Lasse (2019): Data based root cause analysis for improving logistic key performance indicators of a company's internal supply chain, in: *Procedia CIRP*, Jg. 86, S. 276–281. 10.1016/j.procir.2020.01.023.
- Schotten, Martin (1998): Aachener PPS-Modell, in: Luczak, Holger; Eversheim, Walter; Schotten, Martin: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*, Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, S. 9–28.
- Schuh, Günther (2014): *Enterprise-Integration: Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen*, Springer Vieweg. ISBN 9783642418914., <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1697229>.
- Schulte, Christof (2013): *Logistik: Wege zur Optimierung der Supply Chain*, Franz Vahlen. ISBN 9783800639960., <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/Doc?id=10716398>.
- sciencedirect.com (2024): Suchergebnisse Systematische Literaturrecherche, <https://www.sciencedirect.com/search?date=2014-2024&qs=%28KANBAN%20OR%20CONWIP%20OR%20COBACABANA%20OR%20LUMS%20COR%20OR%20POLCA%29%20AND%20Comparison>, abgerufen am: 13.08.2024.
- Silva, C.; Reis, V.; Morais, A.; Brilenkov, I.; Vaza, J.; Pinheiro, T.; Neves, M.; Henriques, M.; Varela, M. L.; Pereira, G.; Dias, L.; Fernandes, N. O.; Carmo-Silva, S. (2017): A comparison of production control systems in a flexible flow shop, in: *Procedia Manufacturing*, Jg. 13, S. 1090–1095. 10.1016/j.promfg.2017.09.169.
- Spearman, Mark L.; Woodruff, David L.; Hopp, Wallace J. (1990): CONWIP: a pull alternative to kanban, in: *International Journal of Production Research*, Jg. 28, Nr. 5, S. 879–894. 10.1080/00207549008942761.
- Suri, Rajan (2018): *<>: The production control system for high-mix, low-volume and custom products*, CRC Press. ISBN 9781351170765., <https://learning.oreilly.com/library/view/-/9781351170741/?ar>.
- Thommen, Jean-Paul; Achleitner, Ann-Kristin; Gilbert, Dirk Ulrich; Hachmeister, Dirk; Jarchow, Svenja; Kaiser, Gernot (2020): *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Gabler. ISBN 978-3-658-27245-6.

Thürer, Matthias; Stevenson (2016): Kartenbasierte Steuerungssysteme für eine
schlanke Arbeitsgestaltung, Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 978-3-658-12507-
3.

Thürer, Matthias; Stevenson, Mark; Protzman, Charles W. (2015): COBACABANA
(Control of Balance by Card Based Navigation): An alternative to kanban in the pure
flow shop?, in: International Journal of Production Economics, Jg. 166, S. 143–151.
10.1016/j.ijpe.2015.05.010.

Thürer, Matthias; Stevenson, Mark; Silva, Cristovao; Land, Martin J.; Fredendall,
Lawrence D. (2012): Workload Control and Order Release: A Lean Solution for Make-
to-Order Companies, in: Production and Operations Management, Jg. 21, Nr. 5, S.
939–953. 10.1111/j.1937-5956.2011.01307.x.

Wannewetsch, Helmut (2021): INTEGRIERTE MATERIALWIRTSCHAFT, LOGISTIK,
BESCHAFFUNG UND PRODUKTION: Supply chain im... zeitalter der digitalisierung,
MORGAN KAUFMANN. ISBN 978-3-662-61094-7.

Wenzel, Alexander; Welzel, Kira; Nyhuis, Peter (2024): Dos und Don'ts in der
Produktionslogistik, in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 119, Nr. 4, S.
240–245. 10.1515/zwf-2024-1037.

Woschank, M.; Dallasega, P.; Kapeller, J. A. (2020): The Impact of Planning
Granularity on Production Planning and Control Strategies in MTO: A Discrete Event
Simulation Study, in: Procedia Manufacturing, Jg. 51, S. 1502–1507.
10.1016/j.promfg.2020.10.209.

Yang, Taho; Hung, Yu-Hsiu; Huang, Kuan-Cheng (2019): A simulation study on
CONWIP System Design for Bicycle Chain Manufacturing, in: IFAC-PapersOnLine, Jg.
52, Nr. 13, S. 2477–2481. 10.1016/j.ifacol.2019.11.578.

Yuan, Mingze; Ma, Lin; Qu, Ting; Thürer, Matthias (2023): Shop floor dispatching with
variable urgent operations based on Workload Control: An assessment by simulation,
in: IET Collaborative Intelligent Manufacturing, Jg. 5, Nr. 3. 10.1049/cim2.12084.

Anhang

Gesamtübersicht statistische Auswertungen

```
GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\Verfahren allgemein.sav".
```

```
ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY Vefahren /STATISTICS=DESCRIPTIVES .
```

Verfahren allgemein

	Vefahren	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	COB	7	1902,77	16,53	6,25	1887,48	1918,07	1883,91
	CONWIP	7	1846,64	28,46	10,76	1820,31	1872,96	1812,69
	LUM	7	1800,20	21,48	8,12	1780,34	1820,07	1775,83
	POLCA	7	2201,23	63,07	23,84	2142,90	2259,56	2137,12
	Gesamt	28	1937,71	163,09	30,82	1874,47	2000,95	1775,83
wip	COB	7	2301,03	27,97	10,57	2275,16	2326,90	2264,24
	CONWIP	7	2292,34	42,94	16,23	2252,63	2332,05	2233,21
	LUM	7	2211,86	30,68	11,59	2183,48	2240,23	2178,98
	POLCA	7	2602,10	73,01	27,60	2534,57	2669,62	2536,42
	Gesamt	28	2351,83	157,74	29,81	2290,67	2412,99	2178,98
machine_utilization	COB	7	23,93	,19	,07	23,75	24,11	23,68
	CONWIP	7	23,95	,16	,06	23,80	24,10	23,73
	LUM	7	24,37	,12	,04	24,26	24,48	24,20
	POLCA	7	24,76	,32	,12	24,46	25,06	24,42
	Gesamt	28	24,25	,40	,08	24,10	24,41	23,68
on_time_delivery_rat	COB	7	83,79	2,68	1,01	81,31	86,27	79,49
	CONWIP	7	90,10	6,42	2,43	84,15	96,04	78,67
	LUM	7	96,19	,22	,08	95,99	96,39	95,91
	POLCA	7	96,38	,26	,10	96,14	96,62	95,91
	Gesamt	28	91,61	6,21	1,17	89,20	94,02	78,67

	Vefahren	Maximum
lead_time	COB	1926,46
	CONWIP	1884,26
	LUM	1833,72
	POLCA	2307,81
	Gesamt	2307,81
wip	COB	2333,63
	CONWIP	2349,59
	LUM	2268,71
	POLCA	2711,75
	Gesamt	2711,75
machine_utilization	COB	24,25
	CONWIP	24,19
	LUM	24,48
	POLCA	25,27
	Gesamt	25,27
on_time_delivery_rat	COB	86,77
	CONWIP	94,27
	LUM	96,42

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich
einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

Vefahren	Maximum
POLCA	96,64
Gesamt	96,64

II

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	685050,6	3	228350,2	165,39	,000
	Innerhalb Gruppen	33137,06	24	1380,71		
	Gesamt	718187,6	27			
wip	Zwischen Gruppen	618415,9	3	206138,6	92,67	,000
	Innerhalb Gruppen	53386,16	24	2224,42		
	Gesamt	671802,0	27			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	3,27	3	1,09	24,18	,000
	Innerhalb Gruppen	1,08	24	,05		
	Gesamt	4,36	27			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	750,25	3	250,08	20,60	,000
	Innerhalb Gruppen	291,41	24	12,14		
	Gesamt	1041,66	27			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\Verfahren
allgemein.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\POLCA Look
Ahead.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY LookAhead
/STATISTICS=DESCRIPTIVES .

Polca Look Ahead

	LookAhead	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	1000	7	2178,48	25,43	9,61	2154,96	2202,01	2146,50
	3000	7	2201,23	63,07	23,84	2142,90	2259,56	2137,12
	5000	7	2221,54	110,46	41,75	2119,38	2323,70	2147,27
	Gesamt	21	2200,42	73,30	16,00	2167,05	2233,78	2137,12
wip	1000	7	2567,83	37,16	14,05	2533,46	2602,20	2519,32
	3000	7	2602,10	73,01	27,60	2534,57	2669,62	2536,42
	5000	7	2607,66	126,85	47,94	2490,34	2724,97	2519,13
	Gesamt	21	2592,53	84,65	18,47	2553,99	2631,06	2519,13
machine_utilization	1000	7	24,50	,14	,05	24,38	24,63	24,34
	3000	7	24,76	,32	,12	24,46	25,06	24,42
	5000	7	24,90	,34	,13	24,59	25,21	24,59
	Gesamt	21	24,72	,32	,07	24,58	24,87	24,34
on_time_delivery_rat	1000	7	94,66	,19	,07	94,48	94,83	94,36
	3000	7	96,38	,26	,10	96,14	96,62	95,91
	5000	7	97,37	,80	,30	96,63	98,10	95,65
	Gesamt	21	96,13	1,24	,27	95,57	96,70	94,36

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	LookAhead	Maximum
lead_time	1000	2219,97
	3000	2307,81
	5000	2451,48
	Gesamt	2451,48
wip	1000	2615,35
	3000	2711,75
	5000	2872,80
	Gesamt	2872,80
machine_utilization	1000	24,70
	3000	25,27
	5000	25,58
	Gesamt	25,58
on_time_delivery_rat	1000	94,96
	3000	96,64
	5000	97,85
	Gesamt	97,85

ii

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	6494,73	2	3247,37	,58	,571
	Innerhalb Gruppen	100962,6	18	5609,03		
	Gesamt	107457,3	20			
wip	Zwischen Gruppen	6514,50	2	3257,25	,43	,658
	Innerhalb Gruppen	136809,8	18	7600,54		
	Gesamt	143324,3	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,56	2	,28	3,56	,050
	Innerhalb Gruppen	1,43	18	,08		
	Gesamt	1,99	20			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	26,30	2	13,15	53,25	,000
	Innerhalb Gruppen	4,44	18	,25		
	Gesamt	30,74	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\POLCA Look Ahead.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\COBACABANA Worklimit.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY Limit /STATISTICS=DESCRIPTIVES .

COBACABANA Work Limit

	Limit	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	7200	7	1906,26	37,97	14,35	1871,14	1941,37	1856,79
	7500	7	1902,77	16,53	6,25	1887,48	1918,07	1883,91

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich
einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	Limit	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
	8000	7	1960,99	58,92	22,27	1906,50	2015,48	1878,79
	Gesamt	21	1923,34	47,98	10,47	1901,50	1945,18	1856,79
wip	7200	7	2302,10	42,21	15,95	2263,06	2341,13	2238,44
	7500	7	2301,03	27,97	10,57	2275,16	2326,90	2264,24
	8000	7	2358,95	56,99	21,54	2306,25	2411,66	2270,25
	Gesamt	21	2320,69	50,12	10,94	2297,88	2343,51	2238,44
machine_utilization	7200	7	23,91	,14	,05	23,78	24,04	23,79
	7500	7	23,93	,19	,07	23,75	24,11	23,68
	8000	7	23,98	,24	,09	23,75	24,20	23,53
	Gesamt	21	23,94	,19	,04	23,85	24,02	23,53
on_time_delivery_rat	7200	7	65,08	4,70	1,77	60,73	69,42	58,68
	7500	7	83,79	2,68	1,01	81,31	86,27	79,49
	8000	7	80,82	14,37	5,43	67,54	94,11	55,79
	Gesamt	21	76,56	11,89	2,60	71,15	81,98	55,79

	Limit	Maximum
lead_time	7200	1959,10
	7500	1926,46
	8000	2041,54
	Gesamt	2041,54
wip	7200	2365,00
	7500	2333,63
	8000	2442,24
	Gesamt	2442,24
machine_utilization	7200	24,16
	7500	24,25
	8000	24,26
	Gesamt	24,26
on_time_delivery_rat	7200	70,92
	7500	86,77
	8000	91,90
	Gesamt	91,90

□

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	14927,64	2	7463,82	4,32	,029
	Innerhalb Gruppen	31118,36	18	1728,80		
	Gesamt	46046,00	20			
wip	Zwischen Gruppen	15374,11	2	7687,05	3,97	,037
	Innerhalb Gruppen	34869,58	18	1937,20		
	Gesamt	50243,69	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,02	2	,01	,22	,806
	Innerhalb Gruppen	,70	18	,04		
	Gesamt	,71	20			

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich
einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
on_time_delivery_rat Zwischen Gruppen	1415,73	2	707,87	9,01	,002
Innerhalb Gruppen	1413,67	18	78,54		
Gesamt	2829,41	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\COBACABANA
Worklimit.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\COBACABANA Look
Ahead.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY LookAhead
/STATISTICS=DESCRIPTIVES .

COBACABANA Look Ahead

	LookAhead	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	1000	7	1905,81	24,83	9,38	1882,84	1928,77	1871,02
	3000	7	1902,77	16,53	6,25	1887,48	1918,07	1883,91
	5000	7	1960,99	58,92	22,27	1906,50	2015,48	1878,79
	Gesamt	21	1923,19	45,39	9,90	1902,53	1943,85	1871,02
wip	1000	7	2313,95	29,36	11,10	2286,80	2341,10	2268,88
	3000	7	2301,03	27,97	10,57	2275,16	2326,90	2264,24
	5000	7	2358,95	56,99	21,54	2306,25	2411,66	2270,25
	Gesamt	21	2324,64	45,99	10,04	2303,71	2345,58	2264,24
machine_utilization	1000	7	23,76	,13	,05	23,64	23,88	23,60
	3000	7	23,93	,19	,07	23,75	24,11	23,68
	5000	7	23,98	,24	,09	23,75	24,20	23,53
	Gesamt	21	23,89	,21	,05	23,79	23,98	23,53
on_time_delivery_rat	1000	7	69,88	3,40	1,28	66,73	73,02	63,72
	3000	7	83,79	2,68	1,01	81,31	86,27	79,49
	5000	7	80,82	14,37	5,43	67,54	94,11	55,79
	Gesamt	21	78,16	10,25	2,24	73,49	82,83	55,79

	LookAhead	Maximum
lead_time	1000	1948,63
	3000	1926,46
	5000	2041,54
	Gesamt	2041,54
wip	1000	2345,18
	3000	2333,63
	5000	2442,24
	Gesamt	2442,24
machine_utilization	1000	23,93
	3000	24,25
	5000	24,26
	Gesamt	24,26
on_time_delivery_rat	1000	73,20

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	LookAhead	Maximum
	3000	86,77
	5000	91,90
	Gesamt	91,90

□

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	15036,30	2	7518,15	5,17	,017
	Innerhalb Gruppen	26167,04	18	1453,72		
	Gesamt	41203,34	20			
wip	Zwischen Gruppen	12943,57	2	6471,78	3,97	,037
	Innerhalb Gruppen	29351,60	18	1630,64		
	Gesamt	42295,17	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,18	2	,09	2,43	,116
	Innerhalb Gruppen	,68	18	,04		
	Gesamt	,87	20			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	751,64	2	375,82	5,01	,019
	Innerhalb Gruppen	1350,68	18	75,04		
	Gesamt	2102,32	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\COBACABANA Look Ahead.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\LUMSCOR Worklimit.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY Limit /STATISTICS=DESCRIPTIVES .

LUMSCOR Work Limit

■

	Limit	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	7200	7	1804,27	69,24	26,17	1740,23	1868,30	1768,03
	7500	7	1800,20	21,48	8,12	1780,34	1820,07	1775,83
	8000	7	1834,11	13,35	5,05	1821,76	1846,46	1813,45
	Gesamt	21	1812,86	43,24	9,44	1793,18	1832,55	1768,03
wip	7200	7	2208,85	55,81	21,10	2157,23	2260,47	2177,73
	7500	7	2211,86	30,68	11,59	2183,48	2240,23	2178,98
	8000	7	2251,19	19,60	7,41	2233,07	2269,32	2227,62
	Gesamt	21	2223,97	41,51	9,06	2205,07	2242,86	2177,73
machine_utilization	7200	7	24,23	,22	,08	24,03	24,44	24,00
	7500	7	24,37	,12	,04	24,26	24,48	24,20
	8000	7	24,19	,10	,04	24,09	24,29	24,03
	Gesamt	21	24,27	,17	,04	24,19	24,34	24,00
on_time_delivery_rat	7200	7	96,06	,53	,20	95,57	96,55	94,87
	7500	7	96,19	,22	,08	95,99	96,39	95,91
	8000	7	96,25	,33	,13	95,95	96,56	95,61

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

Limit	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
					Untere Grenze	Obere Grenze	
Gesamt	21	96,17	,37	,08	96,00	96,34	94,87

	Limit	Maximum
lead_time	7200	1960,43
	7500	1833,72
	8000	1850,22
	Gesamt	1960,43
wip	7200	2333,86
	7500	2268,71
	8000	2291,38
	Gesamt	2333,86
machine_utilization	7200	24,60
	7500	24,48
	8000	24,33
	Gesamt	24,60
on_time_delivery_rat	7200	96,38
	7500	96,42
	8000	96,60
	Gesamt	96,60

□

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	4800,00	2	2400,00	1,33	,290
	Innerhalb Gruppen	32601,12	18	1811,17		
	Gesamt	37401,12	20			
wip	Zwischen Gruppen	7815,48	2	3907,74	2,64	,099
	Innerhalb Gruppen	26642,16	18	1480,12		
	Gesamt	34457,64	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,12	2	,06	2,56	,105
	Innerhalb Gruppen	,44	18	,02		
	Gesamt	,56	20			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	,13	2	,07	,46	,638
	Innerhalb Gruppen	2,64	18	,15		
	Gesamt	2,78	20			

```
SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\LUMSCOR
Worlimit.sav".
```

```
GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\LUMSCOR Look
Ahead.sav".
```

```
ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY LookAhead
/STATISTICS=DESCRIPTIVES .
```

■

LUMSCOR Look Ahead

LookAhead	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum	
					Untere Grenze	Obere Grenze		
lead_time	1000	7	1790,48	28,60	10,81	1764,03	1816,94	1764,24
	3000	7	1800,20	21,48	8,12	1780,34	1820,07	1775,83
	5000	7	1805,65	31,07	11,74	1776,92	1834,39	1775,80
	Gesamt	21	1798,78	26,74	5,83	1786,61	1810,95	1764,24
wip	1000	7	2205,07	35,04	13,25	2172,66	2237,48	2166,24
	3000	7	2211,86	30,68	11,59	2183,48	2240,23	2178,98
	5000	7	2217,84	51,54	19,48	2170,17	2265,51	2174,63
	Gesamt	21	2211,59	38,42	8,38	2194,10	2229,08	2166,24
machine_utilization	1000	7	,24	,00	,00	,24	,24	,24
	3000	7	,24	,00	,00	,24	,24	,24
	5000	7	,25	,00	,00	,24	,25	,24
	Gesamt	21	,24	,00	,00	,24	,24	,24
on_time_delivery_rat	1000	7	,94	,01	,00	,94	,95	,93
	3000	7	,96	,00	,00	,96	,96	,96
	5000	7	,98	,00	,00	,97	,98	,97
	Gesamt	21	,96	,01	,00	,95	,97	,93

LookAhead	Maximum	
lead_time	1000	1848,17
	3000	1833,72
	5000	1867,39
	Gesamt	1867,39
wip	1000	2274,85
	3000	2268,71
	5000	2316,87
	Gesamt	2316,87
machine_utilization	1000	,24
	3000	,24
	5000	,25
	Gesamt	,25
on_time_delivery_rat	1000	,94
	3000	,96
	5000	,98
	Gesamt	,98

II

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	826,91	2	413,46	,55	,585
	Innerhalb Gruppen	13469,76	18	748,32		
	Gesamt	14296,68	20			
wip	Zwischen Gruppen	571,48	2	285,74	,18	,839
	Innerhalb Gruppen	28952,43	18	1608,47		
	Gesamt	29523,91	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,00	2	6,54E-005	17,32	,000
	Innerhalb Gruppen	6,80E-005	18	3,78E-006		

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Gesamt	,00	20			
on_time_delivery_rat Zwischen Gruppen	,00	2	,00	157,41	,000
Innerhalb Gruppen	,00	18	1,33E-005		
Gesamt	,00	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\LUMSCOR Look Ahead.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\CONWIP Worklimit.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY Limit /STATISTICS=DESCRIPTIVES .

CONWIP Work Limit

	Limit	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	45000	7	1789,87	31,81	12,02	1760,45	1819,29	1757,87
	50000	7	1846,64	28,46	10,76	1820,31	1872,96	1812,69
	55000	7	1896,24	47,44	17,93	1852,36	1940,12	1856,04
	Gesamt	21	1844,25	56,61	12,35	1818,48	1870,02	1757,87
wip	45000	7	2216,07	38,50	14,55	2180,46	2251,67	2183,77
	50000	7	2292,34	42,94	16,23	2252,63	2332,05	2233,21
	55000	7	2352,89	63,11	23,85	2294,53	2411,26	2302,06
	Gesamt	21	2287,10	74,05	16,16	2253,39	2320,81	2183,77
machine_utilization	45000	7	23,87	,13	,05	23,76	23,99	23,71
	50000	7	23,95	,16	,06	23,80	24,10	23,73
	55000	7	24,00	,22	,08	23,80	24,21	23,67
	Gesamt	21	23,94	,17	,04	23,86	24,02	23,67
on_time_delivery_rat	45000	7	87,74	3,61	1,36	84,41	91,08	81,21
	50000	7	90,10	6,42	2,43	84,15	96,04	78,67
	55000	7	94,42	1,18	,45	93,32	95,51	92,24
	Gesamt	21	90,75	4,97	1,09	88,49	93,02	78,67

	Limit	Maximum
lead_time	45000	1856,91
	50000	1884,26
	55000	1991,93
	Gesamt	1991,93
wip	45000	2291,90
	50000	2349,59
	55000	2470,48
	Gesamt	2470,48
machine_utilization	45000	24,08
	50000	24,19
	55000	24,27
	Gesamt	24,27

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich
einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

	Limit	Maximum
on_time_delivery_rat	45000	91,12
	50000	94,27
	55000	95,39
Gesamt		95,39

II

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	39660,85	2	19830,42	14,61	,000
	Innerhalb Gruppen	24437,47	18	1357,64		
	Gesamt	64098,31	20			
wip	Zwischen Gruppen	65816,69	2	32908,34	13,51	,000
	Innerhalb Gruppen	43851,21	18	2436,18		
	Gesamt	109667,9	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,06	2	,03	,97	,399
	Innerhalb Gruppen	,54	18	,03		
	Gesamt	,60	20			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	160,30	2	80,15	4,32	,029
	Innerhalb Gruppen	334,20	18	18,57		
	Gesamt	494,50	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\CONWIP
Worklimit.sav".

GET FILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\CONWIP Look
Ahead.sav".

ONEWAY /VARIABLES= lead_time wip machine_utilization on_time_delivery_rate BY LookAhead
/STATISTICS=DESCRIPTIVES .

CONWIP Look Ahead

	LookAhead	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
						Untere Grenze	Obere Grenze	
lead_time	1000	7	1831,64	9,93	3,75	1822,46	1840,83	1820,67
	3000	7	1846,64	28,46	10,76	1820,31	1872,96	1812,69
	5000	7	1868,88	55,21	20,87	1817,81	1919,94	1810,51
	Gesamt	21	1849,05	37,85	8,26	1831,82	1866,28	1810,51
wip	1000	7	2274,87	23,94	9,05	2252,73	2297,01	2256,33
	3000	7	2292,34	42,94	16,23	2252,63	2332,05	2233,21
	5000	7	2309,49	73,03	27,60	2241,94	2377,03	2243,39
	Gesamt	21	2292,23	50,35	10,99	2269,32	2315,15	2233,21
machine_utilization	1000	7	23,65	,14	,05	23,53	23,78	23,52
	3000	7	23,95	,16	,06	23,80	24,10	23,73
	5000	7	24,15	,15	,06	24,02	24,29	23,92
	Gesamt	21	23,92	,25	,06	23,80	24,03	23,52
on_time_delivery_rat	1000	7	88,26	2,35	,89	86,08	90,43	83,07
	3000	7	90,10	6,42	2,43	84,15	96,04	78,67

Systematischer Vergleich verschiedener Produktionssteuerungsverfahren im Bereich einer mechanischen Fertigung mittels Discrete Event Simulation
Anhang

LookAhead	N	Mittelwert	Std. Abweichung	Standardfehler	95% Konfidenzintervall für Mittelwert		Minimum
					Untere Grenze	Obere Grenze	
5000	7	96,02	,70	,27	95,37	96,67	94,92
Gesamt	21	91,46	5,07	1,11	89,15	93,76	78,67

LookAhead	Maximum
lead_time	
1000	1847,22
3000	1884,26
5000	1948,94
Gesamt	1948,94
wip	
1000	2313,22
3000	2349,59
5000	2436,38
Gesamt	2436,38
machine_utilization	
1000	23,88
3000	24,19
5000	24,37
Gesamt	24,37
on_time_delivery_rat	
1000	89,96
3000	94,27
5000	96,81
Gesamt	96,81

II

		Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
lead_time	Zwischen Gruppen	4913,56	2	2456,78	1,86	,184
	Innerhalb Gruppen	23744,90	18	1319,16		
	Gesamt	28658,46	20			
wip	Zwischen Gruppen	4193,50	2	2096,75	,81	,460
	Innerhalb Gruppen	46502,44	18	2583,47		
	Gesamt	50695,94	20			
machine_utilization	Zwischen Gruppen	,88	2	,44	19,91	,000
	Innerhalb Gruppen	,40	18	,02		
	Gesamt	1,27	20			
on_time_delivery_rat	Zwischen Gruppen	230,36	2	115,18	7,31	,005
	Innerhalb Gruppen	283,67	18	15,76		
	Gesamt	514,03	20			

SAVE OUTFILE="C:\Users\micha\Documents\Masterarbeit\Daten\Auswertungen\CONWIP Look Ahead.sav".

Dokumentierung Simulationsmodell Fertigungssteuerungsverfahren

1. Input Daten:

- cobacabana_max_load.json: Für jede Arbeitsstation wird das Cobacabana Arbeitslimit bzw. WIP Obergrenze festgelegt
- control.json: Festlegen von:
 - Simulationsdauer
 - Steuerungsverfahren
 - Look-Ahead-Horizon (Zeitspanne für die Aufträge vorgezogen werden dürfen)
 - Anzahl Wiederholungen
 - Update_frequency (Zeit zwischen Informationsupdates der Stationen)
 - Customer_order_mode (in diesem Modell nur deterministisch, in der Originalversion auch stochastische Orders)
- conwip.json: Festlegen der WIP Grenze für das Gesamtsystem
- polca_cards.json: Festlegen der POLCA-Karten:
 - Source: Startpool des Zwischenproduktes
 - Target: Zielpool des Zwischenproduktes
 - Number_of_cards: Anzahl von Karten
- pp.json: Festlegen der Produktionsaufträge mit:
 - order_size: Größe des Auftrages
 - product_id: zu fertigendes Teil des Auftrages
 - planned_start: geplanter Startzeitpunkt
 - planned_end: geplanter Endzeitpunkt
- workers.json: Festlegen der Worker/des Personals mit:
 - competences: Liste von Pools auf die der Worker fähig ist
- wp.json: Festlegen der Produktionssequenz für jedes Teil:
 - product_sequence: Liste der Abfolge von Maschinen
 - working_time_one_product: Liste der Bearbeitungszeiten pro Stk. je Station
 - setup_time: Liste der Rüstzeiten je Station
- ws.json: Festlegen der Maschinendaten:
 - pos: Position der Maschinen für Visualisierung der Simulation
 - MTBF: durchschnittliche Zeit zwischen Ausfällen
 - MTR: durchschnittliche Zeit zur Behebung des Ausfalles
 - pool: Maschinenpool, dem die Maschine zugehört

2. Simulationsmodell:

- data.py: Einlesen der Inputdaten
- plant.py: Erzeugen einer Plant mit:
 - Attributen abgeleitet aus control.json
 - Erzeugung von Maschinen und zugehörigen Poolobjekten abgeleitet aus ws.json
 - Erzeugung von Orders abgeleitet aus pp.json
 - Erzeugung von Polca Karten abgeleitet aus polca_cards.json, wenn Verfahren Polca
 - Erzeugung von Worker mit zugehörigen Fähigkeiten abgeleitet aus workers.json
 - Erzeugung eines Production Planners
- order.py: Erzeugen eines Auftrages mit:
 - Attributen abgeleitet aus pp.json
 - Attributen abgeleitet aus wp.json
 - Attribut order.order_product_sequence zur tatsächlichen Maschinensequenz der Order (kann durch Parallelstationen unterschiedlich für gleiches Produkt sein)
 - Attribute zur Feststellung der noch übrigen Maschinen- und Poolsequenz sowie restliche Auftragsgröße
 - Attribute für Zeitaufzeichnungen
 - Attribute für Polca Sources und Targets der Order
 - Methoden start_setup, start_production: Speichern der Startzeiten
 - Methoden finished_setup, finished_production: Speichern der Endzeiten
 - Methode remaining_production_time: Berechnen der verbleibenden Auftragszeit (Summe und Liste je Maschine)
 - Methode remaining_production_time_aggregated: Berechnen der verbleibenden Auftragszeiten je Maschine nach Lumscor-Regel (je später Maschine in Sequenz, desto stärker wird deren Zeit reduziert)
 - Methode produced_times: Berechnen der Zeit die Order bereits in Arbeit war
 - Methode get_pool_sequence: Erzeugen der Poolsequenz anhand der Maschinensequenz
 - Methode animation_objects: Festlegen Visualisierungseinstellungen

- machine.py: Erzeugen einer Maschine mit:
 - Attributen abgeleitet aus ws.json
 - Attribut cob_max_load
 - Queues von Aufträgen und Polca Karten vor Station
 - Attribute für momentanen Arbeitszustand der Maschine
 - Attribute für momentanen Störungsstatus der Maschine
 - Attribute für momentanen Personalstatus der Maschine
 - Attribute zur Zeiteinspeicherung

 - Process: solange keine Orders, passiviere Maschine, Aufzeichnen von Idle Times, wenn Polca: sortiere Aufträge um Blockierungen zu vermeiden, erster Auftrag in Queue vor Station wird auf Maschine gegeben, wenn Polca: warte solange bis Karte verfügbar und prüfe in Intervall von 20 time units wenn wartend, prüfe ob Mitarbeiter verfügbar, prüfe in Intervall von 500 time units wenn wartend, Setup, Work, Freigeben des Workers, Freigeben der Order sofern Maschine letzte Station, mögliche Störung der Maschine beheben

 - Methode get_next_mach_id: gibt nächste Maschine der Order zurück
 - Methode get_right_polca_card: gibt richtige Polca Karte zurück
 - Methode get_remaining_time: gibt verbleibende Zeit auf Maschine zurück
 - Methode get_time_in_production: gibt Zeit seit Produktionsstart zurück
 - Methode cardSort: sortiert die Aufträge vor der Station, sodass Aufträge für die Polca-Karten verfügbar sind vorgezogen werden
 - Methode get_worker: prüft, ob es einen Worker im Pool gibt, der anwesend ist (attendance_probability 40%), fähig auf dieser Maschine und momentan nicht auf anderer Maschine ist

- polca_card.py: Erzeugen einer Polca Karte
- pool.py: Erzeugen eines Maschinenpools (mit identen Maschinen)
- production_planner.py: Klasse zur Organisation der Produktionsabläufe mit:
 - Attributen zu Backlog (Orders sortiert nach planned_start)
 - Attributen abgeleitet aus control.json
 - Attributen zur WIP Dokumentierung
 - Attribut periodic_time_interval_lumscor für lumscor Bedingung 1

- Process: Ausführen von `update_wip_level` und somit `release_orders`,
`Update_Frequency` abwarten, wenn `Lumscor`, dann auch Ausführen `periodic
release` und warten der `UpdateFrequency periodic_time_interval_lumscor`
- Methode `release_orders`: Wenn `planned_start-look_ahead_horizon` erreicht,
prüfe ob Conidtions zur Einlastung der Order erfüllt, wenn ja, prüfe welche
Maschine der Parallelstation bzw. des Pools am wenigsten ausgelastet ist und
mache diese zur ersten Maschine der Sequenz, führe `WIP Updates` durch,
entferne Order aus Backlog, füge sie zu den `released orders` hinzu und laste sie
auf der ersten Maschine ein
- Methode `check_parallel_station`: sucht jene Maschine im Pool mit geringstem
`direct_wip` und passt die Order Sequenz dementsprechend an
- Methode `periodic_release`: ident zur Methode `release_orders`, wobei hier nur in
den periodischen Intervallen die `Lumscor` Bedingung 1 geprüft wird
- Methode `started_task`: beginnt den Task
- Methode `finished_task`: beendet den Task, sucht nach nächster Maschine, auch
wieder unter Verwendung von `check_parallel_station` und lastet Auftrag dort ein
- Methoden `started_setup_for_task` und `finished_setup_for_task`: Abspeichern der
Zeiten für die betreffende Order
- Methoden `check_cobacabana_condition`, `check_polca_condition`,
`check_lumscor_condtion`, `check_lumscor_condition2`: Überprüfen auf Regeln
des jeweiligen Steuerungsverfahrens, wenn erfüllt dürfen Orders eingelastet
werden
- Methode `getCardNumber`, Methode `getOrderNumber`: notwendig für den
Vergleich zur Feststellung ob `Polca Condition` erfüllt
- Methode `priority_sort`: Sortiert Aufträge vor Maschine nach nächstem
`plannend_end`
- Methode `add_wip_to_machs`: Durch Einlastung eines Auftrages wird `WIP` auf
allen Maschinen der Sequenz erhöht, wenn Parallelstationen enthalten sind,
wird der zukünftige `WIP` um den Faktor Anzahl der parallelen Stationen reduziert
- Methode `get_parallel(mach_id)`: Gibt Anzahl und Liste von Maschinen zurück die
im selben Pool bzw. parallel zu `mach_id` sind
- Methode `open_wip_level`: Berechnet offenen `WIP` in Zeiteinheiten, betrachtet
werden dabei verbleibende Zeiten, Aufträge in der Warteschleife und Aufträge in
Bearbeitung

- Methode `direct_open_wip_level`: Berechnet offenen WIP in Zeiteinheiten, betrachtet hier aber nur die Aufträge, die auf der Maschine gerade bearbeitet werden oder vor dieser in der Warteschleife sind
- Methode `current_wip_level`: Berechnet offenen WIP in Stück gesamt
- Methode `update_wip_level`: Wird nach jedem Ablauf der Update Frequency aufgerufen, WIP-Attribute werden auf aktuellen Stand überschrieben und `release_orders` aufgerufen
- Methode `document_wip_level`: Dokumentiert den aktuellen WIP für die Auswertung des Mean WIP in `run_sim`
- Methode `check_machine_failure`: Maschine geht in Störungszustand über, wenn errechnete Wahrscheinlichkeiten für MTBF größer als Zufallszahl

- `worker.py`: Erzeugung eines Worker Objektes mit:
 - Attributen, die angeben ob und auf welcher Maschine worker gerade aktiv ist
 - Methode `worker_is_able(mach_id)`: Stellt fest, ob worker competences auf `mach_id` hat
 - Methode `change_worker_status`: Ändert Attribut `active` des Workers auf `true`, wenn für einen Auftrag herangezogen bzw. `false` wenn Task auf Maschine fertiggestellt ist

- `test_animation.py`: Klasse zum Testen der Animation

- `update_frequency.py`: Erzeugen eines Update-Frequenz Objektes:
 - Attribute zur Unterscheidung ob Frequency für Documentation, Periodic Release oder normalem Release bzw. `Update_wip_level`
 - Process: Anhalten der Prozesse für die entsprechende Dauer

- `run_sim.py`:
 - diverse Klassen zur Einstellung der Animationen von Orders, Maschinen und Workers
 - Erzeugung eines Environments und einer Plant
 - Durchführen der Animationsklassen nach gewünschtem Schema
 - Aufsummieren der gesamten Durchlaufzeit und Anzahl von fertiggestellten Aufträgen, Division ergibt Mean Lead Time
 - Berechnen Mean WIP

- Berechnen Mean Machine Utilization anhand der Idle Time
- Berechnen der Delivery Rate anhand der Orders in time/Orders insgesamt
- Schreiben der Werte in zugehörige Zeile in CSV Datei

3. Output Daten

- Als CSV Dateien von run_sim erzeugt
- Benennung: kpis + Name Steuerungsverfahren + Update Frequency.csv im Ordner
FSM/output_data