



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

## Diplomarbeit

# Ein Konzept für die rollierende Feinplanung und - steuerung der Rohbaufertigung eines produzierenden Unternehmens in der Schienenfahrzeugindustrie

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

## Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund**

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

**Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Fabian Holly**

(E330 Institut für Managementwissenschaften, Bereich: Betriebstechnik und Systemplanung,  
Fraunhofer Austria Research GmbH)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

**Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften**

von

**Martin Heiß, BSc**

01525866 (066482)

Rainfeld, im Juli 2022

---

Martin Heiß





TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

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

## **Diplomarbeit**

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Rainfeld, im Juli 2022

---

Martin Heiß

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich bei der Anfertigung und Ausarbeitung dieser Arbeit sowie während meines gesamten Studiums fachlich als auch persönlich unterstützt und motiviert haben.

Zunächst gebührt mein Dank meinen Eltern, die mir stets den nötigen Rückhalt gegeben haben und ohne die meine gesamte Ausbildung in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

Ebenso danke ich meiner Freundin und meinen Freunden, die mich in allen Situationen ermutigt und motiviert haben.

Ich möchte mich auch bei allen involvierten Kollegen und Kolleginnen bedanken, die mich tatkräftig unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinem inhaltlichen Betreuer Dr. Alexander Sunk, der diese Arbeit erst ermöglicht hat und stets einen konstruktiven Einsatz zeigte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Fabian Holly für die wissenschaftliche Betreuung, die aufgebrauchte Zeit und seine persönliche Unterstützung.

Ein Dankeschön auch an Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund für die Betreuung und Betrachtung meiner Arbeit.

## Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Konzept für die Feinplanung und -steuerung der Rohbaufertigung eines geplanten Produktionssystems erstellt, um den Produktionsablauf zu optimieren. Dadurch wird eine Verbesserung hinsichtlich Bestände, Durchlaufzeiten, Durchsatz, Kapazität sowie Übersichtlichkeit ermöglicht.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit beinhaltet eine umfassende Literaturrecherche für das Fachgebiet der Produktionsplanung und -steuerung. Weiters werden grundlegende Zusammenhänge und Begrifflichkeiten der Fertigungsplanung und -steuerung dargelegt.

Im nachfolgenden Praxisteil wird die derzeitige Situation der Rohbauproduktion des Unternehmens abgebildet, um daraus Erkenntnisse und Potentiale zu erkennen.

Anschließend wird der existierende Lösungsansatz beschrieben, um die Erkenntnisse der Probleme zu adressieren und die Potentiale zu nützen. Daraufhin wird ein allgemeines Konzept für den Rohbau in der Schienenfahrzeugindustrie erstellt das wiederum anhand des betrachteten Unternehmens nähergebracht wird. Zielwertströme werden dargestellt und erläutert. Abschließend wird ein Ablauf der Planung dargelegt sowie die Zusammenführung von zwei einzeln betrachteten und geplanten Projekten in einem Plan dargestellt, um die gegenseitige Beeinflussung an den einzelnen Produktionsplätzen sichtbar zu machen, da dies bei Problemen entscheidend ist, um richtig und schnell gegenzusteuern.

Ziel dieser Arbeit ist ein Konzept für eine optimale Feinplanung und Feinsteuerung im Rohbau eines Schienenfahrzeugunternehmens, um möglichst effizient zu produzieren. Das Ergebnis der Umsetzung des Konzepts, ist eine Programminstanz des Programms Opcenter APS in der alle Prozesse bis zum fertig zusammengebauten Wagenkasten mehrerer Projekte im Rohbau geplant, betrachtet und umgeplant werden können und den festgelegten Anforderungen der Feinplanung und Feinsteuerung entspricht.

Am Schluss der Arbeit werden die Ergebnisse betrachtet, wesentliche Erkenntnisse diskutiert und Ansätze weiterer Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt.

## Abstract

As part of this work, a concept for the detailed planning and control of the body shell production of a planned production system is created to optimize the production process. This enables an improvement in terms of inventories, throughput times, throughput, capacity, and clarity.

The first part of the present work includes a comprehensive literature research for the field of production planning and control. Furthermore, basic relationships and concepts of production planning and control are presented.

In the following practical part, the current situation of the company's body shell production is shown to identify insights and potential.

The existing solution is then described to address the findings of the problems and to use the potential. A general concept for body shell construction in the rail vehicle industry is then drawn up, which in turn is explained using the company under consideration. Target value streams are presented and explained. Finally, a planning process is presented and the merging of two individually considered and planned projects in one plan is shown to make the mutual influence on the individual production sites visible, as this is crucial in the event of problems to counteract them correctly and quickly.

The aim of this work is a concept for optimal detailed planning and fine control in the body shop of a rail vehicle company to produce as efficiently as possible. The result of the implementation of the concept is a program instance of the Opcenter APS program in which all processes can be planned, viewed, and rescheduled up to the fully assembled car body of several projects in shell construction, which corresponds to the specified requirements of detailed planning and fine control.

At the end of the work, the results are considered, essential findings are discussed and approaches to further options for action are shown.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
1.1	Einführung und Motivation .....	3
1.2	Ausgangssituation und Problemstellung .....	3
1.3	Zielsetzung .....	4
1.4	Methodik und Struktur der Arbeit .....	5
2	Theoretische Grundlagen .....	7
2.1	Produktionsplanung und -steuerung .....	7
2.1.1	Einordnung und Begriffsbestimmung .....	7
2.1.2	Wertstrommethode und Modellbildung .....	9
2.1.3	Produktionsoptimierung und Zielkonflikte .....	11
2.1.4	Logistische Zielgrößen und Kennzahlen .....	17
2.2	Feinplanung und -steuerung .....	29
2.2.1	Das Modell der Fertigungssteuerung .....	29
2.2.2	Auftragserzeugung .....	30
2.2.3	Auftragsfreigabe .....	31
2.2.4	Kapazitätssteuerung .....	32
2.2.5	Reihenfolgebildung .....	33
2.2.6	Produktionssteuerung .....	35
2.2.7	Rückmeldeprozess .....	39
3	Darstellung des IST-Zustandes .....	40
3.1	Beschreibung des betrachteten Unternehmens .....	40
3.1.1	Fahrzeugproduktion .....	40
3.1.2	Fertigungsabläufe (Wertströme im Alu-Rohbau) .....	44
3.2	IST-Wertstrom der Alu-Rohbaufertigung mit Fokus auf die Informationswege der Produktionsplanung und -steuerung .....	45
3.3	Randbedingungen und Anforderungen an die Feinsteuerung .....	54
3.4	Erkenntnisgewinn und Potentiale .....	56
4	State-of-the-Art .....	60
4.1	Existierende Lösungsansätze im Bereich der Produktionssteuerung .....	60
4.2	Forschungsbedarf und Abgrenzung .....	66
4.3	Fazit .....	68

---

5	Erstellung eines Konzeptes zur Umsetzung der Feinsteuerung.....	70
5.1	Implementierungsmöglichkeiten einer Feinplanung und -steuerung im Alu-Rohbau.....	70
5.2	Darstellung und Beschreibung der Feinplanung und -steuerung im Ziel-Wertstrom.....	75
5.3	Ansatz zur Feinsteuerung mit einem Feinplanungstool.....	81
6	Evaluierung und Ergebnisse .....	88
6.1	Darstellung der Ergebnisse .....	88
6.2	Verifizierung und Validierung.....	88
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	92
7.1	Kritische Würdigung der Arbeit.....	92
7.2	Ausblick für Umsetzung.....	93
8	Abbildungsverzeichnis .....	94
9	Formelverzeichnis.....	95
10	Tabellenverzeichnis .....	96
11	Abkürzungsverzeichnis.....	97
12	Literaturverzeichnis.....	98
13	Anhang .....	100

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung und Motivation

Produzierende Unternehmen stehen unter globalem Wettbewerbsdruck, die Digitalisierung dringt in jeden Unternehmensbereich vor und Kunden erwarten eine immer größer werdende Variantenvielfalt der Produkte. All diese Aspekte und viele weitere erhöhen zunehmend die Komplexität in der Produktion. (H.-P. Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 5)

Um dem Wettbewerbsdruck und der aktuellen komplexen Marktsituation standzuhalten, haben die genauen Kundenanforderungen und eine schnelle Lieferung mit hoher Termintreue hohe Prioritäten. Die Häufigkeit sowie Geschwindigkeit der Veränderungen im Fertigungsumfeld nimmt permanent zu und führt oftmals zu Ineffizienzen und Kapazitätsproblemen in der Produktion. Dieser Druck und der stetige Wandel zwingt Unternehmen dazu die Produktion zu optimieren und Abläufe zu verbessern, um eine pünktliche und fehlerfreie Lieferung zu ermöglichen. Hier ist der Einsatz von Softwareanwendungen zur Feinplanung der Prozesse im Produktionsdurchlauf und damit eine Abbildung der Produktion in digitaler Form ein unumgänglicher Schritt, um die geforderte Wandlungsfähigkeit zu gewährleisten. Dies führt zu einer realitäts- und zeitnahen Planung, um rasch die richtigen Entscheidungen bei auftretenden Störungen oder Problemen treffen zu können und einen sicheren und bestandsarmen Durchlauf zu ermöglichen. Viele Unternehmen streben danach die Produktionsprozesse durch IT-Unterstützung zu verbessern um in Richtung der viel verwendeten Begriffe „Industrie 4.0“, „Smart Factory“ oder „Digital Factory“ zu gehen. (Kletti & Deisenroth, 2019, S. 1–3)

## 1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Das betrachtete Unternehmen produziert verschiedenste Arten von Schienenfahrzeugen. Die Produktionsbreite umfasst Straßenbahnen, Metros sowie Reisezugwägen. Die Produktionstiefe erstreckt sich von der Fertigung einzelner Komponenten, dem folgenden Zusammenbau des Rohbaus über die Oberflächenbehandlung und die Montageprozesse bis hin zur statischen Inbetriebnahme. Einzelne Projekte können sich in der Produktionstiefe unterscheiden.

Aufgrund einer Umstrukturierung der Fertigung, ausgelöst durch die Änderung der Auftragslage, werden auch die Fertigungsprinzipien angepasst, um alle Aufträge innerhalb der vorgegebenen Zeit produzieren zu können. Um bei den neu zugewiesenen Produktionsflächen die Flächenproduktivität zu erhöhen und die durchschnittlichen

Durchlaufzeiten sowie Bestände zu minimieren, ist eine Optimierung der Prozesse notwendig.

Eine detailliertere Planung und Steuerung in der Produktion ist zunehmend unumgänglich, um die Durchlaufzeiten stetig zu verringern und dabei unter Belastungsabgleich der Fertigungsbereiche die Endtermine einzuhalten. Darüber hinaus wird aktuell das Fertigungskonzept im Rohbau überarbeitet, das gegenüber heute zwangsweise kürzere Durchlaufzeiten erfordert. Daraus ergeben sich für den Standort neuartige Anforderungen an die hallen- und bereichsübergreifende Feinplanung und -steuerung.

In der Rohbaufertigung werden Maschinen und Stellplätze von mehreren Projekten in Anspruch genommen. Teile mehrerer Projekte müssen auf gleichen Maschinen gefertigt werden. Eine Multiprojektplanung über alle Ressourcen ist nicht vorhanden.

Die Rohbaufertigung wird aktuell anhand von projektspezifischen Netzplänen/Auftragsnetzen mit Start- und Endterminen pro Projekt einzeln grob geplant und in einem wöchentlichen Abstimmungstermin fortgeschrieben. Die Feinsteuerung der Tätigkeiten an einzelnen Arbeitsplätzen mit projektspezifischen Abhängigkeiten und Überlagerungen wird von den Meistern bzw. Vorarbeitern der Fertigung in Abstimmung mit der Rohbauleitung durchgeführt. Der tatsächliche IST-Fortschritt wird täglich bzw. wöchentlich rückgemeldet. Die Neugestaltung des aktuellen Fertigungskonzepts der Rohbaufertigung lässt eine Feinsteuerung nach aktuellem Stand jedoch nicht zu. Als Grundlage dient eine existierende Simulationsstudie und Analysen und Konzepte des Materialflusses der Fertigungsstrukturen für die Restrukturierung des physischen Umbaus.

### 1.3 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist es, an dem beschriebenen Handlungsbedarf anzusetzen und für das bereits ausgelegte zukünftige Alu-Rohbau Fertigungskonzept des Unternehmens ein Gesamtkonzept des Rohbaus für die Fertigungsfeinsteuerung zu erstellen. Weiters sind alle Informationsflüsse des Rohbaus darzustellen, um die prognostizierten Durchlaufzeiten des zukünftigen Alu-Rohbaus zu ermöglichen.

Die IST-Fertigungsplanung und -steuerung im dynamischen Produktionsumfeld soll analysiert werden, um in weiterer Folge mögliche Verbesserungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Das Hauptaugenmerk der Analysen wird auf die elementaren Kennzahlen der Produktion gelegt - Durchlaufzeiten und Termintreue sowie Bestände, Pufferflächen und gegebenenfalls Maschinenauslastungen.

Wie muss daher die Fertigungsfeinsteuerung im Rohbau zukünftig erfolgen, um das vorhandene Layout realisieren zu können und wie muss diese systemseitig abgebildet werden? Aus dem Konzept der Feinsteuerung sollen Handlungsempfehlungen hinsichtlich Arbeitsvorbereitung, Produktionsplanung, Produktionslogistik und Qualitätskontrolle abgeleitet werden. Da der Umfang dieser Arbeit beschränkt ist, wird die Arbeit von den Ergebnissen der Fabrikplanung abgegrenzt. Die Umsetzungsbegleitung sowie die monetäre Bewertung der Maßnahmen sind ebenfalls nicht Teil der Arbeit.

Aus dieser Zielsetzung lässt sich folgende zentrale Forschungsfrage ableiten:

*„Wie muss ein Konzept für die Fertigungsfeinplanung und -steuerung erstellt und umgesetzt werden, um die prognostizierten Durchlaufzeiten aus dem Simulationsmodell zu ermöglichen?“*

Folgende Unterziele lassen sich definieren:

- Welche IST-Informationsflüsse und -ketten gibt es und in welchen Abhängigkeiten mit welchen Regelkreisen und Häufigkeiten finden diese statt?
- Wie kann ein entwickeltes Soll-Konzept im Terminplan umgesetzt werden?
- Wie muss ein Planungszyklus im Soll-Konzept ablaufen?
- Kann ein rollierender Feinplanungszyklus für die Auftragserzeugung und -freigabe für Wagenkästen eingesetzt werden?
- Wie muss das Einlasten eines Auftrags in die Fertigung zukünftig ablaufen?
- Gibt es intelligente Belegungsstrategien sowie Losgrößenplanungen bei Überlagerung von Projekten?

## 1.4 Methodik und Struktur der Arbeit

Die methodische Vorgehensweise spiegelt sich in den sieben thematischen Kapiteln wider (siehe Abbildung 1).

Im ersten Kapitel wird eine Einführung in das behandelte Thema gegeben und ein Überblick der zugrundeliegenden Ausgangssituation und Problemstellung vermittelt. Danach wird die Zielsetzung definiert sowie die Methodik und Struktur der Arbeit beschrieben.

Das zweite Kapitel umfasst die theoretischen Grundlagen, die zum Verständnis der weiteren Kapitel hilfreich sind und ist das Ergebnis einer umfassenden Literaturrecherche. Da die Arbeit dem Forschungsbereich der Produktionsplanung und -steuerung zuzuordnen ist, werden in diesem Kapitel die für diesen Bereich wichtigen Begrifflichkeiten und Zusammenhänge erläutert, zusätzlich wird hier auch auf den

Teilbereich der Feinplanung und -steuerung näher eingegangen. Ziel dieses theoretischen Teils ist es dem Leser ein Fundament an Fachwissen bereitzustellen, das im darauffolgenden Praxisteil benötigt wird. Es werden verschiedene Planungs- und Steuerungsmöglichkeiten vorgestellt.

Kapitel drei gibt einen Überblick über die Produktion in dem betrachteten Unternehmen und behandelt den aktuellen Stand in der Rohbaufertigung mit Fokus auf die Informations- und Kommunikationswege sowie sämtliche miteinhergehende Probleme.

Im folgenden vierten Kapitel wird der momentane Stand der Technik für diesen Bereich aufgezeigt und mögliche optimale Lösungsansätze, für die davor in Kapitel drei erkannten Probleme, beschrieben. Um im nächsten Kapitel fünf ein Szenario zu erstellen welches mit den vorhandenen Möglichkeiten des Unternehmens umgesetzt werden kann, um in Richtung einer zukunftsfiten Feinplanung zu gehen.

Danach werden die Ergebnisse evaluiert und durch Methoden der Verifikation und Validierung überprüft. Das abschließende Kapitel sieben beinhaltet eine Zusammenfassung und kritische Würdigung der Arbeit, einen kurzen Ausblick auf Weiterentwicklung und mögliche Wege das Erarbeitete umzusetzen.

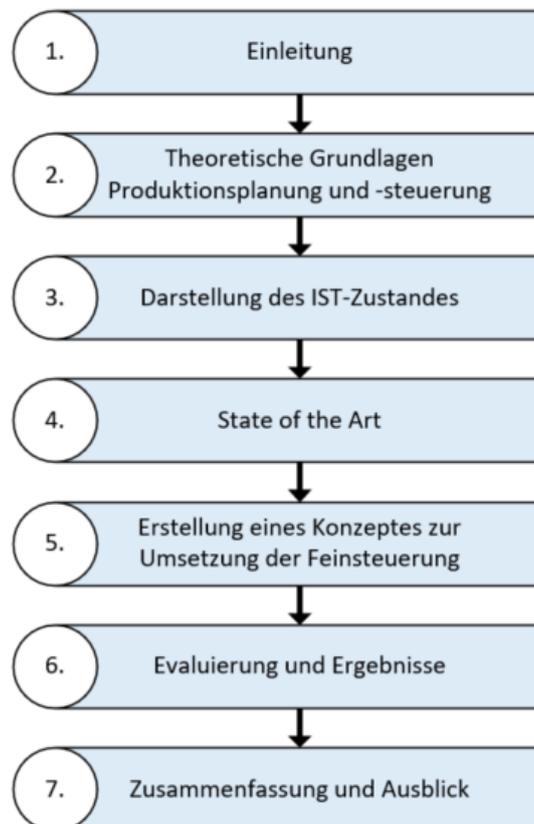


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

## 2 Theoretische Grundlagen

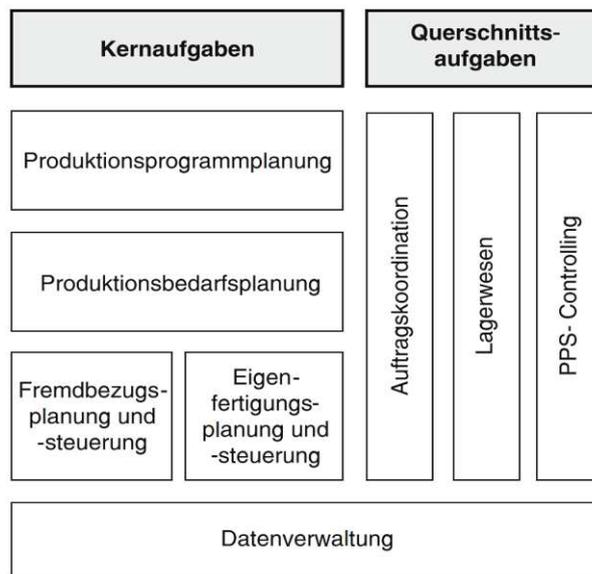
### 2.1 Produktionsplanung und -steuerung

Um etwas produzieren zu können müssen sich Personal, Material und Maschinen richtig bewegen. Dazu sind Informationen notwendig, die bestimmen was, wann und wo zu tun ist. Der Informationsfluss bestimmt die Erfassung, Sammlung, Verarbeitung, Speicherung und Verteilung von Daten und Anweisungen zur Planung und Steuerung der Produktion, um Aufträge abwickeln zu können. Mit entsprechenden Produktionsplänen betreibt und steuert die Produktionslogistik produzierende Unternehmen. (Erlach, 2020, S. 6)

#### 2.1.1 Einordnung und Begriffsbestimmung

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist dafür verantwortlich Produktions- und Fertigungsabläufe zu planen und zu realisieren damit vorgegebene Produktionsziele erreicht werden. Für den Produktionsprozess bestehender Produktionssysteme und -kapazitäten sind räumliche zeitliche und mengenmäßige Dispositionsentscheidungen zu treffen. In der wissenschaftlichen Literatur besteht kein Konsens über eine einheitliche theoretische Abfolge der einzelnen Schritte der PPS. Die Benennung der einzelnen Schritte ist oft unterschiedlich da die Aufteilung oftmals in verschiedenen Detaillierungsgraden erfolgt. Ein Autorenteam hat dies tabellarisch erfasst und systematisch gegenübergestellt. Die PPS ist der Kern eines jeden produzierenden Unternehmens und teilt sich in die Produktionsplanung und die Produktionssteuerung. Die Produktionsplanung plant Abläufe mittel- bis kurzfristig voraus und die Produktionssteuerung gibt Aufträge frei und steuert diese. In dieser Arbeit wird vor allem auf das Aachener PPS-Modell Bezug genommen da dieses zur Gestaltung der PPS im deutschsprachigen Raum weitverbreitet ist. (Meudt et al., 2017)

Das Aachener PPS-Modell gibt einen Überblick über die Aufgaben der PPS. Die Kernaufgaben gliedern sich in Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung sowie die Planung und Steuerung von Fremdbezug und Eigenfertigung. Die Querschnittsaufgaben der PPS sind die Auftragskoordination über verschiedene Unternehmensbereiche, das Lagerwesen, um die Lagergüter bereitzustellen und das PPS-Controlling zum Messen der logischen Zielerreichung. (Lödding, 2016, S. 7)



**Abbildung 2: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells (Lödding, 2016, S. 6)**

Der Eigenfertigungsplanung und -steuerung werden Aufgaben wie die Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Reihenfolgeplanung und Verfügbarkeitsprüfung zugeordnet. Von Lödding wurde ein Modell zur Abbildung der Steuerung entwickelt, welches sich hauptsächlich auf die Eigenfertigungsplanung und -steuerung konzentriert. Die Bedeutung der Fertigungssteuerung für die logistische Zielerreichung ist sehr hoch. Der Einfluss auf die Zielgrößen wird in Kapitel 2.2.1 näher behandelt. (Lödding, 2016, S. 7)

Im Zentrum der Produktionsplanung und -steuerung steht die Beplanung der Ressourcen und der Produktionsprozesse und das nicht mehr nur im innerbetrieblichen Rahmen, sondern über die gesamte Wertschöpfungskette vom Lieferanten bis zum Endkunden. Eine Orientierung am Wertstrom fand bereits am Anfang des 20. Jahrhunderts statt. (Schuh, 2006, S. 4–5)

Die Produktions- bzw. Fertigungssteuerung wird in Theorie und Praxis oft unterschiedlich interpretiert darum sollen die Begriffe wie Planung, Steuerung und Disposition in diesem Kontext nochmals grundlegend definiert werden (Gudehus, 2012, S. 3):

Die Planung (planning) umfasst die Auswahl, Gestaltung sowie die Dimensionierung von Prozessen und Ressourcen zukünftiger Anforderungen.

Die Disposition (scheduling) beschreibt das mengenmäßige Aufteilen der Aufträge einschließlich ihrer terminierten Zuweisungen zu verfügbaren Ressourcen.

Die Steuerung (control) übernimmt den operativen Betrieb in der Produktion, regelt somit die Ausführung der in Menge, Inhalt und Termin vorgegebenen Aufträge während des Produktionsprozesses.

### 2.1.2 Wertstrommethode und Modellbildung

Die Wertstrommethode wurde in der Automobilbranche von der Firma Toyota entwickelt, um zielgerichtet Verbesserungen für die Leistungsfähigkeit einer Produktion zu entwickeln und schließlich anzuwenden. Durch methodische Ergänzungen und Variationen der Gestaltungsrichtlinien war ein Transfer in andere Branchen gut möglich, so erweist sich die Wertstrommethode zur Analyse und Neugestaltung auch in der Schienenfahrzeugindustrie, als geeignet. Durch ausgezeichnete Visualisierung erlaubt es die Methode die gesamte Wertschöpfungskette zu berücksichtigen und unterstützt durch zielführenden Einsatz von Gestaltungsrichtlinien die optimale Gestaltung einer Produktion. Alle wichtigen Einflussfaktoren der Produktion, wie beispielsweise einzelne Produktionsschritte, der Materialfluss, sowie Informations- und Kommunikationsfluss können so auf einen Blick dargestellt werden. Durch das Aufzeigen und in Frage stellen der bisherigen Gewohnheiten des Produktionsablaufes lassen sich potenzielle Verbesserungsmaßnahmen leichter identifizieren, um die Effektivität einer Produktion zu verbessern und weiterzuentwickeln. (Erlach, 2020, S. 1–2)

Die Visualisierung der Produktionsabläufe durch die Wertstrommethode bietet eine gute Kommunikationsbasis zur Verständigung über den aktuellen IST-Zustand sowie den angestrebten Soll-Zustand einer Fertigung, innerhalb des Unternehmens. Die Methode setzt sich aus den beiden Komponenten „Wert“ und „Strom“ zusammen. Wert bezieht sich auf die Wertschöpfung also die Absicht etwas zu produzieren, etwas Wertvolleres aus einem Ausgangsmaterial herzustellen. Strom bezieht sich auf den Produktionsfluss, um durch Verwendung maschineller Anlagen das Ausgangsmaterial über verschiedene Produktionsstationen in einer gewissen Zeit fließen zu lassen.

Der Wertstrom enthält alle notwendigen Tätigkeiten, die zur Wandlung eines Ausgangsmaterial in ein Produkt stattfinden müssen. Ein nicht stockender, fließender Produktionsfluss weist auf einen guten Produktionsablauf hin und wird beispielsweise als Kennzahl mit dem Flussgrad gemessen. (Erlach, 2020, S. 8–11)

Die allgemeine Modellierung eines Wertstromes in einer Fabrik basiert auf sechs Grundelementen, die mit spezifischen Parametern beschrieben werden und je nach Art der Anwendung noch differenzieren können:

1. „Produktionsprozesse“ beschreiben die unmittelbar produzierenden Tätigkeiten in der Fabrik und auch die externe Bearbeitung
2. „Geschäftsprozesse“ beschreiben die Aufgaben der Auftragsabwicklung inklusive der Produktionsplanung und –steuerung
3. Der „Materialfluss“ beschreibt den Transport der Materialien zwischen den Produktionsprozessen einschließlich der Bestände
4. Der „Informationsfluss“ beschreibt die transferierten Daten und Dokumente zwischen den Geschäftsprozessen hin zu den Produktionsprozessen inklusive der Datenfrequenz
5. Der „Kunde“ bildet die von der Produktion abzudeckende Kundennachfrage ab und modelliert so die Systemlast
6. Der „Lieferant“ bildet die Versorgung der Produktion mit Rohmaterialien und Teilen ab (Erlach, 2020, S. 32–33)

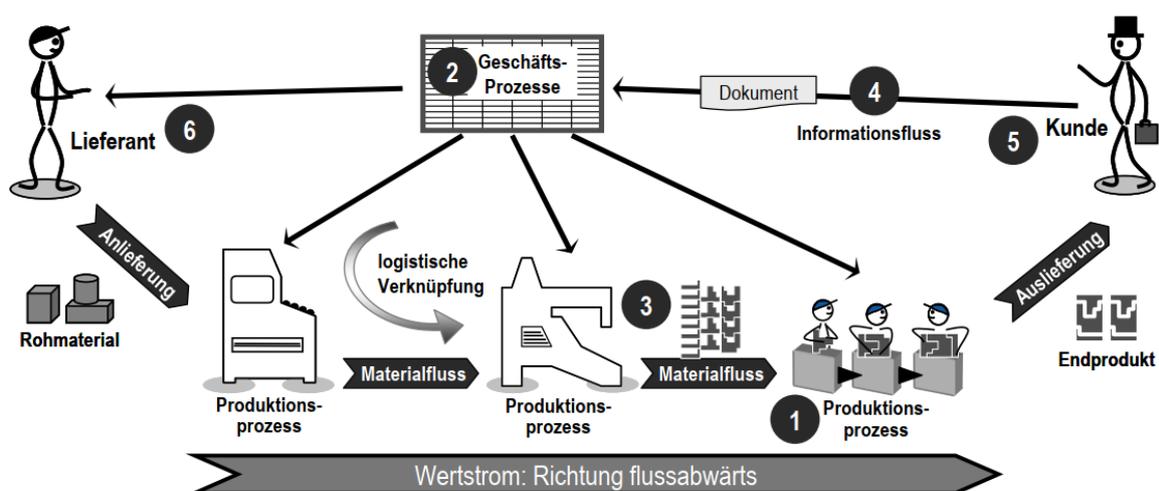


Abbildung 3: Der Wertstrom einer Fabrik (Erlach, 2020, S. 33)

Die Geschäftsprozesse, der Materialfluss und der Informationsfluss bilden zusammen die gesamte Produktionslogistik eines produzierenden Unternehmens. Die in der obigen Abbildung zu sehende „logistische Verknüpfung“ bezeichnet den Materialfluss sowie die dazugehörige Steuerlogik zweier Produktionsprozesse.

### 2.1.3 Produktionsoptimierung und Zielkonflikte

Um eine Produktion zu optimieren ist es unumgänglich Ziele zu definieren, an denen die Verbesserung zu messen ist. Zielkonflikte entstehen, weil Ziele nur selten gleich gut erfüllbar sind. Produktionsziele sind niedrige Herstellungskosten, hohe Produkt- und Leistungsqualität, kurze Durchlaufzeiten in der Produktion und Auftragsabwicklung sowie seit jüngerer Zeit auch die angebotene Produktvielfalt. Allgemein lassen sich vier voneinander in Beziehung stehende, aber unabhängige Zieldimensionen angeben, diese bestimmen grundsätzlich die Leistungsfähigkeit einer Produktion. (Erlach, 2020, S. 11)

Die vier Zieldimensionen sind:

- Variabilität
- Qualität
- Geschwindigkeit
- Wirtschaftlichkeit

Jeder Zieldimension können Teilziele zugeordnet werden, die sich gegenseitig beeinflussen, also in Konflikt stehen können und zusammen die Produktionsziele formulieren. Die zugeordneten Ziele einer Dimension sind nicht auf die einer anderen Dimension rückführbar oder reduzierbar, sie können nicht wechselseitig ausgedrückt werden. Die Produktionsoptimierung zielt darauf ab, unter Berücksichtigung der vier einander widerstrebenden Zieldimensionen, die Effizienz der Produktion zu steigern. Die Herausforderung liegt darin den Produktionsbetrieb und seine angestrebten Ziele an einem bestimmten Standort mit dem jeweiligen Produktspektrum so abzustimmen das ein möglichst hoher Anteil der Ziele erreicht wird. Die Teilziele in den Zieldimensionen Variabilität, Qualität, Geschwindigkeit und Wirtschaftlichkeit lassen sich in Marktziele und Betriebsziele gliedern.

**Marktziele:**

- Lieferbarkeit, Produktvielfalt (Variabilität)
- Lieferqualität und Lieferfähigkeit (Qualität)
- Lieferzeit (Geschwindigkeit)
- Lieferpreis (Wirtschaftlichkeit)

**Betriebsziele:**

- Flexibilität, Wandlungsfähigkeit (Variabilität)
- Produktqualität, Termintreue (Qualität)
- Durchlaufzeit, Verfügbarkeit (Geschwindigkeit)
- Produktivität, Auslastung, Materialkosten (Wirtschaftlichkeit)

Diese sind nur eine Auswahl an üblichen Kennzahlen zur Leistungsmessung in der Produktion. Die Auswahl kann entsprechend der Gegebenheiten ergänzt werden. Ein Kennzahlensystem ist nach den vier Dimensionen zu gliedern und setzt an den parametrisierten Betriebszielen passend zu den Marktzielen an. (Erlach, 2020, S. 12–15)

Die Zieldimensionen sollen im Folgenden mit Betrachtung auf einige Teilziele mit größerer Bedeutung näher beschrieben werden (Erlach, 2020, S. 19–22):

**Variabilität**

Die Lieferbarkeit, das Marktziel der Variabilität gibt an welche Kundenwünsche prinzipiell erfüllbar und dadurch lieferbar sind. Um die gebotene Produktvielfalt auch abdecken zu können sind die Betriebsziele, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit von entscheidender Bedeutung. Diese stellen sicher, dass das gesamte Produktspektrum hergestellt werden kann. Die Variabilität also die Variantenbreite hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen, manche Unternehmen können nur durch spezifische Kundenwuschabdeckung am Markt bestehen.

## Qualität

Mit Qualität ist zum einen die Produktqualität gemeint, die leidet, wenn der Kunde einen Fehler entdeckt und auch die Produktionsqualität die schlechter wird, wenn zu viel Ausschuss vorliegt oder Nacharbeiten notwendig sind. Zum anderen ist auch die Termineinhaltung ein wesentlicher Punkt der Qualität.

Grundsätzlich sind hier vier Termine zu unterscheiden: Der bestellte Kundenwunschtermin, der zugesagte Liefertermin, der intern geplante Fertigstellungstermin sowie der tatsächliche Auslieferungstermin. Im besten Fall sind all diese Termine der gleiche Zeitpunkt. Bei Abweichung von jeweils zwei Terminen ergeben sich Qualitätskennzahlen. Die drei wichtigsten sind:

Lieferfähigkeit: Grad an Übereinstimmung zwischen bestelltem Kundenwunschtermin und zugesagtem Liefertermin in geforderter Liefermenge

Lieferqualität: Anteil der Kundenaufträge die zum zugesagten Liefertermin, ohne Qualitätsmängel und in der richtigen Menge geliefert wurden

Termintreue: Anteil der Teile und Produkte die rechtzeitig zum geplanten Fertigstellungstermin in richtiger Menge produziert wurden

Die Termineinhaltung und die Fehlerfreiheit gilt es mit Hilfe dieser Kennzahlen zu maximieren. Lieferfähigkeit und Lieferqualität sind Teilziele, die das Unternehmen marktseitig verfolgt. Das Betriebsziel der Termintreue ist nur für die innerbetriebliche Ablaufplanung relevant und bleibt dem Kunden verborgen.

## Geschwindigkeit

Zeitliche Kennzahlen in der Dimension der Geschwindigkeit sind ebenfalls in Marktziele und Betriebsziele aufzuteilen. Der Markt wünscht eine kurze Lieferzeit, betrieblich wird das durch eine schnelle Auftragsabwicklung, gerechnet von der Auftragserfassung bis zur Auslieferung, realisiert.

Die innerbetriebliche Produktionsdurchlaufzeit korreliert mit der durchschnittlichen Bestandshöhe und ist teilweise unabhängig von der Lieferzeit, da die Kundenanonyme Vorproduktion nur in die Produktionsdurchlaufzeit einfließt. Die administrative Auftragsabwicklung ist im Gegensatz zur Produktionsdurchlaufzeit nur in der Lieferzeit enthalten.

Die technische Verfügbarkeit ist Maß für den zeitlichen Einfluss von Störungen in Dauer und Häufigkeit. Kostenseitig hängen die Maschinenstundensätze direkt davon ab. In erster Linie sind jedoch bei Verschlechterung, die Termintreue, die nicht eingehalten werden kann und die Durchlaufzeiten, die länger werden, betroffen.

## Wirtschaftlichkeit

Der entscheidendste Faktor ist marktseitig der Preis, wenn das bestellte Leistungsangebot beschlossen ist. Um international wettbewerbsfähig zu sein, müssen alle Kosten auf ein Minimum reduziert werden, um Gewinne zu erzielen. Hier sind die Personalproduktivität beispielsweise gemessen in Lohnstückkosten, die Maschinenauslastung und die Materialkosten von entscheidender Bedeutung.

## Das logische Zielquadrat

Das folgende logische Zielquadrat der Produktion soll verdeutlichen, wie die vier Zieldimensionen mit ihren Teilzielen zueinander in Beziehung stehen und welche Zielkonfliktverhältnisse auftreten. Die Verbesserung eines einzelnen Ziels wirkt sich unterschiedlich negativ auf die anderen Ziele aus. Einige Ziele lassen sich aber auch zeitgleich, zusammen verbessern.

Die Anordnung der Zieldimensionen im Zielquadrat ist durch die Art der wechselseitigen Zielkonflikte bestimmt. Bei konkret vorkommenden Zielkonflikten hilft diese allgemeine Darstellung den Widerspruchscharakter zu klären, um gegebenenfalls eine annehmbare Verträglichkeit herbeizuführen. (Erlach, 2020, S. 23)

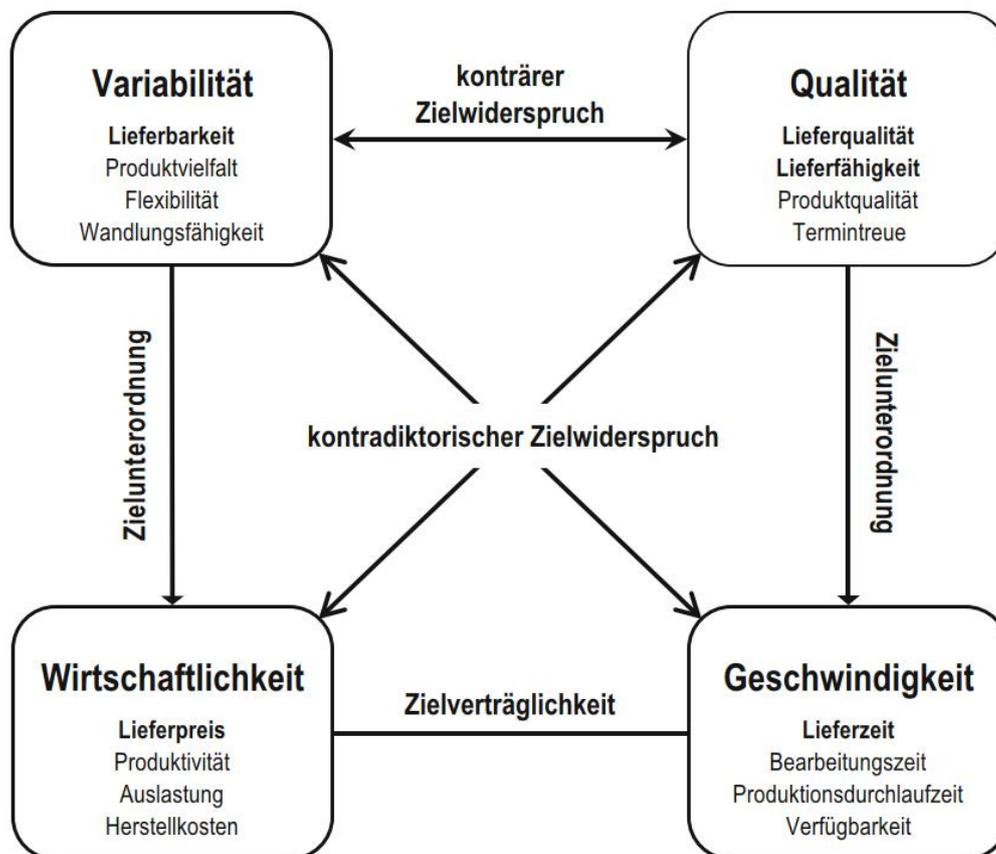


Abbildung 4: Zielquadrat der Produktion (Erlach, 2020, S. 23)

**Die sechs Zielkonflikte (Erlach, 2020, S. 24–26):**

1. Qualität und Wirtschaftlichkeit stehen in einem kontradiktorischen Zielwiderspruch. Dieser ist der am stärksten ausgeprägt Widerspruch. Hier führt die Verbesserung des einen Ziels zur Verschlechterung des anderen. Wird die Produktqualität gesteigert so führt, dass demnach immer zu höheren Kosten. Wird die Auslastung durch größere Losgrößen erhöht, sinkt die Termintreue, da durch die größeren Lose längere und stärker schwankende Wartezeiten vor Ressourcen entstehen und damit auf erforderliche Teile länger gewartet wird. Der Zielkonflikt lässt sich eingeschränkt aufheben indem, die dem Marktpreis angemessene Qualität erreicht wird.
2. Variabilität und Geschwindigkeit stehen ebenfalls in einem kontradiktorischen Zielwiderspruch. Eine Erhöhung der Variabilität führt immer zu einer verlängerten Lieferzeit oder zu längeren Produktionsdurchlaufzeiten. Beispielsweise muss bei einem Kanban-Supermarkt-Lager jede Variante gelagert werden, dadurch erhöht sich der Bestand und weiters die Produktionsdurchlaufzeit. Es muss versucht werden den Variantenentstehungspunkt im Produktionsfluss möglichst weit zum Ende zu schieben. Ein weiteres Beispiel sind hier wandlungsfähigere Maschinen, die zumeist störanfälliger und langsamer in der Bearbeitung von Produkten sind als Maschinen, die nur für einen Prozess gerüstet werden können. Die technische Verfügbarkeit zu erhöhen und die Bearbeitungszeit gleichzeitig zu senken wird schwieriger, je unterschiedlicher die Aufspannvorrichtungen sind und je mehr Werkzeuge benötigt werden.
3. Variabilität und Qualität, hier liegt ein konträrer Zielwiderspruch vor. Dieser etwas schwächere Widerspruch besagt, dass sich beide Ziele nicht zeitgleich verbessern lassen. Doch die Verbesserung eines Zieles lässt sich durchführen ohne die Verschlechterung des anderen. So erschwert sich die Einhaltung der Qualitätsziele durch die Erhöhung der Variabilität, die Varianz und Flexibilität wird eingeschränkt durch eine Erhöhung der Qualitätsanforderungen. Kundenspezifische Produkte, die zum ersten Mal gefertigt werden, sind störanfälliger als Serienprodukte. Der Zielkonflikt kann teilweise neutralisiert werden indem, die Erhöhung der Anforderungen nur langsam stattfindet, um der anderen Seite zu ermöglichen sich anzupassen, ohne oder nur marginal zurückzufallen.
4. Variabilität und Wirtschaftlichkeit, in diesem Fall liegt eine Zielunterordnung vor. Das bedeutet, dass sich manche Ziele einfacher realisieren lassen als andere, wenn Anforderungen für ein Ziel leichter umsetzbar sind als für ein anderes Ziel. Beispielsweise lässt sich die Produktivität und die Auslastung einfacher

verbessern, als das Produktspektrum auszuweiten. Auch die Herstellkosten von bestehenden Standardprodukten lassen sich leichter senken als eine existierende Produktion flexibler und wandlungsfähiger zu machen, um ein größeres Produktspektrum produzieren zu können. Flexibler gestaltete Maschinen können allerdings auch besser ausgelastet werden, dadurch könnte man beide Dimensionen gleichzeitig verbessern. Eine zu hohe Flexibilität ist im Regelfall allerdings unwirtschaftlich.

5. Qualität und Geschwindigkeit stehen ebenfalls in einer Beziehung der Zielunterordnung. Die Qualität ist meist schwieriger zu steigern als die Geschwindigkeit, so ist es einfacher schnell zu produzieren als in einwandfreier Produktqualität. In manchen Fällen sind die Produktionsprozesse aber auch qualitativ besser, wenn sie rascher durchlaufen werden.
6. Wirtschaftlichkeit und Geschwindigkeit stehen in einer Zielverträglichkeit zueinander. Dies bedeutet, dass beide gleichzeitig verbessert werden können. Eine geringere Durchlaufzeit senkt zum Beispiel zwangsläufig die Bestandskosten.

### **Rangordnung der Zieldimensionen**

Da nicht alle Ziele in gleichem Maße erreichbar sind muss überlegt werden welche Ziele im Konfliktfall Priorität haben. Dies kann im Unternehmen von allen Wertstrombeteiligten durch paarweisen Vergleich der Ziele erarbeitet werden. Durch gängige Methoden des Lean Production ergibt sich eine Zielhierarchie. Die Zieldimension der Qualität hat oberste Priorität. Argumentiert aus produktionstechnischer Sicht, ist Ausschuss die schlimmste Art der Verschwendung und muss vermieden werden. Durch Ausschuss werden alle getätigten wertschöpfenden Maßnahmen und das Rohmaterial vernichtet. Auf der Nullfehler Produktion muss daher der Fokus liegen. Aus logistischer Sicht ist eine hohe Liefertermintreue von höchster Priorität, die Sicht des Kunden einnehmen ist ein Grundprinzip des Lean Production. Als zweit wichtigste Zieldimension ergibt sich die Geschwindigkeit mit dem Ziel die Durchlaufzeit und den Bestand zu minimieren, immer unter der Voraussetzung, dass Liefertermine eingehalten werden. Produktionstechnisch gesehen ist eine Maximierung der Maschinenlaufzeit durch hohe Verfügbarkeit das Hauptziel. Die Wirtschaftlichkeit ordnet sich an dritter Stelle nicht unter, sondern wird durch die Erfüllung der Ziele von Qualität und Geschwindigkeit begünstigt. Zum Beispiel durch die Vermeidung von Verschwendungen wie Ausschuss, Beständen und Maschinenstörungen. Zugunsten von Bestandsenkung

und Termineinhaltung wird auf eine maximale Maschinenauslastung verzichtet. Eine hohe Mitarbeiter-Produktivität wird angestrebt. Die Variabilität spielt mit einer hohen Produktvielfalt und einer hohen Maschinen-Flexibilität, um die Vielfalt zu bewerkstelligen, nur eine untergeordnete Rolle. (Erlach, 2020, S. 26–28)

### 2.1.4 Logistische Zielgrößen und Kennzahlen

Ein theoretisches Verständnis wie logistische Zielgrößen zusammenhängen ermöglicht eine wirksamere Fertigungssteuerung da sie gezielter beeinflusst werden können. (Lödding, 2016, S. 4)

Die Erreichung der logistischen Ziele beeinflusst den wirtschaftlichen Erfolg eines Unternehmens in erheblichem Maße. Die Beeinflussung der logistischen Zielgrößen ist daher ausschlaggebend. (Lödding, 2016, S. 41)

#### Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit entspricht dem gesamten zeitlichen Durchlauf eines Produktionsauftrages, Fertigungsauftrages oder auch eines einzelnen Arbeitsvorganges, je nachdem welches Bezugselement betrachtet wird. Die Zeitdauer zwischen Auftragsfreigabe und Bearbeitungsende wird als Durchlaufzeit eines Fertigungsauftrages definiert. (Lödding, 2016, S. 32)

In folgender Abbildung wird ein Produktionsauftrag mit zwei Fertigungsaufträgen und einem Montageauftrag betrachtet, die aus einzelnen Arbeitsvorgängen (AVG1, AVG2, etc.) bestehen. Fertigungsauftrag 2 und Montageauftrag bilden den kritischen Pfad des Auftragsnetzes. Der kritische Pfad bestimmt die Durchlaufzeit des Produktionsauftrags. (Lödding, 2016, S. 58)

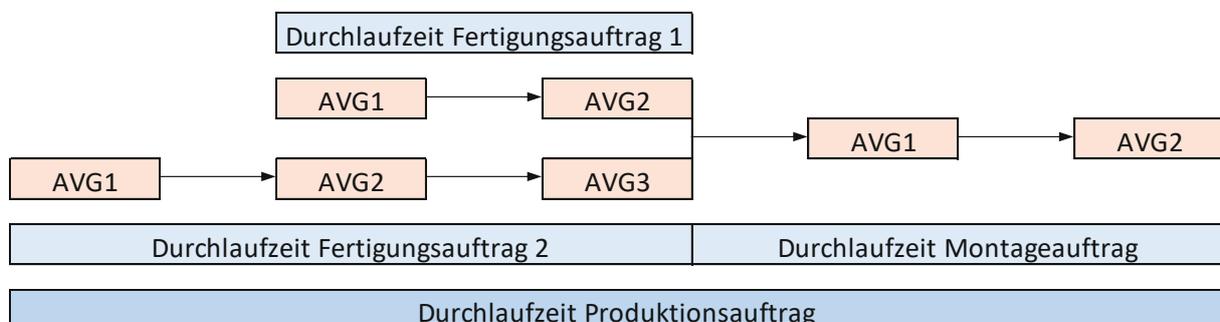


Abbildung 5: Durchlaufplan eines Produktionsauftrages (vgl. Lödding, 2016, S. 59)

In Abbildung 6 werden beispielhaft die Durchlaufzeitanteile des Bezugslements Arbeitsvorgang 2 detaillierter dargestellt. Die Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges setzt sich zusammen aus Übergangszeit und Durchführungszeit. Die Übergangszeit beinhaltet die Liege- und Transportzeiten. Die Durchführungszeit, die Dauer des Rüstens und die Bearbeitungszeit.



**Abbildung 6: Durchlaufzeitanteile eines Arbeitsvorgangs (vgl. Lödding, 2016, S. 59)**

## Flussgrad

Um die Höhe der absoluten Durchlaufzeit zu bewerten, eignet sich die Kennzahl des Flussgrades, welcher die mittlere Durchlaufzeit auf die mittlere Durchführungszeit bezieht. Der Flussgrad kann wie die Durchlaufzeit auch für verschiedene Bezugslemente wie einzelne Arbeitsvorgänge aber auch gesamte Produktionsaufträge, berechnet werden. Ein Flussgrad zwischen drei und fünf ist gemäß Kennlinientheorie für viele Anwendungsfälle angemessen. Ein großer Flussgradwert weist auf einen zu hohen Bestand hin. (Lödding, 2016, S. 60)

$$\text{Flussgrad} = \frac{\text{mittlere Durchlaufzeit}}{\text{mittlere Durchführungszeit}}$$

### Formel 1: Flussgrad (Lödding, 2016, S. 60)

Nimmt der Flussgrad den Wert 1 an, spiegelt das den Idealprozess ohne Übergangszeit wider. Das produzierte Gut fließt von einer Station zur nächsten ohne Liege- und Transportzeiten. Der Flussgrad gibt an um welchen Faktor die Durchlaufzeit die minimal mögliche Durchlaufzeit übersteigt (Erlach, 2020, S. 105)

## Terminabweichung

Die Terminabweichung gibt die Abweichung des tatsächlichen zum geplanten Auftragsdurchlauf meist in Arbeitstagen an. Sie kann für den Abgang, Zugang und relativ zur Plan-Durchlaufzeit eines Auftrages berechnet werden. Folgend werden die drei Abweichungen, Abgangsterminabweichung, Zugangsterminabweichung und relative Terminabweichung kurz erläutert (Lödding, 2016, S. 32–35; H.-H. Wiendahl, 2011, S. 128–132):

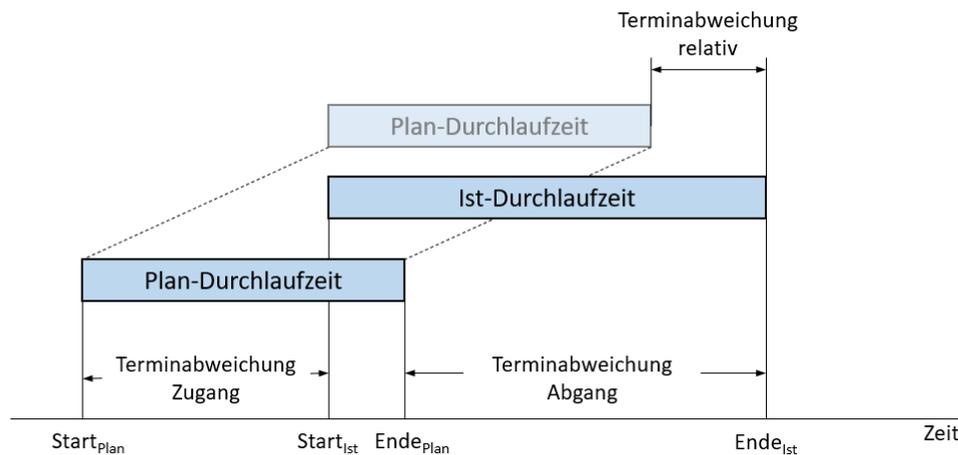


Abbildung 7: Terminabweichungsgrößen (vgl. H.-H. Wiendahl, 2011, S. 129)

Abgangsterminabweichung, gibt die Zeitdauer an um die der Auftrag gegenüber dem Plan-Endtermin abweicht. Ein positiver Wert gibt eine zu späte und ein negativer Wert eine zu frühe Fertigstellung an. Eine wichtige Zielgröße, weil Liefertermin oder die Zeit des Puffers direkt beeinflusst werden.

$$\text{Terminabweichung Abgang} = Ende_{Ist} - Ende_{Plan}$$

### Formel 2: Terminabweichung Abgang

Zugangsterminabweichung, gibt die Zeitdauer an um die ein Auftrag gegenüber dem Plan zu früh oder zu spät startet bzw. freigegeben wird, sie dient hauptsächlich internen Analysezielen und beurteilt die Auftragsfreigabe.

$$\text{Terminabweichung Zugang} = Start_{Ist} - Start_{Plan}$$

### Formel 3: Terminabweichung Zugang

Relative Terminabweichung, gibt die Zeitdauer an um die, die Ist-Durchlaufzeit von der Plan-Durchlaufzeit abweicht. Ein positiver Wert bedeutet eine längere, ein negativer eine kürzere Ist-Durchlaufzeit als geplant. Diese Zielgröße dient ebenfalls primär Analyse Zwecken und beurteilt die Durchlaufzeiten.

$$\text{Terminabweichung relativ} = \text{Durchlaufzeit}_{\text{Ist}} - \text{Durchlaufzeit}_{\text{Plan}}$$

#### Formel 4: Terminabweichung relativ

Die Gegenüberstellung der drei Terminabweichungsgrößen erlaubt Aussagen in welchem Maße die Produktion mit ihren Planungs- und Steuerungseingriffen die Termintreue verschlechtert oder verbessert. (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 130)

### Termintreue

Im Gegensatz zur Terminabweichung, die für einzelne Aufträge oder Teile davon berechnet wird, ist die Termintreue geeignet die Gesamtheit aller Aufträge eines Zeitraums zu beurteilen. Die Termintreue gibt prozentuell an, wie viele von den geplanten Aufträgen innerhalb einer festgelegten Termintoleranz fertiggestellt wurden. Die Termintreue ist eine sehr wichtige Zielgröße, die sich direkt auf die Liefertreue auswirkt, sofern kein Lieferzeitpuffer vorhanden ist. Sie wird vom Mittelwert und der Streuung der Abgangsterminabweichung beeinflusst. (Lödding, 2016, S. 34)

$$\text{Termintreue} = \frac{\text{Anzahl fertiger Aufträge innerhalb der Toleranz}}{\text{Anzahl geplanter Aufträge}} * 100$$

#### Formel 5: Termintreue (Lödding, 2016, S. 34)

Folgende Darstellungen von weiten und engen Termintoleranzen zeigen, wie sich die Termintreue dazu verhält. Die Höhe der Balken gibt die Häufigkeit der Ist-Termine gegenüber dem geplanten Termin an, sortiert nach Tagen an Abweichung. Wird eine weite Termintoleranz gewählt, wie im oberen Diagramm in Abbildung 8, mit 10 Tagen ist die Termintreue mit 98% sehr hoch. Bei engen Toleranzgrenzen nimmt die Termintreue ab. (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 133)

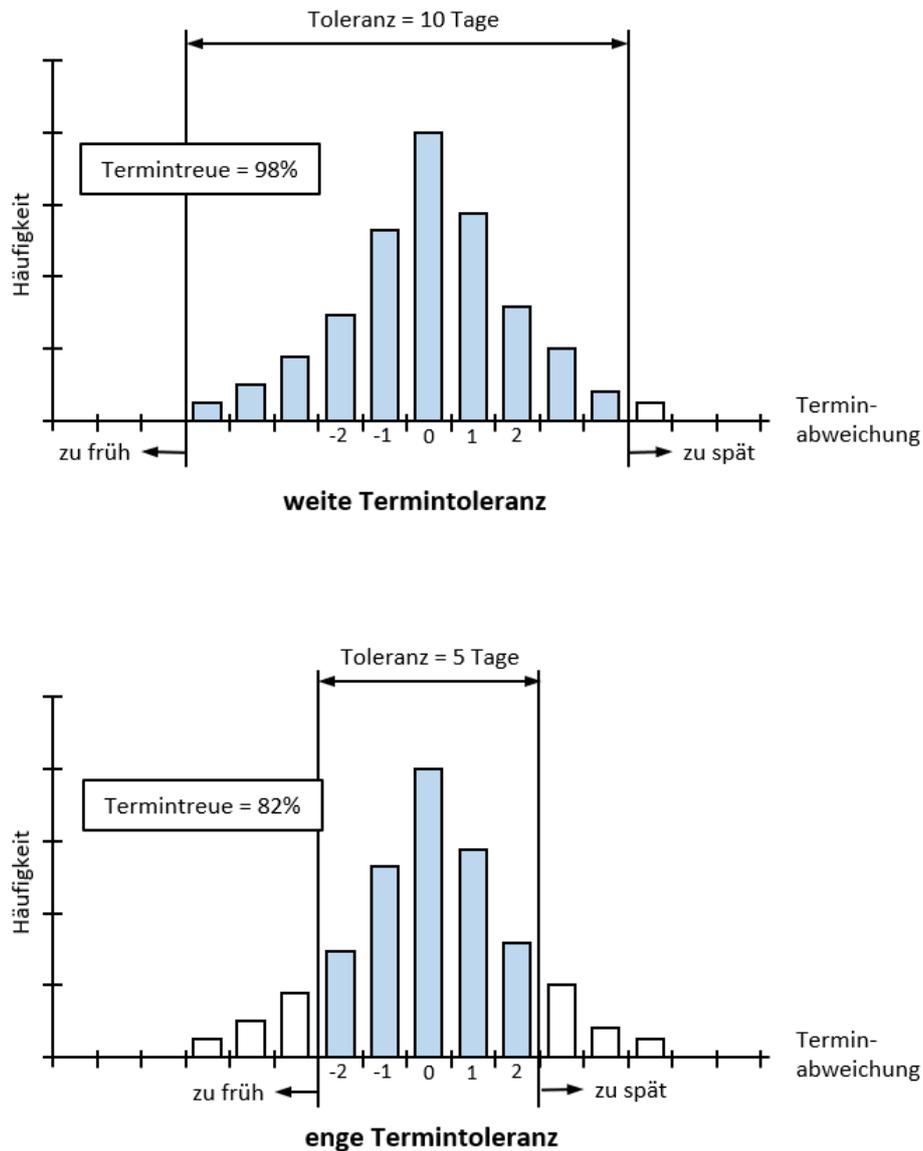


Abbildung 8: Einfluss der Termintoleranz auf die Termintreue (vgl. H.-H. Wiendahl, 2011, S. 133)

### Taktzeit und Zykluszeit

Der Zeitrahmen der vom nachgelagerten Prozess (Kunde) vorgegeben wird, also die Zeit, die für die Produktion eines Teils zur Verfügung steht, nennt sich Taktzeit. Sie wird meist über einen größeren Bezugszeitraum (Woche, Monat) festgelegt. Um die Produktion mit den Kundenbedürfnissen zu synchronisieren, muss flächendeckend auf sämtlichen Linien mit der Taktzeit produziert werden. (Andreas Syska, 2006, S. 145)

$$\text{Taktzeit} = \frac{\text{Länge des Bezugszeitraums}}{\text{Produktionsmenge im Bezugszeitraum}}$$

Formel 6: Taktzeit (Andreas Syska, 2006, S. 145)

Die Taktzeit wird in der Schienenfahrzeugindustrie in Arbeitstagen gemessen. Wird die Länge des Bezugszeitraums mit einem Monat gewählt wären das 20 Arbeitstage, müssen in dieser Zeit 10 Wagenkästen produziert werden ergibt das eine Taktzeit von 2 Arbeitstagen. Alle 2 Arbeitstage muss ein Wagenkasten den Prozess durchlaufen haben. Es können keine Rückschlüsse auf die Kapazitäten einer Produktion gezogen werden. Die Zykluszeit ist die Zeitspanne von der Fertigstellung eines Teils bis zur Fertigstellung des nächsten Teils, somit die Zeit die tatsächlich gebraucht wird. Wird auf der Fertigungslinie nur ein Produkt gefertigt sind im Idealfall Taktzeit und Zykluszeit identisch, werden mehrere Produkte auf einer Linie gefertigt stimmen diese nicht überein. (Andreas Syska, 2006, S. 145–146)

„Die Zykluszeit gibt die Leistungsfähigkeit des Produktionsprozesses in Zeiteinheiten bei kontinuierlichem Betrieb ohne rüst- oder störungsbedingte Unterbrechungen wieder. Die Zykluszeit beschreibt das Kapazitätsangebot eines Produktionsprozesses und gibt an, welcher Kundentakt unter idealen Bedingungen noch unterschritten werden kann, um den entsprechenden Kundenbedarf zu erfüllen.“ (Erlach, 2020, S. 65)

## Bestand

Bestände haben eine sehr hohe logistische Bedeutung, sie beeinflussen, unter anderem, die bestandbedingte Auslastung und die Durchlaufzeit der Aufträge in der Produktion. Entsprechend verschiedener Bereiche im Unternehmen lassen sich unterschiedliche Sichten einnehmen (Lödding, 2016, S. 37–38; H.-H. Wiendahl, 2011, S. 147):

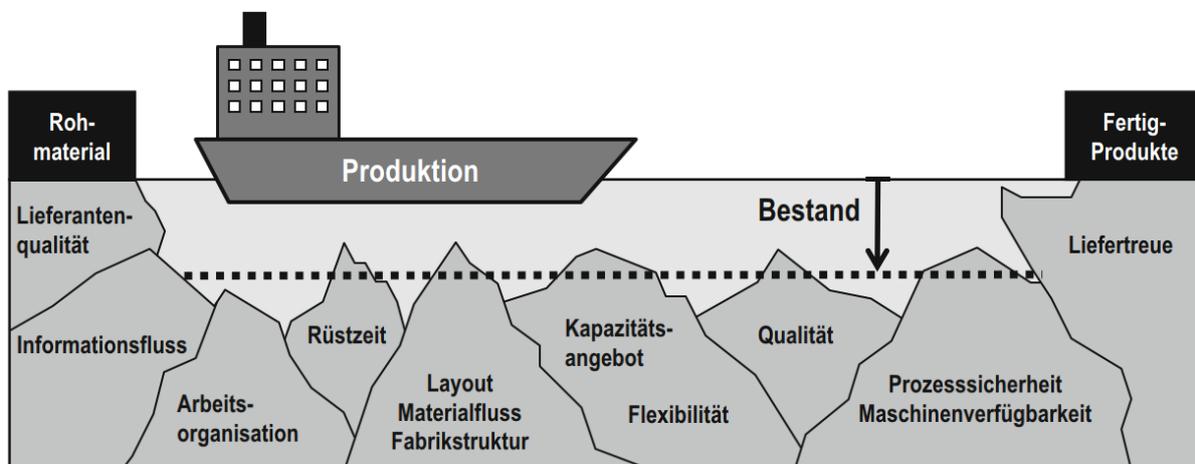
Finanzsicht: Wird die Kapitalbindung reduziert können freigesetzte Finanzmittel genützt werden um die Wettbewerbsposition gezielt zu stärken oder die Finanzierungssituation zu verbessern.

Operative Steuerungssicht: Einerseits eröffnen Bestände Möglichkeiten für kurzfristige schnelle Reaktionen auf Bedarfsschwankungen und dämpfen deren Auswirkungen. Sie ermöglichen Rüstopoptimierungen und sichern die Auslastung in der Produktion, besonders bei wechselnden Engpässen und Batchprozessen. Andererseits wird der Planungs- und Steuerungsaufwand durch Bestände erhöht. Durch höhere Umlaufbestände verlängern sich die Durchlaufzeiten und die Bereitschaft steigt, durch Reihenfolgevertauschung, einzelne Aufträge zu beschleunigen. Eine stärkere Streuung der Durchlaufzeiten ist die Folge und dadurch eine potenzielle Gefährdung der Termintreue. Hohe Bestände benötigen viel Platz und beanspruchen mehr Fläche, bestandsarme Produktionen sind übersichtlicher und dadurch einfacher zu steuern.

**Verbesserungssicht:** Bestände gelten als Symptome eines schwachen, ungenügend koordinierten Logistikmanagements und verdecken oftmals Unzulänglichkeiten im Betrieb wie unabgestimmte Kapazitäten, störanfällige Prozesse oder mangelnde Flexibilität und Qualität, es besteht jedoch ein Zielkonflikt zur hohen Auslastung.

Eine Grundidee ist den Bestand schrittweise nach und nach, zu senken, bis Probleme auftreten, diese werden analysiert und behoben, anschließend wird der Bestand weiter gesenkt, dies wiederholt sich. Den Bestand als Regelgröße für kontinuierliche Verbesserungsprozesse heranzuziehen, stammt aus der Just-in-time-Philosophie. Verantwortungsbereiche können ihren Bestand eigenständig regeln, viele setzen eine Kanban-Steuerung ein. (Lödding, 2016, S. 37–38)

Bestände geben ein Gefühl von Sicherheit und täuschen einen reibungslosen Ablauf vor obwohl möglicherweise ungleichmäßig produziert wird. Dadurch werden teure Verschwendungen jeglicher Art verdeckt. Die folgende Abbildung zeigt das Schiff der Produktion das auf dem hohen Wasserpegel des Bestandes über die Problem-Klippen des Shop Floors hinweg schwimmt. Durch den hohen Bestand wirken sich Schwächen wie mangelnde interne Termintreue gegenüber dem Produktionsplan nur teilweise auf die Liefertreue aus. Je höher der Bestand desto länger ist die Zeitdauer, bis Qualitätsmängel entdeckt werden. (Erlach, 2020, S. 126)



**Abbildung 9: Bestand verdeckt Mängel der Produktion (Erlach, 2020, S. 126)**

Interne Bestände gilt es zu reduzieren. Idealvorstellung des Lean Managements ist es, dass sogenannte Schrittmacherprozesse den Produktionstakt vorgeben, um den Kundenbedarf in die Produktion zu bringen. Lager mit Kanban-Nachfüllung oder Warteschlangen vor dem Schrittmacher dämpfen Bedarfsschwankungen. (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 147)

## Leistung und Auslastung

In logistischen Prozessen wird die Leistung zweckmäßig in Stunden pro Betriebskalendertag oder auch in Anzahl der Aufträge pro Betriebskalendertag gemessen. Die folgend definierte mittlere Leistung wird in der Praxis auch Durchsatz oder Ausbringung genannt und soll die Menge an geleisteter Arbeit in einem Bezugszeitraum angeben. (Lödding, 2016, S. 39)

$$\text{mittlere Leistung} = \frac{\text{Abgang in Bezugszeitraum}}{\text{Länge des Bezugszeitraums}}$$

### Formel 7: mittlere Leistung (Lödding, 2016, S. 39)

Die Auslastung ist das Verhältnis zwischen mittlerer Leistung und maximaler Leistung (= verfügbare Kapazität) im Arbeitssystem und wird in Prozent angegeben. (Lödding, 2016, S. 39)

$$\text{mittlere Auslastung} = \frac{\text{mittlere Leistung}}{\text{maximal mögliche Leistung}} * 100$$

### Formel 8: mittlere Auslastung (Lödding, 2016, S. 39)

Die Auslastung gilt als wichtige Zielgröße, besonders teure Maschinen werden in Unternehmen oftmals hoch ausgelastet, um die Anschaffung zu refinanzieren, jedoch sind die Finanzierungskosten nach Anschaffung festgelegt und können durch die Fertigungssteuerung nicht beeinflusst werden. Eine Fertigungssteuerung, die darauf ausgelegt ist, teure Maschinen hoch auszulasten ist ökonomisch nicht begründbar und führt meist zu hohen Beständen und langen Durchlaufzeiten. Mit erhöhter Auslastung können Umsatz und Deckungsbeitrag eines Unternehmens gesteigert werden, da die Kosten auf mehrere Produkte aufgeteilt werden. Werden die bei höherer Auslastung mehr produzierten Güter nicht abgesetzt, begrenzt die Nachfrage die Auslastung. Da Aufträge meist mehrere Arbeitssysteme durchlaufen und diese selten gleich ausgelastet werden können begrenzt der Durchsatzengpass in einem Arbeitssystem alle anderen und damit die gesamte Leistung der Produktion und somit aller Nichtengpässe. Ist der Durchsatzengpass voll ausgelastet kann die Leistung nicht mehr gesteigert werden. Nach dem Engpassprinzip ist der Engpass eine Produktion das Arbeitssystem mit der höchsten Auslastung. Um die Leistungsfähigkeit zu maximieren ist eine gleichmäßige Auslastung aller Arbeitssysteme von Vorteil. Durch Anpassungen der Maschinenanzahl bzw. Mitarbeiteranzahl kann ein Engpass auch

verlagert werden. Kann die Kapazität des Engpasses nicht erhöht werden, um die Auslastung der anderen Arbeitssysteme zu steigern, verringern viele Unternehmen die Arbeitszeit der Mitarbeiter an Nichtengpässen. Die Personaldisposition nivelliert die verfügbaren Kapazitäten der Arbeitssysteme und macht es schwieriger den Engpass eindeutig zu erkennen. (Hopp & Spearman, 2011, S. 315–317; Lödding, 2016, S. 40–41)

### Gesetz von Little

Das Gesetz von Little beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Bestand einer Produktion, ihrer Leistung und der Durchlaufzeit der Aufträge. Geeignete Auftragsfreigabeverfahren, die den Bestand regeln erlauben eine Steuerung der Durchlaufzeit. (Lödding, 2016, S. 4)

$$\text{erwartete Durchlaufzeit} = \frac{\text{mittlerer Bestand}}{\text{mittlere Leistung}}$$

#### Formel 9: Gesetz von Little (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 169)

Die Gleichung gibt an, wie lange ein Auftrag im Mittel vom Beginn bis zur Abfertigung in einem Arbeitssystem verweilt und beschreibt somit die Durchlaufzeit. Die mittlere Leistung wird beispielsweise in Anzahl Aufträge pro Arbeitstage angegeben. (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 169–170)

## Trichtermodell und Durchlaufdiagramm

Das Trichtermodell modelliert die internen logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung. Mit dem Trichtermodell werden verschiedene Arbeitssysteme also einzelne Arbeitsstationen, Arbeitsstationsgruppen oder auch ganze Produktionen betrachtet, indem jeder Trichter beispielsweise eine Arbeitsstation darstellt. Im Laufe eines Betrachtungszeitraums gehen Aufträge zu und abgefertigte Aufträge fließen ab. Die Füllung spiegelt den Bestand an wartenden Aufträgen wider. Die verschiedenen Kugeln geben Aufträge mit unterschiedlich hohen Arbeitsinhalten in Vorgabestunden an. Die variable Größe der Trichteröffnung stellt die eingestellte Leistung dar, die bis zur maximalen Kapazität ausgeweitet werden kann. Wird dieses System über einen längeren Zeitraum betrachtet lassen sich die Zugangs- und Abgangseignisse in einem Durchlaufdiagramm abbilden. (Lödding, 2016, S. 56–60; H.-H. Wiendahl, 2011, S. 110; H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 170–171; H.-P. Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 254)

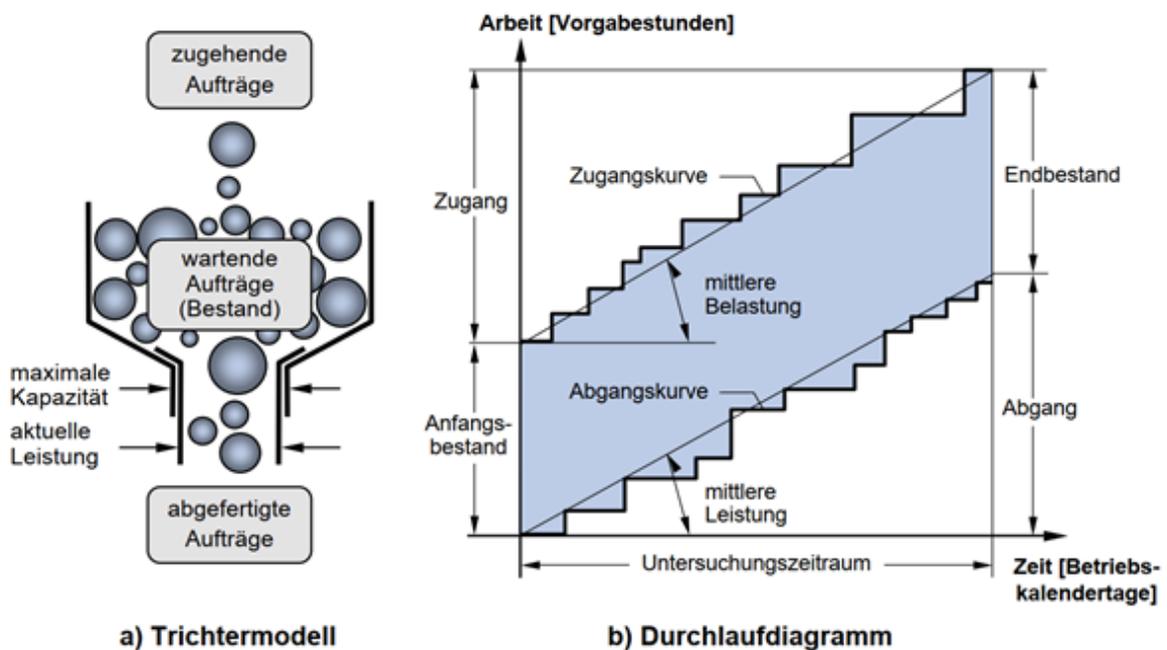


Abbildung 10: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Arbeitsstation (H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 171)

Im Durchlaufdiagramm stellt die untere Kurve den kumulierten Abgangsverlauf dar und die obere analog dazu den Zugangsverlauf. Die mittlere Leistung entspricht der Steigung der Abgangskurve und die mittlere Belastung der Steigung, der Zugangskurve, beide werden gemessen in Vorgabestunden pro Arbeitstag. Wie auch das Gesetz von Little formuliert die sogenannte Trichterformel den Zusammenhang zwischen Bestand, Leistung und Durchlaufzeit. Die Trichterformel lautet: „Reichweite ist gleich Bestand dividiert durch Leistung“, und soll angeben, wie lange eine Produktion mit der aktuellen Leistung weiter produzieren kann, wenn der Zugang ab einem beliebigen Zeitpunkt gestoppt wird. Die aktuelle Reichweite ist also der horizontale Abstand der beiden Kurven und der aktuelle Umlaufbestand ist der vertikale Abstand. Wird der Mittelwert der Durchlaufzeiten der einzelnen Aufträge gebildet ergibt das die mittlere Durchlaufzeit. Im vom Trichtermodell abgeleiteten Durchlaufdiagramm werden nur stationäre Bestandssituationen betrachtet. In Kennlinien können eine Reihe von Zuständen zusammengefasst dargestellt werden. (Lödding, 2016, 4, 60-63; H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 171–172; H.-P. Wiendahl & Wiendahl, 2019, S. 254–257)

### **Produktionskennlinie**

Mittels logistischer Kennlinien werden die logistischen Zielkonflikte zwischen den Zielgrößen veranschaulicht. (Lödding, 2016, S. 4)

Der Zielkonflikt zwischen niedrigen Beständen, kurzen Durchlaufzeiten und einer hohen Auslastung kann mit Hilfe von Produktionskennlinien beschrieben werden. Sie bietet eine operative Hilfestellung da sie die logistischen Wirkzusammenhänge zwischen zentralen logistischen Kennzahlen quantifiziert und dies ist nötig, um Zielgrößen bestmöglich zu steuern. (Lödding, 2016, S. 37; H.-H. Wiendahl, 2011, S. 148)

Zusammenhänge werden in Abhängigkeit eines kontinuierlichen Zustandsspektrums abgebildet. Wie die Zielgrößen an einer Arbeitsstation voneinander abhängen, soll beispielhaft folgende Abbildung veranschaulichen. Leistung, Reichweite und Durchlaufzeit einer Arbeitsstation sind abhängig vom Bestand. Die Leistung wächst bei wachsendem Bestand erst proportional dann deutlich schwächer bis zur Kapazitätsgrenze. Die Reichweite und somit auch die Durchlaufzeit wachsen entsprechend ihrer Abhängigkeit zum Bestand nach der definierten Trichterformel bzw. dem Gesetz von Little. Durch die vertikale Linie werden die Betriebspunkte der Arbeitsstation gekennzeichnet. Die Betriebspunkte werden anhand der gewählten Ziele von den Produktionssteuerern bestimmt. Der Kennlinienverlauf wird hingegen maßgeblich von den Fabrikplanern festgelegt. Die Kennlinien werden mit Hilfe von Näherungsgleichungen oder mittels Simulationsexperimenten punktweise erzeugt. Das logistische Systemverhalten einer Arbeitsstation hängt stark von der Steigung der Leistungskennlinie ab, je steiler diese ist desto optimaler, denn dann wird mit geringen Beständen und somit kurzen Durchlaufzeiten eine hohe Leistung erbracht. (H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 172)

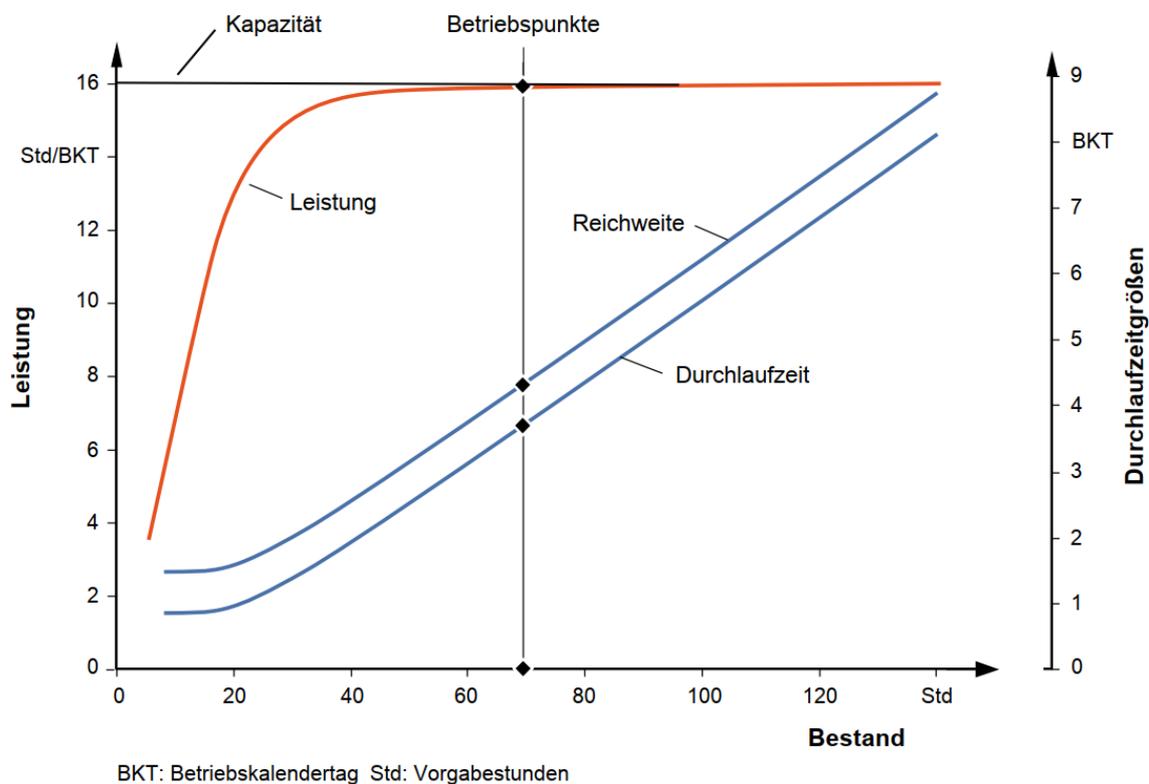


Abbildung 11: logistische Kennlinien einer Arbeitsstation (H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 173)

## 2.2 Feinplanung und -steuerung

In vorherigen Kapiteln wurden die logistischen Zielgrößen und Kennzahlen und deren Modellierungen vorgestellt, um ihre Zusammenhänge und Einflussgrößen zu verstehen. Der nächste Schritt ist, die logistischen Zielgrößen gezielt zu beeinflussen.

### 2.2.1 Das Modell der Fertigungssteuerung

Das von Lödding vorgestellte Modell der Fertigungssteuerung verbindet die bewusst gewählten nur internen logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung, Termintreue) und die zentralen Aufgaben (Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung, Reihenfolgebildung) einer Steuerung. Besonders wertvoll ist dieses Modell bei der Konfiguration einer Fertigungssteuerung und der Analyse von mangelnder Zielerreichung sowie der Unterscheidung zwischen Planung und Steuerung. Die Planwerte der Stellgrößen werden durch die Produktionsplanung festgelegt, die tatsächlichen Ist-Werte hingegen durch die Fertigungssteuerung. (Lödding, 2016, S. 6–11)

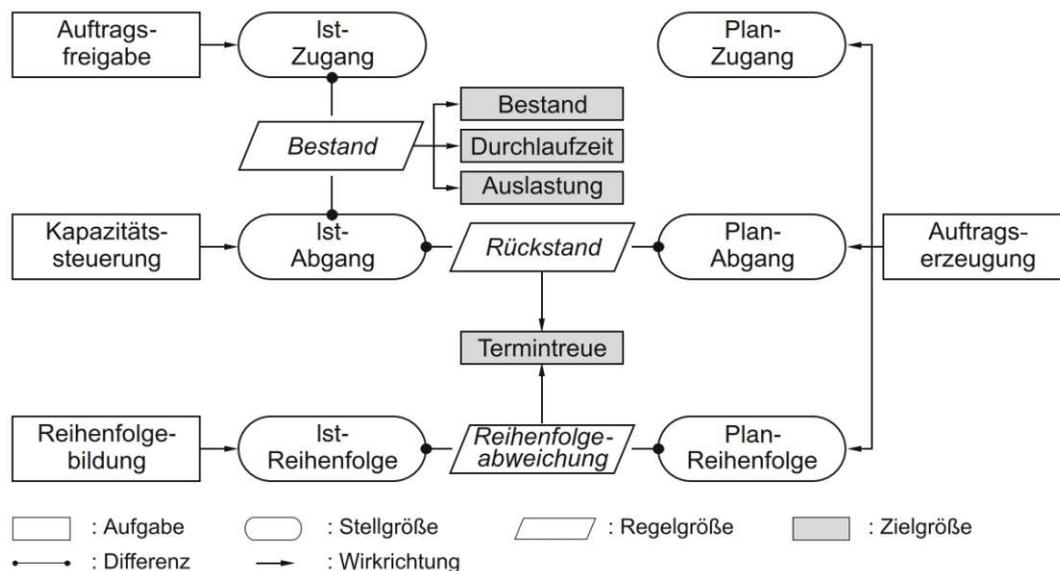


Abbildung 12: Ein Modell zur Fertigungssteuerung (Lödding, 2016, S. 8)

Die Aufgaben legen die Stellgrößen fest. Die Abweichung von zwei Stellgrößen ergeben die Regelgrößen und die Regelgrößen bestimmen wiederum die logistischen Zielgrößen. Die Aufgaben der Fertigungssteuerung sind Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung. Auftragserzeugung auf der rechten Seite der Abbildung ist logischer Bestandteil der Produktionsplanung. (Lödding, 2016, S. 8–9)

## 2.2.2 Auftragserzeugung

Die Auftragserzeugung ist Teil der Produktionsplanung und legt die Plan-Reihenfolge sowie die Planwerte für den Zugang und Abgang der Fertigung fest. Einige Unteraufgaben, wie die Produktionsprogrammplanung, die Termin- und Kapazitätsplanung sowie die Sekundärbedarfsplanung sind ebenfalls Teil der Auftragserzeugung. Nach erfolgreicher Auftragserzeugung sind Plan-Starttermine und Plan-Endtermine für die Aufträge vorhanden. (Lödding, 2016, S. 9) Diese Planwerte bestimmen maßgeblich die internen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung. Eine gute Termintreue wird bestimmt von der Realisierbarkeit des Plan-Abgangs und der Plan-Reihenfolge. Gute Planwerte können nur mit genauen und detailliert hinterlegten Vorgabezeiten und Kapazitätsangaben zustande kommen. (Lödding, 2016, S. 165)

Die Auftragserzeugung wird unter anderem durch die Auslösungsart und die Auslösungslogik klassifiziert. Bei der Art der Auftragsauslösung wird zwischen Auftragsfertigung und Lagerfertigung unterschieden. Bei der Auftragsfertigung werden Fertigungsaufträge durch den Kundenauftrag erzeugt, in dem Ausmaß die der Kundenauftrag benötigt. Bei Lagerfertigung wird der Bedarf eines Kundenauftrages durch das Lager gedeckt es besteht keine direkte Verbindung zwischen Fertigungsauftrag und Kundenauftrag. Im Gegensatz zur Auftragsfertigung sind wesentlich kürzere Lieferzeiten aber auch höhere Lagerbestände die Regel. Meist ist die Lagerfertigung eine Wiederholfertigung, die Produkte sind oft kundenneutral und die Auftragserzeugung wird durch eine Materialentnahme oder -reservierung ausgelöst. Die Fähigkeit der Selbstregelung, die Schnelligkeit und die Programmflexibilität sind bei Verfahren der Lagerfertigung von Vorteil, um auf unerwartete Ereignisse und veränderte Nachfrage reagieren zu können. (Lödding, 2016, S. 165–169)

Bei der Auslösungslogik wird unterschieden zwischen der periodischen Auftragserzeugung, wo nur zu bestimmten Zeitpunkten Aufträge erzeugt werden und der ereignisorientierten Auftragserzeugung die durch Auftreten eines Ereignisses wie eine Materialentnahme bestimmt wann ein Auftrag erzeugt wird. (Lödding, 2016, S. 173–174)

### 2.2.3 Auftragsfreigabe

Die Auftragsfreigabe ist Teil der Fertigungssteuerung und legt den Ist-Wert des Zugangs der Fertigung fest. Zeitpunkt und Reihenfolge, in der die Aufträge für die Fertigung freigegeben werden, sind dann fixiert. (Lödding, 2016, S. 8) Ab der Freigabe darf der Auftrag in der Fertigung bearbeitet werden. Die Auftragsfreigabe hat direkte Auswirkung auf den Bestand somit auf die bestandsbedingte Auslastung und auf die Durchlaufzeit der Aufträge. Für die Auftragsfreigabe lassen sich drei Klassifizierungsmerkmale identifizieren: das Kriterium, der Detaillierungsgrad und die Auslöselogik (Lödding, 2016, S. 339)

**Das Kriterium der Auftragsfreigabe** bestimmt das Merkmal, das entscheidet, ob der Auftrag freigegeben wird. Hier können vier Kriterien unterschieden werden, wobei das erste ein Null-Kriterium ist (Lödding, 2016, S. 339–340):

1. *Sofortige Auftragsfreigabe ohne Kriterium*: Aufträge werden direkt nach Erzeugung freigegeben. Häufig angewendet bei einer automatisierten Auftragserzeugung in der Lagerfertigung.
2. *Plan-Starttermin*: Aufträge werden freigegeben, sobald der Plan-Starttermin erreicht ist.
3. *Bestand der Fertigung bzw. eines Arbeitssystems*: Aufträge werden freigegeben, wenn der Bestand der Fertigung bzw. eines Arbeitssystems unter einen Planwert sinkt, eine sogenannte bestandregelnde Auftragsfreigabe.
4. *Belastung der Arbeitssysteme*: Ein Sonderfall der bestandregelnden Auftragsfreigabe die, die momentane und die erwartete Belastung der Arbeitssysteme berücksichtigt, eine Auftragsfreigabe mit arbeitssystemspezifischem Belastungsabgleich.

**Der Detaillierungsgrad der Auftragsfreigabe** ist besonders für die bestandsregelnde Auftragsfreigabe von Bedeutung. Zwei Detaillierungsgrade werden unterschieden (Lödding, 2016, S. 349):

1. *Niedriger Detaillierungsgrad*: Die Freigabeentscheidung erfolgt zentral und gilt für den gesamten Auftrag mit all seinen Arbeitsvorgängen.
2. *Hoher Detaillierungsgrad*: Die Freigabeentscheidung erfolgt dezentral für jedes einzelne Arbeitssystem.

**Die Auslöselogik der Auftragsfreigabe** entscheidet wann Aufträge freigegeben werden, hier gibt es grundsätzlich zwei Auslöselogiken (Lödding, 2016, S. 352–353):

1. *Periodische Auftragsfreigabe*: Aufträge werden in einem bestimmten Zeitintervall zu festen wiederkehrenden Zeitpunkten (z.B. Beginn eines Arbeitstages) freigegeben, zwischen den Zeitpunkten werden keine Aufträge freigegeben. Die gleichzeitige Freigabe mehrerer Aufträge zu einem Zeitpunkt verursacht Bestandschwankungen, lange Freigabeperioden verstärken diesen Effekt.
2. *Ereignisorientierte Auftragsfreigabe*: Aufträge werden beim Eintreten bestimmter Ereignisse freigegeben, beispielsweise beim Unterschreiten des Plan-Bestandes oder der Erzeugung eines neuen Auftrages.

Sind die Freigabeperioden sehr kurz nähert sich die periodische and die ereignisorientierte Auftragsfreigabe an (Lödding, 2016, S. 354).

Bevor der Auftrag freigegeben werden kann, muss immer auch eine Verfügbarkeitsprüfung durchgeführt werden, die sicherstellt das alle erforderlichen Ressourcen wie Personal, Materialien und die notwendigen Betriebsmittel und Hilfsmittel zu Verfügung stehen. (Lödding, 2016, S. 118; Schuh & Schmidt, 2014, S. 132)

## 2.2.4 Kapazitätssteuerung

Anders als die Kapazitätsplanung die, das erforderliche Kapazitätsangebot für das zu erfüllende Produktionsprogramm im Vorhinein ermittelt, entscheidet die Kapazitätssteuerung über den kurzfristigen tatsächlichen Einsatz der Kapazitäten. Besondere Bedeutung hat dies, wenn durch Abweichungen, Termine von Fertigungsaufträgen laut Planung nicht eingehalten werden können. Die Kapazitätssteuerung entscheidet über Arbeitszeiten, Überstunden, Zusatzschichten, Einsatzort von mehrfachqualifiziertem Personal, Einsatz von Leiharbeitern, alternativen Arbeitssystemen und sonstigen Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität. In der Fertigung wirkt die Kapazitätssteuerung über den Ist-Abgang auf den Rückstand und dadurch auf die Termintreue, siehe Abbildung 12. (Lödding, 2016, S. 531)

## 2.2.5 Reihenfolgebildung

Die Reihenfolgebildung definiert die Ist-Reihenfolge der Aufträge an einem Arbeitssystem. Wann welcher Termin abgearbeitet wird, ist wichtig da sich dies direkt auf die Termintreue auswirkt. (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 238)

Jedem Fertigungsauftrag wird nach definierten Kriterien eine Priorität zugewiesen, die die Ist-Reihenfolge bestimmt. Es wurden viele Reihenfolgeregeln entwickelt allerdings sind für die Praxis nur wenige relevant. Viele scheitern an ihrer Komplexität oder an mangelnder Umsetzung und Reihenfolgedisziplin. Fehler, die in vorherigen Schritten der Planung und Steuerung gemacht wurden, kann die Reihenfolgebildung nur begrenzt ausgleichen. In der Praxis ist es schon sinnvoll eine willkürliche Reihenfolgebildung mit ihren negativen Auswirkungen auf die Liefertreue zu verhindern. (Lödding, 2016, S. 507)

Je höher das Bestandniveau bzw. je mehr Aufträge sich in der Warteschlange befinden desto höher ist der Einfluss der Reihenfolgebildung auf die Erreichung der logistischen Ziele (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 246). Wird der Bestand auf ein Minimum gesenkt verliert auch die Reihenfolgebildung an Bedeutung. Die wichtigsten Reihenfolgeregeln werden nachfolgend beschrieben. Diese beeinflussen jedoch hauptsächlich die Termintreue.

### First in - First out (FIFO)

Alle Fertigungsaufträge werden genau in der Reihenfolge am Arbeitssystem abgearbeitet in der sie eintreffen. FIFO ist eine der natürlichsten und am einfachsten umzusetzenden Reihenfolgeregeln und führt zu wenig Schwankungen in der Durchlaufzeit und einer hohen Liefertreue, hat aber auch eine geringe Flexibilität. Potentiale einer Reihenfolgevertauschung, um verspätete Aufträge vorzuziehen können nicht genutzt werden. (Lödding, 2016, S. 509; Schuh & Schmidt, 2014, S. 215–216)

### Frühester Plan-Start- bzw. Plan-Endtermin (FPS, FPE)

Für die Reihenfolgebildung hat der früheste Plan-Starttermin oder Plan-Endtermin die oberste Priorität. Abweichungen in der Plan-Reihenfolge können durch Reihenfolgevertauschung ausgeregelt werden. Beispielsweise kann ein Auftrag, der wegen Materialmangels später freigegeben wurde in der Warteschlange vorgereicht werden. Es wird jeweils entweder ein Plan-Starttermin oder ein Plan-Endtermin benötigt. Benötigen Aufträge die gleiche Zeit, um gefertigt zu werden sind FPS und FPE identisch. Haben Aufträge eine unterschiedliche Auftragszeit hat nach den FPS-Regeln der Auftrag mit der längeren Auftragszeit Vorrang, nach den FPE-Regeln haben diese gleiche Priorität. (Lödding, 2016, S. 510; Schuh & Schmidt, 2014, S. 216)

### Geringster Restschlupf

Höchste Priorität hat der Auftrag mit dem geringsten Schlupf. In der Literatur sind auch Benennungen wie die „Methode Geringste Schlupfzeit“ oder „Schlupfzeitregel“ zu finden. Der Schlupf ist die Summe an nicht verplanter Zeit zwischen den Arbeitsvorgängen, der gesamte Puffer im Zeitraum zwischen aktueller Zeit und Bearbeitungsende eines Auftrags. Fertigungsaufträge mit wenig Pufferzeit bzw. Schlupf werden vorgereicht da diese stärker gefährdet sind nicht rechtzeitig fertig zu werden als Aufträge mit hohem Schlupf die Verzögerungen gut verkraften, ohne den Endtermin zu schieben. Wenn der Schlupf negativ ist, verspätet sich die Fertigstellung des Auftrags. Aufträge werden so lange zurückgehalten, bis die Schlupfzeit so gering ist, dass die Höhe der Priorität ausreicht, um sie freizugeben. Ein Nachteil ist die ständige Änderung der Reihenfolge, obwohl dies möglicherweise nicht notwendig wäre. (Lödding, 2016, S. 511; Schuh & Schmidt, 2014, S. 217)

Die Schlupfzeit errechnet sich folgendermaßen:

$$\text{Schlupf} = \text{geplantes Bearbeitungsende} - \text{aktuelle Zeit} \\ - \sum_i (\text{Durchführungszeit}_i + \text{Übergangszeit}_i)$$

**Formel 10: Schlupfzeit (Schuh & Schmidt, 2014, S. 217)**

## 2.2.6 Produktionssteuerung

Das Ziel der Produktionssteuerung ist zuverlässige, stabile, transparente und kundenorientierte Material- und Informationsflüsse zu generieren. Die Zuständigkeit der Produktionssteuerung startet mit dem Eingang der Aufträge vom Vertrieb und endet beim Ausgang der fertigen Fahrzeuge an die Distributionslogistik. (Weyer, 2002, S. 57)

### Perlenkettenprinzip und stabile Auftragsfolge

Das aus der Automobilindustrie stammende Perlenkettenprinzip wurde über die Jahre modifiziert und wird auch Produktionssteuerung mit stabiler Auftragsfolge genannt. Dieses basiert auf den entwickelten Verfahren und Methoden der Fahrzeughersteller. Das ursprüngliche rein auf push-orientierter Steuerung aufgebaute Perlenkettenprinzip wurde mit pull-orientierten Steuerungselementen ergänzt. Da das reine durchschieben der geplanten Fahrzeugsequenz durch alle Gewerke gewisse Nachteile wie hohe Lagerbestände, lange Durchlaufzeiten, einen hohen Planungsaufwand und niedrige Änderungsflexibilität mit sich bringt. Der daraus resultierende hybride Steuerungsansatz verbindet also optimal die zentralen Push-Komponenten mit den dezentralen Pull-Komponenten. Durch zentrale Steuerung wird vor der Auftragsfreigabe eine optimale Auftragsreihenfolge für die Montage bestimmt. Die Montage wird gewählt da diese am Ende der Wertschöpfungskette liegt, so kann die Liefertermintreue und die Änderungsflexibilität bestmöglich eingehalten werden. Dezentrale Steuerungsinstanzen generieren Aufträge für den Nachschub retrograd von der Montage über die Oberflächenabteilung zurück bis hin zum Rohbau. Die Montagereihenfolge wird durch ausgereifte Algorithmen, wie beispielsweise Genetische Algorithmen, festgelegt. Diese Algorithmen hängen stark mit den Rahmenbedingungen bei der Planung wie der Werkstruktur, Restriktionen, Produktionsstückzahl, und weiteren zusammen. Grundsätzlich gilt, der Kundenliefertermin hat höchste Priorität also der Auftrag mit dem geringsten Schlupf (vgl. Formel 10). Die Verwendung eines mehrstufigen Prioritätsregelsystems setzt die Aufträge in eine feste Vorgänger-Nachfolgerbeziehung, so entstand der Begriff des Perlenkettenprinzips da sich die Aufträge wie Perlen aneinanderreihen. Die erzeugte Plan-Sequenz wird im besten Fall ohne Veränderung genau in dieser Reihenfolge zum geplanten Termin abgearbeitet. Dem fest definierten Auftragsvolumen in Arbeitstagen werden immer exakt so viele neue Aufträge hinzugefügt wie auch abgearbeitet werden. Aus der Montage-Perlenkette leiten sich alle Zuliefererperlenketten ab. (Klug, 2018, S. 435–437)

## Frozen Zone

Ein eingefrorener Planungshorizont wird als Frozen Zone oder Frozen Period bezeichnet. Hier wird keine Änderung am Auftrag oder an der Reihenfolge der Aufträge mehr zugelassen. In diesem bestimmten Zeitraum vor beispielsweise der Montage muss die Perlenkette, terminlich, inhaltlich und in ihrer Reihenfolge unverändert bleiben. Die Produktionssteuerung zielt darauf ab die Aufträge so einzuplanen, dass die vereinbarten Kundenliefertermine eingehalten werden können. Durch eine lange Frozen Zone kommt es zu einer stabilen Produktionsreihenfolge und diese glättet und nivelliert das Produktionsprogramm und trägt zur Verhinderung des Bullwhip Effektes bei. Je länger die Frozen Zone desto höher ist die Planungssicherheit und desto niedriger die Kundenflexibilität bei Änderungen. Hier muss der Zielkonflikt zwischen den zwei konträren Zielen hohe Planungssicherheit und Liefertermintreue und hohe Kundenflexibilität optimiert werden. Mit einer längeren Frozen Zone nimmt die Wahrscheinlichkeit zu von der Planung abzuweichen. In der Automobilindustrie liegt der Zeitraum der Frozen Zone vor Beginn des Rohbaus zwischen vier und sechs Arbeitstagen. (Klug, 2018, S. 438–439)

Alle Aufträge, die in die Frozen Zone eingetreten sind, stehen in einer strengen Vorgänger-Nachfolgerbeziehung, die nicht geändert werden darf. Beteiligte angegliederte Produktions- und Prozessschritte müssen sich auf diese Planungsreihenfolge ausrichten. (Weyer, 2002, S. 59)

Die richtige Dimensionierung der Frozen-Zone ist ein Problem da die Vorteile durch einen möglichst langen Vorlauf den Nachteilen einer geringen Kundenflexibilität gegenüberstehen. (Klug, 2018, S. 450)

## Späte Auftragszuordnung

Eine späte Auftragszuordnung kann die Einhaltung der Liefertermine maßgeblich beeinflussen. Je später die Rohbauten eine fixe Fahrgestellnummer bekommen desto flexibler kann davor bei Problemen einzelner Aufträge in der Fertigung getauscht werden ohne, dass dies Auswirkungen auf den Auslieferungstermin hat. Wird der Auftrag erst beim Einlauf in die Montage fix zugeordnet kann davor auftragsneutral produziert werden. Alle vorherigen Auftragszuordnungen sind nur temporär und können während des Produktionsdurchlaufs geändert werden. Verletzungen der Perlenkette führen nicht zu einem Abriss, da Problemaufträge Teile aus gleichen Grundvarianten verwenden können. Das komplette Produktionssystem wird durch eine späte Zuordnung toleranter gegenüber Störungen und aufgrund der damit einhergehenden geringeren Variantenvielfalt sinkt der Bestand, weniger Kapital ist gebunden, der Sortierpuffer wird kleiner und weniger Stellfläche wird benötigt. (Klug, 2018, S. 439; Weyer, 2002, S. 62)

„Durch die radikalen Änderungen, welche mit der Einführung von stabilen Auftragsfolgen mit später Auftragszuordnung verbunden sind, ist vor allem in bestehenden Strukturen eine iterative Herangehensweise zu empfehlen, um einerseits Erfahrungen zu sammeln und andererseits Akzeptanz bei den Mitarbeitern zu schaffen.“ (Klug, 2018, S. 450)

### **Kunden-Lieferanten Prinzip der Gewerke**

Die gesamte Fertigung wird in autonome Gewerke wie beispielsweise Rohbaufertigung, Oberfläche und Montage geteilt, die durch Sortierpuffer entkoppelt sind. Jedes Gewerk hat seine individuellen Produktivitäts- und Kostenziele und ist ein selbstständig organisierter Bereich. Das Kunden-Lieferanten-Prinzip verbindet die Bereiche miteinander, indem jeder Bereich als Kunde entscheidet welcher Auftrag von dem vorherigen Bereich also dem Lieferanten abgerufen wird. Diese dezentrale Steuerungsmethode hat den Vorteil, dass die komplexe Steuerung auf einzelne kleinere lösbare transparente Steuerungsaufgaben in den Gewerken aufgeteilt werden. Eine zentrale Gesamtkoordination über den Liefertermin ist dennoch notwendig da sich ansonsten die einzelnen Gewerke auf Kosten der Termintreue optimieren. (Klug, 2018, S. 440)

### **Montagegetriebene Pull-Steuerung**

Das ursprüngliche Perlenkettenprinzip mit reiner Push-Steuerung ist sehr anfällig gegenüber Verzögerungen, deshalb finden heute überwiegend pull-orientierte Steuerungen Verwendung. Die montagegetriebene Pull-Steuerung startet bei der Montage, welche die Aufträge an ihren Lieferanten die Oberfläche weitergibt, die Oberfläche wird so selbst zum Kunden und gibt entsprechende Aufträge an den Rohbau weiter. Der von der Montage ausgehende Steuerungsimpuls setzt sich rückläufig fort. Somit wird mit dieser Steuerung nur das nachgefragt, produziert und geliefert was vom Kunden benötigt wird. Dies hat schlanke bestandsarme Materialströme zur Folge. Pull-gesteuerte und hierarchisch aufgebaute Produktionssteuerungen machen es möglich kleine, selbstregulierende und flexible Steuerungsbereiche zu schaffen. (Klug, 2018, S. 440–441)

## Sortierpuffer

Der Sortierpuffer und dessen optimale Dimensionierung nimmt eine wichtige Rolle ein, wenn es darum geht eine Produktionssteuerung mit stabiler Auftragsreihenfolge zu betreiben. Diese werden zwischen den einzelnen Produktionsbereichen angelegt und beugen Produktionsstillstände vor. Der Pull-Abruf eines internen Kunden kann nur gewährleistet werden, wenn sich die geforderten Grundvarianten im Sortierpuffer befinden. Bei Störungen eines Auftrags kann aus dem Puffer ein baugleicher Auftrag aus dem Puffer verwendet werden damit sich diese Störung nicht auf die gesamte nachfolgende Wertschöpfungskette durchschlägt. Die Größe des Sortierpuffers muss mit Bedacht gewählt werden da sich diese direkt auf die Durchlaufzeit der Aufträge auswirkt und somit den Flussgrad verschlechtert. Je größer der Sortierpuffer desto mehr Stellfläche wird benötigt infolgedessen steigen die Lagerkosten. Die Auslegung des Sortierpuffers ist die Lösung des Zielkonfliktes zwischen Lagerinvestition, Durchlaufzeit und Sequenzstabilität. (Klug, 2018, S. 445–447)

Sortierpuffer erfordern hohe Investitionen und Betriebskosten ebenso hohe Lagerbestände, die nach der Lean Philosophie Verschwendung sind. Zusätzlich werden Fehler leichter verdeckt und nicht sofort visualisiert und behoben. (Weyer, 2002, S. 101)

## Supermarkt

„Unter einem Supermarkt versteht man ein fertigungsnahes Logistiksystem für den Materialumschlag, um es portioniert, sortiert und sequenziert in kurzen Lieferzyklen produktionssynchron in der Fertigung bereitzustellen.“ (Klug, 2018, S. 224)

Ein Supermarkt stellt dem Kunden bereit was er braucht, zu jeder Zeit und in der richtigen Menge. Entnommene Ware wird sofort wieder nachgefüllt. Entnommen werden darf nur die Ware, die auch wirklich benötigt wird. Im Allgemeinen wird durch Supermärkte die Flächenproduktivität beim Materialumschlag in der Produktion verbessert. Die mengen- und variantenverursachte Komplexität in der Fertigung wird durch die aufbereitete und/oder verdichtete Bereitstellung des Materials verringert und Schwankungen bei der Bereitstellung von Teilen werden reduziert. (Klug, 2018, S. 225)

## 2.2.7 Rückmeldeprozess

Um die Aktualität der Termin- und Kapazitätspläne sicherzustellen, müssen die aktuellen Gegebenheiten und Ereignisse so zeitnah wie möglich an die PPS-Abteilung zurückgemeldet werden. Nur so ist eine realitätsnahe gute Planung möglich. Um die Auftragserzeugung, die Auftragsfreigabe und auch den Rückmeldeprozess so effizient wie möglich zu gestalten müssen digitale Programme automatisiert miteinander vernetzt sein. (Schenk, 2015, S. 14–15)

Um den Informationsfluss zwischen der Produktion und allen beteiligten Planungssystemen in beide Richtungen zu automatisieren ist ein sogenanntes Manufacturing Execution System kurz MES sinnvoll. MES ermöglicht die Vernetzung vieler Kommunikationsschnittstellen und wird so zu einer Informationsdrehscheibe, es verbindet einzelne Planungsprogramme und die physische Fertigung. Somit ist die Möglichkeit gegeben, ein aktuelles Abbild der Produktion zu schaffen um damit eine zeitnahe, situationsgerechte Fertigungssteuerung sicherzustellen. (Kletti, 2015, S. 19–20)

### 3 Darstellung des IST-Zustandes

Da für die Schienenfahrzeugindustrie kaum Literatur über die Produktion im Rohbau zu finden ist wird in diesem Kapitel der Bezug zu einem bestimmten Schienenfahrzeugunternehmen hergestellt. Beginnend mit einer kurzen Beschreibung des Unternehmens und der Erläuterung der Fertigung, werden danach die Informationswege von aktuell ablaufenden Auftragserzeugungen und Auftragsfreigaben mit Fokus auf den Rohbau näher betrachtet. Anschließend werden die Randbedingungen festgelegt und Potentiale ausgemacht, um in folgenden Kapiteln ein Konzept für die Fertigungsfeinsteuerung zu formulieren.

#### 3.1 Beschreibung des betrachteten Unternehmens

Das im Mobilitätssektor agierende Unternehmen ist ein international tätiger Konzern. Die Kernbereiche umfassen Schienenfahrzeuge, Bahnautomatisierungs- und -elektrifizierungslösungen, intelligente Straßenverkehrstechnik und damit verbundene Dienstleistungen und Schlüsselfertige Systeme. Das produzierte Fahrzeugspektrum reicht von Metros, Straßen- und Stadtbahnen über Reisezugwagen, Regional- und Hochgeschwindigkeitszügen bis hin zu Lokomotiven und Fahrzeugen für einen fahrerlosen Betrieb. Da sich die vorliegende Arbeit auf eine Fahrzeugproduktion verschiedener Schienenfahrzeuge in einem bestehenden Werk bezieht, wird diese im Folgenden erläutert.

##### 3.1.1 Fahrzeugproduktion

Der allgemeine Produktionsprozess eines Schienenfahrzeugs wird in die vier großen Bereiche Rohbau, Oberfläche, Montage und Zubildung/Inbetriebsetzung (IBS) unterteilt. Jeder Bereich wird mit einem Meilenstein abgeschlossen, in folgender Abbildung durch das gelbe Quadrat gekennzeichnet.

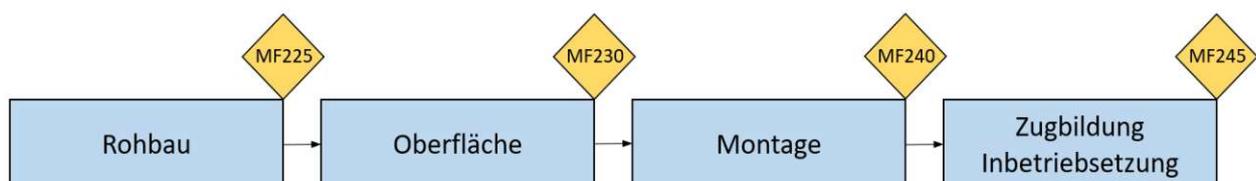


Abbildung 13: allgemeiner schematischer Produktionsprozess inklusive Meilensteinübersicht

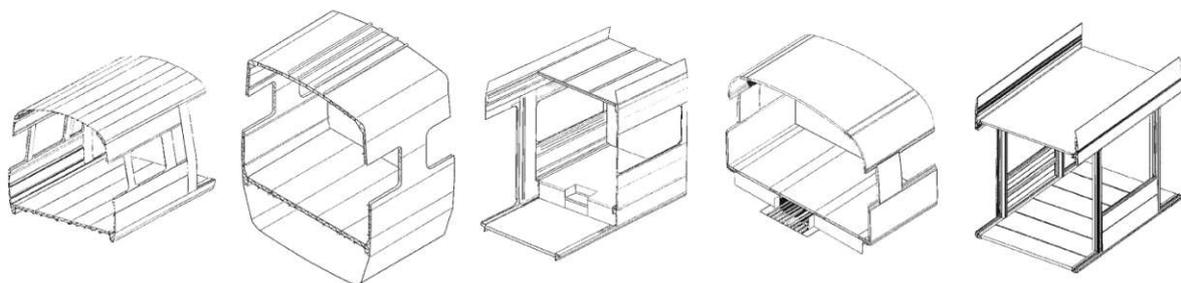
Beginnend mit dem Bereich der Rohbaufertigung, in dem die Einzelkomponenten gefertigt und bearbeitet werden, um sie danach zu Unterbaugruppen zusammenschweißen, die wiederum die Kompetenten der Hauptgruppen Dach, Untergestell, Stirn- und Seitenwände bilden. Bei Einzelkomponenten aus Aluminium ist die spanende Bearbeitung der Profile hervorzuheben. Großprofile werden durch spezielle automatisierte Fräsvorrichtungen auf die richtige Länge gebracht und Durchbrüche sowie Schweißnahtvorbereitungen werden eingefräst. Beim Zusammenbau der Einzelkomponenten zu Unterbaugruppen werden Schweißportale und automatische Schweißroboter eingesetzt. Diese Unterbaugruppen werden teilweise ein weiteres Mal mit der Fräsmaschine bearbeitet. Um die beim Fräsen entstandene Kerben und spitzen Übergänge zu eliminieren, müssen Aluminiumteile auf Ausfertigungsplätzen fein manuell nachbearbeitet werden. Im sogenannten Aufbaustand werden die Hauptbaugruppen zusammengesetzt, um danach einen Wagenkasten zu bilden. Sobald der Wagenkasten fertig zusammengeschweißt und ausgefertigt ist, wird dieser vermessen und die Schweißnähte werden auf ihre Qualität geprüft. Diese Prüfung wird Meilenstein MF225 genannt. Bei positiver Prüfung verlässt der Wagenkasten die Rohbaufertigung und ist freigegeben für den nächsten Bereich der Oberfläche. Da sich diese Arbeit auf den Rohbau und im speziellen den Alu-Rohbau fokussiert wird dieser Teil im Folgenden noch näher beschrieben.

Der Oberflächenprozess umfasst das Sandstrahlen und Grundieren ebenso das Kitten und Schleifen mehrerer Schichten sowie das Lackieren der erforderlichen Farben und Lacke. Nach dem letzten Trocknen ist die Oberflächenbehandlung abgeschlossen und es erfolgt erneut eine Qualitätsprüfung und Abnahme des Kunden mit dem Meilenstein MF230. Ist die Prüfung positiv, erfolgt die Freigabe für den nächsten Bereich der Montage.

Der Montageprozess gliedert sich in mehrere Montageabschnitte, z.B. Moab1 bis Moab14, diese beinhalten den kompletten Innenausbau und die gesamte Endmontage. Die Montage umfasst das Einbauen von Scheiben, Türen, Fußböden, Sitzen, Isolierungen, Kabelkanälen, Schaltschränken und vielen zusätzlichen Montageteilen. Nachdem der Innenausbau abgeschlossen ist und alles montiert wurde, erfolgt die Endmontage mit dem Zusammensetzen von Wagenkasten und Fahrwerk (Drehgestell). Ab diesem Zeitpunkt ist der Wagenkasten schienengebunden. Vor diesem sogenannten Aufsetzen steht der Wagenkasten auf Hilfsdrehgestellen oder Montageböcken. Der Montagebereich wird beendet mit einer elektrischen und mechanischen Montageendprüfung und einer Qualitätsprüfung mit dem Meilenstein MF240.

Im letzten Bereich der Zugbildung und IBS werden die zum Zugverband gehörenden Wagenkästen elektrisch und mechanisch miteinander verbunden und somit ein Zug gebildet. Dieser wird anschließend statisch in Betrieb gesetzt, indem Bremsen, Beleuchtung, Wagensteuerung, Klimaanlage, Heizung, Türeinrichtungen und noch einiges mehr geprüft werden. Darauf folgt der Meilenstein MF245 der die finale Qualitätsprüfung darstellt und bestätigt das der Zug das Werk verlassen darf, um auf eine Teststrecke überstellt zu werden, wo die dynamische Inbetriebsetzung stattfindet, worauf die Übergabe an den Kunden erfolgt.

Im betrachteten Produktionswerk werden Wagenkästen aus Stahl und aus Aluminium gefertigt. Diese Arbeit bezieht sich auf die Rohbaufertigung der Aluminiumprojekte, die mit der sogenannten Aluminium-Strangpressprofilbauweise bzw. Integralbauweise gefertigt werden. Auf die Differentialbauweise aus Stahl, bei der ein tragendes Stahlgerippe aus gekanteten Blechen mit dünnen Deckblechen verkleidet wird, wird nicht näher eingegangen. Die Aluminium-Strangpressprofilbauweise ist eine gängige und gleich weitverbreitete Methode wie die Stahldifferentialbauweise, um den Rohbau verschiedenster Schienenfahrzeuge herzustellen. Einzelne Strangpressprofile werden durch Längsnähte zu einer Fahrzeugröhre zusammengeschweißt. Die verwendeten Aluminiumlegierungen eignen sich sehr gut fürs Strangpressen und zeichnen sich durch ihr geringes Gewicht und eine gute Bearbeitbarkeit aus. Somit können großräumige Hohlkammerprofile hergestellt werden, die eine Formgebung erlauben, welche die nötige Stabilität gewährleistet, um den gegenüber Stahl niedrigeren E-Modul auszugleichen. Höhere Materialkosten des Aluminiums werden meist durch die kostengünstigere Produktion kompensiert. (Bender & Göhlich, 2020, S. 1104; Ihme, 2019, 242-247)



**Abbildung 14: Fahrzeugkästen in Aluminium-Strangpressprofilbauweise von Produzent ALCAN (Bender & Göhlich, 2020, S. 1104)**

Mit Hilfe des geplanten Produktionsprogramms wurde das geplante Fertigungskonzept im Alu-Rohbau statisch dimensioniert. Im Moment werden vier unterschiedliche Metroprojekt aus Aluminium gefertigt, die sich in Konfiguration und Konstruktion der Wagenkästen sowie der Produktionsmenge unterscheiden.

Hauptbaugruppen wie Untergestell, Dach und Stirn- und Seitenwände sind bei allen Projekten vorhanden, die Ausführung und Anzahl der Unterbaugruppen variiert von Projekt zu Projekt.

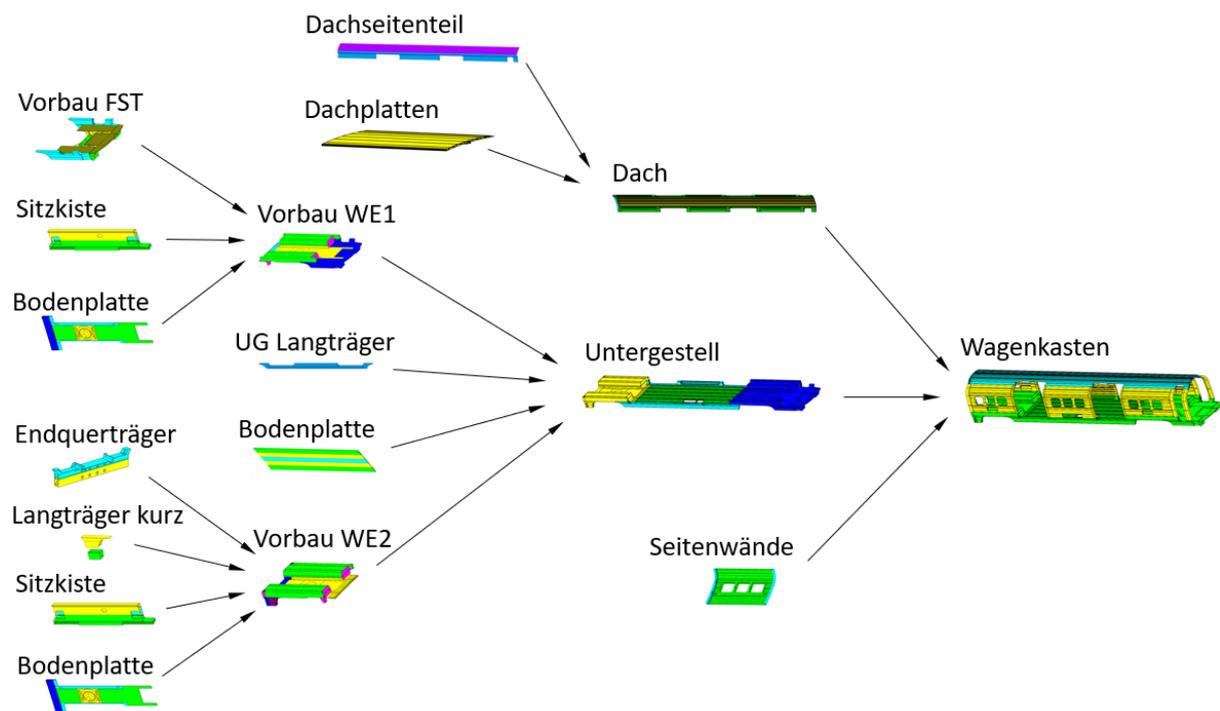


Abbildung 15: Wagenkastenstruktur Haupt- und Unterbaugruppen

Die Fertigung der Alu-Rohbauten findet in fünf Produktionshallen statt. In den Produktionshallen wird die Fertigung in Fertigungszellen unterteilt. In jeder Fertigungszelle werden bestimmte Baugruppen von teils mehreren Projekten gefertigt. Notwendige Werkzeuge und Ausrüstungen können so ohne Zusatzaufwand für mehrere Projekte verwendet werden. Bei Bearbeitung mehrerer Projekte auf einer Maschine muss diese bei zwei aufeinanderfolgenden unterschiedlichen Projekten meist umgerüstet werden.

### 3.1.2 Fertigungsabläufe (Wertströme im Alu-Rohbau)

Zu Beginn der Rohbaufertigung müssen Komponenten für den Vorbau und danach der Vorbau selbst zusammengebaut werden. Ebenfalls werden Komponenten und Langträger des Untergestells geschweißt, gefräst und ausgefertigt. Danach wird das Untergestell zusammengebaut, um es daraufhin in die Oberflächenabteilung zu liefern die es fertig lackiert wieder zurückschickt, um zusammen mit den Stirn- und Seitenwänden den fertigen Wagenkasten zu bilden. Der Wagenkasten wird geschweißt, vorbereitet und freigegeben um ihn, zum nächsten Kunden, in den Bereich der Oberfläche zu transportieren. Der Rohbauzusammenbau ist eine Mischung aus Fließ- und Werkstattfertigung. In den Hallen werden manche Bereiche bzw. Arbeitsplätze für mehrere Projekte benutzt, andere sind fixen Projekten zugewiesen oder müssen umgebaut werden, um ein anderes Projekt an demselben Platz fertigen zu können. Es erfolgt keine langfristige Feinplanung der variabel verwendbaren Plätze in der Rohbaufertigung. Die maximale Durchlaufzeit wird immer von gewissen hintereinander folgenden Prozessschritten bestimmt, dieser Pfad der Prozesse, die die Durchlaufzeit bestimmen wird als kritischer Pfad bezeichnet.

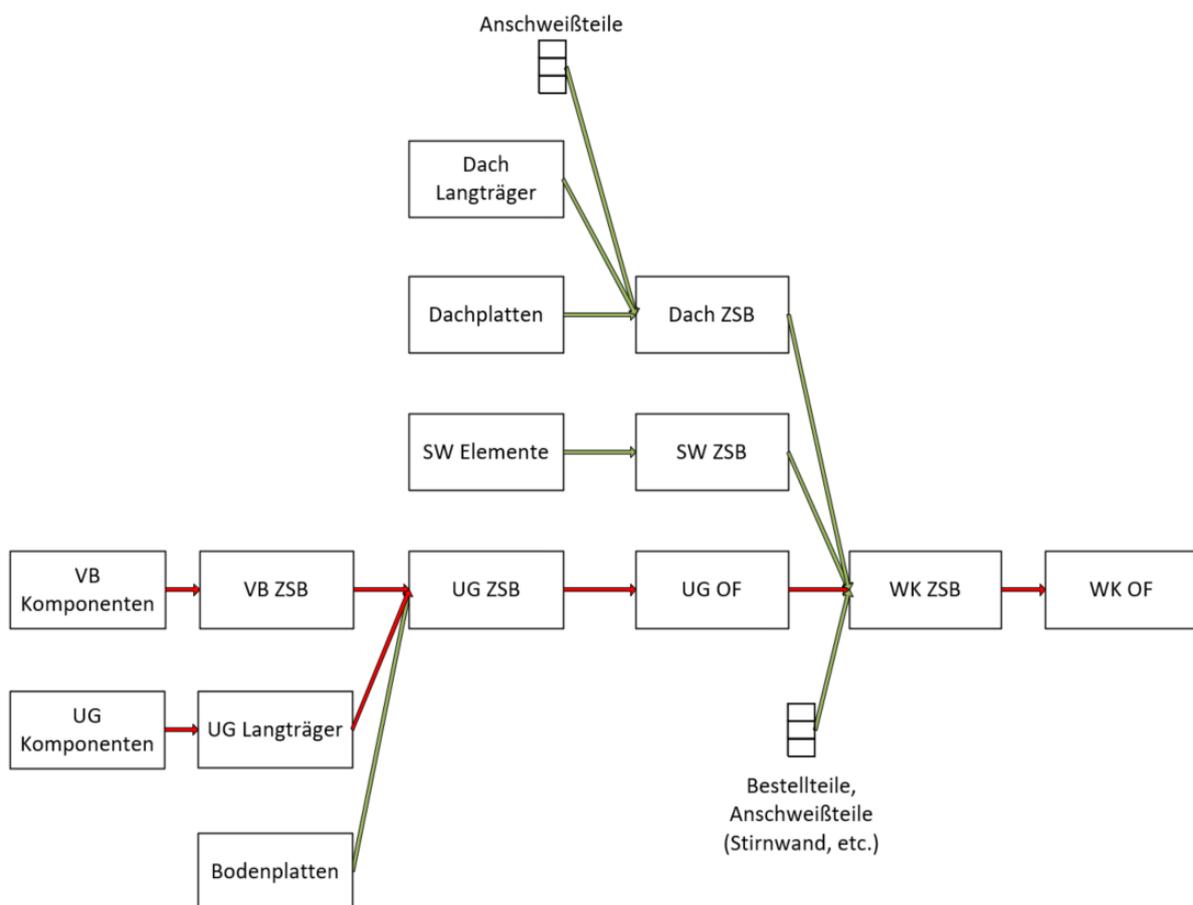


Abbildung 16: roter kritischer Pfad

In Abbildung 16 ist der grobe Fertigungsablauf der Komponenten dargestellt die rot markierte kritische Pfad visualisiert die Prozesse, die die gesamte Durchlaufzeit bestimmen. Meist verläuft der kritische Pfad bei Schienenfahrzeugen entweder über den Vorbau oder über die Fertigung der Langträger. Auszuschließen ist, dass der Pfad über die Seitenwand oder den Dachprozess die Gesamtdurchlaufzeit bestimmt.

### **3.2 IST-Wertstrom der Alu-Rohbaufertigung mit Fokus auf die Informationswege der Produktionsplanung und -steuerung**

Die Planung der Produktion, erfolgt auf Wagenkastenebene projektbezogen also für jedes Projekt einzeln über alle vier großen Fertigungsbereiche: Rohbau, Oberfläche, Montage, Zugbildung (siehe Abbildung 13). Diese Pläne werden wöchentlich, rollierend in Besprechungen grob aufeinander abgestimmt und in dem Planungsprogramm Primavera aktualisiert. Jeder Plan enthält damit alle größeren Fertigungsschritte, die dieses Projekt durchläuft, vom Zusammenschweißen der einzelnen Komponenten am Beginn des Rohbaus bis zur letzten Qualitätsprüfung und dem Roll Out aus dem Werk und dass für alle Wagenkästen, die für dieses Projekt gefertigt werden. Die detaillierten Arbeitsaufgaben der Fertigungsschritte, die durch die Arbeitspläne definiert sind, werden nicht von der PPS Abteilung geplant. Somit erfolgt in der PPS Abteilung keine Feinplanung. In den folgenden Abbildungen ist ein Ausschnitt eines solchen Terminplans beispielhaft grob schematisch ersichtlich. Eingebildet ist der Rohbau eines bestimmten Zuges. Auf der rechten Seite ist der Durchlauf der einzelnen Arbeitspakete als Gantt-Diagramm dargestellt und links sind die Struktur, die Bezeichnungen, die Nummern und das Start- und Enddatum der jeweiligen Prozesse dargestellt. Jeder Wagenkasten wird so, unabhängig von anderen, mit seinen groben Prozessen durchgeplant.

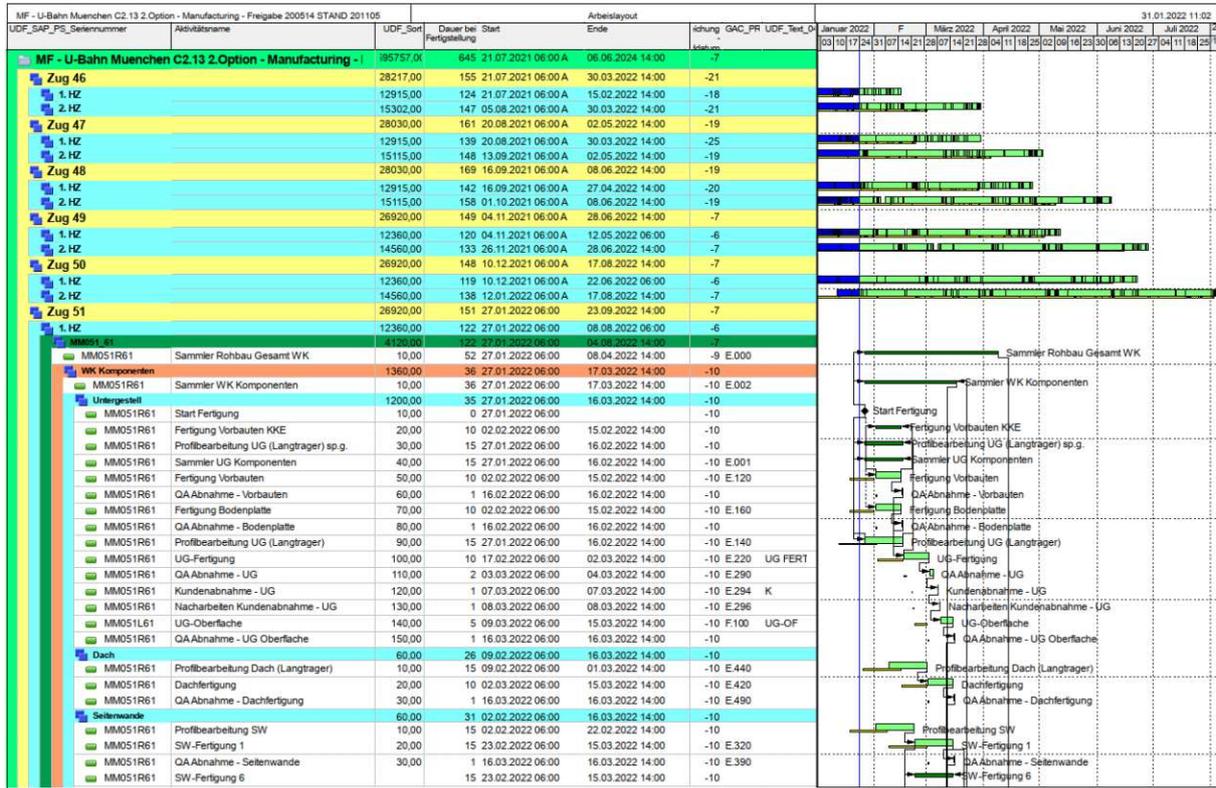


Abbildung 17: Ausschnitt 1 Terminplan Primavera



Abbildung 18: Ausschnitt 2 Terminplan Primavera

Im dargestellten IST-Wertstrom (siehe Abbildung 19) sind die wichtigsten Fertigungsschritte eingezeichnet. Die gesamte Fertigung richtet sich grundsätzlich nach den Terminplänen der einzelnen Projekte.

Da die Terminpläne der Projekte für sich einzeln geplant und zwischen den Fertigungsschritten nur kleine Zeitpuffer eingeplant sind, kann es zu Terminüberschneidungen kommen. Zwei Projekte können so am selben Tag denselben Platz benötigen. Welches Projekt dann gefertigt wird bestimmt der Meister. Dies führt fürs zurückgestellte Projekt zu Verzögerungen bzw. Wartezeiten.

Um Terminplanüberschneidungen bzw. Projektkonflikte zu lösen, werden täglich verschiedene Besprechungen abgehalten. Die ablaufenden Informationswege sind in folgender Abbildung ersichtlich und werden anschließend näher erläutert. Eine vergrößerte Version der folgenden Abbildung ist im Kapitel 13 Anhang zu finden.

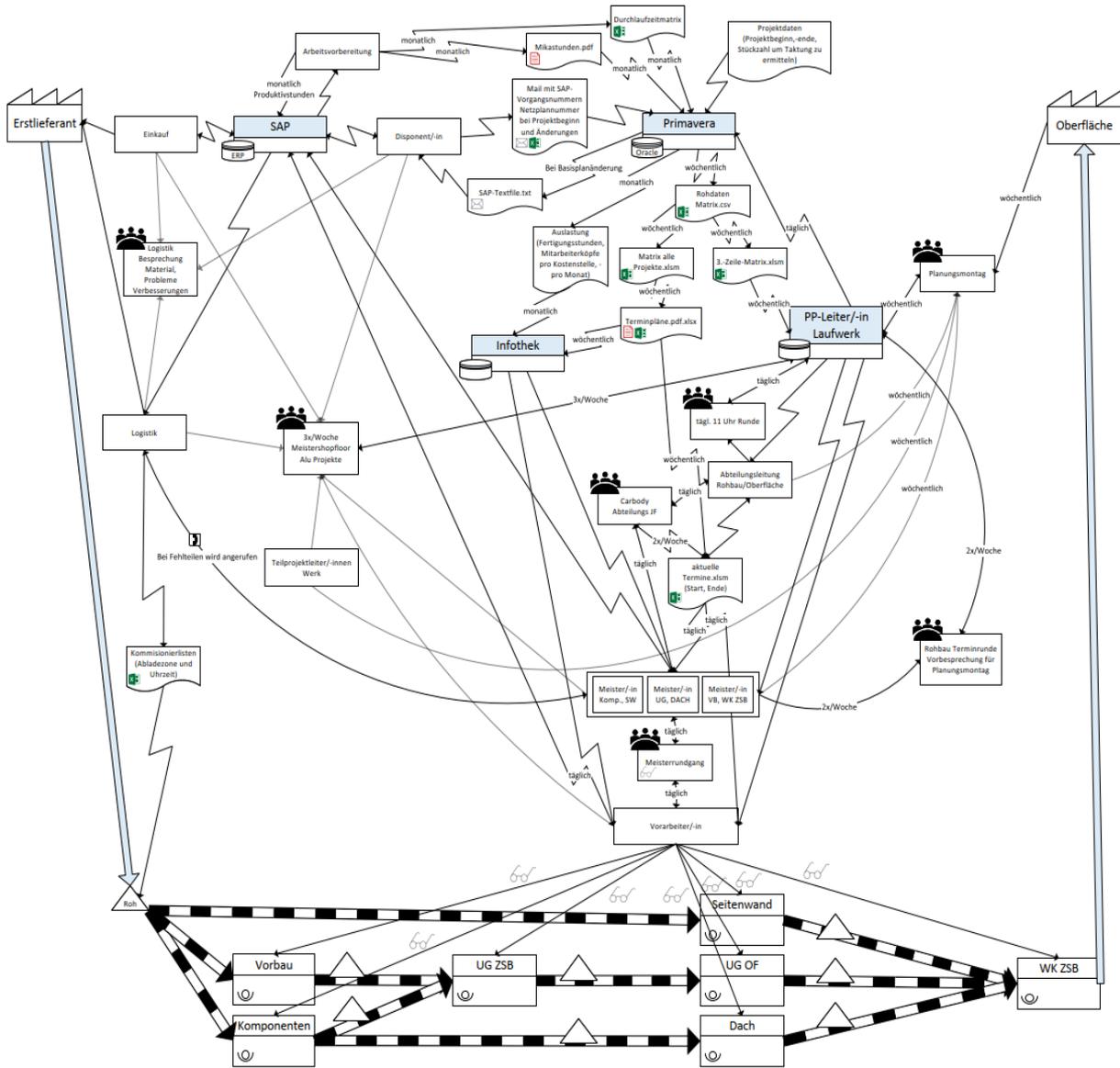


Abbildung 19: Ist-Wertstrom der Rohbaufertigung, Fokus: Informationswege

Primavera und die daraus erstellten Terminpläne stellen das Herzstück der Planung dar. Dieser Terminplan wird mit den Grunddaten des jeweiligen Projekts erstellt. Die Projektdaten beinhalten die Bedingungen die im Rahmen des mit dem Kunden geschlossenen Vertrags vereinbart wurden, unter anderem die festgelegten Liefertermine und die Anzahl der Wagenkästen des Projekts, um die Taktung des Terminplans zu bestimmen.

Zusätzlich fließen die von den Disponenten vorgegebenen SAP-Vorgangsnummern und Netzplannummern ein, um danach die geplanten Termine der Fertigungsschritte pro Wagenkasten in SAP mit dem benötigten Material verknüpfen zu können.

Die geplanten Termine des Basisterminplans inklusive der Nummern gelangen über das SAP-Textfile über die Disponenten in SAP. Bei einer Änderung des Basisterminplans wird ein neues SAP-Textfile für die Disponenten aus Primavera erzeugt. SAP errechnet sich mit den Daten der Durchlaufzeitmatrix die Starttermine.

Der/die Disponent/-in erstellt einen Planauftrag in SAP, wann welcher Auftrag zu fertigen ist. Drei Wochen vor dem Planauftragsbeginn wird der Planauftrag in einen Fertigungsauftrag umgewandelt.

Die von der Arbeitsvorbereitung erarbeiteten Mitarbeiterkalkulationsstunden kurz Mikastunden sowie die Durchlaufzeitmatrix werden ebenfalls im Terminplan in Primavera hinterlegt, um zu wissen für welchen Arbeitsplatz wie viele Mitarbeiter/-innen in welchem Stundenausmaß benötigt werden und wann und wie lange Arbeitsschritte stattfinden. Um daraus monatlich die Auslastung zu erstellen wie viele Fertigungsstunden möglich sind und wie viele Mitarbeiter/-innen pro Kostenstelle und Monat benötigt werden. Damit ein/-e Meister/-in oder Gruppenleiter/-in grob weiß welche Arbeitsleistung auf den jeweiligen Fertigungsbereich zukünftig zukommt, um sein Personal zu planen.

Die Termine aller Projekte werden mittels „Rohdaten Matrix“ aus Primavera ausgeleitet, ein Excelfile, das alle Termine aus Primavera enthält. Diese Rohdaten werden dafür verwendet, um eine „Matrix aller Projekte“ zu erstellen die wiederum Grundlage für die Terminpläne pro Projekt ist. Diese Terminpläne werden für die Meister/-innen und Gruppenleiter/-innen auf der Infothek, einer Datenbank in Ordnerstruktur, zur Verfügung gestellt. Aus der Rohdaten Matrix wird auch die „3.-Zeile-Matrix“ erstellt, in der die SOLL-Termine (Start- und Endtermine wie im Terminplan) übersichtlich pro Projekt und Fertigungsschritt aufbereitet sind, erweitert mit einer zusätzlichen leeren Zeile, um die IST-Termine eintragen zu können und diese mit den SOLL-Terminen zu vergleichen. Diese leere 3.-Zeile wird von den jeweiligen Terminplanern/-innen bei den Besprechungen befüllt oder in der Besprechung des Planungsmontags.

Der Meistershopfloor für alle Alu-Projekte bei dem die zuständigen Terminplaner/-innen, Gruppenleiter/-innen, Meister/-innen, Teilprojektleiter/-innen, die Logistik, die Qualitätsabteilung, der Einkauf und der/die Disponent/-in teilnehmen, wird dafür genutzt, um die momentanen Probleme wie beispielsweise fehlendes Material, Stellplatzprobleme, Personal, Unter- bzw. Überkapazität und die Auswirkungen auf den Terminplan zu besprechen, um danach die IST-Termine in die „3.-Zeile-Matrix“ einzutragen. Der/die Terminplaner/-in passt danach falls notwendig den Terminplan, an den IST-Stand an. Dies hat nur einen informativen Charakter da die Rückmeldungen am „Planungsmontag“ schlagend sind für die Änderung im Terminplan, der danach aktualisiert wird.

In der täglichen „11Uhr Runde“ mit allen Abteilungsleitern/-innen werden die kritischen Termine besprochen und von jedem Abteilungsleiter und jeder Abteilungsleiterin aus seiner Sicht selbst eingeschätzt, ob alles in Ordnung ist oder nicht. Dies wird in Form von Ampelfarben dargestellt und vom Geschäftsführer oder der Geschäftsführerin des Werks abgefragt. Hier wird auf die Termine der „3.-Zeile-Matrix“ Bezug genommen und die Abweichung von SOLL also dem Basisplan und IST beachtet, besondere Bedeutung haben hier die Abschlussmeilensteine wie beispielsweise der MF225 für den Rohbaubereich. Dies geschieht für jedes Projekt und jeden Bereich. Damit wird kommuniziert welche Probleme kritisch sind und wie jeder Abteilungsleiter oder jede Abteilungsleiterin die Lage einschätzt, um danach eine mögliche Lösung zu besprechen.

Der „Planungsmontag“ wird initiiert vom Fertigungsleiter/-in Werk. Hier werden die Bereiche Rohbau, Oberfläche und Montage zeitlich gestaffelt über mehrere Stunden mit den jeweiligen zuständigen Meistern/-innen, Abteilungsleitern/-innen und Teilprojektleitern/-innen der Projekte besprochen und die Termine rückgemeldet und in die „3.-Zeile-Matrix“ eingetragen. Diese Termine haben Vorrang und überschreiben die des Meistershopfloors und sind für die Terminplaner/-innen bindend. Auf Basis dieser Informationen werden die Terminpläne angepasst und für alle zur Verfügung gestellt.

Die Meister/-innen oder Vorarbeiter/-innen buchen in SAP die Fertigungsaufträge um das Material geliefert zu bekommen. Bei den Fertigungsaufträgen sind die 3D Arbeitspläne, Zeichnungen, Materialstand, Fertigungsstunden und Arbeitsplätze sowie ebenfalls Start- und Endtermine hinterlegt. Zurückgemeldet wird, welche Aufträge abgeschlossen sind aber auch Änderungsmeldungen, Störungsmeldungen und Klärungsanforderungen.

Auch die Logistik hat eine Besprechung wo Themen wie Materialfluss, Personal, Kapazität der Lagerfläche, offene Prüflose der Kontrolle, Schichtarbeit, Probleme, Verbesserungen und welche Mitarbeiter/-innen welche Informationen benötigen mit Mitarbeitern/-innen von Einkauf, Disposition, Lager, Reklamation und

Wareneingangsprüfung besprochen werden. Projektverantwortliche Disponenten/-innen erstellen den Fertigungsauftrag in SAP und die Vorarbeiter/-innen in den Hallen bestätigen diesen, sobald das Material gebraucht wird. Aus SAP wird von der Logistik die „Kommissionierliste“ erzeugt auf der die Abladezone und die Uhrzeit für das zu liefernde Material steht. Derjenige oder diejenige der/die den Fertigungsauftrag bestätigt muss auch Uhrzeit und Abladestelle angeben sonst ist diese nicht für die Logistik ersichtlich und muss nachträglich telefonisch geklärt werden. Laut Logistik wird viel Material abgerufen und erst nach telefonischem Abruf geliefert.

„Carbody Abteilungs Jour fixe“ dient zur Besprechung von Problemen, Terminen und Zielen zwischen den Meistern/-innen und der Abteilungsleitung des Rohbaus. Jeder Tag hat ein anderes Hauptthema. Montag und Donnerstag werden die Termine aus der Exceldatei aktuelle Termin besprochen und IST-Termine bekanntgegeben und geplant.

Die „Rohbau Terminrunde“ findet mit den Terminplanern/-innen, Meistern/-innen statt und dient als Hilfe und zur Vorbesprechung der Termine der „3.-Zeile-Matrix“ für den „Planungsmontag“.

Der „Meisterrundgang“ findet täglich in der entsprechenden Halle statt, hier bespricht der Meister oder die Meisterin mit seinen Vorarbeitern/-innen den aktuellen Stand vor Ort. Ob für die nächsten anstehenden Arbeiten alles vorbereitet ist. Die Vorarbeiter/-innen berichten, ob das benötigte Material nach der Datei „aktuelle Termine“ vorhanden ist und geben dem Meister oder der Meisterin Bescheid. Im Anschluss findet täglich das „Carbody Abteilungs Jour fixe“ statt wo die Meister/-innen der Alu-Rohbaufertigung mit der Abteilungsleitung die wichtigen Themen weiterleiten und diese, wenn nötig weiter eskalieren.

Mit der Exceldatei aktuelle Termine wird in der Meisterebene nochmals eine eigene Art der 3.-Zeile-Matrix erstellt. Die Termine des Basisterminplans und der wöchentlich aktualisierten Terminpläne werden eingelese und ebenfalls wöchentlich aktualisiert. Aus dieser lesen die Meister/-innen und Vorarbeiter/-innen die für sie wichtigen Endtermin aus und reihen bzw. priorisieren damit die Wagenkästen bzw. ihre Komponenten. Diese Datei dient den Meistern/-innen als Grundlage um die Fertigung zu steuern. Teilweise tragen die Meister/-innen Termine zwischen den Start- und Endterminen, die aus den Terminplänen der einzelnen Projekte kommen in diese Liste ein, um Zwischenschritte zu planen.

Da im oberen gesamten Wertstrom in Abbildung 19 alle Meisterbereiche zusammengefasst dargestellt sind, jeder Meister oder jede Meisterin in seinem/ihren Bereich aber etwas andere Vorgänge hat, soll hier nochmals der Informationsfluss von den Meistern/-innen bis zum einzelnen Bereich dargestellt werden.

Der/die Meister/in, der für die Komponenten verantwortlich ist, zieht wie jeder der anderen auch seine Informationen hauptsächlich aus der Exceldatei „aktuelle Termine“. Dieser erstellt dann eine Terminübersicht für die Komponenten und macht die Mitarbeiterplanung. Diese Planung erhalten die zwei Vorarbeiter/-innen, die wiederum die Termine an Tafeln bei den Arbeitsplätzen anbringen. Auf diesen Whiteboards werden auch wichtige Informationen für die Arbeiter und Arbeiterinnen aufgeschrieben. Ebenso erfolgt täglich ein Meisterrundgang mit den Vorarbeitern und Vorarbeiterinnen durch die Produktion.

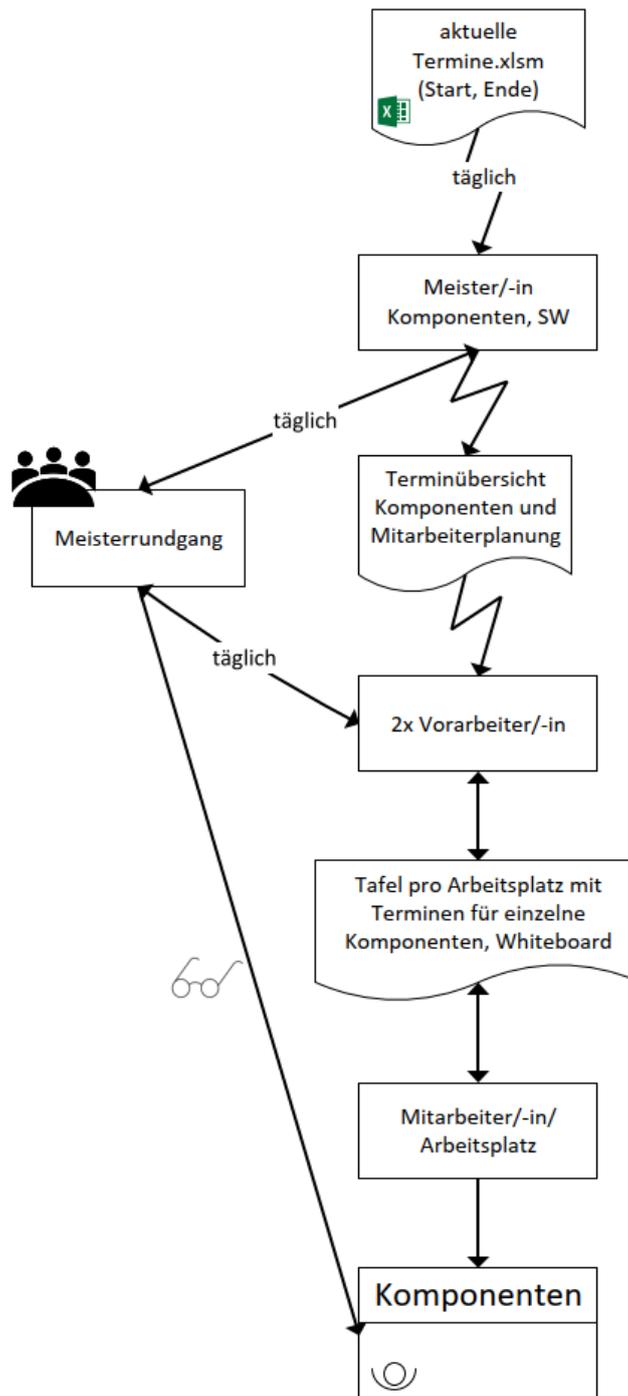


Abbildung 20: Informationsfluss Komponenten

Ebenso ersichtlich ist in Abbildung 19 der Informationsfluss von Untergestell Zusammenbau und Dach.

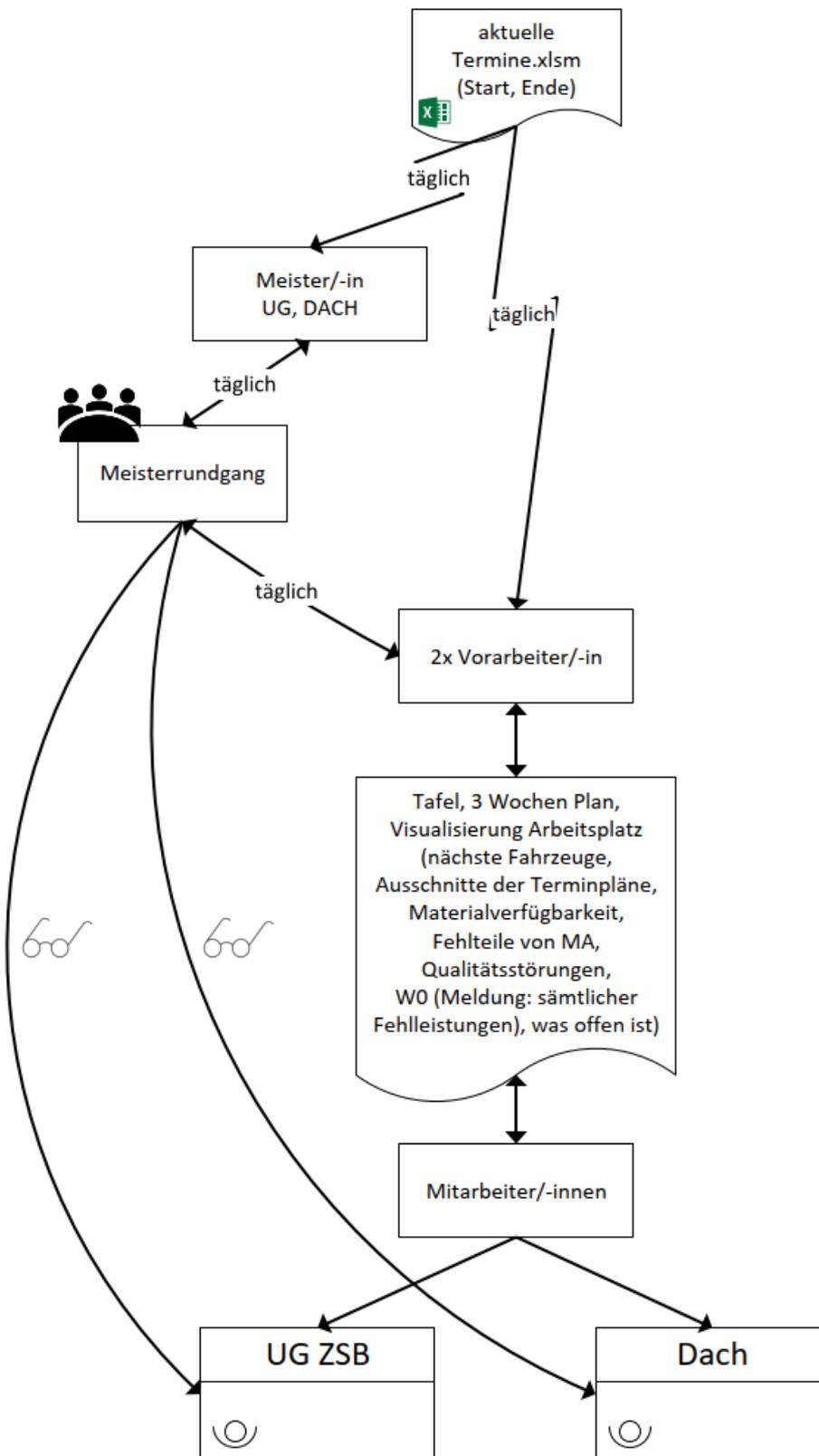


Abbildung 21: Informationsfluss UG ZSB, Dach

Abbildung 20 zeigt den Informationsfluss des Vorbaus und des Wagenkasten Zusammenbaus, hier werden die Informationen teilweise direkt von den Vorarbeitern und Vorarbeiterinnen aus der Exceldatei „aktuelle Termine“ gezogen.

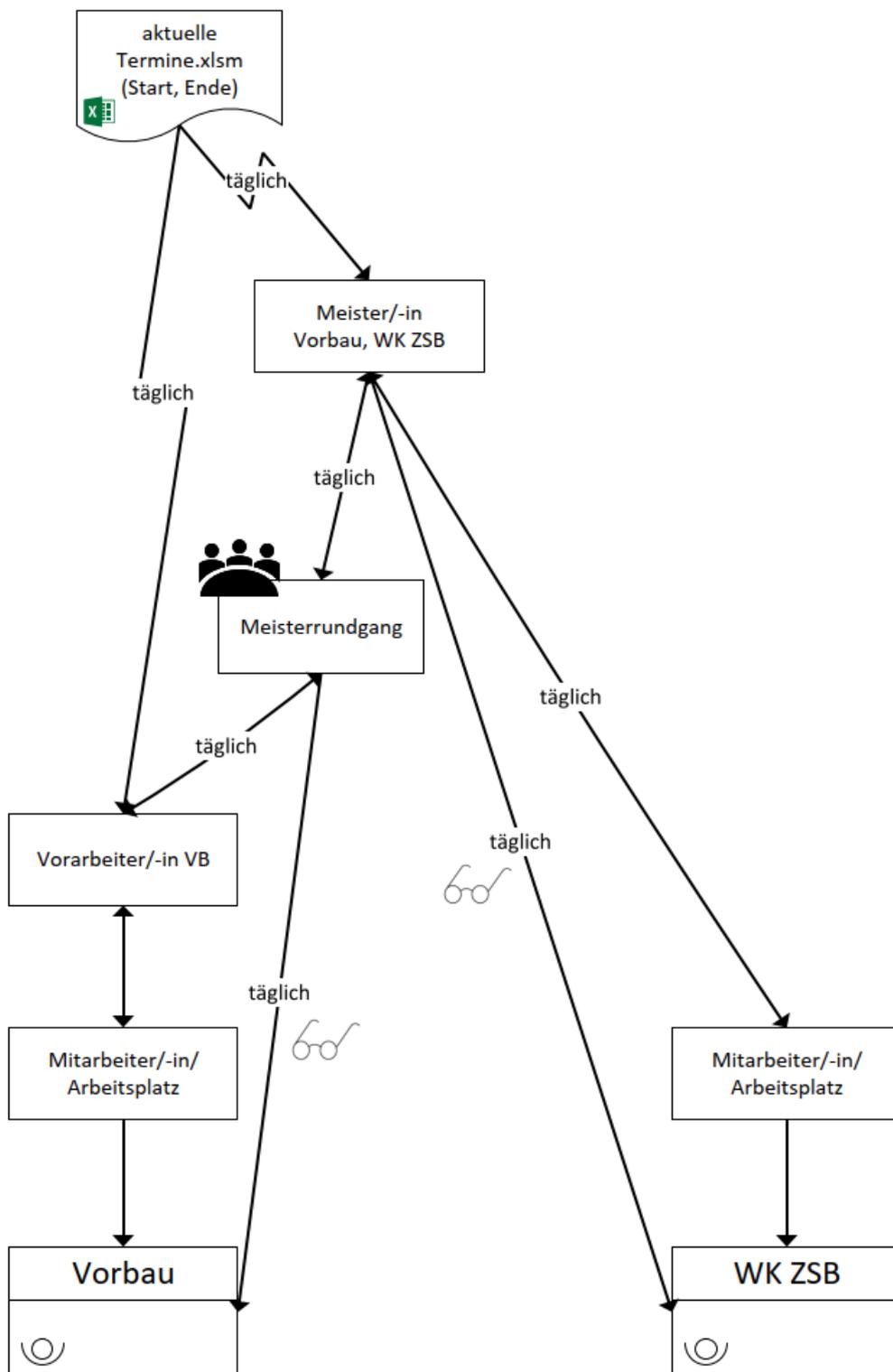


Abbildung 22: Informationsfluss Vorbau, WK ZSB

### 3.3 Randbedingungen und Anforderungen an die Feinsteuerung

Im folgenden Kapitel werden die grundlegenden Anforderungen und Bedingungen für das Feinplanungs und -steuerungskonzept festgelegt. Diese setzen den Rahmen, in dem die Zielstellung der Arbeit erreicht werden soll.

Eine Monetäre Betrachtung der eingesetzten Maßnahmen wird nicht vorgenommen. Das Konzept für das geplante Produktionssystem orientiert sich an den bereits vorhandenen statischen und dynamischen Berechnungen, die auf Basis eines bestehenden Produktionsprogramms durchgeführt wurden. Die Transporte zwischen Arbeitsstationen und die Materialbereitstellung wird als gegeben angenommen. Der Fokus liegt darauf, wie die Produktion bestmöglich gesteuert werden kann, um die Termintreue möglichst hochzuhalten, Bestände zu minimieren und eine optimale Auslastung sowie Wartung der Arbeitsstationen zu gewährleisten. Dies soll durch ein Feinsteuerungskonzept ermöglicht werden welches bestmöglich in die Realität umgesetzt werden kann. Eine grundlegende Randbedingung ist das kaum Fläche für Pufferbestände zwischen den Bearbeitungsschritten möglich ist.

Um kürzere Durchlaufzeiten zu schaffen, müssen alle Arbeitsschritte genau aufeinander abgestimmt werden damit kein Arbeitsschritt auf den vorherigen warten muss. Um diese vielfältigen Abhängigkeiten zwischen den Arbeitsschritten auf kleinstem Raum zu steuern, bedarf es eines MES System da dies allein mit Gedanken und Erfahrung kaum möglich ist. Momentan sind die Durchlaufzeiten so lange, so dass genug Zeit bleibt, Teile zu fertigen die erst viel später gebraucht werden und so lange werden diese gelagert. Dies erhöht den Bestand und benötigt Platz, der in einem optimalen Ziellayout nicht mehr zur Verfügung steht, da Teile dann nur mehr auf Plätzen liegen wo auch tatsächlich gearbeitet wird. Allein mit Start- und Endterminen werden diese komplexen Abhängigkeiten zwischen gemeinsam benutzen Stellplätzen bzw. Arbeitsplätzen, unterschiedlichen Projekttypen und verschiedenen Zykluszeiten der Projektteile, wenn mehrere Projekte auf gleichen Maschinen und Arbeitsplätzen gefertigt werden sollen, nicht möglich sein. Um zu wissen, wann welcher Teil verschoben werden muss und wie Tätigkeiten auf Stellplätzen eingetaktet werden, müssen alle Vorgänge exakt getimt werden.

Es gibt zahlreiche Softwarelösungen, die eine Durchlaufterminierung unterstützen mit langfristigem Blick sollte beachtet werden, dass manche sehr gut in ein MES eingebunden werden können und andere ihre Grenzen hinsichtlich Vernetzung mit anderen möglichen Programmen bald erreicht haben. Es sollte ein Anbieter gewählt werden, der schon jetzt alle Softwarelösungen bieten kann, die in Zukunft gewollt sind, um Schritt für Schritt Richtung MES zu gehen.

Für eine exakte Feinplanung und -steuerung sind die Stammdaten von sämtlichen Maschinen, Werkzeuge, Arbeitsstationen, Personal, Produktionsprogramm, Terminen, Lastdaten, Belegungszeiten, Arbeitsvorgangfolgen und Auftragsnetze notwendig. Um den IST-Zustand abbilden zu können wird eine Betriebs- und Maschinendatenerfassung benötigt.

### **Anforderungen und Randbedingungen:**

- Bei Störungen und Veränderungen soll möglichst schnell ein funktionierender neuer Produktionsplan erstellbar sein
- Möglichst wenig Steuerungsaufwand
- Einbinden verbrauchsorientierter Produktionssteuerungsstrategien
- Projektterminplan muss eingebunden werden
- Alle Beteiligten müssen zeitnah informiert werden und stets aktuelle Produktionspläne zur Verfügung haben
- Schichtbetrieb muss einstellbar sein für Manuelle Arbeitsplätze und automatisierte Arbeitsstationen
- Da ein großer Teil der Arbeiten an Stellplätzen stattfindet, wo kaum Rüstzeiten aufkommen, hat die Rüstoptimierung eine untergeordnete Rolle
- Materialeinkauf und -abrufe werden nicht betrachtet
- Begrenzung des Konzeptes auf den Rohbau und darin nur auf die Aluminiumprojekte vom Beginn der Komponentenfertigung bis hin zur Qualitätsprüfung der fertig zusammengeschweißten Wagenkästen
- Daten aus der vorliegenden statischen und Dynamischen Planungen und der Simulationen
- Anpassbarkeit der Steuerung
- Gute Informationserfassung und Verarbeitung

### 3.4 Erkenntnisgewinn und Potentiale

Die aktuellen Informationswege zur Auftragserzeugung und Auftragsfreigabe sind sehr verworren. Aus der Planungsebene kommt ein guter Grundplan pro Projekt, doch die Informationen aus der Fertigungsebene kommen nur langsam und über verschiedenste Wege in den Plänen an. Wie auch im IST-Wertstrom in Kapitel 3.2 ersichtlich, versucht die Terminplanung der Projekte über verschiedene Besprechungen Informationen über die aktuelle Situation in der Fertigung zu bekommen. Die tägliche sogenannte „11 Uhr Runde“ und das dreimal pro Woche stattfindende „Meistershopfloor“ sowie der wöchentliche „Planungsmontag“ werden dazu verwendet Informationen auszutauschen und den aktuellen Fertigungsfortschritt rückzumelden. Es wirkt so als würden die Fertigungsebene und die Planungsebene parallel arbeiten. In der Fertigungsebene werden über die Exceldatei „aktuelle Termine.xlsm“ selbst nochmal die Informationen umgeformt, um damit arbeiten zu können. Dies sollte von der Planungsebene direkt in richtiger Form für die Fertigung bereitgestellt werden. In verschiedenen Besprechungen trifft die Fertigung Entscheidungen außerhalb der Planungsgrundlage. Die Terminplanung versucht im Nachgang die verschobenen Fertigungsschritte im Plan zu aktualisieren. In der Praxis wird dieses Verfahren Zuruforganisation genannt. (Kletti, 2006, S. 62)

Dieses Nebeneinander kommt durch die vielen verschiedenen nicht vernetzten Informationswege zustande. Informationen werden kaum automatisch übermittelt. In der PPS-Abteilung wird mit der Planungssoftware Primavera gearbeitet, diese Pläne gelangen unvollständig und nicht automatisch ins ERP-System SAP. Zwischen SAP und Primavera besteht keine digitale direkte Schnittstelle. Es gelangen nur die Daten in SAP die notwendig sind für die Materialbeschaffung. Der Materialabruf wird unvernetzt mittels SAP durchgeführt. Die Besprechungen finden mit der wöchentlich aktualisierten statischen „3.-Zeile-Matrix.xlsm“ statt in der alle Termine aller Projekte aufgelistet sind aber ohne Vernetzung zu einem Planungsprogramm. Die in den Besprechungen verschobenen neu bekanntgegebenen Termine werden in die Exceldatei eingetragen und danach in die Terminpläne in Primavera übernommen aus denen wiederum einmal pro Woche die „3.-Zeile-Matrix.xlsm“ aktualisiert erstellt wird.

Über die Rückmeldung des „Planungsmontags“ werden die Terminpläne in Primavera abgeändert und aktualisiert, um eine Anpassung an die Realität des IST-Standes zu erzielen. Die gegenseitige Beeinflussung der Projekte aufeinander zeigt sich nur durch diese Rückmeldung und beeinflusst so die Projekte. Im Grunde wird ein grober Plan für jedes Projekt erstellt und mit jeder Rückmeldung von der Produktion entweder zurückgemeldet, dass das Projekt im Plan ist, oder dass es sich aufgrund von anderen Projekten verspätet, die bevorzugt wurden oder durch Störungen des Prozesses anderer Art. Eine Verletzung der Termine ist so vorprogrammiert.

Eine durchgängige transparente Basis wie Informationen weitergegeben werden gibt es nicht. Wäre das der Fall könnte damit verhindert werden, dass bei unterschiedlichen Besprechungen unterschiedliche Informationen gegeben werden bzw. diese unterschiedlich aufgefasst werden. Dass beispielsweise bei der 11Uhr Runde andere Termine bekanntgegeben werden als in anderen Terminen.

Bei Terminüberschneidung von Terminplänen zweier Projekte entscheidet der/die Meister/-in in diesem Bereich welches Projekt Priorität hat. Der/die Meister/-in übernimmt hier die Feinplanung und Feinsteuerung. Das kann dazu führen, dass eine rein auf diese Abteilung bezogene Reihenfolgepriorität gebildet wird, ohne aber die nächste Abteilung zu berücksichtigen. Dies führt nicht selten zu suboptimalen Reihenfolgen der Aufträge. Hier liegt die Ursache in der mangelnden Transparenz über den gesamten Auftragsdurchlauf für den einzelnen Meister, der die Feinplanung übernimmt. (Kletti, 2015, S. 10)

Eine technische Datenerfassung zur Nachverfolgung der Wagenkästen, um zu wissen, wo sich die einzelnen Wagenkästen gerade befinden, gibt es nicht. Dass diese Informationen verspätet und unkoordiniert im Plan ankommen und somit Maßnahmen zu spät oder auf veralteten Daten beruhen ist systemimmanent. Hier kann ein Feinplanungstool eine grafische Plantafel über den gesamte Rohbau Bereich Abhilfe schaffen, im besten Fall eingebettet in ein MES. Ein MES (Manufacturing Execution System) schließt die Lücke zwischen einer Grobplanung die im ERP-System hinterlegt sein sollte und dem Shopfloor in dem die Fertigung tatsächlich stattfindet. Im MES werden alle Daten zusammen vernetzt und für die Feinplanung und Feinsteuerung zu Verfügung gestellt. Die Grobplanung wird in der grafischen Plantafel dem Hauptbestandteil der Feinplanung und Feinsteuerung im MES, konkretisiert und mit den realen Daten aus dem Shopfloor abgeglichen. Hier sind eine tägliche, digitale Rückmeldung und Planung der Fertigungsschritte in Echtzeit notwendig, um auf aktuelle Störungen und Anforderungen sofort reagieren zu können. Denn je besser die Fertigungsebene mit der Planungsebene verbunden ist desto wahrscheinlicher ist die Einhaltung der Termine und eine optimierte Durchlaufzeit. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 171–174)

Um ein MES zu implementieren ist es notwendig Daten wie Betriebsdaten und Maschinendaten zu erfassen, um Aufträge bestmöglich zu managen, um danach eine Feinplanung und Feinsteuerung mittels eines Leitstands bzw. grafischer Plantafel durchzuführen. Wird ein MES in einem Unternehmen eingeführt, wird in einem Pilotbereich mit begrenztem Funktionsumfang gestartet. Nächste Schritte sind dann ein Ausrollen des MES-Betriebs auf alle Fertigungsbereiche und eine funktionale Erweiterung durch verschiedenste Module, verweis auf Tabelle 3.1 in der Literatur: (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 58). (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 12)

Material wird sicherheitshalber von den Vorarbeitern/-innen in SAP abgerufen damit es sicher da ist, wenn es gebraucht wird und erst wenn es wirklich benötigt wird, wird telefonisch der Anlieferzeitpunkt und die Abladestelle bekanntgegeben. Das führt zu mehr Bestand als notwendig wäre, wenn das Material zeitgerechter bestellt wird, dies setzt allerdings auch eine planmäßige Fertigung voraus und ein Vertrauen an die Logistik, dass die Anforderungen auch erfüllt werden können und das Material zur Stelle ist, wenn es verbaut werden soll. Mithilfe eines MES wird dieses Problem vermieden da durch die Feinplanung der Produktion sowie durch die Rückmeldung der Arbeitsplätze jederzeit der Fertigungsfortschritt sowie der Materialbedarf von Aufträgen im MES abgerufen werden kann. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 184–185)

Für große Unternehmen ist eine Softwarelösung sinnvoll die auch nach Belieben um Module erweitert werden kann, wenn mehr Daten notwendig sind. Wird nun eine Software verwendet von einem Anbieter, der nur das Feinplanungstool mit grafischer Plantafel anbietet und keine anderen Module ist die Erweiterung stärker beschränkt als bei Anbietern, die mehrere Module anbieten, um das MES sukzessive zu erweitern und die Produktion immer besser nachverfolgen, steuern und analysieren zu können.

In Jedem Bereich gibt es mehrere Arbeitsplätze bzw. Stellplätze. Die Wagenkästen werden mit Kränen von einem Stellplatz auf den nächsten gehoben. Die Plätze sind nach Zykluszeiten aufeinander abgestimmt. Hallenwechsel werden vermieden. Es werden Start und Endtermine übergeben und danach richten sich alle. Die Durchlaufzeit wie lange ein Arbeitsvorgang dauert ist unterschiedlich und ist historisch gewachsen und nicht minimal. Die Zeit zwischen Start und Endterminen des Terminplans ist so groß, dass genug Zeit bleibt, um Mitarbeiter/-innen möglichst gut auszulasten, um Stunden zu verrechnen. Der Fokus liegt am Verrechnen der Stunden der Mitarbeiter/-innen und nicht auf einem Effizienten Durchlauf der Teile, um die Durchlaufzeit zu reduzieren, was wiederum einen höheren Bestand verursacht. Teile werden begonnen und gelagert, weil gerade genug Mitarbeiter/-innen zur Verfügung stehen. Damit wird Fertigungsfläche belegt, die in der Vollausbaustufe der Umbauarbeiten nicht mehr zur Verfügung stehen wird. Der Fokus liegt auf den Endterminen und am Verrechnen der Mitarbeiter. Die Durchlaufzeit der Arbeitsvorbereitung ist einschichtig, der Terminplan wird auch einschichtig geplant, produziert wird allerdings zweischichtig. Für jede Komponente werden Start- und Endtermine weitergegeben und alle Meister/-innen und Vorarbeiter/-innen versuchen die Endtermine einzuhalten, der Fertigungsablauf ist somit Endtermingetrieben.

Ein Potential ist die Fertigungsprozesse neu zu strukturieren, um die Gesamtdurchlaufzeit zu minimieren.

Der Terminplan, der in Primavera erstellt wird, beinhaltet keine definierten Arbeitsplätze. Der Primaveraplan ist nur in manchen Teilbereichen der Produktion detailliert, da momentan keine wirkliche Feinplanung besteht. Der Plan ist an einem Punkt angelangt, wo eine weitere Verfeinerung nicht mehr sinnvoll ist und ein MES Modul mit einer grafische digitale Plantafel zur Planung besser geeignet ist, um die einzelnen Bereiche zu überwachen und diese in einem großen Überblick für alle Beteiligten zu Verfügung zu stellen. Dafür sind saubere und transparente Arbeitspläne notwendig.

## 4 State-of-the-Art

### 4.1 Existierende Lösungsansätze im Bereich der Produktionssteuerung

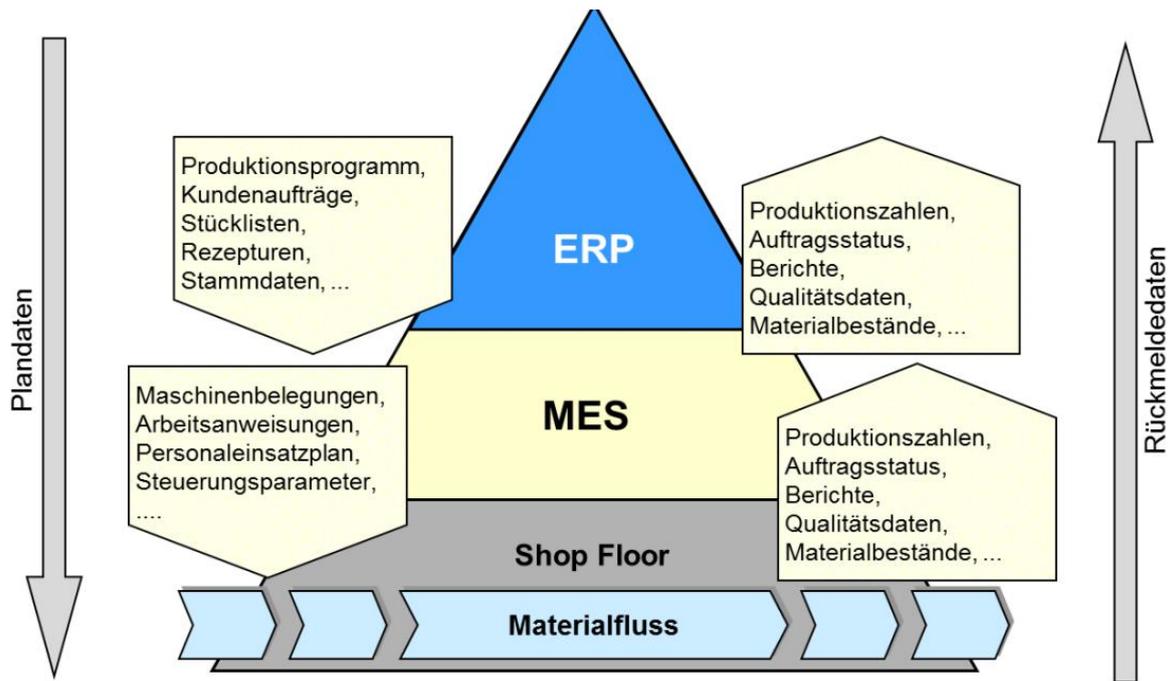
Die Moderne Produktionssteuerung in Unternehmen wird zukünftig immer mehr Teil eines Manufacturing Execution System kurz MES sein. State of the Art ist eine Feinplanung und -steuerung in einem APS-System (Advanced Planning and Scheduling) in einer grafischen digitalen Plantafel, die alle Aufträge mit ihren zugehörigen Arbeitsplätzen in einem Gantt-Diagramm darstellt, eingebettet in einem MES welches alle Daten für diese Darstellung bereitstellt. Manche Softwarehersteller bieten diese Feinplanung und -steuerung als MES-Modul an und bezeichnen dies als Leitstand. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 76)

Das Ziel von APS-Systemen ist die durchgängige Planung und Steuerung der Auftragsabwicklungskette. Somit bilden diese das zentrale Rückgrat der Informationen und der steuerungsrelevanten Kommunikation. (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 15)

Unter MES wurde ursprünglich eine Sammlung an Funktionen zur Betriebsdatenerfassung, Maschinendatenerfassung, Fertigungssteuerung, Werkzeugverwaltung, DNC, CAQ, Personalmanagement und noch weiteren verstanden. Diese aufgezählten Begriffe waren nicht sauber definiert deshalb hat der Verein Deutscher Ingenieure die Richtlinie 5600 ausgearbeitet und darin die Anwendungsgebiete und den Funktionsumfang beschrieben. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 3)

Der Begriff MES fasst im Wesentlichen die Softwarelösungen zusammen die produzierenden Unternehmen helfen die technischen und logistischen Prozesse von Produktionsstart bis -ende zu beherrschen. In der betrieblichen Softwarearchitektur sitzt das MES zwischen ERP-Systemen und der Automatisierungsebene beim Shopfloor. Das volle Potential kann erst ausgespielt werden, wenn das MES gut in der IT-Landschaft mit dem übergelagerten ERP-System und den Systemen am Shopfloor beispielsweise den Maschinen und Eingabegeräte von Mitarbeitern vernetzt ist und Daten automatisch in Echtzeit abgeglichen werden. (H.-H. Wiendahl & Kipp Rolf, 2021, S. 10)

Während ERP-Werkzeuge eher die Kundenauftragsabwicklung vor allem der Geschäftsfälle und die Order-to-Cash-Prozesse unterstützen und eine integrierte Abwicklung der Material-, Informations- und Finanzflüsse sicherstellen. Kommen MES-Werkzeuge für die Herstellauftragsabwicklung zum Einsatz und bilden das zentrale Herzstück für Produktionsprozesse. (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 13)



**Abbildung 23: MES als Bindeglied zwischen ERP-System und Shopfloor (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 13)**

Werden terminliche und kapazitive Einplanungen der Bedarfe wie Kundenaufträge, Produktionsprogramm etc. und die Ressourcen im ERP grob betrachtet, ist die kurzfristige Feinplanung und -steuerung der einzelnen Aufträge und ihrer Arbeitsgänge die Hauptaufgabe des MES. (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 15)

Moderne bestehende ausgereifte MES Lösungen mit langjähriger Entwicklungshistorie sind meist branchenübergreifend nutzbar und verfügen in der Regel über eine Anzahl an Funktionen im mittleren dreistelligen Bereich. Es gibt nicht das eine MES am Markt, sondern viele verschiedene Anbieter mit unterschiedlichsten Sichtweisen und Schwerpunkten. MES-Anbieter nutzen Kategorien, um die vielen MES-Applikationen einzuteilen und sie am Markt darzustellen. Hier werden Begriffe wie Betriebsdatenerfassung, Maschinendatenerfassung, Leitstand, Qualitätssicherung und weitere verwendet. Es gibt allerdings keine einheitliche Kategorisierung. Die VDI-Richtlinie 5600 nutzt eine Aufgabenorientierte Sicht und definiert zehn MES-Aufgaben. In nachfolgender Tabelle sind die von der VDI 5600 definierten Aufgaben mit den zugehörigen MES-Applikationen in der Benennung der MES-Anbieter gegenübergestellt. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 57)

MES-Aufgaben nach VDI 5600	Zugehörige MES-Applikationen in der Benennung der MES-Anbieter
Datenerfassung	Betriebsdatenerfassung (BDE)
	Maschinendatenerfassung (MDE)
	Werkzeug-/Ressourcenmanagement, Werkzeugverwaltung
	Material- und Produktionslogistik
	Tacking&Tracing, Traceability, Produktverfolgung
	Qualitätssicherung, CAQ
	Energiemanagement
	Personalzeiterfassung
	Auftragsmanagement
Feinplanung und Steuerung	Leitstand, Grafische Plantafel
	Betriebsmittelmanagement
Materialmanagement	Werkzeug-/Ressourcenmanagement, Werkzeugverwaltung
	Direct Numeric Control (DNC)
	Material- und Produktionslogistik, Materialflusssteuerung
	Tacking&Tracing, Traceability, Produktverfolgung
Personalmanagement	Personalzeiterfassung
	Personalzeitwirtschaft
	Personaleinsatzplanung
	Leistungslohnermittlung, Prämienlohnermittlung
	Zutrittskontrolle
Leistungsanalyse	Betriebsdatenerfassung (BDE)
	Maschinendatenerfassung (MDE)
	Werkzeug-/Ressourcenmanagement, Werkzeugverwaltung
	Material- und Produktionslogistik
	Qualitätssicherung, CAQ
	Energiemanagement
	Personalzeitwirtschaft
	Qualitätsmanagement
Energiemanagement	Fertigungsbegleitende Prüfung, SPC
	Wareneingangskontrolle, Warenausgangskontrolle
	Prüfmittelmanagement, Prüfmittelverwaltung
	Reklamationsmanagement
	Lieferantenbewertung
	Informationsmanagement
Informationsmanagement	Alle MES-Applikationen
	Eskalationsmanagement, Workflowmanagement

Tabelle 1: Referenzliste VDI 5600 zu MES-Applikationen in Benennung der Anbieter (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 58)

In der Literatur gibt es unter dem Begriff „MES“ unterschiedliche auch inhaltlich abweichende Definitionen. Die VDI-Richtlinie 5600 ist mit den zehn MES-Aufgaben eine der ersten und etabliertesten Richtlinien und Beschreibungen zu Manufacturing Execution Systemen. Am Markt erscheinen Produkte als Gesamtpaket bei denen Anbieter ganzheitliche Systeme liefern oder als Teile, wo sich Anbieter nur auf einzelne Bereiche eines MES konzentrieren. Manche spezialisieren sich zum Beispiel nur auf die Datenerfassung, andere nur auf die Feinplanung. Die einzelnen Software-Komponenten kommen teilweise auch mit ergänzender Hardware zur Datenerfassung und Prozesssteuerung. (H.-H. Wiendahl et al., 2019, S. 6; H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 14)

Ein MES hilft dabei Störungen im Fertigungsalltag und negative Einflüsse auf die Produktion zu kompensieren, indem Informationen des aktuellen IST-Zustands den richtigen Personen so schnell wie möglich bereitgestellt werden. Um die Zeit, die vergeht bis Fertigungssteuerer und andere Verantwortliche erfahren, was nicht wie geplant läuft, möglichst kurz zu halten. Nur so kann auf ungeplante kritische Situationen schnell reagiert und die Produktion optimal gesteuert werden. Um optimal gegensteuern zu können wird es nicht ausreichen nur zu wissen welche Maschine oder welcher Bereich betroffen ist, sondern viele weitere Informationen sind gefordert. Wie beispielsweise, welche Aufträge und Kunden bei Problemen beeinflusst werden, ob Liefertermine eingehalten werden können oder nachfolgende Arbeitsgänge im Zeitplan gefährdet sind, welche Mitarbeiter und Werkzeuge nicht eingesetzt sind und ähnliches. Müssen diese Informationen nun aus mehreren Systemen über Schnittstellen zusammengeführt werden, ist das schwierig, zeit- und arbeitsaufwendig sowie fehleranfällig. Moderne Fertigungssysteme sollten verschiedenste Bereiche schnittstellenfrei horizontal vernetzen und Daten in einer gemeinsamen Datenbank bereitstellen um als zentrale Datendrehscheibe in alle Richtungen fungieren zu können. In eine MES-Datenbank können demnach Betriebsdaten, Auftragsdaten, Maschinendaten, Qualitätsdaten, Personaldaten, Materialdaten, Lagerdaten und viele mehr, gemeinsam vernetzt gespeichert werden. Um sicher zu gehen, dass beim Umsetzen einer Maßnahme gegen ein vorhandenes Problem nicht noch größere Probleme verursacht werden, ist es notwendig grafische Plantafeln zu haben die mit den richtigen Informationen in Echtzeit versorgt sind. Somit kann sofort ermittelt werden welche Auswirkungen, mögliche Änderungen an dem ursprünglichen Ablaufplan, auf die Kapazität der Produktion und die Termine der Aufträge haben. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 2–4)

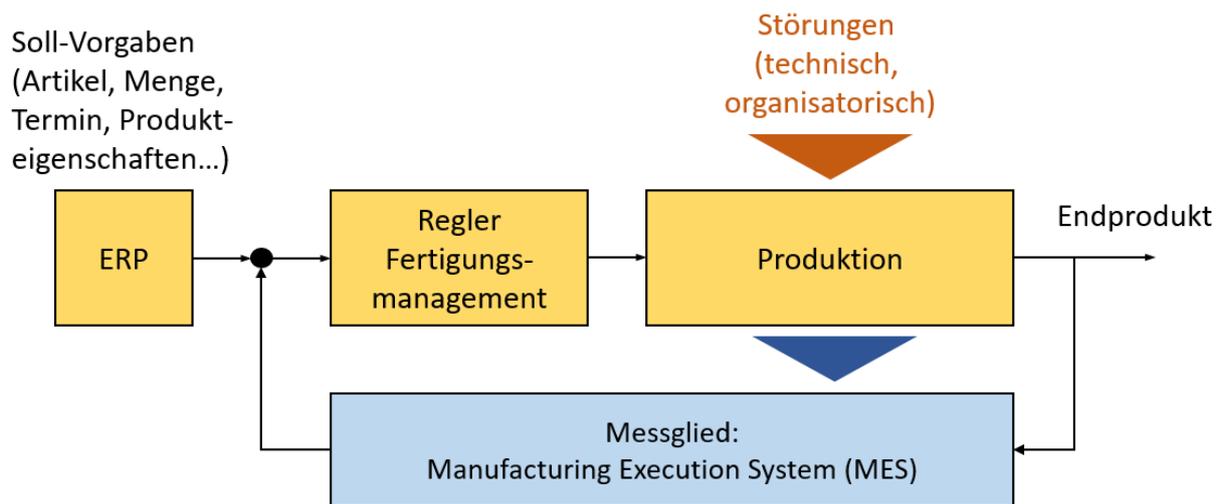


Abbildung 24: Produktion als Regelkreis (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 5)

Der sogenannte Regelkreis der Fertigungssteuerung visualisiert die Funktion eines MES in einem Unternehmen. Es nimmt die Rolle eines Messglieds ein. Ein MES liefert in Echtzeit ressourcen-übergreifende detaillierte Daten zur aktuellen Situation in der Produktion und zeigt das verfügbare Kapazitätsangebot zur Abarbeitung der Fertigungsaufträge. Durch die Integration der Objekte in der Fertigung, zur Erfassung aller relevanten Daten, wird aus der Planung eine punktgenaue Fertigungssteuerung. Ungeplante Vorkommnisse und Probleme werden sofort erkannt, Mitarbeiter können rasch reagieren und auf Grund der realitätsnahen Daten der Produktionskapazitäten gegensteuern. Ein modernes MES hilft nicht nur bei der kurzfristigen Steuerung und Planung der Produktion, sondern hilft durch die Verdichtung der erfassten Daten in Form von reproduzierbaren Kennzahlen über längere Zeiträume. Dies ist die Grundlage für einen zielgerichteten KVP und damit die Optimierung der Produktion. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 5–7)

Um das sehr heterogene MES-Marktangebot zu betrachten ist eine Strukturierung nach der Branchenausrichtung sinnvoll hier liegt der Schwerpunkt der MES-Anbieter klar bei den produzierenden Unternehmen in der Metallerzeugung, im Fahrzeugbau, Maschinenbau und Anlagenbau. (H.-H. Wiendahl & Kipp Rolf, 2021, S. 11)

Am deutschsprachigen Markt werden über 130 MES-Softwarelösungen angeboten. Die Funktionen der Anwendungen reichen vom Erfassen und Auswerten von Betriebsdaten und Maschinendaten über Optimierungen für Ressourcenbelegungsplanung bis hin zu ganzheitlichen Lösungen mit Funktionen, die in Richtung Industrie 4.0 gehen. (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 59)

Das MES-Softwareangebot ist komplex, umfangreich und intransparent. Das richtige System zu finden ist schwierig und als Anwenderunternehmen ohne umfangreiches

Branchenwissen kaum allein machbar. Für den Weg hin zu Industrie 4.0, die ein vollständig digital vernetztes Unternehmen darstellt, ist die Implementierung eines MES ein wesentlicher, wenn nicht sogar unverzichtbarer Baustein. (Wetzchewald & Lütkehoff, 2020, S. 3)

Ein Live-Statement auf der Hannover Messe 2018 von Jürgen Kletti, Geschäftsführer einer der führenden MES-Anbieter soll die Relevanz und das Potential dieser Technik verdeutlichen. „Diejenigen die in 5 Jahren noch kein MES haben werden auch keines mehr brauchen“ (Kletti, 2018)

Shopfloordaten von Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen können durch neue Technologien heute hochfrequent und in großer Menge erfasst werden. ERP-Systeme stoßen bei der Aufgabe diese hochfrequenten Datensätze in eine Produktionsfeinplanung zu verarbeiten systembedingt an ihre Grenzen. MES stellen hier das Bindeglied zwischen ERP und dem Shopfloor dar. Das Zusammenspiel dieser Systemwelten und die unterschiedlichen Verarbeitungsfrequenzen sind eine Herausforderung. Die gezielte Einbindung von Echtzeitdaten in die Produktionsfeinplanung und eine dadurch ermöglichte feingranulare Produktionsregelung mit durchgängiger Überwachung der stattfindenden Prozesse kann nur durch vernetzte MES-Module realisiert werden. ERP-Systeme sind den neuen vielfältigen Möglichkeiten zur Vernetzung und der neuartigen Datennutzung nicht mehr gewachsen. Die Hauptaufgaben eines MES sind die Feinplanung und Feinsteuerung der Produktion, das Betriebsmittelmanagement, Materialmanagement, das Qualitätsmanagement und die geeignete Führung der ausführenden Mitarbeiter in der Fertigungsebene mittels Terminals, Tablets oder Smartphones. Ein MES ermöglicht zeitnah Rückmeldedaten aus dem Shopfloor aufzugreifen sie zu verarbeiten und diese in Echtzeit in die Feinplanung einzubinden. Um die Plandaten umgehen wieder bereitzustellen. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 10; Wetzchewald & Lütkehoff, 2020, S. 1)

Einer der führenden Anbieter am MES-Markt ist die Firma MPDV Mikrolab GmbH, die unter anderen Modulen, mit dem Modul HYDRA Leitstand ein Fertigungssteuerungstool anbieten. Das zentrale Element ist die grafische Plantafel in Form eines Gantt-Charts. Damit soll ein Rundumblick auf alle benötigten Ressourcen und somit eine proaktive, reaktionsfähige Fertigungssteuerung ermöglicht werden. Die Nutzeneffekte reichen von mehr Transparenz der Fertigungssteuerung bis zu verkürzten Durchlaufzeiten, reduzierten Umlauf- und Lagerbeständen, einer hohen Termintreue bei optimaler Kapazitätsauslastung und weiteren. Mit dem HYDRA Leitstand lassen sich unter Berücksichtigung individueller Schichtkalender und Leistungsgraden und auf Basis von Belegungsregeln und Kennzahlen mehrstufige Aufträge über Auftragsnetze automatisch verplanen. Darüber hinaus können Simulationen und Optimierungen von Planungsszenarien durch selbstlernende und

selbstoptimierende Algorithmen durchgeführt werden. Ebenso werden automatisch Auswertungen erstellt. Diese Grundfunktionen können durch weitere Module beliebig erweitert werden. Die Planung und Steuerung basiert dann auf Echtzeitdaten, die über andere MES-Anwendungen erfasst werden. Hier sind die Einbindung der Fortschrittmeldungen von erfassten Betriebsdaten, Maschinenzustände aus erfassten Maschinendaten und Verfügbarkeit von Material, Werkzeugen und Hilfsmittel nur ein beispielgebender Teil von Möglichkeiten. Wie die Einplanung in der grafischen Plantafel durchgeführt wird, kann sehr anpassungsfähig konfiguriert und somit auf jedes Unternehmen maßgeschneidert werden. (MPDV Mikrolab GmbH, 2020)

Das im Praxisteil verwendete Programm Opcenter APS SC Ultimate ermöglicht viele dieser vorher erwähnten Möglichkeiten und steht dem betrachteten Unternehmen bereits zur Verfügung.

## 4.2 Forschungsbedarf und Abgrenzung

Der stetig wachsende globale Kosten- und Qualitätsdruck zwingt Unternehmen ihre Abläufe und die Produktion zu optimieren. Hohe Liegezeiten und dadurch überhöhte Umlaufbestände, Energie- und Materialverschwendungen durch unzureichende Planung oder übermäßigen Personaleinsatz sind in teuren Produktionsländern kaum zu tolerieren. Zusätzlich fordert der Markt eine hohe Variantenvielfalt und individuelle Produkte. Wandlungsfähige flexible Produktionssysteme werden, die heute größtenteils üblichen getakteten Produktionen ablösen und eine strukturelle und organisatorische Neugestaltung auslösen. Fertigungsnahe IT-Systeme stellen sicher das Anlagen autonom auf Veränderungen reagieren, den Produktionsdurchlauf in einem Netzwerk von zusammenhängenden oder gleichen Produktionseinheiten optimieren, individuelle Kundenanforderungen rasch und zuverlässig umsetzen oder die Instandhaltung auf Grund von aussagekräftigen Daten vorbeugend planen. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 14)

In den heutigen Produktionsunternehmen nimmt meist das ERP-System eine zentrale Position ein. Es übernimmt Aufgaben im Bereich der Fertigungsplanung, Einkauf, Vertrieb, Projektmanagement, Materialwirtschaft, Finanzwesen und auch im Controlling. Zusätzlich kommen noch andere Systeme, meist als Insellösungen, zum Einsatz die im Personalwesen, der Logistik oder das Qualitätsmanagement unterstützen, um eine flächendeckende Unterstützung durch IT-Lösungen sicherzustellen. Wird die heutige vorherrschende IT-Unterstützung mit den Aufgaben eines MES wie sie im vorherigen Kapitel 4.1 beschrieben sind verglichen ist schnell ein Unterschied zu erkennen. Ein MES stellt sicher das Mitarbeiter an Maschinen und Anlagen möglichst schnell und papierlos mit den richtigen Informationen in Kontakt kommen. Es spielt eine zentrale Rolle in der Fertigungsleitebene und ist durch die

Erfassungsfunktionen stark mit der Fertigung verbunden, es wird eine komplette Vernetzung aller Bereiche forciert. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 10–13)

Durch die Umsetzung von Industrie 4.0 Ideen und den momentanen Herausforderungen wird sich in den nächsten Jahren einiges ändern. Und es werden auch Herausforderungen auf zukunftssträchtige IT-Systeme wie dem MES zukommen. In der VDI-Richtlinie 5600 Blatt 7 (VDI 2020) sind Erläuterungen und Beispiele enthalten wie ein MES der Zukunft aussehen kann. Einige Charakteristika sind zum Beispiel: Flexibilität und Interoperabilität, um die Produktion dynamisch und kurzfristig anzupassen; Der digitale Zwilling, um eine Produktion komplett Digital abzubilden und die großen Datenmengen, die damit verbunden sind; Die Bewältigung, Analyse und Aufbereitung von Big Data und das Industrial Internet of Things das Maschinen, Sensoren, Messgeräte und andere beteiligte Systeme vernetzt um effizienter, kostengünstiger und schneller produzieren zu können. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 15–17)

Um alle genannten Anforderungen zu erfüllen ist noch viel Entwicklungs- und Umsetzungsarbeit notwendig allerdings sind auch jetzt schon führende Anbieter von MES-Lösungen in der Lage vieles zu ermöglichen, einige sind im folgenden Kapitel 4.3 aufgelistet.

Noch ein Schritt weiter wäre der Zusammenschluss von Produktionsanlagen unterschiedlicher Firmen und Länder um wie ein gemeinsames Ökosystem zu agieren. Ein Forschungsprojekt an drei österreichischen Pilotfabriken forscht in diesem spannenden Bereich. (Siemens Aktiengesellschaft Österreich, 2021)

Forschungsbedarf besteht in einem offenen Plattformansatz als IT-Basis, sodass Module auf dieser Plattform aufgesetzt werden und die Module verschiedener Hersteller ausgetauscht und kompatibel sind so wie bei Apps auf einem Smartphone, wo das Smartphone und sein Betriebssystem als Basis dienen und Apps die spezifischen Dienste ausführen. Entwickler müssten so aufwendig zu programmierende Basisfunktionen und Datenstrukturen nicht jedes Mal neu entwickeln, sondern können sich auf spezifische Konfigurationen und Services fokussieren. Auch der Lock-in-Effekt wäre minimiert und kleine Anbieter können ebenso spezifische Module anbieten um damit die ganze Branche zu verbessern. (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 8–9)

### 4.3 Fazit

Im Idealfall wird ein komplett automatisiertes MES im Unternehmen implementiert mit allen Vorgaben, Rückmeldungen, Anzeigen von Störungen und Änderungen. Um die komplexe und dynamische Fertigung im betrachteten Unternehmen gut steuern zu können, bedarf es aber zumindest ein APS-Werkzeug, in dem alle Aufträge an ihren Arbeitsplätzen eingeplant werden können. Dieses APS-Modul sollte erweiterbar sein mit einer Betriebsdatenerfassung, einer Maschinendatenerfassung und anderen Modulen, um sich nach und nach zu einem vollumfänglichen MES entwickeln zu können.

In diesen Softwaresystemen werden Auftragsnetze abgebildet, Stammdaten und Planungsgrundlagen eingebettet und alle Projekte gemeinsam in einer grafischen Plantafel dargestellt. Alle Arbeitsplätze sind abgebildet und werden mit den Aufträgen zeitlich in einem Gantt-Chart verplant. Dies geschieht in einer zentralen Planungsabteilung. Teilbereiche davon können Meistern zugänglich gemacht werden, die diese dann selbst mitplanen. Diese Planung muss dann auf Bildschirmen überall in der Produktion angezeigt werden, mit automatischen Start- und Endmeldungen. Für eine akkurate Darstellung des IST-Zustandes sind eine Betriebsdatenerfassung, bei der, Mitarbeiter auf Terminals, Tablets oder ihrem Smartphone melden was gerade wo gefertigt wird und eine Maschinendatenerfassung, bei der, Maschinen direkt über Schnittstellen, ihren Produktionsstatus und die Produktionsdaten in die Software melden, notwendig. Ist dies vorhanden wird jede hilfreiche Information bei Problemen direkt in der Steuerung angezeigt, zum Beispiel: auftretende Rüstzeiten, Wartezeiten und Endterminverzögerungen über alle Projekte, um möglichst gute Umbelegungen durchführen zu können. So können Ereignisse in weiterer Folge automatisiert werden, wie beispielsweise, dass das Material automatisch gebucht wird. Durch diese aktuellen Informationen über den IST-Zustand können OEE-Betrachtungen (OEE = Overall Equipment Effectiveness) und die Berechnung von Kennzahlen in Echtzeit online durchgeführt werden. Mehrere Pläne können täglich mit neuen Heuristiken und Unterstützung durch Künstliche Intelligenz simuliert und verglichen werden. Dadurch können täglich online die besten Pläne ausgewählt und eingestellt werden. Besprechungen können damit ebenso auf ein Minimum reduziert werden.

Anbieter wie die Trovarit AG machen ausführliche Analysen und Auswertungen von diversen Softwarelösungen und unterstützen Unternehmen bei der Auswahl der richtigen Softwarelösungen. Für diese Arbeit sind hauptsächlich Anbieter relevant die APS-Werkzeuge bieten, die mit weiteren MES-Modulen vernetzt werden können und eine Betriebsdatenerfassung sowie Maschinendatenerfassung anbieten. Aus einer Übersichtstabelle von Anbietern im deutschsprachigen Raum konnten dadurch folgende Anbieter und ihre Lösung herausgefiltert werden (Trovarit AG, 2021):

Anbieter	Softwarelösung
ACE Solutions	Objective MES & WMS
Aegis Software	FactoryLogix
becos	becosEPS
Berghof Group	PSIPENTA
BMS	PlantMaster
Carl Zeiss MES Solutions	ZEISS GUARDUS
CONSILIO	CONSILIO DIGITAL MANUFACTURING SOLUTIONS
DE software & control	DESC
FASTEC	FASTEC 4 PRO
flexis	Advanced Planning and Scheduling
Flux MES	Flux MES
FORCAM	FORCAM FORCE™ IIOT
gbo datacomp	bisoft MES - MDE BDE PZE
GRASS	COAGO MES
Greycon	GreyconMill
IDAP	IDAP.mes Suite
IGRF	MLogic
INCLUDIS	INCLUDIS Web 8.1
Industrie Informatik	cronetwork
INFORM	FELIOS   APS
InQu Solutions	InQu.MES
ISI Automation	ISIPlus®
ISTEC	ISTEC-PLS
ISTEC	ISTEC-PLS-MLS
iTAC	iTAC MES Suite
JGA Software Solutions	syn:frame
MPDV Mikrolab	HYDRA – MES
on/off group	InfoCarrier
PROXIA	Proxia MES
PSI Automotive & Industry	PSIPENTA
Quantum acompa	Qguar MES
Sack EDV-Systeme	proMExS
sedApta	sedApta Suite
Siemens Industry Software	Siemens MOM Plattform
software4production	software4production Suite
symestic	symesticManufacturing
Syncos	SYNCOS MES
tisoware	tisoware.MES
XETICS	XETICS LEAN

Tabelle 2: MES Software und Anbieter

## 5 Erstellung eines Konzeptes zur Umsetzung der Feinsteuerung

Im folgenden Kapitel wird ein möglicher Ansatz für die Feinplanung und Feinsteuerung im Bereich der Rohbaufertigung eines Schienenfahrzeugunternehmens ermittelt, um die Planung und Steuerung zu verbessern und den Anforderungen einer zukunftsgerechten Produktion näher zu kommen. Die Kommunikations- und Informationswege müssen so schnell, einfach und einheitlich wie möglich sein, um eine robuste sowie schnelle Planung und Steuerung der Fertigung zu ermöglichen. Ein einheitliches MES hat große Potentiale, wenn die Daten gut miteinander vernetzt sind und aktuell gehalten werden. Ein komplettes vollumfängliches MES ist auf Anhieb oft nur mit massiven Investitionen möglich. In folgenden Unterkapiteln soll ein erster Ansatz gezeigt werden, um diesen Weg hin zu einem kompletten MES zu beschreiten. Die Bereiche der Materialwirtschaft und Disposition werden bei diesem Ansatz auf Grund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit nicht behandelt, hier wird lediglich auf Literatur verwiesen: (Schenk, 2015; Schuh, 2006)

### 5.1 Implementierungsmöglichkeiten einer Feinplanung und -steuerung im Alu-Rohbau

Da eine Fertigung im Rohbau meist aus vielen Einzelteilen und Baugruppen besteht und mehrere Projekte auf denselben Fertigungsplätzen bearbeitet werden ist eine händische Planung und Steuerung äußerst schwierig. Hier muss aufgrund der Komplexität auf Software zurückgegriffen werden. Ist kein vollumfängliches MES vorhanden muss versucht werden diesem näher zu kommen. Viele Softwarehersteller bieten ihre Lösungen in Modulen an, somit ist es möglich das notwendige Modul für das bestehende Problem auszuwählen (siehe Kapitel 4).

Eine Implementierung von Software in einem neuen Bereich funktioniert selten als „Plug and Play“ und stellt meist eine Herausforderung dar. Die Einführung neuer Software-Lösungen ist aufwendig und die Auswirkungen auf die Mitarbeiter werden oftmals unterschätzt. Eine Implementierung von neuer Software gehört nicht zum Tagesgeschäft und sollte als Projekt mit einer strukturierten und durchdachten Vorgehensweise angelegt sein, um weder zeitlich noch finanziell auszufern. So ein Projekt benötigt einen Projektleiter/-innen und ein Kernprojektteam, dass themenbezogen durch Fachexperten/-innen ergänzt wird, um die Anforderungen aller betroffenen Bereiche zu erfüllen. Ziele müssen klar kommuniziert und definiert werden. Ein grober Projektplan und eine Aufwandsabschätzung sollten zurechtgelegt werden. Auf die Akzeptanz der Anwender muss speziell geachtet werden, um zu verhindern, dass nach der Implementierung Workarounds geschaffen werden, die nicht dienlich sind. Dies kann durch eine gute interne Kommunikation des Projektes und dessen

Ziele und Vorgehensweise erreicht werden. Mitarbeiter/-innen, die nicht direkt im Projekt mitarbeiten müssen positiv auf Änderungen eingestellt werden und informiert werden. (H.-H. Wiendahl et al., 2019, S. 9–11)

Die IT-Struktur von Unternehmen besteht traditionell aus gewachsenen Insellösungen. Planungssysteme und Fertigungssysteme arbeiten an vielen Stellen größtenteils getrennt nebeneinander. Hier muss ein MES eine Brückenfunktion einnehmen, um die operative Shopfloorebene mit der Planungsebene zu vernetzen und dadurch einen Kreislauf zwischen geplanten Daten und Rückmeldedaten herzustellen. (Wetzchewald & Lütkehoff, 2020, S. 1–2)

Um eine Planung durchführen zu können sind einerseits ein Arbeitsplan notwendig der bestimmt was, wo und wie lange gefertigt wird und andererseits ein Terminplan, der vorgibt, wann bestimmte Teile fertig sein müssen. Die Datenqualität muss sichergestellt werden. Durch technische Änderungen ist es oftmals der Fall, dass weder vorhandene Vorgabezeiten noch der Auftragsdurchlauf des Arbeitsplans mit der Realität übereinstimmen. Die Folge sind falsche Schlüsse und Berechnungen, der Kapazitätsbedarfe und der geplanten Durchlaufzeiten. (Lödding, 2016, S. 637)

Der eine Teil der Implementierung ist die richtige Auswahl von Software und die notwendigen technischen Rahmenbedingungen sowie die daraus resultierende Datenqualität, um eine gute Planung und Steuerung durchführen zu können, der andere Teil ist die richtige Konfiguration der Steuerung.

Um die logistischen Ziele zu erreichen, muss die gesamte Fertigungssteuerung aufeinander abgestimmt werden und auch Vorgaben aus der Produktionsplanung und der Produktionsstruktur müssen einbezogen werden. Die Konfiguration der Fertigungssteuerung ist in der wissenschaftlichen Theorie ein noch wenig erforschtes Gebiet. Mit Fokus auf die vier Aufgaben: Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung wird versucht eine möglichst konsistente Konfiguration der Fertigungssteuerung zu erreichen. (Lödding, 2016, S. 603)

Eine optimale Konfiguration der Fertigungssteuerung zu bestimmen oder zu definieren ist kaum möglich. Viele Unternehmen führen die Konfiguration der Fertigungssteuerung nicht bewusst durch und haben damit auch unvollständige und ungenaue Vorgaben wie die Fertigungssteuerung ihre Aufgaben durchzuführen hat. Eine systematische und konsequente Konfiguration der Fertigungssteuerung und die konsequente Durchsetzung reichen bereits aus, um die logistischen Zielerreichung erheblich zu verbessern. Für die Implementierung der Steuerung müssen Verfahren ausgewählt, parametrisiert und durchgesetzt werden. Diese Arbeit bezieht sich hauptsächlich auf die Auswahl der Verfahren und das Aufzeigen von Möglichkeiten. Hier ergibt sich folgendes Vorgehen (Lödding, 2016, S. 605):



Abbildung 25: Konfiguration der Fertigungssteuerung (Lödding, 2016, S. 605)

### Auftragserzeugungsverfahren

Drei Hauptkriterien müssen immer betrachtet werden. Die Planbarkeit des Bedarfs also mit welcher Genauigkeit, mit welchem Vorlauf und mit welchem Aufwand der Bedarf eines Gutes vorausgesagt werden kann. Zweitens, die Planungsnotwendigkeit, die immer höher wird, je größer die Kosten bei einer Fehleinschätzung des Bedarfs bzw. bei Lieferausfall werden. Und zuletzt ein geeigneter Erzeugungsumfang, wo die Auftragserzeugung einstufig oder mehrstufig erfolgen kann. Ein einstufiges Verfahren erzeugt einzelne Aufträge für jeden Regelkreis extra. Mehrstufige Verfahren erzeugen auch Aufträge für abhängige Bedarfe. Wichtig ist ebenfalls wie gefertigt wird, ob auf Lager oder per Auftrag. Ist die erforderliche Lieferzeit geringer als die realisierbare Durchlaufzeit ist eine Lagerfertigung notwendig. Hier hilft eine geringe Streuung der Bedarfsrate, um die Bestände niedrig zu halten. Die Variantenzahl im gesamten Unternehmen ist ein Schlüsselkriterium, je höher die Anzahl der Varianten, desto höher ist der Bestand. Die Auftragserzeugung bei Auftragsfertigung ist einfach, der Auftrag wird meist direkt in einen Fertigungsauftrag umgesetzt. Eine gute Kapazitätsflexibilität ist immer von Vorteil egal ob eine Lagerfertigung oder Auftragsfertigung durchgeführt wird. (Lödding, 2016, S. 606)

### Auftragsfreigabeverfahren

Hier können verschiedene Verfahrensklassen ausgewählt (siehe Kapitel 2.2.3) werden wie die **Sofortige Auftragsfreigabe**, die den Bestand in der Regel erhöht, nicht zwischen dringenden und nicht dringenden Aufträgen unterscheidet und auf einzelnen

Fertigungsinseln gegeben ist, sofern dort alles vom Rohmaterial bis zum Endprodukt stattfindet. Diese findet Anwendung bei einer KANBAN-Steuerung. Die **Auftragsfreigabe nach Termin**, ist sinnvoll bei guter Termin- und Kapazitätsplanung mit Feinterminierung der Arbeitsvorgänge und begrenzter Kapazität. Die **Bestandsregelnde Auftragsfreigabe**, wird eingesetzt, wenn die sofortige Auftragsfreigabe oder die Auftragsfreigabe nach Termin mit erheblichen Nachteilen verbunden ist. (Lödding, 2016, S. 608–615)

### Reihenfolgeregeln

Hier ist für die Auswahl der Reihenfolgeregel wichtig welches logistische Ziel primär verfolgt wird. Ob die Termintreue, der Servicegrad oder die Leistung des Unternehmens verbessert werden soll. Für die Schienenfahrzeugindustrie wird die Termintreue die Hauptrolle spielen und somit ist aus den Reihenfolgeregeln, Frühester Plan-Starttermin, Frühester Plan-Endtermin, Geringster Schlupf und First In First Out, wie in Kapitel 2.2.5 beschrieben, zu wählen. (Lödding, 2016, S. 615–617)

### Kapazitätssteuerung

Die Kapazitätssteuerung wird von den betrieblichen Rahmenbedingungen bestimmt, die Kapazitätsflexibilität unterscheidet sich in Unternehmen erheblich voneinander. Bestimmend ist wie schnell und mit welchen Maßnahmen Kapazitätsanpassungen zur Verfügung stehen. Die Frage ist, ob eine Kapazitätsflexibilität vorhanden, nicht vorhanden oder teilweise vorhanden ist. Sind Maßnahmen vorhanden, um Arbeitszeiten bzw. Kapazitäten und Ressourcen kurzfristig anzupassen? Falls nicht ist eine Kapazitätssteuerung nicht möglich und Kapazitätsflexibilität muss geschaffen werden. (siehe Kapitel 2.2.4) Ist die Kapazitätsflexibilität gegeben wird in der Schienenfahrzeugindustrie aufgrund ihrer Eigenschaften der Einsatz einer Rückstandregelung sinnvoll sein, aber auch die Bestandregelnde und die Terminorientierte Kapazitätssteuerung können Anwendung finden. (Lödding, 2016, S. 617–619)

### Umsetzung

Nutzlos bleibt die beste Konfiguration der Produktionssteuerung, wenn diese nicht ordnungsgemäß durchgeführt wird daher ist eine hohe Disziplin in der Ausführung der ausgewählten Verfahren notwendig. Hierfür müssen die Anweisungen für die Belegschaft leicht umsetzbar sein, dies ist mit Softwareunterstützung oft leichter zu erreichen. Schulungen helfen das Verständnis der ausführenden Kräfte, wieso welche Tätigkeiten so ausgeführt werden müssen, zu verbessern und verhindern dadurch absichtliche Abweichungen einzelner Mitarbeiter/-innen. Die Umsetzung der Anweisungen für die einzelnen Verfahren wird kontrolliert und belohnt, um die korrekte Ausführung auf Dauer zu sichern. (Lödding, 2016, S. 635–636)

## Standortcode

Eine essenzielle Grundlage, um eine Werksübergreifende Feinplanung und -steuerung durchführen zu können sind definierte Plätze bzw. Standorte mit einer eindeutigen Benennung und Zuweisung. Hierfür wurde ein Standortcode entwickelt, der auf alle Bereiche an einem Produktionsstandort anwendbar und erweiterbar ist, ohne Einschränkungen für viele Jahre und anpassbar, wenn sich Gegebenheiten ändern. Dieser Code ist mit der Trennung durch Punkte gut verarbeitbar in Datenbanken und nicht zu komplex und eindeutig, um für Arbeiter und Arbeiterinnen vor Ort nicht für Verwirrung zu sorgen.

Die ersten drei Ziffern geben die Nummer der Halle wieder, die folgende einzelne Ziffer ist das Schiff dieser Halle und die letzten drei Ziffern sind eine laufende Nummer von 0 bis 999. Vom Eingang in die Halle ausgehend der erste Fertigungsplatz auf der linken Seite beginnt mit der Nummer 001. Im folgenden Bild beispielhaft ein Hallenschiff der Halle 690, mit der Bezeichnung 690/2. Wird beispielsweise ein Arbeitsplatz umstrukturiert und in zwei unterschiedliche Plätze geteilt, so wird die ursprüngliche Nummer verschwinden da dieser konkrete Standort nicht mehr besteht. Dieser Platz bekommt dann zwei neue Nummern. Diese werden entsprechend der laufenden Nummer fortgeführt in diesem Beispiel wären das Nummer 011 und 012. Historische Plätze werden in Auswertungen nicht mit neuen Plätzen vermischt. Durch diese Variante der Standortbestimmung können alle Plätze auf dem Material bearbeitet oder gelagert mit eindeutigen Nummern versehen werden, um eine gute Basis für Softwaregestützte Planung und Steuerung zu gewährleisten. Ist eine sehr feine Unterteilung der physischen Plätze notwendig könnte die laufende Nummer noch um eine vierte Stelle erweitert werden.

690/2

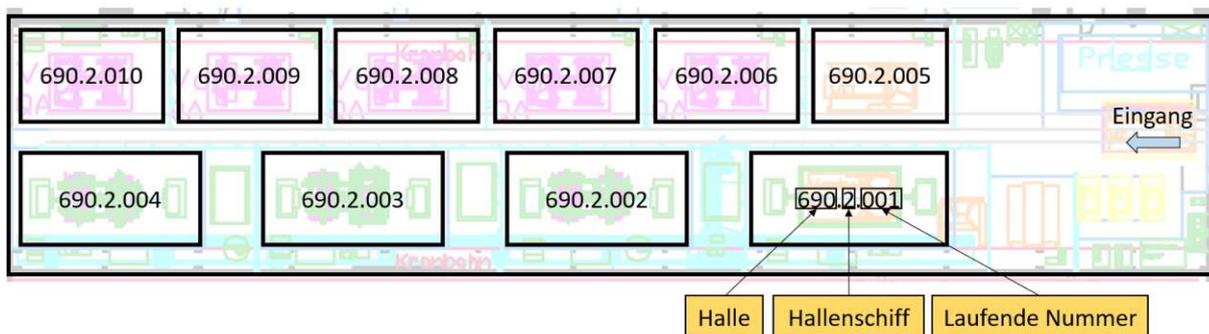


Abbildung 26: entwickelter Standortcode einer Halle

## 5.2 Darstellung und Beschreibung der Feinplanung und -steuerung im Ziel-Wertstrom

### Logistische Zielsetzung

Eine möglichst hohe Auslastung, um einen hohen Umsatz zu erzielen und eine hohe Liefertreue, um Strafzahlungen zu vermeiden stehen im Vordergrund. Der Bestand sollte möglichst gering gehalten werden da die Kapitalbindung und der Platzbedarf bei so großen Metallprodukten wie Zugwagenkästen schnell sehr hohe Ausmaße annimmt.

### Fertigungsumgebung

In der Schienenfahrzeugindustrie sind Fertigungen, die teilweise nach dem Werkstattfertigungsprinzip organisiert sind, nicht unüblich da große teure Maschinen wie beispielsweise Fräsen für mehrere Projekte verwendet werden. In anderen Fertigungsbereichen wird dagegen auch das Fließfertigungsprinzip angewandt. Von einzelnen baugleichen Wagenkästen werden je nach Auftrag auch mehrere dutzend Stück gefertigt. Ein Zug besteht aus mehreren Wagenkästen mit meist gleicher Konfiguration unterschiedlicher Wagenkästen. Da meist mehrere Projekte und bei jedem Projekt mehrere verschiedene Wagenkastentypen möglich sind, ist die Variantenzahl relativ hoch und eine späte Auftragszuordnung der Teile (wie in Kapitel 2.2.6 beschrieben) ist schwierig. Da ein Wagenkasten aus sehr vielen Einzelteilen besteht und unterschiedlichste Teile auf gleichen Fräsen gefertigt werden, ist die Materialflusskomplexität auch relativ hoch. Die unterschiedlichen Projekte und ihre unterschiedlichen Wagenkästen haben immer nur einen Teil der Prozessschritte gemeinsam. Die Kapazitätsflexibilität kann hauptsächlich mit Wochenendschichten oder mit der Fremdvergabe von Arbeitsvorgängen bzw. Zukauf von Baugruppen beeinflusst werden.

### Produktionsplanung

Einen wesentlichen Einfluss, ob die logistischen Ziele erreicht werden, hat die Bestimmung der Liefertermine. Diese berücksichtigt den Fertigungsfortschritt und die Belastung der Arbeitssysteme. (Lödding, 2016, S. 622) Die Termine werden ausgehend von der Montagereihenfolge und den mit Hilfe der Terminpläne bestimmten Montagestartterminen rückwärtsterminiert und so für jeden Bereich und jeden Arbeitsplatz ein Termin erzeugt.

## **Auftragserzeugung**

Da in der Schienenfahrzeugindustrie meist nach Kundenauftrag gefertigt wird, werden gewonnene Kundenaufträge direkt in Fertigungsaufträge umgesetzt, um diese optimal zu verplanen.

## **Auftragsfreigabe**

Bei der Bestimmung der Liefertermine wird die Belastung der Kapazitäten bereits berücksichtigt. Die Auftragsfreigabe erfolgt nach Termin, da die Planung mit einem APS-Werkzeug eine Feinterminierung der Arbeitsvorgänge mit begrenzter Kapazität und somit eine sorgfältige Termin- und Kapazitätsplanung gewährleistet. Die Auftragsfreigabe nach Termin setzt voraus, dass die vorgegebenen Termine eingehalten werden können und sollen. Störungen durch fehlendes Material kann bei einer Auftragsfreigabe nach Termin Materialflussabrisse in der Produktion bewirken. Ein fehlender Abgang bewirkt Bestandsaufbau. Diese Probleme werden durch eine rasche Umplanung, die eine grafische Plantafel in einem APS-Werkzeug zur Verfügung stellt, abgemildert. Sind Bereiche unabhängig vom Rest der Produktion, die Variantenvielfalt gering und der Platz für eine KANBAN-Steuerung verfügbar, muss diese Steuerungsvariante in Betracht gezogen werden.

## **Reihenfolgebildung**

Die Liefertreue ist die wichtigste Zielgröße daher sollte wenn möglich die festgelegte Reihenfolge der Montage nicht verändert werden. Alle anderen Termine werden aus den Terminen ausgehend von der Montage erzeugt. (Siehe Montagegetriebene Pull-Steuerung, Kapitel 2.2.6) Der Großteil der Arbeitssysteme arbeitet die Aufträge nach den Plan-Endterminen der einzelnen Arbeitsvorgänge ab. (Lödding, 2016, 623, 616)

## **Kapazitätssteuerung**

Ist aus der Planung ersichtlich das Termine nicht eingehalten werden können kann früh genug darauf reagiert werden, indem Überstunden oder Wochenendschichten eingeplant werden durch das frühe Erkennen von Terminverzögerungen, die in einer grafischen Plantafel angezeigt werden, können Terminverschiebungen durch Mehrarbeit verhindert werden. Diese Maßnahmen müssen ergriffen werden, wenn der Rückstand eine halbe Schicht übersteigt. Diese Mehrarbeit wird durchgeführt, bis der Verzug eingeholt ist. (Lödding, 2016, S. 624)

## Allgemeiner Zielwertstrom

Ein MES ist das Herzstück der gesamten Informationen einer zukünftigen Produktion. Es führt alle Daten zusammen und vernetzt diese um sie danach entsprechend bereitzustellen, wie schon in Kapitel 4 beschrieben. Der folgende Wertstrom bildet diese Situation ab. Das MES ist das Bindeglied zwischen dem vorherrschenden ERP-System und dem Shopfloor. Eine vergrößerte Version der folgenden Abbildung ist im Kapitel 13 Anhang zu finden.

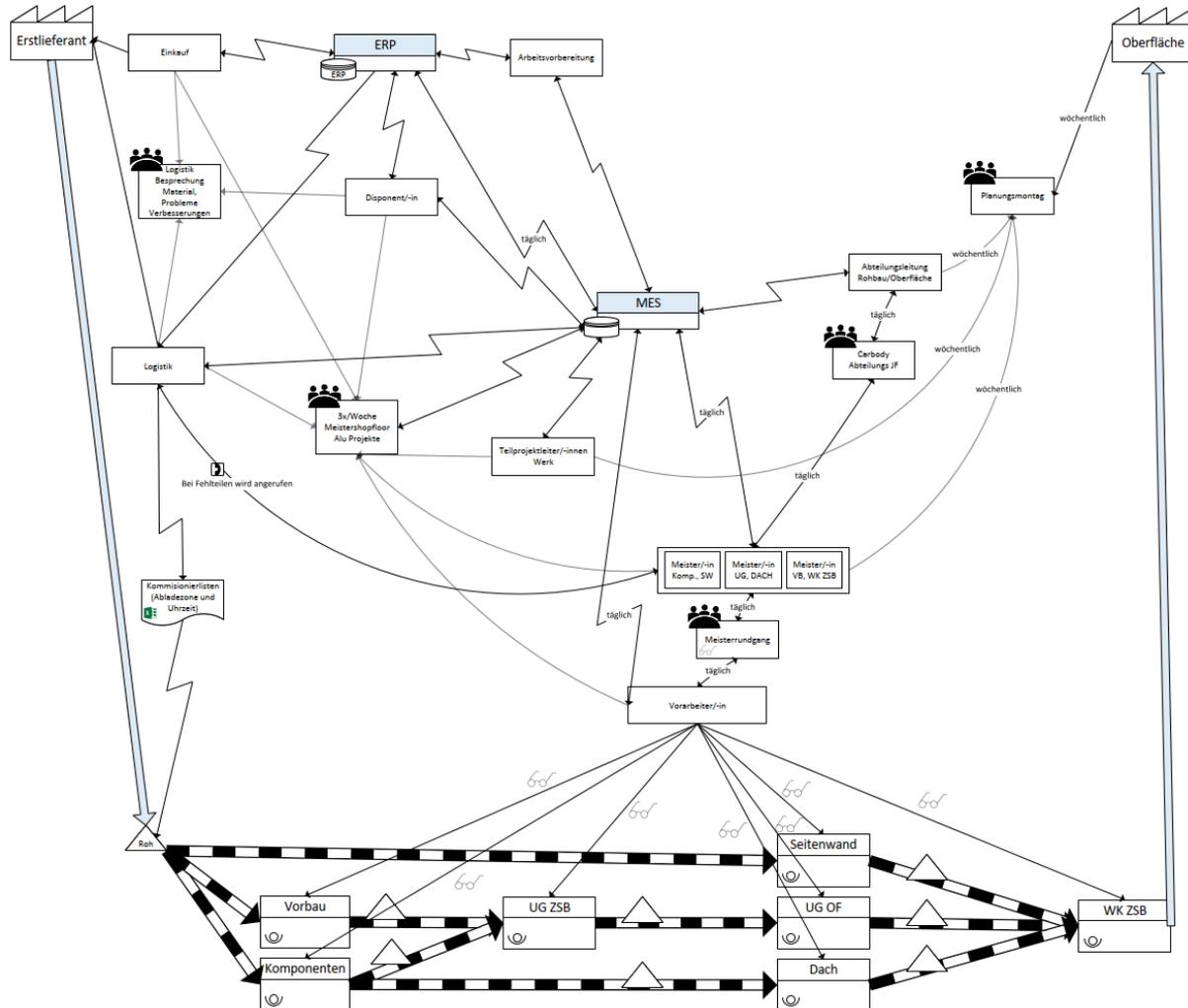


Abbildung 27: allgemeiner Zielwertstrom

Verstrickte komplizierte Informationsflüsse werden durch diesen Zielwertstrom vereinfacht. Das MES erhält alle Daten, vernetzt diese und gibt Zugriff darauf und wird somit zur Datendrehscheibe. Arbeitspläne, Terminpläne und andere Grunddaten gelangen über das ERP-System in das MES. Die aktuellen IST-Daten werden von den Meistern und anderen Mitarbeitern über Eingabeschnittstellen in das MES geladen oder automatisch in der Produktion erfasst, dafür sind Module wie eine Betriebsdatenerfassung und eine Maschinendatenerfassung notwendig.

Ziel sollte sein das jeder Meister eines Bereichs ein Planungstool, eine digitale grafische Plantafel auch Leitstand genannt zur Verfügung hat, mit der der Durchlauf der Güter vernetzt mit anderen Abteilungen geplant werden kann. Die Daten werden dann alle gesammelt vom MES verwaltet und vernetzt. Aufgrund dieser Datenlage kann die Produktion dann gut gesteuert werden und schnell auf Störungen reagieren.

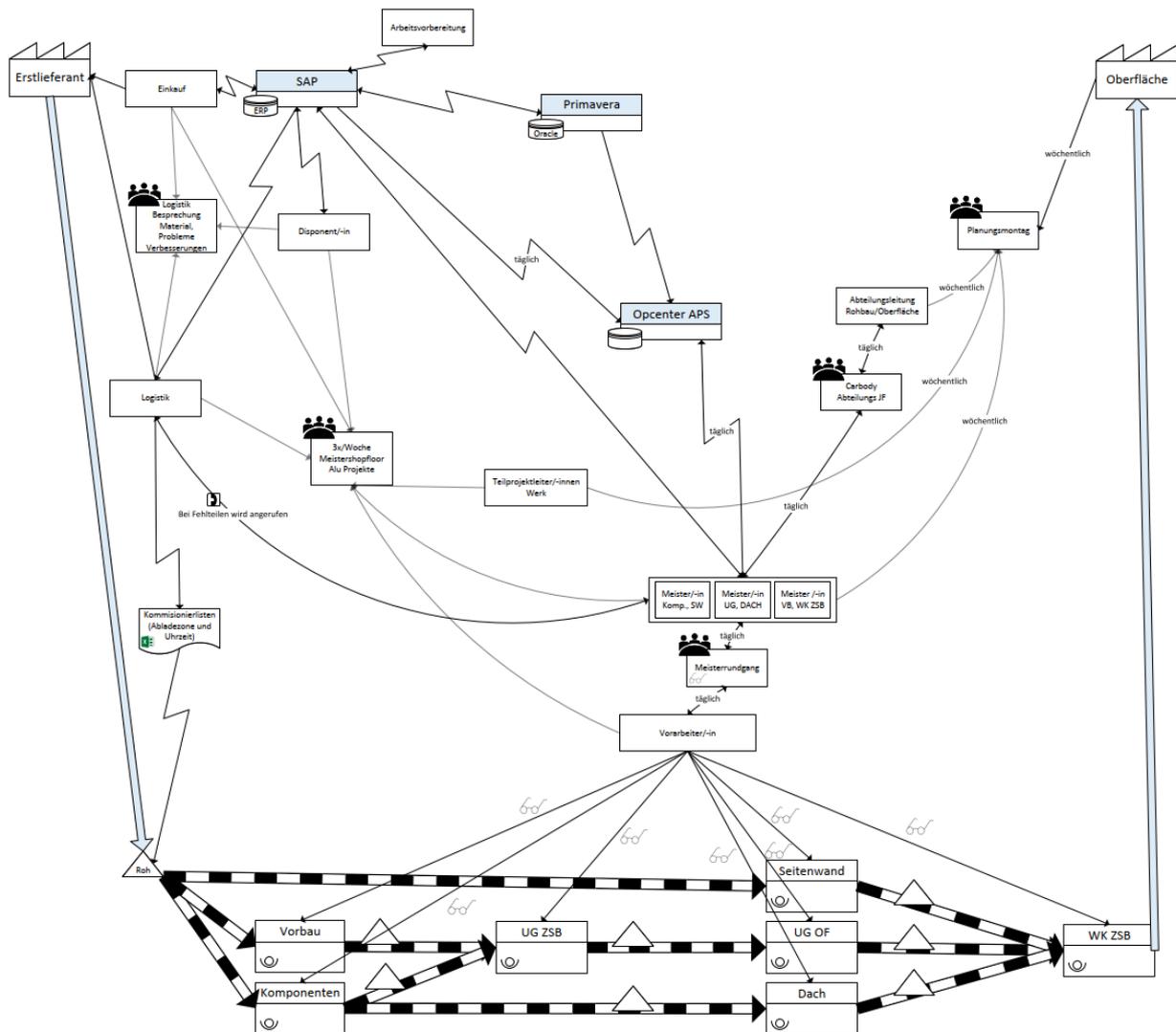
Jeder Meister kann seinen Bereich selbst im APS Tool planen, diese hätten dann Veränderungsrechte für den eigenen Bereich und leserechte für die anderen Meisterbereiche.

Der Überblick über alle Bereiche, die dann zusammen gefasst werden zu dem gesamten Rohbau bzw. auch mit den anderen großen Abteilungen wie die weiterführende Oberflächenabteilung, die Montage und die Zugbildung / Inbetriebsetzung findet in der Planungsabteilung statt.

### **Zielwertstrom betrachtetes Unternehmen**

Das betrachtete Unternehmen stellt in Auftragsfertigung Zugwagenkästen her. Züge mit immer der gleichen Konstellation an Wagenkästen sind auf mehrere Jahre im Voraus bestellt und oftmals gibt es baugleiche Zusatzaufträge, die vorab in Aussicht gestellt werden, wenn der Auftrag gewonnen wird. Die Auftragslage ist für die nächsten Jahre gut und es kann lange vorausgeplant werden. Das Unternehmen kämpft mit Platzmangel, erhöhten Fertigungsbeständen, langen Durchlaufzeiten und der Liefertreue.

Da kein MES vorhanden ist, ist zumindest eine Unterstützung der Produktion durch ein Feinplanungstool wichtig um den komplexen Produktionsdurchlauf besser überblicken, planen und steuern zu können. Dieses Feinplanungstool wurde im Zuge dieser Arbeit für zwei bestehende Projekte aufgesetzt und kann mit entsprechender Unterstützung, mit einer Erweiterung auf alle Projekte und mit sorgfältiger Einbindung in die bestehende IT-Struktur in naher Zukunft zur Geltung kommen. Der Informationsfluss wie dieses Tool mit seiner Umgebung interagieren soll wird in folgendem Wertstrom dargestellt. Eine vergrößerte Version der folgenden Abbildung ist im Kapitel 13 Anhang zu finden.



**Abbildung 28: Zielwertstrom betrachtetes Unternehmen**

Kurzfristig wird der Informationsfluss im Zielwertstrom gegenüber dem Ist-Stand deutlich vereinfacht. Die Arbeitspläne und Grunddaten werden von SAP und die Termine werden von Primavera in das Planungsprogramm Opcenter APS geladen. Eine tägliche automatische Abfrage der Primavera-termine aus SAP in das Planungstool Opcenter APS ist vorgesehen. So kann täglich der aktuelle Stand im Programmdurchlauf dargestellt werden. Die benötigten Daten für die Produktion werden entweder direkt aus SAP gezogen oder aus dem erstellten Ablaufplan für den Rohbau, der in Opcenter APS erstellt wird, dieser wird täglich manuell mit den Meistern abgeglichen und danach für alle, täglich, aktualisiert und zugänglich gemacht.

Da vorerst keine automatisierte Datenerfassung vorhanden ist, ist ein täglicher manueller Abgleich mit den Meistern notwendig, um den Ist-Stand der Produktion in die Planung einfließen zu lassen.

## Arbeitsplan und Wertstrom betrachtetes Unternehmen

Ein grober Arbeitsplan und eine Stückliste für die Wagenkästen ist im betrachteten Unternehmen in SAP vorhanden allerdings keine Zuordnung der Fertigungsschritte auf Arbeitsplätze, sondern lediglich auf Hallenbasis. Um eine feinere Granularität zu ermöglichen, müssen Arbeitsplätze eindeutig definiert werden, dies geschieht mit dem entwickelten Standortcode (siehe Kapitel 5.1, Seite 74). Der bestehende Arbeitsplan und die zugehörige Stückliste wurden vorerst für zwei Projekte mit definierten Arbeitsplätzen erweitert und mit einigen fehlenden Vorgängen ergänzt. Die momentan eingestellten Arbeitsplätze, auf denen die einzelnen Vorgänge stattfinden bezieht sich auf das zukünftige Produktionslayout. Der Arbeitsplan beinhaltet weitere Spalten mit Informationen, die für die Verarbeitung in der grafischen Plantafel notwendig sind. Transportzeiten, Liegezeiten und Übergangszeiten werden hier nicht berücksichtigt. Enthalten sind die Projektnummer, eine kurze Beschreibung des Vorgangs, welches Produkt gefertigt wird, die Type, die Vorgangsnummer, die Materialnummer, die Vorgangszeit und die einzelnen möglichen Arbeitsplätze wo der Vorgang stattfinden kann. Aus diesem Arbeitsplan wurde dann eine Art Wertstrom erstellt, der die meisten dieser Informationen auch enthält und zusätzlich veranschaulicht, wie die einzelnen Vorgänge voneinander abhängig sind. In Abbildung 29 wird dieser Wertstrom schematisch und ein Vorgang davon vergrößert dargestellt. Dieser hervorgehobene Vorgang stellt das Fräsen des Untergestells dar und beinhaltet neben einer Beschreibung die Materialnummer, die Halle, die Stückzahl pro Wagenkasten und die Vorgangszeit in Minuten. Es sind hier auch wiederum, wie in Kapitel 3.1 erläutert, die drei großen Blöcke Untergestell, Dach und Seitenwände, die zu einem Wagenkasten von links nach rechts zusammengebaut werden, zu erkennen.

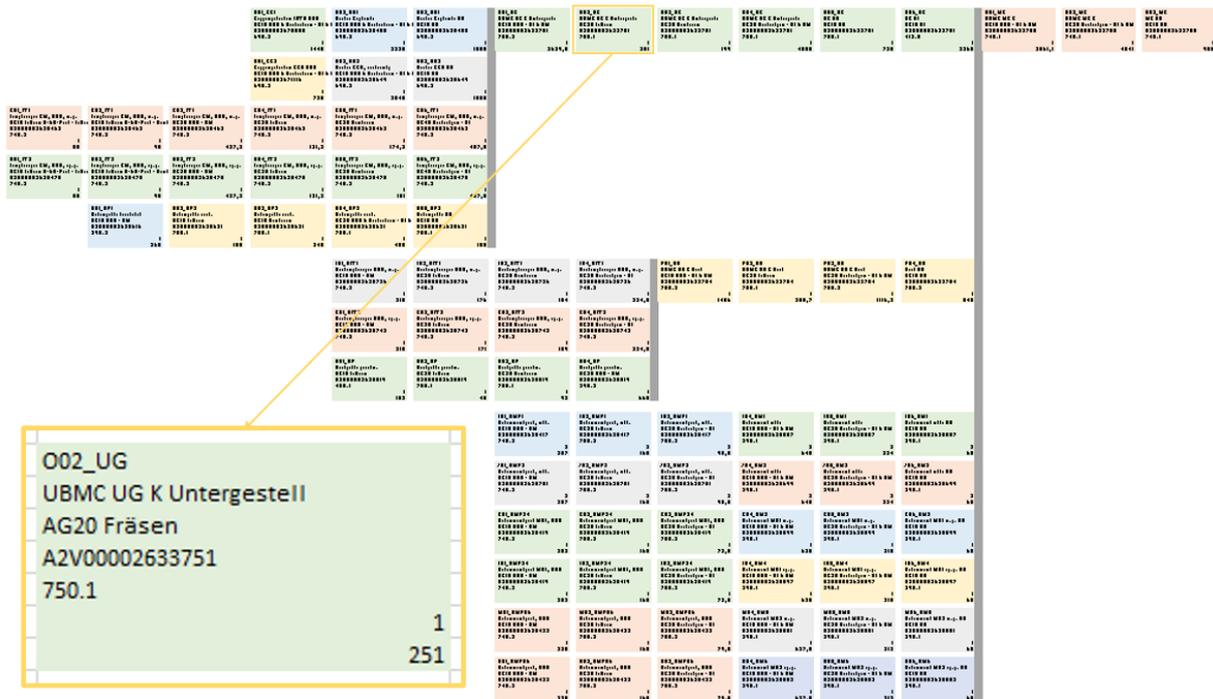


Abbildung 29: Wertstrom eines Wagenkastens abgeleitet aus dem Arbeitsplan

### 5.3 Ansatz zur Feinsteuerung mit einem Feinplanungstool

Die Feinplanung und -steuerung mittels grafischer Plantafel ist nur ein Bereich eines MES und kann erst wirklich gut genutzt werden, wenn es gut mit Daten bestenfalls in Echtzeit versorgt wird. Eine grafische Plantafel, die mit Informationen aus SAP versorgt wird und mit einer Betriebsdatenerfassung und Maschinendatenerfassung vernetzt ist, könnte bereits als MES gesehen werden. Da das Werk auf eine APS Software Zugriff hat und diese verwendet werden soll wird die Feinplanung und -steuerung mit Hilfe dieser Software stattfinden. Diese APS Software, die in dieser Arbeit noch näher betrachtet wird, ist nur ein Teil einer guten MES-Lösung.

Der in dieser Arbeit ausgearbeitete Ansatz nützt die Möglichkeiten die momentan im Werk zur Verfügung stehen. Eine Betriebsdatenerfassung und Maschinendatenerfassung stehen noch nicht bereit. Der Fokus liegt auf der Fertigungsplanung und -steuerung mit einer grafischen Plantafel des Rohbaus. Eine Programminstanz für zwei Projekte im Alu-Rohbau wurde aufgebaut, modifiziert und programmiert, diese wird nachfolgend näher betrachtet. Auf andere Bereiche, die ein MES benötigen wird nicht näher eingegangen. Hier wird ein Ansatz ausgearbeitet und dargestellt der in naher Zukunft umgesetzt werden kann, dem Unternehmen in der Produktion hilft und ein Schritt in Richtung MES ist.

Gegenwärtig wickelt das betrachtete Unternehmen Fertigungsaufträge über eine zentrale Terminplanung ab. Mit Hilfe des vorgegebenen Projektterminplans werden sämtliche Start- und Endtermine für die einzelnen Komponenten und Baugruppen rückwärtsterminiert. Die Disposition wird statisch rollierend in bestimmten Abständen durchgeführt. Bei regelmäßigen Absprachen werden die Ressourcenverfügbarkeit und der Produktionsfortschritt zwischen den Meistern/-innen und der Terminplanung abgeglichen. Diese Informationen werden in den Terminplan eingespielt und der neue Terminplan wird aktualisiert und zugänglich gemacht. Die operative Steuerung in den einzelnen Bereichen erfolgt durch den jeweiligen/-e Meister/-in, nachdem der zentral disponierte Fertigungsauftrag freigegeben wurde. Da das geplante Produktionsprogramm kaum Steuerungsfehler zulässt und vor allem im Rohbaubereich die Planungsdynamik und die Komplexität hoch ist, ist ein APS Werkzeug unabdingbar. Das folgende Konzept wird helfen einen besseren Überblick zu bekommen, über den Durchlauf der Komponenten bis zum Wagenkasten und deren gegenseitige Beeinflussung aufgrund geteilter Ressourcen. Nur so ist genug Information über die Prozesse verfügbar, um an den richtigen Stellen zur richtigen Zeit zu steuern.

Grundlegend wird in der Fertigungssteuerung unterschieden zwischen Push- und Pull-Konzepten. Bei Push-orientierten Konzepten wird die Ausführung aller Prozesse vor Beginn festgelegt, es handelt sich um ein zentral gesteuertes Verfahren. Bei Pull-orientierten Konzepten werden erst bei Ausführung der Prozesse rückwirkend Aufträge für Produktionsstufen ausgelöst, hier handelt es sich um ein dezentral gesteuertes Verfahren. Einzelne Fertigungsstufen sind bei Push-Konzepten im Vorfeld bestimmt, dadurch wird beispielsweise bei Störungen folgender Stationen keine Veränderung der Nachfrage bewirkt. Pull-Konzepte sind dahingegen verbrauchsorientiert, ein Auftrag wird erst ausgelöst, wenn dieser auch benötigt wird. (Klug, 2018, S. 440–441)

Die Schienenfahrzeugindustrie ist ein kundenauftragsgetriebenes Geschäft, wo Aufträge von Projekten meist lange vor Produktionsstart festgelegt sind. Vor Beginn der Produktion hat jedes Produkt schon einen definierten Abnehmer. Der Projektterminplan, der mit dem Kunden vereinbart wird, muss eingehalten werden daher ist ein teilweise Push-orientierter Ansatz sinnvoll. Der Auftragsgetriebene Ansatz startet bei der Einsteuerung der Aufträge in der Montage. Hier bestimmt eine zentrale Steuerungsinstanz die Reihenfolge der eingelasteten Wagenkästen. Mittels Algorithmen wird die Montagereihenfolge nach gewissen Prämissen, wie Kundentakt, Variantenzahl und Montagelinienauslastung, festgelegt. Höchste Priorität haben Aufträge, bei denen bis zum Kundenliefertermin am wenigsten Zeit für die Produktion zur Verfügung steht. Ein mehrstufiges Prioritätsregelsystem setzt die Montageaufträge in eine fixierte Vorgänger-Nachfolger-Beziehung. Diese aneinandergereihte eingefrorene Sequenz wird Perlenkette bezeichnet. (siehe Kapitel 2.2.6)

Die Auftragseinlastung auf Basis der Projektterminpläne findet bewusst am Ende der Wertschöpfungskette in der Montage statt, um eine möglichst hohe Liefertermintreue und Flexibilität für Änderungen zu gewährleisten. Das Auftragsvolumen in der Montage wird in Arbeitstagen definiert, beispielsweise ein bis fünf Arbeitstage. Täglich wird dieselbe Anzahl, die abgearbeitet wird, neu hinzugefügt. Der eingefrorene Montagehorizont auch „Frozen Zone“ genannt, erzeugt einen Lieferabruf bei den vorgelagerten Produktionsstufen. Durch eine rollierende Planung werden ausgehend von dem Einlastungstermin in der Montage die vorgelagerten Produktionsschritte entlang des kritischen Pfades (siehe Kapitel 3.1.2) rückwärtsterminiert.

Der Rohbau ist der erste Bereich, der diesen Lieferabruf erfüllt. Die Termine des Kritischen Pfades werden aus den Primaveraterminplänen in das Planungstool übernommen. Die Start- und Endtermine, die aus den Terminplänen für den kritischen Pfad gezogen werden, bestimmen den hauptsächlichen Durchlauf, diese Vorgänge haben eine höhere Priorität da diese auch meist physisch größer sind und daher mehr Platz einnehmen. Die Nebenkomponten die nicht am kritischen Pfad liegen, werden, da sich diese auch Arbeitsplätze mit den Hauptkomponenten teilen, dann von dem Planungstool dazwischen eingeplant. Aufgrund dieses Konzeptes sind keine Variantenspezifischen Pufferplätze notwendig, die viel Platz benötigen würden.

Komponenten oder Baugruppen, die nicht am kritischen Pfad liegen, können auch mittels KANBAN gefertigt werden, wenn sie sich keine oder nur wenige Arbeitsplätze mit anderen Komponenten teilen und ein eigenständiges System vorliegt. Da die einzelnen Komponenten und Baugruppen allerdings stark variieren, auch innerhalb von Projekten bei verschiedenen Wagenkastentypen, müssten dadurch sehr viele Varianten zeitgleich gepuffert werden. Da die Software eine gute Darstellung aller Vorgänge ermöglicht und sich Nebenkomponten und Hauptkomponenten Arbeitsplätze teilen und die Variantenzahl hoch ist wird auf eine Kanban-Steuerung der Nebenkomponten verzichtet.

Folgende Rahmenbedingungen sind für eine Kanban-Steuerung förderlich: geringe Variantenvielfalt, Organisation in Fertigungsinseln mit one piece flow, beherrschte Prozesse und geringe Verbrauchsschwankungen. (Lödding, 2016, S. 224)

Näher betrachtet wurde die Produktion zweier Aluminium-Projekte, die sich stark gegenseitig beeinflussen, weil viele Arbeitsplätze gemeinsam benützt werden. Der komplette Wertstrom mit all seinen Produktionsvorgängen wird in dem Programm Opcenter APS abgebildet. Hier kann der Durchlauf durch den gesamten Rohbau bis zum rohen Wagenkasten angezeigt werden. Spezifische Wagenkästen können einzeln betrachtet werden, wie der folgende Screenshot der Programmoberfläche zeigt.



Die Vorgänge, die im unteren Bereich eine rote Kennzeichnung haben markieren den kritischen Pfad. Dieser kritische Pfad bestimmt die gesamte Durchlaufzeit durch den Rohbau.

Es ist natürlich auch Wagenkästen und ihre Produktionsvorgänge gemeinsam zu betrachten und wie sie sich gegenseitig beeinflussen. So sind Engpässe schnell zu erkennen. Für diese Ansicht wurden alle verschiedenen Wagenkastentypen der zwei Projekte zeitgleich rückwärtsterminiert eingeplant. Jeden zweiten Arbeitstag wird ein Wagenkasten fertig gestellt. Der Arbeitsplatz 740.1.015, wo die Wagenkästen zusammengebaut werden (die oberste Zeile des letzten Blocks), stellt hier einen Engpass dar. Hier müssten aus jetziger Sicht die Kapazitäten erhöht oder die Schichten erweitert werden. Da die eingetragenen Zeiten im Arbeitsplan aber teilweise nur geschätzt wurden lässt sich keine genaue Aussage für die Durchlaufterminierungen treffen. Eine vergrößerte Version der folgenden Abbildung ist im Kapitel 13 Anhang zu finden.

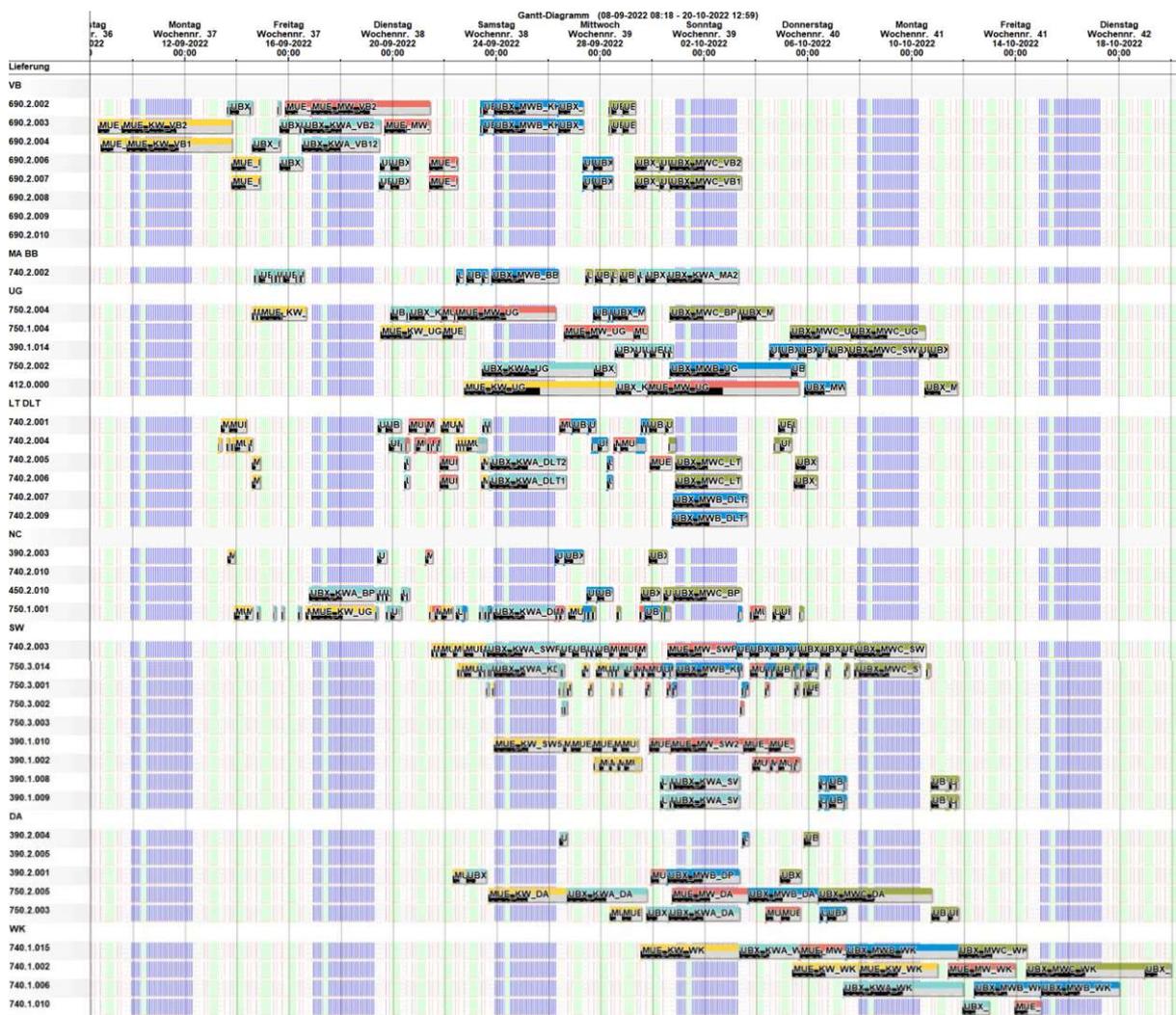


Abbildung 31: Opcenter APS mehrere Wagenkästen gleichzeitig

Die Hauptfunktion dieses APS Werkzeugs liegt darin den optimalen Durchlauf, unter gegenseitiger Berücksichtigung der Projekte, automatisch zu berechnen. Im Programm sind verschiedenste Einstellungen möglich, wie die Berechnung des Durchlaufs erfolgen soll und welche Bedingungen gelten, beispielsweise können Vorgänge priorisiert werden und durch unterschiedliche Kriterien gewichtet werden. Auch einzelne Vorgänge können unterschiedlich berechnet werden. Das Schichtmodell kann für jeden einzelnen Standortcode bzw. Arbeitsplatz getrennt eingestellt werden. Einzelne Vorgänge können händisch verschoben oder auch fixiert werden. Fixierte Vorgänge werden bei der Berechnung nicht verschoben. Es ist möglich Pufferzeiten vor und nach Vorgängen zu definieren. Ein Vorgang dauert mit definierter Anzahl an Mitarbeitern eine gewisse Zeitdauer, sind die benötigten Mitarbeiter nicht verfügbar kann die Vorgangszeit manuell angepasst werden.

Jeder Meister hat für seinen Bereich einen Überblick über die einzelnen Arbeitsplätze und kann so täglich das zu bewältigende Arbeitspensum ablesen. Ist ein Vorgang nicht wie geplant möglich muss dies vom Meister rückgemeldet werden, um danach den Durchlauf anzupassen und neu zu berechnen.

Der kritische Pfad und seine Vorgänge werden mit den Terminplänen bestimmt. Die Vorgänge der Nebenkomponten werden von dem Planungstool ebenfalls erzeugt und eingeplant. Kann ein Termin nicht eingehalten werden so verfärbt sich dieser rot. Dadurch ist der gefährdete Vorgang sofort und meist schon mehrere Tage vorher zu erkennen, Gegenmaßnahmen können somit rechtzeitig eingeleitet werden.

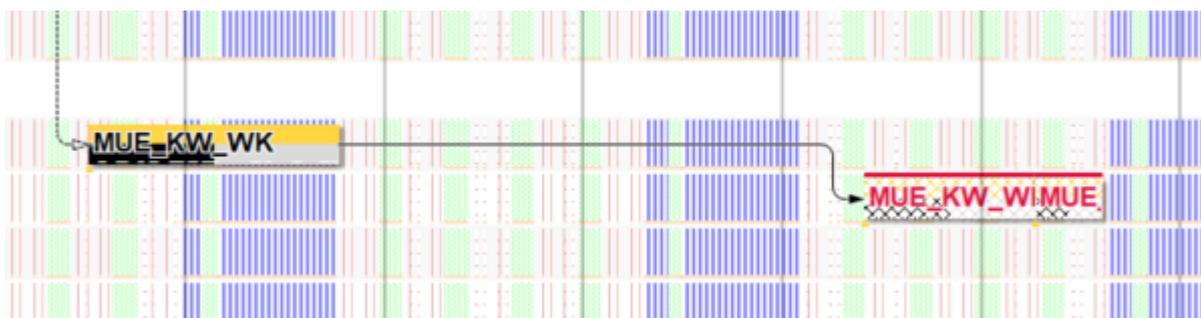


Abbildung 32: rot markierter Terminverzug

In den momentan verwendeten groben Balken der Terminpläne sind nur Start- und Endtermine für zusammengefasste Arbeitspakete angegeben und in diesem Zeitraum wird nicht permanent an dem Prozess gearbeitet, hier gibt es den Freiheitsgrad, dass ab dem Starttermin angefangen werden kann und der Prozess bis zum Endtermin abgeschlossen werden muss. Dazwischen wird die Arbeit selbst eingeteilt. Wo die Prozesse stattfinden, ist im Terminplan nicht festgelegt, dies ist nur im Arbeitsplan

ersichtlich, allerdings nur hallengenau. Die Terminpläne sind Arbeitsplatz unabhängig. Diese Ungenauigkeit wird adressiert, indem die Granularität der Produktionsschritte in der Plantafel auf Arbeitsplätze bezogen sind und Vorgänge ihre vorgeschriebenen Arbeitsplätze sowie Bearbeitungszeiten haben, dadurch kann genau bestimmt werden, wann und wo welcher Prozessschritt stattfindet. Die Zeiten der einzelnen Vorgänge müssen bei der Einführung des Programms iterativ im Arbeitsplan angepasst werden, bis die Realität möglichst gut widerspiegelt wird, nur so lassen sich vertrauenswürdige Aussagen über die Zukunft treffen. Im Programm ist es auch möglich einzustellen, dass Komponenten, die noch keinem fixen Wagenkasten zugeordnet sind in bestimmten Losgrößen gefertigt werden. Auch Wartungen können auf bestimmten Arbeitsplätzen über gewisse Zeiten eingetragen werden. In genau diesem Zeitraum wird der Arbeitsplatz dann nicht verplant und ist sichtbar ausgegraut.

Eine gewisse Widerstandsfähigkeit entsteht durch den Puffer nach dem Rohbaubereich falls in der Montage die Reihenfolge und die Einlastung aufgrund von Problemen gedreht wird wirkt sich dies nicht sofort auf den Rohbau aus. Dieser Puffer ist mit Wagenkästen befüllt aus denen gewählt werden kann und erst wenn alle diese Wagenkästen nicht eingelastet werden ist die Montage gezwungen ihre Prozesse zu stoppen.

## 6 Evaluierung und Ergebnisse

### 6.1 Darstellung der Ergebnisse

Folgende Ergebnisse lassen sich zusammenfassend nennen:

Die Arbeitspläne der zwei betrachteten Projekte stehen nun detaillierter zu Verfügung und sind die Vorlage für alle weiteren Projekte. Die Arbeitsvorgänge können nicht nur hallengenau, sondern Arbeitsplatzgenau dargestellt werden.

Durch die erstellte grafische Plantafel ist der genaue Durchlauf der gesamten Wagenkastenfertigung gut zu überblicken. Täglich kann so das Arbeitspensum was, wann und wo zu fertigen ist an die Arbeiter weitergegeben werden. Bei Störungen und Änderungen lässt sich rasch ein neuer Durchlaufplan erstellen.

Je nach Umsetzung und Erweiterung des beschriebenen Konzeptes kann die Planung immer realitätsnäher an die tatsächliche Produktion anknüpfen. Dadurch sind Aussagen über zukünftige Termineinhaltungen genauer möglich und die Termintreue wird gesteigert. Die Termine der Terminpläne können automatisch im Planungstool aktualisiert werden. Mithilfe des Planungstools ist es möglich die Produktion der zwei Wagenkästen im Rohbau detaillierter zu planen und so zielgerichtet zu steuern.

Verzüge bei Terminen sind gut ersichtlich und auch Engpässe in der Fertigungskapazität können schneller erkannt werden. Durch die genauere Darstellung der Fertigung und den Zugriff auf diesen Plan lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit die Anzahl und Dauer der vielen einzelnen Besprechungen reduzieren. Es kann dazu beigetragen werden eine willkürliche Reihenfolgebildung mit ihren negativen Auswirkungen zu verhindern (siehe Kapitel 2.2.5).

### 6.2 Verifizierung und Validierung

Die Validierung und Verifizierung des Konzepts durch Realdaten ist erst in einigen Jahren möglich, vorab wird durch die Verifikations- und Validierungs-Techniken „Begutachtung“, „Schreibtischtest“, „Strukturiertes Durchgehen“ und „Validierung im Dialog“ sichergestellt möglichst viele Fehler so früh wie möglich auszuschließen. Diese Techniken wurden kontinuierlich im Zuge der Konzepterstellung durchgeführt und angewandt, um die Eignung und Richtigkeit des Konzepts abzusichern. Durch Expertengespräche wird ermittelt, ob das Konzept die Produktionssteuerung verbessern und dieses auch so umgesetzt werden kann oder ob grundlegende Probleme erkennbar sind. (Rabe et al., 2008, S. 93–96)

Die einzelnen Teilerfolge beim Aufsetzen des Planungstools wurden von Arbeitskollegen und Meistern der Bereiche betrachtet. Dadurch wurde ermittelt mit welcher Genauigkeit Vorgänge dargestellt werden sollten und welche Granularität die Darstellung haben soll. Die Vorgänge wurden daraus resultierend etwas genauer aufgesplittet, um in Zukunft nicht nochmals neue Aufteilungen der Vorgänge vornehmen zu müssen. Getroffene Annahmen wurden überprüft wie beispielsweise die Anzahl der Mitarbeiter und die verwendeten Maschinen und Arbeitsplätze der einzelnen Prozessschritte, um die daraus resultierende Vorgabezeit bestmöglich festzulegen. Weiters wurde auch auf die Verständlichkeit und durchgehende Konsistenz geachtet, damit die Prozessschritte nicht unterschiedlich detailliert dargestellt werden. Bezeichnungen von Prozessschritten unterschiedlicher Projekte wurden angeglichen, um die Einheitlichkeit zu gewährleisten. Durch all diese Kriterien wurde ein hinreichender Grad der möglichen Qualität des Konzepts und seine Eignung in der Realität festgestellt. (Rabe et al., 2008, S. 97)

Die Technik des Schreibtischtests wurde dazu verwendet sämtliche verwendete Daten wie Arbeitspläne und deren Vorgangszeiten, die Definition von Maschinen und Arbeitsplätzen sowie die Zuweisung von Arbeitsplätzen zu den Vorgängen, auf deren Konsistenz, Korrektheit und Vollständigkeit zu überprüfen. Kleinere Fehler wurden hier noch korrigiert. Allerdings werden eigene Fehler beim nochmaligen Durchgehen selten erkannt, deshalb wurden nachfolgende weitere Techniken angewandt. (Rabe et al., 2008, S. 102)

Das Konzeptmodell wurde mit der Technik des strukturierten Durchgehens überprüft. Hierbei wurden schrittweise detailliert einzelne Teile wie beispielsweise die logischen Zusammenhänge der Arbeitspläne und ihre Stellplätze, die Zusammenhänge der Datenbeschaffung für das Planungstool, sowie der Informationsfluss im Wertstrom und ebenso der Arbeitsablauf im Planungstool auf ihre Eignung, Richtigkeit und Plausibilität im Team geprüft. Daraus resultierte das der Arbeitsablauf im Planungstool nicht sonderlich intuitiv ist. Hier ist eine Dokumentation der notwendigen Arbeitsschritte sinnvoll. Die Datenbeschaffung für das Planungstool muss vereinfacht werden, um Datenfehler zu vermeiden. Die Daten müssen öfter aktualisiert und geprüft werden, um keine Planungsprobleme zu verursachen. (Rabe et al., 2008, S. 104–105)

Die Validierung im Dialog wurde mittels Expertengesprächen durchgeführt. Hierfür wurden dem Abteilungsleiter des Rohbaus und dem Leiter der Produktionsmethoden das Konzept näher vorgestellt und die entwickelte grafische Plantafel demonstriert. Die Grundaussagen und Ergebnisse der Interviews werden nachfolgend zusammengefasst beschrieben. (Rabe et al., 2008, S. 109)

Das Konzept wurde für den ersten Einsatz im Rohbau als plausibel, anwendbar und hilfreich befunden und eine Ausweitung auf alle Projekte wurde aufgetragen.

Die Einführung des Feinplanungstools wird skeptisch betrachtet allerdings ist das schon vorhandene Abbild der zwei aufgesetzten Projekte relativ nahe an der Realität und vermittelt schon ein Gefühl dafür, dass es hilft die Auslastung zu erhöhen, die Bestände zu verringern und die Durchlaufzeit zu verkürzen. Durch das Programm ist die Produktion in der Lage, jetzige hohe Bestände zu minimieren da genau vorgegeben wird, wann und wo welcher Bearbeitungsschritt stattfinden muss und somit nicht Wagenkästen oder Baugruppen gefertigt werden, die noch nicht gebraucht werden.

Die Auslastung der einzelnen Maschinen wie beispielsweise Fräsen wird dadurch gesteigert, indem dem/der jeweiligen Mitarbeiter/-in ein genauer Plan vorgelegt wird welcher Teil in welcher Reihenfolge bearbeitet werden muss. Der ganze Ablauf wird schneller, wenn die ganze Belegschaft jederzeit weiß, was, wann und wo zu tun ist.

Zusätzlich ist allerdings eine Betrachtung der Mitarbeiter/-innen und ihrer Qualifikationen notwendig, da in der Realität nicht alle Mitarbeiter/-innen alle Arbeiten durchführen können. Zusätzliches Potential ist ebenfalls gegeben bei der Anpassung der Qualifikationen der Belegschaft. Um herauszufinden für welche Personen eine Schulung in welchem Bereich von Vorteil ist, um die Flexibilität der Produktion zu erhöhen.

Eine Urlaubs- und Anwesenheitsplanung ist durch die Hilfe des Planungstool viel einfacher und weit früher zu bewerkstelligen, da Wochen vorher bekannt ist wann, welche Mitarbeiter/-innen benötigt werden.

Eine schnelle Umplanung ist im Programm zwar möglich, aber ob die Pläne dann zeitnah in der Produktion ankommen, wo sie erst wirken können, ist nicht sichergestellt, da die Pläne im Moment ausgedruckt werden und über den/die Vorarbeiter/-in bei den Mitarbeitern/-innen und Maschinen ankommen. Hier besteht die Möglichkeit das zukünftig alle Informationen über einen Bildschirm direkt am entsprechenden Arbeitsplatz angezeigt werden.

Da Termine aus den Terminplänen nur wöchentlich aktualisiert werden ist eine tägliche Planung vorerst begrenzt realitätsnah. Zukünftig muss der Terminplan auch täglich Änderungen weitergeben, um eine Feinplanung der einzelnen Prozesse auf Tages Basis sinnvoll durchzuführen. Meister/-innen sind nicht in der Lage ständig alle Prozesse aller Wagenkastentypen bzw. Baugruppen im Überblick zu behalten daher ist ein manueller Datenabgleich, um zu wissen, wie weit welcher Einzelvorgang ist nur mit sehr großem Aufwand zu bewerkstelligen. Hier ist eine Datenerfassung in der Produktion notwendig. Allerdings muss diese so geschaffen werden das die Datenaufnahme für die Belegschaft keinen großen Mehraufwand bedeutet ansonsten ist die Akzeptanz und somit die Qualität der Daten nicht gewährleistet.

Der Aufbau des Standortcodes ist sinnvoll allerdings ist eine neue Bezeichnung für physische Plätze in der Produktion für die ausführenden Kräfte, die schon lange an ihrem Arbeitsplatz arbeiten nur schwierig anzunehmen, dadurch entstehen möglicherweise Missverständnisse, wenn derselbe Platz unterschiedlich gerufen wird.

Bei weiterem Ausbau des Planungstool ist es möglich die Logistik und Lagerhaltung zu unterstützen, da zu jederzeit bekannt ist wann und wo, welche Produkte in der Produktion benötigt werden.

Die Möglichkeit Engpässe durch das Planungstool früher zu erkennen, wird als sehr gut angesehen. Mitarbeiter sind eher bereit Überstunden oder Wochenendschichten zu übernehmen, wenn diese mehrere Tage vorher gefragt werden. Somit sind Aufholmaßnahmen leichter zu bewerkstelligen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

### 7.1 Kritische Würdigung der Arbeit

Das entwickelte Konzept bildet die Produktionsschritte nach definiertem Detaillierungsgrad ab. Das Planungstool wurde eingehend untersucht und erwies sich im Rahmen dieser Arbeit als nützliches Planungsinstrument. Der Detaillierungsgrad auf Arbeitsplatzebene ist definitiv hinreichend da bei einer zu genauen Betrachtung der Arbeitsschritte die Übersichtlichkeit stark leidet. Hier soll erwähnt werden das der dargestellte Produktionsdurchlauf eine vereinfachte Darstellung der Realität ist. Transportaufwände, Materialbeschaffung und Liegezeiten wurden, wie in Kapitel 3.3 bei den Randbedingungen und Anforderungen beschrieben nicht berücksichtigt.

In der vorliegenden Arbeit wird nicht auf Engpassstrategien eingegangen und wie kurzzeitige Kapazitätserhöhungen zur Aufholung bei Verzügen durch Störungen durchgeführt werden sollen. Auf eine bestimmte Losgrößenbildung wird ebenso nicht näher eingegangen. Um die Realitätsnähe zur Fertigung in diesem Sinne zu erhöhen, benötigt es weitere Betrachtungen und Verfeinerungen der Strukturen.

Aufgrund der guten Auftragslage des betrachteten Unternehmens für die nächsten Jahre und des damit einhergehenden Umbaus wird pro gefertigten Wagenkasten weniger Platz in der Rohbaufertigung zur Verfügung stehen. Das angewandte Konzept ist ein Ansatz, um dieses Problem unter Kontrolle zu bekommen. Es muss berücksichtigt werden, dass beinahe das gesamte Konzept auf Zukunftsdaten und Schätzungen beruht. Die Vorgabezeiten sämtlicher Arbeitsvorgänge der Arbeitspläne wurden teilweise angepasst und Vorgänge wurden ergänzt.

Um den gesamten Rohbau abbilden zu können müssen alle anderen Projekte ebenfalls im Programm implementiert werden, da sich die anderen Aluminium-Projekte aber nur wenige Arbeitsplätze, wie die Fräsen mit den betrachteten zwei Projekten teilen, ist hier keine allzu große Beeinflussung zu erwarten.

## 7.2 Ausblick für Umsetzung

Die Anwendung des Programms Opcenter APS erweist sich als gutes Mittel den Durchlauf der Produktionsprozesse abzubilden und umzuplanen. Das APS Feinplanungstool ist die erste Möglichkeit, um in Zukunft nicht nur die Termine von Produktionsschritten der einzelnen Wagenkästen zu planen, sondern vieles mehr wie das benötigte Material, Personal, Werkzeug und Qualität um anschließend schnell Auswertungen wie OEE automatisch und jederzeit ausführen zu können. Der erste Entwurf des vorgestellten Konzeptes muss stetig weiterentwickelt werden, so können laufend mehr Leistungen für die Produktion zur Verfügung gestellt werden.

Ein Manufacturing Execution System wird in weiterer Folge notwendig sein um verschiedene Teilbereiche wie die Personalplanung und Materialplanung zu verbinden. Auch eine Datenerfassung in der Produktion ist notwendig, um schnell automatisch die Ist-Situation zu erkennen und beinahe in Echtzeit abzubilden. Für die geplanten Prozesse kann so das benötigte Personal, Material, Werkzeug und die Maschinen abgefragt werden sowie sichergestellt werden, dass alle vorgelagerten Prozesse abgeschlossen sind. Um anschließend alles in die Planung einfließen zu lassen. Das MES arbeitet dann als Datendrehscheibe und verknüpft viele Module miteinander. Erst dann können gute Synergien geschaffen werden und Informationen schnell und richtig zu Stelle sein. Auswertungen können somit automatisch täglich erstellt werden.

Die Arbeitspläne der Projekte müssen überarbeitet und mit den Arbeitsplätzen je Vorgang ergänzt werden. Vorgänge müssen sauber getrennt betrachtet und definiert werden. Sobald Tätigkeiten auf unterschiedlichen Arbeitsplätzen stattfinden, ist eine Aufteilung der Vorgänge im Arbeitsplan notwendig, um in der grafischen Plantafel die richtige Belegung der Arbeitsplätze sicherzustellen. Die Zeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge müssen genauer ermittelt und im Arbeitsplan angepasst werden. Die Terminpläne müssen gut gepflegt werden und täglich automatisch in SAP übernommen werden.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells (Lödding, 2016, S. 6).....	8
Abbildung 3: Der Wertstrom einer Fabrik (Erlach, 2020, S. 33).....	10
Abbildung 4: Zielquadrat der Produktion (Erlach, 2020, S. 23).....	14
Abbildung 5: Durchlaufplan eines Produktionsauftrages (vgl. Lödding, 2016, S. 59)	17
Abbildung 6: Durchlaufzeitanteile eines Arbeitsvorgangs (vgl. Lödding, 2016, S. 59) .....	18
Abbildung 7: Terminabweichungsgrößen (vgl. H.-H. Wiendahl, 2011, S. 129).....	19
Abbildung 8: Einfluss der Termintoleranz auf die Termintreue (vgl. H.-H. Wiendahl, 2011, S. 133).....	21
Abbildung 9: Bestand verdeckt Mängel der Produktion (Erlach, 2020, S. 126) .....	23
Abbildung 10: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm einer Arbeitsstation (H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 171) .....	26
Abbildung 11: logistische Kennlinien einer Arbeitsstation (H.-P. Wiendahl et al., 2014, S. 173).....	28
Abbildung 12: Ein Modell zur Fertigungssteuerung (Lödding, 2016, S. 8).....	29
Abbildung 13: allgemeiner schematischer Produktionsprozess inklusive Meilensteinübersicht.....	40
Abbildung 14: Fahrzeugkästen in Aluminium-Strangpressprofilbauweise von Produzent ALCAN (Bender & Göhlich, 2020, S. 1104).....	42
Abbildung 15: Wagenkastenstruktur Haupt- und Unterbaugruppen .....	43
Abbildung 16: roter kritischer Pfad.....	44
Abbildung 17: Ausschnitt 1 Terminplan Primavera .....	46
Abbildung 18: Ausschnitt 2 Terminplan Primavera .....	46
Abbildung 19: Ist-Wertstrom der Rohbaufertigung, Fokus: Informationswege.....	47
Abbildung 20: Informationsfluss Komponenten .....	51
Abbildung 21: Informationsfluss UG ZSB, Dach.....	52
Abbildung 22: Informationsfluss Vorbau, WK ZSB .....	53
Abbildung 23: MES als Bindeglied zwischen ERP-System und Shopfloor (H.-H. Wiendahl et al., 2021, S. 13) .....	61
Abbildung 24: Produktion als Regelkreis (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 5).....	64
Abbildung 25: Konfiguration der Fertigungssteuerung (Lödding, 2016, S. 605) .....	72
Abbildung 26: entwickelter Standortcode einer Halle .....	74
Abbildung 27: allgemeiner Zielwertstrom.....	77
Abbildung 28: Zielwertstrom betrachtetes Unternehmen .....	79
Abbildung 29: Wertstrom eines Wagenkastens abgeleitet aus dem Arbeitsplan .....	81
Abbildung 30: Opcenter hervorgehobener einzelner Wagenkastendurchlauf.....	84
Abbildung 31: Opcenter APS mehrere Wagenkästen gleichzeitig .....	85
Abbildung 32: rot markierter Terminverzug.....	86

## 9 Formelverzeichnis

Formel 1: Flussgrad (Lödding, 2016, S. 60) .....	18
Formel 2: Terminabweichung Abgang .....	19
Formel 3: Terminabweichung Zugang .....	19
Formel 4: Terminabweichung relativ.....	20
Formel 5: Termintreue (Lödding, 2016, S. 34).....	20
Formel 6: Taktzeit (Andreas Syska, 2006, S. 145) .....	21
Formel 7: mittlere Leistung (Lödding, 2016, S. 39).....	24
Formel 8: mittlere Auslastung (Lödding, 2016, S. 39).....	24
Formel 9: Gesetz von Little (H.-H. Wiendahl, 2011, S. 169).....	25
Formel 10: Schlupfzeit (Schuh & Schmidt, 2014, S. 217).....	34

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Referenzliste VDI 5600 zu MES-Applikationen in Benennung der Anbieter (Kletti & Deisenroth, 2021, S. 58) .....	62
Tabelle 2: MES Software und Anbieter .....	69

## 11 Abkürzungsverzeichnis

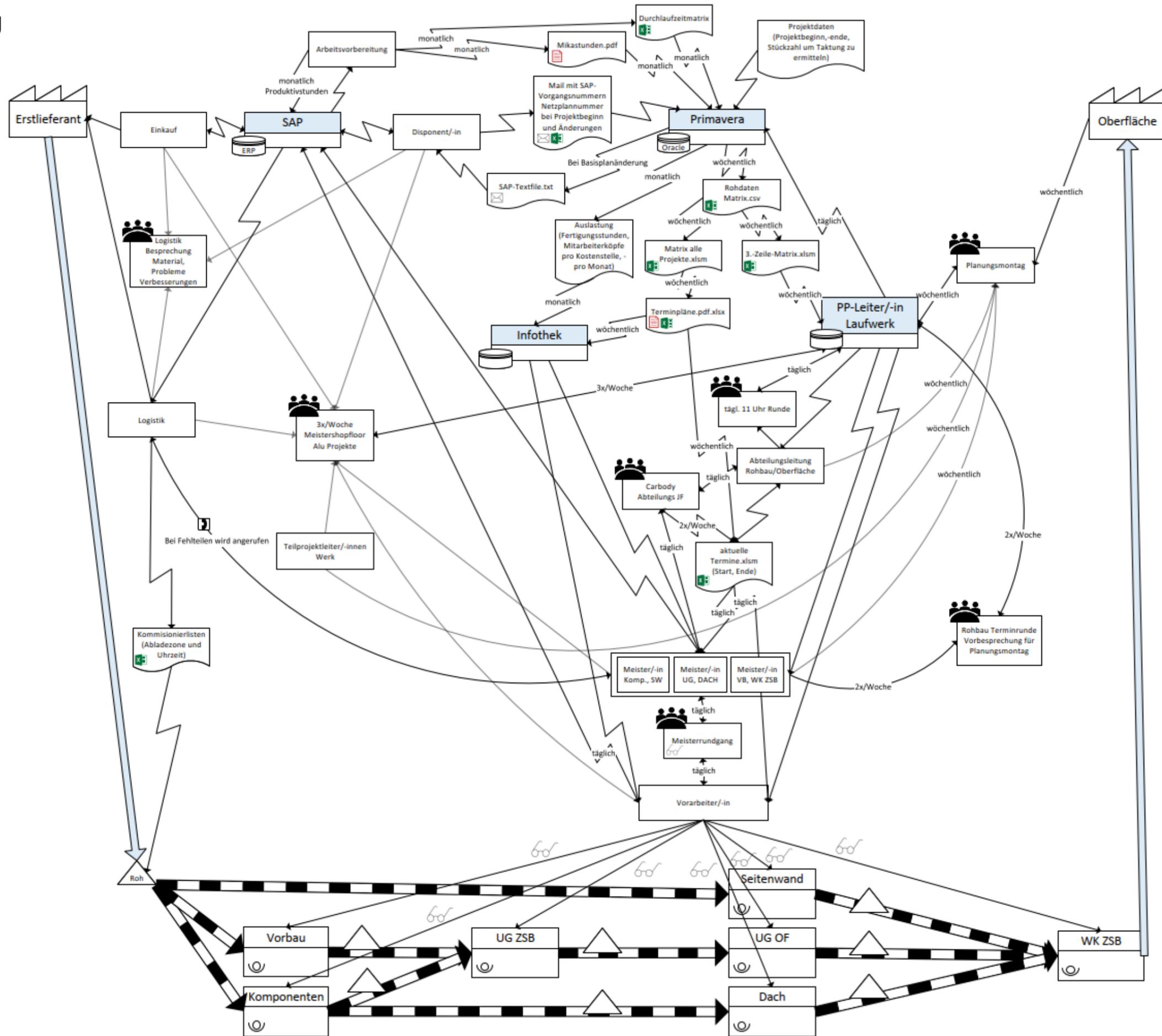
APS	Advanced Planning and Scheduling
AVG	Arbeitsvorgang
bzw.	beziehungsweise
ERP	Enterprise Resource Planning
etc.	et cetera
FIFO	First in First out
FPS	Frühester Plan Starttermin
FPE	Frühester Plan Endtermin
IBS	Inbetriebsetzung
MES	Manufacturing Execution System
OF	Oberfläche
PPS	Produktionsplanung und Steuerung
SW	Seitenwand
UG	Untergestell
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VB	Vorbau
WK	Wagenkasten
ZSB	Zusammenbau
z.B.	zum Beispiel

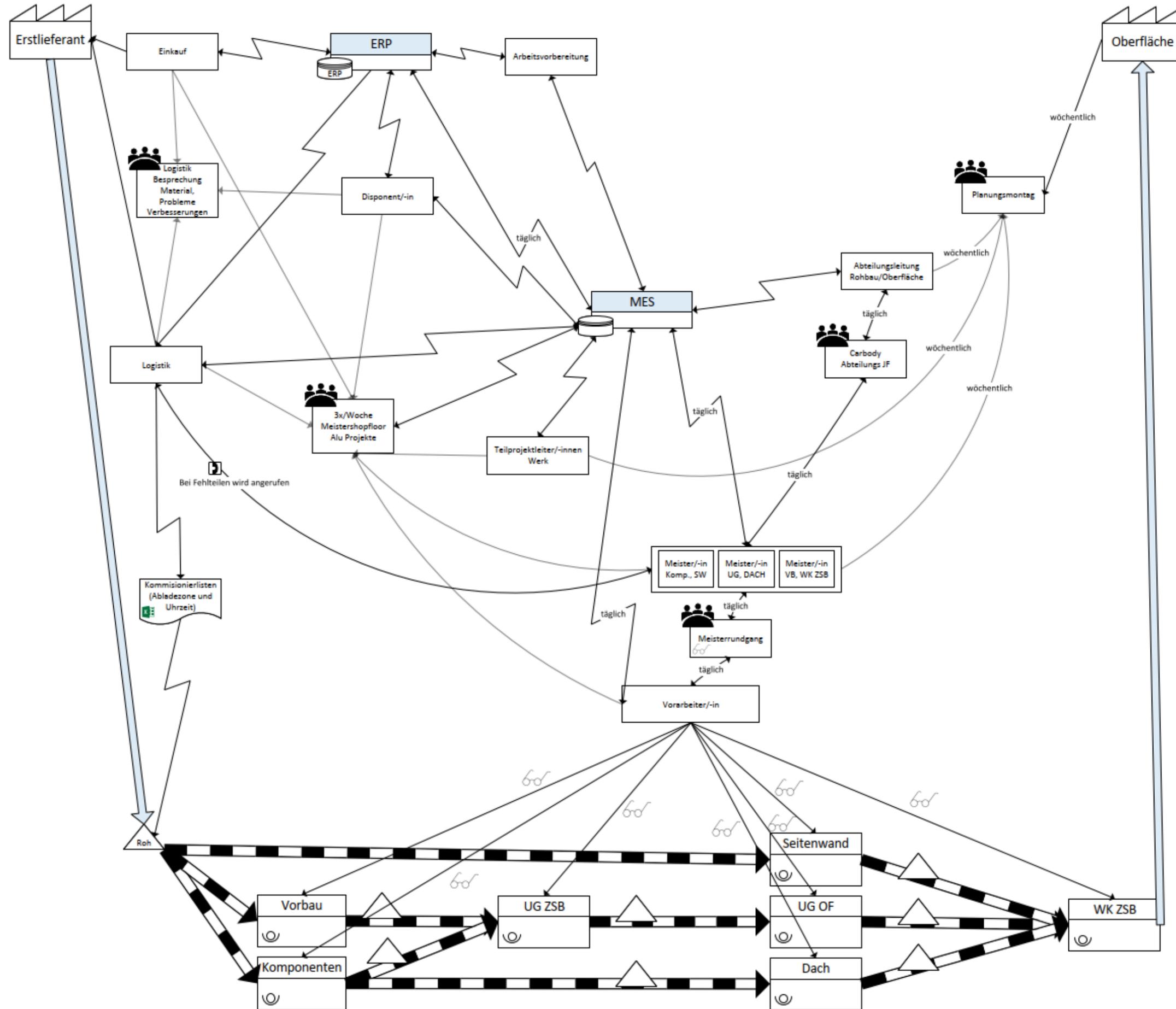
## 12 Literaturverzeichnis

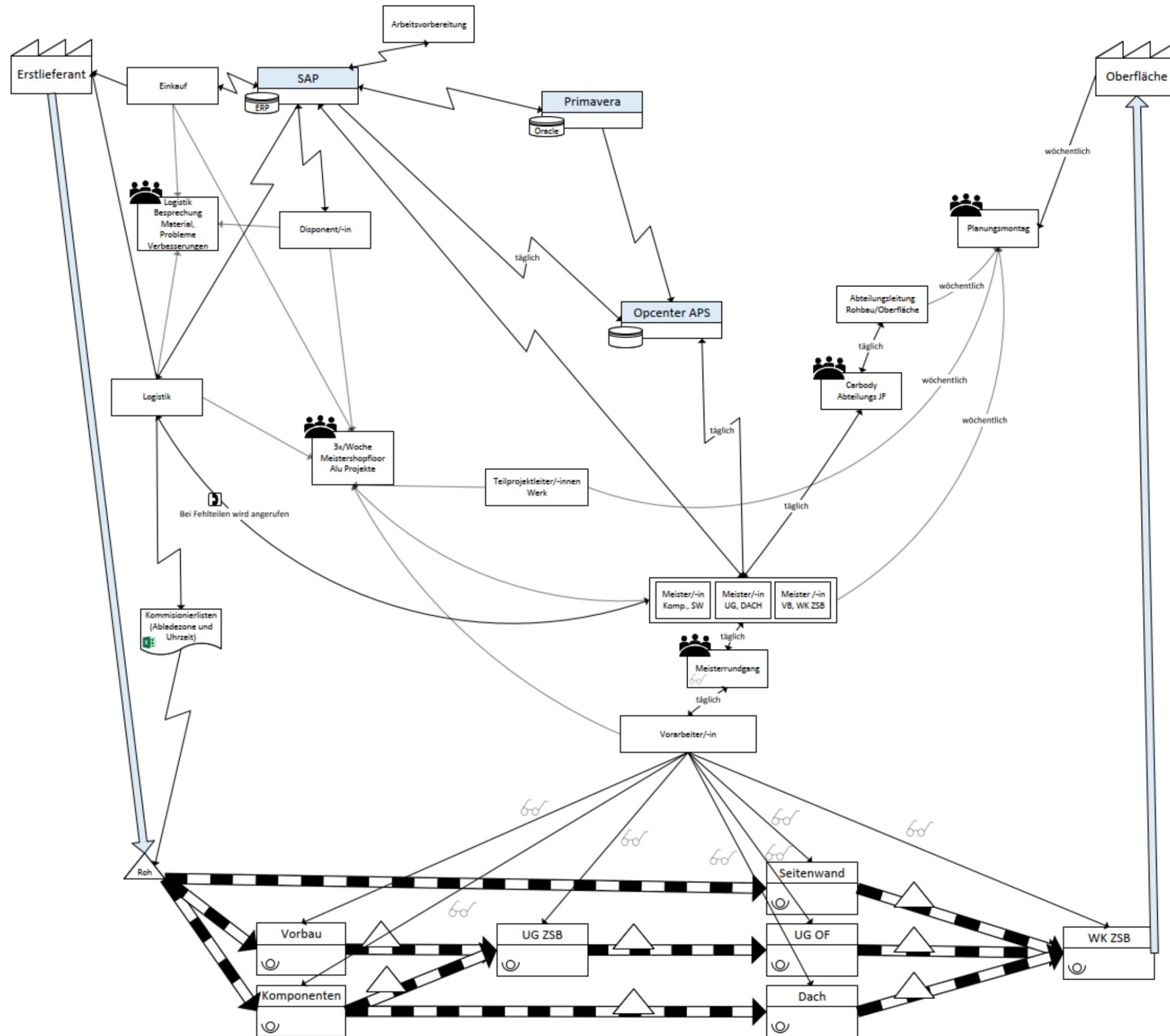
- Andreas Syska. (2006). *Produktions- management: Das A – Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- Bender, B. & Göhlich, D. (Hrsg.). (2020). *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau 3: Maschinen und Systeme*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59715-6>
- Erlach, K. (2020). *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik* (3. Aufl.). VDI-Buch. Springer Vieweg.
- Gudehus, T. (2012). *Dynamische Disposition*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22983-1>
- Hopp, W. J. & Spearman, M. L. (2011). *Factory physics* (3. ed., reissued.). Waveland Press.
- Ihme, J. (2019). *Schienefahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-24923-6>
- Kletti, J. (Hrsg.). (2006). *MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung*.
- Kletti, J. (Hrsg.). (2015). *MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung* (2. Aufl.). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-46902-6>
- Kletti, J. (2018). *Live-Statements HM2018: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Kletti*. <https://www.youtube.com/watch?v=cVmExzGOWBM>
- Kletti, J. & Deisenroth, R. (2019). *MES-Kompendium*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59508-4>
- Kletti, J. & Deisenroth, R. (2021). *Lehrbuch für digitales Fertigungsmanagement*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63202-4>
- Klug, F. (2018). *Logistikmanagement in der Automobilindustrie: Grundlagen der Logistik im Automobilbau* (2. Aufl.). VDI-Buch. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55873-7>
- Lödding, H. (2016). *Verfahren der Fertigungssteuerung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48459-3>
- Meudt, T., Wonnemann, A. & Metternich, J. (2017). *Produktionsplanung und -steuerung (PPS) – ein Überblick der Literatur der unterschiedlichen Einteilung von PPS- Konzepten*. TU Darmstadt.
- MPDV Mikrolab GmbH. (2020). *HYDRA Leitstand: Die Fertigung optimal steuern, ohne Engpässe oder Terminverletzungen*. [https://www.mpdv.com/media/Brochures/DE/Brochure\\_HLS\\_DE.pdf](https://www.mpdv.com/media/Brochures/DE/Brochure_HLS_DE.pdf)
- Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35282-2>

- Schenk, M. (Hrsg.). (2015). *VDI-Buch. Produktion und Logistik mit Zukunft: Digital Engineering and Operation*. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48266-7>
- Schuh, G. (Hrsg.). (2006). *VDI-Buch. Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte* (3. Aufl.). <https://doi.org/10.1007/3-540-33855-1>
- Schuh, G. & Schmidt, C. (2014). *Produktionsmanagement* (2. Aufl.). *Handbuch Produktion und Management*. Springer Vieweg; ProQuest eBook Central.
- Siemens Aktiengesellschaft Österreich. (2021, 24. Mai). *Multifactory: Produktionsplanung über Firmengrenzen hinweg: Fabriken von unterschiedlichen Unternehmen sollen zu einem gemeinsamen Ökosystem werden* [Press release]. <https://hitech.at/industrie/multifactory-produktionsplanung-ueber-firmengrenzen-hinweg>
- Siemens Mobility Website*. <https://www.mobility.siemens.com/at/de.html>
- Trovarit AG. (2021). *IT-Matchmaker.guide Industrie 4.0-Lösungen 2021 - Übersichtstabellen*. <https://www.it-matchmaker.com/de/software-suchen/neuigkeiten-hilfe/download-center/>
- Wetzchewald, P. & Lütkehoff, B. (2020). *MES - Echtzeitfähige Planung, Steuerung und Kontrolle der Produktion*. <https://www.trovarit.com/wp-content/uploads/mes-und-erp-1.pdf>
- Weyer, M. (2002). *Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem*. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2002. Helmesverlag.
- Wiendahl, H.-H. (2011). *Auftragsmanagement der industriellen Produktion*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-19149-7>
- Wiendahl, H.-H., Kipp, R. & Kluth, A. (2019). *MES im Kontext von Industrie 4.0: Whitepaper*. Aachen.
- Wiendahl, H.-H. & Kipp Rolf. (2021). *MES ist nicht gleich MES: Expertenbeitrag. Industrie 4.0 Lösungen*. <https://www.it-matchmaker.com/de/software-suchen/neuigkeiten-hilfe/download-center/>
- Wiendahl, H.-H., Kluth, A. & Kipp, R. (2021). *Marktspiegel Business Software MES – Fertigungssteuerung 2021/2022* (8. Aufl.).
- Wiendahl, H.-P., Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2014). *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. Carl Hanser Verlag München Wien.
- Wiendahl, H.-P. & Wiendahl, H.-H. (2019). *Betriebsorganisation: für Ingenieure*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. Carl Hanser Verlag München.

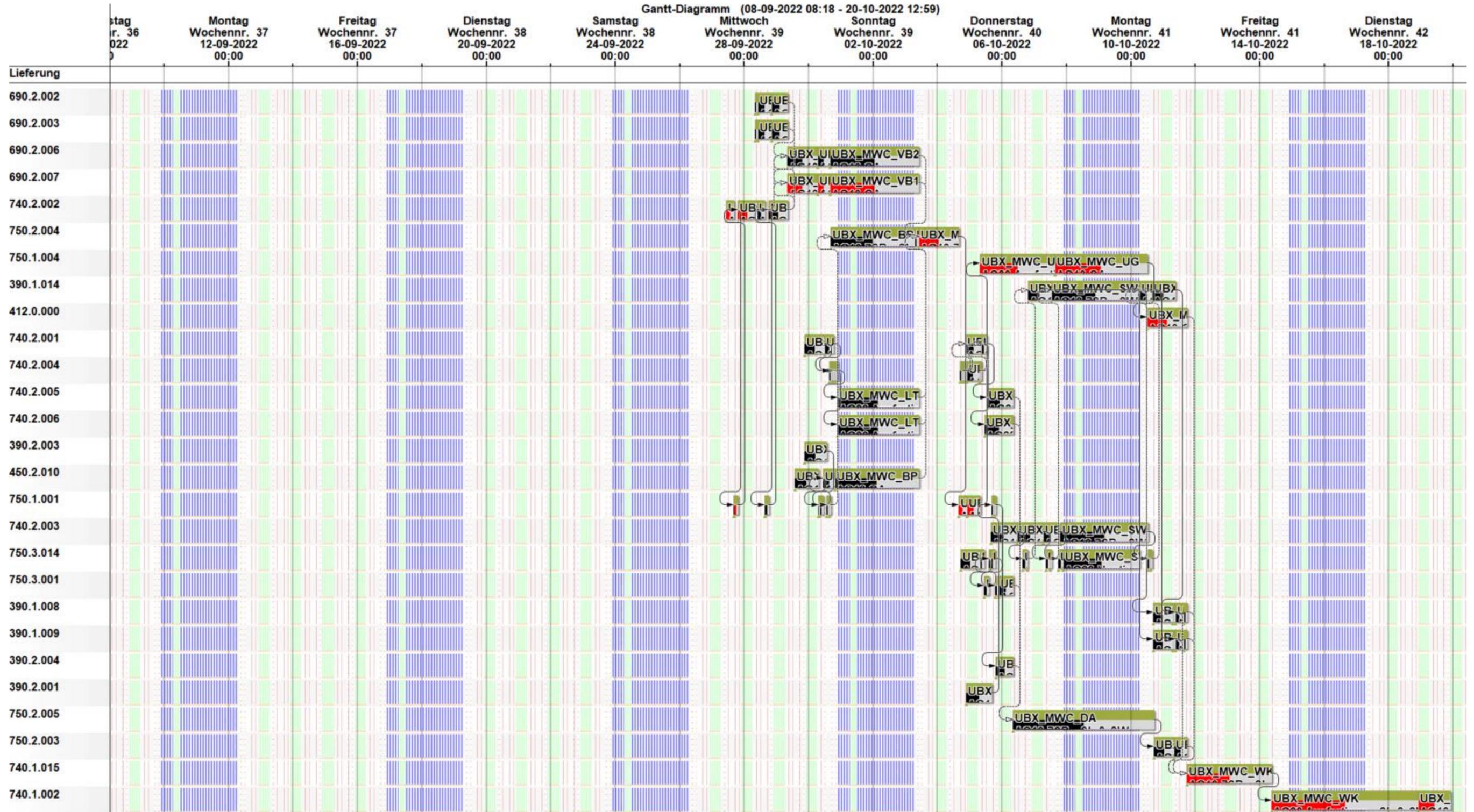
# 13 Anhang







Gantt-Diagramm (08-09-2022 08:18 - 20-10-2022 12:59)



Gantt-Diagramm (08-09-2022 08:18 - 20-10-2022 12:59)

