



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Planungskonzept zur Zusammenlegung zweier variantenreicher Fertigungslinien im Rohbau am Beispiel 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: Human Centered Cyber Physical Production and Assembly Systems)

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

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Johann Li, BSc



Wien, im November 2022

Johann Li



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.

Wien, im November 2022

Johann Li

Danksagung

Zuallererst möchte ich mich besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Sunk und Dipl.-Wirt.-Ing. Michael Leisgang bedanken, da sie mir diese Diplomarbeit in Zusammenarbeit mit Siemens Mobility Austria GmbH ermöglicht haben. Das Arbeiten in einem großen, bedeutsamen produzierenden Unternehmen hat mir geholfen, mich persönlich und beruflich weiterzuentwickeln. Weiterer Dank gilt allen anderen involvierten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Siemens Mobility Austria GmbH.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Ing Sebastian Schlund und allen ehemaligen Arbeitskolleginnen und -kollegen des Instituts für Managementwissenschaften für die lehrreichen zweieinhalb Jahre und die außerordentliche Zusammenarbeit bedanken.

Danke an Patricia und Christian für das Korrekturlesen.

Meinen Universitätskolleginnen und -kollegen möchte ich für die großartige und intensive Zeit während des Studiums danken. Ohne euch hätte das Studium mit Sicherheit nicht so viel Spaß gemacht und hätte beträchtlich länger gedauert. Ich werde bestimmt nostalgisch auf unsere gemeinsame Zeit zurückblicken.

Auch meiner Freundin Martha möchte ich für ihren stetigen Rückhalt danken.

Zu guter Letzt möchte ich meinen Eltern aus tiefstem Herzen danken. Ihr habt mir diese Hochschulausbildung ermöglicht, mich stets unterstützt und immer an mich geglaubt.

Vielen lieben Dank!

Kurzfassung

Der Schienenfahrzeugbau ist geprägt von Kleinserienfertigungen, wobei jede Kleinserie in der Regel einer Fertigungslinie zugeordnet ist. Dabei besteht jede Kleinserie aus mehreren zu fertigenden Varianten, da Schienenfahrzeuge aus unterschiedlichen Waggonen bestehen. Weiters ist in produzierenden Unternehmen die Produktionsfläche eine wertvolle Ressource. Damit diese bestmöglich ausgenutzt wird, ist es zielführend, bereits bestehende Fertigungslinien in der Schienenfahrzeugindustrie zusammenzulegen, wodurch die benötigte Produktionsfläche bestenfalls halbiert wird. Das Ziel dieser Diplomarbeit war, ein Planungskonzept zu entwickeln, durch dessen Anwendung die Zusammenlegung bereits bestehender Fertigungslinien im Schienenfahrzeugbau geplant werden kann.

Die Design Science Research Methodology nach Peffers wurde in dieser Diplomarbeit als wissenschaftliche Methode herangezogen. Darüber hinaus wurde die zugrunde liegende Theorie von Produktions- und Fabrikplanung, der Schienenfahrzeugindustrie, Mixed Model Lines und den verwendeten Methoden ausgearbeitet, auf dessen Basis durch die Kombination mehrerer Methoden – vor allem aus dem Lean Management – ein Planungskonzept entwickelt wurde. Das Planungskonzept wurde an Fertigungslinien für Untergestelle und Dächer von Metros angewendet. Dadurch wurden Daten generiert, welche für die Umsetzung eines Pilotversuchs zur Zusammenlegung zweier variantenreicher Fertigungslinien und für eine diskrete ereignisorientierte Simulation benötigt wurden.

Das Ergebnis der Validierung zeigt, dass durch die Anwendung der ausgewählten Methoden ein Konzept entsteht, in dem eine ausgetaktete Produktionslinie möglich ist. Die ausgearbeitete Vorgehensweise bedarf einen hohen initialen Aufwand, welcher jedoch durch das Nutzenpotenzial in Form von Flächensparnissen gerechtfertigt ist.

Abstract

Rail vehicle construction is characterised by small series production, whereby each small series is usually assigned to a production line. Each series consists of several variants, which have to be produced, as rail vehicles consist of different wagons. Furthermore, production space is a valuable resource in manufacturing companies. In order to make the best possible use of this space, it is advisable to merge existing production lines in the production of rail vehicles, which would at best halve the required production space. Therefore, the aim of this diploma thesis was to develop a planning concept that can be used to plan the merging of existing production lines in the rail vehicle industry.

The Design Science Research Methodology by Peffers was used as a scientific method in this diploma thesis. In addition, the underlying theory of productions, the rail vehicle industry, mixed model lines and the used methods were elaborated. On this basis a planning concept was developed by combining several methods - primarily from lean management. The planning concept was applied to production lines for subframes and roofs of metros. This generated data that was needed for a pilot test to merge two mixed model production lines and a discrete event-oriented simulation.

The result of the simulation shows that the application of the selected methods results in a concept through which a balanced production line is possible. The elaborated procedure requires a high initial effort, which is, however, justified by the benefit potential in the form of space savings.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Allgemeine Problemstellung	2
1.3	Zielsetzung und Forschungsfragen	3
1.4	Definition der Forschungsmethodik	4
1.4.1	Wissenschaftliche Einordnung	4
1.4.2	Abgeleitetes methodisches Vorgehen.....	5
1.5	Aufbau und Struktur der Arbeit	7
2	Theoretische Grundlagen.....	9
2.1	Grundlagen der Fabrik- und Produktionsplanung.....	9
2.1.1	Allgemeines	9
2.1.2	Produktionselemente	10
2.1.3	Fertigungsprinzipien.....	11
2.1.4	Fertigungsarten.....	14
2.1.5	Ziele der Produktion.....	16
2.2	Relevante Grundlagen aus Lean Management.....	17
2.2.1	Wertstromanalyse und -design	18
2.2.2	Ishikawa-Diagramm	22
2.2.3	Heijunka.....	22
2.3	Grundlagen der Schienenfahrzeugindustrie	24
2.3.1	Marktbedingungen	24
2.3.2	Entwicklung der Schienenfahrzeuge.....	26
2.3.3	Aufbau einer Metro	27
2.3.4	Fertigungsprozess einer Metro	30
2.3.5	Variantenreichtum in der Schienenfahrzeugindustrie.....	31
2.4	Mixed Model Line	33
2.4.1	Grundlegende Theorie der Mixed-Model-Line	33
2.4.2	Allgemeiner Sachverhalt der Lösungsansätze	35
2.4.3	Austaktung einer Mixed Model Line	37
2.5	Ergänzende Methoden	42

2.5.1	Zeitstudie nach REFA	42
2.5.2	Business Process Model and Notation 2.0	44
2.5.3	Vorranggraph	45
2.5.4	Gantt-Diagramm	46
2.5.5	Ereignisorientierte Simulation	47
3	State-of-the-Art Literatur	50
3.1	Systematische Literaturrecherche zur Zielstellung	50
3.2	Forschungslücke anhand Literaturrecherche	56
3.3	Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien nach Pröpster (2015)	58
4	Gewählte Vorgehensweise für das Planungskonzept	67
5	Charakterisierung von Prozessen und Daten im Ist-Zustand	70
5.1	Ausgangssituation im Kooperationsunternehmen	70
5.2	Prozessaufnahme.....	71
5.2.1	Makroebene	71
5.2.2	Mikroebene	73
5.3	Zeitaufnahme	74
5.4	Verbesserungsmaßnahmen	80
6	Planung des Soll-Zustands	85
6.1	Soll-Layout	85
6.2	Soll-Personalplanung	87
6.3	Soll-Arbeitspläne	90
6.4	Soll-Reihenfolgenplanung	93
6.5	Bestimmung von Taktzeitszenarien.....	96
6.6	Überwachung im laufenden Betrieb.....	99
7	Validierung des Planungskonzepts	100
7.1	Vorgehensweise der Validierung.....	100
7.2	Auswertung und Resultate der Validierung	101
8	Resümee und Ausblick	104
8.1	Diskussion der Ergebnisse	104
8.2	Beantwortung der Forschungsfragen	105
8.3	Kritische Bewertung und Einschränkungen	108

8.4	Kommunikation der Ergebnisse.....	109
8.5	Handlungsempfehlung.....	109
9	Anhang.....	111
9.1	Symbolik der Business Process Model and Notation (BPMN 2.0).....	111
9.2	Symbolik der Wertstromdarstellung.....	112
9.3	Wertstromanalysen der Fertigungslinien	114
9.4	Darstellungen der Ist-Zustände	118
9.5	Darstellung der Soll-Arbeitspläne	125
10	Literaturverzeichnis.....	128
11	Abbildungsverzeichnis	137
12	Formelverzeichnis.....	141
13	Tabellenverzeichnis	142
14	Abkürzungsverzeichnis.....	143

1 Einleitung

In städtischen Produktionsunternehmen ist jeder Quadratmeter der Produktionshalle mit hohen Kosten und Investitionen verbunden. In dicht besiedelten Städten können Produktionsflächen oftmals nicht erweitert bzw. vergrößert werden. Da durch die Klimakrise nachhaltige Fortbewegung immer gefragter wird, steigt der Bedarf an Metros und Zügen, wodurch ein Anstieg in der Produktion der Schienenfahrzeugindustrie zu erwarten ist (Siemens Mobility 2020). Um dem Produktionsanstieg bei begrenzten Produktionsflächen gerecht zu werden, müssen Fertigungslinien zusammengelegt werden. Eine Zusammenlegung der Fertigungslinien mitsamt der Austaktung aller Arbeitsstationen innerhalb der resultierenden Fertigungslinie beugt somit dem prognostizierten Platzmangel vor und führt zu Flächensparnissen.

1.1 Ausgangssituation

Diese Arbeit richtet ihr Augenmerk primär auf variantenreiche Fertigungslinien in der Schienenfahrzeugindustrie. Eine variantenreiche Fertigungslinie (engl.: mixed-model assembly line) ist so konzipiert, dass mehrere gleichartige Produkte, die als Varianten verstanden werden, in beliebiger Reihenfolge gefertigt werden können (Dolgui et al. 2019, S. 2747). Da U-Bahnen bzw. Metros immer aus zwei End- bzw. Kopfwägen und mehreren Mittelwägen bestehen, ergeben sich dadurch mindestens zwei Varianten pro Metroprojekt. Je nach Betreiber und Stadt kann die Anzahl der Mittelwägen variieren (Schnieder 2018).

Wie auch in anderen Branchen führt die steigende Kundenorientierung in der Schienenfahrzeugindustrie zu einem außerordentlichen Anstieg an Varianten, was eine erhöhte Komplexität der Produkte und Produktionsprozesse bewirkt (Pröpster 2015). Aufgrund dessen kommt es auch zu geringeren Stückzahlen und kleinen Losgrößen für die Produzent_innen der Schienenfahrzeuge. Dies wirkt sich für die Hersteller_innen der Schienenfahrzeuge insofern aus, dass jedes Fahrzeugprojekt großen Modifikationen sowohl in der Konstruktion als auch im Bau des Fahrzeugs unterzogen werden muss, was sich schwer mit der Wirtschaftlichkeit und den kurzen time-to-market-Zyklen vereinbaren lässt. Die vorherrschenden Wettbewerbsbedingungen und der prognostizierte Anstieg des Bedarfs an Metros und

Zügen, aufgrund der Klimakrise und der daraus resultierenden Nachfrage nachhaltiger Fortbewegung, verdichten den Markt, wodurch ein besseres Variantenmanagement gefordert wird (Siemens Mobility 2020). Fest steht, dass eine Verringerung der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau keine eindeutige Lösung darstellt, wodurch sich das Variantenmanagement als Optimierungsproblem zeigt (Schmidt 2002; Altenburg 1999; Siemens Mobility 2020).

Um eine Lösung abseits der Konstruktion zu finden, befasst sich diese Arbeit mit dem Bauvorgang des Fahrzeugs, im Speziellen mit einem Planungskonzept zur Zusammenlegung zweier Fertigungslinien, was zur Gewinnung einer der wertvollsten Ressourcen jedes produzierenden Unternehmens führt – der Fläche (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 117).

1.2 Allgemeine Problemstellung

Der Trend einer steigenden Varianz an und in Produkten führt zur Erhöhung der Individualisierung, wodurch Losgröße 1 keine Seltenheit mehr darstellt (Boysen et al. 2009a, S. 1). Dadurch werden Fertigungsunternehmen zum Einsatz variantenreicher Fertigungsstraßen gezwungen (Hashemi-Petroodi et al. 2022, S. 2). In der Praxis findet die Anwendung der variantenreichen Fertigungsstraße in der Endmontage von Automodellen bereits statt (Boysen et al. 2009a, S. 1). Auch im Flugzeugbau hat dieses Thema bereits Anklang gefunden (Lietzau et al. 2022; Biele 2018; Buergin et al. 2018; Biele und Monch 2015; Biele et al. 2014). In der Schienenfahrzeugindustrie wurde das Thema bislang noch nicht behandelt.

Durch die Größe der Bauteile von Metros bedingt ist, ähnlich wie bei Flugzeugen ein Zwischenbestand nur begrenzt oder gar nicht möglich, wodurch das Fehlen von Material im weiterführenden Produktionsfluss Stillstände der Fertigungslinie auslöst (Biele et al. 2014). Diese Problematik wird beim Auftreten mehrerer Varianten verstärkt, da aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten und Arbeitstätigkeiten der einzelnen Fahrzeugvarianten zeitliche Diskrepanzen auftreten (März 2015).

Ein ungleichmäßiger Arbeitsablauf in Fließfertigungen ist üblich, wenn der Arbeitsinhalt der Aufträge variiert. Leider verschlechtert ein Ungleichgewicht des Arbeitsinhalts zwischen den Stationen oder zwischen den Aufträgen den Leistungsgrad. Die Auswirkungen dieses Ungleichgewichts lassen sich durch eine angemessene Sequenzierung der Aufgaben mildern, was durch die Aufbereitung und Verteilung von

standardisierten Arbeitsanweisungen je Arbeitsstation erreicht wird (Freiheit und Li 2017, S. 1). Weiters gilt es eine optimale Austaktung aller Arbeitsstationen bei einer Zusammenlegung zweier variantenreicher Fertigungslinien zu bewerkstelligen, damit die zeitlichen Diskrepanzen zwischen den Stationen minimiert werden.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Die maßgebende Zielsetzung dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Planungskonzepts, mit dem zwei bereits bestehende variantenreiche Fertigungslinien im Rohbau der Schienenfahrzeugindustrie auf eine Fertigungslinie komprimiert werden. In Anbetracht dessen sind potenzielle Probleme und Engpässe für eine Zusammenlegung ausfindig zu machen. Um Engpassstationen und eine geeignete Austaktung zu erörtern, muss der Arbeitsaufwand je Werkstück pro Arbeitsstation identifiziert werden. Aufgrund der Werkstückgröße und des Arbeitsaufwands im Schienenfahrzeugbau herrscht Gruppenarbeit an den meisten Arbeitsstationen vor, weshalb die Aufwände der einzelnen Ressourcen zu ermitteln sind. Der Aufwand der einzelnen Ressourcen gibt wiederum Rückschluss über den Gesamtaufwand pro Werkstück. Das entstehende Planungskonzept soll künftig dabei helfen, Zusammenlegungen von unterschiedlichen Metroprojekten im Rohbau durch ein standardisiertes Vorgehen zu vereinfachen.

Des Weiteren werden alle relevanten literarischen Werke recherchiert und hinsichtlich der Relevanz zur vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit kritisch betrachtet. Schlussendlich wird ein Teil des Planungskonzepts in einem branchenrelevanten Unternehmen umgesetzt und durch eine diskrete ereignisorientierte Simulation evaluiert.

Angesichts der beschriebenen Zielsetzung lassen sich die folgenden fünf Forschungsfragen ableiten:

Forschungsfrage 1: Wie können Engpässe in der Produktion identifiziert werden?

Forschungsfrage 2: Wie werden einzelne Aktivitäten, Tätigkeiten und Ressourcen so verteilt, dass unabhängig von den verschiedenen Varianten und Taktzeiten eine einheitliche Taktzeit über die gesamte Fertigungslinie, unter der Berücksichtigung von Vorbereitung und Logistik der Materialien, gegeben ist?

Forschungsfrage 3: Wie können unterschiedliche Taktzeitszenarien ermittelt werden?

Forschungsfrage 4: Was sind daraus resultierende Potentiale und technische als auch organisatorische Maßnahmen?

Forschungsfrage 5: Wie sieht ein Schritt für Schritt Vorgang für die Zusammenlegung von variantenreichen Fertigungslinien in der Schienenfahrzeugindustrie aus?

1.4 Definition der Forschungsmethodik

Damit die zuvor definierten Forschungsfragen beantwortet werden können, erfolgt im ersten Schritt eine umfangreiche State-of-the-Art Literaturrecherche. Dadurch werden die bereits vorhandenen theoretischen Grundlagen identifiziert, um auf alle für diese Arbeit relevanten Methoden und Themengebiete einzugehen.

1.4.1 Wissenschaftliche Einordnung

Die Forschung von Informationssystemen wird durch zwei Paradigmen gekennzeichnet (Hevner et al. 2004): Die Verhaltenswissenschaft und die Designwissenschaft.

Während das Paradigma der Verhaltenswissenschaft darauf abzielt, Gesetze oder Prinzipien zu entdecken und zu verifizieren, die menschliches oder soziales Verhalten erklären oder vorhersagen, zielt das Paradigma der Designwissenschaft darauf ab, die Grenzen menschlicher und sozialer Fähigkeiten zu erweitern, indem neue und innovative Artefakte geschaffen werden (Hevner et al. 2004).

Design Science erstellt und bewertet IT-Artefakte, die identifizierte organisatorische Probleme lösen sollen. Sie beinhaltet einen rigorosen Prozess zur Entwicklung von Artefakten, um beobachtete Probleme zu lösen, Forschungsbeiträge zu leisten, die Entwürfe zu evaluieren und die Ergebnisse an geeignete Zielgruppen zu kommunizieren. Solche Artefakte können Konstrukte, Modelle und Methoden umfassen. Sie können auch soziale Innovationen oder neue Eigenschaften technischer, sozialer oder informationeller Ressourcen beinhalten; kurz gesagt umfasst diese Definition jedes gestaltete Objekt mit einer eingebetteten Lösung für ein verstandenes Forschungsproblem (Peppers et al. 2007, S. 49).

Dazu haben Hevner et al. (2004) Praxisregeln für die Durchführung von Design Science Forschung für Informationssysteme in Form von sieben Leitlinien zur Verfügung gestellt, welche die Merkmale einer gut durchgeführten Forschung beschreiben. Die Wichtigste davon ist, dass aus der Forschung ein Artefakt resultiert, das zur Lösung eines Problems geschaffen wurde. Des Weiteren sollte das Artefakt für die Lösung eines bisher ungelösten und wichtigen Geschäftsproblems relevant sein. Sein Nutzen, seine Qualität und seine Wirksamkeit müssen rigoros bewertet werden.

1.4.2 Abgeleitetes methodisches Vorgehen

Die gewählte Forschungsmethodik ist die *Design Science Research Methodology* nach Peffers et al. (2007), nach welcher sich auch der Aufbau dieser Arbeit richtet. Diese Vorgehensweise ist etabliert und bewerkstelligt eine wissenschaftliche Aufbereitung der Thematik, um Forschungsergebnisse verständlich und strukturiert darzustellen. Aus der Methodik lässt sich folgendes Vorgehen ableiten (Peffers et al. 2007, S. 52–56):

1. **Definition des Problems:** Das spezifische Forschungsproblem muss identifiziert werden, wodurch gleichzeitig der Wert einer Lösung begründet wird. Die Rechtfertigung des Wertes einer Lösung erfüllt zwei Zwecke: Sie motiviert die Forscher_innen und das Publikum der Forschung, die Lösung zu verfolgen und die Ergebnisse zu akzeptieren, und sie hilft, die mit dem Verständnis der Forschenden für das Problem verbundene Argumentation zu verstehen. Nachdem das Problem identifiziert wurde, bleibt noch der Schritt, die Leistungsziele für eine Lösung zu bestimmen.
2. **Definition des Ziels:** Ausgehend vom Problem werden die Ziele einer Lösung abgeleitet. Die Ziele können quantitativ sein, z. B. in Bezug auf die Bedingungen, unter denen eine wünschenswerte Lösung besser wäre als die derzeitige, oder qualitativ, z. B. eine Beschreibung, wie ein neues Artefakt Lösungen für bisher nicht behandelte Probleme unterstützen soll. Die Ziele sollten rational aus der Problemspezifikation abgeleitet werden. Zu den dafür erforderlichen Ressourcen gehören Kenntnisse über den Stand der Probleme und über etwaige aktuelle Lösungen und deren Wirksamkeit.

3. **Design und Entwicklung:** In diesem Schritt wird das im Fokus stehende Artefakt kreiert. Artefakte sind potenzielle Konstrukte, Modelle oder Methoden. Konzeptionell kann ein Artefakt der *Design Science* jedes gestaltete Objekt sein, bei dem ein Forschungsbeitrag in das Design eingebettet ist. Zu den Ressourcen, die benötigt werden, um von den Zielen zum Design und zur Entwicklung zu gelangen, gehören auch theoretische Kenntnisse, die in eine Lösung einfließen können und eine Korrektheit des Artefakts gewährleisten.
4. **Demonstration:** Das Artefakt wird nun zur Probe gestellt, indem es Anwendung findet. Dies kann durch ein Experiment, eine Simulation, eine Fallstudie, einen Beweis oder andere geeignete Aktivität geschehen.
5. **Evaluierung:** Bei der Evaluierung wird die Güte des Artefakts in Hinsicht auf die definierten Lösungsziele in Schritt 2 bewertet.
6. **Kommunikation:** Schlussendlich soll die Kommunikation den wissenschaftlichen Kreislauf schließen und die Resultate mit den interessierten Individuen teilen.

Die genannte Methodik wird übersichtlich in *Abbildung 1* visualisiert.

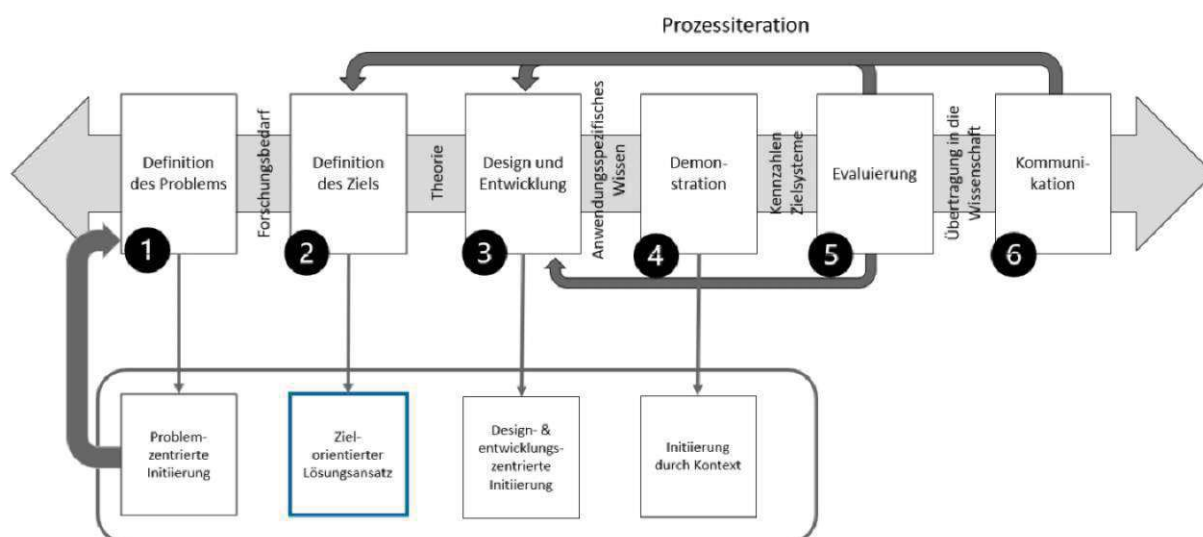


Abbildung 1: Angewandte DSRM (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al. 2007, S. 54)

1.5 Aufbau und Struktur der Arbeit

Auf Basis der in Kapitel 1.4 und Abbildung 1 beschriebenen *Design Science Research Methodology* (DSRM) gliedert sich die Struktur dieser Arbeit in *Grundlagen*, *Entwicklung der Lösung und Validierung* und *Inhalte der Arbeit*. Einen Überblick über den Aufbau und die Inhalte verschafft Abbildung 2.

	Kapitelstruktur	Ergebnisse	DSRM Prozess
Grundlagen	Kapitel 1 Einleitung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausgangssituation • Problemstellung und Zielsetzung • Gewählte Forschungsmethodik 	Schritt 1 und 2
	Kapitel 2 Grundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagenwissen des Themenkomplexes 	
	Kapitel 3 Stand der Forschung	<ul style="list-style-type: none"> • Aktueller Stand der Forschung • Identifizierte Forschungslücke 	
Entwicklung der Lösung	Kapitel 4 Vorgehensweise des Planungskonzepts	<ul style="list-style-type: none"> • Ausarbeitung der Vorgehensweise des Planungskonzepts 	Schritt 3
	Kapitel 5 Charakterisierung von Prozessen und Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Prozess- und Zeitaufnahmen des Ist-Zustands • Verbesserungsmaßnahmen 	Schritt 3 und 4
	Kapitel 6 Planung des Soll-Zustands	<ul style="list-style-type: none"> • Planung einer zusammengelegten Fertigungslinie 	Schritt 3 und 4
Validierung und Ausblick	Kapitel 7 Validierung	<ul style="list-style-type: none"> • Validierung des Planungskonzepts mithilfe einer Teilimplementierung und Simulation 	Schritt 5
	Kapitel 8 Resümee und Ausblick	<ul style="list-style-type: none"> • Beantwortung der Forschungsfragen • Erkenntnisse für Forschung und Praxis 	Schritt 6

Abbildung 2: Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)

Die ersten zwei Schritte der *Design Science Research Methodology* werden durch die *Grundlagen* ausgearbeitet. Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird in *Kapitel 1* die Ausgangssituation mitsamt der einhergehenden Problemstellung erläutert. Anschließend werden die Forschungsziele definiert. Die für diese Arbeit relevanten Theoriegrundlagen werden in *Kapitel 2* ausgearbeitet. Anschließend wird in *Kapitel 3* der Stand der Forschung bezüglich variantenreicher Produktionen und die vorherrschende Forschungslücke erörtert. Die aus DSRM hervorgehenden Phasen Design, Entwicklung und Demonstration finden in Kapitel 4-6 statt, da das Planungskonzept einerseits entwickelt und andererseits anhand eines konkreten Praxisfalls demonstriert wird. Die Vorgehensweise des Planungskonzepts wird in *Kapitel 4* ausgearbeitet. *Kapitel 5* befasst sich mit der Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands und geht auf die spezifischen Rahmenbedingungen des Kooperationsunternehmens ein. Es werden Prozesse, Zeiten und Restriktionen aufgenommen und anschließend Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet. Die Planung

des Soll-Zustands der zusammengelegten Fertigungslinien erfolgt in *Kapitel 6*, wofür die zuvor erhobenen Daten genutzt werden. Statt einer Evaluierung erfolgt eine Validierung des Planungskonzepts durch eine Teilimplementierung in einem branchenrelevanten Unternehmen und eine ereignisorientierte Simulation in *Kapitel 7*. Abschließend werden die Beantwortung der Forschungsfragen, die daraus gezogenen Erkenntnisse und Handlungsempfehlungen in *Kapitel 8* resümiert.

2 Theoretische Grundlagen

Um die Verständlichkeit der Arbeit für Dritte leichter zu gestalten, werden in diesem Abschnitt Begriffe und Sachverhalte zu den relevanten Themen erklärt.

2.1 Grundlagen der Fabrik- und Produktionsplanung

2.1.1 Allgemeines

"Der Begriff 'Produktion' (lat. producere = hervorbringen) bezeichnet die Erschaffung und Kombination von materiellen und immateriellen Gütern, um durch einen wertschaffenden Prozess Güter von höherem Wert zu generieren. Dabei beinhaltet die Produktion zum einen die direkt wertschöpfenden Tätigkeiten der Teilefertigung und Montage, zum anderen aber auch unterstützende Prozesse wie die Planung und Steuerung." (Pröpster 2015)

Eine Fabrik wird definiert als ein „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet“ (VDI 5200 2011, S. 3).

In der Fabrikplanung werden laut Grundig (2014) fünf verschiedene Planungsfälle unterschieden:

1. Neubau eines Industriebetriebs
2. Um- und Neugestaltung bestehender Fabrikstrukturen
3. Erweiterung bestehender Fabrikstrukturen
4. Rückbau von Fabrikstrukturen
5. Revitalisierung von Industriebetrieben

In dieser wissenschaftlichen Arbeit handelt es sich um eine Um- und Neugestaltung bestehender Fabrikstrukturen, welche auch als Brownfieldplanung bezeichnet wird. Das Ziel einer Brownfieldplanung ist die Modernisierung und/oder Rationalisierung der Produktionsstätte. Häufig liegen genaue Vorgaben des Produktionsprogramms und des zeitlichen Verlaufs vor (Grundig 2014, S. 18).

Allgemein können Anlässe zur Fabrikplanung reaktiver oder proaktiver Natur sein. Firmeninterne Faktoren wie eine mangelhafte Supply Chain oder Platzmangel können

als Schwachstellen identifiziert werden und als Anlass für reaktive Fabrikplanungen gelten. Im Gegensatz dazu wird proaktiv gehandelt, wenn Marktanteile oder Wettbewerbsvorteile durch Technologie-Push oder gezielt erzeugte Marktturbulenzen gewonnen werden (Wiendahl et al. 2005, S. 9–12).

2.1.2 Produktionselemente

Die Produktionselemente einer Fabrik können durch das von Bergholz (2005) entwickelte Klassifizierungsmodell, welches in *Abbildung 3* visualisiert ist, dargestellt werden.

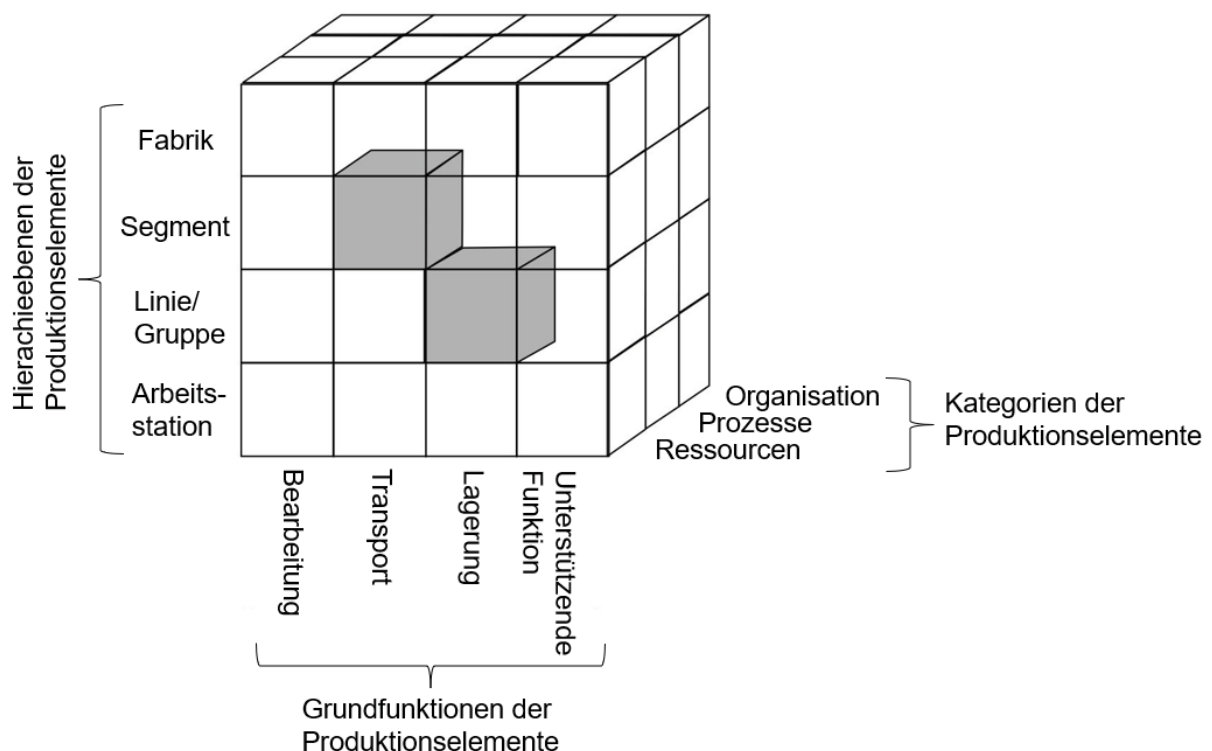


Abbildung 3: Kategorisierung der Produktionselemente (in Anlehnung an Bergholz 2005, S. 139)

Zu erkennen ist, dass drei Kategorien definiert werden (Bergholz 2005, S. 139):

- Organisation
- Prozesse
- Ressourcen

Der Zweck ist die Möglichkeit der eindeutigen Zuordnung aller Elemente bzw. Ressourcen zu der dazugehörigen Organisation und einem zielführenden Prozess. Weiters wird bei den Funktionen zwischen Bearbeitung, Transport, Logistik und

unterstützenden Funktionen unterschieden (Bergholz 2005, S. 136). Zuletzt teilt Bergholz die Hierarchie auf vier Ebenen auf (Bergholz 2005, 128--130):

- Arbeitsstationen stellen die kleinste Betrachtungsebene dar und schließen Personal und Betriebsmittel wie Maschinen und Werkzeug mit ein.
- Linien bzw. Gruppen, welche mehrere Ressourcen oder Arbeitsstationen zusammenfassen.
- Segmente, welche aus mehreren Linien bzw. Gruppen bestehen und auch indirekte produktionsrelevante Bereiche wie die Instandhaltung oder Qualitätssicherung beinhalten.
- Die Fabrikebene, in der ein Produktionswerk als Ganzes betrachtet wird.

2.1.3 Fertigungsprinzipien

Fertigungsprinzipien bezeichnen sowohl die räumliche Formation, die Zusammenarbeit von Betriebsmitteln und Menschen als auch den Durchfluss des Materials bzw. des Werkstücks durch die Produktion. Grundsätzlich gibt es viele verschiedene Fertigungsprinzipien, die aufgrund der industriellen Gegebenheiten entstanden sind. Nichtsdestotrotz lassen sich industrielle Fertigungssysteme durch ihre zeitlichen, organisatorischen und räumlichen Strukturen darstellen. In der Praxis wird häufig zwischen fünf verschiedenen Fertigungsprinzipien, welche sich aufgrund der räumlichen Struktur ergeben, unterschieden. Die fünf Fertigungsprinzipien mitsamt der räumlichen Struktur sind in *Abbildung 4* dargestellt.

Ordnungskriterium	Fertigungsprinzip	Räumliche Struktur	Beispiele
Mensch	Werkbankprinzip		Handwerkliche Arbeitsplätze Werkzeugmaschinenerei
Produkt	Einplatz-/Baustellenprinzip		Großmaschinenbau Schiffswerft Wasserturbinen
Arbeitsaufgabe	Verrichtungsprinzip oder Werkstättenprinzip		Dreherei Bohrerei Schleiferei Schweißwerkstatt
Arbeitsfolge	Inselprinzip		Fertigungsinsel Montageinsel
	Linienprinzip		Fertigungslinie Montagelinie

Abbildung 4: Räumliche Struktur industrieller Fertigungsprinzipien (in Anlehnung an Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 44)

Die Fließfertigung und die Werkstättenfertigung stehen aufgrund ihrer gegensätzlichen Eigenschaften im Kontrast zueinander. Die Fließfertigung, welche in dieser Arbeit am meisten Relevanz hat, unterliegt dem Linien- bzw. Fließprinzip und charakterisiert sich durch ihre kurzen Durchlaufzeiten aufgrund des sofortigen Materialtransports zur nächsten Arbeitsstation direkt nach der benötigten Bearbeitung des Erzeugnisses. Oft wird versucht, die Taktzeiten der einzelnen Arbeitsstationen bestmöglich aufeinander abzustimmen, damit ein annähernd einheitlicher Produktionstakt entsteht, jedoch weisen die Arbeitsstationen meistens ungleichmäßige Auslastungen auf, da die vielen Arbeitsschritte grundlegend verschieden sein können. Dadurch ergibt sich sogleich einer der Nachteile dieses Fertigungsprinzips: Es tritt Materialstau auf, sobald eine Arbeitsstation Probleme hat, weshalb zeitlicher Verzug entsteht. Nachfolgenden Stationen können, auch aufgrund geringer Pufferstände, nicht mehr zeitnah beliefert werden und vorhergehende Stationen können ihr Material nicht an die nachfolgende weiterschicken, wodurch wirtschaftliche Schäden entstehen. Ein weiterer Aspekt ist, dass Fließfertigungen einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen, wodurch nur eine begrenzte Anzahl an Varianten produziert werden kann (Lödding 2016, S. 124).

In der Literatur wurde das Thema einer getakteten Fließfertigung bereits zahlreich behandelt. Folgende Vorteile wurden erörtert (Scholl 1999; Kratzsch 2000; Boysen 2005; Bebersdorf und Huchzermeier 2021):

1. Hoher Nutzungsgrad der Fläche
2. Hohe Produktivität
3. Minimaler, sich wiederholender operativer Steuerungsaufwand
4. Vorausschauende Planung der Stückzahlen
5. Kürzere Durchlaufzeiten und als Resultat geringe Kapitalbindung
6. Geringe Lohnkosten

Die Werkstättenfertigung unterliegt im Gegensatz zur Fließfertigung dem Verrichtungsprinzip, wofür similäre Arbeitssysteme räumlich einer Werkstatt zugeordnet sind. Im Allgemeinen werden die Erzeugnisse desselben Loses zwischen den Werkstätten transportiert, was dazu führt, dass jedes Erzeugnis vor und nach der Bearbeitung auf die Fertigstellung des gesamten Loses bis zum Weitertransport warten muss. Dem gegenüber steht der Vorteil, dass Produkte mit verschiedenen Bearbeitungsfolgen ohne Weiteres gefertigt werden, da Mitarbeiter auf spezielle Verrichtungen geschult sind und oftmals in der Lage sind, mehrere Maschinen innerhalb einer Werkstatt zu bedienen (Lödding 2016, S. 123).

Weiters gibt es das Baustellenprinzip, welches vor allem bei großen Werkstücken und kleinen Fertigungslosgrößen, wie beispielsweise im Schiffsbau, zum Einsatz kommt. Dabei werden die Arbeiter mitsamt den Arbeitssystemen zum Werkstück gebracht (Lödding 2016, S. 125). Darüber hinaus gibt es die Insel- oder Gruppenfertigung, wo sich die Arbeitssysteme, wie bei einer Fließfertigung, nach dem Materialfluss der Varianten orientieren und in den meisten Fällen U-Form haben (Lödding 2016, S. 124).

Die Gruppenfertigung bzw. Inselfertigung sei vom Begriff der Gruppenarbeit zu unterscheiden. Bei der Gruppenarbeit handelt es sich um kleine Teams mit bis zu 12 Mitarbeitenden, welche sich auf einer Arbeitsstation befinden und gemeinsam die Arbeitsaufgaben weitestgehend selbstständig organisieren und ausführen. Der Bedarf zur Gruppenarbeit entsteht durch große Objekte, welche einen großen Arbeitsaufwand mit sich bringen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 57). Die Anzahl an Mitarbeiter_innen pro Station wird als Werkerdichte w bezeichnet (Becker 2007).

2.1.4 Fertigungsarten

Die Fertigungsart ist ein maßgeblicher Faktor für die Auslegung von Fertigungen von produzierenden Unternehmen. Sie spiegelt sich durch die sogenannte Losgröße wider. Unter einer Losgröße „[...] versteht man eine Anzahl gleicher Werkstücke, Baugruppen oder Erzeugnisse, die mit derselben Einrichtung und denselben Werkzeugen auf einer oder mehreren Bearbeitungsmaschinen in einem sogenannten Los hergestellt werden. Dabei versucht man, in optimalen Losgrößen zu fertigen. Diese bestimmen sich durch die Minimierung der Summe der Kosten, die zur Einrichtung der Maschine für ein Werkstück erforderlich sind und der Kosten für die Lagerhaltung und Kapitalbindung.“ (Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 42–43).

Aus der Höhe der Losgröße lassen sich weitere wichtige Einflussgrößen für Fertigungen ableiten: der Wiederhol- oder Stückzahlcharakter und in weiterer Folge die Fertigungsart. Der Zusammenhang wird in *Abbildung 5* verdeutlicht. Allgemein gibt es bei der Fertigungsart folgende Unterscheidungen (Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 43):

- Die **Einzelfertigung** oder Unikatfertigung, bei der es sich um die häufig in der Literatur erwähnte Losgröße 1 handelt, erstellt und verkauft ein Produkt nur ein einziges Mal.
- Bei der **Mehrfachfertigung** wird das gleiche Erzeugnis mehrmals unmittelbar hintereinander produziert.
- Wird derselbe Grundtyp in mehreren Varianten erzeugt, wird die Fertigung als **Variantenfertigung** bezeichnet.
- Wenn Erzeugnisse in großen Stückzahlen gefertigt werden, handelt es sich um eine **Serienfertigung**.
- Bei der **Massenfertigung** wird ununterbrochen das gleiche Produkt über einen langen Zeitraum gefertigt.

		Fertigungsprinzipien																	
		Einzelplatzprinzip		Verrichtungsprinzip			Fließ- oder Erzeugnisprinzip												
		Externe Baustellenfertigung	Innerbetriebliche Baustellenfertigung	Werkbankprinzip	Werkstättenprinzip	Gruppen-technologische Fertigungssysteme		Flexible Taktfertigung	Lose verkettete Taktfertigung	Starr verkettete Taktfertigung									
Fertigungsinsel	Flexibles Fertigungssystem																		
Fertigungsart	Einzelfertigung	Einmalfertigung	X	X	X	X													
		Wiederholfertigung		X	X	X	X								X	X	X		
	Mehrfachfertigung	Sortenfertigung			X	X	X								X	X	X		
		Serienfertigung						X	X	X	X				Bereich der Einzel- und Serienfertigung				
		Massenfertigung									X	X							

Abbildung 5: Zuordnung von Fertigungsarten und Organisationstypen (in Anlehnung an Wiendahl und Wiendahl 2020, S. 52)

Die Losgröße 1 wird in einer Einmalfertigung hergestellt und folgt meistens dem Prinzip der Werkstätten- oder Baustellenfertigung, außer das einmalige Erzeugnis kann einer eindeutigen Produktfamilie zugeordnet werden, in welchem Fall das Insel- oder Fließprinzip Relevanz hätte. Die Bereiche der Einzel- und Kleinserienfertigung, die in *Abbildung 5* grau hinterlegt sind, werden durch kleine Losgrößen charakterisiert, welche sich in vielen Fällen am Kundenauftrag orientieren. Wie anhand von *Abbildung 5* zu erkennen ist, wird für diese Art von Fertigung ausschließlich das Verrichtungsprinzip angewendet. Die Serienfertigung erzeugt im Vergleich höhere Losgrößen, was in vielen Fällen durch eine Mischform aus Insel- und

Werkstättenfertigung erreicht wird. Typischerweise wird ein Teil des Erzeugnisses für die Kundenaufträge gefertigt und ein anderer Teil auf Lager gefertigt. Das höchste Maß an Losgrößen wird in der Massenfertigung, welche sich nach dem Fließprinzip richtet, produziert (Lödding 2016; Wiendahl und Wiendahl 2019).

2.1.5 Ziele der Produktion

Die primären Ziele einer Fertigung sind geringe Durchlaufzeiten der Aufträge, die Einhaltung der Termintreue, eine hohe Auslastung der Betriebsmittel und Erreichen der geforderten die Prozess- und Produktqualität. Aus einer betriebswirtschaftlichen Sicht und vom Return on Investment abgeleitet, streben Unternehmen geringe Kapitalbindung durch niedrige Lagerbestände und geringe Fertigungskosten an. Damit der Erfolg oder Misserfolg der Ziele messbar ist, wird häufig folgende Kennzahl verwendet (Böge und Böge 2021, S. 1587):

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Produzierte Menge}}{\text{Eingesetzte Arbeitsstunden}}$$

Formel 1: Produktivität

Um Kundenzufriedenheit zu gewährleisten und infolgedessen weitere Aufträge von demselben_ derselben Kunden_ Kundin zu erhalten, stellt die Einhaltung der Termine, welche mit den internen als auch externen Kund_innen auszumachen sind, eine zentrale Rolle in der Fertigung dar. Dadurch ist die Termineinhaltung eine zentrale Forderung an die Produktionslogistik. Um diese zu gewährleisten, muss im ersten Schritt die Menge aller zu fertigenden Produkte, welche sich innerhalb von Fertigungen durch Fertigungsaufträge äußern, erörtert werden, um genaue Start- und Endtermine für das gesamte Vorhaben und die einzelnen Arbeitsschritte zu erhalten (Böge und Böge 2021, S. 1708).

Praktisch wird die Einhaltung der Termine in der Fertigung dadurch gewährleistet, dass bei den einzelnen Arbeitsstationen bzw. Arbeitsorten geeignete und qualifizierte Mitarbeiter_innen sind, um die benötigten Arbeitsschritte in der geforderten Zeit zu erledigen. Dazu bedarf es einer guten Personaleinsatz- und Schichtplanung (Günther und Tempelmeier 2012, S. 132).

Die Schichtplanung definiert sich dadurch, dass die Kapazitätsanforderungen pro Arbeitsstation durch eine passende Anzahl des Produktionspersonals erfüllt werden.

Dafür werden in Schichtmustern einzelne Arbeitstage, Tageszeiten, Schichtdauern und Arbeitsplätze des Personals erfasst, damit in weiterer Folge durch die Personaleinsatzplanung qualifizierte Mitarbeiter_innen zur richtigen Zeit dem richtigen Arbeitsplatz zugeordnet sind (Günther und Tempelmeier 2012, S. 132).

2.2 Relevante Grundlagen aus Lean Management

Hintergrund des Lean Managements sind, die vom Automobilhersteller Toyota entwickelten und umgesetzten Toyota Production Systems. Im Zuge der schlanken Produktion von Toyota wurde das in *Abbildung 6* ersichtliche Modell eines Produktionssystems gebildet, was einem Haus ähnelt (Liker 2004, S. 29).

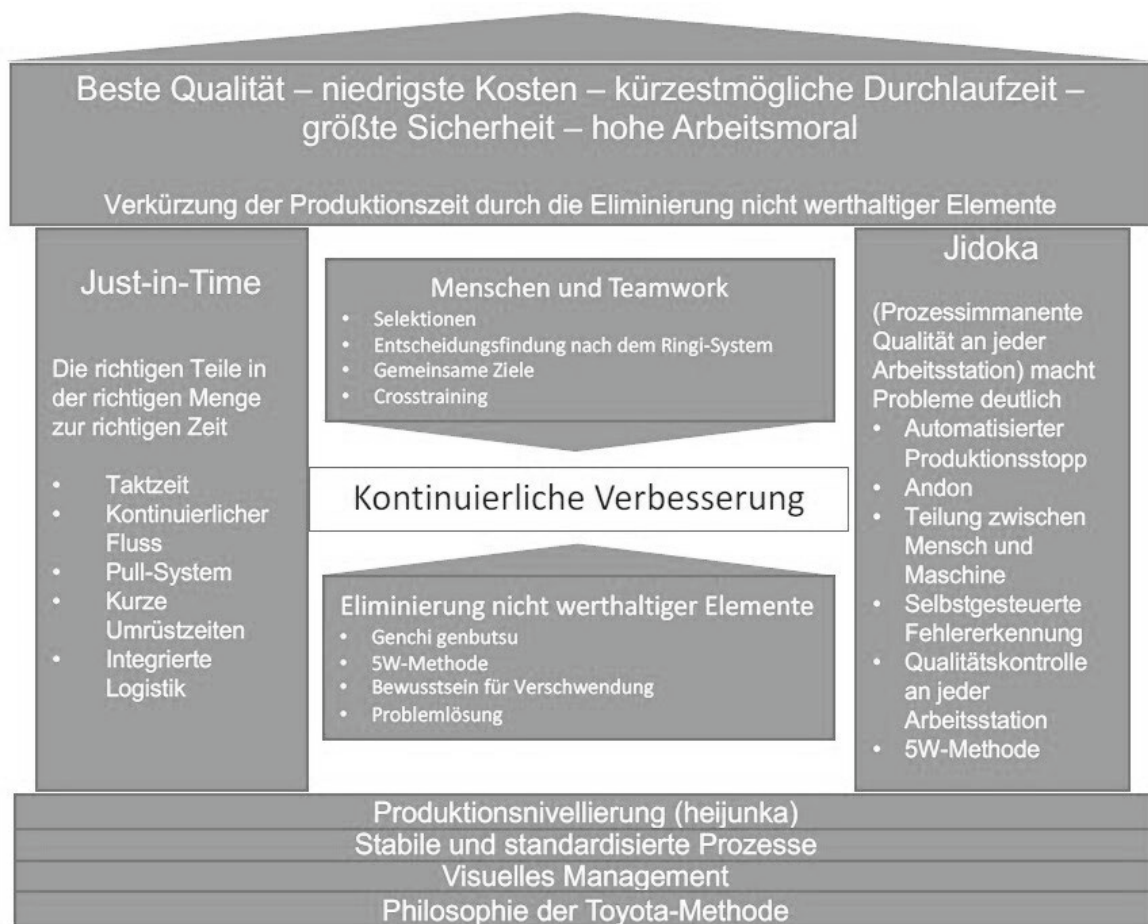


Abbildung 6: Toyota Production Systems Haus (in Anlehnung an Brunner 2008, S. 121)

Dabei stellt das Dach des Hauses metaphorisch die Unternehmensziele dar. Um diese Ziele zu erreichen, sind die darunter befindlichen Säulen ein essenzieller Bestandteil. Hinzu kommt der Kern des Hauses, welcher als Herzstück des Produktionssystems betrachtet wird – die kontinuierliche Verbesserung. Beim Fundament handelt es sich um benötigte Basis, auf welchem das Haus errichtet ist (Brunner 2008, S. 122).

Lean Management Methoden sind Werkzeuge, mit denen die Unternehmensziele umgesetzt, erreicht und sichergestellt werden. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels werden Lean Management Methoden angeführt, welche für diese Arbeit an Relevanz haben. In der Literatur finden sich weitere Lean Management Methoden, welche im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht näher erläutert werden.

2.2.1 Wertstromanalyse und -design

Die Wertstromanalyse dient sowohl zur Darstellung von Produktionsprozessen und Material- als auch zur Darstellung von Informationsflüssen. Sie kann Teilgebiete sowie die Gesamtheit eines Unternehmens visualisieren. Im Gegensatz zu detaillierten Prozessbeschreibungen, die beispielsweise durch BPMN (siehe *Kapitel 2.5.2*) dargestellt werden, zeigen Wertstromdesigns durch die Erfassung der Gesamtheit Verbesserungsmöglichkeiten entlang der Wertschöpfungskette auf, denn sie ist eine weitverbreitete Lean Management Methode, das den Arbeits- und Informationsfluss nebeneinander aufzeigt und die verschwendete Zeit offenbart (Zennaro et al. 2019, S. 5372).

Die Wertstromanalyse wird in dieser Arbeit nach dem Schema von Erlach (2010) ausgearbeitet. Die Modellierung basiert auf sechs Grundelementen:

- „1. ‚Produktionsprozesse‘ beschreiben die unmittelbar produzierenden Tätigkeiten in der Fabrik sowie bei externer Bearbeitung,
2. ‚Geschäftsprozesse‘ beschreiben die Aufgaben der Auftragsabwicklung inklusive der Produktionsplanung und Produktionssteuerung,
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 und 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 2010, S. 32–33).

Im ersten Schritt der Analyse werden Produktfamilien gebildet. Dabei wird das gesamte Produktspektrum methodisch in Produktfamilien gegliedert. Bei einer Erstanwendung der Methodik ist demnach eine geeignete Produktfamilie dafür auszuwählen. Im zweiten Schritt wird eine Kundenbedarfsanalyse erstellt. Mit Zuhilfenahme alter Verkaufszahlen kann die Modellierung des Kundenbedarfs vonstattengehen. Nach Beendigung der vorbereitenden Schritte kann anschließend als Drittes die tatsächliche Wertstromaufnahme erfolgen. Bei einem Rundgang, der beim letzten Produktionsprozess startet, sind alle wichtigen Kennzahlen der Produktions- und Logistikprozesse aufzunehmen und im Ist-Zustand zu erfassen. Im letzten Schritt werden die Verbesserungspotentiale durch die Analyse von ausgerechneten Kennzahlen erörtert (Erlach 2010).

Die zugehörigen Symbole des Wertstromdesigns sind im Anhang vorzufinden. Damit Wertstromanalyse/-design durchgeführt wird, ist es nötig einige weitere Begriffe zu verstehen. Aufgrund dessen werden an dieser Stelle essenzielle Begriffe erklärt.

Aus *Formel 1* ist ersichtlich, dass Zeit eine wertvolle Ressource ist. Damit diese sinngemäß erfasst wird, gibt es diverse Begrifflichkeiten, wie beispielsweise die Durchlaufzeit.

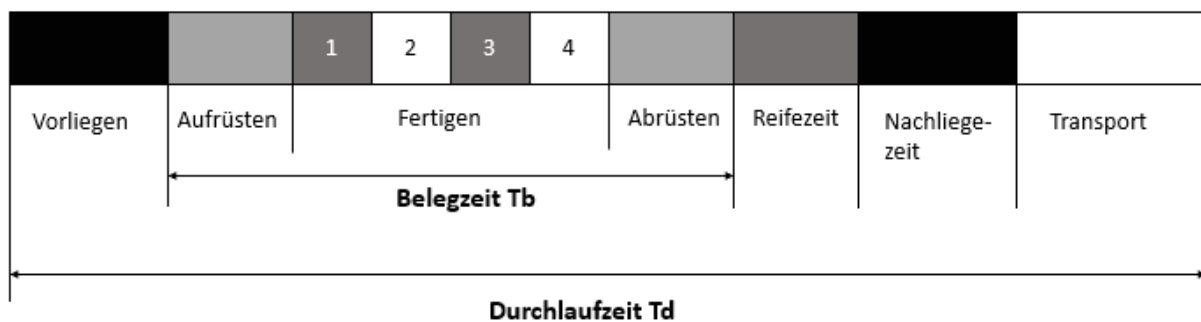


Abbildung 7: Durchlaufzeit und Belegungszeit (in Anlehnung an Böge und Böge 2021, S. 1709)

Grundsätzlich beschreibt die Durchlaufzeit die Zeitspanne zwischen Produktionsanfang und -ende eines Auftrags. In der Literatur gibt es jedoch keine einheitliche Definition, da keine Einigkeit über die ausschlaggebenden Anfangs- und Endereignisse besteht. Bezieht sich eine Durchlaufzeit auf eine Arbeitsstation, setzt sie sich aus folgenden Bestandteilen zusammen (Adam 1993, S. 408):

- Transportzeit
- Vorliege- oder Lagerzeit
- Rüstzeit
- Fertigungszeit
- Technisch bedingte Reifezeit (Aushärtungs-, Abkühlungs- oder Trocknungszeit)
- Nachliegezeit

Dabei ist eine Arbeitsstation laut der Interpretation sowohl von Bebersdorf und Huchzermeier (2021) als auch von Bergholz (2005) als das kleinste Layoutelement bzw. die geografisch kleinste Einheit in einer Fertigungslinie (siehe *Kapitel 2.1.2*).

Die Durchlaufzeit kann sich jedoch nicht nur auf einzelne Arbeitsstationen beziehen, sondern auch auf die Gesamtheit aller Arbeitsstationen, was als auftragsbezogene Durchlaufzeit bezeichnet wird. Um diese zu errechnen, werden die Durchlaufzeiten aller Arbeitsstationen aufsummiert (Adam 1993, S. 406–408).

Der in der Produktion zyklisch vorherrschende Takt entsteht aufgrund des Kundentaktes, der sich aus den Anforderungen des Kunden ableitet (Bertagnolli 2018, S. 71).

$$\text{Kundentakt} = \frac{\text{Produktionszeit}}{\text{Kundenauftragsmenge}}$$

Formel 3: Kundentakt (Bertagnolli 2018, S.71)

Überschreitet eine Prozessdauer den Kundentakt, so handelt es sich um einen Engpass. Der ausschlaggebende Engpass ist der langsamste Prozess, er bestimmt die Ausbringung und Produktivität. Die Engpassstationen zu optimieren oder zu entlasten, ist eines der Ziele der Austaktung, welches genauer in *Abschnitt 2.4.3* behandelt wird (Bertagnolli 2018, S. 70).

"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 2010, S. 66).

$$\text{Zykluszeit} = \frac{\text{Bearbeitungszeit} \times \text{Anzahl Gleichteile pro Endprodukt}}{\text{Anzahl gleicher Ressourcen}}$$

Formel 2: Berechnung der Zykluszeit (Erlach 2010, S. 66)

Ein weiterer wichtiger Begriff ist die Taktzeit, welche aufgrund des Kundenbedarfs und der Zykluszeit entsteht. Sie ist vor allem bei Fließfertigungen ein ausschlaggebender Faktor, da die aufeinanderfolgenden Arbeitsstationen zeitlich aufeinander abgestimmt sind, wodurch ein „Materialfluss“ entsteht. Die Taktzeit ist demnach die Zeit, in der die Arbeitsstationen regelmäßig das neue Zeitintervall beginnen und die fertig bearbeiteten Werkstücke an die nächste Arbeitsstation weitergeben. Oftmals sind bei Fließfertigungen die Durchlaufzeiten kurz und jede Arbeitsstation ist auf ein gewisses Werkstück ausgerichtet (Böge und Böge 2021, S. 1629).

$$\text{Taktzeit} = \frac{\text{Gesamtaufwand}}{\text{Anzahl der Werker} * \text{Wirkungsgrad}}$$

Formel 3: Berechnung der Taktzeit (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 115)

Oftmals gibt die Taktzeit auch zugleich den Produktionsausstoß einer Produktion vor, welcher aufgrund des Kundenbedarfs entsteht (Pröpster 2015).

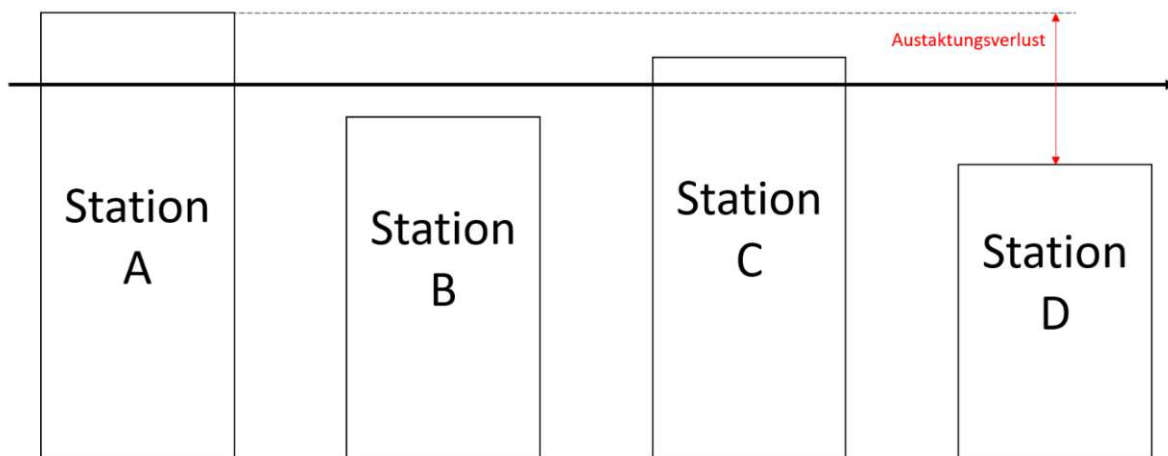


Abbildung 8: getaktete Fließfertigung inklusive der Zeitdauer (eigene Darstellung)

Ein weiterer wichtiger Begriff ist der Austaktungsverlust. Dieser kann sowohl an einer Station als auch zwischen Stationen festgestellt werden. Dabei handelt es sich um die Differenz zwischen der kürzesten und der längsten Ablaufzeit, was auch Leer- bzw. Wartezeit genannt wird (Mayr und Berger 2017).

2.2.2 Ishikawa-Diagramm

Das Ishikawa-Diagramm bietet die Möglichkeit, Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen herzustellen. Entlang von horizontalen und vertikalen Pfeilen werden mögliche primäre als auch sekundäre Ursachen eingetragen. Als Leitfaden können die geläufigen „5M's“ herangezogen werden (Wong et al. 2016, S. 122):

- Mensch
- Material
- Methode
- Maschine
- Mitwelt

In Abbildung 14 ist ein beispielhaftes Ishikawa-Diagramm abgebildet.

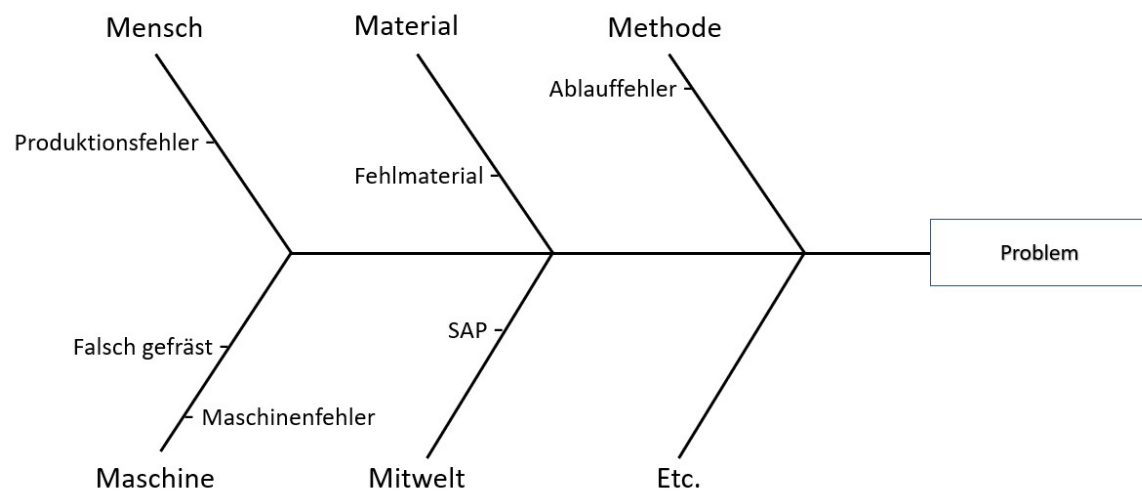


Abbildung 9: Beispiel Ishikawa-Diagramm (eigene Darstellung)

2.2.3 Heijunka

Heijunka, was so viel bedeutet wie eine nivellierte Belastung bzw. eine ausgetaktete Produktion, richtet ihr Augenmerk auf eine gleiche Verteilung aller Fertigungsaufträge

über einen längeren Produktionszeitraum (Liker 2004). Die Arbeitslast entlang der Wertschöpfungskette wird dadurch nivelliert, dass die Varianten gleichmäßig aufgeteilt werden. Beispielsweise sollen nach einem aufwändigen Produkt P1 drei Einheiten folgen (siehe *Abbildung 10*), welche eine geringe Arbeitslast enthalten (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 87). Die Implementierung bringt zahlreiche Vorteile für das einführende Unternehmen und dessen Kunden (Liker 2004; Bebersdorf und Huchzermeier 2021; Liker 2021; Veit 2010):

- Kapitalgebundene Bestände können gesenkt werden.
- Minimierung großer Fertigwarenbestände durch falsch prognostizierte Absatzmengen, die bei Verzicht von Heijunka auftreten.
- Kurze Lieferzeiten, was gleichbedeutend mit kurzen Order-to-Cash-Zyklen ist, durch regelmäßige Produktion verschiedener Varianten, was zu einem verbesserten Cashflow im Unternehmen führt.
- Kurze Durchlaufzeiten und verbesserte Qualität sind anzustreben. Durch die verkürzten Durchlaufzeiten werden unnötige Prozessschritte vermieden, bei denen Transportschäden entstehen können. Weiters können Fehler dadurch schneller erkannt werden und in weiterer Folge Fehler bei den Folgeprodukten früher verhindert werden.
- Durch die gleichmäßige Auslastung aller Mitarbeiter_innen entlang des Produktionsflusses können Produktionsstopps besser vermieden werden, da sich die Stationszeiten besser an die Taktzeit annähern, wodurch gleichzeitig weniger Leer- bzw. Wartezeiten entstehen.

Mehrprodukt-Fließmontage: Montage in Losen nach a) Nachfrageprognose oder b) Sammlung von Kundenaufträgen



Modell-Mix-Montage nach Heijunka: gleichmäßige Verteilung der Produkte nach angestrebtem Muster



Abbildung 10: Montage in Losen vs. Modell-Mix-Montage (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 87)

2.3 Grundlagen der Schienenfahrzeugindustrie

2.3.1 Marktbedingungen

In der Schienenfahrzeugindustrie steigt die Anzahl der Varianten aufgrund von Anpassungen an Infrastrukturegebenheiten, Fahrwerksgegebenheiten und Kundenwünschen. Infolgedessen kommt es auch zu geringeren Stückzahlen und kleinen Losgrößen für die produzierenden Konzerne der Schienenfahrzeuge. Auch durch die Privatisierung von Unternehmen ergaben sich neue Marktbedingungen, welche zu neuen Herausforderungen führten, die unter anderem aus der geforderten Variantenvielfalt entstanden. Daraus resultieren kontinuierliche Anpassungsprozesse in der Entwicklung, Produktionsplanung und Fertigung. Schlussendlich bedeutet das für die Hersteller_innen der Schienenfahrzeuge, dass jedes Fahrzeugprojekt großen Modifikationen sowohl in der Konstruktion als auch im Bau des Fahrzeugs unterzogen werden muss, was sich schwer mit der Wirtschaftlichkeit und den kurzen Time-to-Market-Zyklen vereinbaren lässt. Die bereits seit dem Jahr 2002 vorherrschenden Wettbewerbsbedingungen verdichten den Markt, wodurch ein besseres Variantenmanagement gefordert wird. Fest steht, dass eine Verringerung der Variantenvielfalt im Schienenfahrzeugbau keine eindeutige Lösung darstellt. Daher entpuppt sich das Variantenmanagement als Optimierungsproblem (Schmidt 2002; Altenburg 1999).

Das Thema des Variantenmanagements hat in der Literatur hinsichtlich der Schienenfahrzeugindustrie bereits Anklang gefunden. Dabei handelt es sich jedoch um die unterschiedlichen Bauformen und die Produktentwicklung. Hoffmann (2018) hat die geläufigsten Werke dazu ausgearbeitet und schrieb, dass enorme Einsparungspotenziale durch die Standardisierung in der frühen Produktentstehungsphase aufkommen, analog zur Automobilbranche. Der Vergleich mit der Automobilbranche ist dennoch nur bedingt möglich, da die Schienenfahrzeugindustrie folgende Eigenschaften aufweist (Schmidt 2002, S. 42):

- Hohes Maß an Arbeitsteilung und hohe Taktzeiten
- Viel manuelle Arbeit sowohl in der Fertigung als auch in der Montage
- Niedriger Automatisierungsgrad
- Hohe Komplexität bei Montageabläufen
- Hybridfertigungsorganisationsformen

Schmidt (2002) merkt an, dass die Schienenfahrzeugindustrie nach wie vor einige Defizite aufweist, welche in *Abbildung 11* dargestellt sind.

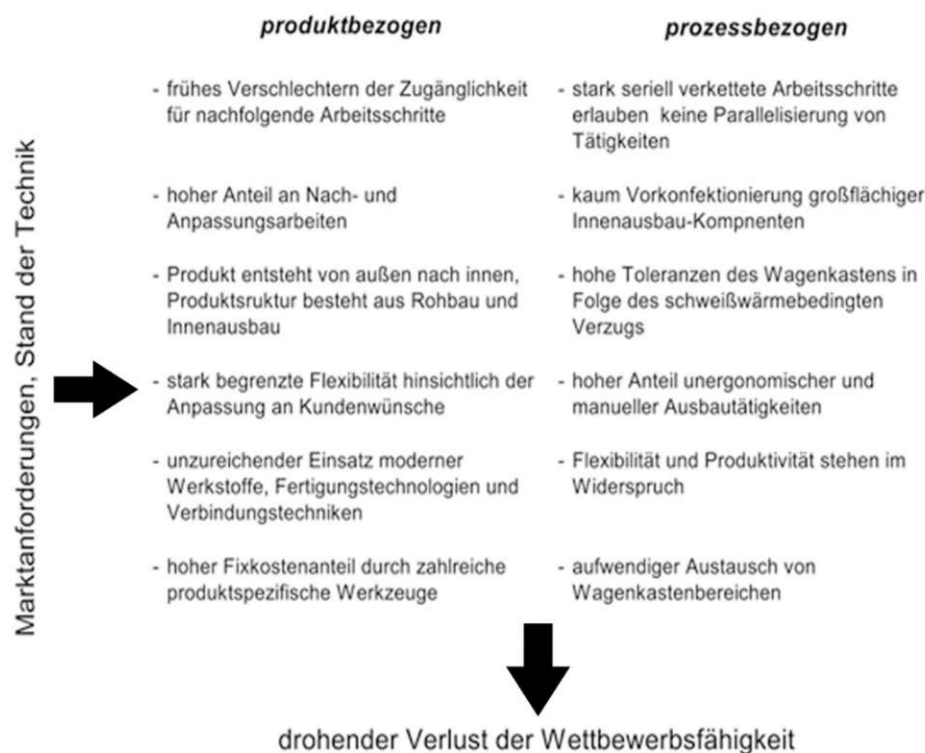


Abbildung 11: Zusammenfassung der Defizite im Schienenfahrzeugbau (Schmidt 2002, S. 55)

Die in *Abbildung 11* ersichtlichen Defizite ergeben sich aufgrund der typischen Produktionsstrategien für Serienprodukte, deren Fertigungsumgebungen auf Make-To-Order (MTO) und Engineering-To-Order (ETO) Konzepten basieren. Der charakteristische Faktor dieser Strategien ist der Kundenauftragspunkt, der vor dem Produktionsprozess liegt, da dieser erst nach der Bestätigung des Kundenauftrags beginnt. Aus diesem Grund ist es strategisch nicht sinnvoll, Fertigerzeugnisse auf Lager zu haben, um die Nachfrage der Kunden zu befriedigen. Bei der MTO-Produktion werden die meisten oder alle für die Herstellung eines bestimmten Produkts erforderlichen Vorgänge erst nach Eingang eines Kundenauftrags durchgeführt (Amaro et al. 1999). Häufig werden auch Komponenten und Materialien nach dem Kundenauftragspunkt hergestellt oder bestellt. Bei der Engineer-to-Order-Produktion werden auch Engineering und Design gemeinsam mit dem Kunden durchgeführt, um seine spezifischen Anforderungen zu erfüllen. In diesem Fall müssen die Produktions- und Materialbestellungen nach der Auftragsbestätigung des Kunden erfolgen (Zennaro et al. 2019, S. 5362).

Hinzu kommt, dass aufgrund der Tendenz zur steigenden Urbanisierung und Globalisierung die Nachfrage nach Mobilität rasant ansteigt. Bis 2050 wird eine Verdreifachung des Personenverkehrs prognostiziert. Um eine nachhaltige Entwicklung zu gewährleisten, haben 193 Mitgliedstaaten der Vereinten Nationen die Sustainable Development Goals verabschiedet, welche bereits im Jahr 2016 in Kraft getreten sind. Damit diese Nachhaltigkeit, die aufgrund des Klimawandels notwendig ist, unterstützt wird, ist die Schienenfahrzeugindustrie eine wichtige Branche, um der Verdreifachung des Personenverkehrs mit einer nachhaltigen Mobilität gerecht zu werden (Siemens Mobility 2020, S. 1).

2.3.2 Entwicklung der Schienenfahrzeuge

Um die jetzigen Gegebenheiten des Aufbaus zu verstehen, ist ein Blick in die Entstehung des Schienenfahrzeugs hilfreich.

Die ersten Schienenfahrzeuge wurden fast zur Gänze aus Holz gebaut. Absplitterndes Holz verursachte bei Unfällen schwerwiegende Verletzungen. Mit Anstieg des Holzpreises wurden Mitte des 19. Jahrhunderts die ersten Untergestelle und Seitenwände aus Stahl gebaut bzw. durch Stahl verstärkt, was zu einer hohen Gesamtmasse führte. Auch die weiterentwickelte Mischbauweise aus Holz und Stahl bot, aufgrund der funktionellen Trennung von Untergestell, was die Tragfunktion erfüllte, und des Wagenkastens, der zur Unterbringung der Fahrgäste diente, keinen guten Schutz für die Fahrgäste. Bei Zusammenstößen kam es oftmals zu einer Überpufferung bzw. zum übereinander Schieben der Untergestelle, was zur vollständigen Trennung von Untergestell und Wagenkasten führte. Ende des 19. Jahrhunderts setzte sich die Ganzstahl-Bauweise durch, jedoch wurden die Komponenten genietet, da die Schweißtechnik noch nicht ausgereift für den Praxiseinsatz war. Durch die Entwicklung hin zum Leichtbau übernahmen seither auch die Seitenwände und das Dach Tragfunktionen. Bereits damals wiesen die Wagenkästen viele Merkmale auf, die auch heutzutage noch zu erkennen sind (Ihme 2019, S. 222).

Der Bau von Wagenkästen lässt sich prinzipiell in Differential- und Integralbauweise unterscheiden (Schmidt 2002, S. 29). Bei der Differentialbauweise, welche auch Gerippe-Blech-Bauweise bezeichnet wird und von den 1920er-Jahren bis in die 1960er vorwiegend verbreitet war, besteht die Wagenkastenprimärstruktur aus einem

skelettartigen Gerippe, welches mit Blech-Beplankungen, die aus Stahl-, Aluminium- oder Edelstahl-Profilen bestehen, verkleidet wird. Bei dieser Bauweise werden bis zu 1300 Teile verwendet, was zu einem hohen Fertigungsaufwand führt. Aufgrund der hohen konstruktiven Flexibilität hinsichtlich der Form des Wagenkastens ist diese Bauweise heutzutage noch bei kleineren Fahrzeugserien verbreitet (Schmidt 2002, S. 23–30).

Die Integralbauweise, auch Großprofilbauweise genannt, hatte in den 1970er-Jahren ihren Aufschwung und nahm im Rohbau durch großformatige Strangpressprofile bis zu 80% des Wagenkastens ein. Die profilierte Struktur setzte die erforderliche Steifigkeit voraus und machte somit das separat tragende Gerippe, wie es in der Differentialbauweise vorzufinden war, überflüssig. Die Integralbauweise nutzt die mechanischen und verarbeitungstechnischen Eigenschaften von Aluminium, um die Bauteilmenge und -vielfalt zu minimieren. Dadurch kommt es auch zu einem geringeren Fertigungsaufwand im Rohbau, da sich die Bauteile zum Teil über die ganze Wagenlänge erstrecken, wodurch sich der Aufwand beim Zusammenbau des Wagenkastens reduziert. Weiters wird durch die großen Bauteile eine Reduktion der Gesamtanzahl auf ungefähr 700 Bauteile bewirkt, was im Vergleich zur Differentialbauweise eine Senkung um fast 50% bedeutet und infolgedessen zu einer besseren Wirtschaftlichkeit führt. Für den Innenausbau werden Befestigungsschienen, wie z.B. Winkelprofile und C-Schienen verwendet. Aufgrund der Materialeinsparungen und der höheren Wirtschaftlichkeit ist heutzutage die Integralbauweise in der Industrie verbreitet (Schmidt 2002, S. 23–30).

2.3.3 Aufbau einer Metro

Grundsätzlich wird im Schienenfahrzeugbau zwischen Lokomotiven und Waggon unterschieden, wobei Waggon in Güter- und Personenwagen unterteilt werden. Diese Arbeit befasst sich nur mit Personenwagen, da diese eine höhere Variantenvielfalt und einen höheren Fertigungsaufwand mit sich bringen (Schmidt 2002, S. 21).

Ein standardisierter Aufbau von Schienenfahrzeugen wird durch die DIN EN 15380-2 vorgegeben. Zweck der Norm ist die Vorgabe einer Produktstruktur, die eine vereinfachte Kommunikation zwischen allen involvierten Parteien in jeder Phase der Zusammenarbeit gewährleistet. Dafür wird das Produkt in Haupt- und Unterproduktgruppen eingeteilt, welche durch bestimmte Kennzeichnungen

identifiziert werden können. *Tabelle 1* gibt einen Überblick über die Kennbuchstaben der Hauptproduktgruppen (HPG) (DIN EN 15380-2 2006, S. 4).

Kennzeichen der HPG	Benennung der HPG
B	Fahrzeugkasten
C	Fahrzeugausbau
D	Fahrzeuginneneinrichtung
E	Fahrwerk
F	Energieanlage, Antriebsanlage
G	Steuerungsanlage für Fahrbetrieb
H	Hilfsbetriebsanlage
J	Überwachungs- und Sicherheitseinrichtungen
K	Beleuchtung
L	Klimatisierung
M	Nebenbetriebsanlage
N	Türen, Einstiege
P	Informationseinrichtungen
Q	Pneumatik / Hydraulik
R	Bremse
S	Fahrzeugverbindungseinrichtungen
T	Tragsysteme, Umschließungen
U	elektrische Leitungsverlegung

Tabelle 1: Übersicht über die Hauptproduktgruppen (DIN EN 15380-2, S.7)

Die Hauptproduktgruppen werden in Unterproduktgruppen (UPG) aufgeteilt. Der Fahrzeugkasten besteht z.B. aus acht Unterproduktgruppen (DIN EN 15380-2 2006, S. 8):

1. Untergestell
2. Längswände
3. Dach
4. Fahrzeugkopf
5. Stirnwände
6. Anschweißteile, Anbauteile
7. Zwischendecke
8. Zwischenwände



Abbildung 12: Untergestell (Werksfoto: Siemens Mobility Austria GmbH)

Abbildung 12 verdeutlicht die Dimensionen der Unterproduktgruppen. Das dargestellte Untergestell befindet sich zum Zeitpunkt der Aufnahme noch in der Ausfertigung und hat eine Länge von über 20 Metern.

Eine Übersicht aller Unterproduktgruppen ist in der Norm DIN EN 15380-2 (2006) vorzufinden. Nicht alle Unterproduktgruppen, die in der Norm erwähnt werden, müssen in einem Schienenfahrzeug enthalten sein (DIN EN 15380-2 2006, S. 8).

U-Bahnen bzw. Metros bestehen aus zwei Kopfwägen und mehreren Mittelwägen. Ein Kopfwagen beherbergt zusätzlich auf einem Ende des Wagens die Fahrerkabine. Je nach Betreiber und Stadt kann die Anzahl der Mittelwägen variieren. Durch den Unterschied von Kopf- zu Mittelwagen entstehen auch in den Unterproduktgruppen verschiedene Varianten, welche sich bereits in einer variantenreichen Produktion der Unterproduktgruppen äußern (Schneider 2018).

2.3.4 Fertigungsprozess einer Metro

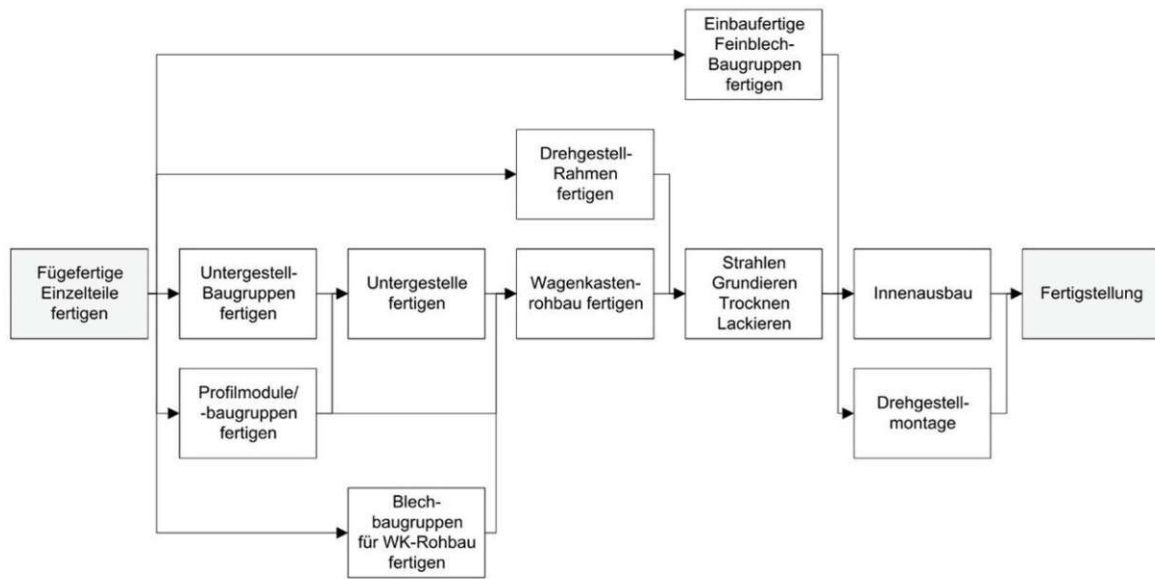


Abbildung 13: Vorranggraph der Kernprozessstufen in der Wagenkastenfertigung (Schmidt 2002, S. 49)

Im ersten Schritt der Fertigung werden fügefertige Einzelteile gefertigt oder zugekauft. Hierbei handelt es sich beispielsweise um Profile, welche im Folgeschritt dazu benutzt werden, durch das Fertigen und Fügen von Baugruppen die Produktion des Wagenkastens zu beginnen. Das Untergestell besteht aus verschiedenen Untergestellbaugruppen und Profilbaugruppen. Zusammen mit den weiteren Blechbaugruppen, bestehend aus dem Dach, den Stirn- und den Seitenwänden, kann der Wagenkastenrohbau gefertigt werden. Der parallel zum Wagenkastenrohbau gefertigte Drehgestellrahmen und der Wagenkastenrohbau kommen anschließend in die Oberflächenbehandlung, bei der gestrahlt, grundiert, getrocknet und lackiert wird. Auch der durch das Schweißen entstandene Verzug wird in diesem Arbeitsschritt mithilfe von manuellem oder mechanisiertem Richten, Spachteln und Schleifen korrigiert. Danach werden die einbaufertigen Feinblechbaugruppen hinzugefügt, womit der Wagenkasten bereit für die Montage bzw. den Innenausbau ist. Der Innenausbau des Wagenkastens beinhaltet das Verlegen von Rohren und der Elektrik sowie den Einbau aller Arten von Isolation als auch die Montage von Innenverkleidungselementen und vieler weiterer Komponenten, wie beispielsweise Klimaanlage, Toiletten, Stühle und Tische. Durch den Einsatz vieler verschiedener Fachkräfte und der Vielzahl an Montageoperationsschritten handelt es sich bei der

Montage um einen zeitintensiven und hochkomplexen Vorgang (Schmidt 2002, S. 49–50).

Zusammengefasst kann die Produktion eines Schienenfahrzeugs in fünf verschiedene Produktentstehungsphasen eingeteilt werden:

- „*Einzelteillfertigung*,
- *Baugruppenmontage*,
- *Rohbaufertigung*,
- *Nacharbeiten und Farbgebung* sowie
- *Ausbau bzw. Endmontage*.“ (Schmidt 2002, S. 41).

Bei der traditionellen Differentialbauweise, welche in *Kapitel 2.3.2* erklärt wurde, herrscht in der Fertigung überwiegend die Baustellen- und Werkstattfertigung vor. Bei der heutigen Kleinserienfertigung von Metros hingegen herrscht entlang der Wertschöpfungskette eine Mischform von verschiedenen Fertigungsprinzipien vor. So lässt sich das übergeordnete Prinzip als Werkstättenprinzip klassifizieren, während in den einzelnen Kernprozessstufen, welche in *Abbildung 13* dargestellt sind, unterschiedliche Verrichtungsprinzipien angewendet werden. Eine klare Einordnung zu einem Fertigungsprinzip ist daher nicht möglich (vgl. Schmidt 2002, S. 41).

2.3.5 Variantenreichtum in der Schienenfahrzeugindustrie

Bei Schienenfahrzeugen gibt es die Unterscheidung in Personen- oder Güterfahrzeuge. Bei den Güterfahrzeugen unterscheiden sich die Fahrzeuge in erster Instanz durch die technische Ausführung und weniger durch den Anwendungsbereich. Im Gegensatz dazu werden Personenzüge in ihre unterschiedlichen Anwendungsbereiche unterteilt, wodurch unterschiedliche Varianten entstehen (Schmidt 2002, S. 14).

Fahrzeugtyp/ Eigenschaften	Straßen- bahnen, Stadtbahnen, U-Bahnen	Regional- züge	Regional- bahnen, Intercityzüge, Schnellbahnen	Intercity- expresszüge, Hoch- geschwindig- keitszüge
Streckenart	Stadtverkehr	Nah- /Regional- verkehr	Regional- schnellverkehr	Fernverkehr
Fahrstreckenlänge	Unter 20 km	Bis 60 km	Bis 150 km	Über 150 km
Höchst- geschwindigkeit der Fahrzeuge	80 km/h	100 km/h	120-140 km/h	über 160 km/h
Durchschnittliche Fahr- geschwindigkeit	30 km/h	40 km/h	60 km/h	Über 80 km/h
Durchschnittliche Fahrzeit	0,5 h	1 h	2 h	Über 21 h

Tabelle 2: Merkmale der Verkehrsträger im Schienenverkehr (in Anlehnung an Schmidt 2002, S. 14)

Durch Variationsparameter wie Spurweite, Fahrzeugbreite und Fußbodenhöhe (Nieder- und Hochflur) ergibt sich in der Strukturvariante eine theoretische Variantenvielfalt von 30000. Wird diese Zahl mit den unterschiedlichen Fahrzeugtypen bzw. Varianten, welche in *Tabelle 2* ersichtlich sind, multipliziert, ergibt sich eine Vielfalt von über 100000 Varianten, wobei die Variations- und Traktionsvarianten noch nicht inbegriffen sind (Schmidt 2002, S. 15).

Im Gegensatz zur Automobilbranche, welche auch große Variationsmöglichkeiten zu handhaben hat, ergeben sich drei wesentliche Probleme in der Schienenfahrzeugindustrie (Schmidt 2002, S. 16):

1. Die Varianten entstehen primär durch die Geometrie und Ausführung der Fahrzeugstruktur.
2. Eine geringe Vorhersagbarkeit der Variantenausprägungen aufgrund der heterogenen und auftragsspezifischen Kundenvorgaben.
3. Die Losgrößen der einzelnen Fahrzeugvarianten sind normalerweise klein und liegen typischerweise zwischen 1 und 60.

So wie im Flugzeugbau (Biele et al. 2014, S. 2101) ist auch die Produktion kleiner Stückzahlen im Schienenfahrzeugbau durch eine große Anzahl von manuell auszuführenden Aufgaben als auch speziellen Ressourcen sowie Vorrichtungen und Werkzeuge gekennzeichnet.

Eine weitere Ähnlichkeit zum Flugzeugbau ergibt sich durch die Begrenzung der Pufferkapazitäten aufgrund der Größe der Komponenten, wodurch nur wenige Komponenten gelagert werden können. Die Puffer sind erforderlich, um die Stationen und die Flusslinien zu entkoppeln. Aufgrund der endlichen Puffer kann es zu einer Blockierung der gesamten Fließlinie kommen (Biele et al. 2014, S. 2102).

Der in *Kapitel 2.3.4* beschriebene Fertigungsprozess verdeutlicht den Produktionsprozess einer Metro und die daraus resultierende hohe Durchlaufzeit. Durch Variabilität in der Produktion und Produktionsstörungen können Ungleichheiten des Arbeitsaufwands pro Station auftreten. Diese Ungleichheiten können zu physischen Belastungen und sinkender Arbeitsmoral führen (Schlüter und Ostermeier 2022, S. 135).

Aufgrund dessen und aufgrund der vorherrschenden Marktsituation, welche in *Kapitel 2.3.1* beschrieben ist, wird unter anderem ein besseres Variantenmanagement gefordert, denn es steht fest, dass das Problem keine eindeutige Lösung besitzt, eine Reduktion der Variantenvielfalt keine Option darstellt und auch nicht zu einer Bewältigung der Problemstellung führt. Daher entpuppt sich das Variantenmanagement als Optimierungsproblem (Schmidt 2002, S. 10).

2.4 Mixed Model Line

2.4.1 Grundlegende Theorie der Mixed-Model-Line

Nichts ist wichtiger für eine effektive und effiziente Produktherstellung, als einen kontinuierlichen Material-, Informations- und Arbeitsfluss zu schaffen. In produzierenden Unternehmen mit variantenreichen Produkten und einem großen Produktportfolio ist die Erschaffung eines kontinuierlichen Flusses in der Produktion als auch in der Montage kein triviales Unterfangen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 27).

Eine Produktions- bzw. Fertigungslinie ist ein Produktionssystem, das aus mehreren Arbeitsstationen besteht. In der Regel fließen die Produkte von der ersten bis zur letzten Station, und an jeder Station wird eine Reihe von Aufgaben ausgeführt. Fertigungslinien können in drei Kategorien eingeteilt werden: eine einfache Fertigungslinie bearbeitet ein einziges Produktmodell; eine Multi-Modell-Fertigungslinie fertigt mehrere Varianten in Chargen, die auf demselben Modell basieren; und eine variantenreiche Fertigungslinie (engl.: mixed-model assembly line) ist so konzipiert, dass mehrere gleichartige Produkte, die als Varianten verstanden werden können, in beliebiger Reihenfolge gefertigt werden (Dolgui et al. 2019, S. 2747; Boysen et al. 2009b).

Während des Betriebs einer variantenreichen Fertigungslinie kommt es zu Ungleichgewichten sowohl zwischen verschiedenen Produkten auf derselben Station als auch zwischen den Arbeitsbelastungen auf verschiedenen Stationen der variantenreichen Fertigungslinie (Freiheit und Li 2017, S. 1).

Fest steht, dass der Trend einer steigenden Varianz an und in Produkten und eine Erhöhung an Individualisierung vorhanden ist, wodurch Losgröße 1 keine Seltenheit mehr darstellt (Boysen et al. 2009a, S. 1). Dadurch werden Fertigungsunternehmen zum Einsatz variantenreicher Fertigungsstraßen gezwungen (Hashemi-Petroodi et al. 2022, S. 2). In der Praxis findet die Anwendung der variantenreichen Fertigungsstraße in der Endmontage von Automodellen, welche eine theoretische Variantenvielfalt von bis zu 10^{32} haben, statt (Meyr 2004, S. 344). Die einhergehende Herausforderung sei zu beherrschen. Für das Problem zur Handhabung der hohen Anzahl an Varianten in der Produktion gibt es drei Lösungen, welche in *Kapitel 2.4.2* ausführlicher beschrieben werden: Eine langfristige Problemlösung durch die Planung der Fertigungslinie, eine mittelfristige Lösung durch die Aus- bzw. Abtaktung der Linie und eine kurzfristige Lösung durch die Personaleinsatz- und Reihenfolgenplanung (Boysen 2005, S. 53).

Bei den Lösungen handelt es sich um Optimierungsprobleme, welche sich in vielen Fällen als mathematische Probleme darstellen lassen und deren Optima durch Simulationen berechenbar sind.

2.4.2 Allgemeiner Sachverhalt der Lösungsansätze

In diesem Abschnitt werden die drei Lösungsansätze zur Bewältigung von variantenreichen Fertigungslinien näher ausgeführt. Diese drei Ansätze schließen sich gegenseitig nicht aus, wodurch auch mehrere Ansätze für ein Problem herangezogen werden können.

Bei einer langfristigen Planung der Fertigungslinie, welche durch die Layoutplanung charakterisiert ist, müssen folgende Entscheidungen getroffen werden (Dolgui et al. 2019, S. 2747):

- Wie viele Arbeitsstationen werden geplant?
- Wie werden die Arbeitsstationen angeordnet? (gerade, u-förmig, parallel, etc.)
- Wie viele Arbeiter_innen befinden sich auf den jeweiligen Stationen?
- Welches Werkzeug und Equipment werden wo benötigt?
- Welche Arbeitstätigkeiten werden bei welcher Arbeitsstation verrichtet?

Die mittelfristige Lösung beinhaltet die Ab- bzw. Austaktung der Fertigungslinie. Dies erfolgt durch die Annäherung der Taktzeiten aller Arbeitsstationen an den Standardtakt, was eine sinngemäße Zuweisung aller Vorgänge zu den Arbeitsstationen erfordert. Die Voraussetzung für ein solches Vorhaben ist das Wissen über alle relevanten Daten; wie z.B. die Bearbeitungszeiten jedes Vorgangs oder die Vorrangbeziehungen zwischen den Arbeitsgängen. Das Problem kann ein oder mehrere Kriterien haben, wie beispielsweise die Minimierung der Anzahl von Personal, Arbeitsplätzen, der Gesamtkosten oder die Maximierung der Produktionsrate. Der Sachverhalt von variantenreichen Fertigungslinien kann deterministisch oder stochastisch sein, je nachdem, ob die Bearbeitungszeiten der Aufgaben fest sind oder einer Wahrscheinlichkeitsverteilung folgen (vgl. Dolgui et al. 2019, S. 2747).

"Die höchste Komplexität bei der Planung von variantenreichen Montagelinien besteht in deren Austaktung. Aufgrund der vielen zu berücksichtigenden Restriktionen und Varianten ist eine in der Wissenschaft stark erforschte rechnergestützte Automatisierung bislang in der Praxis nicht umsetzbar. Insbesondere die Aufnahme der Montagereihenfolgebeziehung jeglicher Varianten in einem Vorranggraph ist der begrenzende Faktor. Somit wird die Austaktung in der Realität weiterhin manuell in Probiervverfahren unter Zuhilfenahme von Expertenwissen durchgeführt. Dementsprechend ist die Austaktung aktuell bei Montagelinien mit hoher

Variantenvielfalt dem mittelfristigen Planungshorizont zuzuordnen." (Pröpster 2015, S. 49).

Aufgrund der hohen Relevanz für diese Arbeit wird das Thema der Austaktung in *Kapitel 2.4.3* ausführlicher behandelt.

Die kurzfristige Problemlösung erfolgt durch die Reihenfolgen- oder Personaleinsatzplanung in der Produktion (Pröpster 2015). Bei der Reihenfolgenplanung wird die Produktionsreihenfolge festgelegt. Oftmals wird die Reihenfolge als „Perlenkette“ betrachtet, wobei eine Perle ein zu fertigendes Produkt repräsentiert. Diese Metapher veranschaulicht, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt eine festgelegte Reihenfolge für die Produktion vorliegt. Dieser Zeitraum wird auch als „Frozen-Zone“ bezeichnet. Je mehr Varianten in einer Produktion vorhanden sind, desto komplexer wird die einhergehende Reihenfolgenplanung (Pröpster 2015).

Zwei unterschiedliche Zielsetzungen der Reihenfolgeplanung werden in der Literatur behandelt (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 88–90; Boysen et al. 2009b, S. 350):

1. Überlastungsorientierter Ansatz:

Durch die Inhomogenität der Aufträge gibt es Über- und Unterlastungen bei den einzelnen Aufträgen. Durch ein gezieltes Aneinanderreihen der Aufträge sollen sich durch diesen Ansatz die Aufträge gegenseitig ausgleichen bzw. nivellieren. Dies kann sich jedoch bei hohen Losgrößen mit einer hohen Variantenvielfalt zu einem hochkomplexen Vorhaben entwickeln.

2. Versorgungsorientierter Ansatz:

Dieser wird auch als Just-In-Time-orientierter Ansatz (Boysen 2005) bezeichnet. Unterschiedliche Varianten benötigen unterschiedliche Bauteile, welche oftmals von Vormontagen zur Verfügung gestellt werden. Das Ziel dieses Ansatzes ist, einen gleichmäßigen bzw. nivellierten Bedarf an Vorprodukten durch eine optimale Anreihung der Varianten, zu gewährleisten.

Aufgrund der beiden Zielsetzungen hat die Literatur drei Lösungsansätze entwickelt (Bebersdorf und Huchzermeier 2021; Boysen et al. 2009b, S. 350):

- **Level-Scheduling:**
Dieser Lösungsansatz ist im Rahmen des TPS (Toyota Production System) entstanden und kann auch als Heijunka (siehe *Kapitel 2.2.3*) bezeichnet werden. Durch eine Gleichverteilung der Produkte auf die unterschiedlichen Schichtprogramme werden Über- und Unterlastungen ausgeglichen.
- **Mixed-Model-Sequencing:**
Bei diesem Ansatz werden die Auslastungsverluste in Form von Modell-Mix-Verlusten verringert. Das Ziel ist, alle Werker_innen gleich auszulasten und das Driften der Mitarbeiter_innen zu minimieren. Dieses Verfahren ist mit hohem Datenerhebungsaufwand verbunden, da in der Praxis viele Daten erhoben und in den meisten Fällen in eine Software eingespeist werden müssen.
- **Car-Sequencing:**
Um den hohen Datenerhebungsaufwand des Mixed-Model-Sequencing zu vermeiden und einen nivellierten Materialfluss zu erzeugen, wurde der Ansatz des Car-Sequencing entwickelt. Durch Restriktionen auf Produktebene werden Montagesequenzen in der Produktionsprogrammplanung erstellt.

Zusammenfassend können alle drei Methoden eine Ausrichtung hin zur Build-to-Order-Produktion stark einschränken. Momentan ist in produzierenden Unternehmen das Car-Sequencing das am weitesten verbreitete Konzept, da es einen guten Kompromiss zwischen den überlastungsorientierten und versorgungsorientierten Lösungsansätzen bildet. Ein Trend zur verstärkten Anwendung des auslastungsorientierten Mixed-Model-Sequencing ist jedoch festzustellen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 88–90).

2.4.3 Austaktung einer Mixed Model Line

Das Ziel der Austaktung ist es, verkettete Prozesse im selben Takt auszuführen. Um dies zu erreichen, werden allererst Engpassstationen optimiert und entlastet. Verbesserungen an anderen Stationen und Prozessen sind nicht zielführend, solange der Engpass bestehen bleibt, da andernfalls unnötige und nicht wertschöpfende

Abläufe in den weiterführenden Austaktungsprozessen auch systematisiert und eingeplant werden (Bertagnolli 2018, S. 70).

Folgende Maßnahmen können zur Reduktion der Taktzeit der Engpassstation eingesetzt werden:

- „• Reduzierung der Wartezeit: Montageobjekte werden durch verschiedene Funktionsträger innerhalb einer Station geführt und deren Handhabungsabläufe bestimmen die Taktzeit einer Station, welche in Summe optimal aufeinander abzustimmen sind.
- Vermeidung unnötiger Bewegungen während des Montage- und Handhabungsprozesses: Ausgehend vom Produktkonzept und möglicher Änderungen, z. B. durch vermehrte Integralbauweise, werden die Einzelmontagevorgänge und zugeordneten Handhabungsfunktionen analysiert und optimiert.
- Reduzierung der Handhabungszeit: Funktionsträger mit schnellere [sic] Bewegungen, wie z. B. kürzere Öffnungs- und Schließzeiten bei Zangengreifern, beeinflussen die Zykluszeit des Funktionsträgers und sind zu optimieren.“ (Mayr und Berger 2017, S. 88).

Um Verschwendungen (Muda), Überlastungen (Muri) und Ungleichgewicht (Mura) zu messen, wurden im Zuge der Toyota Lean-Prinzipien die folgenden drei Begriffe geprägt (Liker 2004):

- Muda: Je geringer die Verschwendung in einer Wertschöpfung ist, desto geringer sind die gesamten Kosten, die Durchlaufzeit ist geringer und die Qualität ist besser.
- Muri: Überlasten von Menschen und Maschinen führen zu Verschwendungen bzw. Muda, in Form von Fehlern, Wartezeiten oder Unfällen.
- Mura: Die Unausgeglichenheit kann als Spannweite von Überlast und Unterlast betrachtet werden. Heijunka hat das Ziel Mura bzw. Ungleichgewichte zu senken, um somit eine bedeutende Grundlage zur Entstehung von Verschwendung zu vermeiden.

In Muda, Muri und Mura ist keine Bezeichnung für Unterlast enthalten. Unterlast wird oftmals mit Verschwendung gleichgesetzt. Huchzermeier und Bebersdorf schließen sich dieser Definition explizit nicht an (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 80–83).

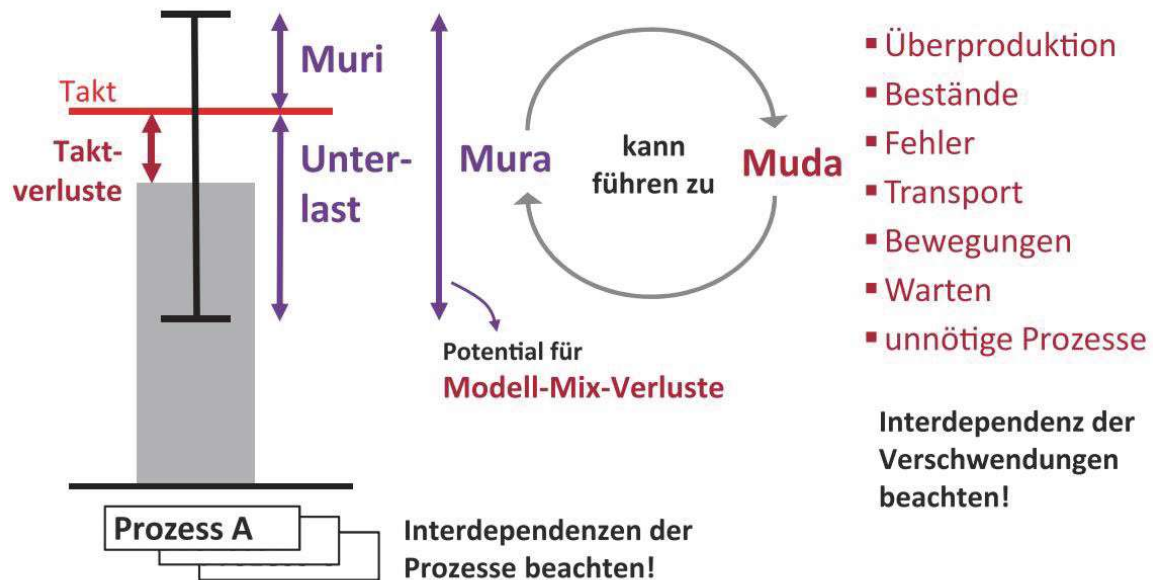


Abbildung 14: Visualisierung von Muri, Unterlast, Mura und Muda (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 81)

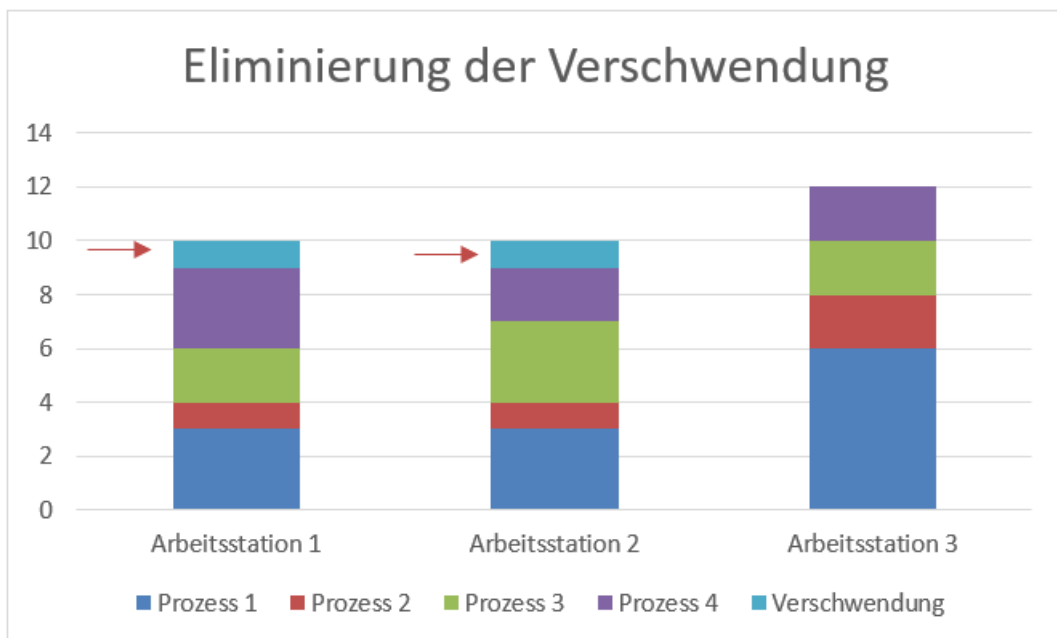


Abbildung 15: Schritt 1 der Austaktung (eigene Darstellung)

Nach der Eliminierung der Verschwendungen im ersten Schritt (siehe *Abbildung 15*) werden anschließend die Arbeitsabläufe definiert, wobei die Tätigkeiten gleichmäßig auf die einzelnen Arbeitsstationen aufgeteilt werden (siehe *Abbildung 16*). Dabei sind

die Vorranggraphen der Produkte zu beachten, denn es darf kein Tätigkeitsschritt einem anderen vorgezogen werden, wenn dieser den vorherigen bedingt (Bertagnolli 2018, S. 72).

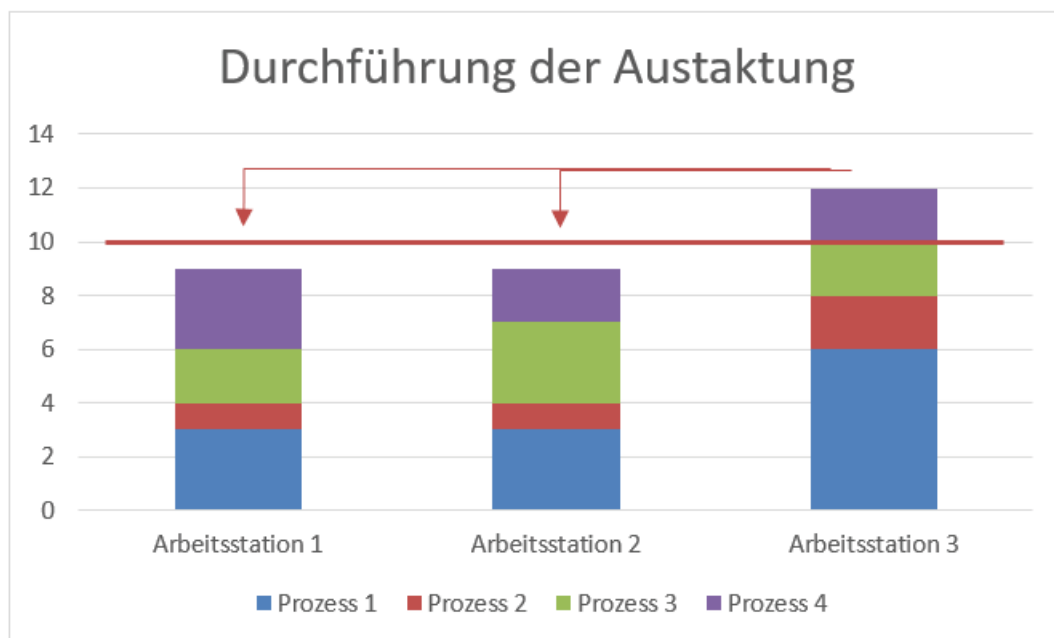


Abbildung 16: Schritt 2 der Austaktung (eigene Darstellung)

Aufgrund der im Schienenfahrzeugbau vorherrschenden Restriktionen lassen sich viele Tätigkeiten nicht auf andere Stationen verteilen, da sie an die Ressourcen einer bestimmten Arbeitsstation gebunden sind. Deshalb muss jede Tätigkeit, die einer anderen Arbeitsstation zugeordnet werden soll, individuell auf die Umsetzbarkeit an der anderen Arbeitsstation geprüft werden. Infolgedessen ist die konventionelle Austaktung nicht zur Gänze für den Schienenfahrzeugbau geeignet.

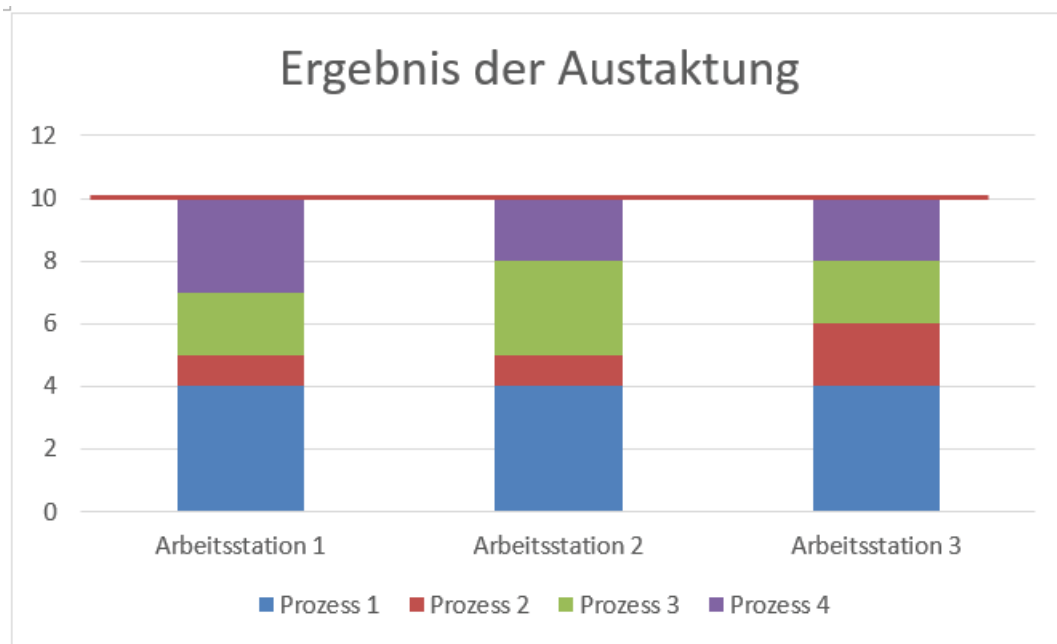


Abbildung 17: Ergebnis der Austaktung (eigene Darstellung)

Um unterschiedliche Varianten bzw. Produkte zu fertigen, werden in der Regel unterschiedliche Vorprodukte benötigt. Dadurch entsteht in den Vorprozessen großer und ungleichmäßig verteilter Bedarf. Es gibt zwei Möglichkeiten, um diesen Bedarf zu decken: Es wird so viel Kapazität bereitgestellt, sodass kurzfristig ein großer Bedarf gedeckt werden kann oder der Bedarf wird gleichmäßig produziert und als Puffer in Form von Fertig- und Zwischenwaren gelagert. In beiden Fällen handelt es sich um Verschwendung (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 87).

Die Verschwendung im Sinne von Austaktungsverlusten ist auch bei der Austaktung unabhängig von der Methode nicht vermeidbar. Austaktungsverluste treten auf, wenn verfügbare Kapazitäten in Form von Arbeitszeit des Personals nicht mit produktiver Arbeit gefüllt werden. Zu erkennen sind die Verluste anhand von Wartezeiten der Werker_innen oder durch unproduktive Reparaturen und Nachmontagen. Wie hoch die Austaktungsverluste ausfallen, kann durch den Planer_die Planerin beeinflusst werden. In idealen Einprodukt-Fließmontagen ohne auftretende Varianzen lässt sich eine durchgehende Produktivität ohne Austaktungsverluste (wie in *Abbildung 17*) theoretisch umsetzen. Die Komplexität einer Mixed Model Assembly Line bringt Austaktungsverlust mit sich, welche sich praktisch nicht zur Gänze lösen lassen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 62).

Wie anhand dieses Unterkapitels ersichtlich ist, birgt die Austaktung, unabhängig von der Branche eine gewisse Komplexität. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle auf

Abbildung 18 verwiesen, welche die zusammengefassten Einflussgrößen der Austaktung darstellt.

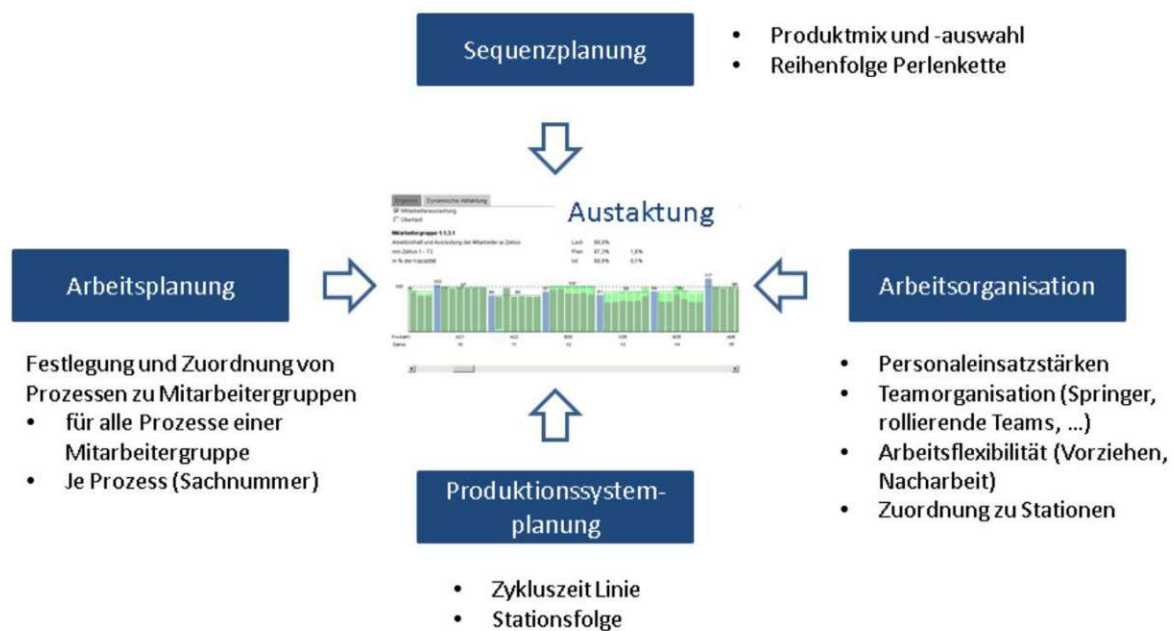


Abbildung 18: Einflussgrößen der Austaktung (März 2015, S. 8)

2.5 Ergänzende Methoden

In diesem Unterkapitel werden Methoden beschrieben, welche im weiteren Verlauf dieser wissenschaftlichen Arbeit Anwendung finden. Dabei handelt es sich um Zeitstudien, Werkzeuge des Prozess- und Projektmanagements und ereignisorientierte Simulationen. Diese Methoden werden in Ausschluss auf Vollständigkeit beschrieben, da eine spezifische Beschreibung im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit ausreicht.

2.5.1 Zeitstudie nach REFA

Eine durchgeführte REFA-Arbeitszeitstudie dient der Erfassung der Dauer von Tätigkeiten und des Einsatzes von Personal- und Arbeitsplatzressourcen. Die für die Durchführung der Tätigkeiten erforderlichen Qualifikationsprofile der Mitarbeiter_innen werden ebenso wie die Anforderungen an die Mitarbeiterressourcen definiert und dokumentiert. Darüber hinaus werden die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Tätigkeiten erneut betrachtet und überprüft (Huka et al. 2021, S. 708).

Die Zeitstudie nach REFA durch Vergleichen und Schätzen (REFA 2015) ermöglicht die Ermittlung von Zeiten für Arbeitsaufgaben, bei denen eine herkömmliche

Zeitaufnahme nicht möglich oder zu aufwendig ist. Der Einsatz- und Schulungsaufwand sind für diese Methodik gering und können kurzfristig zu einer Realisierung führen. Die Voraussetzung ist jedoch, dass ein ausreichender Umfang an Erfahrung oder Vergleichsunterlagen vorhanden sind.

In der Praxis ist REFA eine gängige Methode zur Ermittlung von Arbeitszeitstudien vor Ort (Pröpster 2015), insbesondere wenn keine hinreichend genauen Daten über die Dauer der Tätigkeiten vorliegen.

Durch das Vergleichen mit möglichst ähnlichen Arbeitsabläufen können die dazugehörigen Zeiten ermittelt werden. Bei Unterschieden zum verglichenen Ablauf werden durch Schätzen Zu- oder Abschläge hinzugefügt. Im Gegensatz zum Vergleichen beruht das Schätzen auf den Erinnerungen und Erfahrungen der Experten. Nichtsdestotrotz wird auch beim Schätzen zuerst ein Vergleichen durchgeführt, auch bei neuen Situationen.

Die Vorgehensweise des REFA-Standardprogramm „Vergleichen und Schätzen“ beinhaltet acht Schritte:

„Schritt 1 Arbeitsaufgabe beschreiben, Verwendungszweck der Daten festlegen

Schritt 2 In Vergleichsunterlagen ähnlichen Arbeitsgegenstand suchen

Schritt 3 Arbeitsbedingungen vergleichen

Schritt 4 Abweichungen der Arbeitsgegenstände untersuchen

Schritt 5 Abweichungen in den Ablaufabschnitten untersuchen

Schritt 6 Zeiten für hinzukommende und entfallende Ablaufabschnitte ermitteln

Schritt 7 Zuschläge bestimmen und addieren

Schritt 8 Zeit als Soll-Zeit verwenden" (REFA 2015, S. 3).

Sobald die Produktionstätigkeit in die einzelnen Prozesse geteilt wurde und die Prozesszeiten ermittelt wurden, kann die Erstellung eines Vorranggraphs folgen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 51).

2.5.2 Business Process Model and Notation 2.0

Die Anwendung von „Business Process Model and Notation (BPMN) 2.0“ dient zur Visualisierung und zur Nachvollziehbarkeit der Geschäftsprozesse (beispielhaft in *Abbildung 19* dargestellt). Geschäftsprozesse sind eine kontinuierliche Reihe von Unternehmensaufgaben, die mit dem Ziel durchgeführt werden, einen Output zu erzeugen. Der Ausgangspunkt und das Endprodukt des Geschäftsprozesses ist der Output, der von Unternehmen oder externen Kund_innen angefordert und genutzt wird (Scheer 1999).

Um kontinuierliche Verbesserungsprozesse einzuführen, müssen die Prozesse im ersten Schritt dokumentiert und gemessen werden, dazu wird eine spezielle Notation verwendet. Diese kann dem Anhang (*Kapitel 9*) entnommen werden.

Den größten Nutzen bringen Modellierungen, wenn sie semantisch und syntaktisch eindeutig sind und infolgedessen konsistenten Konventionen bzw. denselben Modellprinzipien folgen. Diese Konformität bewerkstelligt eine leichte Vergleichbarkeit zwischen den Modellen. Weiters ist darauf zu achten, nur relevante Informationen einzuarbeiten und die Darstellungen simpel zu halten, damit sie auch von Dritten schnell erfasst und verstanden werden (Becker et al. 1995).

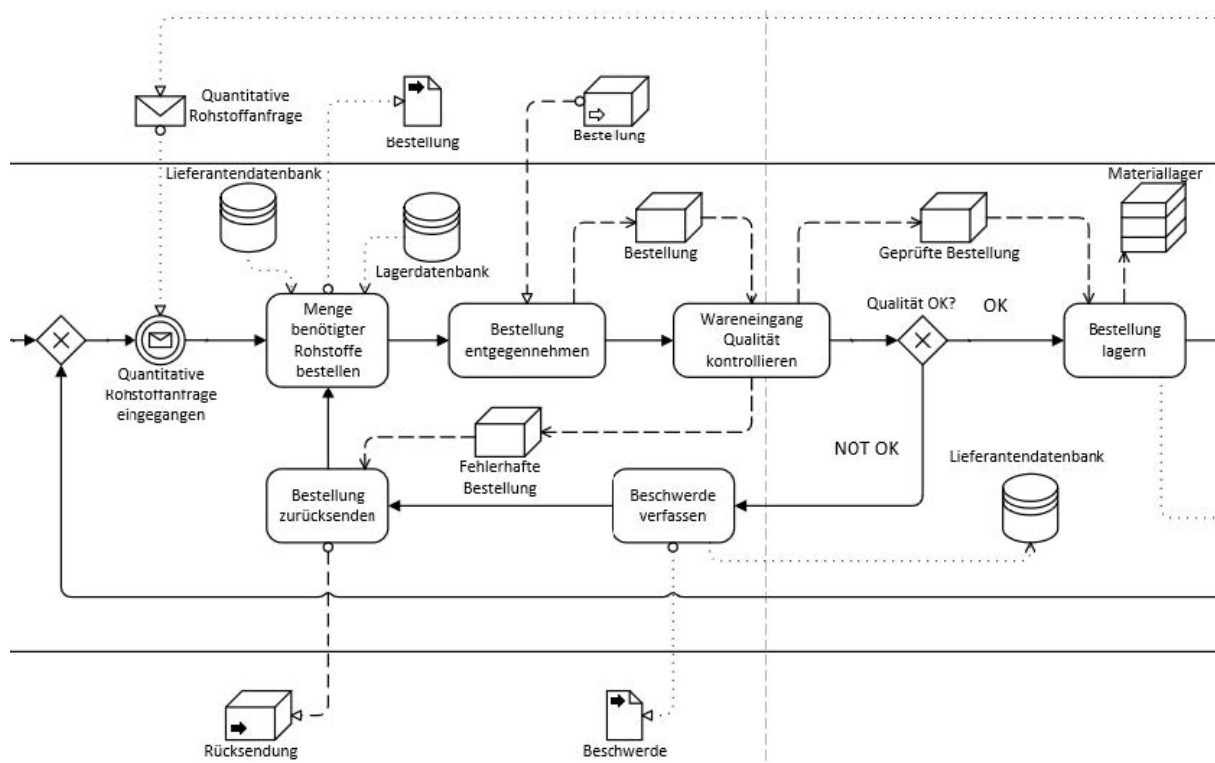


Abbildung 19: Beispiel einer Modellierung mit BPMN 2.0 (eigene Darstellung)

2.5.3 Vorranggraph

Eine maßgebende Restriktion bei der Austaktung ist die Vorrangbeziehung der einzelnen Prozessschritte (Pröpster 2015). Um diese darzustellen, werden Vorranggraphen benutzt. Diese haben den Zweck, die Montagesequenz und alle inkludierten technischen Restriktionen darzustellen (Bullinger 1995). Ein U-Bahnboden kann beispielsweise nicht an die Langträger geschweißt werden, bevor er gewaschen, poliert und zwischen die Langträger eingelegt wurde.

Zunächst werden die einzelnen Prozesse in Abschnitte, sogenannte Verrichtungen, unterteilt. Die Verrichtungen unterliegen Planzeiten und werden durch logische Beziehungen aneinander geordnet (Bornewasser und Hinrichsen 2020, S. 48). Bei variantenreichen Produktionen reicht ein Vorranggraph nicht aus, da jede Variante anderen Sequenzen, Prozesszeiten und Tätigkeiten unterliegt (Huka et al. 2021, S. 708). Deshalb ist für jede Variante ein eigener Vorranggraph zu erstellen (Zülch und Müller R. 2001; Bornewasser und Hinrichsen 2020, S. 48). Durch die Visualisierung der Abläufe, welche Prozesse mitsamt den Restriktionen beinhalten, ist es den Werker_innen möglich, je nach Variante die richtigen Verrichtungen an der richtigen Arbeitsstation in der richtigen Reihenfolge auszuführen.

In der Wissenschaft wird die Abtaktung bei unvollständigem Vorranggraphen nahezu kaum behandelt. Daher stellt die wichtigste Datenquelle das Erfahrungswissen von den Produktionsexperten_innen, Meister_innen, Vorarbeiter_innen und Werker_innen dar. Falls kein vollständiger Vorranggraph gebildet werden kann, ist durch das Zusammentragen des Wissens der Individuen implizit ein vollständiger Vorranggraph vorhanden (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 52). Weiters können qualitativ hochwertigere Montageanleitungen, die von den Bedienern_Bedienerinnen mit ihrem Wissen erweitert werden, Fehler während des Montageprozesses reduzieren und eine höhere Qualität sicherstellen (Richter 2019).

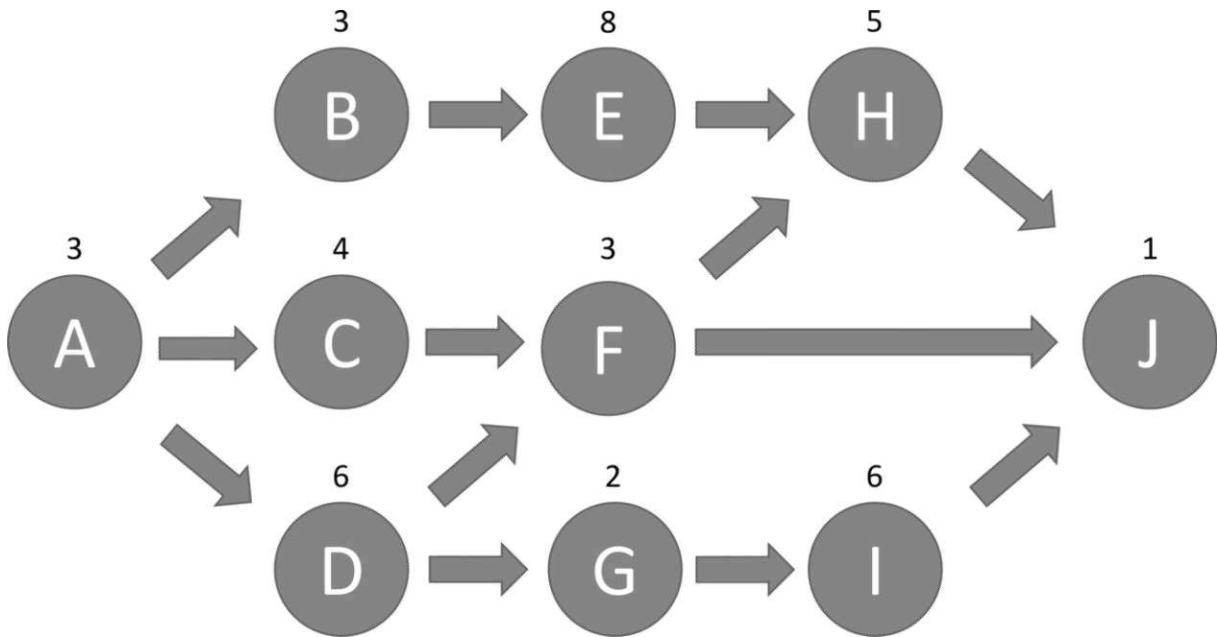


Abbildung 20: Beispielhafter Vorranggraph (eigene Darstellung)

2.5.4 Gantt-Diagramm

Das Gantt-Diagramm wurde nach dem amerikanischen Betriebswissenschaftler Gantt benannt. Ein Gantt- bzw. Balkendiagramm stellt den Projektplan in Form von Balkenverläufen dar (Hobel und Schütte 2006, S. 53). Es dient „zur grafischen Darstellung der Zuordnung von Aktivitäten zu Maschinen, Geräten, Prozessoren, Arbeitskräften u. a. innerhalb einer Zeitspanne.“ (Iwainsky und Wilhelmi 1994, S. 113). *Abbildung 21* stellt ein beispielhaftes Gantt-Diagramm dar. Zu erkennen ist, dass mehrere Aufträge in zwei unterschiedlichen Arbeitsstationen abgewickelt werden. Bevor ein Gantt-Diagramm erstellt wird, sind Rahmenbedingungen, wie die Aufteilung der Aufträge in einzelne Aktivitäten, die Ortsgebundenheit der Einzeltätigkeiten und die Reihenfolge, festzulegen (Iwainsky und Wilhelmi 1994, S. 113).

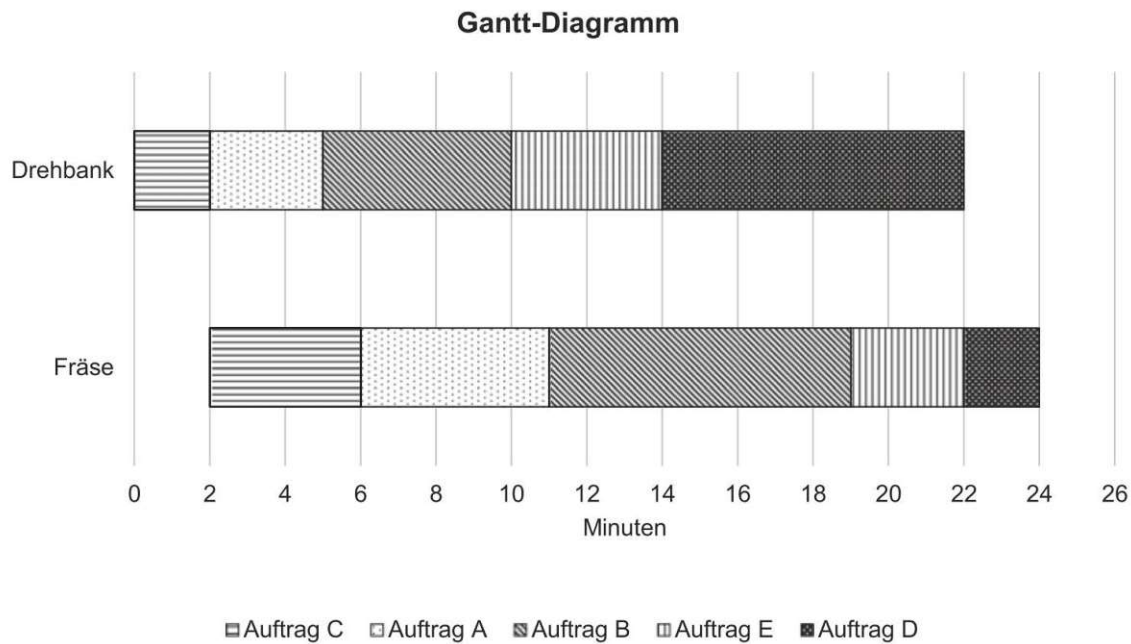


Abbildung 21: Gantt-Diagramm (Lukesch und Kellner 2020, S. 234)

Wie aus *Abbildung 21* ersichtlich und wie Dorninger et al. (1990, 220 f.) beschreiben, ist das Gantt-Diagramm gut für die Visualisierung von reihenfolgemäßigen Auftragsfolgen und Maschinenbelegungen geeignet.

2.5.5 Ereignisorientierte Simulation

Simulationen bilden physische Systeme digital nach, damit die Funktionalität getestet wird und gegebenenfalls Erkenntnisse darüber generiert werden. Der Fortschritt von Simulationen wird durch unterschiedliche Parameter gesteuert. Allgemein wird zwischen diskretem und kontinuierlichem Simulationsfortschritt differenziert. Kontinuierliche Simulationsfortschritte werden im Normalfall durch Differentialgleichungen gesteuert, während diskrete Simulationen hingegen durch definierte Zeitschritte oder Ereignisse gesteuert werden (siehe *Abbildung 22*) (Eitner und Strohmeier 2017; Weber et al. 2018; Schumacher 2020).



Abbildung 22: Klassifizierung von Simulationen (Schumacher 2020)

Ereignisorientierte Simulationen (engl.: discrete event simulation) besitzen das Merkmal, das beim Auftreten von Ereignissen plötzliche Änderungen des Systemzustands hervortreten. Das Ein- und Austreten von Produkten bei einer Arbeitsstation kann beispielsweise ein solches Ereignis darstellen und zu einer Kettenreaktion an Prozessen führen, wodurch der Zustand des Systems Veränderung widerfährt. Die Prozesszeiten können dabei diskreten Werten entsprechen oder durch Zufallsgeneratoren erzeugt werden. Mithilfe von simplen und zielorientierten Simulationen ist es daher möglich, in einer kurzen Zeitdauer klare Aussagen zum Ausgang von simulierten Ereignissen zu treffen. Bei den simulierten Ereignissen kann es sich unter anderem um Fertigungssysteme handeln, da diese wie in *Kapitel 2.1.3* beschrieben aus unterschiedlichen Prozessabläufen bestehen (Kohl 2016; Lidberg 2021).

Ereignislisten sind essenzielle Elemente von ereignisorientierten Simulationen. Durch die Angabe von wichtigen Daten, wie des Eintrittszeitpunkts und des Ereignistyps, wird der Simulation mitgeteilt, wann der Fortschritt von Ereignis zu Ereignis stattfindet (Hedtstück 2013).

Die Ereignisroutine, welche ein Programmcode ist, hilft hingegen beim Eintritt eines Ereignisses drei Aufgaben zu bewältigen (Raffel 2005):

- Statistische Auswertungen durchführen
- Ereignisliste aktualisieren
- Zustände berechnen

Algorithmen, die für die Wahl des nachfolgenden Ereignisses sorgen, haben in der Regel auch drei Aufgaben (Raffel 2005):

- Die ersten Elemente der Ereignisliste werden entfernt
- Simulationszeiten aktualisieren
- Ereignisroutinen ausführen, die dem jeweiligen Ereignistyp zugeordnet sind

Wenn die vordefinierte Simulationszeit erreicht oder überschritten wird, endet die Ereignisroutine. Im Allgemeinen beginnt die Simulationszeit bei 0 und hat einen vordefinierten Endzeitpunkt (Raffel 2005; Goldman und Goldman 2015).

3 State-of-the-Art Literatur

Dieses Kapitel befasst sich mit den aktuellen wissenschaftlichen Publikationen zu den relevanten Themen für diese wissenschaftliche Arbeit und liefert eine Übersicht dazu. Mithilfe der systematischen Literaturrecherche nach Brocke et al. (2009), welche durch die Rückwärts- und Vorwärtssuche nach Webster und Watson (2002) unterstützt bzw. erweitert wird, wird der aktuelle Stand der Forschung analysiert und eine akute Forschungslücke identifiziert. Weiters wird anschließend die von Pröpster (2015) erarbeitete Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien aufgrund der hohen Relevanz für diese Arbeit erläutert.

3.1 Systematische Literaturrecherche zur Zielstellung

Der systematische Ablauf der Literaturrecherche ist in *Abbildung 23* dargestellt.

1985-2022	„mixed-model planning“	„Schienenfahrzeug“	Scholar.google.com researchgate.net
	„model mix“	„Schienenfahrzeugbau“	
	„Multi-model assembly line“	„Eisenbahnwesen“	
	„production planning“	„Modell-Mix“	
	„manpower planning“	„Austaktung“ OR „Austakten“	
	„mixed model assembly line“ OR „mixed model line“	„variantenreiche Produktionsplanung“	
	„assembly line balancing“ OR „line balancing“	"varianten" AND "fertigung" AND "schienenfahrzeug**"	
	"mixed model line assembly" AND "production planning"	"varianten*" AND "fertigung" AND "schienenfahrzeug*" AND "kapazität"	
	"mixed model line assembly" AND "production planning" AND "rolling stock"	"variantenmanagement" AND "schienenfahrzeug**"	
	"rolling stock" AND "manpower planning"	„varianten*" AND "produktionsplanung" AND "schienenfahr**"	
"mixed model" OR "mixed model assembly line" AND "manpower planning" AND "assembly" AND "rolling stock"	„mixed model line“		
"mixed model assembly design" AND "production"	„mixed model line“ AND „low volume“		



Abbildung 23: Systematische Literaturrecherche der vorliegenden Arbeit (eigene Darstellung)

Die Suchterme für die Literaturrecherche wurden auf Basis der Bezeichnungen (*siehe Kapitel 2*) für variantenreiche Fertigungslinien und für die Schienenfahrzeugindustrie gewählt. Aus der Recherche gingen aufgrund von Titel, Abstract und Schlussfolgerung 116 wissenschaftliche Arbeiten hervor. Schlussendlich wurden die verbleibenden Bücher, Artikel und Studien durch eine gründliche Analyse auf 35 relevante Werke eingegrenzt.

(Boysen 2005)	(Biele 2018)
(Boysen et al. 2007; Bebersdorf und Huchzermeier 2021)	(Zennaro et al. 2019)
(Altemeier 2009)	(Kampker et al. 2019)
(Boysen et al. 2009a)	(Samouei und Ashayeri 2019)
(Boysen et al. 2009b)	(Liu et al. 2019)
(Duggan 2013)	(Liu et al. 2020)
(März 2015)	(Bebersdorf und Huchzermeier 2021)
(Pröpster 2015)	(Lietzau et al. 2022)
(Freiheit und Li 2017)	(Hashemi-Petroodi et al. 2022)

Tabelle 3: Literatur zu den relevanten Themen

Der Großteil der Publikationen hinsichtlich variantenreicher Produktionen bezieht sich auf die Automobilindustrie und deren Endmontage. Dabei geht es hauptsächlich um spezifische Probleme, wie die Personalzuordnung zu Stationen, die Austaktung der Stationen in Form von Tätigkeits- und Kapazitätszuordnungen, die Sequenzierung der Jobs und die Reihenfolgenplanung von Fahrzeugen (Kern 2021; Altemeier 2009; März 2015; Hashemi-Petroodi et al. 2022; Dolgui et al. 2019). Diese Optimierungsprobleme werden in den meisten Fällen durch mathematische Modelle gelöst.

Beispielsweise stellt Boysen (2005) fest, dass sich die Literatur zur Produktionsplanung nur vage mit der langfristigen Fließbandabstimmung und der kurzfristigen Reihenfolgenplanung befasst. Deshalb entwickelt er ein Optimierungsmodell für die Automobilindustrie, welches die Produktionsprogrammplanung thematisiert und durch eine computergestützte Heuristik evaluiert wird.

Altemeier entwickelte (2009) ein mathematisches Modell mit dem Ziel, kosteneffiziente Kapazitätszuordnung getakteter Variantenfertigungen durch die Umdisposition von

Arbeitsinhalten auf unterschiedliche Stationen zu erreichen. Weiters minimiert er den Springereinsatz durch ein heuristisches Simulationsmodell zur Reihenfolgenplanung.

Liu et al. (2019) entwickeln ein stochastisches Berechnungsmodell, um die Materialpuffer und die ideale Austaktung zu berechnen.

Kampker et al. (2019, S. 444) beschreiben einen Ansatz der proaktiven Resequenzierung (engl.: Proactive Resequencing) für variantenreiche Montagelinien (engl.: mixed model assembly lines) in der Automobilindustrie. Dieser Optimierungsansatz zielt darauf ab, die mit den zunehmend variierenden Durchlaufzeiten in der Automobilendmontage verbundenen Modellmix-Verluste zu reduzieren.

Samouei und Ashayeri (2019, S. 273) haben zwei mathematische Modelle für das Austakten von Fließfertigungen mit variantenreichen Modellen (engl.: mixed model) und einer Ressourcenauswahl vorgestellt, die die Auswahl von Robotern, Bediener_innen mit unterschiedlichen Fähigkeiten oder Bediener_innen mit unterstützenden Robotern sowie die Zuweisung von Aufgaben an Stationen umfassen, bei denen die Zusammenarbeit zwischen menschlichen Bediener_innen an zwei benachbarten Stationen erlaubt ist. Sie haben eines dieser Modelle unter sicheren Bedingungen mit einer vorgegebenen Zykluszeit entwickelt und das Zweite beschreibt ein robustes Mehrziel-Optimierungsmodell (engl.: multi-objective robust optimization), welches die Zykluszeit sowie die festen und variablen Kosten der Ressourcenauswahl und der Aufgabenzuweisung minimiert.

Weiters werden in Produktionslinien Nacharbeitsplätze für die Nachbearbeitung fehlerhafter Teile verwendet. Die ausschließliche Verwendung von Nacharbeitsstationen für diesen Zweck kann zu einer ineffizienten Nutzung der Ressourcen in dieser Station führen, insbesondere in einer Montagelinie mit einer niedrigen Fehlerquote. In der Studie von Kaymaz und Cavdur (2020, S. 111) wird ein gemischt-ganzzahliges Programmiermodell (engl.: mixed-integer programming model) zur Minimierung der Zykluszeit vorgeschlagen, das den Einsatz von Nacharbeitsstationen zur Durchführung paralleler Aufgaben berücksichtigt. Durch die Linearisierung der nichtlinearen Randbedingungen für parallele Aufgaben unter Verwendung einer Variantentransformation wird das Modell in eine linear-gemischt-ganzzahlige (engl.: linear-mixed-integer) Form überführt. Zusätzlich zu

unterschiedlichen Fehlerraten werden mit dem vorgeschlagenen Modell auch unterschiedliche Positionen der Nacharbeitsstationen berücksichtigt. Die Leistungsfähigkeit des Modells wird anhand mehrerer Testprobleme aus der einschlägigen Literatur analysiert.

Mitarbeiter_innen wird in der Automobilbranche die Möglichkeit gegeben, aufwändige Fahrzeuge vor- bzw. nachzuarbeiten. Dieser Prozess wird als Driften bezeichnet und lässt sich nicht auf den Bau von Schienenfahrzeugen übertragen (März 2015).

Um Equipment- und Lohnkosten zu minimieren, verwenden Hashemi-Petroodi et al. (2022) im Vergleich zu vielen anderen Arbeiten ein metaheuristisches Berechnungsmodell, in dem mehrere Arbeiter_innen gleichzeitig einer Arbeitsstation zugeordnet werden. Sie betrachten dafür das Worst-Case Szenario, um anhand dessen die Fertigungslinie zu planen. Es wird jedoch keine Optimierung der Sequenzierung vorgenommen. Die Ergebnisse des Papers zeigen, dass die Zuordnung und Arbeitseinteilung abhängig vom Produktmodell kostengünstiger sind als eine fixe, vom Produkt unabhängige Zuteilung, aber dadurch eine Reduktion der Produktivität auftreten kann.

Biele (2018) stellte fest, dass charakteristische Unterschiede zwischen der Automobil- und Flugindustrie vorhanden sind, wodurch sich die in der Automobilbranche angewendeten Planungsansätze nicht übertragen lassen. Weiters sei es nicht möglich, formale analytische Methoden und zugehörige Optimierungsverfahren für die Produktion von Flugzeugen anzuwenden. Daher diskutiert er mittelfristige Produktionsplanungsansätze in der Flugzeugmontage und entwickelte analytische Verfahren für die Reihenfolge- und Ressourcenplanung. Die bedeutungsvollste branchenrelevante Referenz dafür ist das von Heike et al. (2001) untersuchte mittelfristige Planungsproblem für Kleinserienfertigungen am Beispiel der Luftfahrtindustrie. Sie entwickeln Ansätze zur Anpassung der Taktzeiten. Im Zuge dessen werden im ersten Ansatz die Lager- und Gehaltskosten unter Berücksichtigung einer variablen Durchlaufzeit gesenkt. Bei der Personalzuordnung wird zwischen flexiblem und unflexiblem Personal unterschieden. Im zweiten Ansatz werden die Start- und Endzeiten durch ein ganzzahliges Optimierungsproblem (engl.: Integer Program) terminiert.

Auch andere wissenschaftliche Arbeiten befassen sich mit Optimierungsproblemen für die Luft- und Raumfahrtindustrie:

Biele und Monch (2015) befassen sich mit einem Optimierungsproblem zur Minimierung des Gesamtbestands und von Gehaltskosten. Das Resultat validieren sie mit einem stochastischen Simulationsmodell des Fließbands (Biele und Monch 2015, S. 2148).

Biele et al. (2014, S. 2110) leisten einen Beitrag zum Bestandsmanagement für den Kabineneinbau in der variantenreichen Kleinserienfertigung von Flugzeugen.

Lietzau et al. (2022) erarbeiten einen metaheuristischen Ansatz, bei dem sie mit drei Kriterien und geringem Aufwand qualitativ hochwertige Lösungen zur Arbeiterzuteilung für parallele variantenreiche Fertigungslinien und parallele Lackierstationen errechnen.

In Anbetracht der Optimierungsmodelle und Simulationen sei auf die ausführlichen Literaturrecherchen von Boysen et al. (2007, 2009a), Pröpster (2015), Ambilkar (2017), Biele (2018) und Hashemi-Petroodi et al. (2022), welche sich intensiv mit mathematischen Algorithmen zur Lösung der Probleme beschäftigen, verwiesen.

März (2015) schreibt, dass die meisten wissenschaftlichen Optimierungsansätze zur Austaktung in der Praxis kaum Anwendung finden, da nicht alle Restriktionen und Problemstellungen simultan berücksichtigt werden können oder mit einem enormen Aufwand zur Datenbeschaffung verbunden sind. Aufgrund dessen entwickelt er ein simulationsgestütztes Austaktungswerkzeug, welches den Mitarbeiter_innen und Produktionsplaner_innen rollierend die Auslastungsverläufe über einen interaktiven Touchscreen-Monitor anzeigt. Mithilfe der dynamischen Austaktung wird die Planung der Automobilindustrie dazu befähigt, unterschiedliche Szenarien auf Basis von Tätigkeitszuordnung, Fahrzeugreihenfolge und dem flexiblen Einsatz der Bandarbeiter zu analysieren und zu bewerten.

Mehr zum Thema der dynamischen Austaktung lässt sich in der ausführlichen Problemklassifikation und Literaturrecherche von Schlüter und Ostermeier (2022) vorfinden.

Damit eine dynamische Austaktung tatsächlich funktioniert, weisen Boudreau et al. (2003) auf verschiedene Kompetenzen hin. Die Arbeiter_innen müssen verstehen,

wann sie Aufgaben wechseln sollten, sie müssen motiviert sein, die zusätzliche Arbeit zum richtigen Zeitpunkt zu übernehmen und sie müssen verstehen, wie ihre Entscheidungen, die Aufgabe zu wechseln, den Gesamtdurchsatz verbessern und Leerlaufzeiten vermeiden. Die Arbeitnehmer_innen müssen Loyalität gegenüber ihrer Einheit entwickeln und bereit sein, füreinander einzuspringen.

Ähnlich zur dynamischen Austaktung haben Bebersdorf und Huchzermeier (2021) durch die Entwicklung des VarioTakts, welcher die Ansätze des variablen Takts mit den Ansätzen des gewichteten Durchschnittstakts (engl.: WATT/ weighed average takt time) verbindet, die Fließbandfertigung für die Montage von Traktoren bei Fendt ausgetaktet. Beim variablen Takt wird die Bandbelegung bzw. der Abstand zwischen den zu produzierenden Produkten je nach Bearbeitungsdauer zeitgerecht nacheinander angeordnet (siehe *Abbildung 24*), wodurch sich die Fließbandfertigungslinie selbstständig austaktet. Die WATT-Methode gewichtet alle variantenzugehörigen Arbeitsvorgänge und verteilt sie auf Basis der Eintrittswahrscheinlichkeit auf die Stationen. Durch den VarioTakt wird somit nicht der Fertigungsschritt der Produkte an den Takt angepasst, sondern der Takt wird dem Produkt angepasst. Prinzipiell geht der VarioTakt jedoch von einer Fließbandfertigung aus und enthält für die Automobilindustrie typische Konzepte wie beispielsweise das Driften oder das Werkerdreieck.

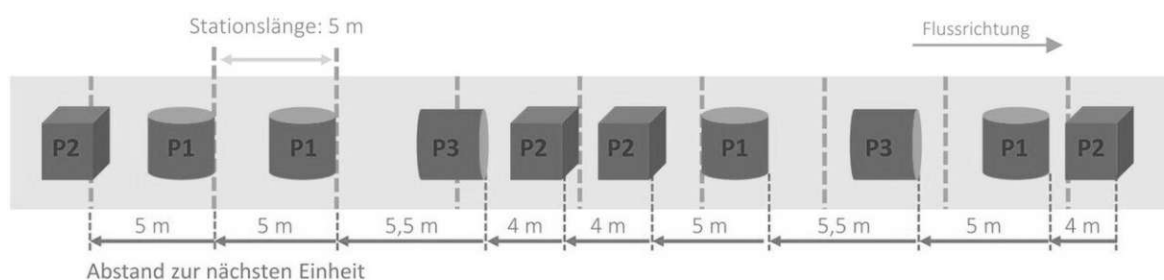


Abbildung 24: Bandbelegung bei variabler Taktung – ein selbstständiges Heijunka (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 114)

Im Vergleich zu den anderen literarischen Werken, welche sich hauptsächlich mit mathematischen Lösungsalgorithmen beschäftigen, hat die Dissertation von Pröpster (2015) hohe Relevanz für diese Arbeit, da sie ein übergeordnetes Problem behandelt. Pröpster entwickelte eine manuelle Austaktungsmethodik, welche als Probiervorgang mit Einbezug von Expertenwissen klassifiziert wird und aus drei Kerninhalten besteht. Der Erste beinhaltet eine Austaktung durch die Anpassung der Personalzahl an den Arbeitsstationen. Im zweiten Kerninhalt werden

variantenabhängige und variantenunabhängige Arbeitsinhalte voneinander getrennt und den Arbeitsplätzen zugeordnet. Zuletzt simuliert er das Verhalten der Werker_innen in Zusammenhang mit den diversen Varianten mit Hilfe eines Simulationswerkzeugs und prüft dadurch auch die Güte der Austaktung bzw. des Produktionsprogramms. Teile der Methodik können laut Pröpster (2015, S. 167) durch Anpassungen nicht nur für die Automobilbranche, sondern auch für andere Branchen übernommen werden. Die Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien wird ausführlicher in *Kapitel 3.3* diskutiert.

3.2 Forschungslücke anhand Literaturrecherche

Die Wissenschaft hat im Zusammenhang mit Variantenreichtum in der Schienenfahrzeugindustrie lediglich zwei Werke vorzuweisen:

Liu et al. (2020) erstellen mit Hilfe ganzzahliger Programmierung ein Modell zur Minimierung von Personalkosten für die Instandhaltung von Metros in Hong Kong. Dafür werden die Metros demontiert, instandgehalten und dann wieder zusammengebaut. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Zusammenlegung von Fertigungslinien des Rohbaus, daher weist das Paper von Liu et al. (2020) keine signifikante Relevanz für die vorliegende Arbeit auf.

Weiters behandelt Schmidt (2002) das Variantenmanagement in der Schienenfahrzeugindustrie, jedoch handelt es sich dabei um die Optimierung der Fahrzeugentwicklung, welche zur Verbesserung einer einheitlichen Modulbauweise führen soll.

Kapitel 3.1 verdeutlicht, dass die Forschung Fokus auf mathematische Lösungsalgorithmen legt, da sich getaktete Fließmontagen durch mathematische Modelle logisch ableiten lassen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 28). Dabei werden jedoch in den meisten Fällen die Rahmenbedingungen nicht zur Gänze abgedeckt, wodurch sie in der industriellen Praxis kaum Anwendung finden (Pröpster 2015, S. 62). Ein weiterer wichtiger Aspekt, welcher bei mathematischen Modellen oftmals fehlt, ist, dass die Produktion eines Produktes von Menschen gelenkt, geplant und ausgeführt wird. Diese Menschen handeln nicht immer konsequent, nicht immer im Sinne der gemeinsamen Sache und nicht immer konsistent, auch wenn gleiche Rahmenbedingungen gegeben sind (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 28). Wie Pröpster (2015, S. 60) in seiner Dissertation betont, legt die Literatur trotz der hohen

Verbreitung und Praxistauglichkeit in der Industrie kaum Augenmerk auf Probiervverfahren. Außerdem fehle es den verbreiteten Probiervverfahren an Güte und vor allem an standardisierten Regelwerken. Die Notwendigkeit dazu sei durch die Wissenschaft und Forschung bestätigt (Pröpster 2015, S. 165). Auch wenn Probiervverfahren keine idealen Ergebnisse erzielen, sind diese aufgrund der in vielen Fällen unvollständigen Daten und Vorranggraphen häufig aussagekräftiger als Ergebnisse von algorithmischen Verfahren (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 54).

Ein weiterer Aspekt ist, dass sowohl Automobil- als auch Flugzeughersteller sich fast ausschließlich mit variantenreichen Montagen beschäftigen (Kaymaz und Cavdur 2020; Altemeier 2009). Der Rohbau der Automodelle und Flugzeuge bleibt gleich und die Variationen treten daher erst ab der Lackierung bis hin zur Endmontage auf (Lietzau et al. 2022). Im Vergleich dazu treten im Schienenfahrzeugbau die unterschiedlichen Varianten bereits im Rohbau (siehe *Kapitel 2.3.4* und *2.3.5*) auf.

Das von Pröpster (2015) vorgestellte Probiervverfahren zur kurzfristigen Austaktung wurde unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen der Nutzfahrzeugmontage entwickelt. Das Verfahren könne auch in verwandten Branchen angewendet werden. Zusätzliche Forschung sei jedoch für eine Adaption in anderen Branchen notwendig (Pröpster 2015, S. 167).

Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass die Planung variantenreicher Fertigungslinien im Schienenfahrzeugbau unzureichend in der Literatur diskutiert wird und die gegebenen Marktbedingungen, welche in *Kapitel 2.3.1* erläutert wurden, den dringlichen Bedarf zur Deckung dieser Forschungslücke begründen. Hinzu kommt, dass die Wirksamkeit etablierter Methoden und Vorgehensweisen hinsichtlich dieser praktischen Problemstellung noch nicht beschrieben und bearbeitet worden ist.

3.3 Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien nach Pröpster (2015)

Das Ziel der Arbeit von Pröpster (2015) ist es, bei der Austaktung einer Montagelinie verschiedene Taktzeiten mit wenig oder ohne Anpassung der Tätigkeitszuordnung zu Stationen, lediglich durch das Anpassen der Mitarbeiterzuordnung, vorzuplanen, sodass das Montagesystem ohne großen Aufwand umgestellt werden kann. Dazu entwickelt er ein Probierversfahren mit drei Kerninhalten (Pröpster 2015, S. 165–166):

1. Austaktung durch Taktzeitszenarien. Die uniforme Anpassung der Personalzahl je Arbeitsstation bzw. der Werkerdichte soll Stückzahlschwankungen entgegenwirken.
2. Variantenabhängige Austaktung. Durch die Aufteilung von variantenabhängigen und variantenunabhängigen Tätigkeiten auf getrennte Arbeitsstationen kann schnell auf eine Veränderung beim Variantenmix reagiert werden.
3. Simulationswerkzeug zur Beherrschung der Planungskomplexität. Mit Hilfe eines Simulationswerkzeugs wird das Verhalten des Personals in der dynamischen Umgebung und die Güte der Austaktung mit Berücksichtigung aller Varianten im Produktionsprogramm validiert.

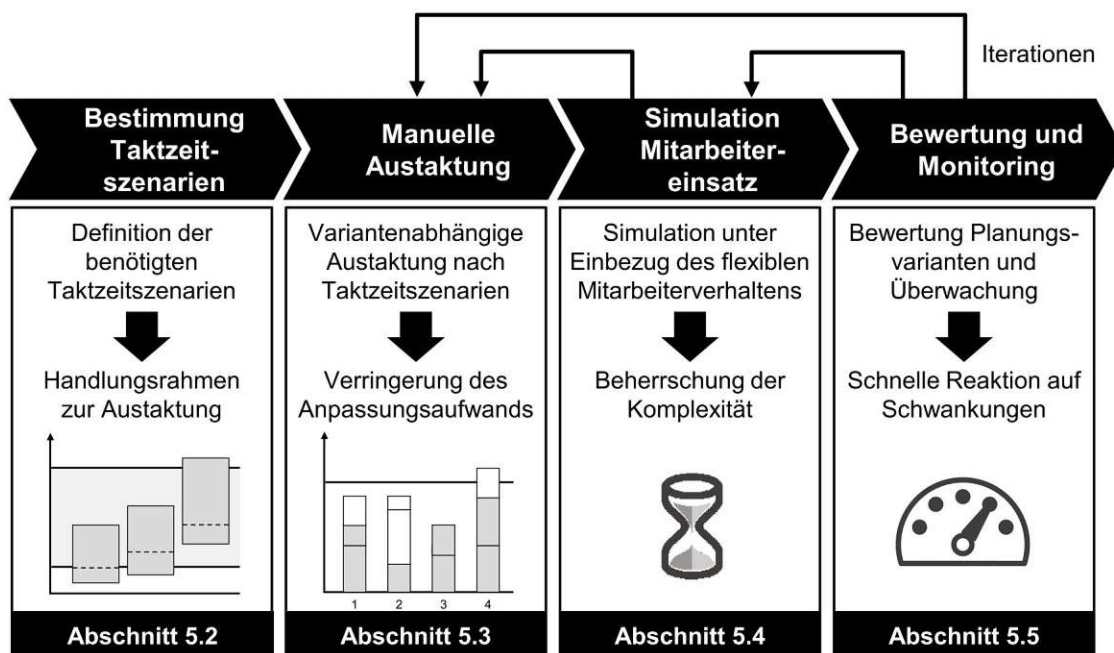


Abbildung 25: Überblick über den Ablauf der Gesamtmethodik (Pröpster 2015, S. 75)

Die drei aufgelisteten Kerninhalte werden durch ein Planungsvorgehen mit vier Schritten (siehe *Abbildung 22*) abgehandelt.

Im ersten Schritt werden die Taktzeitszenarien bestimmt und es werden die umsetzbaren Taktzeitsprünge festgelegt. Daraus resultieren die Taktzeiten und die einhergehende Werkerdichte, welche als Eingangswerte für die variantenreiche Austaktung im zweiten Schritt genutzt werden. Mit den initialen Planungen wird in Zusammenarbeit mit Experten im Zuge eines Workshops die variantenreiche Fertigungslinie ausgetaktet. Es ist auch zu besprechen, was im Falle einer Abweichung bei der Feinplanung passiert. Anschließend wird im dritten Schritt das ausgearbeitete Ergebnis der Austaktung durch ein Tool namens „PePe“ simuliert. Im letzten Schritt werden Kennzahlen entwickelt, die in Zusammenarbeit mit der Simulation eine Überwachung der Fertigungslinie bewerkstelligen. Somit ist es möglich, frühzeitig Probleme zu erkennen und den Problemen durch geeignete Maßnahmen entgegenzuwirken (Pröpster 2015, S. 166).

Die vorgestellte Methodik wurde für Montagelinien von Automobilen konzipiert und enthält Konzepte des Driftens und Springereinsätze von Personal. Mitarbeitern wird in der Automobilbranche die Möglichkeit gegeben, aufwändige Fahrzeuge vor- bzw. nachzuarbeiten. Dieser Prozess wird als Driften bezeichnet (März 2015). Weiters wird angenommen, dass Arbeiter_innen an jeder Station arbeiten können, eine identische Anzahl an Personal pro Station benötigt wird und die Aufteilung von variantenabhängigen und variantenunabhängigen Tätigkeiten auf getrennten Arbeitsstationen stattfindet. Im Schienenfahrzeugbau sind Produkte für bestimmte Prozesse an Stationen gebunden, da den Stationen beispielsweise speziell ausgebildete Schweißer mit Schweißprüfungen und Maschinen zugeordnet sind. Deshalb kann nicht jede Personalressource Station wechseln und Driften. Infolgedessen kann die Methodik von Pröpster (2015) nicht zur Gänze übernommen werden. Wie der Autor anmerkt, sind Adaptionen für die Anwendung in anderen Branchen nötig. Im folgenden Unterkapitel werden daher nur die für diese Arbeit relevanten Ansätze der Methodik erklärt.

Wie bereits beschrieben, werden im ersten Schritt der Planung die realisierbaren Werkerdichten und die daraus resultierenden Taktzeitvielfachen ermittelt. Als Resultat wirken die vorgeplanten unterschiedlichen Taktzeiten Stückzahlschwankungen entgegen (Pröpster 2015).

Die Taktzeitvielfache ist dabei das Verhältnis zwischen der Werkerdichte in der Basistaktzeit zur angepassten Werkerdichte.

w ...Werkerdichte

$$w = \frac{\text{Anzahl der Arbeiter_innen}}{\text{Arbeitsplatz}}$$

Formel 4: Werkerdichte (Becker 2007)

x_i ...Taktzeitvielfache

w_i ... Werkerdichte (des Szenarios i)

w_{i_0} ...Werkerdichte in der Basistaktzeit

$$w_i = w_{i_0} * x_i$$

Formel 5: Werkerdichte für Szenario i

Nun sind folgende Kennzahlen zu ermitteln (Pröpster 2015, S. 78):

- Die minimal als auch maximal umsetzbare Werkerdichte.
- Das Spektrum der zu fertigenden Stückzahlen.
- Die Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassungsmaßnahmen.
- Die minimal und maximal umsetzbare Taktzeiten.

Den größten Einfluss auf die Werkerdichte hat der zur Verfügung stehende Platz, da sich die Arbeiter mit steigender Zahl auf begrenzter Fläche gegenseitig behindern. Aus diesem Grund ist die theoretisch umsetzbare Werkerdichte proportional zum verfügbaren Platz am zu bearbeitenden Produkt (Pröpster 2015, S. 80).

Durch die Bestimmung der minimalen und maximalen Werkerdichte lassen sich nun Rückschlüsse auf das Intervall ziehen, in welchem sich die Werkerdichte bewegen kann, um später diskrete Sprünge in der Taktzeit zu machen. Das Intervall wird laut folgendermaßen definiert:

$$„[w_{min}, w_{max}] := \{w \in \mathbb{N} \mid w_{min} \leq w \leq w_{max}\}“ \text{ (Pröpster 2015, S. 81).}$$

Formel 6: Stückzahlkorridor

w_{min} ... minimale Werkerdichte

w_{max} ... maximale Werkerdichte(in Anlehnung an Pröpster 2015, S. 82)

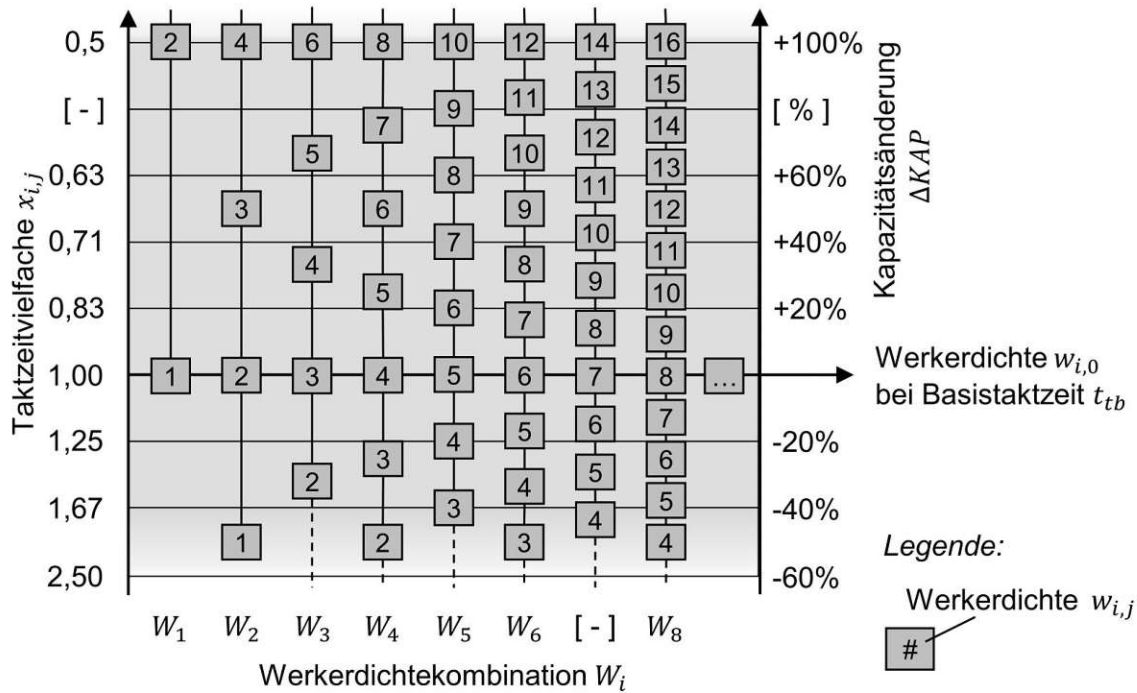


Abbildung 26: Mögliche Taktzeitvielfache x in Abhängigkeit der Werkerdichte w samt resultierender Kapazitätsänderung (Pröpster 2015, S. 80)

Bei Pröpster (2015) besteht, wie in *Abbildung 26* ersichtlich, ein linearer Zusammenhang zwischen den Taktzeitvielfachen und der Werkerdichte. Dieser lineare Zusammenhang ist im Rohbau von Schienenfahrzeugen nicht gegeben, da gewisse Taktzeiten, wie beispielsweise das Schweißen mit einer Oxytechnik-Schweißmaschine, nicht durch die Anzahl der Mitarbeiter_innen veränderbar ist. Da diese Prozesse jedoch nur einen Bruchteil der Gesamtheit ausmachen und zwangsweise Austaktungsverluste in einer Austaktung enthalten sind, wird die Annahme des linearen Zusammenhangs zwischen Taktzeitvielfache und Werkerdichte getroffen.

Stückzahlkorridore beschreiben die Stückzahlflexibilität eines Produktionssystems. Die dafür relevanten Kennzahlen sind die minimal fertigbare Stückzahl s_{min} , die maximal fertigbare Stückzahl s_{max} und die fertigbare Stückzahl ohne Kapazitätsmaßnahmen s_g (Pröpster 2015, S. 82).

Des Weiteren sind zusätzlich umsetzbare Kapazitätsanpassungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Darunter wird jede Maßnahme verstanden, die ohne Anpassung der Taktzeit zu einer maßgeblichen Veränderung des Produktionsausstoßes führt. Beispiele dafür sind (Gottschalk 2005; Schellmann 2012):

- die Änderung der Schichtdauer,
- Änderung der Anzahl der Arbeitstage (Verkürzung der Schicht, Wochenendarbeit, Verlängerung des Betriebsurlaubs)
- Änderung der Schichten pro Tag (1-, 2-, 3-Schichtbetrieb)

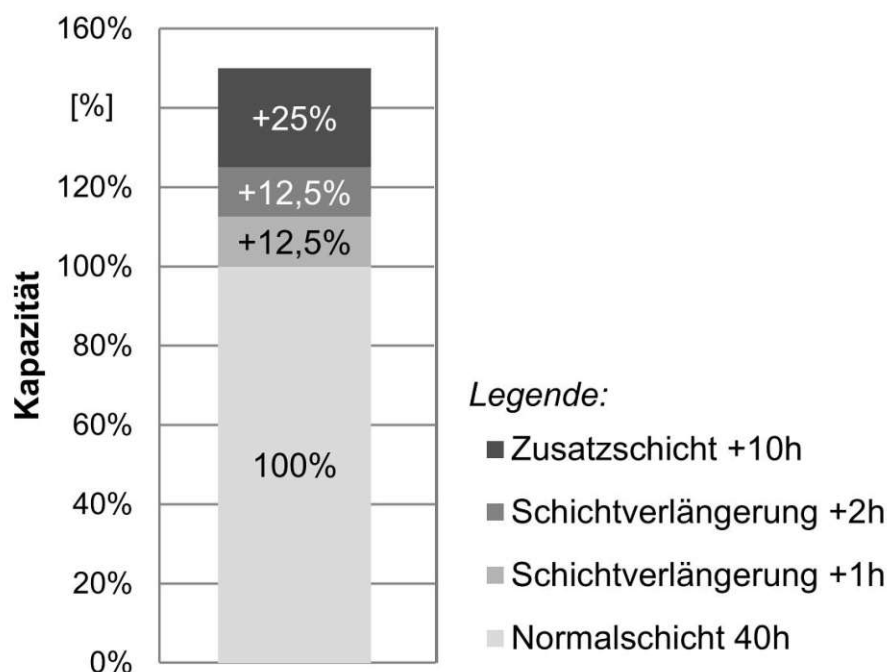


Abbildung 27: Kapazitätserweiterung bei bestehendem Personalstamm und gleichbleibender Schichtanzahl pro Tag (Hämmerle und Rally 2010, S. 672)

Wie in *Abbildung 27* erkenntlich ist, lässt sich durch die zusätzlichen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen eine Kapazitätserhöhung von rund 50% erreichen, jedoch lassen sich die Maßnahmen aufgrund von Überbelastung der Arbeiter und gesetzlicher Grenzwerte nicht dauerhaft umsetzen (Pröpster 2015, S. 83; Hämmerle und Rally 2010).

Um im nächsten Schritt die Taktzeit zu bestimmen, sind zuerst die umsetzbaren Kapazitätsänderungen ΔKAP (in Prozent) in Erfahrung zu bringen. Dabei kann es sich um Maßnahmen handeln, die zu einer Steigerung oder Senkungen der ausgebrachten Stückzahlen führen. Weiters werden die grundsätzlich vorhandenen kapazitiven

Arbeitsstunden in Form von Grundkapazität der Produktionslinie KAP_g benötigt (Pröpster 2015, S. 84).

Nach Ermittlung aller benötigten Kennzahlen werden nun die zur Umsetzung geeigneten Taktzeiten bestimmt. *Abbildung 28* zeigt die Berechnungsformeln für die jeweiligen fertigen Stückzahlen je Taktzeit t_t . Dabei verkörpert ΔKAP_m die Kapazitätsänderung durch Maßnahmen (Pröpster 2015, S. 84).

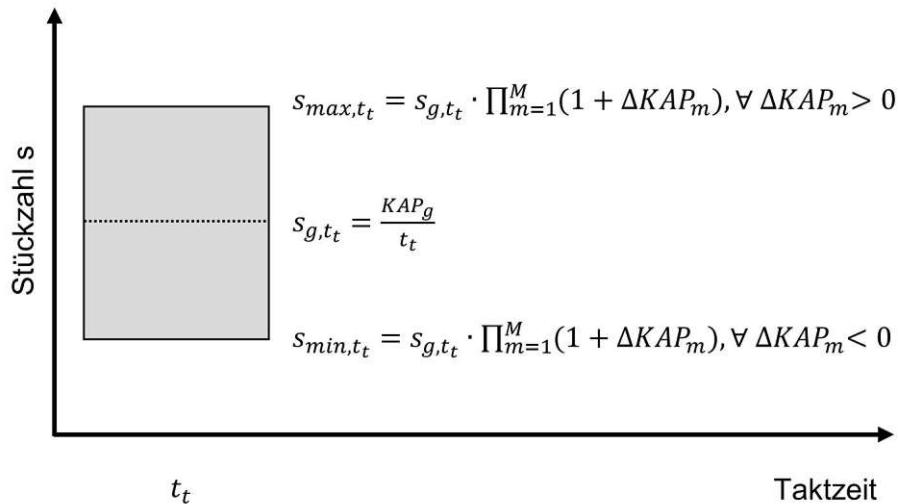


Abbildung 28: Stückzahlkorridor bei einer festen Taktzeit (Pröpster 2015, S. 84)

Neben der Kapazität ist auch die Taktzeit eine dynamische Größe, die durch Veränderung zu anderen Taktzeitvielfachen führt. *Abbildung 26* veranschaulicht, wie diese durch die Multiplikation mit der Taktzeitvielfachen $x_{i,j}$ der Werkerdichtekombination w_i adaptiert wird (Pröpster 2015, S. 85).

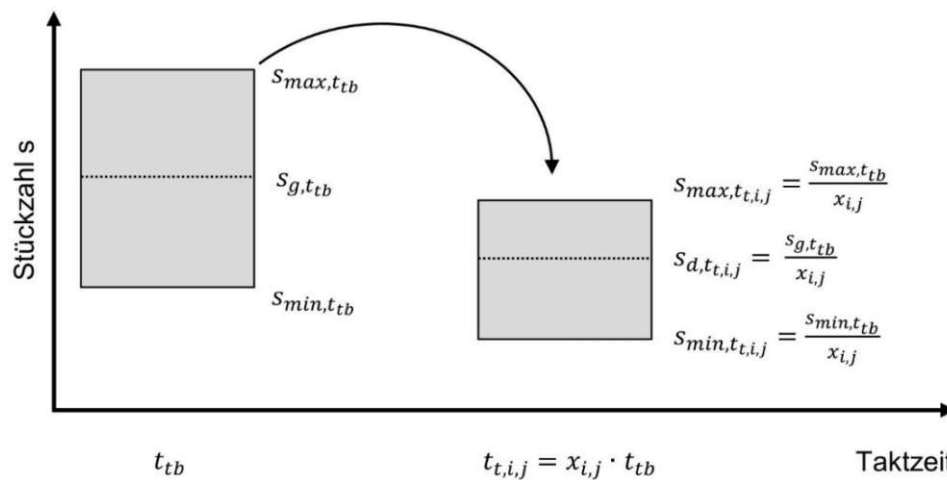


Abbildung 29: Verschiebung des Stückzahlkorridors durch eine Anpassung um das Taktzeitvielfache $x_{i,j}$ (Pröpster 2015, S. 85)

Auf Basis der bis dato erläuterten mathematischen Zusammenhänge können nun die tatsächlichen Taktzeiten durch die Beantwortung folgender zwei Fragen bestimmt werden:

„1. Welche Basistaktzeit t_{tb} und somit resultierende anderen Taktzeiten ergeben sich aufgrund der Kombination von Taktzeitvielfachen, Stückzahlenanforderungen und vorhandenen zusätzlichen Maßnahmen?

2. Welche [...] theoretisch ermittelten Werkerdichtekombinationen W_i ist darauf aufbauend auszuwählen, um deren Werkerdichten in der nachfolgenden Ausplanung zu berücksichtigen?“ (Pröpster 2015, S. 85).

2. Entscheidung zwischen alternativen Werkerdichtekombinationen W_i

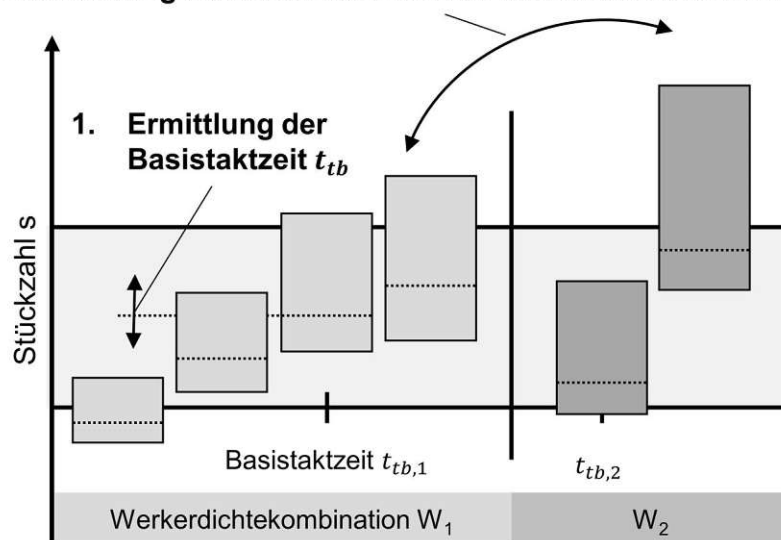


Abbildung 30: Entscheidungsbedarf bei der Bestimmung der Taktzeiten (Pröpster 2015, S. 86)

Durch die unterschiedlichen Taktzeiten und der zusätzlichen Kapazitätsanpassungsmaßnahmen kann je nachdem welches Ziel verfolgt wird, eine dementsprechend andere Taktzeit gewählt werden. So kann beispielsweise durch die Wahl einer hohen Taktzeit eine Humanisierung der Arbeitsverhältnisse für die Arbeiter_innen durch Job Rotation, Job Enlargement oder Job Enrichment erfolgen. Gegensätzlich dazu kann auch eine wirtschaftliche, geringe Taktzeit verfolgt werden, um eine maximale Auslastung der Personalkapazität und Betriebsmittelkapazität zu bewerkstelligen (Pröpster 2015, S. 86).

Abbildung 31 zeigt den Korridor zwischen den zuvor ausgerechneten minimalen und maximalen produzierbaren Stückzahlen an. Es ist zu empfehlen, dass die angestrebten Taktzeiten innerhalb dieses Spektrums liegen.

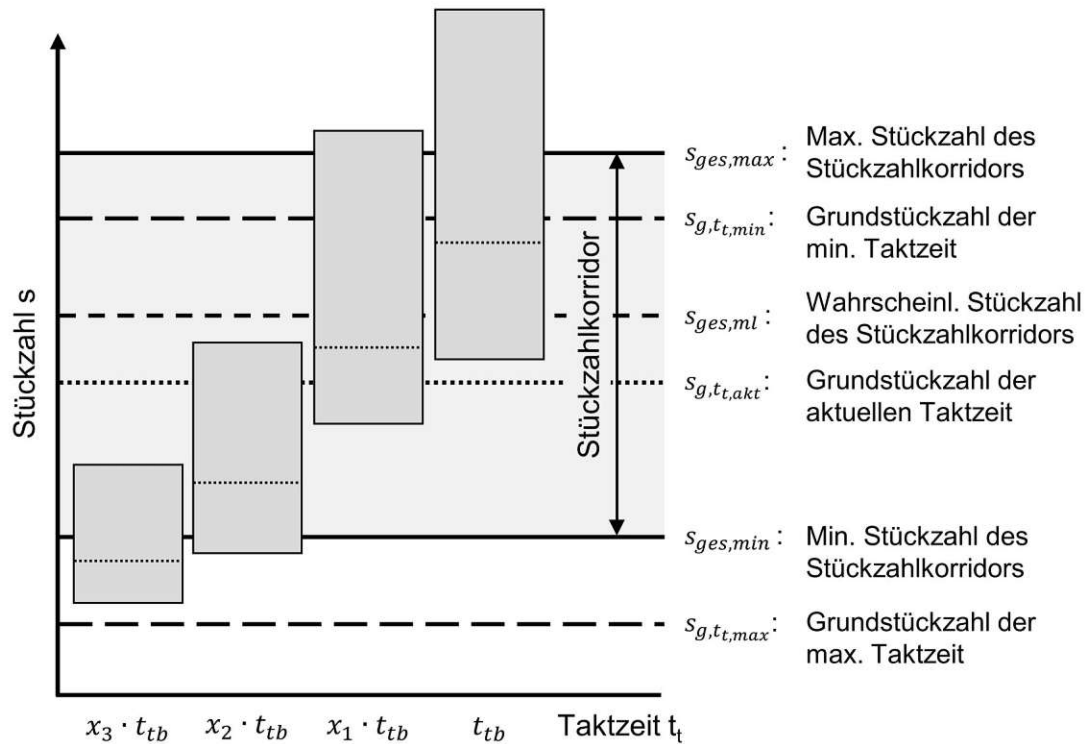


Abbildung 31: Parameter zur Bestimmung der resultierenden Taktzeiten am Beispiel einer Werkerdichtekombination (Pröpster 2015, S. 87)

Im Zuge einer Brownfieldplanung sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten, um den Anpassungsaufwand gering zu halten (Pröpster 2015, S. 88):

1. Die berechnete Taktzeit sollte nah an der aktuellen Taktzeit liegen, damit der initiale Aufwand bei der Umtaktung und der Werkerqualifizierung bei einem Minimum gehalten wird.
2. Aus den eben genannten Gründen ist auch zu beachten, welche Werkerdichtekombination w_i im Taktzeitszenario am nächstgelegenen zur aktuellen durchschnittlichen Werkerdichte $w_{\emptyset,akt}$ mit der aktuellen Taktzeit $t_{t,akt}$ liegt.

Abbildung 32 zeigt ein Flowchart zur Auswahl geeigneter Taktzeiten mit den einhergehenden Werkerdichten an.

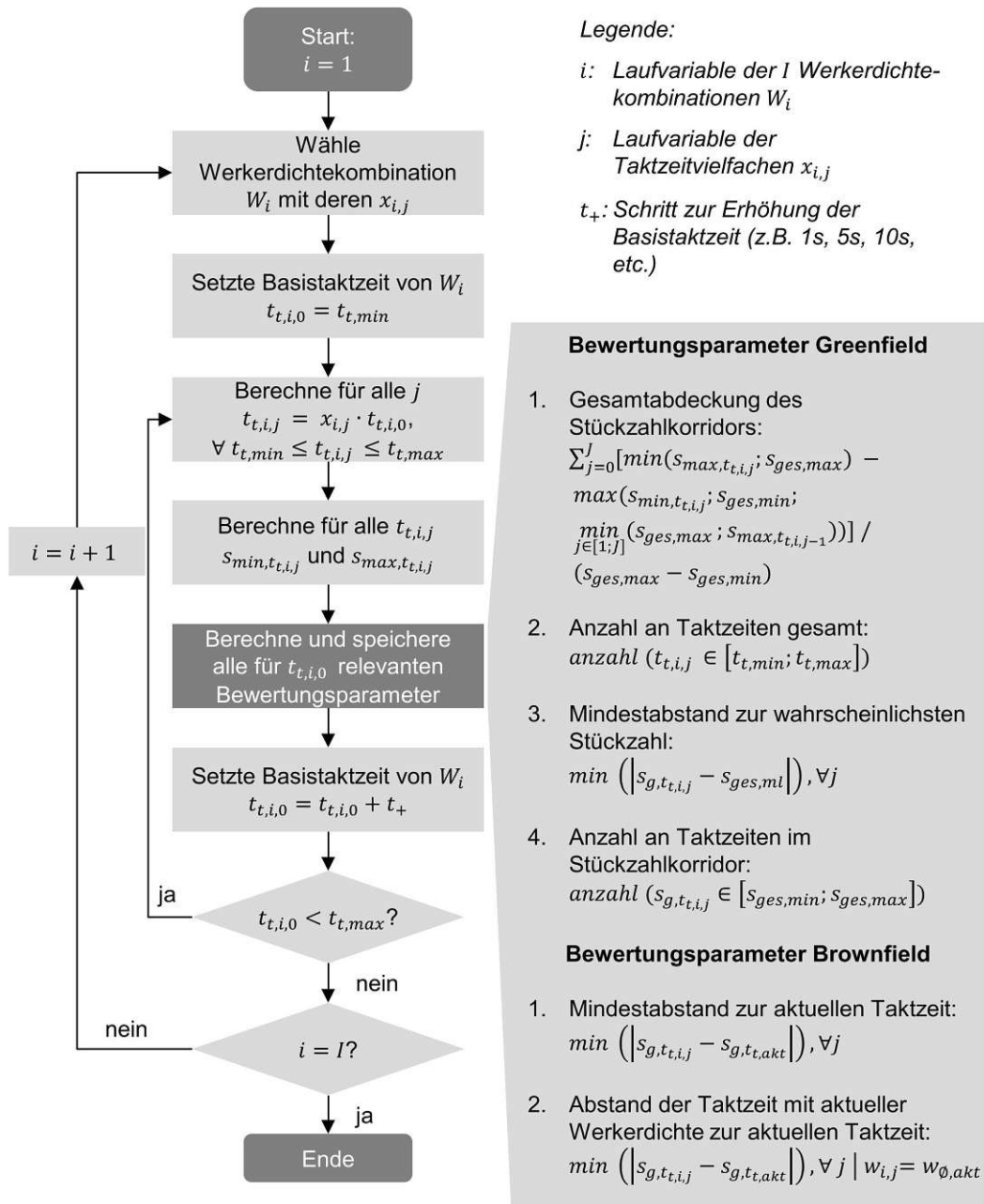


Abbildung 32: Ablauf der Bewertung der verschiedenen Werkerdichte-/ Taktzeit- kombinationen (Pröpster 2015, S. 89)

Die richtig ausgewählte Kombination aus Werkerdichte und Taktzeit ist die Grundvoraussetzung für die Austaktung der Fertigungslinie. Nachdem eine passende Werkerdichtekombination w_i mitsamt der resultierenden Taktzeit $t_{t,i,j}$ ermittelt wurde, kann nun in Zusammenarbeit mit den Wissensträger_innen und Expert_innen eine Austaktung ausgearbeitet werden. (Pröpster 2015, S. 90)

4 Gewählte Vorgehensweise für das Planungskonzept

Dieser Abschnitt befasst sich mit dem ersten Teil des dritten Schrittes der Design Science Research Methodology, des Designs des Artefakts bzw. des Planungskonzepts. Zur Beantwortung der in *Kapitel 1.3* definierten Fragen muss ein Konzept ausgearbeitet werden.

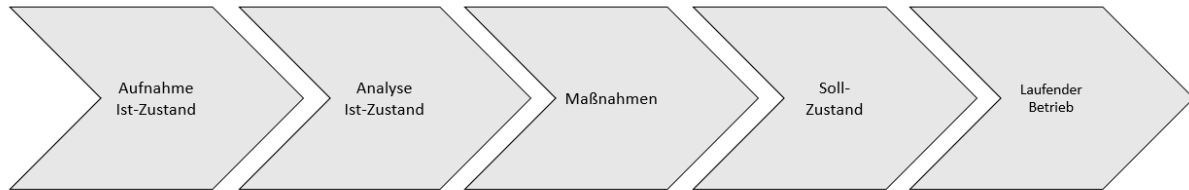


Abbildung 33: Phasen des Planungskonzepts (eigene Darstellung)

Damit zwei Fertigungslinien zusammengelegt werden, hat im ersten Schritt eine Aufnahme des Ist-Zustands aller Varianten zu erfolgen. Die Planenden erhalten Daten über die Produktionslinie, können erste Abschätzungen zur Machbarkeit und zu potenziellen Problemen abgeben, wodurch Verbesserungsmaßnahmen generiert werden. Es bietet sich eine Prozessaufnahme der gesamten betrachteten Fertigungslinie mit Hilfe der Methodik der Wertstromanalyse und -designs (siehe *Kapitel 2.2.1*) an. Weiters hilft die Wertstromanalyse auf Makroebene dabei, Engpässe im Produktionsfluss zu ermitteln und aufzuzeigen. Danach wird eine Prozessaufnahme der einzelnen Arbeitsschritte innerhalb der Arbeitsstationen unter Verwendung der Business Process Model and Notation 2.0 (BPMN 2.0) an.

Da das Ziel eine einheitlich abgetaktete Fertigungslinie ist, sind Prozesszeiten und die resultierenden Taktzeiten von hoher Bedeutung. Bei den Taktzeiten der einzelnen Stationen handelt es sich nicht um Minuten, sondern um mehrere Schichten mit einem Gesamtausmaß von über 30 Stunden. Aufgrund der hohen Komplexität und der Vielzahl an Einflussfaktoren (Logistik, Maschinenverfügbarkeit, Maschinenfehler, Qualifikation der Mitarbeiter_innen, Qualität der Vorprodukte, etc.) sind Zeitstudien durch Methods-Time Measurement (MTM) (Bokranz und Landau 2012) oder ähnliche Methoden nicht zielführend, da die Produktionszeiten in jeder Taktung hohen Varianz unterliegen. Aus diesem Grund bietet sich die REFA-Zeitstudie „Vergleichen und Schätzen“ an. Sie ist eine gängige Methode, wenn keine genauen Daten vorliegen (Pröpster 2015, S. 22).

Nachdem die Vielzahl an Prozessen und die dazugehörigen Zeiten ermittelt wurden, ist der Ist-Zustand übersichtlich darzustellen. Dazu können, wie in Huka et al.'s Paper (2021) beschrieben, aus den Prozessmodellen Reihenfolgebeziehungen der Aktivitäten abgeleitet. Anschließend können mit Hilfe von Vorranggraphen Gleichzeitigkeit und Reihenfolgeeinschränkungen der Tätigkeiten dargestellt werden. Die Ermittlung solcher Beziehungen im Fertigungsprozess ist insbesondere bei variantenreichen Produktionslinien von entscheidender Bedeutung, da die Prozessdauer und -abfolge von Bauteil zu Bauteil stark variieren kann (Huka et al. 2021, S. 708). Mit Hilfe des Vorranggraphs wird ein Konzept ausgearbeitet, um Verschwendung bei der im Schienenfahrzeugbau vorherrschenden Gruppenarbeit aufzuzeigen. Eine Anforderung an das Konzept ist die übersichtliche Ist-Darstellung des zeitlichen Verlaufs der Prozessabschnitte aus dem Vorranggraph. Weiters sollen in der Ist-Darstellung die Arbeitsaufteilung innerhalb der Arbeitsgruppe und der örtliche Zeitverlauf des Materials zwischen den Arbeitsstationen aufgezeigt werden, um die Auslastungen der Arbeitsressourcen und Arbeitsplätze zu visualisieren. Daraufhin können Ineffizienzen schnell erkannt werden und durch geeignete Maßnahmen Verbesserungen umgesetzt werden. Aus den Analysen der Ist-Zustände können durch weitere Lean Management Methoden, wie die Fehler-Möglichkeit-Einfluss-Analyse (FMEA) oder ein vereinfachtes Ishikawa-Diagramm, Potentiale und Herausforderungen abgeleitet werden, um technische und organisatorische Maßnahmen zu formulieren.

Nach Abschluss der Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands kann die Ermittlung des Soll-Zustands erfolgen. Es ist zu entscheiden, wie das Layout der zusammengelegten Fertigungslinien auszusehen hat. Dafür können die Fragen für die langfristige Planung einer variantenreichen Fertigungslinie aus *Kapitel 2.4.2* ausgearbeitet werden. Durch die bereits erfolgte Ist-Aufnahme der Arbeitstätigkeiten kann mit Pröpster's Konzept (2015) die Soll-Personalplanung der entstehenden einheitlich getakteten Fertigungslinie durchgeführt werden. In weiterer Folge kann mitsamt den vorgenommenen technischen und organisatorischen Maßnahmen die Erstellung von Soll-Arbeitspaketen erfolgen. Laut Duggan (2013, S. 144–145) ermöglicht Standardarbeit das Erkennen von Verschwendung und bietet den Mitarbeiter_innen die Möglichkeit, Probleme zu lösen und sich kontinuierlich zu verbessern. Im weiteren Verlauf wird eine gleiche Verteilung aller Fertigungsaufträge über einen längeren Produktionszeitraum durch Anwendung von Heijunka bewerkstelligt, wobei eine

geeignete Reihenfolgenbildung zu beachten ist. Zur Reihenfolgenbildung und Austaktung ist neben Heijunka auch eine Durchlaufterminierung mit Hilfe eines Gantt-Diagramms durchzuführen. Dies bietet sich an, da im Schienenfahrzeugbau keine hohe Anzahl an Variationsmöglichkeiten gegeben ist. Bei einer höheren Komplexität lässt sich eine optimale Reihenfolgenbildung mithilfe einer Simulation planen. Danach werden für einen dynamischen Kundenbedarf unterschiedliche Taktzeitszenarien (Pröpster 2015) erarbeitet, damit eine schnelle Anpassung der Fertigungslinie und der Ausbringungszahl erfolgen kann. Zuletzt ist die zusammengelegte Fertigungslinie im laufenden Betrieb zu überwachen und gegebenenfalls müssen Anpassungen erfolgen. *Abbildung 33* visualisiert die beschriebenen Phasen des Planungskonzepts.

5 Charakterisierung von Prozessen und Daten im Ist-Zustand

Dieses Kapitel befasst sich mit der Ausarbeitung des Planungskonzepts zur Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands, welches anhand eines praxisrelevanten Unternehmens demonstriert wird. Zu Beginn wird die Ausgangssituation im Kooperationsunternehmen erläutert. Im Zuge der Ist-Aufnahme werden Prozessaufnahmen von der Makroebene, was in diesem Fall die Fertigungslinie darstellt und anschließend von der Mikroebene bzw. den Prozessen der jeweiligen Arbeitsstationen gemacht. Es folgen Zeitaufnahmen des Ist-Zustands. Auf Basis der Ist-Aufnahmen werden abschließend Verbesserungsmaßnahmen ausgearbeitet.

5.1 Ausgangssituation im Kooperationsunternehmen

Das in diesem Kapitel auszuarbeitende Planungskonzept wird bei Siemens Mobility Austria GmbH exemplarisch angewendet, wodurch sowohl Design und Entwicklung als auch Demonstration der DSRM gleichzeitig erarbeitet werden. Siemens Mobility Austria GmbH hat mehrere Standorte in Österreich und stellt Schienenfahrzeuge aus Stahl und Aluminium für den europäischen Markt her.

Wie andere Fertigungsunternehmen auch ist Siemens Mobility Austria GmbH mit einer zunehmenden Komplexität konfrontiert, da Unternehmen in Hochtechnologiemärkten sich mit technologischen Innovationen, dynamischen Umweltbedingungen, sich ändernden Kundenanforderungen, der Globalisierung der Märkte und des Wettbewerbs sowie mit der Unsicherheit des Marktes befassen müssen. Die produzierenden Unternehmen können sich diesen Trends, die zu einer zunehmenden Komplexität führen, nicht entziehen. Gründe für dieses Phänomen sind interne und externe Komplexitätsquellen, sogenannte Komplexitätstreiber. Das Erkennen, Analysieren und Verstehen von Komplexitätstreibern ist der erste Schritt zur Entwicklung und Umsetzung von Komplexitätsmanagement. Komplexitätsmanagement ist ein strategisches Thema für Unternehmen, um wettbewerbsfähig zu bleiben (Vogel und Lasch 2016).

In dem Fall von Siemens Mobility wird das Komplexitäts- bzw. Variantenmanagement durch die Zusammenlegung zweier bereits bestehender Fertigungslinien gelöst. Bei den zusammenzulegenden Fertigungslinien handelt es sich um zwei europäische

Metros, welche aus Aluminium bestehen. Das Ziel der Zusammenlegung ist, Platz für eine neue Fertigungslinie zu schaffen und eine maximale Auslastung auf der zusammengelegten variantenreichen Fertigungslinie zu gewährleisten. Das Planungskonzept wird in einem Teilbereich der Fertigungslinie getestet und als Pilot-Bereich betrachtet. Nach einer erfolgreichen Testphase kann die Zusammenlegung auf weitere Bereiche übertragen werden.

Im betrachteten Bereich handelt es sich um die Fertigung von Untergestellen und Dächern von mehreren Metros, welche parallel zusammengebaut werden. Die betrachtete Produktionshalle ist ein abgetrennter bzw. entkoppelter Teilabschnitt der gesamten Produktionslinie (siehe *Abbildung 13*; Untergestell fertigen, Blechbaugruppen für WK-Rohbau fertigen) und verfügt über mehrere Arbeitsstationen. Diese besitzen keine Materialspeicher, wodurch eine starre Verbindung zwischen den Stationen vorliegt (Mayr und Berger 2017, S. 81). So wie es in den meisten Unternehmen der Fall ist, gibt auch Siemens Mobility Austria GmbH eine Taktzeit vor, in welcher ein bestimmtes Zielvolumen erreicht werden soll (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 116). Aufgrund der einzuhaltenden Kundentermine beträgt die vorgegebene Zieltaktung der zusammenzulegenden Fertigungslinie x Tage.

5.2 Prozessaufnahme

5.2.1 Makroebene

Damit ein übergeordnetes Gesamtbild entsteht und potenzielle Engpässe ausgeforscht werden, wird im ersten Schritt eine Wertstromanalyse des Ist-Zustands durchgeführt. Diese thematisiert nicht nur den Produktionsfluss, sondern auch die dahinterstehenden Informationsflüsse. Bei der Durchführung können bereits ersichtliche Verschwendungen bzw. Probleme erkannt und notiert werden. Die Methodik der Wertstromanalyse wird in *Kapitel 2.2.1* erklärt. Die Wertstromanalysen der Ist-Zustände sind im Anhang vorzufinden. Durch die Wertstromanalysen und die im Zuge dessen grob aufgenommenen Zeiten, ist es möglich Materialflüsse im Ist-Layout darzustellen und durch Taktdiagramme erste Abschätzungen über Engpässe zu generieren.

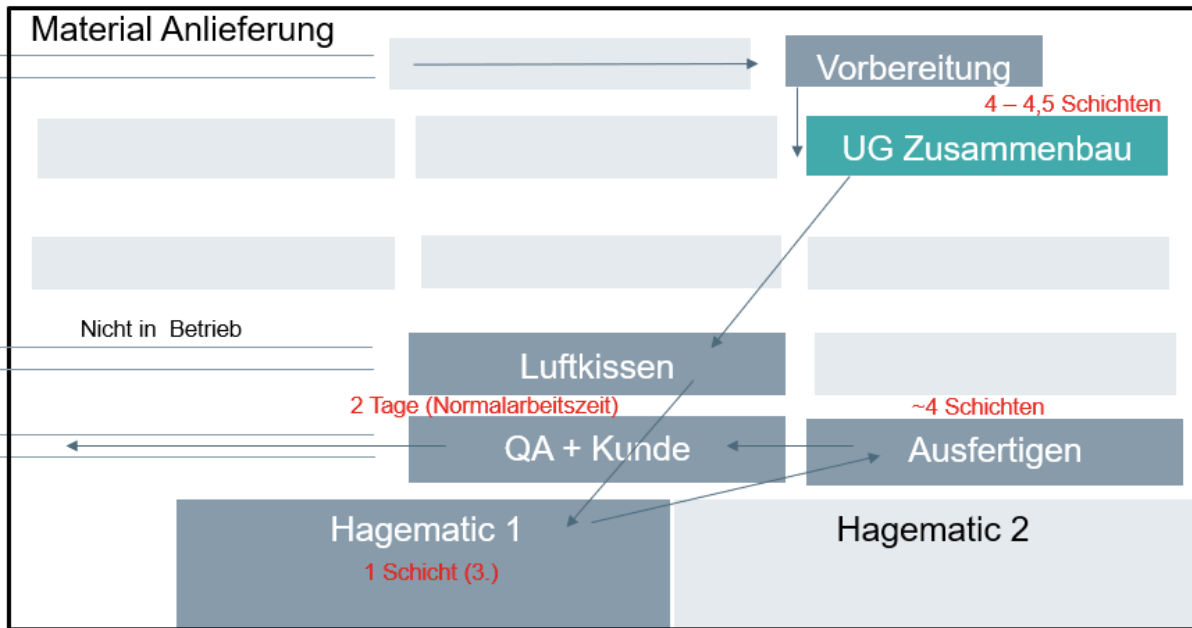


Abbildung 34: Materialfluss im Ist-Layout UG Metro München (Fertigungslinie 1, Variante 1 und 2)

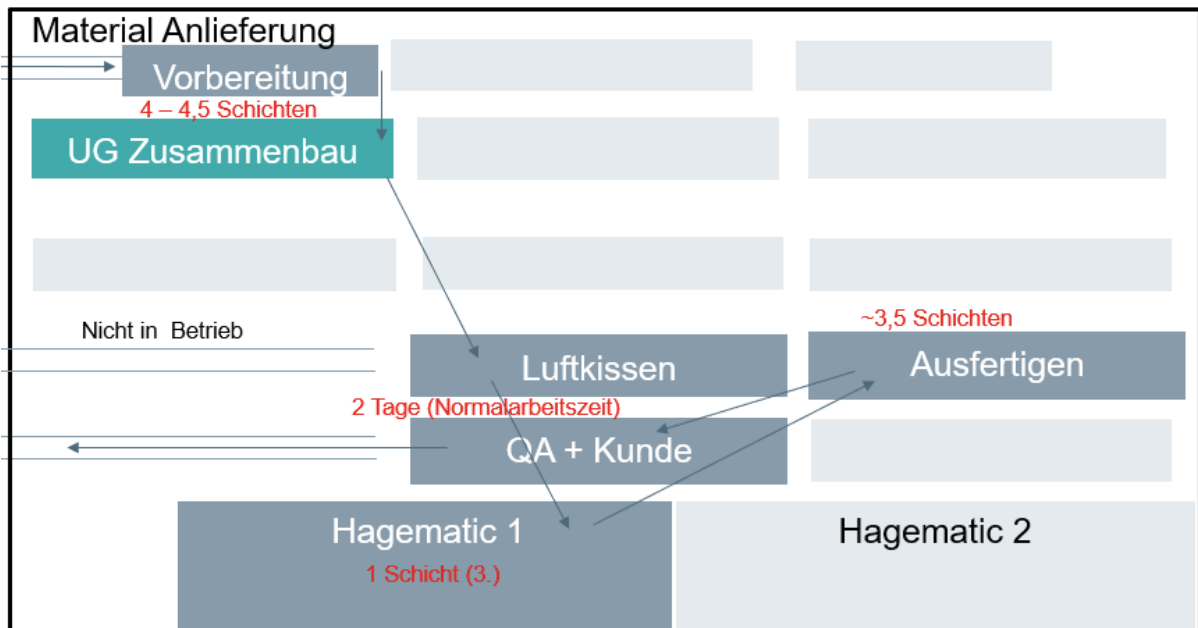


Abbildung 35: Materialfluss im Ist-Layout UG Metro Wien (Fertigungslinie 2, Variante 3 und 4)

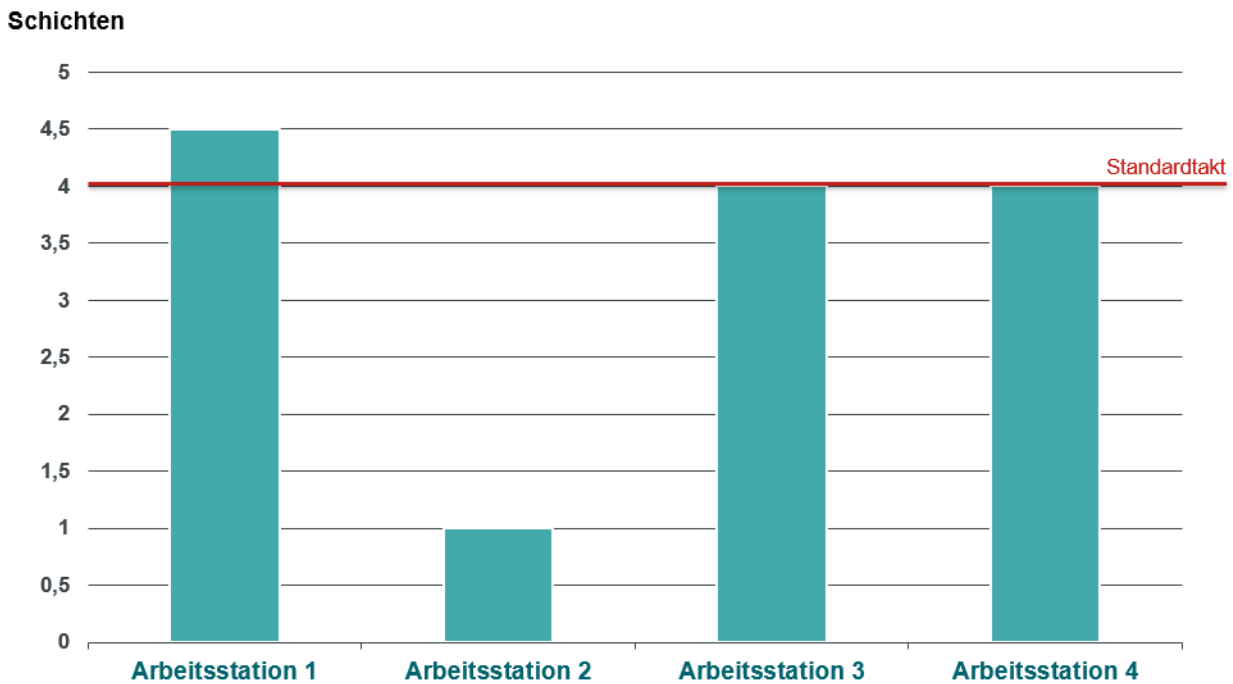


Abbildung 36: Taktdiagramm Fertigungslinie 1, Variante 1

Das Optimieren oder Entlasten der Engpassstation ist eines der Ziele der Austaktung. Verbesserungen an anderen Stationen und Prozessen sind nicht zielführend, solange der Engpass bestehen bleibt (Bertagnolli 2018, S. 70). Aufgrund dessen sind besonders Stationen, die über der Standardtaktzeit t_{st} liegen, bei der Prozessaufnahme der Mikroebene genauer zu betrachten. Engpassstationen werden also, wie in *Abbildung 36* ersichtlich, durch $DLZ_{vi} > t_{st}$ definiert. Eine weitere Möglichkeit, Engpässe zu identifizieren, ist mithilfe einer diskreten ereignisorientierten Simulation (siehe *Kapitel 7*), wodurch vorzeitig das Auftreten von Blockierungen und Ausbremsungen innerhalb des Wertstroms erkannt wird. Die Voraussetzung, um Vorhaben zu simulieren ist jedoch eine qualitativ hochwertigen Datenbasis, welche zu dem momentanen Zeitpunkt noch nicht vorhanden ist.

5.2.2 Mikroebene

In diesem Schritt sind die Fertigungsprozesse aller betroffenen zusammenzulegenden Arbeitsstationen zu erörtern. Auf Basis der mit BPMN 2.0 (siehe *Kapitel 2.5.2*) dargestellten Prozesse werden Vorranggraphen (siehe *Kapitel 2.5.3*) erstellt. In der Realität bedarf die Erstellung eines Vorranggraphen einen hohen Zeitaufwand, insbesondere bei einer hohen Anzahl an Varianten und der einhergehenden Komplexität des zu bearbeitenden Produkts (Pröpster 2015). Im Schienenfahrzeugbau

ist die Anzahl der Varianten nicht hoch, jedoch ist die Komplexität des Fertigungsprozesses immens hoch, weshalb für jede Variante pro Station ein Vorranggraph zu erstellen ist, denn die Belegungszeiten pro Station belaufen sich auf mehrere Schichten.

Um eine hohe Datengüte der Prozessaufnahme zu gewährleisten ist es sinnvoll, entsprechende Fachexperten_innen in den Datenerhebungsvorgang miteinzubeziehen.

5.3 Zeitaufnahme

Nach der Erstellung einer Prozessdarstellung und des dazugehörigen Vorranggraphen werden Zeitstudien nach REFA durch Vergleichen und Schätzen (siehe *Kapitel 2.5.1*) durchgeführt. Eine REFA-Arbeitszeitstudie dient der Erfassung der Dauer von Tätigkeiten und des Einsatzes von Personal- und Arbeitsplatzressourcen. Die für die Durchführung der Tätigkeiten erforderlichen Qualifikationsprofile der Mitarbeiter_innen werden ebenso definiert und dokumentiert wie die Anforderungen an die Mitarbeiterressourcen. Darüber hinaus werden die Reihenfolgebeziehungen zwischen den Tätigkeiten erneut betrachtet und überprüft (Huka et al. 2021, S. 708). Aufgrund der Objektgröße von Schienenfahrzeugen herrscht auf vielen Stationen Gruppenarbeit vor (Böge und Böge 2021, S. 1626; Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 57). Dabei sind sowohl Schweißer_innen als auch Schlosser_innen im Einsatz. Diese zwei Arbeitergruppen haben unterschiedliche Qualifikationen und Aufgaben. Schlosser_innen sind beispielsweise für das Vorbereiten, Fräsen und Polieren von Bauteilen zuständig, während Schweißer_innen die einzelnen Bauteile zusammenschweißen. Angesichts dieser Arbeitsdynamik sind die beiden Arbeitsgruppen oftmals nicht zur gleichen Zeit gleich belastet. Damit die Produktivität der einzelnen Arbeitsgruppen und in Folge der Arbeitsstation in Zahlen gefasst wird, müssen die Prozesszeiten auf die jeweiligen Arbeitsgruppen bezogen werden. Aus den Prozesszeiten der Arbeitsgruppen kann die benötigte Werkerdichte und der Kapazitätsbedarf errechnet werden. Weiters wird die Durchlaufzeit der einzelnen Stationen berechnet. Die Berechnung erfolgt mit den *Formeln 8-15*.

i ...Laufvariable der Station

j ...Laufvariable des Prozesses

v ...Laufvariable Variante

n_v ...Anzahl der Variante v

$KpB_{SL_{vi}}$... Kapazitätsbedarf der Schlosser_innen für Variante v und Arbeitsstation i

$KpB_{SW_{vi}}$... Kapazitätsbedarf der Schweißer_innen für Variante v und Arbeitstation i

t_{vi} ...Durchlaufzeit bzw. Prozesszeit für Variante v und Station i

t_{vij} ...Prozesszeit für Variante v , Station i und Prozess j

t_R ...Vorliege-, Reife- und Nachliegezeiten

t_h ...Arbeitszeit je Schicht

$x_{SL_{vij}}$... Anzahl benötigter Schlosser_innen für Variante v , Station i , Prozess j und Prozesszeit t_{vij}

$x_{SW_{vij}}$... Anzahl benötigter Schweißer_innen für Variante v , Station i , Prozess j und Prozesszeit t_{vij}

KpB_{SL_v} ...Gesamter Kapazitätsbedarf an Schlosser_innen für Variante v

KpB_{SW_v} ...Gesamter Kapazitätsbedarf an Schweißer_innen für Variante v

μ ...Produktivität der Mitarbeiter_innen

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}$$

$$\forall j \in \{1, \dots, m\}$$

$$\forall v \in \{1, \dots, k\}$$

$$\forall (x_{SL_{vij}} \in N)$$

$$\forall (x_{SW_{vij}} \in N)$$

$$KpB_{SL_{vi}} = \sum_{j=0}^m (t_{vij} * x_{SL_{vij}})$$

Formel 7: Kapazitätsbedarf Schlosser_innen für Variante v und Arbeitsstation i (in Anlehnung an Bokranz und Landau 2012, S. 369)

$$KpB_{SW_vi} = \sum_{j=0}^m (t_{vij} * x_{SW_vij})$$

Formel 8: Kapazitätsbedarf Schweißer_innen für Variante v und Arbeitsstation i (in Anlehnung an Bokranz und Landau 2012, S. 369)

$$KpB_{SL_v} = \sum_{i=0}^n (KpB_{SL_vi})$$

Formel 9: Kapazitätsbedarf Schlosser_innen für Variante v

$$KpB_{SW_v} = \sum_{i=0}^n (KpB_{SW_vi})$$

Formel 10: Kapazitätsbedarf Schweißer_innen für Variante v

$$t_{vi} = \sum_{j=0}^m (t_{vij})$$

Formel 11: Wertschöpfende Prozesszeit der Station i für die Produktion der Variante v

$$t_v = \sum_{i=0}^n (t_{vi})$$

Formel 12: gesamte wertschöpfende Prozesszeit der Variante v entlang der Fertigungslinie

$$DLZ_{vi} = \sum_{j=0}^m (t_{vij}) + t_R$$

Formel 13: Durchlaufzeit der Station i für die Produktion der Variante

$$DLZ_v = \sum_{i=0}^n DLZ_{vi}$$

Formel 14: Gesamte Durchlaufzeit der Variante v

Die Resultate der Zeitaufnahmen sind in der Einheit Stunden in *Abbildung 37-44* dargestellt und werden mit den Daten aus dem firmeninternen SAP, welche als Planwerte bezeichnet werden, verglichen. Wie vorgegeben, werden die Arbeitsgruppen der Schlosser_innen (SL) und Schweißer_innen (SW) getrennt betrachtet.

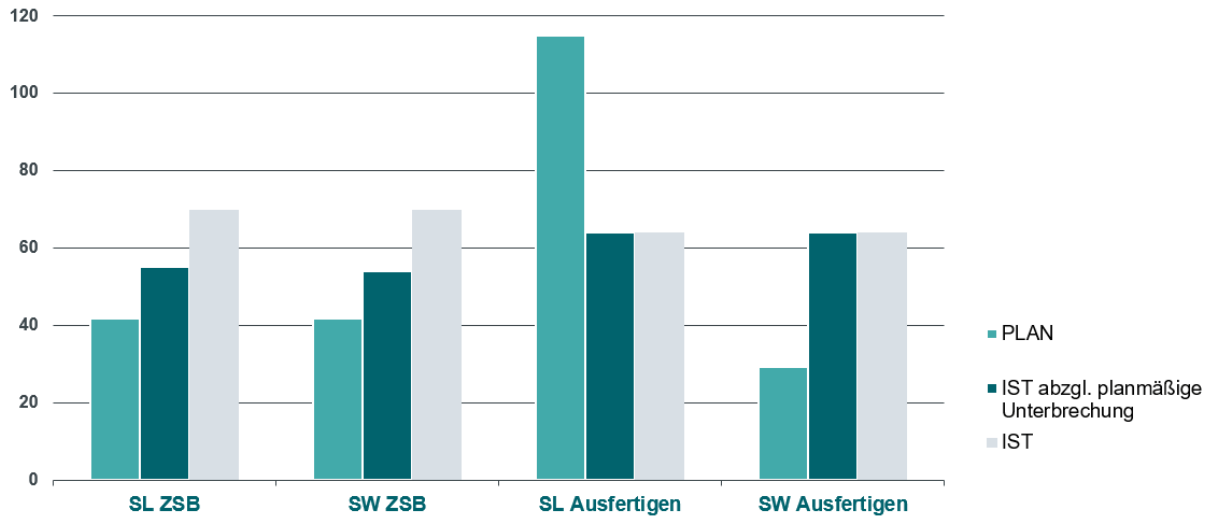


Abbildung 37: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 1, Variante 1 (Untergestell Kopfwagen) (eigene Darstellung)

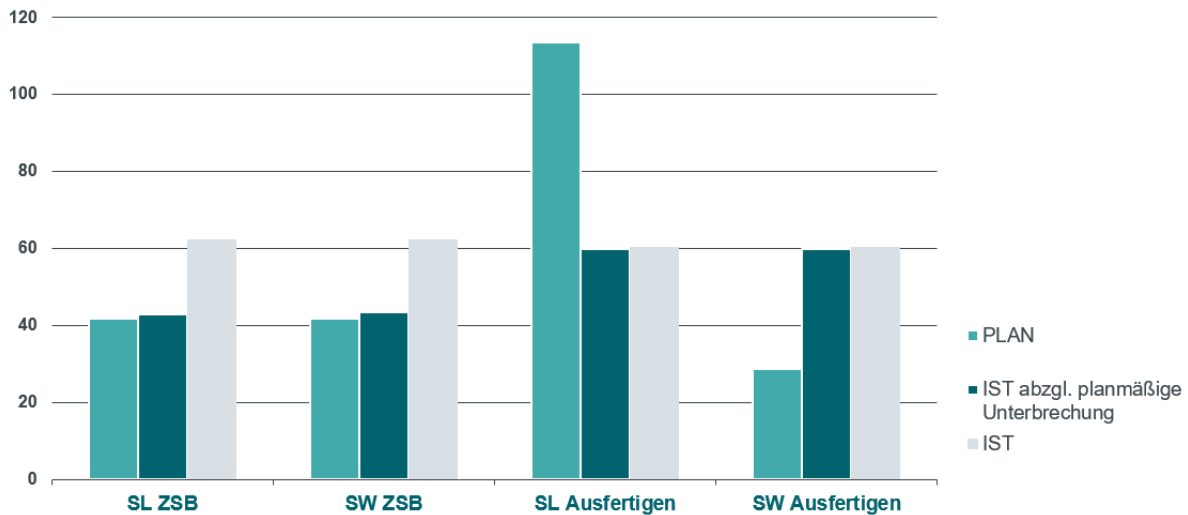


Abbildung 38: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 1, Variante 2 (Untergestell Mittelwagen) (eigene Darstellung)

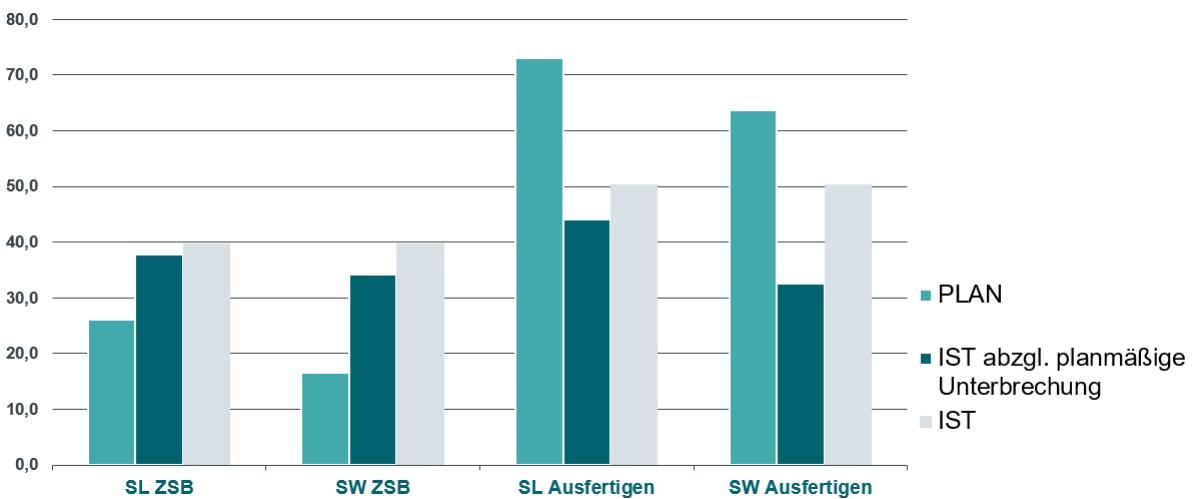


Abbildung 39: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 2, Variante 3 (Untergestell Kopfwagen) (eigene Darstellung)

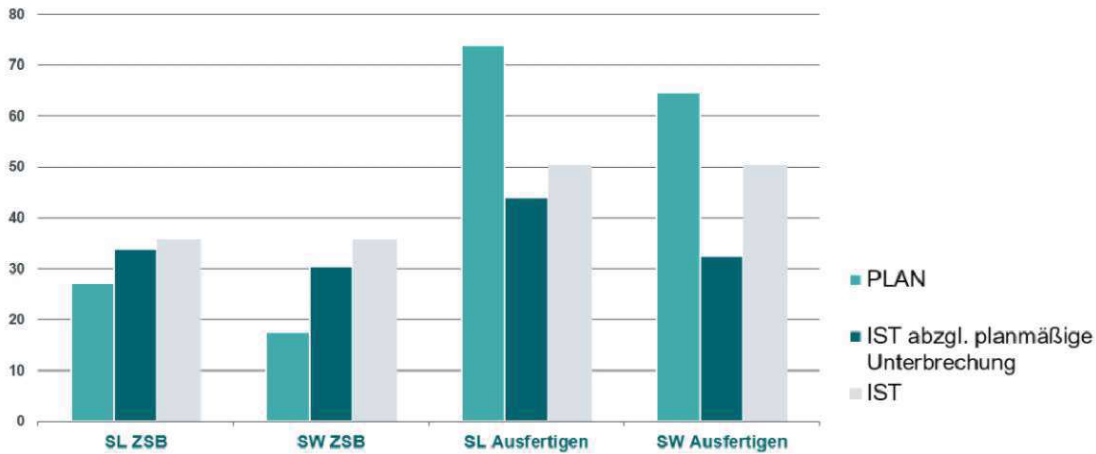


Abbildung 40: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 2, Variante 4 (Untergestell Mittelwagen) (eigene Darstellung)

Anhand von *Abbildung 37-40* ist zu erkennen, dass die Untergestelle der Fertigungslinie 1 einen weit höheren Kapazitätsbedarf als Fertigungslinie 2 haben.

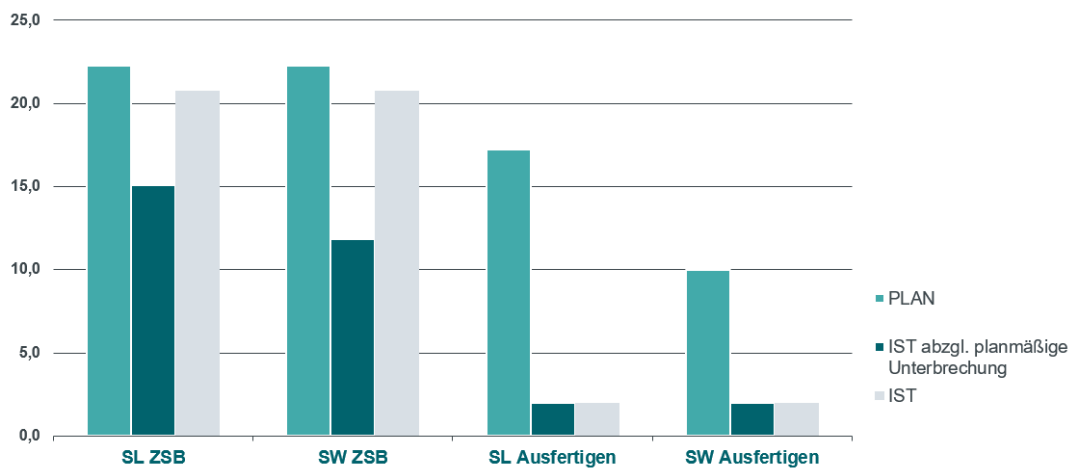


Abbildung 41: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 3, Variante 1 (Dach Kopfwagen) (eigene Darstellung)

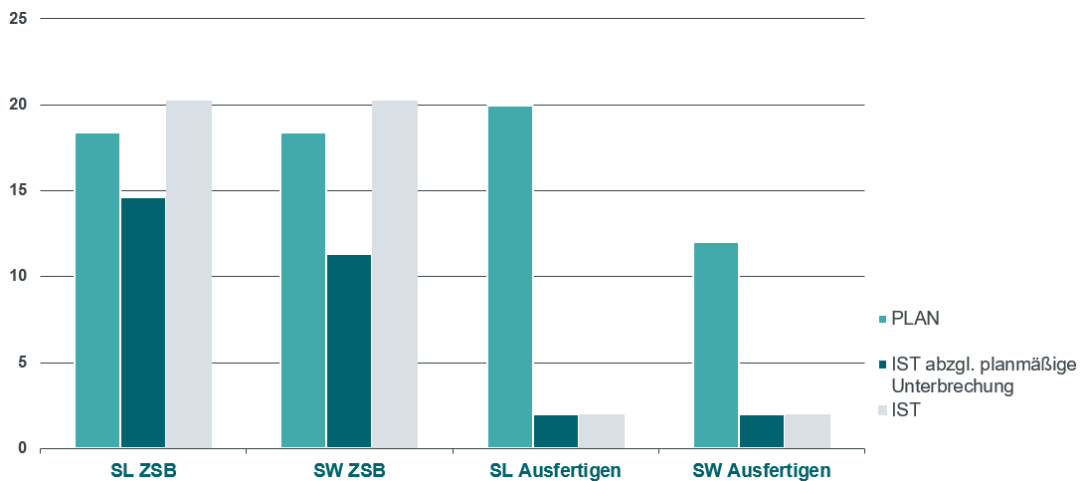


Abbildung 42: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 3, Variante 2 (Dach Mittelwagen) (eigene Darstellung)

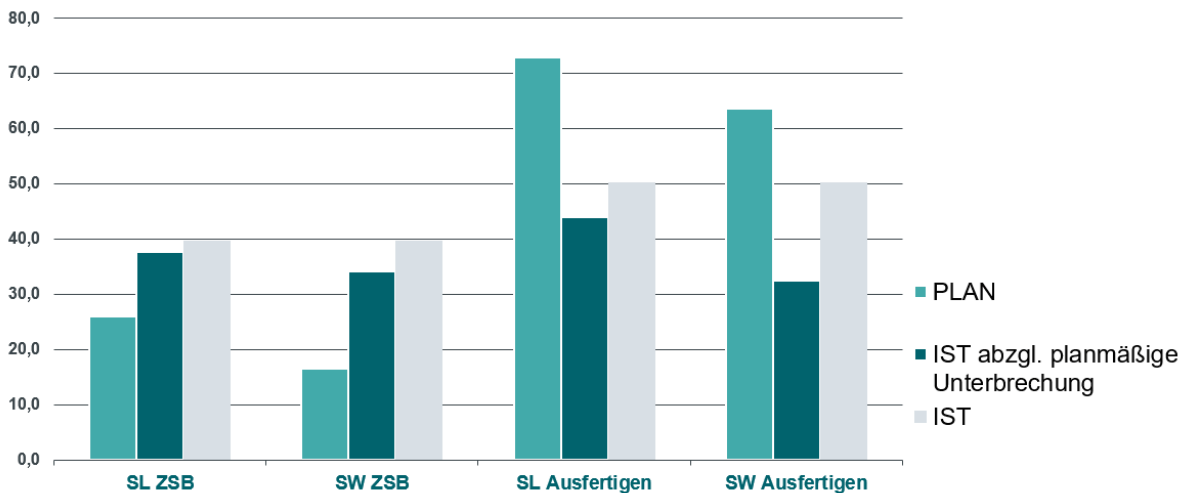


Abbildung 43: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 4, Variante 3 (Dach Kopfwagen) (eigene Darstellung)

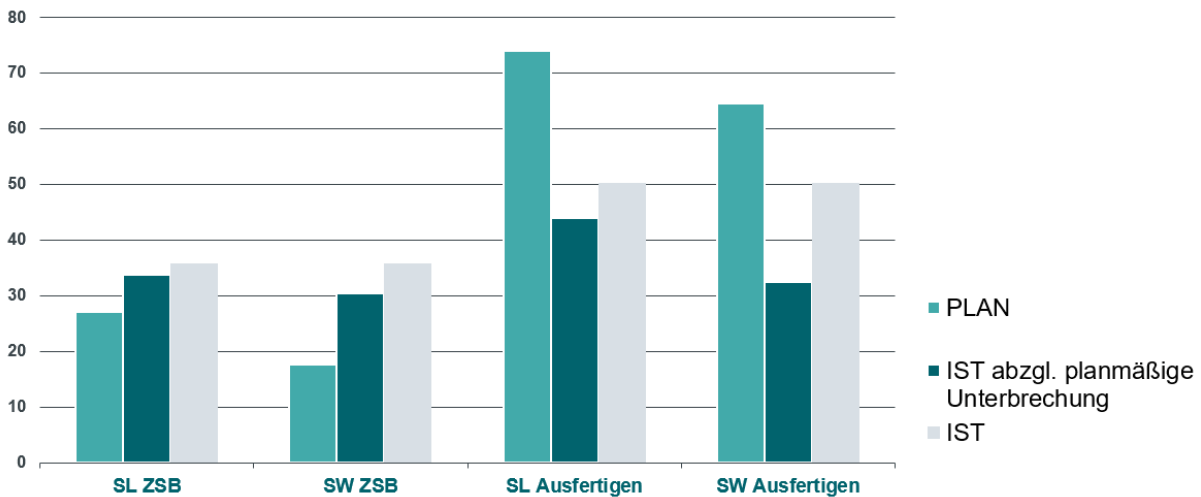


Abbildung 44: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 4, Variante 4 (Dach Mittelwagen) (eigene Darstellung)

Auch die Fertigungslinien der Dächer (Fertigungslinie 3 und 4) sind zusammenzulegen. Durch *Abbildung 41-44* wird deutlich, dass die parallele Fertigungslinie des Daches der Fertigungslinie 3 im Vergleich zu den Untergestellen bei beiden Varianten nur etwa die Hälfte des Kapazitätsbedarfs benötigt. Auch bei der Fertigungslinie 4 haben die Dächer einen geringeren Kapazitätsbedarf als bei den Untergestellen. Daraus lässt sich schließen, dass in beiden Fertigungslinien und bei allen vier Varianten das Untergestell das kritische Produkt ist. Aufgrund dessen werden die Dächer nicht explizit behandelt. Alle weiteren Daten zu den Dächern sind im Anhang vorzufinden.

Da die anvisierte Taktzeit x Tage beträgt und die meisten kritischen Stationen bei einer aktuellen Werkerdichte von x Schlossern und x Schweißern eine Prozesszeit von x

Schichten haben, wird in den meisten Fällen durch einen 2-Schichtbetrieb die Taktzeit von x Tagen eingehalten. Durch die erfolgten Prozess- und Zeitaufnahmen wurde ein Engpass ermittelt, welcher sich auf der Fertigungslinie 1 bei der Variante 1 (Untergestell) und in der ersten Arbeitsstation befindet. Dieser übersteigt die anvisierte Taktzeit von x Schichten um mehr als 10%. Bei der Engpassstation handelt es sich um die Arbeitsstation des Zusammenbaus der Untergestelle auf Fertigungslinie 1 für die Variante 1.

Alle ermittelten Zeiten unterliegen gewissen Varianzen, da es sich bei den Prozesszeiten um Zeitspannen im Bereich von mehreren Stunden handelt und die Prozesse vielen Einflussgrößen unterliegen. Nachdem der Wertstrom, die Zeiten und der Personalbedarf für jede Variante festgestellt wurden, kann im nächsten Schritt die Analyse des Ist-Zustands erfolgen.

5.4 Verbesserungsmaßnahmen

Ein reibungsfreier Übergang und eine funktionierende zusammengelegte Fertigungslinie werden bewerkstelligt, indem Potentiale und Herausforderung erkannt werden, um daraus Maßnahmen abzuleiten.

Die Darstellung des Wertstromdesigns zeigt Personalressourcen und belegte Plätze an, jedoch gibt sie keinen Aufschluss über die Arbeitsauslastung der einzelnen Arbeiter_innen, welche gemeinsam in Gruppen an den Arbeitsstationen agieren. Daher werden nun die Prozessabschnitte aus dem Vorranggraph mitsamt den zugehörigen Prozesszeiten zu den jeweiligen Arbeitsplätzen und Werker_innen auf einer Zeitachse zugeordnet. Infolgedessen entstehen Ist-Arbeitspakete, in denen zwischen Schlosser_innen und Schweißer_innen unterschieden wird. Schlosser_innen können nicht Tätigkeiten von Schweißer_innen verrichten, da diese eine spezielle Schweißausbildung haben und für jedes Projekt bzw. die Projektabschnitte eine Schweißprüfung benötigen. Das beschriebene Vorhaben ist in *Abbildung 45* dargestellt und zeigt die Engpassstation mitsamt der Auslastung der Ressourcen und der Arbeitsplätze, wobei zwei vorhanden sind: ein Vorbereitungsplatz für das einzubauende Material und ein Platz für den Zusammenbau, auf welcher sich die Vorrichtung zum Spannen und Fixieren des Untergestells befindet. Um *Abbildung 45* zu erstellen, musste zuerst *Tabelle 4* kreiert werden. *Tabelle 4* wurde durch die Kombination von sowohl der Prozess- und Zeitaufnahmen als auch durch den

Vorranggraphen erstellt. Die benötigte Anzahl der jeweiligen Arbeitsressourcen je Prozess sind nicht in *Tabelle 4* enthalten und wurden für die Erstellung von *Abbildung 45* aus der Berechnung des Kapazitätsbedarfs entnommen.

Schicht	Nr.	Prozessablauf	Dauer [Min.]
1	1	Langträger vorbereiten	120
	2	Langträger einlegen	40
	3	Vorbau Wagenende 1 vorbereiten	240
	4	Vorbau Wagenende 2 vorbereiten	120
	5	Vorbau einlegen	40
2	6	Wagenende 1 schweißen (inkl. Vorbaubleche 1&2)	480
	7	Wagenende 2 schweißen	270
	8	Spoiler vorbereiten, heften und schweißen	60
	9	Bodenplatte vorbereiten (inkl. Anschlussblech + Radkasten)	240
3	10	Bodenplatte einlegen	50
	11	Bodenplatte heften und schweißen	90
	12	Längsnaht mit Oxytechnik Schweißroboter schweißen	90
	13	Kleinteile vorbereiten	60
	14	Kleinteile schweißen	90
	15	Untergestell umdrehen (Vorrichtung aufmachen, Untergestell drehen und	50
	16	Längsnaht mit Oxytechnik Schweißroboter schweißen (Rückseite)	90
17	Konsolen	120	
4	18	Unterseite Hauptquerträger vorbereiten, heizen und schweißen	120
	19	Wagenende 1 Vorbau fertiggearbeiten	420
	20	Wagenende 2 Vorbau Quernaht innen schweißen	60
	21	Wagenende 2 Vorbau Längsnaht innen schweißen	160
	22	Spoiler auf der Rückseite bearbeiten	90
5	23	Untergestell aufstellen	30
	24	Wagenende 1 fertigschweißen	120
	25	Wagenende 2 fertigschweißen	150
	26	Wagenende 1 Spoiler fertiggearbeiten	50

Tabelle 4: Prozessablauf Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 1

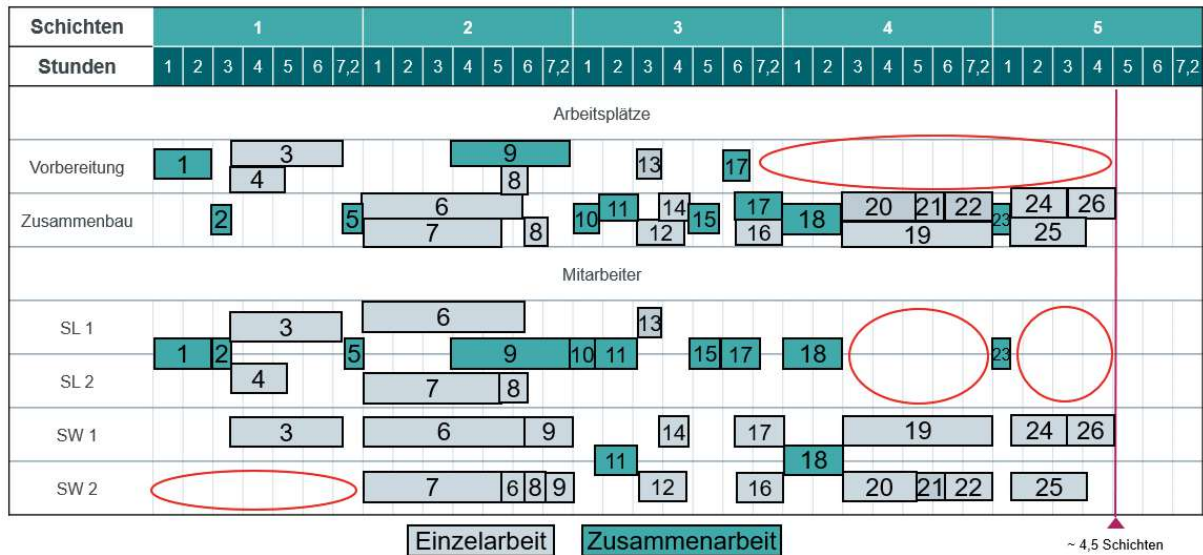


Abbildung 45: Auslastung des Arbeitspersonals und der Arbeitsplätze in der Fertigungslinie 1, Arbeitsstation 1 für die Variante 1 (eigene Darstellung)

In *Abbildung 45* ist die Auslastung der einzelnen Arbeiter_innen und die Belegung der Arbeitsplätze zu erkennen. Dadurch ist es möglich, in Zusammenarbeit mit Expert_innen Maßnahmen zur Verbesserung auszuarbeiten, indem beispielsweise ungenutzte Arbeitszeit bzw. prozessbedingte Wartezeit, welche in *Abbildung 45* rot markiert wurden, mit wertschöpfenden oder anderweitig nützlichen Tätigkeiten gefüllt werden. Hinzu kommt, dass der_die zweite Schweißer_in in der ersten Schicht nicht zum Einsatz kommt. Außerdem haben beide Schlosser_innen in der vierten und fünften Schicht eine geringe Auslastung, während gleichzeitig der Vorbereitungsplatz leer steht. Diese Tatsachen sind in der bevorstehenden Reduktion der Verschwendung und der Soll-Planung zu berücksichtigen. Analog zu *Abbildung 45* wurde die Auslastung je Ressource und Arbeitsplatz auch für jede andere Arbeitsstation und die jeweilige Variante erstellt. Die weiteren Darstellungen der Ist-Zustände der Auslastungen sind im Anhang vorzufinden.

Im Zuge der Prozess- und Zeitaufnahmen sollten den Planenden bereits einige Probleme und Ineffizienzen aufgefallen sein. Diese sind festzuhalten und im Rahmen der Verbesserungsmaßnahmen zu diskutieren. Durch den Einbezug von Fachexpert_innen und mit Zuhilfenahme des Ishikawa-Diagramms (siehe *Kapitel 2.2.2*) werden weitere Ursachen zu unterschiedlichen Problemthemen erörtert. Die Fachexpert_innen geben durch das Beisteuern ihrer Expertise Auskunft über akute Probleme und potenzielle Schwierigkeiten bei der zusammenzulegenden Fertigungslinie. Weiters ist im Rahmen des Workshops mit den Expert_innen der

Eintritt von Worst-case Szenarien gedanklich durchzugehen. Als Resultat werden Maßnahmen in Form von technischer und organisatorischer Natur entwickelt.

Die erste ermittelte Herausforderung ist die integrierte Qualitäts- und Kundenabnahme am Ende der Fertigungslinie, da das Personal der Qualitätsabnahme in Gleitzeit arbeitet, wodurch eine zeitliche Versetzung der Arbeitszeiten zwischen Arbeiter_innen und Qualitätskontrolleur_innen entsteht. Dies bewirkt eine Verschiebung der Ausbesserungsarbeiten, wodurch langfristig Materialstau entlang der Fertigungslinie entsteht. Um einen Materialstau zu prävenieren, ist es nötig, dass das Personal der Qualitätsabnahme gleichzeitig mit den Werker_innen arbeitet, welche die Qualitätsmängel ausbessern. Daraus resultiert der gleichzeitige Arbeitsbeginn des Qualitätspersonals mit den Werker_innen. In weiterer Folge ist es auch nötig, einen Schichtbetrieb des Qualitätspersonals einzuführen, da der Arbeitsaufwand für die Qualitätskontrollen bei einem erhöhten Produktionsausstoß durch den Schichtbetrieb der Werker_innen nicht bewältigbar ist. Eine weitere Herausforderung ist die Sicherstellung der rechtzeitigen Materiallieferung. Aufgrund der Größe der Materialien sind einige an ein Transportmittel gebunden, welches durch die vorhandene Anzahl einen Engpass in der Logistik darstellt. Um dem entgegenzusteuern, ist eine Entkopplung des kritischen Transportmittels nötig. Die Entkopplung soll durch einen Materialträger in Form eines Anhängers stattfinden, welcher die Bodenplatten beinhaltet und sich von einem leicht verfügbaren Stapler transportieren lässt. Dies gewährleistet eine bessere Verfügbarkeit und höhere Flexibilität.

Die wichtigste Maßnahme ist die Einschulung der Werker_innen zur Produktion der anderen Varianten, da sie sonst im zusammengelegten Normalbetrieb nicht in der Lage sind, die nicht erlernten Varianten zu produzieren. Daher ist eine umfängliche Job Rotation rechtzeitig vor der Zusammenlegung durchzuführen, sodass die Vorgehensweisen und Spezifikationen der anderen Fertigungslinien und Varianten bestmöglich erlernt werden. Da Gruppenarbeit vorherrscht, ist es auch von Vorteil, in der ersten Rotation die erfahrensten Mitarbeiter_innen an ihrer ursprünglichen Arbeitsstation zu lassen. Dadurch wird wichtiges Fachwissen effektiver unter den Arbeiter_innen weitergegeben und in weiterer Folge besser verteilt. Weiters kann nach einer erfolgreichen Job Rotation auch Job Enlargement betrieben werden. Dabei erlernen die Arbeiter_innen die Tätigkeiten der anliegenden Arbeitsstationen, damit sie im Falle von Abwesenheiten abhelfen können (Schlüter und Ostermeier 2022, S. 141).

Diese Maßnahme ist zweifelsfrei vor der Zusammenlegung der Fertigungslinien zu treffen, da es sonst zu Schwierigkeiten nach der Zusammenlegung der Fertigungslinien kommt. Infolgedessen wurde aufgrund der Wichtigkeit diese Maßnahme bereits in einem frühen Stadium der exemplarischen Anwendung des Planungskonzepts im Unternehmen eingeführt.

6 Planung des Soll-Zustands

Das Ziel dieser Soll-Planung ist, eine annähernd einheitlich getaktete Fertigungslinie zu erhalten. Dazu muss im ersten Schritt das Layout festgelegt werden, sodass maximale Effizienz und geringe Verschwendung gegeben sind. Im Anschluss werden anhand des Ist-Zustands die Personalplanung und die vorgegebenen Arbeitspläne im Soll-Zustand geplant. Weiters ist die Reihenfolgenbildung der Produktion zu planen. Zuletzt werden auf Basis der bis dato erstellten Soll-Planung Taktzeitszenarien erstellt, um einer Änderung im Kundenbedarf dynamisch entgegenzuwirken. Bis ein zufriedenstellender Soll-Zustand erreicht ist, unterliegt der Planungsprozess gegebenenfalls mehreren Iterationen.

6.1 Soll-Layout

Die Layoutplanung ist ein langfristiger Problemlösungsansatz bei variantenreichen Fertigungslinien (Boysen 2005, S. 53). Im Rohbau von Schienenfahrzeugen sind die Arbeitsprozesse an stationäre Vorrichtungen und Maschinen gebunden. *Abbildung 46* zeigt eine von vielen Vorrichtungen, welche im Laufe der Untergestell-Herstellung benötigt wird. Diese Vorrichtungen fixieren Produkte in der Größe eines ganzen Wagenkastens, damit die vom Kunden geforderten Maßtoleranzen eingehalten werden. Wegen der unterschiedlichen Geometrien muss für jedes neue Kundenprojekt eine Vorrichtung abgeändert oder neu konstruiert und hergestellt werden. Eine Abänderung des Layouts ist daher schwer umzusetzen und sowohl mit hohen finanziellen als auch zeitlichen Aufwänden verbunden. Daher sollte das Soll-Layout gut durchdacht und als erstes bestimmt werden.



Abbildung 46: Vorrichtung für das Einspannen der Untergestell Langträger (Werksfoto: Siemens Mobility Austria GmbH)

Bei der Zusammenlegung zweier Fertigungslinien handelt es sich um eine Brownfieldplanung, da sowohl die Fabrikhalle als auch die Fertigungslinien bereits existieren. Aufgrund dessen ist es sinnvoll, die Arbeitsstationen der entstehenden Fertigungslinie entlang der zwei bestehenden Fertigungslinien anzuordnen. Die Zusammenlegung führt bestenfalls zu einer Halbierung der Gesamtanzahl an Arbeitsstationen. Diese können in unterschiedlichen Formen zueinander angeordnet sein (Dolgui et al. 2019, S. 2747):

- geradlinig,
- parallel,
- u-förmig
- und beliebig.

Vorrichtungen, welche für mehrere Varianten geeignet sind, sind gesondert zu konstruieren und werden in dieser Diplomarbeit nicht behandelt.

Ausschlaggebend für die Soll-Planung des Layouts sind der Materialfluss bzw. die Anordnung der jeweiligen Stationen sowie Restriktionen durch benötigte Ressourcen wie Werkzeug, Equipment und Maschinen, welche teilweise ortsgebunden sind. Optimalerweise liegen aufeinanderfolgende Arbeitsstationen nebeneinander oder in kurzer Distanz voneinander entfernt, um den Transportweg und Transportzeiten so gering wie möglich zu halten und einen optimalen Materialfluss zu gewährleisten. Der aus der Wertstromdarstellung abgeleitete layoutbezogene Materialfluss kann dabei helfen, eine sinnmäßige Anordnung der Arbeitsstationen in einer Produktionshalle zu generieren. Das geplante Soll-Layout ist in *Abbildung 47* dargestellt.

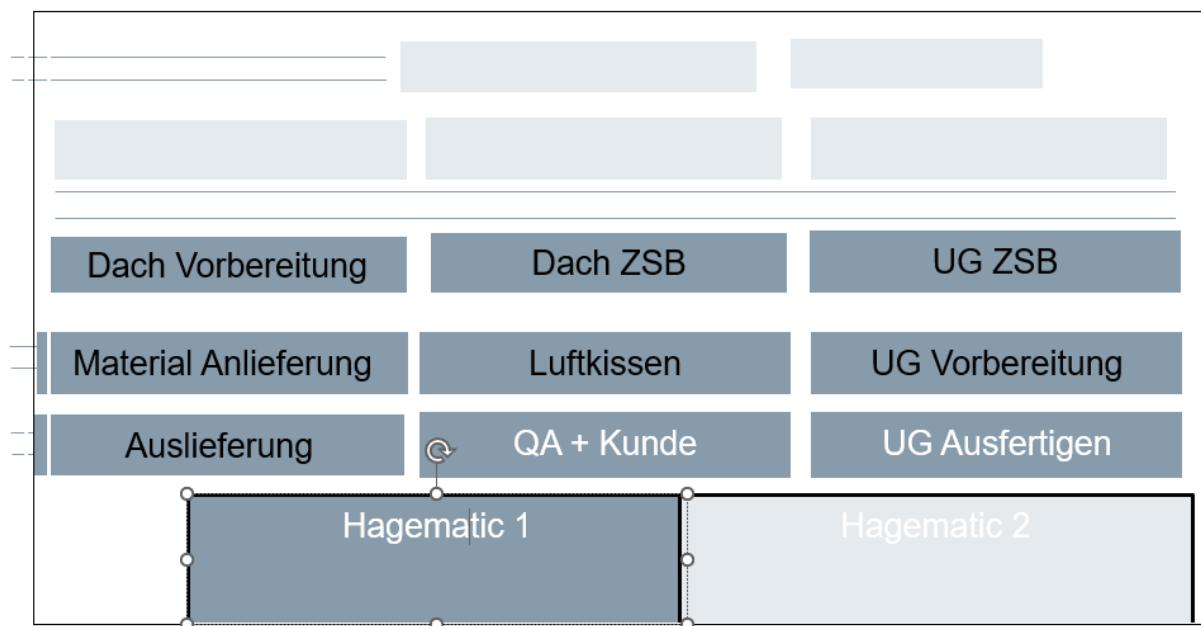


Abbildung 47: Soll-Layout (eigene Darstellung)

6.2 Soll-Personalplanung

Um eine effiziente und produktive, variantenreiche Fertigungslinie zu gewährleisten, ist eine gut durchdachte Kapazitätsplanung und Produktsequenzierung wichtig (Huka et al. 2021, S. 707). Daher ist das Ziel der Soll-Personalplanung, dass durch eine geeignete Werkerdichte auf den einzelnen Arbeitsstationen entlang der Fertigungslinie unabhängig von der Variante annähernd die gleiche Taktzeit entsteht, damit eine zeitliche Ausgewogenheit gegeben ist. Die Ausgewogenheit zwischen den einzelnen Stationen hat die größte Auswirkung auf die Lösungsqualität des Austaktungsproblems, weshalb versucht wird, die Prozessdauer zwischen den Stationen auszugleichen, sofern dies möglich ist (Freiheit und Li 2017, S. 14). Wie auch in *Formel 2* beschrieben, lässt sich die Taktzeit durch die Anzahl der eingesetzten

Arbeiter abändern (Dolgui et al. 2019, S. 2747). Dementsprechend muss zuerst eine Basis- bzw. Standardtaktzeit gewählt werden. Wie in *Kapitel 3.3* erklärt wird, sind die Taktzeitvielfache in Zusammenhang mit den unterschiedlichen Werkerdichten, Stückzahlkorridoren und vorhandene Kapazitätsanpassungsmaßnahmen zu setzen, damit die Kombination aller Faktoren zu einer Basistaktzeit führt. Die Werkerdichte wird, wie in *Kapitel 3.3* beschrieben, durch eine minimale und maximale Werkerdichte begrenzt. Die minimale Werkerdichte ist in den meisten Fällen ein Schlosser und ein Schweißer, da fast ausschließlich jede Arbeitsstation im Rohbau des Schienenfahrzeugbaus beide Arbeitsgruppen benötigt. Aufgrund der Rahmenbedingungen und der Kapazitätsbedarfsunterscheidung zwischen Schlosser und Schweißer wird nun auch bei der Werkerdichte zwischen den beiden Arbeitsgruppen unterschieden. Die maximale Werkerdichte ist durch die Größe des Arbeitsplatzes bzw. des Werkstücks begrenzt. Wie bereits erwähnt, gibt die Werkerdichte die Anzahl der Arbeiter_innen pro Arbeitsplatz an. Dabei kann es sich bei dem Arbeitsplatz um eine Arbeitsstation als auch um eine gesamte Fertigungslinie handeln.

w_{SL_min} ...minimale Werkerdichte der Schlosser

w_{SL_max} ...maximale Werkerdichte der Schlosser

w_{SW_min} ...minimale Werkerdichte der Schweißer

w_{SW_max} ...maximale Werkerdichte der Schweißer

$$[w_{SL_min}, w_{SL_max}] := \{w_{SL} \in \mathbb{N} \mid w_{SL_min} \leq w_{SL} \leq w_{SL_max}\}$$

Formel 15: Randbedingung der Werkerdichte für Schlosser (in Anlehnung an Pröpster 2015, S. 81)

$$[w_{SW_min}, w_{SW_max}] := \{w_{SW} \in \mathbb{N} \mid w_{SW_min} \leq w_{SW} \leq w_{SW_max}\}$$

Formel 16: Randbedingung der Werkerdichte für Schweißer (in Anlehnung an Pröpster 2015, S. 81)

Da es sich bei der Zusammenlegung bereits vorhandener Fertigungslinien um eine Brownfieldplanung handelt, kommt hinzu, dass die resultierende Taktzeit nah an der aktuellen Taktzeit liegen soll, um initiale Aufwände bezüglich der Zusammenlegung und der Arbeiterqualifikation bei einem Minimum zu halten. Weiters ist zu beachten, welche Werkerdichtekombination w_i im Taktzeitszenario am nächsten zur aktuellen

durchschnittlichen Werkerdichte $w_{\emptyset,akt}$ mit der aktuellen Taktzeit $t_{t,akt}$ liegt (Pröpster 2015, S. 88):

$$t_t \sim t_{t,akt}$$

Formel 17: Approximation der Soll-Taktzeit zur aktuellen Taktzeit

Die Randbedingung der *Formel 19 und 20* stellt sicher, dass genug Arbeitskräfte an den einzelnen Stationen sind, um den Bedarf an Arbeitskräften zu decken. Ungeplante Auslastungsspitzen werden nicht bewältigt, wenn die Standardtaktzeit t_t überschritten wird. Um dem entgegenzuwirken, können durch die in *Kapitel 3.3* besprochenen Maßnahmen Kapazitätsänderungen ΔKAP vorgenommen werden, wodurch sich der Wert t_h um den Faktor ΔKAP ändert.

$$t_h * \mu * w_{SL_{vi}} \geq KpB_{SL_{vi}}$$

Formel 18: Randbedingung Werkerdichte Schlosser_innen für Variante v und Station i

$$t_h * \mu * w_{SW_{vi}} \geq KpB_{SW_{vi}}$$

Formel 19: Randbedingung Werkerdichte Schweißer_innen für Variante v und Station i

Weiters ist es möglich, durch Springereinsätze geringere Austaktungsverluste und bessere Leistungsgrade der Arbeiter_innen zu erhalten. Wie in der Produktion von Automobilen können Werker_innen, die fertig mit ihren Aufgaben sind und größere Menge an nicht genutzter Zeit überhaben zum Springer werden, um bei benachbarten Arbeitsstationen auszuweichen, solange ihre Qualifikation dies zulässt (Pröpster 2015, S. 34–35). In dieser Arbeit wird jedoch der Springereinsatz vernachlässigt, da in erster Linie eine stabile getaktete Fertigungslinie Vorrang hat. Der voreilige Einsatz von Springern kann zu Ressourcenengpässen führen, da bei der zusammengelegten Linie aufgrund von unbekanntem Umrüstzeiten und anderen noch unbekanntem Problemen Auslastungsspitzen auftreten können. Erst wenn eine erfolgreiche Zusammenlegung stattgefunden hat, ist es sinnvoll weitere Optimierungen durch Springereinsätze vorzunehmen, da zu dem zukünftigen Zeitpunkt mehr Informationen zu den noch unbekanntem Einflussgrößen zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, dass die Qualität und Termintreue unter ungeplanten Ressourcenengpässen leidet. Ein weiterer Faktor für die Vernachlässigung von Springern ist, dass aufgrund der resultierenden Nacharbeitungskosten und verlorenen Umsätze durch verlorene Kundenaufträge die Inkaufnahme von geringen Austaktungsverlusten bzw. Unterlastungen womöglich wirtschaftlicher ist als eine vorzeitige Optimierung durch Springereinsätze. Beim

zukünftigen Einsatz von Springer_innen kann die benötigte Werkerdichte statt mit *Formel 19 und 20* über die gemittelte Werkerdichte aller Arbeitsstationen berechnet werden.

Aufgrund der bestrebten Taktzeit von x Tagen ergibt sich zum Bau der Untergestelle im Kooperationsunternehmen an Station 1 und 3 eine Werkerdichte von x Schlosser_innen und x Schweißer_innen für Variante 1 und 2. Für Variante 3 und 4 reicht eine geringere Werkerdichte aus. Diese wird jedoch in der Summe aller Arbeiter kompensiert, da die Fertigungslinie für den Bau der Dächer bei Variante 1 und 2 eine geringere Werkerdichte als bei Variante 3 und 4 bedarf. Wie im Artikel von Hashemi-Petroodi et al. (2022) wird hier der modell-abhängige Personaleinsatz angewendet, da dieser im Vergleich zur klassischen einheitlichen Tätigkeits- bzw. Personalzuordnung zu einer signifikanten Kostenreduktion führt. Arbeitsstation 2 und 4 haben hingegen eine variantenunabhängige Werkerdichte, da diese Arbeitsstationen unterlastet sind bzw. eine weit geringere Taktzeit als x Tage besitzen.

6.3 Soll-Arbeitspläne

Der Schienenfahrzeugbau unterliegt hohen Taktzeiten im Ausmaß mehrerer Stunden, welche ihrerseits hohen Schwankungen unterliegen können. Um diese Schwankungen zu verringern, kann laut Duggan (2013, S. 144–145) die Arbeit in Abschnitte unterteilt werden, sodass jede Arbeitsstation Standardarbeit bzw. Arbeitspakete vorgegeben bekommt. Dies informiert die Arbeiter_innen visuell über ihren Ist-Zustand im Vergleich zur Taktzeit. Duggan (2013, S. 144–145) schreibt, dass die Einführung und Beibehaltung von Standardarbeit Zeit und Mühe kosten kann, jedoch die Entwicklung und Umsetzung von Standardarbeit die Kultur nachhaltig verändert, da sie wie andere Techniken in der schlanken Produktion das Erkennen von Verschwendung ermöglicht und den Mitarbeiter_innen die Möglichkeit bietet, Probleme zu lösen und sich kontinuierlich zu verbessern. In einem komplexen Umfeld, wie in der Schienenfahrzeugindustrie, kommt es vor, dass sich die Planenden mit den Details beschäftigen und die Details ausarbeiten müssen, um einen zukünftigen Zustand zu schaffen, der die Verschwendung stark reduziert und eine Kultur der kontinuierlichen Verbesserung schafft (Duggan 2013, S. 144–145). Der Grundstein dazu wurde durch die Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands in *Kapitel 5* dieser Arbeit gelegt.

Verluste sind in diesem Schritt bestmöglichst zu eliminieren, da Unterlasten zu einer Steigerung von Fehlern in der Produktion führen, denn Diwas und Terwiesch (2009) bewiesen, dass die qualitativ beste Arbeit entsteht, wenn die Arbeiter_innen weder überlasten noch unterlastet sind. Bebersdorf und Huchzermeier (2021, S. 82) deuten darauf hin, dass, wenn regelmäßig der Arbeitsfluss unterbrochen wird, mehr Fehler entstehen, da Werker_innen häufiger aufgrund des Verlassens der Struktur bzw. des Rhythmus abgelenkt werden. Im Gegensatz dazu entstehen bei zu starker Überlast auch Fehler, was in weiterer Folge eine höhere Gefahr des Produktionsstopps birgt, da die Werker_innen in diesem Fall ihre Arbeit nicht in dem vorgegebenen Zeitraum ableisten können (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 82).

Der zu planende Arbeitsablauf oder auch Standard- bzw. Arbeitsplan besteht je nach Variante aus mehreren Arbeitspaketen. Im Vergleich zu Pröpster's (2015) Methode, in welcher er an dieser Stelle zwischen variantenabhängigen und -unabhängigen Tätigkeiten unterscheidet, kann dieser Schritt hier nicht erfolgen. Im Vergleich zur Automobil- und Flugzeugindustrie ändert sich nämlich je nach Variante der gesamte Rohbau des Fahrzeuges. Als Beispiel hat BMW eine theoretische Variantenvielfalt von 10^{32} , welche sich aufgrund von unterschiedlichen Motorisierungen, Lackfarben, Innenausstattung, etc. ergeben (Meyr 2004, S. 344). Dabei bleibt die Karosserie des Autos jedoch gleich. Auch die Abfolge der Schritte bleiben größtenteils ähnlich, lediglich die Farbe beim Lackieren wird geändert, es wird ein unterschiedlicher Motor oder eine andere Innenausstattung eingebaut. Im Schienenfahrzeugbau hingegen ändert sich durch den Bau einer anderen Variante der Fertigungsprozess so sehr, dass Prozesse aufgrund der Dauer und Reihenfolge nicht in variantenunabhängige Vorgänge eingeteilt werden können. Aufgrund der erläuterten Komplexität sind die bereits aufgenommenen Arbeitsinhalte und Verschwendungen in Workshops in Zusammenarbeit mit den Expert_innen zu analysieren, um als Resultat je Variante einen Soll-Arbeitsplan zu generieren. Weiters lassen sich aufgrund der im Schienenfahrzeugbau vorherrschenden Restriktionen viele Tätigkeiten in der Planung der Soll-Arbeitspläne nicht auf andere Stationen verteilen, da sie an die Ressourcen einer bestimmten Arbeitsstation gebunden sind. Deshalb muss jede Tätigkeit, die einer anderen Arbeitsstation zugeordnet werden soll, individuell auf die Umsetzbarkeit an der anderen Arbeitsstation geprüft werden. Infolgedessen ist die konventionelle Austattung nicht zur Gänze für den Schienenfahrzeugbau geeignet.

Hashemi-Petroodi et al. (2022) zeigten in ihrem Artikel, dass eine variantenabhängige Aufgabenzuweisung die Kosten der Linie im Vergleich zur klassischen festen Aufgabenzuweisung erheblich reduziert. Laut Richter (2019, S. 1) wird eine höhere Qualität sichergestellt, wenn Arbeitspläne von den Arbeiter_innen mit ihrem Wissen unterstützt werden, wodurch sich Fehler während des Produktionsprozesses reduzieren. Hinzu kommt, dass durch die Workshops mit den Arbeiter_innen, Vorarbeiter_innen und Meister_innen qualitativ hochwertige Arbeitspläne entstehen, die von allen schnell und leicht verstanden werden. Nach der Elimination der Verschwendungen durch die abgehaltenen Workshops führen die ausgearbeiteten Arbeitspläne, wie in *Formel 21* ersichtlich, zu Durchlaufzeiten, welche kleiner-gleich der Zieltaktzeit sind. *Abbildung 48* zeigt die Darstellung eines Soll-Arbeitsplans. Dieser ist in Arbeitspakete unterteilt, hat vordefinierte Ziele (blau) je Schicht (türkis) und hält *Formel 21* ein.

$$t_t \geq DLZ_{vi}$$

Formel 20: Randbedingung zur Einhaltung der Taktzeit

Arbeitspakete / Schicht	1	2	3	4
VB vorbereiten	LT+BP bereits fertig			
LT & VB einlegen + heften				
WE 1 schweißen				
WE 2 schweißen				
Bodenplatte einlegen + sw.				
Oxy Normallage				
Kleinteile + Umdrehen				
Spoiler + Konsolen				
Oxy Rückenlage				
Hauptquerträger				
Vorbau innen sw.				
VB WE1&WE2 fertig sw.				
UG aufstellen + fertigstellen				
LT + BP vorbereiten				

Abbildung 48: Soll-Arbeitsplan je Schicht für Station 1, Variante 1 (eigene Darstellung)

Die restlichen Arbeitspläne sind im Anhang vorzufinden. Durch die vorgenommene Personaleinsatzplanung und die Soll-Arbeitspläne entsteht ein einheitlicher Takt der Arbeitsstationen, was zu einer Reduktion der Austaktungsverluste führt. Lediglich die Taktzeit der Fräsmaschine kann nicht durch die Planung beeinflusst werden. Weiters ist es durch die Soll-Arbeitspakete möglich, Kapazitätsanpassungsmaßnahmen in

Form eines Schichtbetriebs zu treffen, ohne die Soll-Arbeitspakete ändern zu müssen, wenn in der 2. und/oder 3. Schicht die gleiche Anzahl an Personal eingeplant wird. Dadurch ist die Bewältigung eines dynamischen Kundenbedarfs leichter zu planen. In diesem Fall ist aufgrund des geforderten Takts von x Tagen und der einheitlichen Prozessdauer von x Schichten je Variante und Station ein 2-Schichtbetrieb zielführend. Daher ergibt sich $\Delta KAP = 2$, wodurch die Randbedingungen der *Formel 19 und 20* eingehalten werden.

Im Zuge der Zusammenlegung und der erfolgreichen Einführung einer stabilen Taktzeit können im Falle sehr hoher Verschwendungen a posteriori Optimierungen, wie beispielsweise der in *Kapitel 6.2* beschriebene Springereinsatz, vorgenommen werden. Falls in der Implementierungsphase der Zusammenlegung die Arbeitsressourcen doch nicht ausreichen oder nicht in der Taktzeit produziert wird, können, wie in der Methodik von Pröpster (2015), welche in *Kapitel 3.3* beschrieben wird, als Maßnahme Kapazitätsanpassungen angewendet werden. Weiters ist es je nach Bedarf auch nachträglich möglich, weitere Iterationen der Soll-Planung durchzuführen.

6.4 Soll-Reihenfolgenplanung

Die Reihenfolgenplanung erfolgt nach Level-Scheduling bzw. Heijunka (siehe Kapitel 2.2.3), welches eines der Toyota Management Prinzipien darstellt (Liker 2004). Demnach werden Produkte nicht nach der Bestellreihenfolge der Kundenaufträge gefertigt, sondern es wird das gesamte bestellte Produktvolumen über eine gewisse Zeitperiode betrachtet und gleichmäßig aufgeteilt, sodass eine Produktionsnivellierung stattfindet (Liker 2004, S. 129).

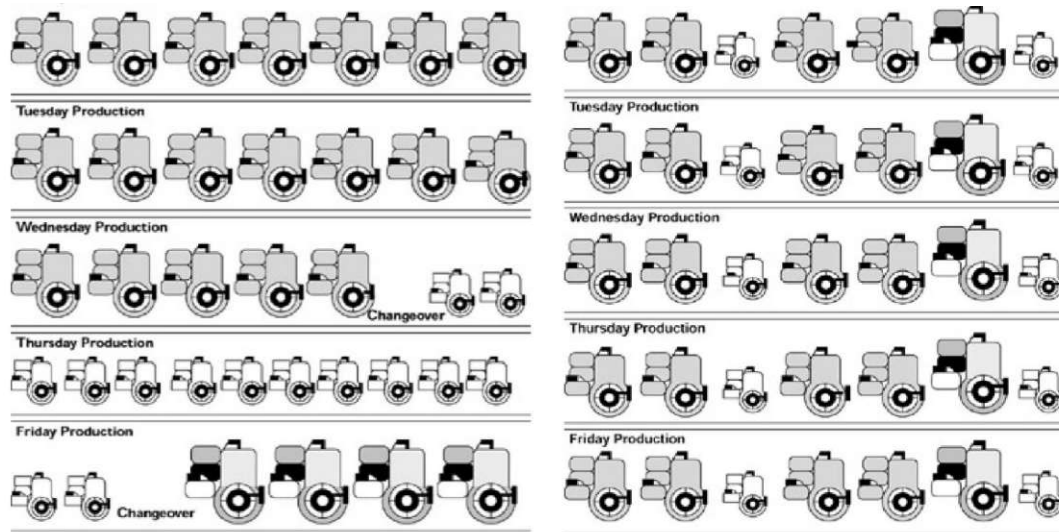


Abbildung 49: links: Visualisierung einer herkömmlichen Produktion (Liker 2004, S. 129); rechts: Visualisierung einer nivellierten Produktion (Liker 2004, S. 131)

Da die Höhe der Austaktungsverluste durch den Planer beeinflusst werden, ist trotz der Produktionsnivellierung in Form von Taktzeitanpassungen durch die Anpassung der Werkerdichte eine geeignete Reihenfolge der Produkte zu wählen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 62). Es ist zu bedenken, dass es sich im Schienenfahrzeugbau um Kleinserienfertigungen handelt, was dazu führt, dass dieselben Varianten wiederkehrend erzeugt werden und sich dadurch eine wiederholende Abfolge ergibt, wodurch die Reihenfolgenbildung vereinfacht wird. Im Schienenfahrzeugbau kann nur eine geringe Anzahl an Varianten auf einer Fertigungslinie hergestellt werden, weshalb die Auswahl einer geeigneten Reihenfolge im Vergleich zur Automobilherstellung nicht zwangsweise ein aufwändiges Simulationsmodell bedarf. Arbeitsstationen lassen sich wegen der bereits beschriebenen Schwierigkeit von Tätigkeitsumdispositionen oftmals nur durch die Anpassung der Werkerdichte und eine geeignete Reihenfolge austakten. Dies hat zur Folge, dass einige Arbeitsstationen zwangsweise unterschiedliche Prozesszeiten haben. Infolgedessen ist der überlastungsorientierte Ansatz, welcher in *Kapitel 2.4.2* beschrieben wird, geeignet, da aufeinanderfolgende Unter- und Überlasten der unterschiedlichen Varianten eine Nivellierung bewirken. Ein weiteres Kriterium zur Reihenfolgenbildung ist, dass nicht nur Unter- und Überlasten bezüglich der Stationsprozessdauer, sondern auch die Höhe der Varianz der unterschiedlichen Varianten zu berücksichtigen sind (Freiheit und Li 2017, S. 14). An dieser Stelle sei erwähnt, dass wie Schlüter und Ostermeier (2022, S. 134) bereits erörtert haben, dass variantenreiche Fertigungslinien fast nie perfekt ausgetaktet sind und die

Sequenzierung der Aufträge auch keine signifikanten Austaktungsverluste kompensieren. Durch die festgelegten Auswahlkriterien und den überlastungsorientierten Ansatz, welcher in Heijunka beinhaltet ist, werden bereits eine Auswahl an geeigneten Reihenfolgen gebildet, da Fertigungslinien im Rohbau von Schienenfahrzeugen im Gegensatz zur Automobilindustrie nur in der Lage sind, eine geringe Anzahl unterschiedlicher Varianten zu fertigen und somit die Kombinationsmöglichkeiten gering ausfallen. Um die optimale Reihenfolge und Austaktung innerhalb der getroffenen Auswahl zu finden, wird eine Durchlaufterminierung durchgeführt. Die Durchlaufterminierung, welche mit Hilfe eines Gantt-Diagramms erstellt wird, visualisiert alle Anfangs- und Endzeitpunkte der Arbeitstätigkeiten und Pufferzeiten (Günther und Tempelmeier 2012, S. 224). Das Gantt-Diagramm visualisiert wie Iwainky und Wilhelmi (1994, S. 239) beschreiben, übersichtlich aktuelle und vorausberechnete Arbeitsplatzbelegungen. Somit werden die unterschiedlichen Lösungsansätze, welche aufgrund der Auswahl entstanden sind, durch die Visualisierung des Gantt-Charts miteinander verglichen (Lukesch und Kellner 2020, S. 223). Dafür werden die in *Kapitel 5.3* erörterten Prozesszeiten und alle Rahmenbedingungen entlang des gesamten Wertstroms benötigt. Die unterschiedliche Qualität der Lösungen tritt aufgrund von blockierten und ausgebremsten Einheiten auf. Eine Einheit ist blockiert, wenn ein abgeschlossener Auftrag die Arbeitsstation nicht verlassen kann, weil der nächste Arbeits- oder Pufferplatz belegt ist. Eine Ausbremsung liegt vor, wenn eine Station nicht arbeiten kann, weil keine Aufträge in den vorhergehenden Arbeitsstationen vorhanden sind (Mayer et al. 2020, S. 217–218).

Eine weitere Möglichkeit zur bestmöglichen Reihenfolgenbildung besteht durch die Anwendung einer diskreten ereignisorientierten Simulation, da bei einfachen Problemstrukturen mit einer geringen Kombinatorik exakte Optimierungsverfahren geeignet sind (Fandel et al. 1994, S. 295).

Je nach Reihenfolge und der gewählten Werkerdichte der einzelnen Arbeitsstationen, welche durch die Rahmenbedingung der *Formel 16* und *17* beschränkt ist, variieren die Höhe der blockierten und ausgebremsten Einheiten. Es ist nicht überall möglich, dass aufgrund der beschränkten Werkerdichte ein einheitlicher Takt je Variante entsteht, wodurch dieselben Arbeitsstationen abhängig von der Variante zwangsweise unterschiedliche Prozesszeiten vorweisen. Wenn aus der Durchlaufterminierung

resultiert, dass nicht überwindbare bzw. kritische Engpässe entstehen, wird die Soll-Planung einer weiteren Iteration unterzogen.

Im Kooperationsunternehmen ist das zu fertigende Produktvolumen der Varianten 1 und 2 in etwa doppelt so hoch wie das der Variante 3 und 4. Hinzu kommt, dass es sich bei Varianten 1 und 3 um die Kopfwägen der Metros handelt, welche im Verhältnis 1:2 zu den Mittelwägen bzw. Varianten 2 und 4 produziert werden (siehe *Kapitel 2.3.3*). Weiters brachte die Aufnahme des Ist-Zustands hervor, dass Variante 1 den höchsten Produktionsaufwand und eine hohe Varianz mit sich bringt. Den geringsten Aufwand hat Variante 4 im betrachteten Fertigungsabschnitt. Aufgrund dessen sind Variante 1 und 4 nacheinander zu fertigen, sodass ein zeitlich lokaler Ausgleich der Aufwände nach dem überlastungsorientierten Ansatz für die Reihenfolgenplanung entsteht. Infolgedessen und infolge der zu fertigenden Stückzahlen je Variante ergibt sich folgende Reihenfolge: 1, 2, 2, 2, 2, 1, 4, 4, 3.

Eine Durchlaufterminierung mit einem Gantt-Diagramm ist in diesem speziellen Fall nicht nötig, da eine Vereinheitlichung der Taktzeiten unabhängig der Variante aufgrund der anpassbaren Werkerdichte bewerkstelligt wird. Als Resultat fallen die Durchlaufterminierung und Durchlaufzeiten unabhängig der Reihenfolge ähnlich aus. Die Reihenfolge wurde jedoch gewählt, um sowohl die Fluktuation der Werkerdichte als auch die Rüstzeiten gering zu halten, während die lokale Auslastung ausgeglichen und die Rahmenbedingung des Kundenbedarfs eingehalten wird.

6.5 Bestimmung von Taktzeitszenarien

Die Grundlage für Taktzeitszenarien ist die Bestimmung eines Standardtaktes mitsamt einer erörterten Werkerdichte, welche im Zuge der Soll-Personalplanung in *Kapitel 6.2* bereits erfolgt ist. Das Auftreten einer Änderung im Kundenbedarf kann zu einer veränderten Ausbringungsmenge führen. Damit die Produktion entsprechend auf die dynamischen Produktionsmengen und der einhergehenden Taktzeitänderung reagieren kann, werden unterschiedliche Taktzeitszenarien erörtert. Diese werden durch die Schichtplanung, welche die tägliche Einteilung und Anordnung des Produktionspersonals plant, sodass sie den lokalen Kapazitätsanforderungen der jeweiligen Arbeitsstation entsprechen, sichergestellt (Günther und Tempelmeier 2012, S. 132). Auch andere Kapazitätsanpassungsmaßnahmen, welche in *Kapitel 3.3* beschrieben sind, können zum Einsatz kommen. Weiters ist es auch möglich, durch

die Änderung der Werkerdichte entlang der Fertigungslinie Anpassungen zu generieren. Beispielsweise führt die Halbierung der Werkerdichte theoretisch zu einer Verdoppelung in der Produktionszeit und vice versa, jedoch ist die minimale und maximale Werkerdichte bei der Personalplanung zu beachten. Im Kooperationsunternehmen sind durch die Kapazitätsanpassungsmaßnahmen neben dem geplanten 2-Schichtbetrieb auch 1- und 3-Schichtbetriebe möglich. *Abbildungen 50 und 51* verdeutlichen den genannten Sachverhalt der Halbierung bzw. Verdoppelung. Hinzu kommt, dass die Änderung der Taktzeit und der Anzahl von Schichten zu einer Abänderung der Belegungszeit der Arbeitsstationen führt. Aufgrund dessen ist bei der Einführung einer Taktzeitvielfache die Umsetzbarkeit durch eine Durchlaufterminierung oder Simulation zu überprüfen.

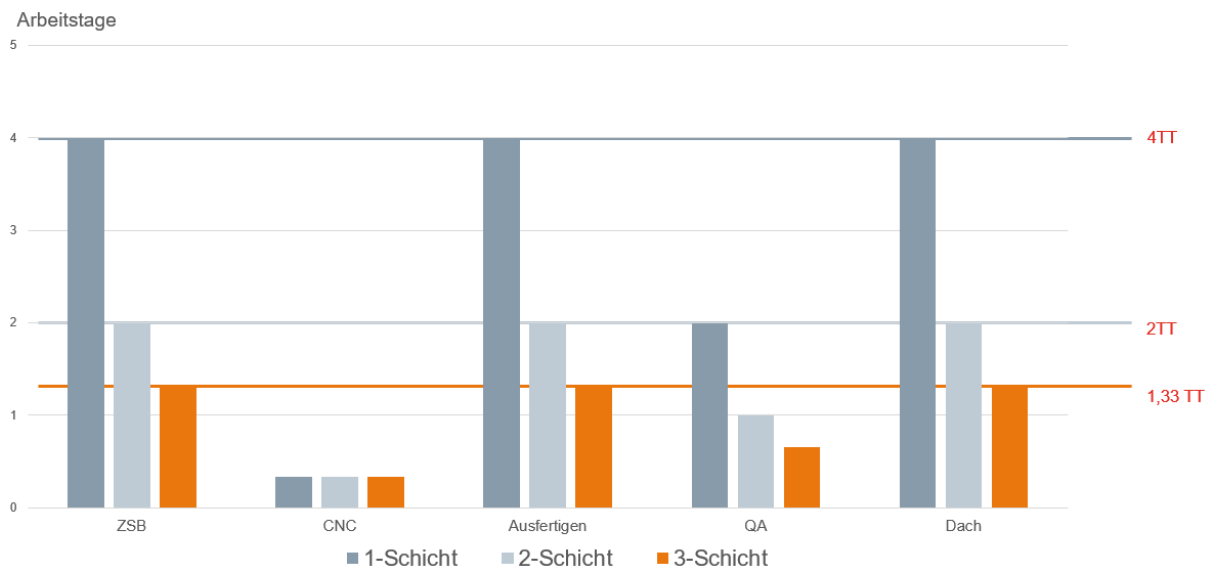


Abbildung 50: Taktzeiten abhängig vom Schichtbetrieb (eigene Darstellung)

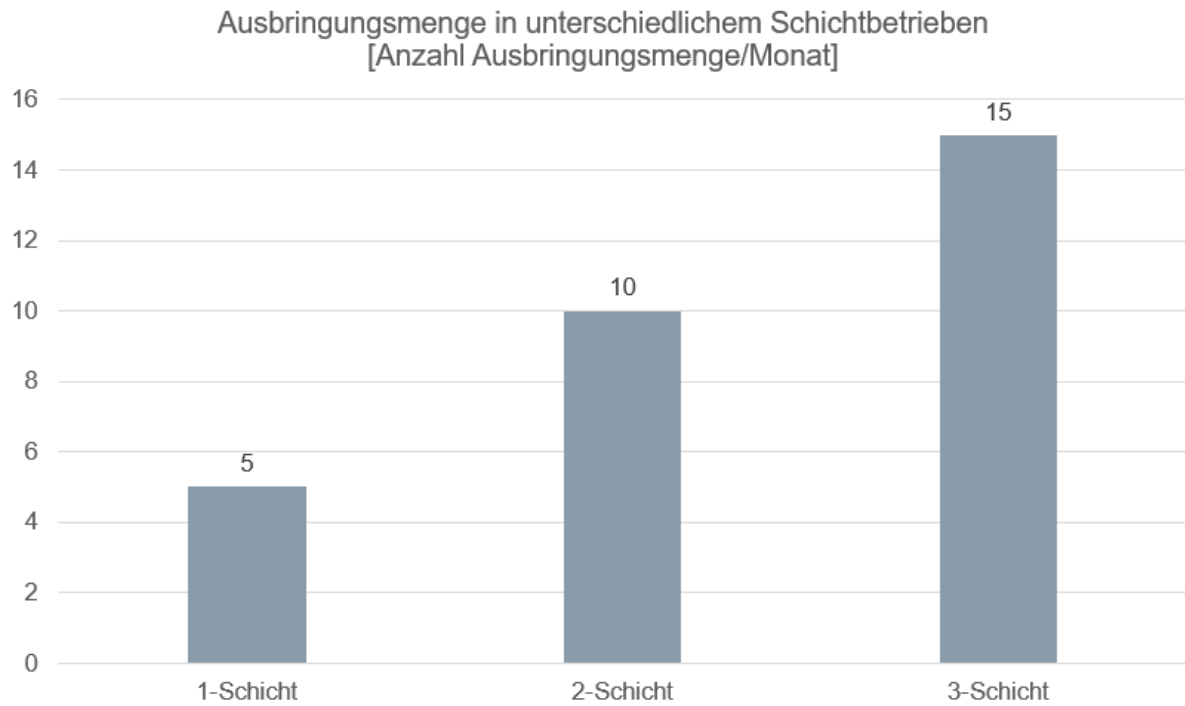


Abbildung 51: Ausbringungsmenge in unterschiedlichem Schichtbetrieb (eigene Darstellung)

Neben der Taktzeit und der Ausbringungsmenge ändert sich auch die Durchlaufzeit, was durch *Abbildung 52* visualisiert wird.

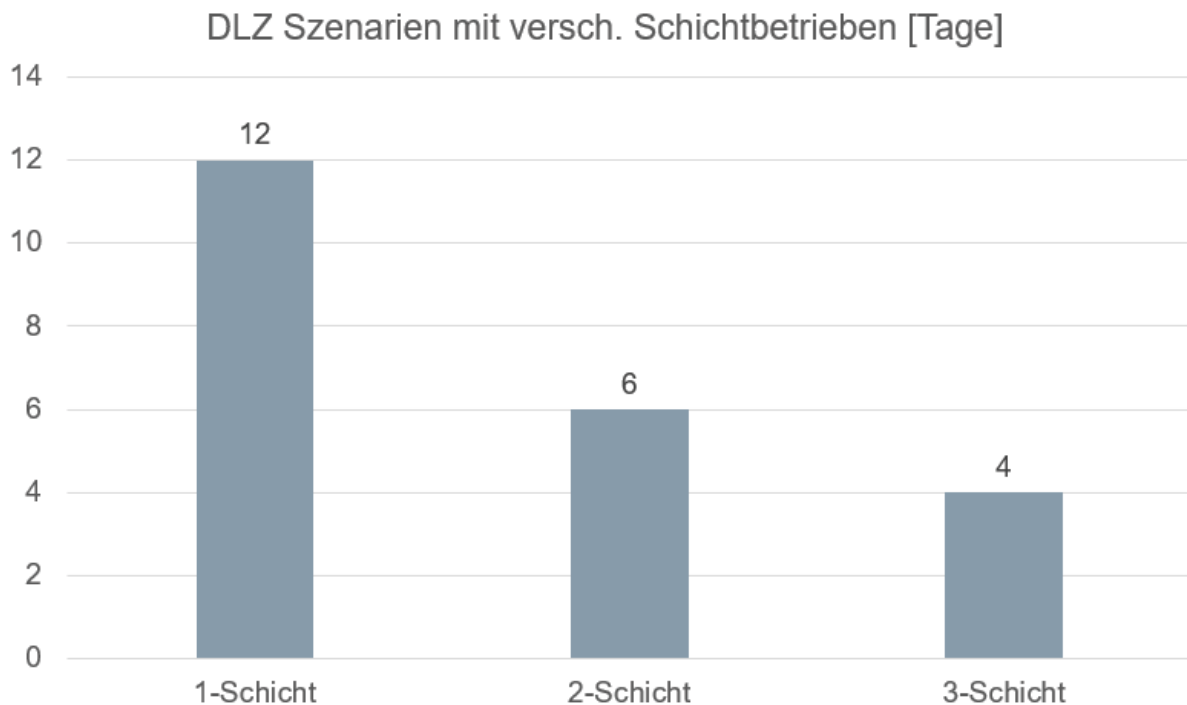


Abbildung 52: Durchlaufzeiten in Abhängigkeit des Schichtbetriebs (eigene Darstellung)

6.6 Überwachung im laufenden Betrieb

Mit Hilfe laufender Soll-Ist-Vergleiche in Sinne von Plan-Do-Check-Act-Zyklen (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 62) können Vorarbeiter_innen, welche in der Produktion für Arbeitsgruppen verantwortlich sind, die Einhaltung der Produktionsaufträge überwachen. Durch die erfolgte Einführung und Beibehaltung der Standardarbeit, welche *Kapitel 6.3* behandelt, wurde der Grundstein für eine schlanke Produktion gelegt. Infolgedessen wird den Werker_innen ermöglicht, Verschwendungen zu erkennen und Probleme zu lösen, weshalb kontinuierliche Verbesserungen entstehen (Duggan 2013, S. 144–145). Mit der Einführung einer laufenden Dokumentation kann nicht nur der stetige Ist-Zustand festgehalten werden, sondern im besten Fall auch die auftretenden Probleme, welche Soll-Ist-Abweichungen bzw. Verzögerungen bewirken. Wenn Probleme somit häufig vorkommen, ist dies mitdokumentiert und schnell feststellbar, wodurch der Handlungsbedarf für eine Problemidentifikation und -lösung gegeben ist. Weiters wird durch die rechtzeitige Erkennung von Abweichungen in den Soll-Ist-Vergleichen die Möglichkeit geschaffen, rechtzeitig Gegenmaßnahmen zu setzen, damit die Soll-Termine eingehalten werden (Lukesch und Kellner 2020, S. 223). Wird eine Arbeitsstation unabhängig der Ursache voraussichtlich nicht rechtzeitig mit ihren vorgeschriebenen Tätigkeiten fertig, können Kapazitätsanpassungsmaßnahmen erfolgen, damit die vorgegebenen Soll-Termine eingehalten werden und keine resultierende Blockierung des Materialflusses entsteht.

7 Validierung des Planungskonzepts

Dieses Kapitel befasst sich mit der Validierung des Planungskonzepts durch eine reale Teilumsetzung und eine Simulation. Es ist zu eruieren, ob die Zusammenlegung mithilfe des Planungskonzepts zielführend ist und die Taktzeit, welche eine Herstellung von einem Produkt alle x Tage vorsieht, eingehalten werden kann. Die Vorrichtung, die für die Zusammenlegung der Fertigungslinien auf der ersten Arbeitsstation benötigt wird, ist zum Zeitpunkt der praktischen Anwendung bei Siemens Mobility Austria GmbH noch nicht vorhanden, wodurch sich nur ein Teil des Planungskonzepts direkt in der Produktion validieren lässt. Der restliche Teil wird per Simulation begutachtet.

7.1 Vorgehensweise der Validierung

Im ersten Schritt der Validierung wird untersucht, ob die im Unternehmen umsetzbaren Teile des Planungskonzepts so wie geplant funktionieren. Dafür werden bis auf die jeweils erste Arbeitsstation der Fertigungslinien alle weiteren Arbeitsstationen im Rahmen einer Machbarkeitsprüfung für einen Zeitraum von einem Monat zusammengelegt. In *Abbildung 53* beschreiben die Zahlen 0,1,2 und 3 die Varianten. Die Zahlen der Varianten beginnen zum Zweck der Einheitlichkeit mit der Simulation bei 0, da die Python-Programmiersprache bei 0 zu zählen beginnt.

Tag	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Zusammenbau 1		0				1			1											
Zusammenbau 2			3				3				2									
CNC				0			3		1		3		1		2					
Ausfertigung						0		3		1		3		1		2				
QA + Kunde								0		3		1		3		1		2		

Abbildung 53: Teilimplementierung der Zusammenlegung (eigene Darstellung)

Abbildung 53 veranschaulicht die geplante Zusammenlegung. Bei den ersten Arbeitsstationen beider Fertigungslinien (Zusammenbau 1 und Zusammenbau 2) wird das Personal in einem normalen 1-Schichtbetrieb eingeteilt. Dies entspricht der

Personalplanung eines 2-Schichtbetriebs auf einer einzelnen Station. Dadurch bauen diese Stationen in einer Taktzeit von x Tagen ein Untergestell zusammen. Mit einer Versetzung von x Tagen zueinander werden somit alle x Tage Untergestelle für die nächste Station (CNC) bereitgestellt. Die Werkerdichte der restlichen Stationen wird so geplant, dass auch dort das Ziel des x -tägigen Taktes eingehalten wird. Weiters werden die in Kapitel 6.3 erstellten Soll-Arbeitspakete auf allen Stationen eingeführt. Die Überwachung der Arbeitspakete im laufenden Betrieb wird durch die Gruppenführenden bzw. Vorarbeiter_innen vorgenommen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass es aufgrund der nicht zusammengelegten Arbeitsstationen nicht möglich ist, die geplante Reihenfolge aus Kapitel 6.4 umzusetzen.

Im zweiten Schritt dieser Validierung wird der restliche Teil des Planungskonzepts, welcher nicht durch die Realität validiert werden kann, mithilfe einer ereignisorientierten Simulation begutachtet. Zu diesem Zweck erfolgt die Zusammenlegung der Fertigungslinien virtuell mit „SimPy“. „SimPy“ basiert auf Python und ist ein prozessbasiertes, ereignisorientiertes Opensource-Simulationsframework. In der ereignisorientierten Simulation werden alle Arbeitsstationen mitsamt den zugehörigen, schief verteilten Prozesszeiten, welche auf den Daten der Teilimplementierung und der Ist-Aufnahmen basieren, abgebildet. Die Produktionsreihenfolge der Varianten ist änderbar, hat jedoch einen Wiederholungscharakter aufgrund der Serienfertigung der Varianten. Weiters wird bei einem Variantenwechsel eine zusätzliche Rüstzeit von 5% hinzugerechnet, da die Daten zu den Rüstzeiten der in Planung befindlichen Vorrichtung für den Zusammenbau der Untergestelle noch nicht vorhanden sind. Damit die Simulation ein anschauliches Ergebnis liefert, beträgt der Simulationszeitraum 1000 Zeiteinheiten bzw. Schichten, was einer realen Produktionszeit von über einem Jahr entspricht. Somit handelt es sich bei den Parametern der Simulation um die Produktionsreihenfolge, die Höhe der Simulationsdurchläufe und die Prozesszeiten.

7.2 Auswertung und Resultate der Validierung

Das Resultat der Teilimplementierung zeigt, dass in 94,5% aller Fälle die Arbeitspläne und in weiterer Folge die Taktzeit eingehalten wurden. Die restlichen 5,5% lassen sich auf Maschinenfehler und Logistikfehler bzw. eine zu späte Bereitstellung des Vorprodukts zurückführen. Daraus kann abgeleitet werden, dass sowohl die Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands als auch die Soll-Personalplanung und die Soll-

Arbeitspläne umsetzbare Planungsergebnisse liefern. Trotz der im Ausmaß von 5,5% nicht eingehaltenen Arbeitspläne, ist es somit gelungen Untergestelle innerhalb einer x-tätigen Taktzeit zu produzieren.

Die ereignisorientierte Simulation zeigt Blockierungen und Ausbremsungen von Produkten auf den einzelnen Arbeitsstationen auf. Dabei wird die Anzahl, die durchschnittliche Höhe, die maximale Höhe und der Prozentsatz des Eintritts eines solchen Vorgangs ausgewertet.

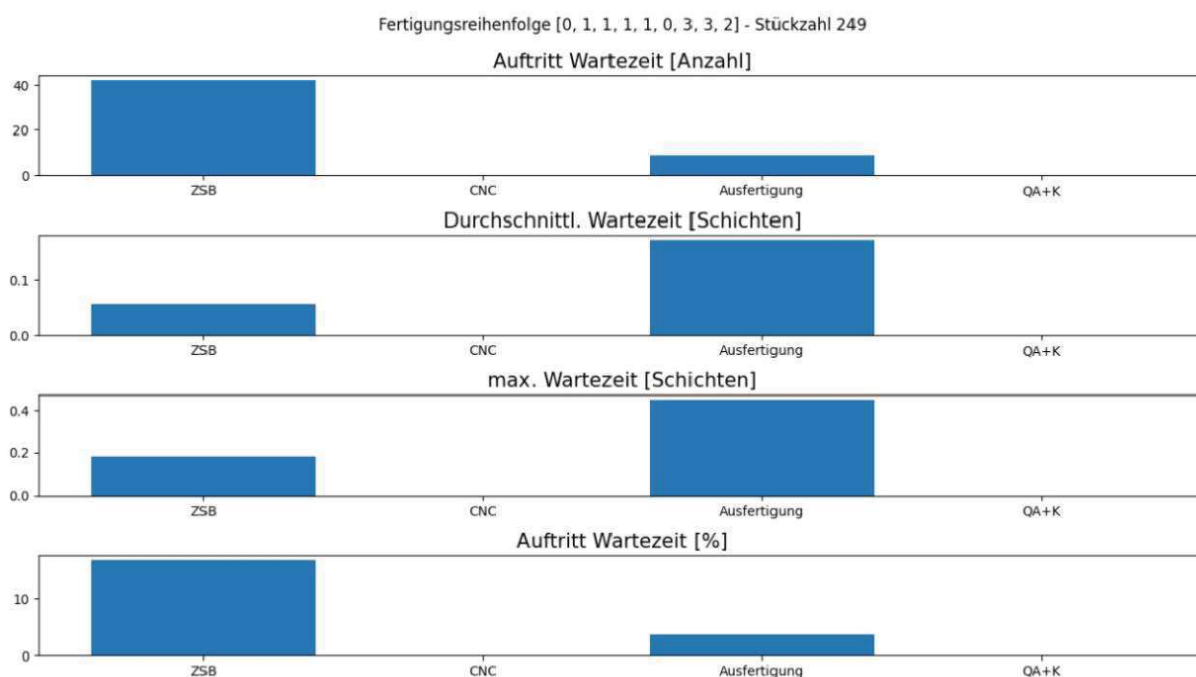


Abbildung 54: Simulationsergebnisse (eigene Darstellung)

Anhand von *Abbildung 54* lässt sich erkennen, dass aufgrund der auftretenden Varianz der Prozesszeiten Blockierungen auf der Fertigungslinie auftreten. Diese haben ihren Ursprung in der ersten Station der Fertigungslinie und wirken sich auch auf die dritte Station – die Ausfertigung – aus. Die zweite Station ist nicht davon betroffen, da die geringe Auslastung und die kurze Prozesszeit keine Blockierung zulassen. Durch die Blockierung der ersten und dritten Station treten zeitlich lokale Maxima im Arbeitsaufwand für die Werker_innen auf. Diese können jedoch überwunden werden, da aufgrund des Zeitpuffers der zweiten und x-ten Arbeitsstation im Takt von x Schichten Untergestelle erzeugt werden. Hinzu kommt, dass es sich bei der Verzögerungsdauer um maximal 4 Stunden bei der Ausfertigung und 1,6 Stunden beim Zusammenbau handelt. Mehraufwand in dieser Höhe kann durch die Werker_innen selbst oder im schlimmsten Fall durch die in *Kapitel 3.3* behandelten

Kapazitätsanpassungsmaßnahmen oder eine Anpassung der Werkerdichte überwunden werden. Den Werker_innen ist es möglich ungeplanten Mehraufwand dieser Höhe zu bewältigen, da eine geringe Unterlastung durch *Formel 19* und *20* für solche Zwecke eingeplant wurde. Dies hat sich in der Teilimplementierung bewiesen. Weiters veranschaulicht der Plot der Simulation, dass eine Blockierung im Zusammenbau bei ca. 18% und in der Ausfertigung bei weniger als 5% der Fälle auftritt. Von den Simulationen aller möglichen Reihenfolgenkombinationen lässt sich ableiten, dass sich in jedem Fall eine Stückzahl von x in einem Zeitraum von 1000 Schichten produzieren lässt. Dies ist das Ergebnis der einheitlichen Prozessdauer aufgrund der variantenabhängigen Personaleinteilung. Die gewählte Reihenfolge in *Kapitel 6.4* und *Abbildung 54* stellt die bestmögliche Produktionsreihenfolge dar, da diese die geringste Anzahl an Variantenwechsel mitsamt einer erhöhten Rüstzeit mit sich bringt. Hinzu kommt, dass diese Reihenfolge die geringste Fluktuation beim Personaleinsatz hat, da Variante 2 und 3 eine geringere Anzahl an Werker_innen benötigt. Andere Produktionsreihenfolgen haben aufgrund der zusätzlichen Rüstzeit höhere Wartezeiten und eine höhere Eintrittszahl der Wartezeiten. Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass eine zielgemäße Produktion mit einer Taktzeit von x Tagen trotz Wartezeiten erfolgreich ablaufen kann. Es sei erwähnt, dass Schlüter und Ostermeier (2022, S. 134) erörtert haben, dass variantenreiche Fertigungslinien fast nie perfekt ausgetaktet sind. Nichtsdestotrotz entspricht das Ergebnis dem Optimum, welches mit den gegebenen Ressourcen unter Einhaltung der Rahmenbedingungen möglich ist.

8 Resümee und Ausblick

Dieses Kapitel befasst sich mit den gesamtheitlichen Ergebnissen dieser Arbeit. In *Kapitel 8.1* werden die Ergebnisse diskutiert. *Kapitel 8.2* befasst sich mit den Beantwortungen der Forschungsfragen. Anschließend werden in *Kapitel 8.3* die Limitationen erörtert und die Methode kritisch bewertet. Somit werden schlussendlich die Ergebnisse nach dem sechsten Schritt der DSRM kommuniziert und eine Handlungsempfehlung abgegeben.

8.1 Diskussion der Ergebnisse

Damit komplexe Vorgänge in Unternehmen beleuchtet, verstanden und kommuniziert werden, ist eine detaillierte Prozessaufnahme erforderlich. Auch diese wissenschaftliche Arbeit konnte dessen Gebrauch demonstrieren, da die Aufnahme eines genauen Status Quo die Grundlage für Design und Entwicklung der Design Science Research Methodology darstellt. Außerdem konnten durch die Prozessaufnahmen in Form von BPMN- und Wertstromdarstellungen bereits Herausforderungen und Potentiale erkannt und durch sachgemäße Maßnahmen adressiert werden.

Die Soll-Planung basiert auf mehreren Methoden, welche im Zuge der State-of-the-Art Recherche (*Kapitel 3*) und der Konzeptionierung (*Kapitel 4*) erörtert wurden. Zusammen ergeben die Methoden eine Kombination aus Probierversahren und heuristischen Verfahren, mit welchem die Planung zur Zusammenlegung zweier variantenreicher Fertigungslinien im Schienenfahrzeugbau erfolgen kann. Im Schienenfahrzeugbau wird für die Anwendung einer Mixed Model Line kein aufwändiges computergestütztes Optimierungsverfahren benötigt, da aufgrund der branchenspezifischen Gegebenheiten wie Bauteilgröße und der hohen Durchlaufzeiten nur ein geringer Betrag an Varianten auf einer Fertigungslinie produziert werden kann. Das im Zuge dieser wissenschaftlichen Arbeit entstandene Planungskonzept zur Zusammenlegung zweier variantenreicher Fertigungslinien hat wie die Methode von Pröpster (2015) den Vorteil einer hohen Praxisanwendbarkeit aufgrund der manuellen Austaktung, während zeitgleich die Berücksichtigung vieler Restriktionen gewährleistet ist.

Im Zuge der Demonstration und Validierung wurde eine Teilimplementierung im praxisrelevanten Kooperationsunternehmen durchgeführt. Das Resultat zeigt, dass das ausgearbeitete Planungskonzept unter den vorherrschenden Rahmenbedingungen umsetzbar ist und zu der gewünschten Taktzeit von x Tagen führt. Um den aufgrund der im Kooperationsunternehmen vorherrschenden Restriktionen nicht umsetzbaren Teil der wissenschaftlichen Arbeit zu begutachten, wurde eine ereignisorientierte Simulation erstellt. Unter Zuhilfenahme einer diskreten ereignisorientierten Simulation wurde die zusammengelegte Fertigungslinie virtuell nachgestellt werden. Das Ergebnis zeigt, dass das entwickelte Planungskonzept zu einem zielgerechten Resultat führt, da ein Produkt im Takt von x Tagen trotz Wartezeiten an den einzelnen Stationen erzeugt wird. Die Wartezeiten sind ein geeigneter Key Performance Indicator, da sie die Einhaltung der geplanten Produktivität widerspiegelt. An der ersten Station treten durchschnittliche Wartezeiten von 24 Minuten in ca. 18% der Fälle auf. Die in 5% der Fälle auftretenden Wartezeit auf Station 3 betragen im Durchschnitt ca. 1,5 Stunden. Im schlimmsten Fall tritt für dasselbe Produkt eine Blockierung von 1,5 Stunden im Zusammenbau und eine Blockierung von 4 Stunden in der Ausfertigung auf. Dies kann durch die eingeplante Unterlastung oder eine kurzfristige Kapazitätsanpassungsmaßnahme wie Wochenendarbeit oder der Verlängerung einzelner Arbeitsschichten kompensiert werden.

8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Forschungsfrage 1: Wie können Engpässe in der Produktion identifiziert werden?

Aktuelle Engpässe werden durch die Analyse der Prozess- und Zeitaufnahme des Ist-Zustands (siehe *Kapitel 5*) und durch $DLZ_{vi} > t_{st}$ erörtert. Engpässe des Soll-Zustands werden bei geringer Komplexität durch zeitliche Überschneidungen von Produkten auf einzelnen Stationen mithilfe der Durchlaufterminierung ausgeforscht. Durch den Einsatz einer ereignisorientierten Simulation ist es, wie in *Kapitel 7*, möglich potenzielle Engpässe in Produktionslinien mit erhöhter Komplexität zu identifizieren, da reale Systeme virtuell nachgebildet werden und Materialstau der jeweiligen Stationen angezeigt wird. Für den Anwendungsfall im Kooperationsunternehmen hat die ereignisorientierte Simulation einen potenziellen Engpass auf Station 1, dem Zusammenbau der Untergestelle, und Station 3, der Ausfertigung, festgestellt.

Forschungsfrage 2: Wie werden einzelne Aktivitäten, Tätigkeiten und Ressourcen so verteilt, dass unabhängig von den verschiedenen Varianten und Taktzeiten eine einheitliche Taktzeit über die gesamte Fertigungslinie, unter der Berücksichtigung von Vorbereitung und Logistik der Materialien, gegeben ist?

Eine variantenbasierte Ressourcenzuteilung setzt zulängliche Information über den Kapazitätsbedarf je Variante und Station voraus. Diese sind im Zuge der Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands ermittelt worden. Aktivitäten und Tätigkeiten können in der Schienenfahrzeugindustrie in vielen Fällen aufgrund von Spannvorrichtungen nicht umverteilt werden, weshalb das Verteilen von Tätigkeiten auf andere Stationen oftmals nicht möglich ist. Eine annähernd einheitliche Taktzeit wird sowohl durch die Anpassbarkeit der Werkerdichte pro Arbeitsstation und Variante als auch durch eine geeignete Kapazitätsanpassungsmaßnahme bewerkstelligt. Ist die benötigte Werkerdichte durch die Anzahl der maximalen oder minimalen Werker_innen beschränkt, so kann durch eine Kapazitätsanpassungsmaßnahme (siehe *Kapitel 3.3*) entgegengewirkt werden, um die Taktzeit zu nivellieren. Bezugnehmend auf das Praxisbeispiel dieser Diplomarbeit wurden für Variante 0 und 1 der Untergestelle bei den kritischen Arbeitsstationen (Zusammenbau und Ausfertigung) x Schlosser und x Schweißer in einem 2-Schichtbetrieb eingeteilt. Für Variante 2 und 3 reichten x Schlosser und x Schweißer in einem 2-Schichtbetrieb aus. Bei den Dächern wurden für Variante 0 und 1 ein Schlosser und ein Schweißer für einen 1-Schichtbetrieb eingeteilt, da dieser ausreicht, um in der Taktzeit zu produzieren. Für die Dächer der Variante 2 und 3 sind x Schlosser und x Schweißer einem 2-Schichtbetrieb zugewiesen worden. Die Vorbereitung und Logistik der Materialien flossen im Rahmen der Ist-Aufnahme und Analyse mit ein und wurden nicht explizit hervorgehoben.

Forschungsfrage 3: Wie können unterschiedliche Taktzeitszenarien ermittelt werden?

Zur Ermittlung unterschiedlicher Taktzeitszenarien ist es nötig, zuerst aus der Auslastungsanalyse des Ist-Zustands durch die Zuteilung von Prozessen zu den einzelnen Ressourcen und Arbeitsplätzen (*Abbildung 45*) Verbesserungsmaßnahmen und in weiterer Folge Soll-Arbeitspläne zu generieren. Für die Soll-Arbeitspläne muss eine Festlegung der initialen Werkerdichte erfolgen, damit die Arbeitspläne unabhängig von dem variierenden Schichtbetrieb eingesetzt werden können (*Abbildung 48*). Die Abänderung des Schichtbetriebs führt zu unterschiedlichen

Taktzeiten, wodurch eine dynamische Änderung im Kundenbedarf bewältigt wird. Die unterschiedlichen Taktzeitszenarien werden durch $w_i = w_{i_0} * x_i$ errechnet. *Abbildung 50-52* zeigen die unterschiedlichen Auswirkungen der Taktzeitszenarien.

Forschungsfrage 4: Was sind daraus resultierende Potentiale und technische als auch organisatorische Maßnahmen?

Bezüglich Forschungsfrage 4 muss vorerst erwähnt werden, dass Potentiale und Maßnahmen aufgrund der unterschiedlichen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen in jedem Unternehmen anders ausfallen. Aus der Auslastungsanalyse (*Abbildung 45*) lässt sich Verschwendung leicht erkennen, wodurch diese adressiert und eliminiert werden können. Weiters wurde in dem betrachteten Unternehmen anhand der Ist-Aufnahme, Ist-Analyse und ereignisorientierten Simulation ersichtlich, dass Materialstau aufgrund der Qualitätsabnahme entstehen wird, wenn die durchschnittliche Ausbringungsmenge durch einen 2-Schichtbetrieb erhöht wird. Als Maßnahme ist die Einführung eines Schichtbetriebs der Qualitätsabnahme nötig. Weiters wurde im Laufe der Workshops und der laufenden Überwachung festgestellt, dass die rechtzeitige Materialversorgung durch die Logistik essenziell ist. Deshalb wird angedacht, die Engpassressource der Logistik zu entkoppeln. Die Entkopplung findet durch einen Materialträger in Form eines Anhängers statt, welcher die Bodenplatten beinhaltet und sich von einem leicht verfügbaren Stapler transportieren lässt. Dies gewährleistet eine bessere Verfügbarkeit und höhere Flexibilität. Die wichtigste Maßnahme ist die Einführung von Job Rotation der Werker_innen, sodass die Vorgehensweisen und Spezifikationen der anderen Fertigungslinien und Varianten bestmöglich erlernt werden, bevor die Zusammenlegung stattfindet. Da Gruppenarbeit vorherrscht, ist es von Vorteil, in der ersten Rotation die erfahrensten Mitarbeiter_innen an ihrer ursprünglichen Arbeitsstation zu lassen. Wichtiges Fachwissen wird dadurch effektiver unter den Arbeiter_innen weitergegeben und besser verteilt.

Forschungsfrage 5: Wie sieht ein Schritt für Schritt Vorgang für die Zusammenlegung von variantenreichen Fertigungslinien in der Schienenfahrzeugindustrie aus?

Zuerst wird das übergeordnete Ziel der Zusammenlegung festgelegt. Anschließend werden top-down Prozessaufnahmen aller relevanten Segmente, Linien und Arbeitsstationen erstellt. Dadurch erhalten die Planenden einen Überblick aller

Hierarchieebenen und sind möglicherweise bereits in der Lage erste Probleme und Engpässe zu erkennen. Durch REFA-Zeitstudien erfolgen Zeitaufnahmen der Prozesse, welche den Kapazitätsbedarf quantifizieren. Die Kombination der Prozess- und Zeitaufnahmen ermöglichen eine Auslastungsanalyse von Ressourcen und Arbeitsplätzen (siehe *Abbildung 45*), wodurch Verschwendung entdeckt wird. Nachdem die Aufnahme und Analyse des Ist-Zustands erfolgt ist, werden Verbesserungsmaßnahmen generiert. Diese werden aus bereits bekannten Erkenntnissen oder durch Workshops mit den Fachexpert_innen erarbeitet und abgeleitet. Im nächsten Schritt erfolgt die Planung des Soll-Zustands, wofür Layout, Personal, Arbeitspläne, Produktionsreihenfolge und Taktzeitszenarien geplant werden. Das detaillierte Vorgehen ist in *Kapitel 6* vorzufinden. Die Soll-Planung wird so oft iteriert, bis ein zufriedenstellender Soll-Plan entsteht. Abschließend wird die Zusammenlegung umgesetzt, während zeitgleich der laufende Betrieb überwacht wird, um durch Plan-Do-Check-Act Zyklen den Ist-Zustand zu begutachten und gegebenenfalls zu optimieren.

8.3 Kritische Bewertung und Einschränkungen

Die Implementierung innerhalb des Unternehmens fand in einem entkoppelten Teilbereich der gesamten Fertigungslinie statt, welche eine in sich geschlossene Fertigungslinie darstellt. Das skalierbare Planungskonzept ermöglicht eine Erweiterung der Zusammenlegung auf den restlichen Abschnitten der Fertigungslinie, wobei je Abschnitt weitere Rahmenbedingungen und Restriktionen einfließen, welche zu berücksichtigen und einzuplanen sind.

Prinzipiell lässt sich das menschliche Verhalten bzw. die Inhomogenität von Arbeiter_innen schwer durch eine Simulation oder mathematische Formulierungen abbilden, da der Mensch ein Individuum darstellt, welches selbstständig agieren kann, wodurch Simulationen lediglich so gut sind, wie die Güte der Datenbasis. Daraus lässt sich der direkte Zusammenhang zwischen der Qualität der Datenbasis und der Genauigkeit des Simulationsergebnisses ableiten. Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit hoher Wert auf die Ist-Aufnahme der Daten gelegt. In diesem Planungskonzept wurde der Springereinsatz nicht berücksichtigt, da in erster Linie die Zusammenlegung der Fertigungslinien im Vordergrund stand. An dieser Stelle sei auch erwähnt, dass die Planung und Konstruktion der Vorrichtung, welche für die Zusammenlegung der Fertigungslinien benötigt wird, in dieser Arbeit nicht behandelt wurde.

Die Validierung durch die Teilimplementierung und Simulation betrachtet das Gesamtergebnis des Planungskonzepts, daher wurden die einzelnen Methoden im Rahmen der Validierung nicht explizit betrachtet.

8.4 Kommunikation der Ergebnisse

Der wissenschaftliche Mehrwert dieser Arbeit liegt in der Beschreibung und Diskussion dieses speziellen Anwendungsfalls von variantenreichen Fertigungslinien, welcher in der Literatur noch nicht behandelt wurde. Die Wirksamkeit bekannter Methoden und Vorgehensweisen wurden in diesem Zusammenhang bislang nicht erörtert. Aufgrund dessen bietet das Planungskonzept, welches anhand eines praxisrelevanten Unternehmens demonstriert wurde, einen Mehrwert für die Praxis und Wissenschaft, da es auch ein allgemeines Vorgehen zur Zusammenlegung variantenreicher Fertigungslinien beschreibt. Die Demonstration und Validierung zeigen, dass das Planungskonzept zum anvisierten Ziel führt. Im Allgemeinen ist im ersten Schritt eines solchen Vorhabens das Ziel der Zusammenlegung zu definieren. Dabei kann es sich um Minimierung von Kosten, Fläche, Durchlaufzeit oder ähnlichem handeln. Die Ist-Aufnahme der Prozesse und Daten ist top-down durchzuführen. Je nach Rahmenbedingungen ist eine Betrachtung unterschiedlicher Hierarchieebenen der Produktionselemente (siehe Kapitel 2.1.2) sinnvoll. Nachdem die Prozesse, Zeiten und Daten aufgenommen und analysiert wurden, erfolgen Verbesserungsmaßnahmen, welche im Zuge der Ist-Aufnahme, Ist-Analyse und gemeinsamer Workshops mit Fachexpert_innen entstehen. In der anschließenden Soll-Planung werden Layout, Personalplanung, Arbeitspläne, Reihenfolgenplanung und Taktzeitszenarien geplant.

Aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung mit dem Kooperationsunternehmen werden Details der Ergebnisse nicht an Dritte weitergegeben und diese Arbeit wird für einen Zeitraum von zwei Jahren gesperrt. Die ausführliche Kommunikation der Ergebnisse erfolgt im Zuge einer Abschlusspräsentation im Kooperationsunternehmen.

8.5 Handlungsempfehlung

Im Zuge der Ausarbeitung dieser wissenschaftlichen Arbeit ließen sich neben den Erkenntnissen auch offene Fragestellungen ableiten, welche unter anderem als Handlungsempfehlungen betrachtet werden können:

- Wie kann der Springereinsatz bei variantenreichen Fertigungslinien im Schienenfahrzeugbau berücksichtigt werden?
- Wie wird ein digitaler Zwilling unter Einbeziehung aller produktions- und logistikrelevanten Rahmenbedingungen erstellt?
- Kann eine Simulation variantenreicher Fertigungslinien im Schienenfahrzeugbau alle technischen und betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen und Restriktionen berücksichtigen und zu einem besseren Ergebnis führen?
- Können Vorrichtungen für den Schienenfahrzeugbau so konstruiert werden, dass sie universell und variantenunabhängig einsetzbar sind?

Prinzipiell ist die Durchführung von Wertstromanalysen weiterzuempfehlen, da durch den resultierenden gesamtheitlichen Überblick innerhalb eines Unternehmens und dessen Wertströme schnell Probleme ans Licht kommen.

Wie Zennaro et al. (2019, S. 5374) in ihrer Literaturrecherche bereits feststellen, weist die Wissenschaft hinsichtlich des Themas Industrie 4.0 insbesondere Lücken auf, wenn es um die Produktionsplanung und -steuerung geht. Hinzu kommt, dass Industrie 4.0-Tools wie intelligente Geräte, Produktidentifikationstechnologien, Erkennung von Aktivitätsparametern oder Cloud-Computing-Informationen, welche Informationen besser verwalten, und Produktionsschritte steuern, bislang noch keine Anwendung bei der Herstellung von hochgradig individualisierten und komplexen Großprodukten finden jedoch immer wichtiger werden (Zennaro et al. 2019, S. 5374). Infolgedessen wird an dieser Stelle eine Handlungsempfehlung zur Implementierung von Industrie 4.0-Tools und cyber-physischen Produktionssystemen gegeben, da diese Transparenz über den Zustand und Bedarf der Objekte schaffen können, wodurch eine optimierte Produktionssteuerung ermöglicht wäre (Kern 2021, S. 158).

Schlussendlich kann für Unternehmen der Schienenfahrzeugindustrie generell empfohlen werden, mehr variantenreiche Fertigungslinien einzuführen, da durch keine andere Methode eine Flächensparnis von bis zu 50% in so einem kurzen Zeitraum möglich ist, ohne auf die variantenreiche Produktausbringung zu verzichten. Um diese Wettbewerbsvorteile zu generieren und einen Erfolg sicherzustellen, müssen innerhalb eines Unternehmens Mitarbeiter_innen aus mehreren Abteilungen in das Vorhaben miteinbezogen werden.

9 Anhang

9.1 Symbolik der Business Process Model and Notation (BPMN 2.0)

http://bpmb.de/poster

BPMN 2.0 - Business Process Model and Notation

Aktivitäten

- Aufgabe:** Eine Aufgabe ist eine Arbeitseinheit. Ein zusätzliches Symbol markiert eine Teilaufgabe.
- Transaktion:** Eine Transaktion ist eine Gruppe von Aktivitäten, die logisch zusammen gehören. Ein Transaktionsprotokoll kann angegeben werden.
- Ereignis-Teilprozess:** Ein Ereignis-Teilprozess wird in einem anderen Prozess definiert und kann abhängig vom Status einer Aktivität gestartet werden. Ein Ereignis-Teilprozess kann abhängig vom Status einer Aktivität gestartet werden.
- Aufruf-Aktivität:** Eine Aufruf-Aktivität repräsentiert einen Teilprozess, der auf einer Transaktionsbasis durch einen anderen Teilprozess gestartet wird. Ein Ereignis-Teilprozess kann abhängig vom Status einer Aktivität gestartet werden.

Aufgaben-Typen

Sie beschreiben das Ausführungsverhalten von Aktivitäten:

- Teilprozess:** Senden
- Subprozess:** Empfangen
- Parallel:** Benutzer
- Mehrfachlauf:** Manuell
- Sequenz:** Geschäftsregel
- Ad-hoc:** Service
- Komponente:** Skript

Markierungen

Sie beschreiben den Charakter einer Aufgabe:

- Standard:** Standard
- Handgezeichnet:** Handgezeichnet
- Automatisch:** Automatisch
- Belegungsgruppe:** Belegungsgruppe
- Ergebnis:** Ergebnis
- Input/Output:** Input/Output
- Unterbrechung:** Unterbrechung
- Ergebnis-Teilprozess:** Ergebnis-Teilprozess
- Unterbrechung:** Unterbrechung
- Ergebnis-Teilprozess:** Ergebnis-Teilprozess
- Standard:** Standard
- Ergebnis-Teilprozess:** Ergebnis-Teilprozess
- Unterbrechung:** Unterbrechung

Choreographien

Beispiel 1: Ein Choreographie-Teilprozess enthält eine globale Konversation oder Interaktion zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Choreographie-Teilprozess enthält eine globale Konversation oder Interaktion zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Beispiel 2: Eine Aufruf-Choreographie repräsentiert einen Teilprozess, der auf einer Transaktionsbasis durch einen anderen Teilprozess gestartet wird.

Beispiel 3: Ein Choreographie-Teilprozess enthält eine globale Konversation oder Interaktion zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Kollaborationsdiagramm

Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Choreographie-Diagramm

Ein Choreographie-Diagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Choreographie-Diagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Kollaborationsdiagramm

Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Konversationen

Ein Konversationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Konversationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Kollaborationsdiagramm

Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen. Ein Kollaborationsdiagramm zeigt die Interaktionen zwischen mehreren Beteiligungsrollen.

Ereignisse

Start	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung
Standard	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung
Standard	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung	Ergebnis-Teilprozess	Unterbrechung

Blanko: Ungeordnetes Ereignis, Zeitpunkte oder Zeitintervalle
 Nachlicher ending und/oder Ende eines Prozesses.
 Timer: Periodische zeitliche Ereignisse, Zeitpunkte oder Zeitintervalle
 Ereignis: Wichtung an den Verantwortlichen.
 Bedingung: Reaktion auf veränderte Bedingungen und verbindliche Bedingungen und Link-Zwei zusammengehörige Link-Ereignisse repräsentieren einen sequenziellen Fehler: Auslösen und Beenden von definierten abhängigen Transaktionen abgeordnete Transaktionen Komplement: Verhalten, Kompensation: Verhalten, Kompensation
 Link: Signal über mehrere mehrfach reagiert werden, mehrere Ereignissen.
 Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse.
 Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse.
 Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse. Auslöser für Ereignisse.

Daten

Ein Datenobjekt repräsentiert Informationen, die durch den Prozess fließen, wie z.B. Dokumente, Emails, Briefe oder Datenätze.
 Ein Datenpool repräsentiert eine Gruppe von Informationen, wie z.B. eine Liste mit Datenpunkten.
 Ein Dateninput ist ein externer Input für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird. Ein Datenoutput ist ein externer Output für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird.
 Ein Dateninput ist ein externer Input für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird. Ein Datenoutput ist ein externer Output für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird.
 Ein Dateninput ist ein externer Input für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird. Ein Datenoutput ist ein externer Output für den gesamten Prozess, der von einer Aktivität geleistet wird.

Swimlanes

Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren.

Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren. Die Aufgabe der Swimlanes ist es, die Verantwortlichkeiten in einem Prozess zu definieren.

Abbildung 55: Datenblatt zu BPMN 2.0 (Lübbe, 2022)

9.2 Symbolik der Wertstromdarstellung

Prozesse

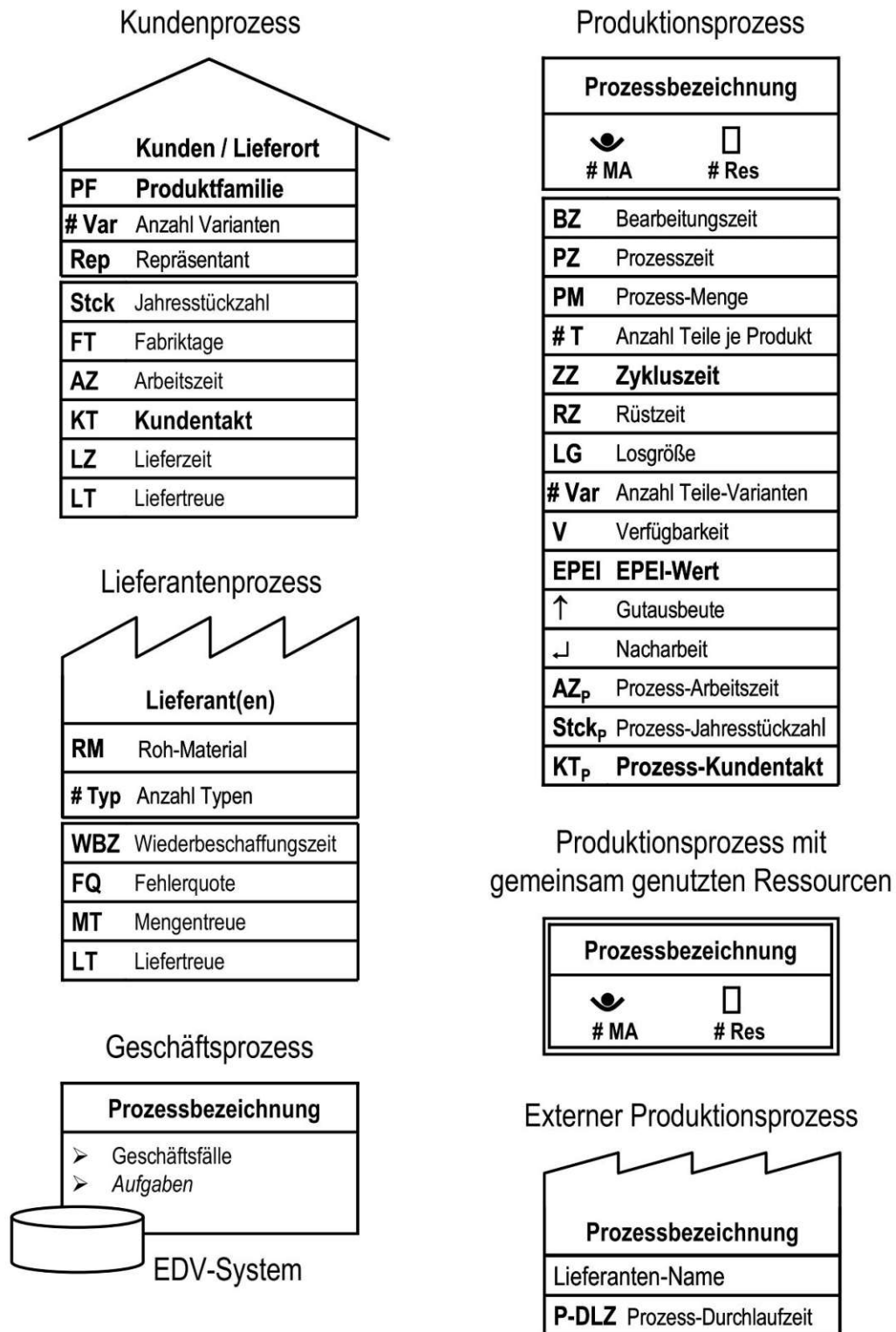


Abbildung 56: Wertstrom Symbole (Erlach 2010, S. 381)

Materialfluss

Informationsfluss

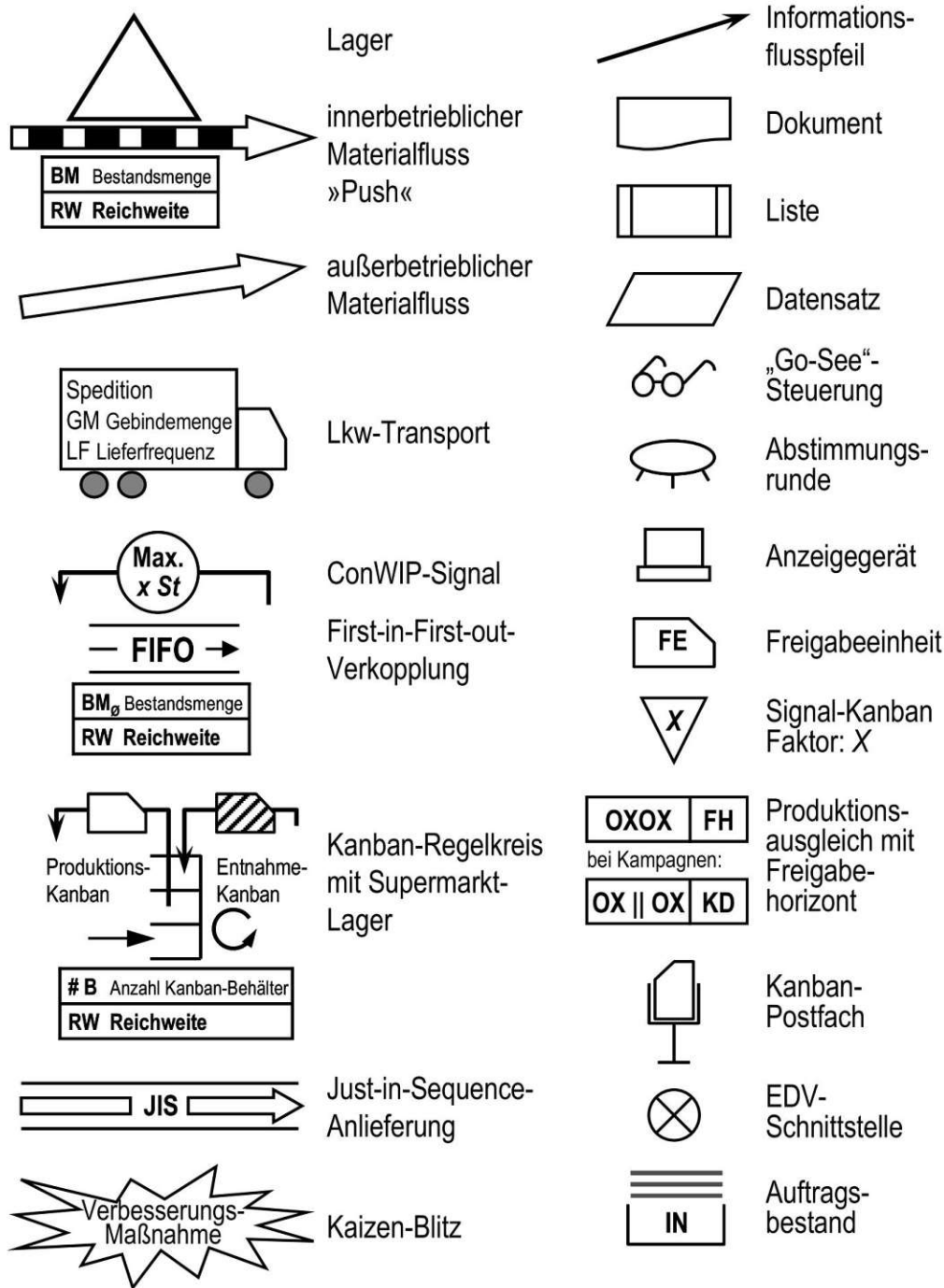


Abbildung 57: Wertstrom Symbole Teil 2 (Erlach 2010, S. 382)

9.3 Wertstromanalysen der Fertigungslinien

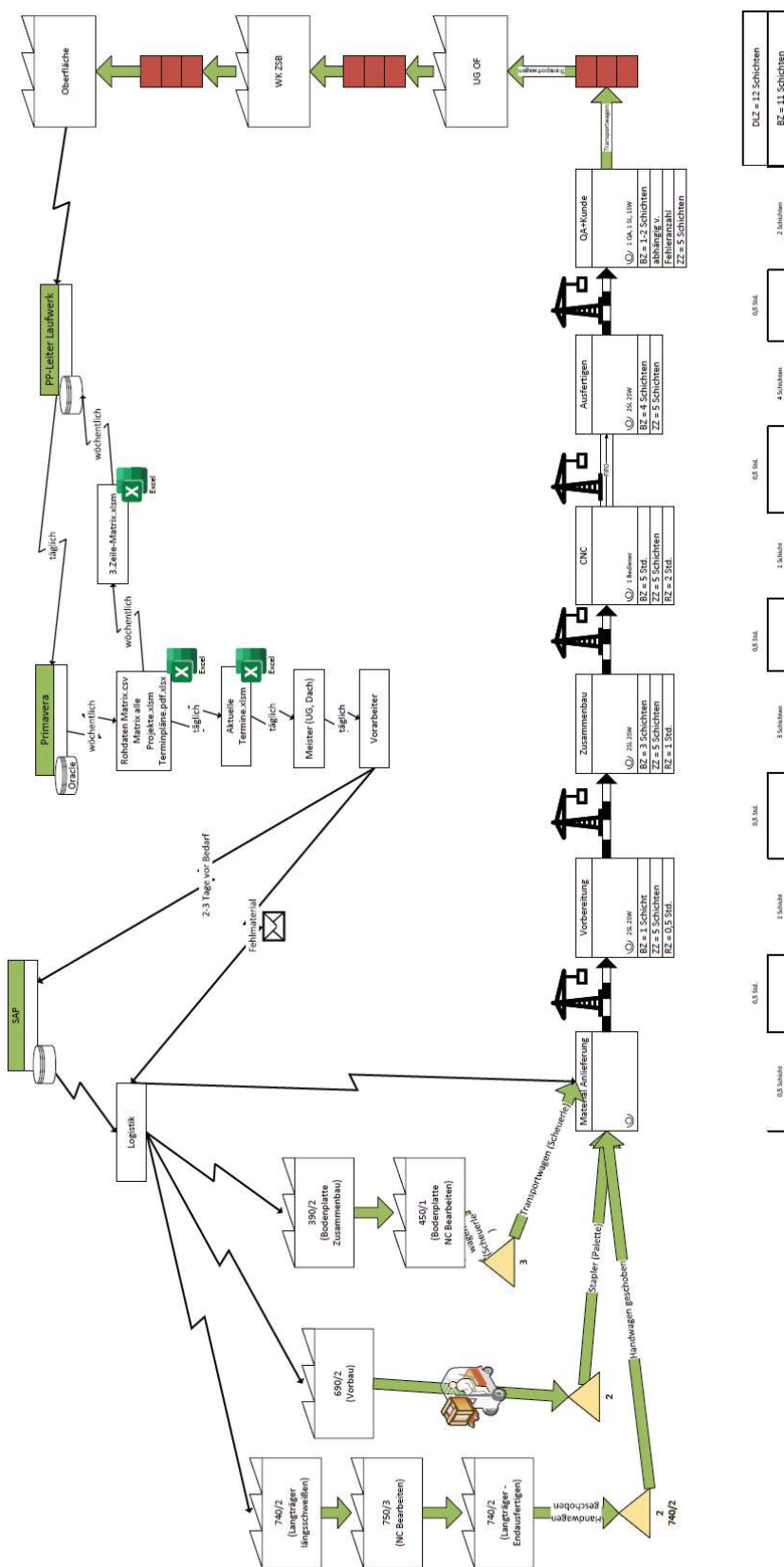


Abbildung 58: Wertstromanalyse Fertigungslinie 1, Untergestell (eigene Darstellung)

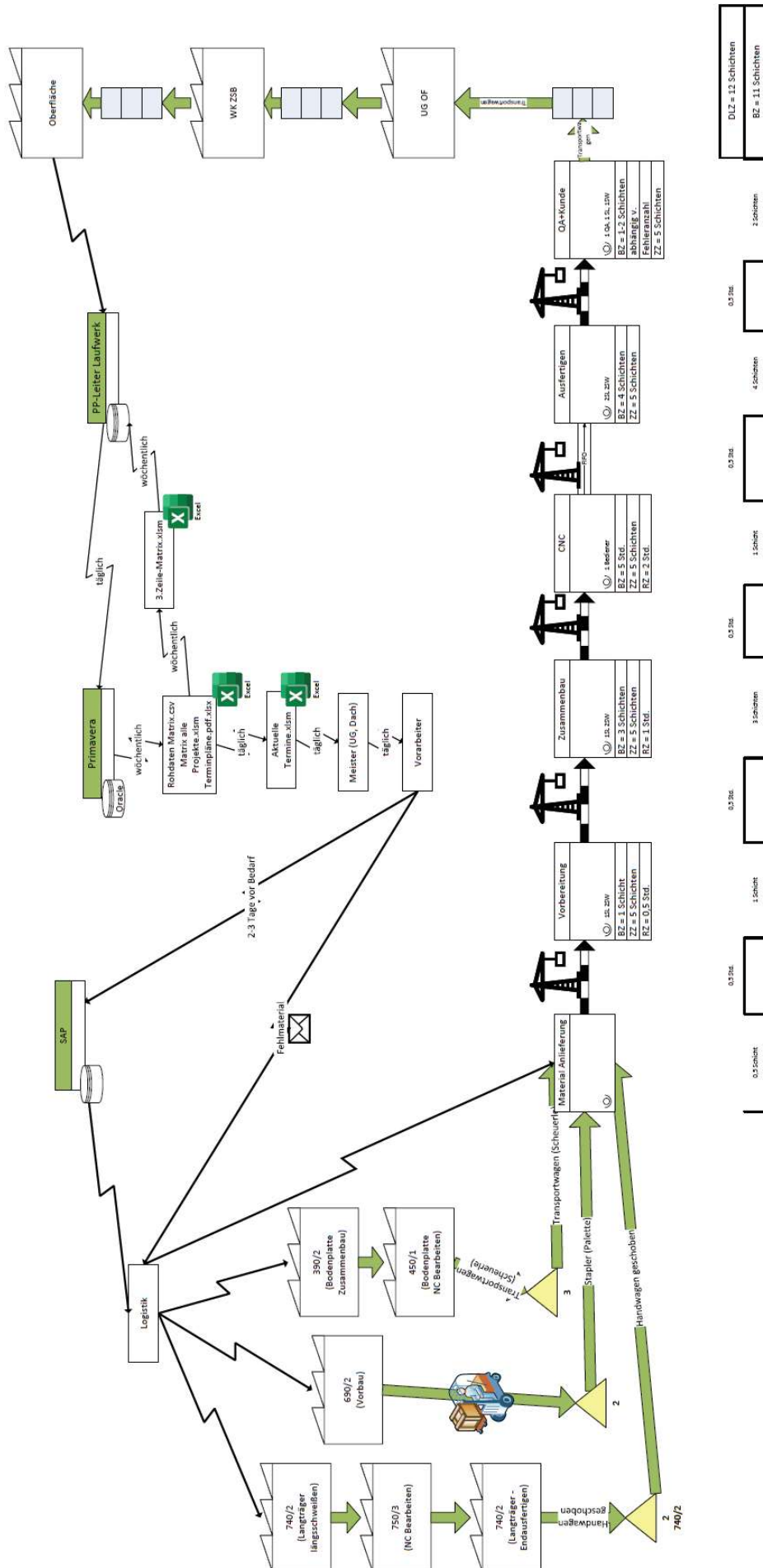


Abbildung 59: Wertstromanalyse Fertigungslinie 2, Untergestell (eigene Darstellung)

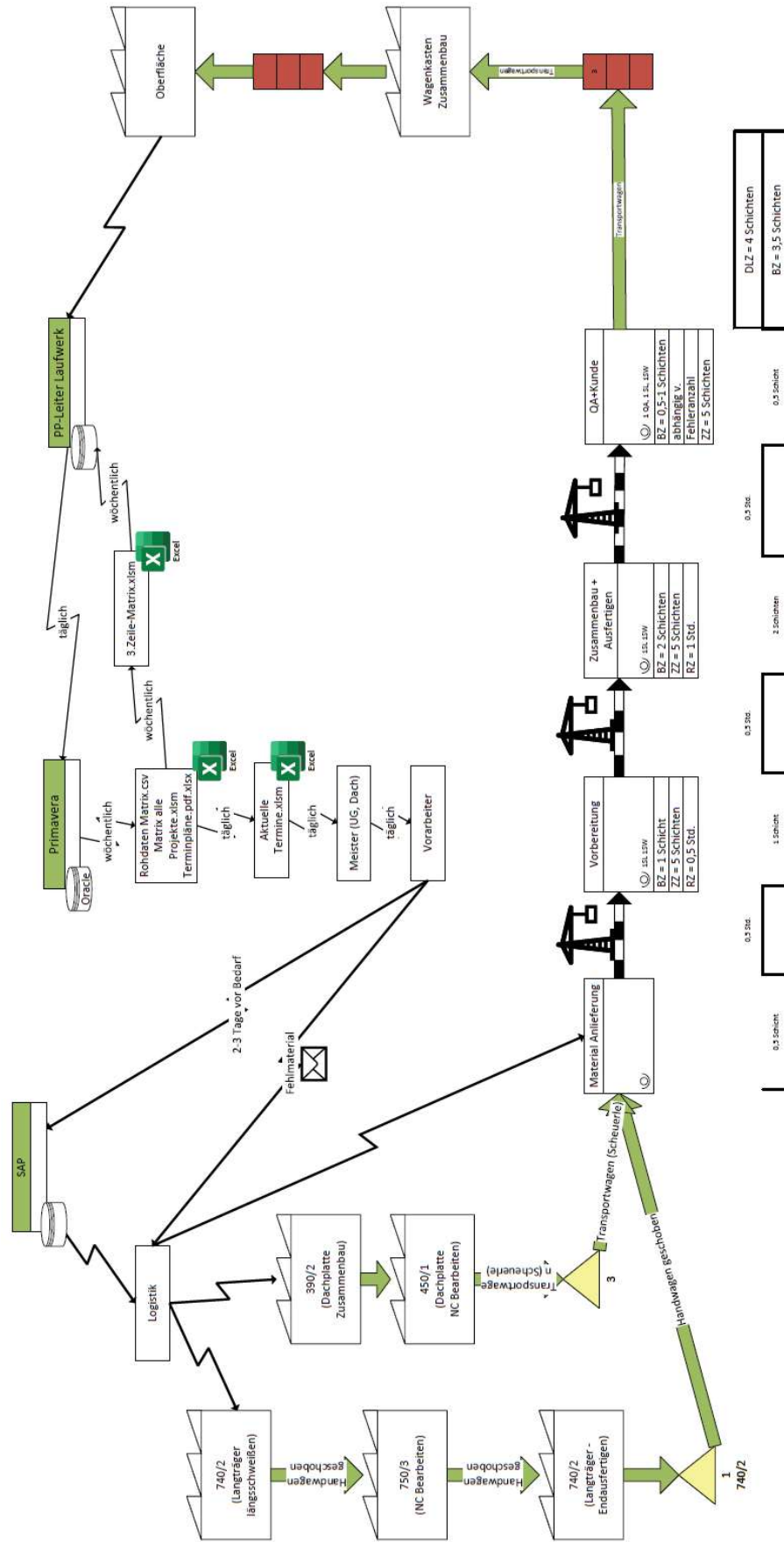


Abbildung 60: Wertstromanalyse Fertigungslinie 3, Dach (eigene Darstellung)

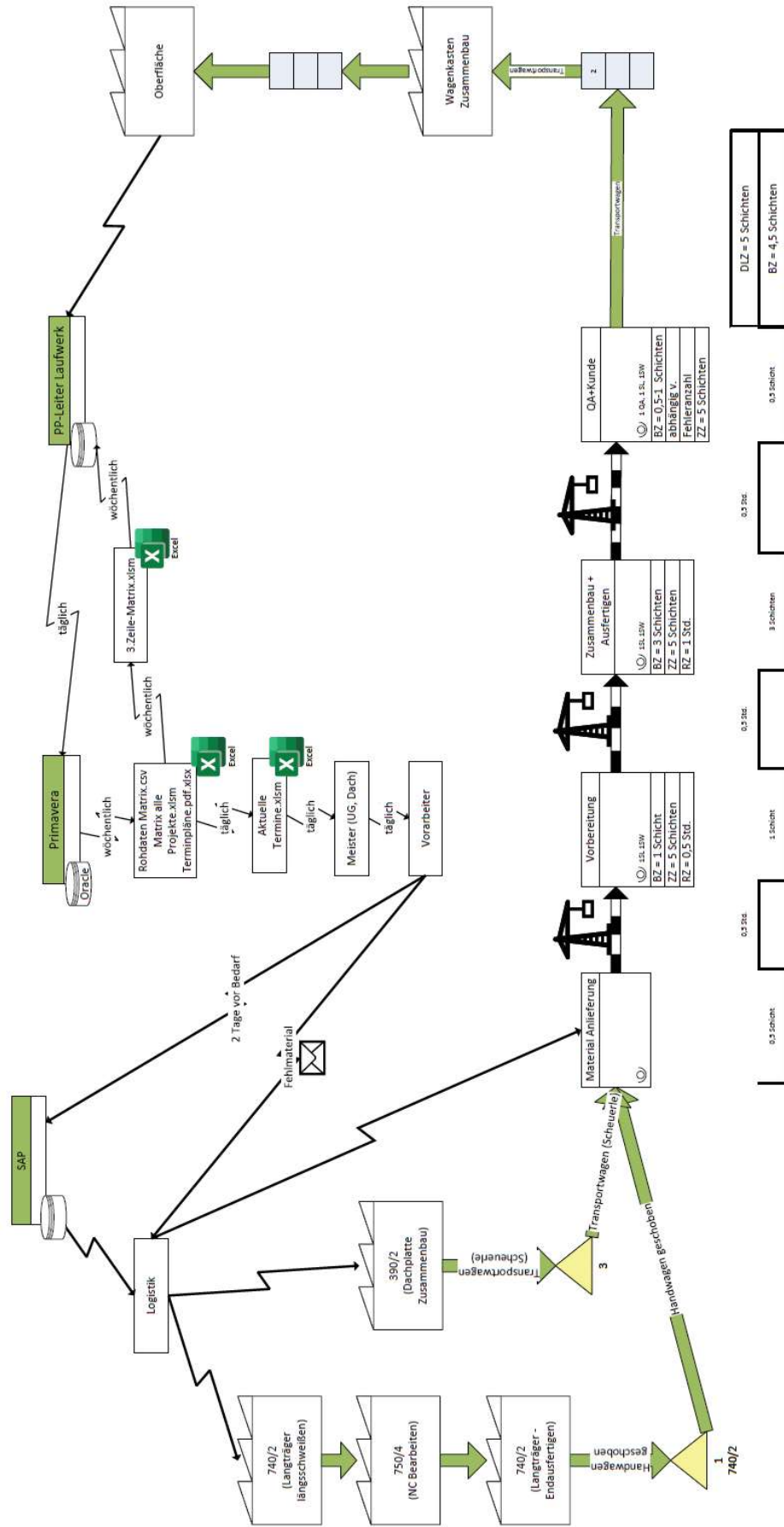


Abbildung 61: Wertstromanalyse Fertigungslinie 4, Dach (eigene Darstellung)

9.4 Darstellungen der Ist-Zustände

Schicht	Nr.	Arbeitsablauf	Dauer [Min.]
1	1	LT Vorb.	120
	2	LT einlegen	40
	3	VB Vorb.	120
	4	VB einlegen	40
	5	LT + VB einstellen & heften	90
2	6	VB sw.	270
	7	Bodenplatte Vorb. (inkl. Anschlussblech + Radkasten)	240
	8	BP einlegen	50
	9	BP heften + sw.	90
3	10	Oxy	90
	11	Kleinteile Vorb.	60
	12	Kleinteile sw.	90
	13	Umdrehen (aufmachen + drehen + spannen)	50
	14	Oxy RL	90
	15	Konsolen	120
	16	Unterseite hqt Vorb + heizen + sw	120
4	17	VB MW Innen Längsnaht innen	160
	18	VB MW Innen Quernaht x2	60
	19	UG aufstellen (Gurte, KRAN, etc.)	30
	20	fertigsw.	150

Tabelle 5: Arbeitsablauf Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 2

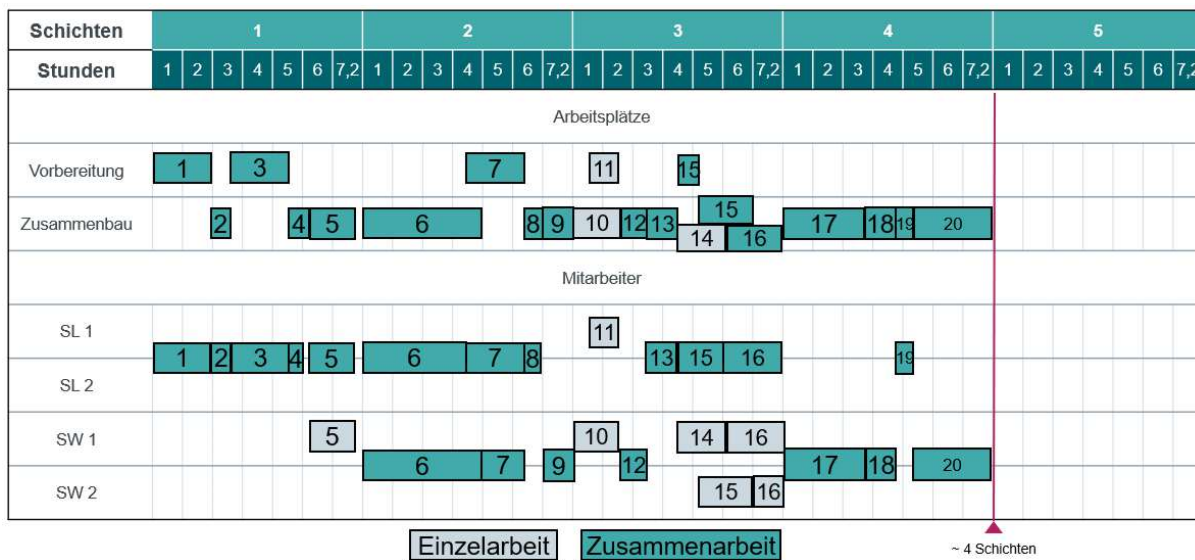


Abbildung 62: Auslastung je Arbeitsressource Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 2 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitsablauf	Dauer [Min.]
1	1	Transport aus Fräse + ausblasen	30
	2	UG reinigen	30
	3	Endträger	120
	4	waschen + pol. + Phasenbearbeiten	120
	5	bemessen + spannen + richten	180
2	6	Aufbau (Abdeckbleche + Versteifungsbleche)	430
3	7	Aufbau fertigstellen	170
	8	Kleinteile (C-Schienen, Erdungslaschen, Brandschutzbleche, Halterungen, sonstige WIG-Teile)	270
4	9	Restlichen Kleinteile	120
	10	UG aufstellen	90
	11	Rückseite (Endquerträger sw., Halterungen sw., ganze Rückseite verfräsen + richten)	150
	12	KW Rückseite (NL extra Kleinteile)	

Tabelle 6: Arbeitsablauf Fertigungslinie 1, Station 2, Variante 1 und 2

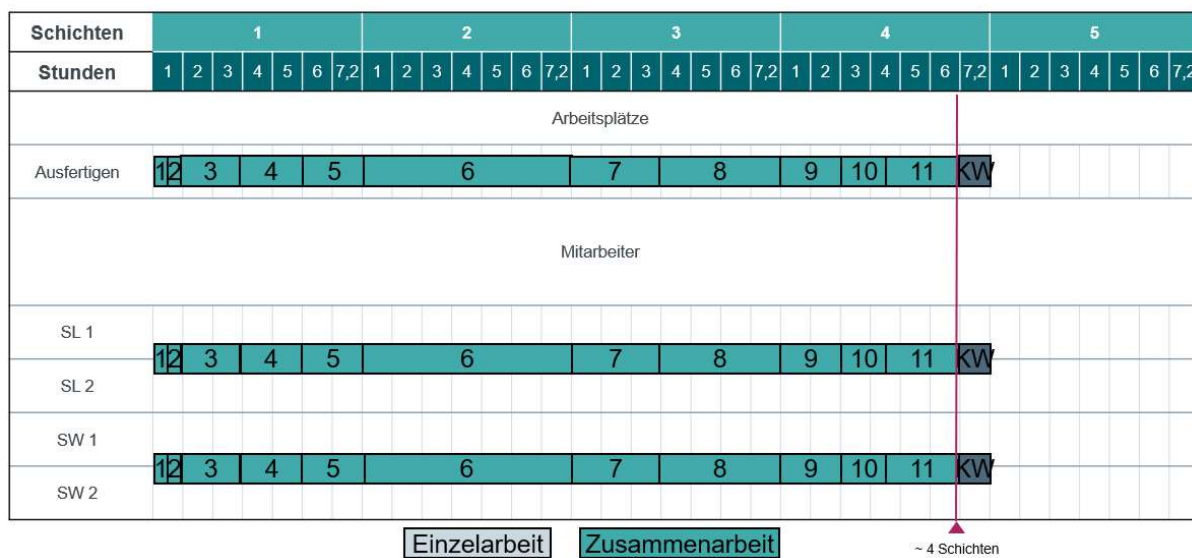


Abbildung 63: Auslastung je Arbeitsressource Fertigungslinie 1, Station 2, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitsablauf	Dauer [Stunden]
1	1	LT Vorb.	1
	2	LT einlegen	0,5
	3	Querträger schw. & verschl.	0,5
	4	Dachplatte Vorb. (wasch, pol., schleifen)	4
	5	Dachplatte einlegen, einstellen & fixieren	1
2	6	Oxytechnik schweißen	1,5
	7	Spanngurte aufmachen	0,25
	8	Krägen und Rohr	1,5
	9	Nähte pol.	0,5
	10	Anfang Längsnaht & Ecken Krägen schw.	1
	11	Spitzen aufwärmen und schw.	0,5
	12	Vorr. Öffnen und Dach wenden	0,75
	13	Dach überdrücken	0,15
	14	Querträger schw. & Längsnaht heften	0,6
	15	Querträger schleifen + Längsnaht Heftugen aufmachen	0,5
3	16	Oxytechnik schweißen	1,5
	17	Vorrichtung aufmachen, Querbalken&Innenseite Dach wasch. + pol.	0,5
	18	Querbalken heften	0,15
	19	Erneut einspannen & überdrücken	0,1
	20	Querbalken sw.	0,3
	21	SW Naht pol.	0,15
	22	Querträger WIG -SW. ausbessern	0,15
	23	Krägen innen schw. + Querbalken kontrollieren & ausbessern	0,6
	24	Erdungslaschen anwärmen + sw.	1,5
	25	Krägen innen schleifen & Naht v. Krägen pol.	0,5
	26	Gewindeeinsätze	0,5
	27	Vorr. Aufmachen + Gurte spannen + Transportieren	0,25
	28	AUSFERTIGUNG: WIG sw. F. Naht zw. Oxy und MIG 8x + QA & Ausbessern	2

Tabelle 7: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 3, Station 1, Variante 1 und 2

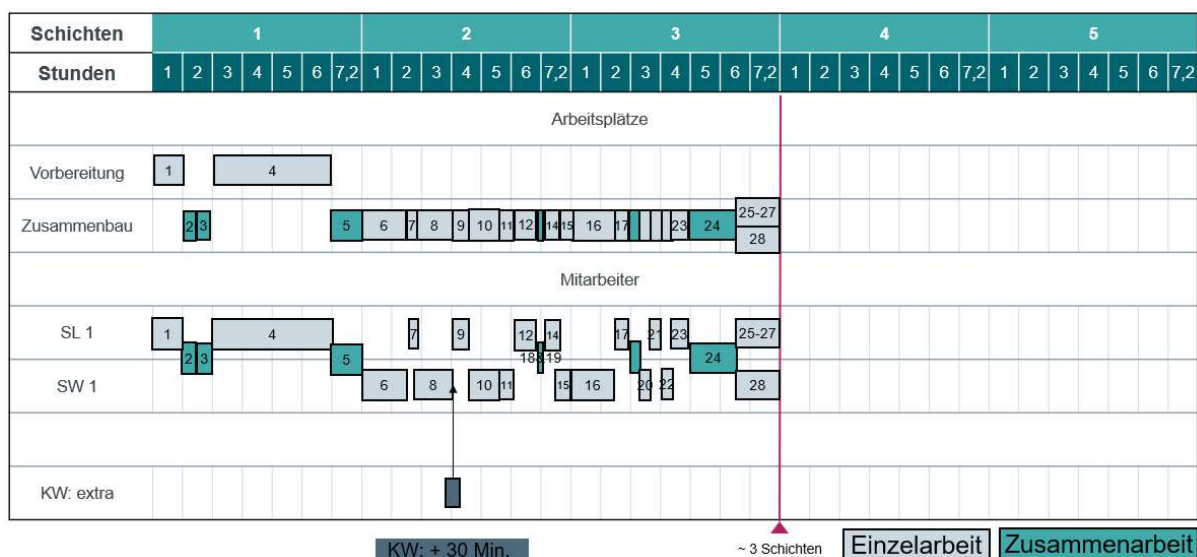


Abbildung 64: Auslastung der Fertigungslinie 3, Station 1, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitsvorgänge	Dauer [Minuten]
1	1	Vorrichtung vorbereiten	33
	2	LT vorbereiten	49,5
	3	kurz LT vorbereiten	49,5
	4	LT + kLT einlegen	66
	5	Schweißbadsicherung zw. kLT & LT	22
	6	VB vorbereiten	66
	7	VB einlegen + einstellen + Maße messen	99
	8	HQT heften	60
2	9	HQT anwärmen + sw. (KW extra)	140
	10	VB an LT ebnen + heften + sw.(KW extra)	125
	11	großes Radkastenblech vorbereiten + einlegen + sw.	154
	12	Kleinteile	0
3	13	BP vorbereiten + sw.	198
	14	BP einlegen	22
	15	Anschlussbleche an LT sw. + Kleinteile	33
	16	Oxy	49,5
	17	Türrahmen	0
	18	Radkastenbleche (inkl. Vorbereiten)	132
4	19	Aufmachen + Umdrehen	33
	20	Oxy	49,5
	21	Flügel bzw. Elefantenoehren	110
	22	HQT	264
5	23	Kleinteile	99
	24	KW: aufstellen + 4 Nähte anwärmen + sw. (beide Seiten)	49,5
	25	andere Kleinigkeiten	49,5
	26	Aufmachen + Liefern	16,5

Tabelle 8: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 3

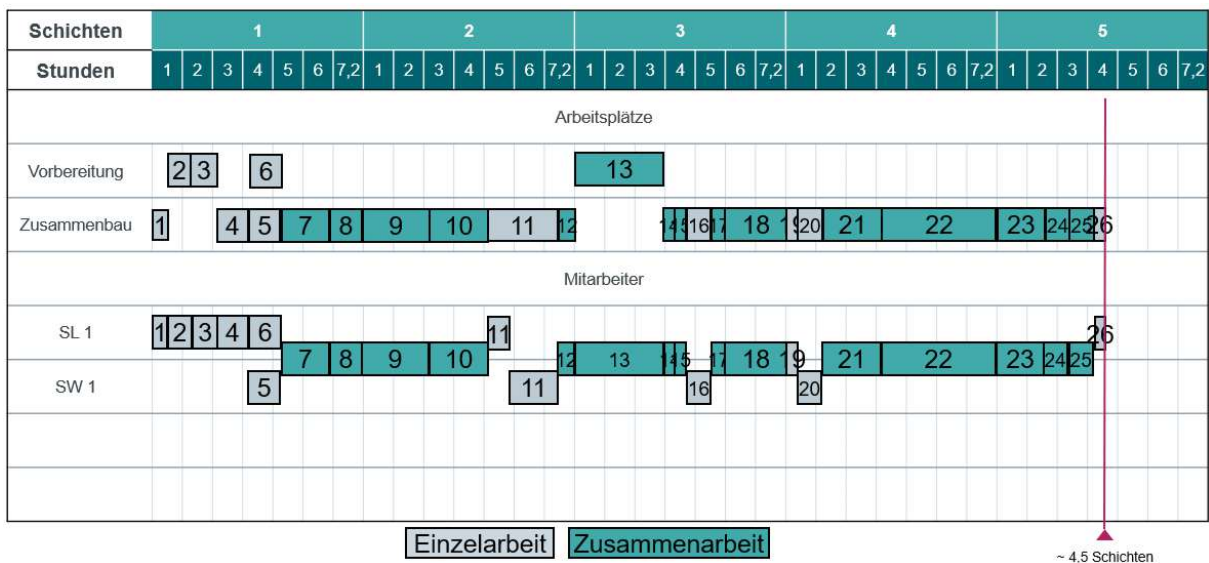


Abbildung 65: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 3 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitsvorgänge	Dauer [Minuten]
1	1	Vorrichtung vorbereiten	33
	2	LT vorbereiten	49,5
	3	kurz LT vorbereiten	49,5
	4	LT + kLT einlegen	66
	5	Schweißbadsicherung zw. kLT & LT	60
	6	VB vorbereiten	
	7	VB einlegen + einstellen + Maße messen	99
	8	HQT heften	60
2	9	HQT anwärmen + sw.	94
	10	VB an LT ebnen + heften + sw.	66
	11	großes Radkastenblech vorbereiten + einlegen + sw.	154
	12	Kleinteile	44
	13	BP vorbereiten	80
3	14	BP sw.	108
	15	BP einlegen	22
	16	Anschlussbleche an LT sw. + Kleinteile	33
	17	Oxy	49,5
	18	Türrahmen	0
	19	Radkastenbleche (inkl. Vorbereiten)	132
	20	Aufmachen + Umdrehen	33
4	21	Oxy	49,5
	22	Flügel bzw. Elefantenoehren	110
	23	HQT	264
	24	Kleinteile	99
	25	Aufmachen + Liefern	16,5

Tabelle 9:Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 4

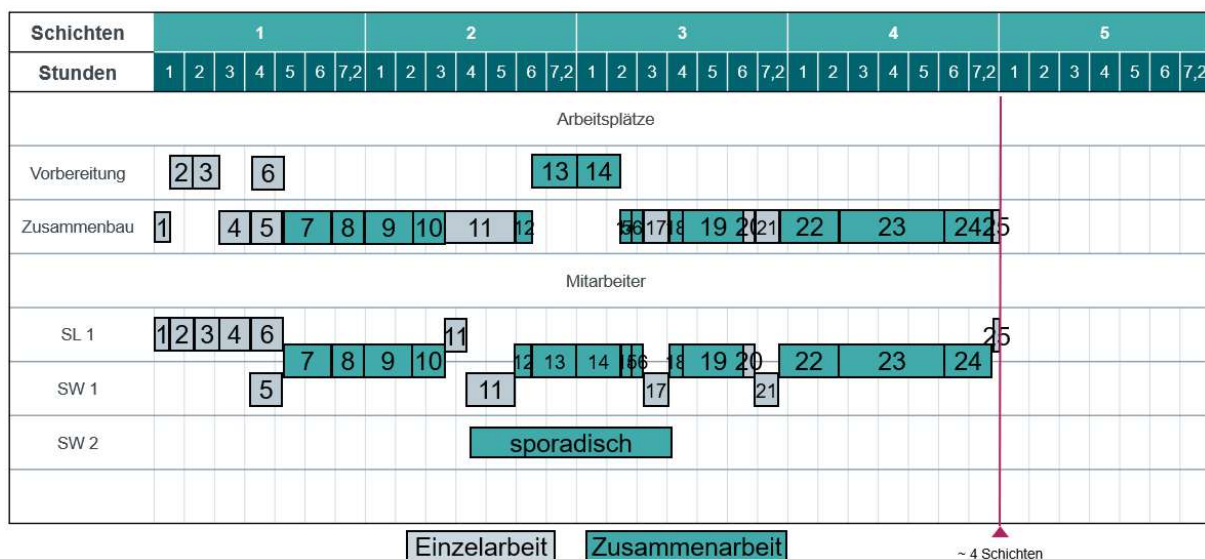


Abbildung 66: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 4 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitspakete	Zeit [Minuten]
1	1	Ausblasen + waschen	30
	2	Vorb. f QT (UG niederspannen & ebnen v. VB & LT)	60
	3	QT einbauen + anpassen + heften	30
	4	QT +Kleinteile + Deckel sw.	120
	5	Verbau (anpassen + einsw., inkl. Zwischenkontrollen)	180
2	6	allg. Kleinteile (vorb.+sw.) + Erdungslaschen sw.	120
	7	Gewindeeinsätze + Blindnieten	120
	8	Sw. Nähte verfr. + verputzen	120
	9	Alles entkraten (alle C-Schienen)	60
3		KRAN ZUM AUFSTELLEN	
	10	Aufstellen + Versteifungsblech sw.	90
	11	Restl. Erdungslaschen	30
	12	Umdrehen zur NL	60
	13	Vorb. QT (SW. Naht anarbeiten)	30
	14	NL VB sw.	60
	15	Verschleifen + Verfräsen	120
	16	Blindnieten	30
4	17	Endwässerungslöcher	60
	18	Richten	120

Tabelle 10: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 2, Variante 3 und 4

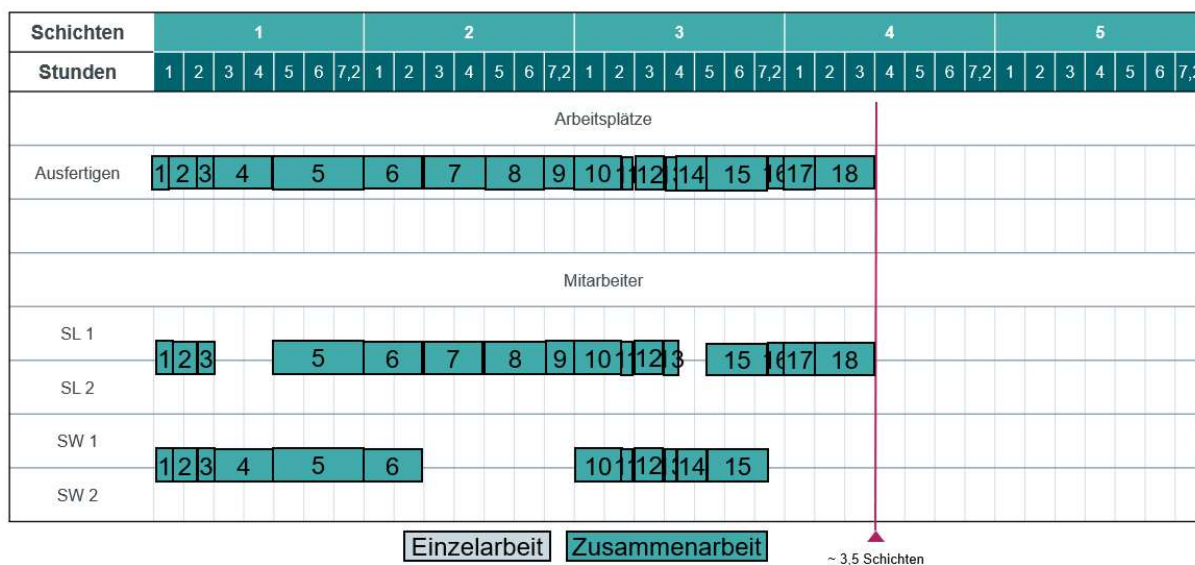


Abbildung 67: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 2, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)

Schicht	Nr.	Arbeitsablauf	Dauer [Minuten]
1	1	LT + kLT (wasch. + pol. + schleifen + verfräsen) + einlegen	120
	2	Endträger	60
	3	Dachplatte einpassen & verschw. + verschleifen	60
	4	Klimaplatte vorb. + gegenspannen + heizen	240
2	5	alles runterspannen + heften	180
	6	Oxy	120
	7	Zwischenplatte (zw. Dach- & Klimaplatte) vorb. + einlegen	
	8	Quernaht zw. Dachplatte & Klimaplatte	30
	9	Ecke (Bei Dach-&Klimaplatte)	60
	10	Umdrehen RL	45
3	11	Oxy	120
	12	Vorbereiten von allen restlichen Sachen	
	13	restl. Längs- & Quernähte	120
	14	alles verfräsen & verputzen	120
	15	Blindnieten	30
	16	Gewindeeinsätze	30
4	17	Erdungslaschen vorb. + sw.	120
	18	WIG sw. & ausbessern	60
	19	Umdrehen	45
	20	Ringmitte vorb. + sw.	60
	21	alles verfräsen + WIG ausbessern	60

Tabelle 11: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 4, Station 1, Variante 3 und 4

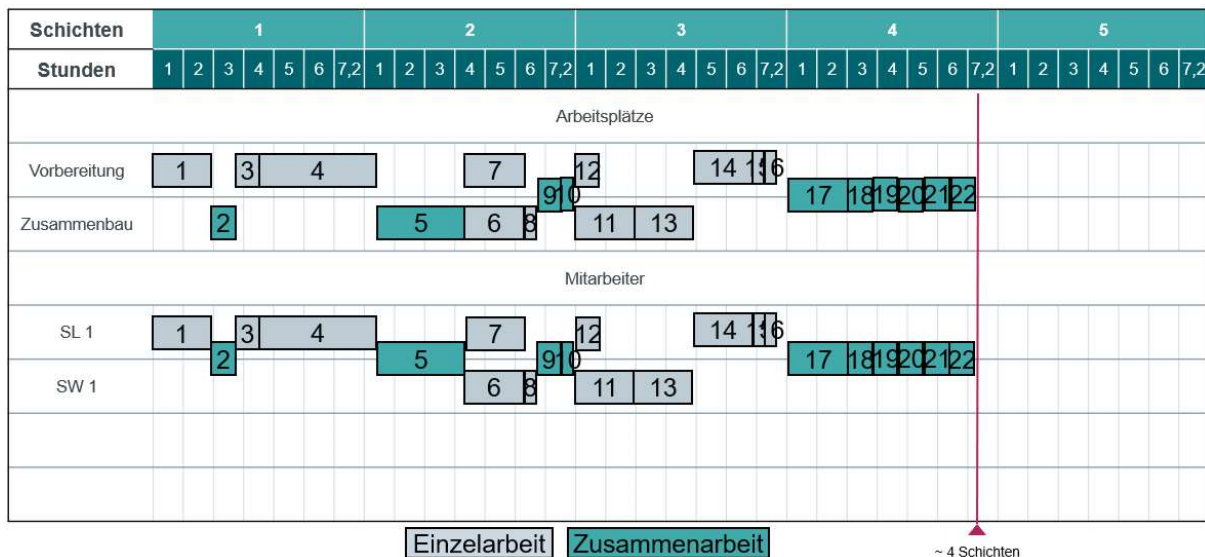


Abbildung 68: Auslastung der Fertigungslinie 4, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)

9.5 Darstellung der Soll-Arbeitspläne



Abbildung 69: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 1, Variante 2 (eigene Darstellung)

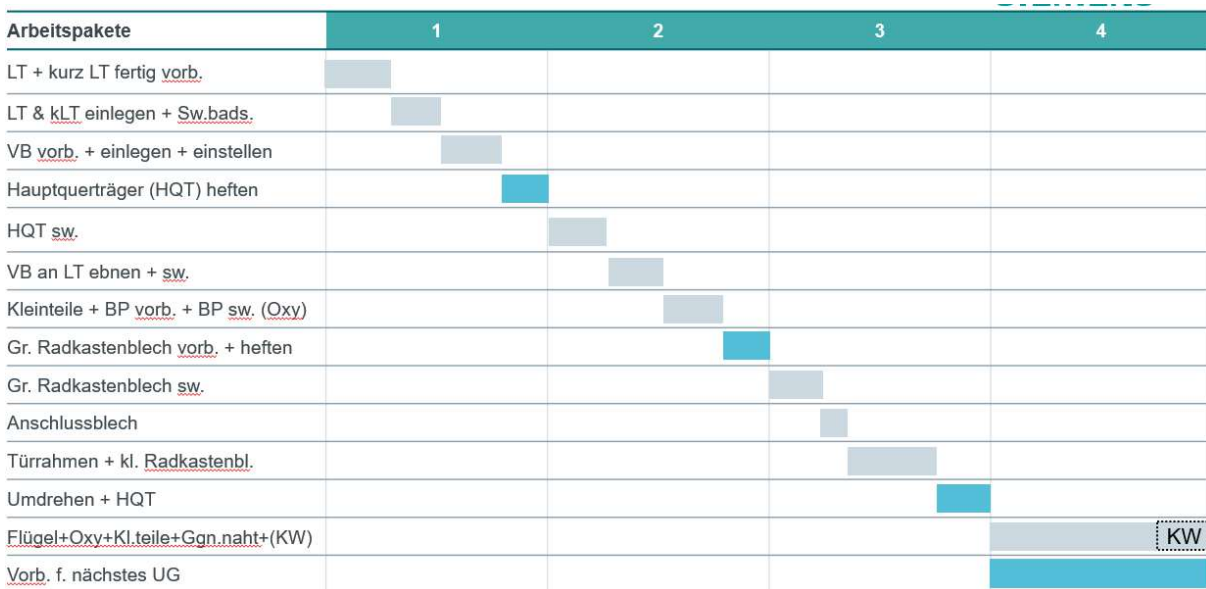


Abbildung 70: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)

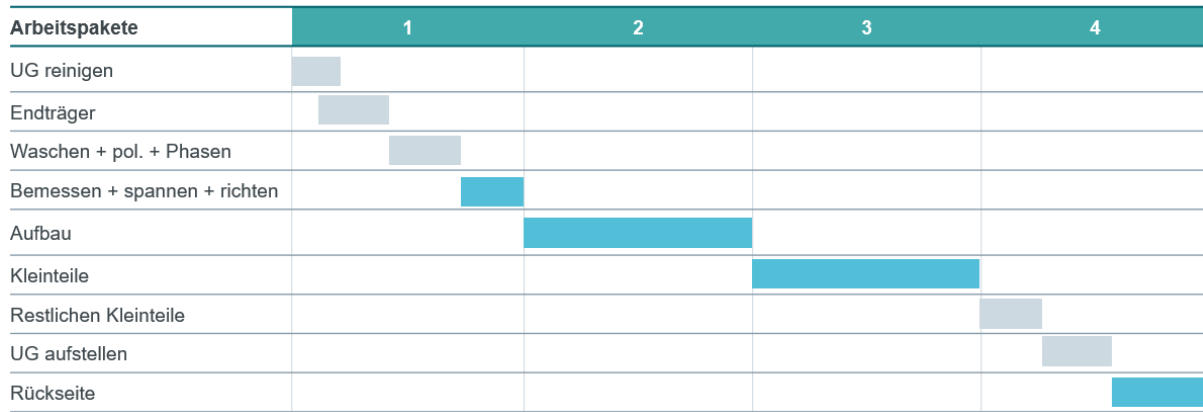


Abbildung 71: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 2, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)

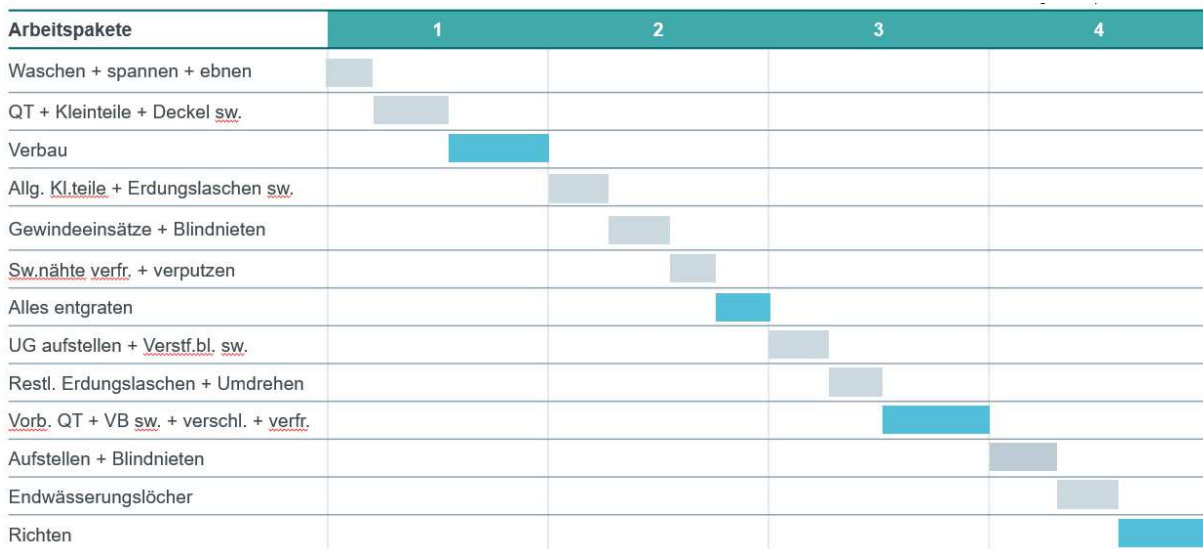


Abbildung 72: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 2, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)

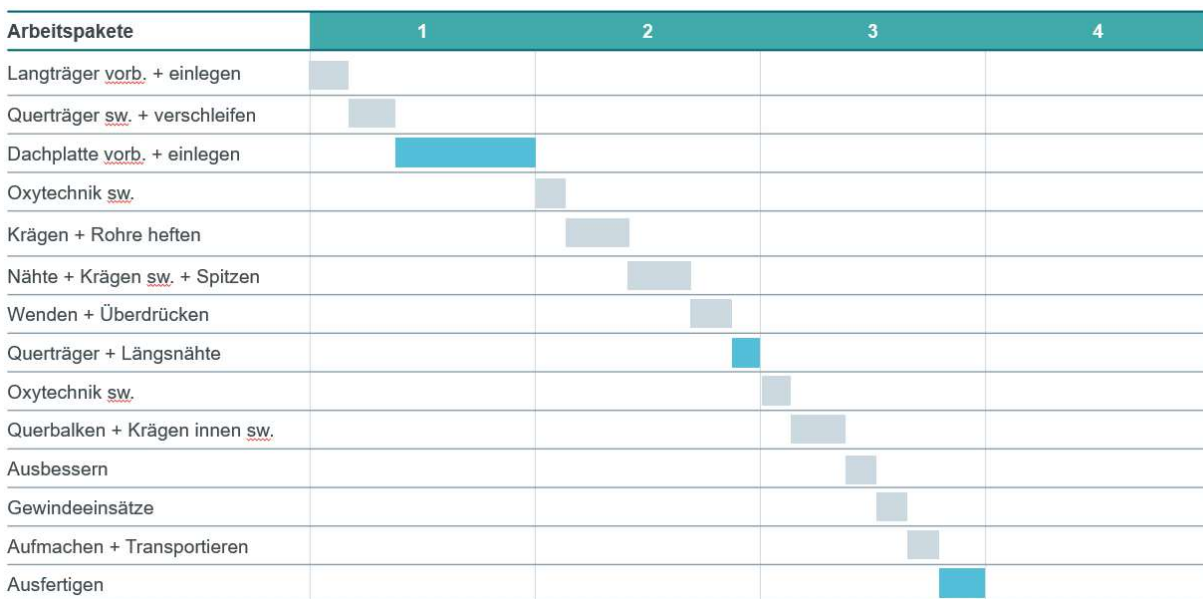


Abbildung 73: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Dächer, Station 1, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)

Arbeitspakete	1	2	3	4
LT + <u>kLT</u> <u>vorb.</u> + einlegen + Endträger	■			
Dachplatte einpassen + <u>sw.</u> + <u>schl.</u>		■		
<u>Schottwand</u> + <u>Klimaplatte</u> <u>vorb.</u> +heften		■		
Alles runterspannen + heften			■	
<u>Oxy</u> DP+ <u>Zw.platte</u> <u>vorb.</u> + einlegen		■		
Eckelement + Umdrehen			■	
<u>Oxy</u> innen DP & KP+ <u>Vorb.</u> vom Rest			■	
Restl. Längs- & Quernähte			■	
Alles <u>verfr.</u> + verputzen + Blindnieten			■	
Gewindeeinsätze + Umdrehen NL				■
Klimaplatte <u>vorb.</u> + Rest KP <u>sw.</u>			■	
<u>Kl.Teile</u> + Erdungslaschen <u>vorb.</u> + <u>sw.</u>				■
Ausbessern + Umdrehen				■
Ringmitte <u>vorb.</u> + <u>sw.</u> + Rest				■

Abbildung 74: Dartellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Dächer, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)

10 Literaturverzeichnis

- Adam, D. (1993): Produktions-Management. 7. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Altemeier, S. (2009): Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in der getakteten Variantenflielinie. unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation. Universität Paderborn, Paderborn.
- Altenburg, K. (1999): Quo vadis Waggonbau?: Einige aktuelle Konzepte und Richtungen der Bauweisenentwicklung im Waggonbau. Online verfügbar unter <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getrecorddetail&idt=1211129>.
- Amaro, G.; Hendry, L.; Kingsman, B. (1999): Competitive advantage, customisation and a new taxonomy for non make-to-stock companies. In: Int Jrnl of Op & Prod Mngemnt 19 (4), S. 349–371. DOI: 10.1108/01443579910254213.
- Ambilkar, P. (2017): A review of resequencing in mixed-model assembly lines, S. 1–10.
- Bebersdorf, P.; Huchzermeier, A. (2021): Variabler Takt. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Becker, C. (2007): Abstimmung flexibler Endmontagefließbänder in der Automobilindustrie. Dissertation. Norderstedt: Books on Demand.
- Becker, J.; Rosemann, M.; Schütte, R. (1995): Grundsätze ordnungsmässiger Modellierung, S. 435–445.
- Bergholz, M. A. (2005): Objektorientierte Fabrikplanung. Dissertation. RWTH, Aachen. Fakultät für Maschinenwesen.
- Bertagnolli, F. (2018): Lean Management. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Biele, A. (2018): Produktionsplanungsansätze in der Flugzeugmontage: Modellierung, Algorithmen und Leistungsbewertung.

- Biele, A.; Monch, L. (2015): Using simulation to improve planning decisions in mixed-model assembly lines. In: 2015 Winter Simulation Conference (WSC). 2015 Winter Simulation Conference (WSC). Huntington Beach, CA, USA, 06.12.2015 - 09.12.2015: IEEE, S. 2148–2159.
- Biele, A.; Ziarnetzky, T.; Monch, L. (2014): Simulation of low-volume mixed model assembly lines: Modeling aspects and case study, S. 2101–2112.
- Böge, A.; Böge, W. (2021): Handbuch Maschinenbau. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bokranz, R.; Landau, K. (2012): Handbuch Industrial Engineering. Produktivitätsmanagement mit MTM. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Bornewasser, M.; Hinrichsen, S. (2020): Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Boudreau, J.; Hopp, W.; McClain, J. O.; Thomas, L. J. (2003): On the Interface Between Operations and Human Resources Management. In: M&SOM 5 (3), S. 179–202. DOI: 10.1287/msom.5.3.179.16032.
- Boysen, N. (2005): Produktionsprogrammplanung bei Variantenfließfertigung, S. 53–72.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2007): Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung. Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung. In: Zeitschrift für Betriebswirtschaft, S. 759–793.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009a): Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions 20 (5), S. 455–471. DOI: 10.1080/09537280903011626.
- Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A. (2009b): Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. In: European Journal of Operational Research 192 (2), S. 349–373. DOI: 10.1016/j.ejor.2007.09.013.
- Brocke, J.; Sonnenberg, C.; Simons, A. (2009): WERTORIENTIERTES PROZESSMANAGEMENT: STATE-OF-THE-ART UND ZUKÜNFTIGER FORSCHUNGSBEDARF. In: Wirtschaftsinformatik Proceedings 2009.

- Brunner, F. J. (2008): Japanische Erfolgsrezepte. KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Productive Maintenance, Shopfloor Management, Toyota Production Management, Praxisreihe Qualitätswissen. München Wien: Hanser.
- Buergin, J.; Helming, S.; Andreas, J.; Blaettchen, P.; Schweizer, Y.; Bitte, F. et al. (2018): Local order scheduling for mixed-model assembly lines in the aircraft manufacturing industry. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 12 (6), S. 759–767. DOI: 10.1007/s11740-018-0852-x.
- Bullinger, H.-J. (1995): Arbeitsgestaltung: Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme. Stuttgart: BG Teubner Verlag.
- DIN EN 15380-2. Bahnanwendungen - Kennzeichnungssystematik für Schienenfahrzeuge – Teil 2: Produktgruppen; Deutsche Fassung EN 15380-2:2006 (2006).
- Diwas, S. K.C.; Terwiesch, C. (2009): Impact of Workload on Service Time and Patient Safety: An Econometric Analysis of Hospital Operations. In: *Management Science* 55 (9), S. 1486–1498. DOI: 10.1287/mnsc.1090.1037.
- Dolgui, A.; Petroodi, S. E. H.; Kovalev, S.; Kovalyov, M. Y.; Thevenin, S. (2019): Workforce planning and assignment in mixed-model assembly lines as a factor of line reconfigurability: state of the art. In: *IFAC-PapersOnLine* 52 (13), S. 2746–2751. DOI: 10.1016/j.ifacol.2019.11.623.
- Dorning, C.; Janschek, O.; Olearczick, E.; Röhrenbacher, H. (1990): PPS - Produktionsplanung und -steuerung, Konzepte, Methoden und Kritik. Wien.
- Duggan, K. J. (2013): Creating Mixed Model Value Streams. Practical Lean Techniques for Building to Demand. 2. Aufl.: CRC Press.
- Eitner, J.; Strohmeier, K. (2017): Industrie 4.0: Virtueller Zwilling steuert die Produktion.
- Erlach, K. (2010): Wertstromdesign. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Fandel, G.; François, P.; Gubitz, K. M. (1994): PPS-Systeme. Grundlagen, Methoden, Software, Marktanalyse: Springer Berlin Heidelberg.

- Freiheit, T.; Li, W. (2017): The effect of work content imbalance and its interaction with scheduling method on sequential flow line performance. In: International Journal of Production Research 55 (10), S. 2791–2805. DOI: 10.1080/00207543.2016.1194536.
- Goldman, D.; Goldman, P. (2015): Discrete-Event Simulation BT. Unter Mitarbeit von M. L. Loper. In: M. L. Loper (Hg.): Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle: Core Concepts and Accompanying Lectures. London: Springer, S. 103–109.
- Gottschalk, L. L. (2005): Flexibilitätsprofile: Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion. Dissertation. Zürich: vdf Hochschulverlag 2007. Online verfügbar unter <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/49736/1/eth-28519-01.pdf>, zuletzt geprüft am 05.09.2022.
- Grundig, C.-G. (2014): Fabrikplanung. Planungssystematik, Methoden, Anwendungen. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser (Hanser eLibrary).
- Günther, H.-O.; Tempelmeier, H. (2012): Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hämmerle, M.; Rally, P. (2010): Wertschöpfung steigern. Ergebnisse der Datenerhebung über die Verbreitung und Ausgestaltung von Methoden zur Prozessoptimierung in der Produktion mit besonderem Fokus auf die Wertstrommethode. Stuttgart: Fraunhofer Verlag. Online verfügbar unter https://www.engineering-produktion.iao.fraunhofer.de/content/dam/iao/tim/dokumente/studie_wertschoepfung-steigern.pdf, zuletzt geprüft am 05.09.2022.
- Hashemi-Petroodi, S. E.; Thevenin, S.; Kovalev, S.; Dolgui, A. (2022): Model-dependent task assignment in multi-manned mixed-model assembly lines with walking workers. Hg. v. Omega. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102688>.
- Hedtstück, U. (2013): Simulation diskreter Prozesse. Methoden und Anwendungen. Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-642-34871-6.pdf>, zuletzt geprüft am 12.10.2022.

- Heike, G.; Ramulu, M.; Sorenson, E.; Shanahan, P.; Moinzadeh, K. (2001): Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry. In: *International Journal of Production Economics* 72 (2), S. 103–120. DOI: 10.1016/S0925-5273(00)00089-X.
- Hevner, A.; March, S.; Park, J.; Ram, S. (2004): *Design Science Research in Information Systems*.
- Hobel, B.; Schütte, S. (2006): *GABLER BUSINESS-WISSEN A-Z. Projektmanagement*. 1.: Gabler Verlag.
- Hoffmann, C.-A. (2018): *Methodik zur Steuerung modularer Produktbaukästen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Huka, M. A.; Grenzfurthner, W.; Zauner, B.; Gronalt, M. (2021): Capacity planning of a mixed-model assembly line for prefabricated housebuilding elements. In: *Procedia Computer Science* 180 (10), S. 706–713. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.293.
- Ihme, J. (2019): *Schienenfahrzeugtechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Iwainsky, A.; Wilhelmi, W. (1994): *Lexikon der Computergrafik und Bildverarbeitung*. Mit über 1000 Eintragungen, zahlreichen Querverweisen und Illustrationen sowie einem Bildanhang. Wiesbaden: Vieweg.
- Kampker, A.; Kreisköther, K.; Schumacher, M. (2019): Mathematical Model for Proactive Resequencing of Mixed Model Assembly Lines. In: *Procedia Manufacturing* 33, S. 438–445. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.04.054.
- Kaymaz, E.; Cavdur, F. (2020): A mixed-integer programming model for cycle time minimization in assembly line balancing: Using rework stations for performing parallel tasks, S. 109–121. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.4995/ijpme.2020.12368>.
- Kern, W. (2021): *Modulare Produktion*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Kohl, J. (2016): *Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik*: Meisenbach. Online verfügbar unter https://opus4.kobv.de/opus4-fau/files/10358/282_johannes_kohl_web1.pdf.

- Kratzsch, S. (2000): Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Dissertation. Universität Braunschweig.
- Lidberg, S. (2021): Evaluating Fast and Efficient Modeling Methods for Simulation-Based Optimization. University of Skövde. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1600918>.
- Lietzau, B.; Mönch, L.; Biele, A. (2022): A Multi-criteria Production Planning Approach for Aircraft Manufacturing Flow Lines. In: IFAC-PapersOnLine 55 (2), S. 144–149. DOI: 10.1016/j.ifacol.2022.04.184.
- Liker, J. K. (2004): The Toyota Way - 14 Management Principles From The World'S Greatest Manufacturer: McGraw-Hill.
- Liker, J. K. (2021): The Toyota way. 2. Aufl.: McGraw Hill.
- Liu, S.; Bohács, G.; Shi, X.; Shang, X.; Huang, A. (Hg.) (2020): LISS 2020. Proceedings of the 10th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences. Unter Mitarbeit von Y. Wu und R. J. Zhong. Singapore: Springer Singapore.
- Liu, X.; Lei, M.; Zeng, Q.; Li, A. (2019): Integrated Optimization of Mixed-Model Assembly Line Balancing and Buffer Allocation Based on Operation Time Complexity. In: Procedia CIRP 81, S. 1040–1045. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.248.
- Lödding, H. (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Lukesch, M.; Kellner, F. (2020): Übungsbuch Produktionswirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- März, L. (2015): Dynamische Austaktung in sequenzierten Produktionslinien der Automobilindustrie. In: T. Claus, F. Herrmann und M. Manitz (Hg.): Produktionsplanung und –steuerung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 241–255.
- Mayer, G.; Pöge, C.; S., Sven; Wenzel, S. (2020): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie, S. 1–413.

- Mayr, P.; Berger, M. (Hg.) (2017): FūMoTeC 2017. Tagungsband. Technische Universität Chemnitz. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz (Schriftenreihe der Füge- und Montagetechnik Chemnitz, Band 2). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-229352>.
- Meyr, H. (2004): Supply chain planning in the German automotive industry 26 (4), S. 447–470. DOI: 10.1007/s00291-004-0168-4.
- Peppers, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M. A.; Chatterjee, S. (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: Journal of Management Information Systems 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.
- Pröpster, H. (2015): Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus. Dissertation. Technische Universität München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.
- Raffel, W.-U. (2005): Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten-Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels Fahrerloser Transportsysteme. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek der FU Berlin.
- REFA (2015): Industrial Engineering. Standardmethoden zur Produktivitätssteigerung und Prozessoptimierung. 2. Aufl. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Unternehmensentwicklung). Online verfügbar unter <http://shop.refa.de/shop/details.php?id=207>, zuletzt geprüft am 05.09.2022.
- Richter, M. (2019): Understanding and Exploring Operator Needs in Mixed.
- Samouei, P.; Ashayeri, J. (2019): Developing optimization & robust models for a mixed-model assembly line balancing problem with semi-automated operations. In: Applied Mathematical Modelling 72, S. 259–275. DOI: 10.1016/j.apm.2019.02.019.
- Scheer, A.-W. (1999): ARIS - business process frameworks. 3. ed. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Schellmann, H. (2012): Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012. München: Utz (Forschungsberichte / IWB, 260).

- Schlüter, M. J.; Ostermeier, F. F. (2022): Dynamic line balancing in unpaced mixed-model assembly lines: A problem classification. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 37 (18–19), S. 134–142. DOI: 10.1016/j.cirpj.2022.01.012.
- Schmidt, H. (2002): Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen. Dissertation. Technischen Universität Berlin, Berlin.
- Schnieder, L. (2018): Betriebsplanung im öffentlichen Personennahverkehr. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Scholl, A. (1999): Balancing and sequencing of assembly lines. With 75 tables. Zugl.: Darmstadt, Techn. Hochsch., Diss., 1995. 2., rev. ed. Heidelberg, New York: Physica-Verl. (Contributions to management science).
- Schumacher, B. C. (2020): Beitrag zur Einarbeitung in ereignisdiskrete Simulation zur Neu- und Umplanung von Materialflusssystemen. Dissertation. Technische Universität Berlin, Berlin.
- Siemens Mobility (2020): Hintergrund Information: Nachhaltige, innovative Lösungen von Siemens Mobility für den Schienen- und Straßenverkehr. Hauptenthal, E. Online verfügbar unter <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:bd687864-8d22-488b-a83e-a97c05ecf10d/hintergrund-sustainability.pdf>, zuletzt geprüft am 05.06.2022.
- VDI 5200 (2011): Fabrikplanung-Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag.
- Veit, M. B. (2010): Modelle und Methoden für die Bestandsauslegung in Heijunka-nivellierten Supply Chains. Erscheinungsort nicht ermittelbar: KIT Scientific Publishing.
- Vogel, W.; Lasch, R. (2016): Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review. In: Logist. Res. 9 (1), S. 1399. DOI: 10.1007/s12159-016-0152-9.
- Weber, C.; Wieland, M.; Reimann, P. (2018): Konzepte zur Datenverarbeitung in Referenzarchitekturen für Industrie 4.0. In: Datenbank Spektrum 18 (1), S. 39–50. DOI: 10.1007/s13222-018-0275-z.

- Webster, J.; Watson, R. T. (2002): Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. In: *MIS Quarterly* (2), S. xiii–xxiii. Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/4132319>, zuletzt geprüft am 19.06.2022.
- Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (2005): Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München: Hanser.
- Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H. (2019): Betriebsorganisation für Ingenieure. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary).
- Wong, K. C.; Woo, K. Z.; Woo, K. H. (2016): Ishikawa Diagram. In: W. O'Donohue und A. Maragakis (Hg.): *Quality Improvement in Behavioral Health*. Cham: Springer International Publishing, S. 119–132.
- Zennaro, I.; Finco, S.; Battini, D.; Persona, A. (2019): Big size highly customised product manufacturing systems: a literature review and future research agenda. In: *International Journal of Production Research* 57 (15-16), S. 5362–5385. DOI: 10.1080/00207543.2019.1582819.
- Zülch, G.; Müller R. (2001): Entwicklung von Organisationsstrukturen für die Montage. *Ergonomie und Organisation in der Montage*, S. 338–349.

Online-Quellen

- Lübbe, A.: BPMNPoster, gelesen am 03.09.2022, von http://www.bpmb.de/images/BPMN2_0_Poster_DE.pdf

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Angewandte DSRM (eigene Darstellung in Anlehnung an Peffers et al. 2007, S. 54).....	6
Abbildung 2: Aufbau und Struktur der Arbeit (eigene Darstellung)	7
Abbildung 3: Kategorisierung der Produktionselemente (in Anlehnung an Bergholz 2005, S. 139).....	10
Abbildung 4: Räumliche Struktur industrieller Fertigungsprinzipien (in Anlehnung an Wiendahl und Wiendahl 2019, S. 44)	12
Abbildung 5: Zuordnung von Fertigungsarten und Organisationstypen (in Anlehnung an Wiendahl und Wiendahl 2020, S. 52)	15
Abbildung 6: Toyota Production Systems Haus (in Anlehnung an Brunner 2008, S. 121)	17
Abbildung 7: Durchlaufzeit und Belegungszeit (in Anlehnung an Böge und Böge 2021, S. 1709).....	19
Abbildung 8: getaktete Fließfertigung inklusive der Zeitdauer (eigene Darstellung) ..	21
Abbildung 9: Beispiel Ishikawa-Diagramm (eigene Darstellung)	22
Abbildung 10: Montage in Losen vs. Modell-Mix-Montage (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 87).....	23
Abbildung 11: Zusammenfassung der Defizite im Schienenfahrzeugbau (Schmidt 2002, S. 55)	25
Abbildung 12: Untergestell (Werksfoto: Siemens Mobility Austria GmbH).....	29
Abbildung 13: Vorranggraph der Kernprozessstufen in der Wagenkastenfertigung (Schmidt 2002, S. 49).....	30
Abbildung 14: Visualisierung von Muri, Unterlast, Mura und Muda (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 81).....	39
Abbildung 15: Schritt 1 der Austaktung (eigene Darstellung)	39
Abbildung 16: Schritt 2 der Austaktung (eigene Darstellung)	40
Abbildung 17: Ergebnis der Austaktung (eigene Darstellung)	41
Abbildung 18: Einflussgrößen der Austaktung (März 2015, S. 8)	42
Abbildung 19: Beispiel einer Modellierung mit BPMN 2.0 (eigene Darstellung).....	44
Abbildung 20: Beispielhafter Vorranggraph (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 21: Gantt-Diagramm (Lukesch und Kellner 2020, S. 234)	47
Abbildung 22: Klassifizierung von Simulationen (Schumacher 2020).....	48

Abbildung 23: Systematische Literaturrecherche der vorliegenden Arbeit (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 24: Bandbelegung bei variabler Taktung – ein selbstständiges Heijunka (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 114).....	55
Abbildung 25: Überblick über den Ablauf der Gesamtmethodik (Pröpster 2015, S. 75)	58
Abbildung 26: Mögliche Taktzeitvielfache x in Abhängigkeit der Werkerdichte w samt resultierender Kapazitätsänderung (Pröpster 2015, S. 80).....	61
Abbildung 27: Kapazitätserweiterung bei bestehendem Personalstamm und gleichbleibender Schichtanzahl pro Tag (Hämmerle und Rally 2010, S. 672).....	62
Abbildung 28: Stückzahlkorridor bei einer festen Taktzeit (Pröpster 2015, S. 84).....	63
Abbildung 29: Verschiebung des Stückzahlkorridors durch eine Anpassung um das Taktzeitvielfache $x_{i,j}$ (Pröpster 2015, S. 85).....	63
Abbildung 30: Entscheidungsbedarf bei der Bestimmung der Taktzeiten (Pröpster 2015, S. 86).....	64
Abbildung 31: Parameter zur Bestimmung der resultierenden Taktzeiten am Beispiel einer Werkerdichtekombination (Pröpster 2015, S. 87)	65
Abbildung 32: Ablauf der Bewertung der verschiedenen Werkerdichte-/ Taktzeitkombinationen (Pröpster 2015, S. 89).....	66
Abbildung 33: Phasen des Planungskonzepts (eigene Darstellung)	67
Abbildung 34: Materialfluss im Ist-Layout UG Metro München (Fertigungslinie 1, Variante 1 und 2).....	72
Abbildung 35: Materialfluss im Ist-Layout UG Metro Wien (Fertigungslinie 2, Variante 3 und 4)	72
Abbildung 36: Taktdiagramm Fertigungslinie 1, Variante 1	73
Abbildung 37: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 1, Variante 1 (Untergestell Kopfwagen) (eigene Darstellung)	77
Abbildung 38: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 1, Variante 2 (Untergestell Mittelwagen) (eigene Darstellung).....	77
Abbildung 39: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 2, Variante 3 (Untergestell Kopfwagen) (eigene Darstellung)	77
Abbildung 40: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 2, Variante 4 (Untergestell Mittelwagen) (eigene Darstellung).....	78

Abbildung 41: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 3, Variante 1 (Dach Kopfwagen) (eigene Darstellung)	78
Abbildung 42: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 3, Variante 2 (Dach Mittelwagen) (eigene Darstellung)	78
Abbildung 43: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 4, Variante 3 (Dach Kopfwagen) (eigene Darstellung)	79
Abbildung 44: Plan-Ist-Vergleich Fertigungslinie 4, Variante 4 (Dach Mittelwagen) (eigene Darstellung)	79
Abbildung 45: Auslastung des Arbeitspersonals und der Arbeitsplätze in der Fertigungslinie 1, Arbeitsstation 1 für die Variante 1 (eigene Darstellung)	82
Abbildung 46: Vorrichtung für das Einspannen der Untergestell Langträger (Werksfoto: Siemens Mobility Austria GmbH).....	86
Abbildung 47: Soll-Layout (eigene Darstellung).....	87
Abbildung 48: Soll-Arbeitsplan je Schicht für Station 1, Variante 1 (eigene Darstellung)	92
Abbildung 49: links: Visualisierung einer herkömmlichen Produktion (Liker 2004, S. 129); rechts: Visualisierung einer nivellierten Produktion (Liker 2004, S. 131).....	94
Abbildung 50: Taktzeiten abhängig vom Schichtbetrieb (eigene Darstellung).....	97
Abbildung 51: Ausbringungsmenge in unterschiedlichem Schichtbetrieb (eigene Darstellung).....	98
Abbildung 52: Durchlaufzeiten in Abhängigkeit des Schichtbetriebs (eigene Darstellung).....	98
Abbildung 53: Teilimplementierung der Zusammenlegung (eigene Darstellung).....	100
Abbildung 54: Simulationsergebnisse (eigene Darstellung)	102
Abbildung 55: Datenblatt zu BPMN 2.0 (Lübbe, 2022)	111
Abbildung 56: Wertstrom Symbole (Erlach 2010, S. 381)	112
Abbildung 57: Wertstrom Symbole Teil 2 (Erlach 2010, S. 382).....	113
Abbildung 58: Wertstromanalyse Fertigungslinie 1, Untergestell (eigene Darstellung)	114
Abbildung 59: Wertstromanalyse Fertigungslinie 2, Untergestell (eigene Darstellung)	115
Abbildung 60: Wertstromanalyse Fertigungslinie 3, Dach (eigene Darstellung)	116
Abbildung 61: Wertstromanalyse Fertigungslinie 4, Dach (eigene Darstellung)	117

Abbildung 62: Auslastung je Arbeitsressource Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 2 (eigene Darstellung)	118
Abbildung 63: Auslastung je Arbeitsressource Fertigungslinie 1, Station 2, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)	119
Abbildung 64: Auslastung der Fertigungslinie 3, Station 1, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)	120
Abbildung 65: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 3 (eigene Darstellung)	121
Abbildung 66: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 4 (eigene Darstellung)	122
Abbildung 67: Auslastung der Fertigungslinie 2, Station 2, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)	123
Abbildung 68: Auslastung der Fertigungslinie 4, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)	124
Abbildung 69: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 1, Variante 2 (eigene Darstellung)	125
Abbildung 70: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)	125
Abbildung 71: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 2, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)	126
Abbildung 72: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Untergestelle, Station 2, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)	126
Abbildung 73: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Dächer, Station 1, Variante 1 und 2 (eigene Darstellung)	126
Abbildung 74: Darstellung des Soll-Arbeitsplans für die Fertigungslinie der Dächer, Station 1, Variante 3 und 4 (eigene Darstellung)	127

12 Formelverzeichnis

Formel 1: Produktivität.....	16
Formel 2: Berechnung der Zykluszeit (Erlach 2010, S. 66)	21
Formel 3: Berechnung der Taktzeit (Bebersdorf und Huchzermeier 2021, S. 115) ...	21
Formel 5: Werkerdichte (Becker 2007).....	60
Formel 6: Werkerdichte für Szenario i	60
Formel 7: Stückzahlkorridor.....	60
Formel 8: Kapazitätsbedarf Schlosser_innen für Variante v und Arbeitsstation i (in Anlehnung an Bokranz und Landau 2012, S. 369).....	75
Formel 9: Kapazitätsbedarf Schweißer_innen für Variante v und Arbeitsstation i (in Anlehnung an Bokranz und Landau 2012, S. 369).....	76
Formel 10: Kapazitätsbedarf Schlosser_innen für Variante v	76
Formel 11: Kapazitätsbedarf Schweißer_innen für Variante v.....	76
Formel 12: Wertschöpfende Prozesszeit der Station i für die Produktion der Variante v	76
Formel 13: gesamte wertschöpfende Prozesszeit der Variante v entlang der Fertigungslinie	76
Formel 14: Durchlaufzeit der Station i für die Produktion der Variante	76
Formel 15: Gesamte Durchlaufzeit der Variante v.....	76
Formel 16: Randbedingung der Werkerdichte für Schlosser (in Anlehnung an Pröpster 2015, S. 81).....	88
Formel 17: Randbedingung der Werkerdichte für Schweißer (in Anlehnung an Pröpster 2015, S. 81).....	88
Formel 18: Approximation der Soll-Taktzeit zur aktuellen Taktzeit.....	89
Formel 19: Randbedingung Werkerdichte Schlosser_innen für Variante v und Station i.....	89
Formel 20: Randbedingung Werkerdichte Schweißer_innen für Variante v und Station i.....	89
Formel 21: Randbedingung zur Einhaltung der Taktzeit.....	92

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Hauptproduktgruppen (DIN EN 15380-2, S.7)	28
Tabelle 2: Merkmale der Verkehrsträger im Schienenverkehr (in Anlehnung an Schmidt 2002, S. 14)	32
Tabelle 3: Literatur zu den relevanten Themen	51
Tabelle 4: Prozessablauf Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 1	81
Tabelle 5: Arbeitsablauf Fertigungslinie 1, Station 1, Variante 2	118
Tabelle 6: Arbeitsablauf Fertigungslinie 1, Station 2, Variante 1 und 2	119
Tabelle 7: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 3, Station 1, Variante 1 und 2	120
Tabelle 8: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 3	121
Tabelle 9: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 1, Variante 4	122
Tabelle 10: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 2, Station 2, Variante 3 und 4	123
Tabelle 11: Arbeitsablauf der Fertigungslinie 4, Station 1, Variante 3 und 4	124

14 Abkürzungsverzeichnis

bzw.	beziehungsweise
d.h.	das heißt
HPG	Hauptproduktgruppen
UPG	Unterproduktgruppen
etc.	et cetera
MTO	Make-To-Order
ETO	Engineering-To-Order
CTO	Kundenauftragspunkt
BPMN	Business Process Model and Notation
ERP	Enterprise-Resource-Planning
z.B.	zum Beispiel
DSRM	Design Science Research Methodology
IT	Informationstechnik
MTM	Methods-Time Measurement
SL	Schlosser
SW	Schweißer / Schweiß- / schweißen
UG	Untergestell
LT	Langträger
kLT	Kurzlangträger
VB	Vorbau
BP	Bodenplatte
HQT	Hauptquerträger
QT	Querträger
WE	Wagenende
Vorr.	Vorrichtung
pol.	polieren
zw.	zwischen
MW	Mittelwagen
KW	Kopfwagen
WK	Wagenkasten
Oxy	Oxytechnik Schweißroboter
vorb.	vorbereiten
allg.	allgemein
wasch	waschen
pol.	polieren
restl.	restliche/s

verschw.	verschweißen
NL	Normallage
RL	Rückenlage
x_i	Taktzeitvielfache
w_i	Werkerdichte (des Szenarios i)
w_{i_0}	Werkerdichte in der Basistaktzeit
w_{min}	minimale Werkerdichte
w_{max}	maximale Werkerdichte
$w_{SL_{min}}$	minimale Werkerdichte der Schlosser
$w_{SL_{max}}$	maximale Werkerdichte der Schlosser
$w_{SW_{min}}$	minimale Werkerdichte der Schweißer
$w_{SW_{max}}$	maximale Werkerdichte der Schweißer
i	Laufvariable der Station
j	Laufvariable des Prozesses
v	Laufvariable Variante
n_v	Anzahl der Variante v
$KpB_{SL_{vi}}$	Kapazitätsbedarf der Schlosser_innen für Variante v und Arbeitsstation i
$KpB_{SW_{vi}}$	Kapazitätsbedarf der Schweißer_innen für Variante v und Arbeitstation i
t_{vi}	Durchlaufzeit bzw. Prozesszeit für Variante v und Station i
t_{vij}	Prozesszeit für Variante v, Station i und Prozess j
t_R	Vorliege, Reife- und Nachliegezeiten
t_h	Arbeitszeit je Schicht
$x_{SL_{vij}}$	Anzahl benötigter Schlosser_innen für Variante v, Station i, Prozess j und Prozesszeit t_{vij}
$x_{SW_{vij}}$	Anzahl benötigter Schweißer_innen für Variante v, Station i, Prozess j und Prozesszeit t_{vij}
KpB_{SL_v}	Gesamter Kapazitätsbedarf an Schlosser_innen für Variante v
KpB_{SW_v}	Gesamter Kapazitätsbedarf an Schweißer_innen für Variante v
μ	Produktivität der Mitarbeiter_innen
DLZ_{vi}	Durchlaufzeit der Variante v bei Station i
t_{st}	Standardtaktzeit