



Lehrstuhl für Industrielogistik

Masterarbeit

Ramp-Up Management im Kontext des
schnellen industriellen Wachstums - Eine
Fallstudie zur analytischen Modellierung
als Leitfaden

Rupert-Stefan Widmann, BSc

Mai 2024



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

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

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

Datum 03.05.2024

Unterschrift Verfasser/in
Rupert-Stefan Widmann

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die bei Personen verwendeten maskulinen Formen für alle Geschlechter zu verstehen sind.

Kurzfassung

Diese Arbeit analysiert die Herausforderungen, denen Industriebetriebe aufgrund des rasanten Wachstums durch außergewöhnliche externe Faktoren wie den Klimawandel gegenüberstehen. Politische Interventionen, Regelungen und Subventionen beeinflussen die Wirtschaft, schaffen jedoch auch neue Märkte und Wachstumschancen. Industrieunternehmen stehen vor der Aufgabe, diese Chancen zu nutzen und langfristige Wettbewerbsvorteile zu sichern. Das Management, ausgehend von der Strategie, muss die Produktions- und Logistikprozesse sowie die Wertschöpfung des Unternehmens analysieren, gestalten und steuern. Die vorliegende Masterarbeit bietet hierbei einen Leitfaden zur Bewältigung des Wachstums.

Der zweite Teil dieser Masterarbeit fokussiert sich auf die Entwicklung eines konzeptionellen Planungsunterstützungstools für den Produktionshochlauf im Kontext des rasanten Wachstums. Ziel ist es, einen Informationssystem-Ansatz für das Ramp-Up Management zu schaffen und somit effektiv auf die entstehenden Chancen zu reagieren.

Abstract

This thesis analyzes the challenges that industrial enterprises face due to rapid growth driven by extraordinary external factors such as climate change. Political interventions, regulations, and subsidies influence the economy, but also create new markets and growth opportunities. Industrial companies are tasked with leveraging these opportunities to secure long-term competitive advantages. The management, starting from the strategy, must analyze, shape, and control the production and logistics processes and the value creation of the company. This master's thesis serves as a guide for coping with growth in this context.

The second part of this master's thesis focuses on the development of a conceptual planning support tool for production ramp-up in the context of rapid growth. The goal is to create an information system approach for ramp-up management, effectively responding to the emerging opportunities.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Eidesstattliche Erklärung | II |
| Gleichheitsgrundsatz | III |
| Danksagung | IV |
| Kurzfassung | V |
| Abstract | VI |
| Inhaltsverzeichnis..... | VII |
| Tabellen- und Abbildungsverzeichnis..... | X |
| 1 Einleitung | 13 |
| 1.1 Motivation und Problemstellung..... | 13 |
| 1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung | 15 |
| 1.3 Aufbau der Arbeit..... | 16 |
| 2 Theoretische Grundlagen | 17 |
| 2.1 Logistisches Produktionssystem..... | 17 |
| 2.1.1 Das Produktionssystem | 18 |
| 2.1.1.1 Produktionsmanagement | 22 |
| 2.1.1.2 Lean Management..... | 24 |
| 2.1.1.3 Das agile Produktionssystem | 27 |
| 2.1.2 Die Bedeutung der modernen Logistik | 28 |
| 2.1.2.1 Betriebswirtschaftliche Sicht des Logistikmanagement | 32 |
| 2.1.2.2 Produktionslogistik | 35 |
| 2.1.2.3 Bestandsmanagement..... | 40 |
| 2.2 Unternehmenswachstum..... | 42 |
| 2.2.1 Die Expansionsphase | 44 |
| 2.2.2 Ramp-Up-Management | 46 |
| 2.2.2.1 Ramp-Up-Strategie | 51 |
| 2.2.2.2 Ramp-Up-Planung..... | 53 |
| 2.2.2.3 Ramp-Up-Bewertung | 54 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 2.2.3 | Fazit: Unternehmenswachstum..... | 57 |
| 2.3 | Computerbasierte Modellierung von Logistik- und Produktionssysteme | 58 |
| 2.3.1 | Entwicklungsprozess nach Verifizierung- und Validierungsstandards..... | 62 |
| 2.3.1.1 | Entwicklungsprozess..... | 62 |
| 2.3.1.2 | Verifizierung und Validierung | 67 |
| 3 | Hauptteil der Arbeit | 70 |
| 3.1 | Industriepartner..... | 71 |
| 3.1.1 | Beurteilung aus Wachstumswissenschaftlicher Sicht: Eingliederung und Probleme | 73 |
| 3.1.1.1 | Personalzuwachs..... | 73 |
| 3.1.1.2 | Infrastruktur | 75 |
| 3.1.2 | Ramp-Up-Management des Industriepartners | 78 |
| 3.2 | Praxisteil: Entwicklung eines Planungsunterstützungssystems für das Ramp-Up-Management des Industriepartners | 81 |
| 3.2.1 | Aufgabenbeschreibung und Konzeptentwurf des Modells | 81 |
| 3.2.1.1 | Systemanforderungen an das Modell..... | 82 |
| 3.2.1.2 | Analyse des logistischen Produktionssystems..... | 82 |
| 3.2.1.3 | Konzeptionelles Modell..... | 85 |
| 3.2.2 | Modellformalisierung und Implementierung | 89 |
| 3.2.3 | Datensammlung und -vorbereitung | 100 |
| 3.2.3.1 | Datenquelle: Workshop und Systemanalyse | 101 |
| 3.2.3.2 | Datenquelle: Vorhandene IT-Infrastruktur | 102 |
| 3.2.4 | Experimente und Analyse | 104 |
| 3.2.4.1 | Modellkonfiguration 1 | 106 |
| 3.2.4.2 | Testläufe der Modellkonfiguration 1 für Szenario 1, 2, 3 | 109 |
| 3.2.4.3 | Modellkonfiguration 2..... | 115 |
| 3.2.4.4 | Testläufe der Varianten 1, 2 und 3 für das Szenario 3 | 118 |
| 3.2.4.5 | Bewertung | 122 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| Conclusio | 125 |
| 4 Literaturverzeichnis..... | 127 |

Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Vergleich der Organisationstypen mit Anlehnung an Kummer, Günther und Tempelmeier..... | 21 |
| Tabelle 2: Mögliche Zielkonflikte der Logistik | 34 |
| Tabelle 3: Ereignisabhängige Arbeits- und Verhaltensweisen mit Anlehnung an Säfsten, Harlin et al. (2008) | 53 |
| Tabelle 4: Unternehmensentwicklung von 2018 bis 2024..... | 71 |
| Tabelle 5: Ramp-Up Projektteam des Industriepartners..... | 79 |
| Tabelle 6: Excel Sheet "Netzwerk Konfiguration"..... | 92 |
| Tabelle 7: Excel Sheet "Masterdata Workstations"..... | 102 |
| Tabelle 8: Excel Sheet "Masterdata Locations"..... | 102 |
| Tabelle 9: Excel Sheet "Masterdata Articles"..... | 104 |
| Tabelle 10: Excel Sheet "Masterdata Routing sheet"..... | 104 |
| Tabelle 11: Planungstableau vom Produktionshochlauf des Experiments | 105 |
| Tabelle 12: Stammdaten der Arbeitsstationen des Experiments..... | 107 |
| Tabelle 13: Stammdaten der Artikel des Experiments..... | 108 |
| Tabelle 14: Variable Eingabeparameter des Experiments | 108 |
| Tabelle 15: Modellergebnis - Linieninformationen vom Wertstrom HYC-400 / HYC-200 | 110 |
| Tabelle 16: Modellergebnis - Standort- und Lagerinformationen | 112 |
| Tabelle 17: Modellergebnis - Artikelinformationen für Szenario 1..... | 113 |
| Tabelle 18: Modellergebnis - Transportinformationen für Szenario 1, 2 und 3..... | 114 |
| Tabelle 19: Aktualisierte Stammdaten für Linieninformationen..... | 115 |
| Tabelle 20: Arbeitsstationen der Modellkonfiguration 2..... | 117 |
| Tabelle 21: Aktualisierte Stammdaten für Standortinformationen | 118 |
| Tabelle 22: Aktualisierte Stammdaten für Artikelinformationen | 118 |
| Tabelle 23: Konfiguration der Arbeitsstationen nach Variante 2 | 119 |
| Tabelle 24: Testergebnisse - Standortinformationen Variante 1, 2 und 3..... | 120 |
| Tabelle 25: Bestandsentwicklung bei maximal möglicher Reichweite..... | 121 |
| Tabelle 26: Testergebnisse - Transportinformationen Variante 1, 2 und 3 | 121 |

| | |
|---|-----|
| Tabelle 27: Kennzahlen des logistischen Aufwands | 122 |
| Abbildung 1: Geschätzter weltweiter Absatz von Elektroleichtfahrzeugen von 2015 bis 2022 | 14 |
| Abbildung 2: Aufbau der Forschungsarbeit..... | 16 |
| Abbildung 3: Lagerproduktion versus Kundenauftragsproduktion | 20 |
| Abbildung 4: Elemente des Toyota Production System | 26 |
| Abbildung 5: Die Drei Säulen der Logistik..... | 30 |
| Abbildung 6: Transformationsprozesse in der Logistik | 31 |
| Abbildung 7: Determinanten des Logistik-Servicegrades..... | 33 |
| Abbildung 8: Logistische Erfolgsfaktoren von Produktionsunternehmen..... | 36 |
| Abbildung 9: Logistische Kennlinien für die Referenzprozesse der Produktion | 37 |
| Abbildung 10: Gewichtung logistischer Zielgrößen bei unterschiedlichen Entkopplungsstrategien | 38 |
| Abbildung 11: Komplexität von Produktions-Ramp-Up mit Anlehnung an Almgren (1999) | 48 |
| Abbildung 12: Komplexität von Produktions-Ramp-Up modifiziert von Juerging & Milling (2006) | 48 |
| Abbildung 13: Projektmanagement-Regelkreis..... | 50 |
| Abbildung 14: Unterschiedliche Produktionshochlaufstrategien | 52 |
| Abbildung 15: Define, Measure, Analysis, Improvement, Control-Kreislauf für Six Sigma Projekte | 54 |
| Abbildung 16: Modell als Experiment für eine geplante Änderung | 59 |
| Abbildung 17: Entwicklungsprozess eines computerbasierten Modells nach Verifikations- und Validierungsstandards | 63 |
| Abbildung 18: Entwicklung der Beschäftigung von 2018 bis 2024 | 73 |
| Abbildung 19: Organisationsstruktur 2023 | 75 |
| Abbildung 20: Produzierte Ladesäulen, Anzahl Produktionsstandorte und Anzahl externe Lagerhallen..... | 76 |
| Abbildung 21: Landkarte des standortübergreifenden Produktionssystems..... | 77 |
| Abbildung 22: Vereinfachte Erzeugnisstruktur der Produkte | 83 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 23: Value Stream Map HYC200/HYC400 | 84 |
| Abbildung 24: Identifizierte Verschwendung im Zuge der Systemanalyse | 85 |
| Abbildung 25: Anwendungsmethodik im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung | 89 |
| Abbildung 26: Übersetzung und Ausführung von Java Programme | 90 |
| Abbildung 27: Klassendiagramm Teil 1/2 | 95 |
| Abbildung 28: Klassendiagramm Teil 2/2 | 96 |
| Abbildung 29: Hochlaufkurve des Experiments | 105 |
| Abbildung 30: Konfiguration der Arbeitsstationen nach Variante 3..... | 119 |

1 Einleitung

Im Zuge der kontinuierlichen Veränderungen der Geschäftswelt steht diese Forschungsarbeit vor der fesselnden Aufgabe, eine wegweisende Strategie zur Optimierung des Ramp-Up Managements eines Unternehmens zu erforschen. Das besondere Augenmerk liegt dabei auf der Entwicklung einer computergestützten analytischen Modellierung, welche dazu beitragen soll, die Ramp-Up-Planung des logistischen Produktionssystems zu verbessern, indem Engpässe und Kapazitätsgrenzen antizipativ erkannt werden. Diese Zielsetzung ist vor dem Hintergrund eines außergewöhnlichen dynamischen Wachstums, insbesondere im Bereich der Elektromobilität, von höchster Relevanz.

1.1 Motivation und Problemstellung

Im Zuge der Energiewende haben in den letzten Jahren viele Regierungen grüne Konjunkturpakete verabschiedet, die auf die Reduzierung des Treibhausgasausstoßes abzielen. Laut dem deutschen Umweltbundesamt lagen in Deutschland im Jahr 2022 19,4% der Treibhausgasemissionen auf den Verkehr.¹ Laut Statista betrug der Anteil der weltweiten Kohlendioxidemissionen des Transports im Jahr 2021 20,2%.² Diese Zahlen machen deutlich, dass viele dieser Konjunkturpakete den Sektor Verkehr und Transport ins Visier nehmen, was erhebliche Auswirkungen auf die Marktdynamik der Elektromobilität hat. Abbildung 1 zeigt die weltweiten Verkaufszahlen von Elektromotorgetriebenen Leichtfahrzeugen von 2015 bis 2022.

¹ Umweltbundesamt 2023.

² Statista 2023a.

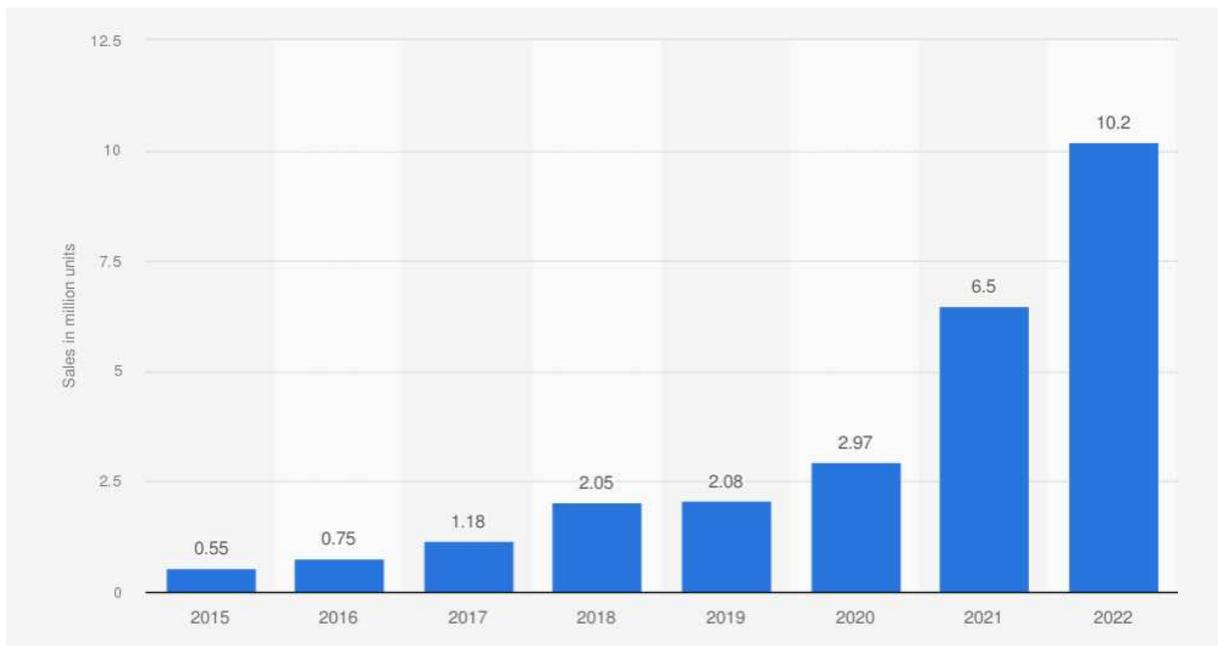


Abbildung 1: Geschätzter weltweiter Absatz von Elektrolichtfahrzeugen von 2015 bis 2022³

Obwohl die Automobilbranche wegen dem weltweiten Mangel an Halbleitern während und nach der Covid-19-Pandemie stagnierte, verzeichnete der Markt für Elektroautos im Jahr 2021 mit über drei Millionen verkauften Einheiten ein Rekordjahr. Prognosen deuten darauf hin, dass sich die jährlichen Verkaufszahlen von Elektroautos bis 2027 mehr als vervierfachen und eine geschätzte globale Marktgröße von etwa 1,4 Billionen US-Dollar erreichen.⁴ Mit dem Anstieg der Verkaufszahlen von Elektroautos, steigt die Nachfrage nach Ladeinfrastruktur und Batterieforschung.⁵ Diese Entwicklungen wecken weltweit das Interesse vieler Investoren, einschließlich Technologieunternehmen wie Apple und Sony, die in den Markt der Elektromobilität einsteigen.⁶ Diese Fakten verdeutlichen, wie die Konjunkturpakete in bestimmten Branchen regelrechte Wettrennen um Marktanteile ausgelöst haben.

Unternehmen sehen sich trotz positiver Wachstumsaussichten erheblichen Herausforderungen gegenübergestellt, bedingt durch die rasante Marktentwicklung. Der steigende Wettbewerbsdruck und Innovationspotenziale führen häufig dazu, dass Unternehmen ihren Verpflichtungen aufgrund des schnellen Wachstums nicht nachkommen können. Dies zeigt sich beispielsweise in unzureichenden Produktionskapazitäten, einem Mangel an Arbeitskräften und Ressourcen sowie

³ Statista 2023b.

⁴ Statista 2023d.

⁵ Statista 2023b.

⁶ Statista 2023c.

sinkenden Margen und einem ausbleibenden Cashflow bei steigendem Umsatz.^{7 8} Das deutsche Sprichwort „Gut Ding braucht Weile“ betont die Bedeutung von Geduld und Ausdauer bei der Verfolgung qualitativer Ziele. Zusätzlich erschweren das rasante Wachstum und der Innovationsdruck der Branche jegliche Prognostizierung und langfristige Planung von Kapazitätserweiterungen. Neue Stücklisten erfordern ständiges Re-Engineering der Fertigungsprozesse, und das Wachstum der Mitarbeiteranzahl beeinflusst die internen Kommunikations- und Koordinationsprozesse. Insgesamt resultiert ein Unternehmenswandel, der schneller vorstättengeht, als er geplant und gesteuert werden kann.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung

Mit dieser Arbeit beabsichtigt der Autor, sich mit typischen Herausforderungen des schnellen Unternehmenswachstums im Industriesektor auseinanderzusetzen. Unternehmen in solchen Wachstumsphasen stehen vor vielfältigen Problemen, die eine enorme Anpassungsfähigkeit erfordern. In Zusammenarbeit mit einem rasant wachsenden Industrieunternehmen, das Ladesäulen für Elektroautos entwickelt und produziert, soll ein computergestütztes Planungsunterstützungstool entwickelt werden, welches gezielt das Ramp-Up-Management unterstützt. Dieses Tool soll nicht nur hohe Flexibilität bieten, sondern auch einen Schwerpunkt auf die antizipative Grobplanung des standortübergreifenden Materialflusses legen. Das Ziel ist, eine umfassende Lösung zu schaffen, die nicht nur die gegenwärtige Ressourcenplanung verbessert, sondern auch Prozesse für zukünftiges Wachstum optimiert. Die primäre Absicht ist dabei, eine optimale Kapazitätsauslastung sicherzustellen, und das Risiko von unbekanntem logistischen Engpässen und Produktionsengpässen bei steigender Nachfrage zu vermeiden.

Die Zielsetzung führt zu folgender Forschungsfrage:

Welche Eigenschaften sollte ein Planungsunterstützungssystem haben, um ein rasant wachsendes Unternehmen bei der Planung des Produktionshochlaufs zu unterstützen?

Aus dieser doch sehr umfangreichen Forschungsfrage lassen sich folgende Unterfragen ableiten:

- Welche Herausforderungen sind bei rasantem Unternehmenswachstum zu erwarten?

⁷ Express 2022.

⁸ Heyne 2001.

- Wie soll der Produktionshochlauf geplant und umgesetzt werden?
- Welche Hebel können getätigt werden, um die Produktivität eines Produktionssystems zu erhöhen und ohne dass die Wirtschaftlichkeit sinkt?

1.3 Aufbau der Arbeit

Wie in Abbildung 2 ersichtlich, gliedert sich die Arbeit in drei Abschnitte:

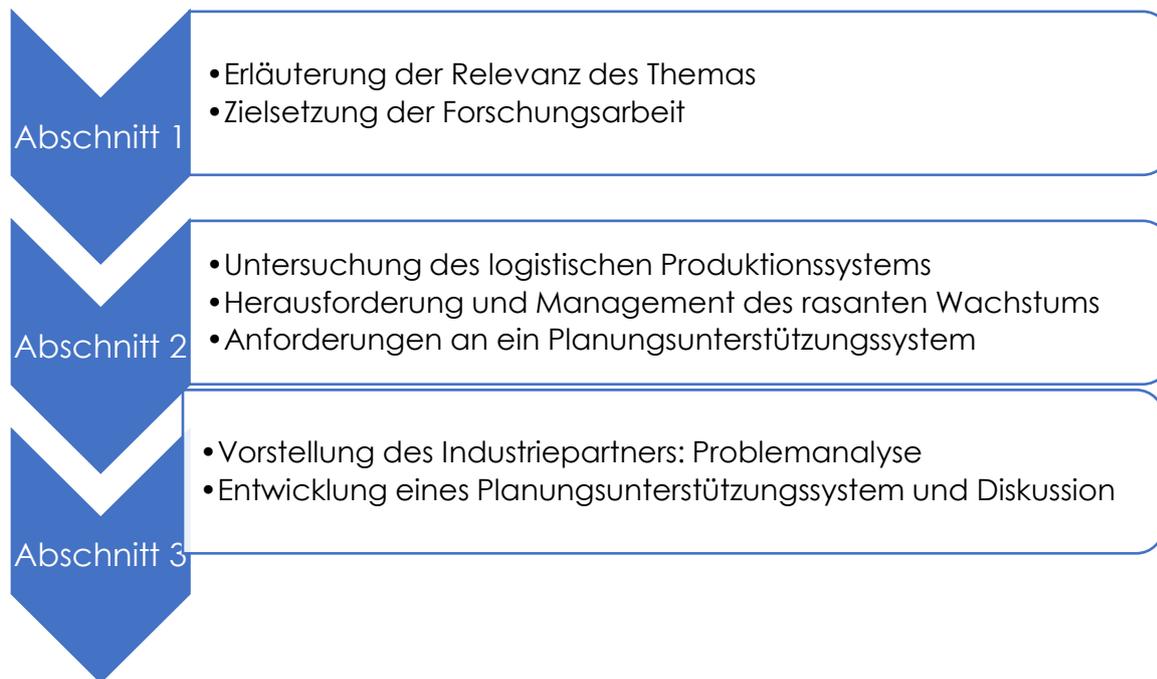


Abbildung 2: Aufbau der Forschungsarbeit

In Kapitel 1 wird die Relevanz des Themas und die Zielsetzung des Forschungsprojekts erläutert. In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen angeführt, welche notwendig sind, die drei Unterfragen der Forschungsfrage zu beantworten. Im Kapitel 3 wird zuerst der Industriepartner vorgestellt. Dabei wird Bezug zu den theoretischen Grundlagen genommen und eine Problemanalyse sowie eine Systemanalyse vorgenommen. Im Anschluss werden die Eigenschaften und Komponenten des erarbeiteten Planungsunterstützungstool erklärt und begründet. Zuletzt werden die Ergebnisse analysiert und auf dieser Grundlage Handlungsempfehlungen entwickelt. Im letzten Abschnitt erfolgt abschließend eine objektive Bewertung des Planungsunterstützungstools. In diesem Zuge wird auf mögliche weiterführende Forschungsfragen verwiesen.

2 Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel legt den theoretischen Grundstein für einen Leitfaden eines effizienten Ramp-Up Managements sowie für die Entwicklung des computergestützten Planungsunterstützungstools. Ziel ist es, die essenziellen Konzepte und Prinzipien zu verstehen, die die Basis für die spätere Anwendung in der Praxis bilden. Der Fokus liegt dabei auf drei Hauptbereichen:

1. Logistisches Produktionssystem
2. Unternehmenswachstum und Ramp-Up-Management
3. Computerbasierte Modellierung

Im Abschnitt "Logistisches Produktionssystem" werden grundlegende Begriffe erläutert und theoretische Grundlagen eines logistischen Produktionssystems beleuchtet. Dies dient einerseits dazu, die Komplexität im Kontext eines überdimensional schnellen Unternehmenswachstums zu erfassen, andererseits auch der Entwicklung eines konzeptionellen Modells. Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Eigenschaften des Wachstums und die damit verbundenen Herausforderungen, die durch das Ramp-Up-Management bewältigt werden müssen. Gleichzeitig soll hier der aktuelle Stand der Forschung zu Unterstützungstools in dieser spannenden Phase aufgearbeitet werden. Abschließend wird im dritten Abschnitt die computerbasierte Modellierung logistischer Produktionssysteme thematisiert. Hierbei wird verdeutlicht, wie Modellierungstechniken zur Bewältigung der Herausforderungen des dynamischen Unternehmenswachstums beitragen können. In der Folge ermöglichen diese theoretischen Grundlagen eine fundierte Analyse und Entwicklung eines effektiven Planungsunterstützungstools.

2.1 Logistisches Produktionssystem

Ein Produktionssystem kann als die geordnete Zusammenstellung von Aufgaben und Prozessen betrachtet werden, die sorgfältig kombiniert sind, um eine ausgewählte Gruppe von Rohstoffen und Halbfabrikaten in eine Vielzahl von Fertigprodukten zu verwandeln. Die drei grundlegenden Funktionen der Fertigung umfassen Beschaffung, Produktion und Distribution.⁹ In der heutigen globalisierten Wirtschaft spielt die effiziente Verknüpfung von Logistik und Produktion eine entscheidende Rolle für den Erfolg eines Unternehmens.¹⁰ Das Logistische Produktionssystem integriert nicht die

⁹ Altioik 1997.

¹⁰ Günther 2005.

beiden Komponenten Logistiksystem und Produktionssystem, um eine nahtlose Verbindung zwischen der Beschaffungs-, Produktions- und Distributionsphase zu schaffen.¹¹ Analyseverfahren und Methodiken des Logistikmanagements und des Produktionsmanagements helfen die Wertschöpfungsketten effizienter zu gestalten und spielen im Rahmen der Optimierung des Logistischen Produktionssystems eine herausragende Rolle.

In folgenden Unterkapiteln werden die Begriffe „Produktion“ und „Logistik“ erläutert, wobei auf ihre Unterscheidung und ihre Bedeutung als Managementfunktion eingegangen wird. Dabei werden moderne Techniken und Methoden des Produktionsmanagements und des Logistikmanagements vorgestellt. Bevor jedoch in die Details eingetaucht wird, ist es notwendig, die Begriffe Effektivität und Effizienz zu klären:¹²

Effektivität misst die Fähigkeit, ein beabsichtigtes Ergebnis zu erzielen, und betrifft die „äußere“ Seite der Organisation - welche Ergebnisse erzielt die Organisation?

Effizienz ist die Messgröße für die Erzielung von Ergebnissen unter Berücksichtigung der eingesetzten Ressourcen.

2.1.1 Das Produktionssystem

Formell ausgedrückt repräsentiert die Produktion einen Transformationsprozess von Inputgüter zu wertgesteigerten Outputgüter. Inputgüter umfassen Rohmaterialien und Halbfabrikate, die durch Faktorkombinationen in fertige Produkte transformiert oder umgewandelt werden. Ressourcen und Stammdaten, so wie von Kummer et al. (2006) beschrieben, sind die Faktoren, die für diese Transformation benötigt werden. Ressourcen umfassen Betriebsmittel wie Maschinen und Werkzeuge sowie Mitarbeiter, die für Produktionsprozesse notwendig sind. Stammdaten beinhalten Stücklisten, Arbeitspläne und Kapazitätsdaten.

Ein Produktionsprozess muss bestimmte Anforderungen erfüllen, um Wertschöpfung zu generieren:^{13 14}

- **Zeit:** Je schneller ein Produktionsprozess ist, desto mehr Wertschöpfung kann generiert werden.

¹¹ Arnold et al. 2008.

¹² Elfriede Krauth, Hans Moonen, Viara Popova, Martijn Schut 2005.

¹³ Kummer et al. 2006.

¹⁴ Günther und Tempelmeier 2009.

- **Flexibilität:** Je flexibler ein Produktionsprozess ist, desto größer ist seine Fähigkeit sich an Veränderungen anzupassen. Dies spiegelt sich in der Anpassungszeit, aber auch im Anpassungsumfang, der aufgrund bestehender Ressourcen und Stammdaten möglich ist.
- **Qualität:** Diese betrifft Eigenschaften und Merkmale des erzeugten Produktes, welche durch Kundenzufriedenheit einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor darstellen.
- **Wirtschaftlichkeit:** Unter Wirtschaftlichkeit versteht man die Effizienz in finanzieller Hinsicht. Sie das Verhältnis von erzielten Erträgen zu aufgebrauchten Aufwendungen oder kostenrechnerisch von erzielten Leistungen zu entstandenen Kosten. Somit ist sie ein Maß dafür, wie rentabel eine bestimmte Aktivität ist und zielt darauf ab, den Einsatz von Ressourcen für diese Aktivität zu rechtfertigen.

Alle vier Leistungsziele sind voneinander abhängig und müssen in Abhängigkeit von den Unternehmenszielen für jedes Produktionssystem individuell ausgewogen und definiert werden.¹⁵

Zur Erfüllung des Sachziels der Wertschöpfung laufen in einem Unternehmen vielfältige Aktivitäten und Prozesse ab, welche ein Materialflussnetzwerk bilden.¹⁶ Hierbei spielt das Produktionssystem eine entscheidende Rolle - ein integraler Bestandteil eines produzierenden Unternehmens, der die Struktur und den Ablauf der Fertigung definiert. Die Struktur des Produktionssystems wird von verschiedenen Faktoren bestimmt, darunter die Erzeugnisstruktur des Endprodukts, die Art der Güter, die Anzahl der zu produzierenden Erzeugnissen, die Kosten der Input-Güter sowie der Individualisierungsgrad für Kunden und die angebotene Produktvielfalt. Die Organisation eines Produktionssystems, also der Organisationstyp der Fertigung, wird wesentlich von der Auflagengröße und dem Kundenentkopplungspunkt geprägt.¹⁷

Hinsichtlich der Auflagengröße unterscheidet man zwischen Massen-, Sorten-, Serien- und Einzelfertigung. Massenfertigung eignet sich für große Stückzahlen gleichartiger Erzeugnisse, während Sortenfertigung auf die Produktion begrenzter Varianten abzielt. Serienfertigung liegt zwischen Massen- und Einzelfertigung und ermöglicht eine gewisse Flexibilität. Einzelfertigung ist für individuelle Produkte oder Kleinserien

¹⁵ Bauer 2017.

¹⁶ Arnold et al. 2008.

¹⁷ Kummer et al. 2006.

geeignet. Die Eignung für größere Auflagen nimmt von der Massen-, Sorten-, Serienfertigung bis hin zur Einzelfertigung ab, während die Flexibilität umgekehrt steigt.¹⁸

Der Kundenentkopplungspunkt gibt an, ab wann im Wertschöpfungsprozess auf Kundenwünsche eingegangen wird. Die Kundeneinbindung erfolgt durch verschiedene Strategien. Make to Stock produziert vorab und lagert Produkte, um sofortige Verfügbarkeit zu gewährleisten. Make To Order fertigt erst nach Bestelleingang, was höhere Flexibilität bei der Individualisierung ermöglicht. Bei Assembly to Order werden Baugruppen vorab produziert und erst nach Bestellung zusammengestellt, um auf Kundenwünsche einzugehen.¹⁹ Abbildung 3 veranschaulicht, dass der Produktionsprozess parallel zum Kundenauftragsabwicklungsprozess ist, wenn es sich um eine Kundenauftragsproduktion handelt. Während bei der Lagerproduktion auf Nachfrageprognosen unabhängig der tatsächlichen Nachfrage produziert wird.

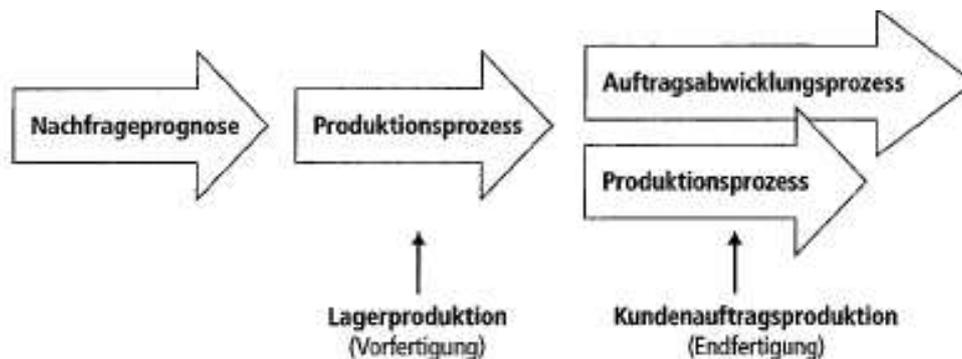


Abbildung 3: Lagerproduktion versus Kundenauftragsproduktion²⁰

Das Produktionssystem kann je nach organisatorischem Ansatz unterschiedliche Typen umfassen, die sich danach richten, ob die Produktion funktionsbezogen oder objektbezogen organisiert ist. Bei einer funktionsbezogenen Produktion wird diese nach bestimmten Funktionseinheiten strukturiert, beispielsweise nach spezifischen Bearbeitungsschritten. Im Gegensatz dazu ist bei der objektbezogenen Produktion die Organisation nach den herzustellenden Objekten ausgerichtet. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal betrifft den Materialfluss, ob er einheitlich ist oder nicht. Bei einem nicht einheitlichen Materialfluss, also einem entkoppelten Materialfluss, muss das Material zwischen den Arbeitsschritten transportiert oder gelagert werden. In

¹⁸ Kummer et al. 2006.

¹⁹ Kummer et al. 2006.

²⁰ Kummer et al. 2006.

Tabelle 1 werden die wesentlichen Organisationstypen bezüglich dieser Eigenschaften gelistet und hinsichtlich der Anforderungen an Produktionsprozesse zur Wertschöpfung bewertet. Dabei wird besonders die Wirtschaftlichkeit anhand der Einflussfaktoren der Auflagengröße und der angebotenen Produktvielfalt betrachtet, wie im vorliegenden Kapitel beschrieben. Die Anordnung der Organisationstypen in Tabelle 1 reflektiert die zunehmende Vorteilhaftigkeit der Organisationstypen mit steigenden Losgrößen und sinkender Produktvielfalt.

Tabelle 1: Vergleich der Organisationstypen mit Anlehnung an Kummer, Günther und Tempelmeier^{21,22}

| Organisationstyp | Struktur | Materialfluss | Zeit | Flexibilität | Qualität | Wirtschaftlichkeit |
|----------------------------|--|---------------|------|--------------|----------|--|
| Werkstattfertigung | Funktionsbezogen | Entkoppelt | -- | ++ | +- | ++ bei kleinen Losgrößen und großer Produktvielfalt |
| Inselfertigung | Objektbezogen | Beliebig | +- | ++ | +- | ++ bei kleinen Losgrößen und mittlerer Produktvielfalt |
| Flexibles Fertigungssystem | Objektbezogen | Beliebig | +- | ++ | +- | ++ bei kleinen Losgrößen und mittlerer Produktvielfalt |
| Reihenfertigung | Objektbezogen | Einheitlich | +- | +- | +- | ++ |
| Fließfertigung | Objektbezogen | Einheitlich | ++ | -- | +- | ++ bei großen Losgrößen und geringer Produktvielfalt |
| Transferstraße | Objektbezogen | Einheitlich | ++ | -- / +- | +- | ++ bei großen Losgrößen und geringer Produktvielfalt |
| ++ | = Vorteile gegenüber den anderen Organisationstypen | | | | | |
| +- | = Weder Vor- noch Nachteile gegenüber den anderen Organisationstypen | | | | | |
| -- | = Nachteile gegenüber den anderen Organisationstypen | | | | | |

²¹ Kummer et al. 2006.

²² Günther und Tempelmeier 2009.

2.1.1.1 Produktionsmanagement

Produktionsbezogene Entscheidungsprobleme lassen sich in langfristige, mittelfristige und kurzfristige Entscheidungen klassifizieren.²³ Daher unterscheidet das Produktionsmanagement drei Ebenen: strategisches, taktisches und operatives Produktionsmanagement.²⁴ Die Hauptaufgabe des Produktionsmanagements besteht darin, sich mit den logistische Zielsetzungen abzustimmen und die gegenseitigen Abhängigkeiten im Hinblick auf eine effiziente Produktion zu berücksichtigen.²⁵ Auf die logistische Zielsetzung eines Produktionsunternehmens wird in Kapitel 2.1.2 näher eingegangen.

Strategisches Produktionsmanagement

Das strategische Produktionsmanagement ist ein Bestandteil der übergeordneten Unternehmensstrategie und befasst sich mit langfristigen Entscheidungen, die die Rahmenbedingungen für zukünftige Leistungsanforderungen beeinflussen. Zu den wesentlichen Themen gehören:^{26 27}

- **Leistungstiefe:** Festlegung des Anteils der Eigenfertigung und Fremdbezuges.
- **Produktionsstandorte:** Dimensionierung des Produktionssystems, Erweiterung oder Errichtung neuer Produktionsstandorte sowie Auswahl des Produktionsstandorts.
- **Produktionstechnologie:** Organisationstyp und Automatisierungsgrad.

Taktisches Produktionsmanagement

Das taktische Produktionsmanagement setzt die Ziele der strategischen Ebene schrittweise um. Dabei wird der Master-Produktionsplan entwickelt, der eine quantitative Zuweisung aktueller Leistungsanforderungen sowie die zeitliche Abstimmung mit den verfügbaren Ressourcen umfasst. Zu den Aufgaben des taktischen Produktionsmanagements gehören:^{28 29}

- **Prozessanalyse**
- **Layoutplanung**
- **Kapazitätsmanagement** (Dimensionierung der Kapazitäten)

²³ Altiok 1997.

²⁴ Kummer et al. 2006.

²⁵ Arnold et al. 2008.

²⁶ Altiok 1997.

²⁷ Kummer et al. 2006.

²⁸ Altiok 1997.

²⁹ Kummer et al. 2006.

- **Qualitätssicherung.**

Operatives Produktionsmanagement

Das operative Produktionsmanagement zielt auf die kurzfristige Ausschöpfung der im strategischen und taktischen Produktionsmanagement geschaffenen Leistungspotenziale ab. Kurzfristige Entscheidungen beinhalten in der Regel tägliche oder wöchentliche Produktionspläne, Materialbedarfsplanung und Ablaufplanung. Es leitet die operativen Prozesse und regelt die Ausführung definierter Aufträge hinsichtlich Menge, Inhalt und Zeit.^{30 31}

Prozessanalyse

Als Bestandteil des taktischen Produktionsmanagement fokussiert sich die Prozessanalyse auf die Untersuchung von Produktionsprozessen anhand verschiedener Prozesskennzahlen, welche folglich erläutert werden. Diese Kennzahlen ermöglichen die Quantifizierung der Prozessleistung, wodurch Ziele und Kriterien transparent werden.³² In diesem Zusammenhang ist die Prozessanalyse eine wichtige Methode zur Verfolgung der logistischen Zielsetzung eines Produktionsunternehmens, auf welche in Kapitel 2.1.2.1 näher eingegangen wird. Die Prozessanalyse umfasst folgende Aufgaben:³³

- Erstellung eines Flussdiagramms: Hierbei werden die verschiedenen Aktivitäten und ihre Beziehungen grafisch dargestellt.
- Berechnung der theoretischen Durchlaufzeit
- Ermittlung der Wartezeiten und Berechnung der Durchlaufzeit-Effizienz
- Berechnung der Kapazitäten und Auslastungen der Prozess-Schritte sowie Identifizierung des Engpässen

Wichtige Prozesskennzahlen sind:

Durchlaufzeit (DLZ): Die Zeit, die benötigt wird, um den Prozess zu durchlaufen, von Input bis Output. DLZ umfasst wertschöpfende Bearbeitungszeit und nicht wertschöpfende Wartezeiten.

Theoretische Durchlaufzeit: Die theoretisch kürzest mögliche Durchlaufzeit, unter Berücksichtigung nur wertschöpfender Zeiten.

³⁰ Altıok 1997.

³¹ Kummer et al. 2006.

³² Kummer et al. 2006.

³³ Kummer et al. 2006.

Durchlaufzeit-Effizient: Verhältnis von theoretischer Durchlaufzeit zur tatsächlichen Durchlaufzeit, ein Indikator für den Anteil der Bearbeitungszeit.

$$\text{DLZ-Effizienz} = \text{Theoretische DLZ [t]} / \text{DLZ [t]}$$

Durchsatz (Kapazität): Die Output-Rate eines Prozesses, die Menge an Output pro Zeiteinheit.

Theoretischer Durchsatz: Die maximale mögliche Output-Rate.

Bestand (Work in Process – WIP): Die Menge an Einheiten im Prozess zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Diese Kennzahlen stehen in einem mathematischen Zusammenhang, bekannt als "**Das Gesetz von Little**":

$$\text{WIP [stk]} = \text{Durchsatz [stk/t]} \times \text{DLZ [t]}$$

Prozessumschlagshäufigkeit (Taktzeit): Das Maß dafür, wie schnell sich der Bestand in Output transformiert.

$$\text{Prozessumschlagshäufigkeit [1/t]} = \text{Durchsatz [stk/t]} / \text{WIP [stk]} = 1/\text{DLZ [t]}$$

Auslastung: Das Verhältnis zwischen tatsächlicher Output-Rate und theoretischer maximaler Kapazität. Wenn die Auslastung nicht 1 ist, heißt das im Folgeschluss, dass noch freie Produktionskapazität zur Verfügung steht.

$$\text{Auslastung} = \text{Durchsatz [stk/t]} / \text{Theoretischer Durchsatz [stk/t]}$$

Die Prozessanalyse ermöglicht somit eine detaillierte Bewertung und Optimierung der Produktionsprozesse anhand dieser entscheidenden Kennzahlen.

2.1.1.2 Lean Management

Der Begriff "Lean" bezieht sich darauf, die Produktionsprozesse schlanker und effizienter zu gestalten, indem Verschwendungen eliminiert und Ressourcen optimal genutzt werden. Lean Management/Lean Production repräsentiert somit keinen technologischen Fortschritt, sondern vielmehr einen erfolgreichen Paradigmenwechsel im industriellen Produktionskontext.³⁴

Während der Industrialisierung etablierte sich die Massenproduktion durch die Fixkostendegression des Skaleneffekts (economies of scale) als Erfolgsrezept zur

³⁴ Reinhart 2017.

Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit.³⁵ ³⁶ Die Massenproduktion entwickelte spezifische Organisationsformen wie Fließfertigung und Transferstraße, die darauf abzielten, Bauteile in großen Mengen kosteneffizient und in erforderlicher Qualität herzustellen, basierend auf festen Werkzeugen und Automatisierung.³⁷ Der Ursprung des Lean Managements liegt in der japanischen Produktionsphilosophie, die als Reaktion auf die Herausforderungen der Nachkriegszeit entstand. Die Grundidee besteht darin, dass Unternehmen gerade in Krisenzeiten durch kontinuierliche Verbesserung der internen Abläufe und verstärkte Fokussierung auf Prozessqualitätssicherung ihre Ressourcen vollständig ausschöpfen sollten. Dies birgt Potenzial für Kostenreduktionen, was einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil gegenüber Mitbewerbern ermöglicht.³⁸ Aus diesem Grund wird Lean Production nach Meinung vieler nicht als neue Technik, sondern als Verbesserung der Massenproduktion betrachtet.³⁹ Eine Schlüsselfigur in diesem Kontext ist Taiichi Ohno, der das "Toyota Produktionssystem" (TPS) entwickelte. Ohnos Werk, erstmals 1978 in Japan veröffentlicht, fasst seine Erfahrungen in der Entwicklung von bedarfsgetriebenen, sich kontinuierlich selbst verbessernden und schlanken "Just-in-Time" Produktionssystemen zusammen.⁴⁰ Ohno erklärte ihre Absicht, als "Alles, was wir tun, ist, auf die Zeitlinie vom Moment an zu schauen, wenn uns ein Kunde einen Auftrag gibt, bis zum Zeitpunkt, wenn wir das Geld erhalten. Und wir verkürzen diese Zeitspanne, indem wir die nicht wertschöpfenden Verschwendungen entfernen."⁴¹ In Abbildung 4: Elemente des Toyota Production System" sind die Kernelemente des Toyota Produktionssystems dargestellt.

³⁵ Bichler 2011.

³⁶ Hosp 2001.

³⁷ Mehrabi et al. 2002.

³⁸ Wagner und Lindner 2022.

³⁹ Mehrabi et al. 2002.

⁴⁰ Arnold et al. 2008.

⁴¹ Reinhart 2017.

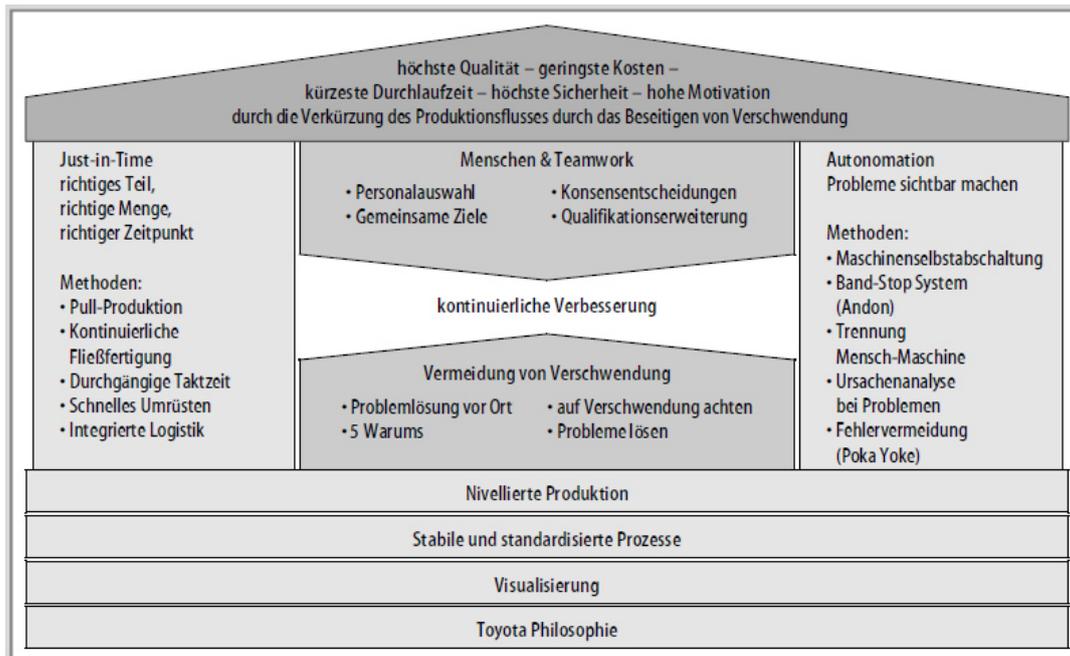


Abbildung 4: Elemente des Toyota Production System⁴²

Die Ideen und Prinzipien des Lean Managements wurden erst in den 1980er Jahren durch Autoren wie Schonberger in den USA, in Deutschland durch Wildemann und schließlich weltweit durch Womack, Jones und Roos bekannt gemacht. Diese Autoren trugen maßgeblich dazu bei, die Grundsätze des Lean Managements zu verbreiten und es zu dem Leitbild modernen "Lean Managements" zu entwickeln.⁴³ Heutzutage ist Lean Management eine zentrale Methodik im Produktionsmanagement, unter der man die Identifizierung und Reduktion von „Verschwendungen“ innerhalb des Unternehmens versteht. Verschwendungen sind dabei als Aktivitäten definiert, die aus Sicht des Kunden keinen wertschöpfenden Aspekt beinhalten. Diese können wie folgt kategorisiert werden:⁴⁴

- **Überproduktion:** Im TPS wird Überproduktion als die „schlimmste Art der Verschwendung“ angesehen, da sie alle anderen Verschwendungsarten mit sich zieht.
- **Bewegungsabläufe:** Mitarbeiter bewegen sich oft unnötig, haben große Laufwege und können nicht kontinuierlich wertschöpfende Arbeit verrichten.
- **Materialbewegung und Transporte:** Transporte und Materialbewegungen dienen aus Sicht des Kunden nicht der Wertschöpfung.
- **Wartezeiten:** Wartende Mitarbeiter erzeugen keinen Mehrwert.

⁴² Arnold et al. 2008.

⁴³ Arnold et al. 2008.

⁴⁴ Wagner und Lindner 2022.

- **Verschwendung im Prozess(-schritt):** Wenn zusätzliche Tätigkeiten notwendig werden, um die gewünschten Ergebnisse zu erreichen, weil der Prozess nicht in der Lage ist.
- **Bestände:** Bestände entsprechen ungenutztem Kapital. Es kann zwischen Rohmaterial, WIP und fertige Produkte unterschieden werden.
- **Fehler und Nacharbeit:** Hier zeigt sich die Verschwendung deutlich an unnötigem Aufwand, ineffektiver Nutzung der Ressourcen und in Qualitätsproblemen.
- **Qualifikation der Mitarbeiter, Arbeitsbedingungen und Arbeitsklima:** Diese Kategorie ist nicht in der traditionellen Definition des TPS zu finden, jedoch für moderne Unternehmen von Bedeutung für nachhaltigen Erfolg und gleichzeitig ein entscheidender Faktor in der Wachstumsphase.⁴⁵ Zum einen soll das Wissen und die Fähigkeiten der Mitarbeiter vollständig genutzt werden. Weiters dürfen Arbeitsbedingungen nicht zu Fehlzeiten der Mitarbeiter führen. Letzteres betrifft das Arbeitsklima, welches keine Kündigungen oder andere Folgen der Demotivation verursachen sollte.

Lean Management ist ein multidimensionaler Ansatz, der eine Reihe von „Standard“ Werkzeugen umfasst, um durch ganzheitliche Betrachtung des Unternehmens, durch Kundenorientierung und Qualitätssicherung, also der Vermeidung von Fehlern und Verschwendungen, die Produktivität zu steigern, Kosten zu reduzieren und den Profit zu maximieren.^{46 47 48 49} Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die kontinuierliche Verbesserung; Lean sollte nicht als kurzfristige oder radikal durchgesetzte Maßnahme verstanden werden. Es ist entscheidend dieses Konzept langfristig und kontinuierlich einzusetzen, um strategische Vorteile gegenüber Wettbewerbern zu erzielen.^{50 51}

2.1.1.3 Das agile Produktionssystem

In einem sich ständig wandelnden Umfeld ist es für Unternehmen von entscheidender Bedeutung, flexibel auf Veränderungen zu reagieren. Mit der Verschiebung der Märkte in den letzten Jahren hin zur „Mass Customization“, also der Fertigung auf Kundenauftrag in der Auflagengröße der Massenfertigung, gewinnt die

⁴⁵ Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

⁴⁶ Mehrabi et al. 2002.

⁴⁷ Braglia et al. 2019.

⁴⁸ Reinhart 2017.

⁴⁹ Wannenwetsch 2010.

⁵⁰ Zsifkovits 2012.

⁵¹ Mehrabi et al. 2002.

reaktionsschnelle Agierung zunehmend an Bedeutung.⁵² Dabei spielen die Strategien "Explore" (Erkunden) und "Exploit" (Ausnutzen) eine zentrale Rolle. "Explore" steht für die kontinuierliche Erkundung neuer Möglichkeiten, während "Exploit" die effiziente Nutzung vorhandener Ressourcen bedeutet.⁵³ Agilität wird von Saaty und Vargas(2001) als die Fähigkeit beschrieben, „unter Segel schnell manövrieren zu können“.⁵⁴

Agilität, betont durch Flexibilität und kontinuierliche Verbesserung, unterstützt Unternehmen dabei, dynamisch auf Marktveränderungen zu reagieren und gleichzeitig eine robuste Struktur zu bewahren.⁵⁵ Dabei liegt der Fokus auf organisatorischen Aspekten eines Fertigungsunternehmens, das einzelne Unternehmen zusammenbringt, um ein Netzwerk von Herstellern und deren Lieferanten über fortschrittliche Computernetzwerke und Kommunikationssysteme zu bilden.⁵⁶ Moderne Paradigmen für die Gestaltung von Fertigungssystemen konzentrieren sich auf die Notwendigkeit, eine hohe Reaktionsfähigkeit zu erreichen, indem sie die Durchlaufzeit als Hauptinstrument zur Aufrechterhaltung der Kosteneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit in solchen Marktszenarien verkürzen.⁵⁷

Agile Methoden werden zunehmend in Automobilunternehmen eingeführt, um im Systementwicklungsprozess effizienter und flexibler zu werden.⁵⁸

2.1.2 Die Bedeutung der modernen Logistik

Der Begriff "Logistik" ist traditionell mit physischen Aufgaben wie Transport, Umschlag und Lagerhaltung, der sogenannten TUL-Logistik, verbunden.⁵⁹ TUL steht für Transport, Umschlag, Lagerung, wobei auch logistische Dienstleistungen wie Verpacken, Kommissionieren, Etikettieren oder Palettieren dazu gehören.⁶⁰

Mit dem Aufkommen von Massenproduktionssystemen während der Industrialisierung wurde die Logistik als eigenständige Funktion anerkannt. Ihre Kernaufgabe, bekannt unter der 6-R Regel⁶¹, besteht darin, das

⁵² Castellano et al. 2019.

⁵³ Wagner und Lindner 2022.

⁵⁴ Saaty und Vargas 2001.

⁵⁵ Mehrabi et al. 2002.

⁵⁶ Mehrabi et al. 2002.

⁵⁷ Castellano et al. 2019.

⁵⁸ Wohlrab et al. 1993.

⁵⁹ Arnolds et al. 2013.

⁶⁰ Kummer et al. 2006.

⁶¹ Schuh und Stich 2013.

1. richtige **Produkt**,
2. in der richtigen **Menge**,
3. zur richtigen **Qualität**,
4. zur richtigen **Zeit**,
5. am richtigen **Ort**,
6. und zu den richtigen **Kosten**

bereit zu stellen.

Die japanische Philosophie des Lean Management wie in Kapitel 2.1.1.2 beschrieben, hat sich die Logistik zu einem äußerst komplizierten Aufgabenbereich entwickelt und musste sich dementsprechend neu aufstellen.⁶² Diese Entwicklung der Logistik führte zu verschiedenen Definitionen, die verdeutlichen, dass moderne Logistik weit mehr ist als nur der Transport von Waren.

Weber und Kummer beschreiben die Logistik 1990 als das Prozessmanagement der Wertschöpfungskette, mit dem Ziel das Leistungssystem des Unternehmens flussorientiert zu gestalten.⁶³ Laut Schuh und Stich (2013) ist Logistik die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und -übergreifenden Güter- und Informationsflüsse.⁶⁴ Zsifkovits (2012) definiert folgendermaßen: „Logistik ist die integrierte Planung, Gestaltung, Abwicklung und Kontrolle des gesamten Materialflusses vom Lieferanten in das Unternehmen, innerhalb des Unternehmens, vom Unternehmen zum Kunden, der Rückführung von Gütern in einem Kreislauf sowie der für die Steuerung des Materialflusses erforderlichen Informationsflüsse. Logistik ist das Management vernetzter Prozesse innerhalb und außerhalb des Unternehmens, die wie Kettenglieder ineinandergreifen und direkt oder indirekt der Wertsteigerung im Sinne des Kundennutzens dienen.“⁶⁵ Der Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) definiert Logistikmanagement als Teil des Supply-Chain-Managements, der den effizienten Vorwärts- und Rückfluss von Gütern, Dienstleistungen und Informationen plant. Supply Chain Management umfasst dabei die Planung und Verwaltung aller Aktivitäten im Zusammenhang mit Beschaffung, Einkauf, Umwandlung und allen logistischen Managementaktivitäten.⁶⁶

⁶² CHOW et al. 2005.

⁶³ Kummer et al. 2006.

⁶⁴ Schuh und Stich 2013.

⁶⁵ Zsifkovits 2012.

⁶⁶ Vgl. Council of Supply Chain Management Professionals. (Übersetzung durch den Autor)

Unter Berücksichtigung der vorliegenden Definitionen hat sich der Fokus der Logistik von der bloßen Koordination von Transport, Umschlag und Lagerung wegbewegt. Stattdessen hat sich dieser erweitert, nun umfasst Logistik das Gestalten und Managen sämtlicher unmittelbarer und mittelbarer wertschöpfender Prozesse innerhalb von Unternehmen sowie in unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsketten. Die moderne Logistik repräsentiert einen umfassenden Ansatz zur Organisation von Warenflüssen, Informationsströmen und dem effizienten Einsatz von Ressourcen, um den Erwartungen der Kunden gerecht zu werden.⁶⁷ Als Koordinationsfunktion geht die Logistik über die Optimierung der material- und warenflussbezogenen Dienstleistungen innerhalb der betrieblichen Funktionsbereiche hinaus und versucht, eine Abstimmung zwischen den unterschiedlichen Funktionsbereichen wie F&E, Beschaffung, Produktion oder Absatz vorzunehmen. In diesem Sinne wird sie auch als Querschnittsfunktion bezeichnet.⁶⁸ Laut Baumgarten (2008) sind die wesentlichen Eckpfeiler einer exzellenten Logistik die Kundenorientierung, die Prozessorientierung und der ganzheitliche, integrative Ansatz.⁶⁹ Somit entwickelte sich das Logistikmanagement in den vergangenen Jahrzehnten eine immer wichtigere Rolle für industriell produzierenden Unternehmen und hat sich mittlerweile zu einer integrativen Führungsfunktion entwickelt.⁷⁰

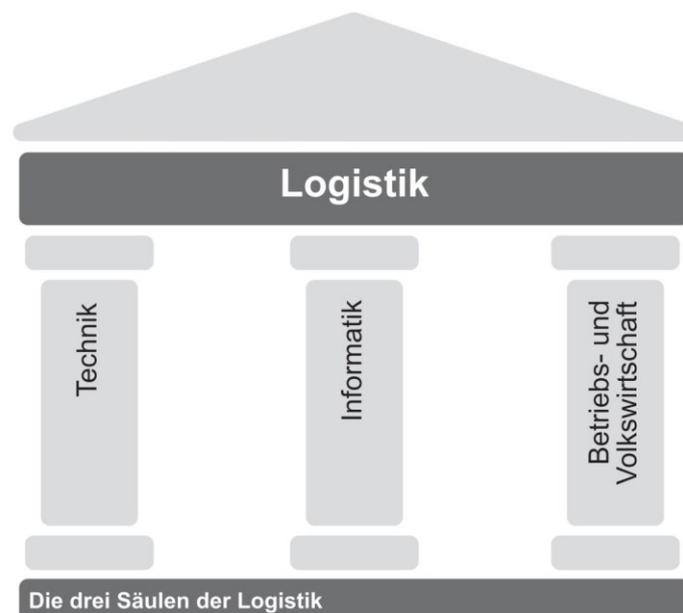


Abbildung 5: Die Drei Säulen der Logistik⁷¹

⁶⁷ Gözaçan und Lafci 2020.

⁶⁸ Kummer et al. 2006.

⁶⁹ Baumgarten 2008.

⁷⁰ Oberhofer et al. 2005.

⁷¹ Hompel et al. 2007.

Die moderne Logistik basiert auf einem Zusammenspiel von Technik, Informatik und Betriebs- sowie Volkswirtschaft.⁷² Diese drei Disziplinen werden in Abbildung 5 als die drei Säulen der Logistik bezeichnet.

Die technische Perspektive betont den Materialfluss als physische Komponente logistischer Prozesse, bei dem alle Schritte von der Gewinnung über die Be- und Verarbeitung bis zur Verteilung von Gütern innerhalb definierter Bereiche als Verkettung betrachtet werden. Materialflusssysteme setzen sich aus mindestens zwei Logistikobjekten zusammen, die diskrete Einzelemente oder Subsysteme repräsentieren. Diese Logistikobjekte bilden vielfältige logistische Systeme, die in unterschiedlichen Kombinationen, häufig hierarchisch strukturiert, in logistischen Prozessen interagieren. Grundsätzlich kann man zwischen Objekten der Logistik unterscheiden, die als Güter, Informationen oder Energie im Verlauf ihres Aufenthalts im logistischen System einen Transformationsprozess durchlaufen, und solchen, die als Arbeitsmittel (Materialflussmittel, Produktionsmittel, Informationsflussmittel) zusammen mit der notwendigen Infrastruktur (Gebäude, Flächen, Wege) die Veränderungen der Objekte in Systemen bewirken.⁷³ Dieser logistische Transformationsprozess wird in Abbildung 6 veranschaulicht.



Abbildung 6: Transformationsprozesse in der Logistik⁷⁴

Die Logistik zählt zu den Sektoren, deren effiziente Funktion ohne die Unterstützung von Informationstechnologie nicht gewährleistet wäre.⁷⁵ Informatik betrachtet die Logistik

⁷² Hompel et al. 2007.

⁷³ Hompel et al. 2007.

⁷⁴ Hompel et al. 2007.

⁷⁵ Wozniakowski et al. 2018.

als einen speziellen Fall der Datenverarbeitung, bei dem ein kontinuierlicher Datenstrom unmittelbar mit dem Transport von Gütern verbunden ist. Dies umfasst die Verarbeitung von Informationen an Objekten des Materialflusses, die Kommunikation entlang der logistischen Kette und die weltweite Informationskette zur Abstimmung von Lagerbeständen und Nachfrage.⁷⁶ Ohne die engmaschige Vernetzung zwischen der Beschreibung von Eingabedaten und deren Bereitstellung durch die Informatik sind die Potenziale zur Kostensenkung und die Wettbewerbsvorteile auf den Absatzmärkten im Vergleich zu Mitbewerbern nur schwer zu realisieren. Der logistische Lösungsansatz erfordert somit die Entwicklung entsprechender Informations- und Kommunikationstechnologie-Programme sowie die kontinuierliche Wartung der dabei genutzten Bewegungsdaten.⁷⁷

2.1.2.1 Betriebswirtschaftliche Sicht des Logistikmanagement

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht fungiert die Logistik als spezieller Führungsansatz zur Entwicklung, Gestaltung, Lenkung und Realisierung effizienter Flüsse von Objekten (Güter, Informationen, Gelder, Personen) in unternehmens- und übergreifenden Wertschöpfungssystemen. Der Fokus liegt dabei auf Distribution, Marketing, strategischem Handeln, Kosten und der überbetrieblichen Vernetzung.⁷⁸ Durch ein effizientes Logistikmanagement ist es möglich die Wettbewerbsposition der Unternehmen nachhaltig zu verbessern. Als Wettbewerbsstrategien gibt es zwei prinzipielle Ansätze, nämlich die der „Kostenführerschaft“ und die der „Differenzierung“.⁷⁹ Die Differenzierungsstrategie wird anhand eines hohen Servicelevel durch effektiver Logistikleistung verfolgt.⁸⁰ Darunter versteht man kurze Lieferzeiten, sowie hohe Lieferbereitschaft, hohe Lieferqualität und hohe Lieferflexibilität. Nähere Definitionen, sowie Einflussfaktoren sind in Abbildung 7: „Determinanten des Logistik-Servicegrades“ zu entnehmen.⁸¹

⁷⁶ Hompel et al. 2007.

⁷⁷ Arnolds et al. 2013.

⁷⁸ Hompel et al. 2007.

⁷⁹ Gleißner und Femerling 2008.

⁸⁰ Schuh und Stich 2013.

⁸¹ Gleißner und Femerling 2008.

| | |
|---------------------------|---|
| Lieferzeit | <p>Definition: Zeitspanne zwischen der Auftragserteilung durch den Kunden und dem Wareneingang in dessen Lager</p> <p>Beeinflussbar durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftragsübermittlung und Auftragsbearbeitung ▪ Versand und Transport ▪ Lagerstandort |
| Lieferqualität | <p>Definition: Erfüllung der Kundenanforderung in Bezug auf Beschaffenheit und Zusammensetzung der Ware</p> <p>Beeinflussbar durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zustand (Verpackung/Verladung/Transport) ▪ Art & Menge (Auftragsbearbeitung/Kommissionierung) |
| Lieferflexibilität | <p>Definition: Fähigkeit, Liefermodalitäten und Produktauslieferung den spezifischen Kundenerfordernissen anzupassen</p> <p>Beeinflussbar durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Auftragsabwicklung ▪ Verpackung und Transport |
| Lieferbereitschaft | <p>Definition: Wahrscheinlichkeit, eine Kundenanfrage in einer vorgegebenen Zeit zu bearbeiten</p> <p>Beeinflussbar durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestandsführung (Verfügbarkeit) |

Abbildung 7: Determinanten des Logistik-Servicegrades⁸²

Neben den Differenzierungsmöglichkeiten ist die Bedeutung der Logistik für die Unternehmen stark gestiegen, weil die Logistikkosten einen immer höher werdenden Anteil an den Gesamtkosten darstellen.⁸³ Logistikkosten können dabei definiert werden als der bewertete Einsatz an Produktionsfaktoren in Logistiksystemen. Sie sind dann gerechtfertigt, wenn ihnen eine entsprechende Leistung als Systemoutput gegenübersteht. Die Kosten, die für die Erbringung dieser Logistikleistung anfallen, lassen sich in Bestandskosten, Lagerkosten, Transportkosten, Handlingkosten sowie Planungs-, Steuerungs- und Systemkosten unterteilen.⁸⁴ Die BVL erhob, dass der Anteil der Unternehmen, die die Logistikkosten nicht beziffern können bei 47% liegt und der Unternehmen, die sie nicht im Detail kennen, bei 25% liegt.⁸⁵ Diese Zahlen spiegeln das Rationalisierungspotential wider,⁸⁶ jedoch ist die Minimierung der Logistikkosten ist,

⁸² Gleißner und Femerling 2008.

⁸³ Gleißner und Femerling 2008.

⁸⁴ Koch 2012.

⁸⁵ Straube und Pfohl 2008.

⁸⁶ Gleißner und Femerling 2008.

gerade als Querschnittsfunktion über verschiedener Funktionsbereiche eines Unternehmens, herausfordernd, da beim Versuch viele Zielkonflikte entstehen. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** soll einige mögliche Zielkonflikte der Logistik mit verschiedenen Funktionsbereichen verdeutlichen:^{87 88 89}

Tabelle 2: Mögliche Zielkonflikte der Logistik⁹⁰

| Bereich/Abtl. | Ziele | Zielkonflikt |
|-------------------------|---|---|
| Produktion | hohe Verfügbarkeit der Teile | hohe Kapitalbindung im Lager |
| Einkauf | geringe Einstandspreise, hohe Rabatte, Boni, Skonti | hohe Abnahmemengen, hohe Kapitalbindung |
| Qualitäts- sicherung | hohe Qualität | intensive Stichprobenprüfung, hohe Prüfkosten |
| Lager- management | hohe Teilverfügbarkeit | hohe Lagermenge und damit hohe Kapitalbindung und Lagerkosten |
| Distribution | schneller Transport | hohe Transportkosten |
| Verkauf | hohe Teilverfügbarkeit | hohe Lagerbestände bzw. hohe Kapitalbindung |
| Controlling | geringe Kapitalbindung und hohe Liquidität | geringe Lagerbestände und damit Gefahr von Fehlmengen bzw. Produktionsstop infolge fehlender Teile |
| Produktion | geringe Rüstkosten | Produktion vieler homogener Teile und damit Gefahr von hohem Lagerbestand |
| Kunde | individuelle Produkte, Flexibilität | hohe Rüstkosten, viele Varianten, Ladenhüter |
| Einkauf | geringe Kapitalbindung durch Just-in-Time Anlieferung | Gefahr von Lieferengpässen, Fehlmengenkosten |
| Produktion | Kostenersparnis durch Standardisierung der Teile | mangelnde Kundenflexibilität und Individualisierung der Produkte |
| Kommissio- nierung | schnelle Kommissionier- zeiten | hohe Investitionskosten in Lager- haltung und Kommissionierung |
| Service | optimaler Kundendienst | hohe Personalkosten |
| Ersatzteillog. | schnelle Teilverfügbarkeit | hoher Lagerbestand |
| Vertrieb | umfassendes Produktsortiment | viele Lagerplätze, Lagerkosten, geringer Lagerumschlag |
| Logistik | hohe Informationsbereitschaft | hohe Investitionen in Hardware und Software |

Unternehmerische Wertschöpfungsprozesse und Logistikaktivitäten weisen eine Vielzahl wechselseitiger Abhängigkeiten auf, deren Vernachlässigung zu erheblichen Kosten führen kann. Diese wechselseitigen Abhängigkeiten betonen die Wichtigkeit des System- und Gesamtkostendenken des modernen Logistikmanagement. Es

⁸⁷ Wannenwetsch 2010.

⁸⁸ Schuh und Stich 2013.

⁸⁹ Koch 2012.

⁹⁰ Wannenwetsch 2010.

berücksichtigt von Anfang an unternehmerische Gesamtzusammenhänge und Interdependenzen, um Kosten zu minimieren.⁹¹ Laut Wannenwetsch (2010), Schuh und Stich (2013) et al. ist das ökonomische Hauptziel des Logistikmanagements die Optimierung der Logistikeffizienz, die sich durch maximale Logistikleistung bei minimalen Logistikkosten auszeichnet.^{92 93}

2.1.2.2 Produktionslogistik

Die Produktion, als primärer Ort der Leistungserfüllung und Wertschöpfung, steht vor der Herausforderung, wesentliche Beiträge zur Steigerung der Effektivität zu leisten. Dabei liegt der Fokus darauf, den gesamten Materialfluss von der Beschaffung über alle Produktionsstufen bis zur Versorgung des Vertriebs effizient zu gestalten, um schnell auf Marktanforderungen reagieren zu können. Die Produktionslogistik spielt hier eine maßgebliche Rolle und ist Ziel intensiver Bemühungen in Forschung und Praxis, um die Gestaltung und den Betrieb logistischer Systeme zu professionalisieren.⁹⁴ Dabei nimmt die Produktionslogistik die Rolle der Planung, Steuerung und Überwachung der Produktion ein und sorgt für die fließende Versorgung der einzelnen Fertigungsstufen.⁹⁵ Die Faktoren Zeit, Qualität und Kosten der Produktionsprozesse haben einen wesentlichen Einfluss auf die maximale Wertschöpfung der Produktion.⁹⁶

Die logistischen Zielsetzungen für produzierenden Unternehmen sind, wie aus Abbildung 8 ersichtlich, die Fähigkeit der Zusage gewünschter Liefertreue, Einhaltung zugesagter Liefertermine, sowie marktfähige Produktionskosten.⁹⁷

⁹¹ Koch 2012.

⁹² Wannenwetsch 2010.

⁹³ Schuh und Stich 2013.

⁹⁴ Nyhuis 2003.

⁹⁵ Schuh und Stich 2013.

⁹⁶ Vgl. Kapitel 2.1.1 Das Produktionssystem

⁹⁷ Nyhuis 2003.

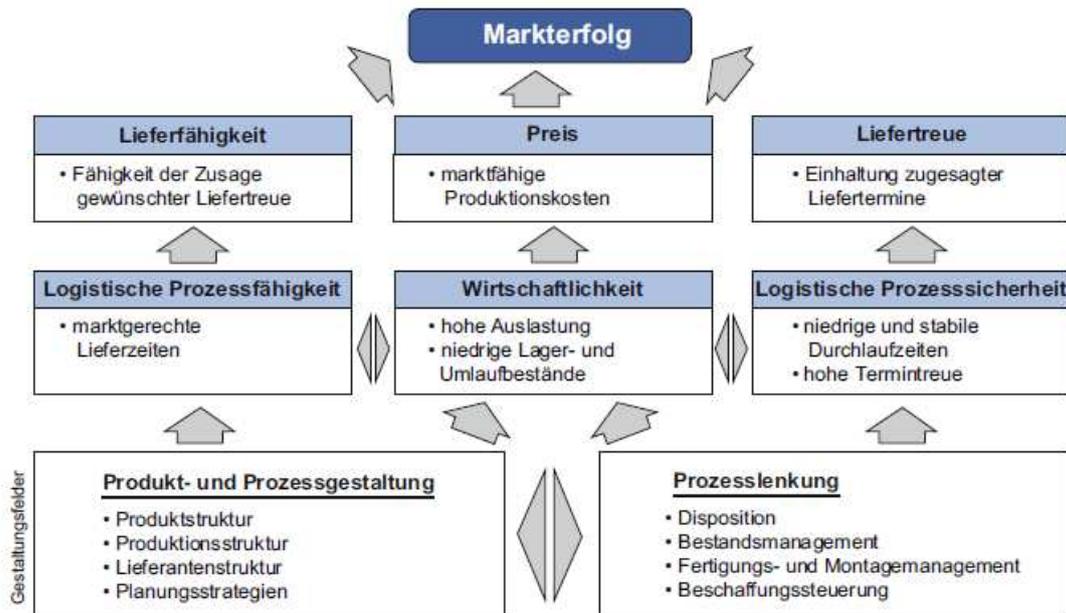


Abbildung 8: Logistische Erfolgsfaktoren von Produktionsunternehmen⁹⁸

Die Lieferfähigkeit zeigt, inwieweit der Vertrieb unter Berücksichtigung der Produktionsgegebenheiten Liefertermine zusagen kann. Die Liefertreue hingegen misst, in welchem Maße zugesagte Termine tatsächlich realisiert werden. Beide sind neben marktfähigen Produktionskosten entscheidend für den langfristigen Markterfolg. Um eine hohe Lieferfähigkeit sicherzustellen, müssen Produkt-, Produktions- und Lieferantenstrukturen so gestaltet werden, dass sie marktgerechte Lieferzeiten ermöglichen. Die Prozesslenkung ist entscheidend, um das logistische Potenzial durch Disposition, Bestandsmanagement und operative Steuerung auszuschöpfen und eine hohe logistische Prozesssicherheit zu gewährleisten.⁹⁹

Die Wechselwirkung zwischen Leistungs- und Kostenzielen ist bei der Gestaltung und Lenkung unternehmenslogistischer Abläufe zu berücksichtigen. Eine hohe Auslastung der Kapazitäten ist für marktfähige Produktionskosten anzustreben, gleichzeitig sollten Lager- und Umlaufbestände minimiert werden, um Kapitalbindungskosten zu reduzieren.¹⁰⁰

Das Dilemma der Ablaufplanung

Die gezielte Stärkung der logistischen Erfolgsfaktoren wird durch bestehende Zielkonflikte erschwert. Die zu berücksichtigenden Zielsetzungen und Anforderungen sind nicht widerspruchsfrei und variieren örtlich und zeitlich. Zum Beispiel erfordert die

⁹⁸ Nyhuis 2003.

⁹⁹ Nyhuis 2003.

¹⁰⁰ Nyhuis 2003.

Sicherung hoher Auslastung hohe Bestände, die wiederum lange Durchlaufzeiten zur Folge haben. Dieser Zusammenhang wurde bereits im Kapitel 2.1.1.1 "Prozessanalyse" unter der Formel von Little's Law vorgestellt.¹⁰¹ Diese langen und stark schwankenden Durchlaufzeiten stehen jedoch im Konflikt mit dem Ziel hoher Termintreue. Dieses Dilemma der Ablaufplanung veranschaulicht, dass es prinzipiell nicht nur ein Ziel, dessen Wert es zu maximieren oder zu minimieren gilt, sondern es müssen immer die Auswirkungen von Maßnahmen auf alle Teilziele gleichzeitig berücksichtigt werden. Das erfordert eine simultane Berücksichtigung aller Teilziele und wird durch unterschiedliche Gewichtungen der Ziele im Produktionsprozess erschwert.¹⁰² Abbildung 9 veranschaulicht die Auswirkung von steigendem Bestand auf die logistischen Zielgrößen der Termineinhalung, Durchlaufzeiten, Leistung und Kosten für die drei Referenzprozesse Produzieren, Transportieren sowie Lagern.

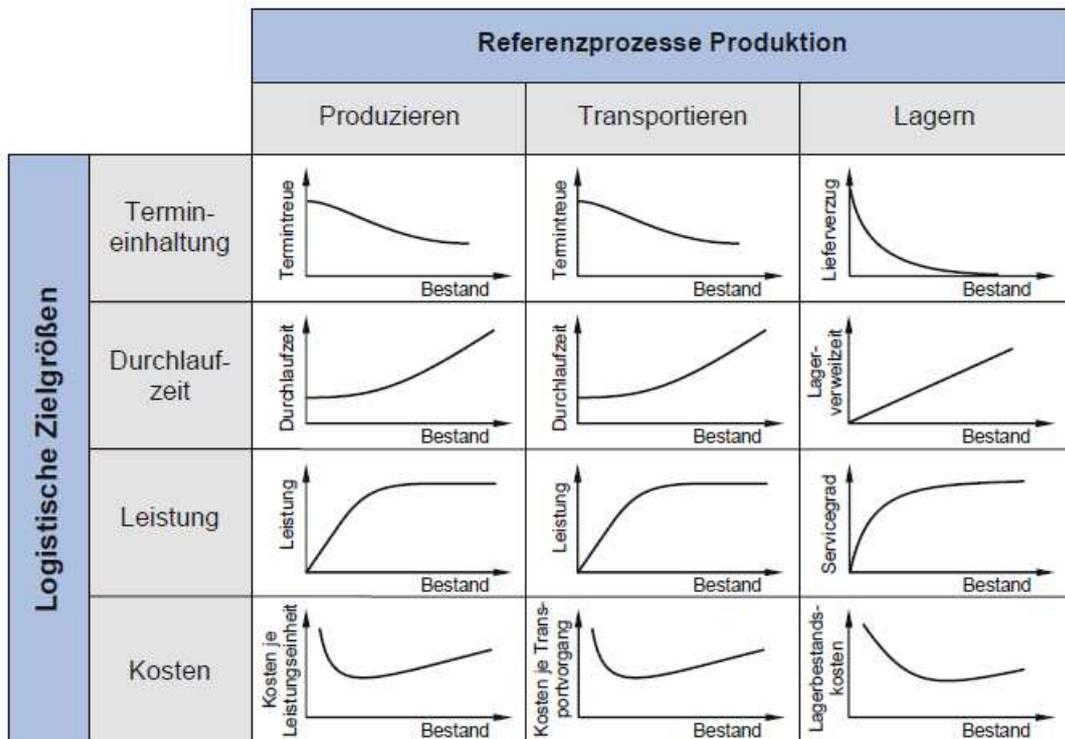


Abbildung 9: Logistische Kennlinien für die Referenzprozesse der Produktion¹⁰³

Aus Abbildung 10 ist zu entnehmen, dass wenn die Produktion nicht aufgrund konkreter Kundenaufträge erfolgt, stehen die betrieblichen Ziele einer hohen Auslastung und geringer Bestände im Vordergrund. Obwohl diese beiden Teilziele gegenläufig sind, beeinflussen sie maßgeblich die Wirtschaftlichkeit der Produktion.

¹⁰¹ Vgl. Kapitel 2.1.1.1 "Prozessanalyse"

¹⁰² Nyhuis 2003.

¹⁰³ Nyhuis 2003.

Termintreue und Durchlaufzeiten sind in solchen Fällen meist von sekundärer Bedeutung. Dennoch haben sie mittelbaren Einfluss auf die Ziele der Lagerhaltung. Eine geringe Termintreue und eine hohe Durchlaufzeit in der vorgeschalteten Produktion erfordern einen größeren Lagerbestand, um einen vordefinierten Servicegrad zu erreichen. In der kundenbezogenen Produktion verschiebt sich das Verhältnis der Zielgewichtungen. Hier steht die Einhaltung zugesagter Lieferzeiten und -termine im Vordergrund, da Kunden direkt betroffen sind. Allerdings ist es fraglich, ob es zulässig ist, kurze Lieferzeiten durch geringe Auslastung zu erreichen, da dies zu Kapazitätsausweitungen und steigenden Stückkosten führen kann. Ein Gesamtoptimum, an dem sich das Unternehmen ausrichten kann, ist kaum zu erreichen.¹⁰⁴

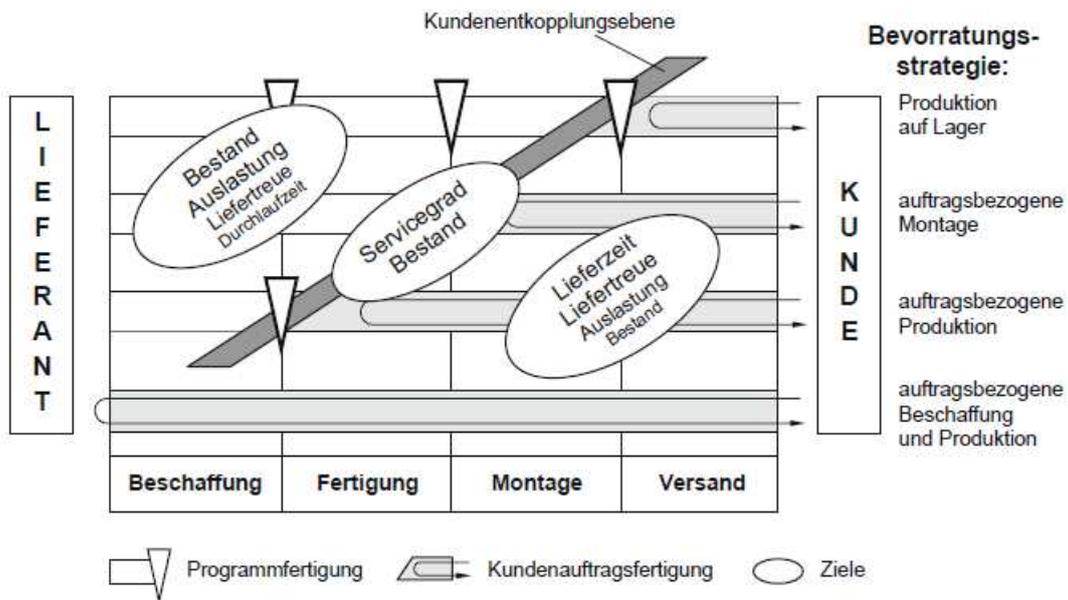


Abbildung 10: Gewichtung logistischer Zielgrößen bei unterschiedlichen Entkopplungsstrategien¹⁰⁵

Um das Dilemma der Ablaufplanung zu bewältigen, sind aktive Prozess- und Produktionsgestaltungen erforderlich. Es gilt, die wechselseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrößen qualitativ und quantitativ zu beschreiben. Aufgrund der Vielfalt der betrieblichen Realität und Einflussfaktoren sind diese Zusammenhänge nicht einfach erkennbar. Daher ist die Nutzung von Modellen zur transparenten Darstellung und Bewertung der Produktionsabläufe laut Nyhuis (2003) unerlässlich für die Bewältigung unternehmerischer Gestaltungs- und Lenkungsarbeiten.

¹⁰⁴ Nyhuis 2003.

¹⁰⁵ Nyhuis 2003.

Theory of Constraints (TOC)

Die Theory of Constraints (TOC) wurde von Dr. Eliyahu Moshe Goldratt, einem israelischen Physiker, entwickelt und erstmals in seinem Buch "The Goal: Excellence In Manufacturing" (1984) vorgestellt. Als neues Paradigma der Unternehmensführung konzentriert sich die TOC in diesem Artikel auf die Herausforderungen von Produktionsunternehmen. Sie definiert das Produktionssystem als eine Kette, die eine Gruppe unabhängiger Glieder darstellt, die gemeinsam auf ein Gesamtziel hinarbeiten. Die TOC geht davon aus, dass eine einzige Ursache, bekannt als Engpass, eine Vielzahl negativer Auswirkungen verursachen kann. Der Engpass ist ein Element des Systems, dessen Bandbreite die Produktivität des gesamten Systems bestimmt.¹⁰⁶ Jedes System hat mindestens einen Engpass, und die Leistungsfähigkeit der Kette wird durch das schwächste Glied beeinflusst. Daher sind die Lokalisierung und das Management oder die Beseitigung der Engpässe entscheidend. Lagerbeschränkungen können zu Blockaden führen, die aufgrund von Platzmangel oder übermäßigen Lagerbeständen in den nachgelagerten Stufen zu Stillständen an den Arbeitsstationen führen. Ebenso können in Fertigungssystemen Engpässe auftreten, die zu Leerlauf an den Arbeitsplätzen führen, wenn es in den vorgelagerten Stufen nicht genügend Aufträge zur Bearbeitung gibt.¹⁰⁷ Goldratt und Cox entwickeln einen Fünf-Schritte-Prozess zum Management von Engpässen. Der Schwerpunkt liegt zunächst darauf, die Gesamtproduktivität des betrachteten Systems zu steigern, indem die dominierenden Einschränkungen eliminiert werden. Zweitens zielt der Prozess darauf ab, den Bestand zu reduzieren, der den Durchsatz begrenzt:¹⁰⁸

1. Identifikation der Systemeinschränkungen.
2. Festlegung der optimalen Nutzung der identifizierten Einschränkungen, z. B. durch die Gewährleistung von Betreibern bei Bedarf.
3. Unterordnung aller anderen Prozesse unter die oben getroffene Entscheidung, um sicherzustellen, dass sie die Bedürfnisse der Einschränkungen unterstützen.
4. Anheben der Systemeinschränkungen durch weitere Maßnahmen, wie Kapitalinvestitionen oder Änderungen im Materialfluss.

¹⁰⁶ Kolinski et al. 2010.

¹⁰⁷ Altiock 1997.

¹⁰⁸ Kolinski et al. 2010.

5. Bei Änderungen in den Einschränkungen des Systems in den vorherigen Schritten den gesamten Prozess wiederholen, um Trägheit als neue Einschränkung zu verhindern.

2.1.2.3 Bestandsmanagement

Der Bestand lässt sich in Lager- und Produktionsbestand gliedern. Er umfasst erstens Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren, die an einem definierten Lagerort aufbewahrt werden. Zweitens werden Materialien im Zusammenhang mit freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Produktionsaufträgen als "Work in Process" (WIP) bezeichnet, die sich üblicherweise physisch im Fertigungsbereich befinden.¹⁰⁹ Auf die Auswirkung von WIP wurde in dieser Arbeit in Kapitel 2.1.1.1 „Prozessanalyse“ eingegangen.

Aufgrund des erheblichen Anteils der Lagerbestandskosten am Gesamtkostenvolumen¹¹⁰ verfolgt das Lagerbestandsmanagement das Ziel einer integrierten Perspektive auf den Gesamtbestand eines Unternehmens, um die Rentabilität zu steigern.¹¹¹ Der sogenannte Return on Investment (ROI) wird durch die Umsatzrentabilität und den Kapitalumschlag beeinflusst und lässt sich durch folgende Formel darstellen:

- **ROI** = Umsatzrentabilität * Kapitalumschlag

Die Steigerung der Kapitalumschlagshäufigkeit ist entscheidend, und dies kann durch die Reduzierung der Lagerbestände erreicht werden. Ein niedriger Lagerbestand bedeutet gleichzeitig, dass weniger Kapital im Umlaufvermögen gebunden ist, was für verschiedene Investitionen oder Zahlungen zur Verfügung stehen kann.¹¹²¹¹³

Lager und Pufferlager sind dennoch entscheidend für den physischen Materialfluss in Produktionssystemen, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten und Angebot und Nachfrage zu synchronisieren. Zudem ist die Materialzuverlässigkeit eine Voraussetzung für den Start eines Produktionsprozesses, weshalb eine Zwischenlagerung unerlässlich ist - hierbei ist die richtige Größenbestimmung entscheidend.¹¹⁴ Die Lagerbestandsplanung beinhaltet die Festlegung von

¹⁰⁹ Lödding 2016.

¹¹⁰ Kummer et al. 2006.

¹¹¹ Pfohl 2018.

¹¹² Pfohl 2018.

¹¹³ Kummer et al. 2006.

¹¹⁴ Pfohl 2018.

Meldebestand und Sicherheitsbestand. Mehrere Faktoren, wie schwankender oder sporadischer Bedarf, können diese Aufgabe erschweren. Auch die Zuverlässigkeit von Bedarfsvorhersagen beeinflusst die Lagerbestandsplanung, wobei Faktoren wie Berechenbarkeit des Verbrauchs, Produktionsplanung, Ausschuss zu berücksichtigen sind. Bestände sind entscheidend für einen reibungslosen Produktionsprozess, können jedoch auch zu Produktivitätshindernissen werden, abhängig vom Bestandsniveau.¹¹⁵

116

Im Fokus steht hier insbesondere die Festlegung der Menge und Positionierung von Sicherheitsbeständen. Diese sind notwendig, um die regulären Abläufe der Wertschöpfungsprozesse vor zufälligen Einflüssen zu schützen. Zum Beispiel kann es erforderlich sein, in einem Beschaffungslager einen Sicherheitsbestand zu pflegen, um den Materialnachschub für den nachfolgenden Produktionsprozess sicherzustellen, selbst wenn der Lieferant verspätet liefert. In einem regionalen Auslieferungslager für Fertigprodukte ermöglicht hingegen der Sicherheitsbestand das Erreichen eines angestrebten Servicegrades gegenüber den Endkunden.¹¹⁷

Im Rahmen des Bestandsmanagement werden Kennzahlen zur Erfassung der relevanten Tatbestände eingesetzt. Einige dieser Kennzahlen werden folglich dargestellt und dienen auch als Entscheidungsgrundlage für Anpassungsmaßnahmen der Bestände.^{118 119 120}

- **Sicherheitsbestand [stk]** = Verbrauch pro Periode [stk/t] *
Wiederbeschaffungszeit (WBZ) [t]

Offt wird beim Sicherheitsbestand noch ein Sicherheitskoeffizient hinzugefügt.

- **Lagerreichweite [t]** = Aktueller Lagerbestand [stk] / Verbrauch pro Periode [stk/t]

Die Lagerreichweite gibt Aufschluss über die interne Versorgungssicherheit durch Bestände im Unternehmen.

- **Durchschnittlicher Lagerbestand [stk]** = Summe der Periodenbestände [stk] /
Summe der Perioden

¹¹⁵ Wannewetsch 2010.

¹¹⁶ Vgl. Kapitel 2.1.2.1 „Das Dilemma der Ablaufplanung“

¹¹⁷ Tempelmeier 2005.

¹¹⁸ Kummer et al. 2006.

¹¹⁹ Arnolds et al. 2013.

¹²⁰ Wannewetsch 2010.

- **Durchschnittlicher Lagerbestandwert [€]** = $\frac{\text{Summe der Periodenbestände in Wert [€]}}{\text{Summe der Perioden}}$

Der durchschnittliche Lagerbestand ist Ausgangspunkt der Berechnung der durchschnittlichen Kapitalbindung.

- **Durchschnittliche Lagerdauer** = $\frac{\text{durchschnittlicher Lagerbestand}}{\text{Jahresverbrauch}} * \text{Summe der Perioden}$

Die durchschnittliche Lagerdauer bezeichnet die durchschnittliche Verweildauer von Materialien und gibt Aufschluss über die Entwicklung der Kapitalbindung.

- **Umschlagshäufigkeit** = $\frac{\text{Lagerabgänge pro Periode}}{\text{durchschnittlicher Lagerbestand}}$

Umschlagshäufigkeit zeigt an wie oft sich das Material in einer Periode austauscht.

- **Lagerhaltungskostensatz** = $\frac{\text{Lagerhaltungskosten}}{\text{durchschnittlicher Lagerwert}}$

Spiegelt das Verhältnis der Betriebskosten des Lagers zum gelagerten Bestandwert wider.

2.2 Unternehmenswachstum

Dieses Kapitel widmet sich dem Unternehmenswachstums, seiner verschiedenen Dimensionen, den grundlegenden wirtschaftlichen Motiven bis hin zu den Herausforderungen in den einzelnen Phasen des Wachstumsprozesses.

Generell kann festgestellt werden, dass Wachstum einen Prozess der positiven Größenänderung innerhalb eines bestimmten Zeitraums darstellt. Im Unternehmenskontext bezieht sich Wachstum in der Regel auf Umsatz, Gewinn, Mitarbeiterzahl oder Marktanteil. Es kann durch verschiedene Maßnahmen wie Fusionen, Auslagerungen und mehr initiiert werden. Jedoch wird natürliches Unternehmenswachstum in der Regel durch eine gesteigerte Nachfrage nach den Produkten oder Dienstleistungen des Unternehmens ausgelöst und durch deren erfolgreiche Bedarfsdeckung erreicht.¹²¹

Die Bedeutung des Unternehmenswachstums in der Geschäftswelt liegt darin, dass es die Wettbewerbsposition stärkt. Gleichermäßen gilt, dass ein Unternehmen im wachsenden Markt expandieren muss, um nicht relativ zu diesem zu schrumpfen und seine Wettbewerbsposition zu verschlechtern. In diesem Kontext wird das Streben

¹²¹ Heyne 2001.

nach Wachstum zu einem zentralen Element des strategischen Managements. Obwohl Wachstum ein grundlegendes Ziel von Unternehmen ist, fungiert es nicht zwangsläufig als Indikator für Erfolg. Laut Heyne (2001) besteht eine nur geringe Korrelation zwischen Veränderungen im Umsatz, Gewinn und Beschäftigung. Wirtschaften selbst bedeutet, mit begrenzten Ressourcen maximale Ziele zu erreichen. Dieser Grundsatz spiegelt sich im Streben der Unternehmen nach Wachstum wider. Mit begrenzten Mitteln, die alternativ verwendbar sind, zwingt die Knappheit dazu, zwischen verschiedenen Möglichkeiten zu wählen. Effizientes Wirtschaften besteht darin, mit minimalem Mitteleinsatz den größtmöglichen Nutzen oder Erfolg zu erzielen. Wenn es keine klare Korrelation zwischen Umsatz, Gewinn und Beschäftigung gibt, deutet dies darauf hin, dass die Herausforderungen im Wachstum nicht effektiv bewältigt werden. Dies liegt daran, dass Unternehmen während des Wachstums mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert sind, die eine hohe Anpassungsfähigkeit und antizipatives Handeln erfordern, um nachhaltig auf dem Wachstumspfad zu bleiben.^{122 123 124}

Unternehmenswachstum ist ein komplexer Prozess, der nicht nur Chancen, sondern auch Herausforderungen birgt. Um antizipativ zu handeln und bestmögliche Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten, ist es wichtig, sich frühzeitig mit dem Wachstum und den potenziellen Herausforderungen auseinanderzusetzen. Nur so kann ein Unternehmen langfristig auf einem nachhaltigen Wachstumspfad bleiben und gleichzeitig den Anforderungen des dynamischen Marktes gerecht zu werden. Die Fachliteratur teilt das Wachstum eines Unternehmens oft in vier Phasen: die Start-Up-Phase, die Expansionsphase, die Reifephase oder Maturity-Phase und die Diversifikationsphase. Jede dieser Phasen ist durch unterschiedliche Marktsituationen, Unternehmenssituationen und spezifische Herausforderungen charakterisiert:¹²⁵

1. **Start-Up-Phase**

In dieser Phase ist die größte Herausforderung für das Aufrechterhalten des Wachstums für Unternehmen, ausreichende finanzielle Ressourcen sicherzustellen sowie technologische Fähigkeiten zu entwickeln.

¹²² Heyne 2001.

¹²³ Wiklund und Shepherd 2003.

¹²⁴ Mankiw 1998.

¹²⁵ Heyne 2001.

2. Expansionsphase

Diese Phase zeichnet sich durch das schnellste Wachstum hinsichtlich Leistungserbringung und Mitarbeiteranzahl aus.

3. Reifephase oder Maturity-Phase

In dieser Phase müssen Unternehmen neue Wege finden, um mit dem bisherigen Leistungsangebot in neue Märkte einzutreten und wettbewerbsfähiger zu werden.

4. Diversifikationsphase

Hier müssen Unternehmen beginnen, sich strategisch von Wettbewerbern zu diversifizieren, um die Leistungsnachfrage zu steigern.

Grundsätzlich bringen alle vier beschriebenen Phasen diverse Herausforderungen mit sich. Die gegenständliche Arbeit fokussiert auf die Expansionsphase, da in dieser Phase der Produktionshochlauf und dem Ramp-Up-Management eine besonders entscheidende Rolle spielt. Daher wird diese Phase nachfolgend näher beleuchtet, indem die klassischen Barrieren und Herausforderungen erläutert sowie die erforderlichen Maßnahmen, die das Unternehmen ergreifen muss, um diese zu bewältigen, angeführt werden.

2.2.1 Die Expansionsphase

Beim Übergang eines Industrieunternehmens von der Start-Up-Phase in die Expansionsphase verschiebt sich der Fokus vom reinen Produkt hin zum Aufbau der Wertschöpfungsprozesse. Es ist von entscheidender Bedeutung, die Produktions-, Auftragsabwicklungs- und Distributionsprozesse zu verbessern, um die in der Start-Up-Phase etablierten Produkte effizient herzustellen und an die Kunden zu liefern. Die Kapazitäten dieser Prozesse müssen kontinuierlich dem Wachstum angepasst werden, was wiederum die kurzfristige Beschaffung und Integration zusätzlicher Ressourcen erfordert. In dieser Situation steht insbesondere das Management der infrastrukturellen Kapazitäten sowie der personellen Ressourcen vor großen Herausforderungen.^{126 127}

Die Steigerung der infrastrukturellen und **Produktionskapazitäten** eines Unternehmens ist unerlässlich, um den Anforderungen des Marktes hinsichtlich Produkt- und Leistungsnachfrage gerecht zu werden. Die Suche nach der richtigen Strategie stellt dabei eine herausfordernde Aufgabe dar. Die Anschaffung von leistungsfähigeren

¹²⁶ Heyne 2001.

¹²⁷ Wiklund und Shepherd 2003.

Maschinen sowie Automatisierung kann die Produktionskapazitäten erhöhen, geht jedoch in der Regel mit hohen Investitionskosten und einer geringeren Flexibilität des Produktionssystems einher.¹²⁸ In einem dynamischen Marktumfeld ist es erforderlich, die Anpassungsfähigkeit hinsichtlich der herzustellenden Produkte und des Produktionsvolumens zu gewährleisten. Eine schrittweise und häufige Erweiterung des Produktionssystems hingegen kann die ökonomische Lebensdauer von Komponenten verkürzen, was zu steigenden Fixkosten führt und das Unternehmen finanziell belasten kann.^{129 130}

Eine weitere Herausforderung bei der Erweiterung der Infrastrukturen ist die **IT-Infrastruktur**. Der zunehmende Druck zur Steigerung der Effizienz von Unternehmensoperationen führen zur Suche nach neuen Lösungen und Technologien und erhöhen die Bedeutung moderner IT-Systeme. Das Problem besteht darin, die richtige Lösung zu finden, die das erforderliche Maß an Effizienz zu angemessenen Kosten bietet. Ein ERP-System integriert Module zur Ressourcenplanung eines Unternehmens, optimiert Prozesse und gewährt Echtzeitinformationen. Die Datenbankebene bildet das Fundament, mit einem gemeinsamen Datenbankmanagementsystem. Funktionen umfassen Logistik, Fertigung, Vertrieb, Finanzen, Controlling, Personalmanagement und mehr. Die breite Palette an Funktionen eines ERP-Systems ist der Grund, weshalb wachsende Unternehmen sich meist für ein solches entscheiden. Bei der Implementierung eines ERP-Systems sind mehrere Risikobereiche zu beachten. Das erste betrifft die Möglichkeit, das System überhaupt nicht einzuführen. Ein häufiges Risiko ist die Budgetüberschreitung, unabhängig vom Systemtyp. Ein weiteres Risiko besteht darin, dass die geplanten Vorteile aus der Implementierung des ERP-Systems nicht realisiert werden. Die Nutzenbewertung ist entscheidend. Schließlich kann eine Verzögerung bei der Implementierung auftreten, die durch das Projektmanagement beeinflusst wird.¹³¹ Laut Literatur spielen die persönlichen Fähigkeiten und Kenntnisse der Manager in der Expansionsphase eine entscheidende Rolle dafür, wie stark das Wachstum des Marktes auf das Unternehmen abgebildet wird. Für deren Unterstützung erfordert es eine signifikante Veränderung in den Planungs- und Kontrollsystemen.¹³²

¹²⁸ Vgl. Kapitel 2.1.1 „Das Produktionssystem“

¹²⁹ Heyne 2001.

¹³⁰ Milling 1974.

¹³¹ Wozniakowski et al. 2018.

¹³² Heyne 2001.

Für den Aufbau einer effektiven und effizienten Organisation, die in der Lage ist, das Wachstum zu bewältigen, ist ein Ausbau des Personals erforderlich. In der Wachstumsphase ist es entscheidend, dass dieses Personal optimal in die bestehende **Organisationsstruktur** integriert wird. Andernfalls bleibt das erworbene Humankapital ungenutzt und das Unternehmen kann seine Mitarbeiter nicht motivieren, um Wachstumsmöglichkeiten zu nutzen oder neue zu entdecken. Hierfür sind interne Umstrukturierungen und die Zuweisung von Verantwortungsbereichen an neue Abteilungen erforderlich. Eine verstärkte Arbeitsteilung und das Vorhandensein mehrerer Abteilungen können jedoch die interne Kommunikation und Koordination erschweren, was wiederum die Reaktionsgeschwindigkeit und Flexibilität des Unternehmens beeinträchtigt. Es ist wichtig, dass cross-funktionale Aufgabenbereiche etabliert werden, die das ganzheitliche Denken fördern und als Vermittlungsinstanz zwischen den verschiedenen Funktionen wie Einkauf, Produktion und Vertrieb dienen.^{133 134 135}

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Aufbau einer effektiven und effizienten Organisation in der Expansionsphase eine zentrale Aufgabe darstellt. Dazu gehört der Ausbau der Produktionskapazitäten unter Berücksichtigung der Ressourcenbeschaffung, die Implementierung einer effizienten IT-Infrastruktur zur Unterstützung der Manager, sowie die Integration und Strukturierung des Personals.^{136 137 138} Wenn dies gelingt, sind die Wachstumsmöglichkeiten des Unternehmens nur noch durch die Nachfrage des Marktes begrenzt. Im nächsten Kapitel wird auf den Hochlauf der Produktionskapazitäten näher eingegangen

2.2.2 Ramp-Up-Management

Der Ramp-Up-Prozess, auf Deutsch auch als Produktionshochlauf bezeichnet, umfasst den Zeitraum zwischen dem Beginn der Produktion eines Fertigungssystems und der Erreichung seiner vollen Kapazitätsauslastung. Unter dem Beginn der Produktion

¹³³ Heyne 2001.

¹³⁴ Wiklund und Shepherd 2003.

¹³⁵ Fojt 1996.

¹³⁶ Heyne 2001.

¹³⁷ Wiklund und Shepherd 2003.

¹³⁸ Wozniakowski et al. 2018.

versteht man den Moment, wo die Prototypen durch die Entwicklung für die Serienproduktion freigegeben werden.^{139 140 141 142}

Dieser Prozess spielt eine entscheidende Rolle im Lebenszyklus von Produkten und bietet noch beträchtliches Verbesserungspotenzial. Während des Hochlaufs liegt der Fokus hauptsächlich auf dem Erreichen des benötigten Produktionsvolumens für die optimale Nachfragedeckung und der Maximierung des potenziellen Gewinns. Aufgrund der häufigen Integration neuer Technologien und Prozesse, um auf Produktinnovationen und Marktdruck zu reagieren, gestaltet sich der Produktionshochlauf als äußerst komplexer und einzigartiger Prozess, der im Voraus nur schwer zu planen und zu strukturieren ist. In dieser Phase spielen die Faktoren Zeit, Kosten, Komplexität und Ungewissheit eine maßgebliche Rolle.^{143 144}

Die **Zeitaspekte** des Ramp-Up-Prozesses sind vielfältig. Die ersten Marktteilnehmer können von Spitzenpreisen profitieren, solange bis Wettbewerber ähnliche Produkte entwickeln und den Preisdruck erhöhen. Zeit- und Termindruck können zudem die Qualität der Produktion negativ beeinflussen.¹⁴⁵

Kosten sind ein weiterer wichtiger Faktor während des Ramp-Ups. Das Hochfahren der Produktion wird als einer der Hauptkostentreiber betrachtet. Mit steigenden Produktionsanlagenkosten und verkürzten Produktlebenszyklen erhöht sich der Druck, schnell Rentabilität zu erzielen.¹⁴⁶

Die **Komplexität** von High-Tech-Produkten und die starke Auslagerung von Fertigungsprozessen tragen zur Komplexität des Ramp-Ups bei. Die Neuheit des Produkts und des Prozesses, sowie die erforderlichen Fertigungsressourcen stellen zusätzliche Dimensionen der Komplexität dar. Dargestellt in Abbildung 11, definierte Almgren (1999), dass die Komplexität eines Ramp-Up zunimmt, je neuer das Produkt/Produkttechnologie und die Produktion/Produktionstechnologie sind.¹⁴⁷

¹³⁹ Doltsinis et al. 2013.

¹⁴⁰ Surbier et al. 2014.

¹⁴¹ Kuhn et al. 2002.

¹⁴² Ahrens 2013.

¹⁴³ Surbier et al. 2014.

¹⁴⁴ Doltsinis et al. 2013.

¹⁴⁵ Surbier et al. 2014.

¹⁴⁶ Surbier et al. 2014.

¹⁴⁷ Surbier et al. 2014.

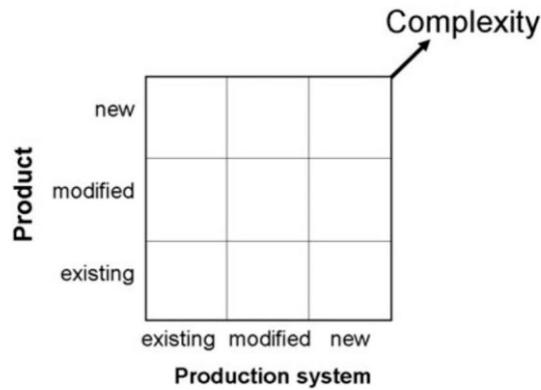


Abbildung 11: Komplexität von Produktions-Ramp-Up mit Anlehnung an Almgren (1999)¹⁴⁸

Juerging und Miller (2006) erweiterten diese Definition um die Dimension der benötigten Kapazität, wie in Abbildung 12 dargestellt.¹⁴⁹

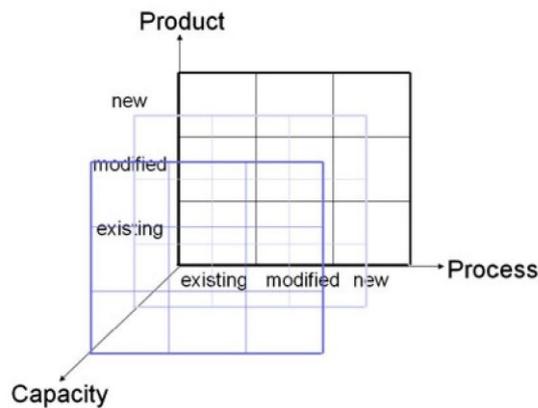


Abbildung 12: Komplexität von Produktions-Ramp-Up modifiziert von Juerging & Milling (2006)¹⁵⁰

Ungewissheit ist ein weiteres charakteristisches Merkmal der Ramp-Up-Phase. Da das Produkt, das Produktionssystem und die Lieferkette neu sind, herrscht eine erhöhte Unsicherheit bezüglich deren Zuverlässigkeit. Die Neuheit des Produkts bringt unter Anderem Unsicherheit in Hinblick auf die Marktnachfrage mit sich. Die Neuheit des Produktionssystems bringt beispielsweise Unsicherheit in Hinblick auf die erwartete Qualität und Leistung mit sich und die Neuheit der Lieferkette bringt eine Unsicherheit bezüglich der Verfügbarkeit von Material mit sich. Studien haben gezeigt, dass eine beträchtliche Anzahl von Ramp-Ups weder wirtschaftlich noch technisch erfolgreich ist.^{151 152}

¹⁴⁸ Surbier et al. 2014.

¹⁴⁹ Juerging und Milling 2006.

¹⁵⁰ Surbier et al. 2014.

¹⁵¹ Surbier et al. 2014.

¹⁵² Doltsinis et al. 2013.

Wie zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, besteht das übergeordnete Ziel des Ramp-Ups darin, Qualitäts- und Quantitätsziele innerhalb einer vorgegebenen Zeit zu minimalen Kosten zu erreichen. Das erfordert umfassendes Verständnis des Produktionsverhaltens und Fachwissen, um fundierte Entscheidungen zu treffen und somit ein effizientes System mit den gewünschten betrieblichen Leistungsmerkmalen in kürzester Zeit bereitzustellen.¹⁵³ Allerdings werden häufig Methoden und -instrumente verwendet, die nicht spezifisch auf den Ramp-Up-Prozess zugeschnitten sind. Dies führt zu Problemen im Daten- und Wissensmanagement sowie zu ungenauer Ressourcenplanung und unbekanntem Kosten.

In der Literatur wird die Verkürzung der Hochlaufzeit als dringende Notwendigkeit erkannt, um die Gesamtkosten für den Hochlauf auf ein Minimum zu reduzieren. Allerdings finden sich in der Literatur nur wenige messungsgestützte Entscheidungshilfen, die sich gezielt auf die Optimierung des Ramp-Ups konzentrieren, und es wurde noch kein systematischer Ansatz zur Verkürzung der Ramp-Up-Zeit definiert.^{154 155 156} Beim Versuch zur Erstellung solcher messgestützter Entscheidungshilfen haben verschiedene Forscher Leistungsindikatoren (KPIs) vorgeschlagen, die mit diesen Zielen in Verbindung stehen. So haben Carrillo und Franza (2006) festgestellt, dass die Minimierung der Hochlaufzeit durch Wissensakkumulation erreicht werden kann, was sie zur Entwicklung eines Modells zur Gewinnmaximierung motiviert hat. Winkler, Heins und Nyhuis (2007) haben die KPIs in Bezug auf die Ziele gruppiert, die sie unterstützen: Produktivität und Qualitätsniveau dienen dem Effektivitätsziel, während die Kosten das Effizienzziel widerspiegeln und die Intervalllängen zwischen den Meilensteinen des Ramp-Up-Projekts ein Indikator dafür sind, wie gut die zeitlichen Ziele erreicht werden. Juering und Milling (2006) identifizieren zwei Hauptvariablen, die die Effizienz des Produktionsprozesses während des Ramp-Ups beeinflussen: Produktivität und Qualität. Die Qualität wiederum wird von vier Hauptfaktoren beeinflusst: durchschnittliche Qualifikation der Mitarbeiter, Angemessenheit der Arbeit, Termindruck und Ermüdung. Zur Unterstützung bei der Bewältigung von Ereignissen unterteilen sie die relevanten Informationen in drei Typen: Probleminformationen, die sich strikt auf das spezifische Ereignis oder Problem beziehen, Bereichsinformationen, die allgemeines Wissen über einen oder mehrere mit dem Problem

¹⁵³ Vgl. Kapitel 2.2.1 Die Expansionsphase

¹⁵⁴ Carrillo und Franza 2006.

¹⁵⁵ Ahrens 2013.

¹⁵⁶ Doltsinis et al. 2013.

zusammenhängende Bereiche liefern, und Problemlösungsinformationen, also das "Know-how" des Problemlösers zur Bewältigung des Problems.^{157 158 159 160}

Surbier et al. (2014) kommen zum Schluss, dass ein effizientes Ramp-Up-Management nur durch einen ganzheitlichen Ansatz erreicht werden kann. Unter ganzheitlichem Ansatz versteht man, dass bereits in der Vorbereitungsphase die unten gelisteten Fachkompetenzen ins Ramp-Up-Managements mit einbezogen werden sollen, aber auch, dass der Ramp-Up-Prozess, welcher auf folgenden drei Stufen der Strategiefindung, Umsetzungsplanung und Bewertung basiert, vollständig vollzogen wird. Dabei sollen klare Zielvorgaben und Rückmeldungen können die menschlichen Entscheidungsprozesse während des Ramp-Ups erheblich verbessern. Die Bestandteile des Ramp-Up-Managements wären die folglich gelisteten Fachbereiche:^{161 162}

Projektmanagement: Der Ramp-Up ist ein Projekt, deshalb sollte das Projektteam auch von einem professionellen Projektmanagementexperten begleitet werden und sich an den PM-Regelkreis aus Abbildung 13 halten.

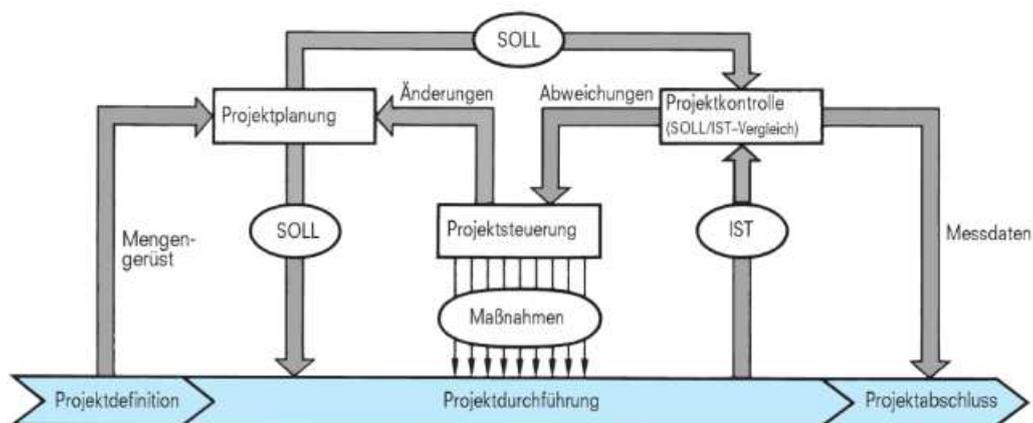


Abbildung 13: Projektmanagement-Regelkreis¹⁶³

Lieferantenmanagement: Beim Ramp-Up werden auch bei den Zulieferern Hochlaufschwierigkeiten beobachtet, was zu ähnlichen Auswirkungen wie dem Bullwhip-Effekt führt. Aus diesem Grund sollte man die Lieferanten so früh wie möglich in das Projekt mit einbeziehen.

¹⁵⁷ Juering und Milling 2006.

¹⁵⁸ Carrillo und Franza 2006.

¹⁵⁹ Klocke et al. 2016.

¹⁶⁰ Surbier et al. 2014.

¹⁶¹ Surbier et al. 2014.

¹⁶² Ahrens 2013.

¹⁶³ Burghardt 2013.

Qualitätsmanagement: Das Qualitätsmanagement muss vor Beginn des Projektes die Qualitätsstandards festlegen und den Reifegrad der Produkte und Prozesse stetig überwachen.

Prozessmanagement: Im Prozessmanagement werden Prozessbeschreibungen für alle Prozesse, vom Gesamtprozess bis hin zu den Einzelprozessen, erstellt. Dabei sollten alle Prozessschritte, die Durchlaufzeiten, den benötigten Aufwand, das benötigte Material, die benötigten Hilfsmittel und alle Ausgänge erfasst werden. Anhand dieser Darstellungen können die Prozesse geplant, gesteuert und Potenziale aufgedeckt und genutzt werden.

Changemanagement: Changemanagement dient in erster Linie der Integration von Neuerungen während des Ramp-Up-Prozesses und besteht im Wesentlichen aus einer Änderungsroutine, welche dem Unternehmen die notwendige Agilität geben sollte.

Kostenmanagement: Das Kostenmanagement muss vor Beginn des Projekts das benötigte Budget kalkulieren, festlegen und zuweisen.

Controlling: Controlling beschäftigt sich mit der Beschaffung der Daten, um ergebnisorientierte Analysen durchzuführen.

2.2.2.1 Ramp-Up-Strategie

Unter Ramp-Up-Strategie versteht man die Entwicklung marktgerechter Ramp-Up-Szenarien. Primär geht es um die Entscheidungstreffung, auf welcher Art und Weise aber auch mit welchen Varianten man das Produktionsvolumen hochfahren will und wie es zeitlich vonstattengehen soll. Die Erhöhung des Produktionsvolumens kann entweder durch Beschleunigung der Liniengeschwindigkeit, durch die Anzahl der Linien und somit der Erzeugnisse in Bearbeitung (WIP)¹⁶⁴ oder durch Verlängerung der Betriebszeit der Linie erfolgen.¹⁶⁵

Schuh, Desoi und Tücks (2005) stellen vier Ramp-Up Strategien in Abhängigkeit von der Wichtigkeit der Ramp-Up Zeit, der Kapazitätsauslastung während der Hochfahrphase, der Produktvielfalt und den Entkopplungsgrad der Fertigung¹⁶⁶ vor, welche in Abbildung 14 ersichtlich sind.

¹⁶⁴ Vgl. Kapitel 2.1.1.1 Produktionsmanagement

¹⁶⁵ Surbier et al. 2014.

¹⁶⁶ Vgl. Kapitel 2.1.1 Das Produktionssystem

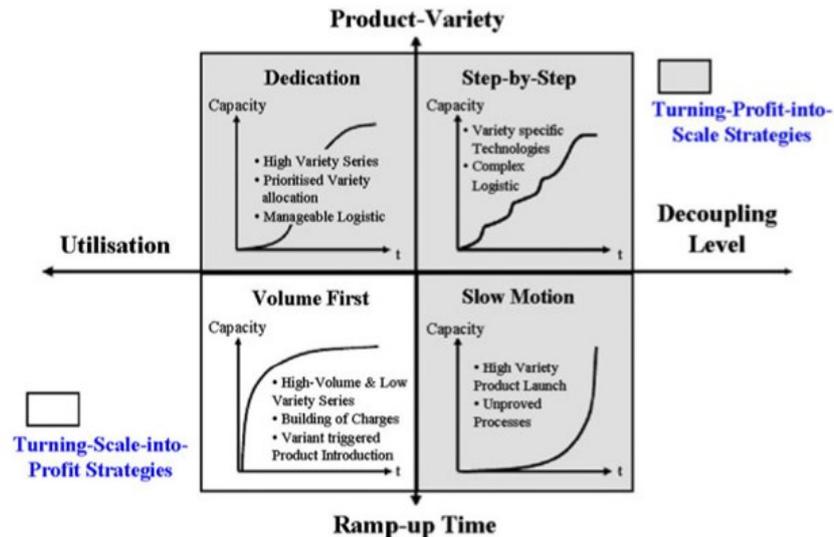


Abbildung 14: Unterschiedliche Produktionshochlaufstrategien¹⁶⁷

Bei der "Volume-first"-Strategie (Volumen zuerst – Strategie) wird versucht Gewinnerzielung durch Skalenvorteile zu erzielen. Bei dieser Strategie steht die Verkürzung der Ramp-Up Zeit und die Kapazitätsauslastung im Vordergrund und ist für Produktionsprogramme mit hohem Volumen und geringer Sortenvielfalt geeignet.

Bei der "Turning-Profit-into-Scale"-Strategie hingegen, wird versucht, den Gewinn in große Skalierung umzuwandeln. Die Autoren unterteilen diese in drei weitere Kategorien:

Die "Dedication"-Strategie (Hingabe-Strategie), ein sequenzielles Hochfahren von der Varianten mit kumulierten Volumen. Präferierte Varianten werden zuerst hochgefahren. Erleichtert die logistische Koordination bei variantenreichen Produkten erheblich.

Die "Slow-Motion"-Strategie (Zeitlupenstrategie), ein paralleles Hochfahren aller Varianten, wobei das Produktionsvolumen einen längeren Zeitraum auf einem niedrigen Niveau bleibt, um die Prozesse besser kennenzulernen und die logistischen Herausforderungen vorzubereiten.

Die "Step-by-Step"-Strategie (Schritt für Schritt – Strategie), bei der die Hochlaufkurven der verschiedenen Varianten und Prozesse entkoppelt sind und getrennt optimiert werden. Erforderlich, wenn die unterschiedlichen Varianten Prozesstechnologien erfordern.

¹⁶⁷ Schuh et al. 2005.

2.2.2.2 Ramp-Up-Planung

Bei der **Ramp-Up-Planung** wird ein Umsetzungsplan erstellt, wie das Planungstableau der Hochlaufkurve, also die mengenmäßige zeitliche Verteilung der verschiedenen Varianten, realisiert werden soll.¹⁶⁸

Aufgrund der extremen Ungewissheit während der Hochlaufphase ist es nicht immer möglich alles im Vorfeld zu planen. Somit werden sich die Mitglieder des Planungsteams bei einem Großteil ihrer Aktivitäten auf die Problemlösung kritischer Ereignisse konzentrieren. Man sollte versuchen eine Verhaltens- und Arbeitsweise für möglicherweise eintretende Ereignisse vorzudefinieren. Dafür muss man sich zuerst Gedanken machen, welche Ereignisse im generellen eintreten könnten. Wie bereits erwähnt, können diese Ereignisse vorhersehbar, also planbar, oder unvorhersehbar und somit nicht planbar sein. Egal ob geplant oder nicht, können diese Ereignisse zusätzlich bekannt oder unbekannt sein. In Tabelle 3 werden für diese Ereignisse Verhaltens- und Arbeitsratschläge für die möglichen Ereignisse dargelegt:^{169 170}

Tabelle 3: Ereignisabhängige Arbeits- und Verhaltensweisen mit Anlehnung an Säfsten, Harlin et al. (2008)

| | | Art des Ereignisses | |
|----------------|----------------------|---|--|
| | | Vorhersehbares Ereignis | Unvorhersehbares Ereignis |
| Erfahrungsgrad | Bekanntes Ereignis | <ul style="list-style-type: none"> • Routineprobleme • Proaktive Arbeitsweise • Kompetenzbasiertes Verhalten | <ul style="list-style-type: none"> • Für Probleme geschult • Proaktive & Reaktive Arbeitsweise • Regelbasiertes Verhalten |
| | Unbekanntes Ereignis | <ul style="list-style-type: none"> • Für Probleme geschult • Proaktive Arbeitsweise • Regelbasiertes Verhalten | <ul style="list-style-type: none"> • Neuartige Probleme • Reaktive Arbeitsweise • Wissensbasiertes Verhalten |

Wie aus dieser Tabelle zu entnehmen ist, wird auf jede Art des Ereignisses eine Arbeitsweise (proaktiv oder reaktiv) und eine entsprechende Verhaltensweise

¹⁶⁸ Ahrens 2013.

¹⁶⁹ Surbier et al. 2014.

¹⁷⁰ Berglund et al.

(Kompetenzbasiertes-, Regelbasiertes- oder Wissensbasiertes Verhalten vorgeschlagen.

Im Sinne der kontinuierlichen Verbesserung des lean Managements, näher geschildert in Kapitel 2.1.1.2, sollte sich das Planungsteam an die Vorgehensweise des DMAIC-Kreislaufs (Define, Measure, Analysis, Improvement, Control) in Abbildung 15 halten. Die stetige Messung, Analyse, Verbesserung, Kontrolle und neu Definierung der Leistung des Systems soll vorbeugen, dass es durch den Hochlauf zu Lücken im Daten- und Wissensmanagement und zu ungenauer Ressourcenplanung sowie unbekanntem Kosten.^{171 172}

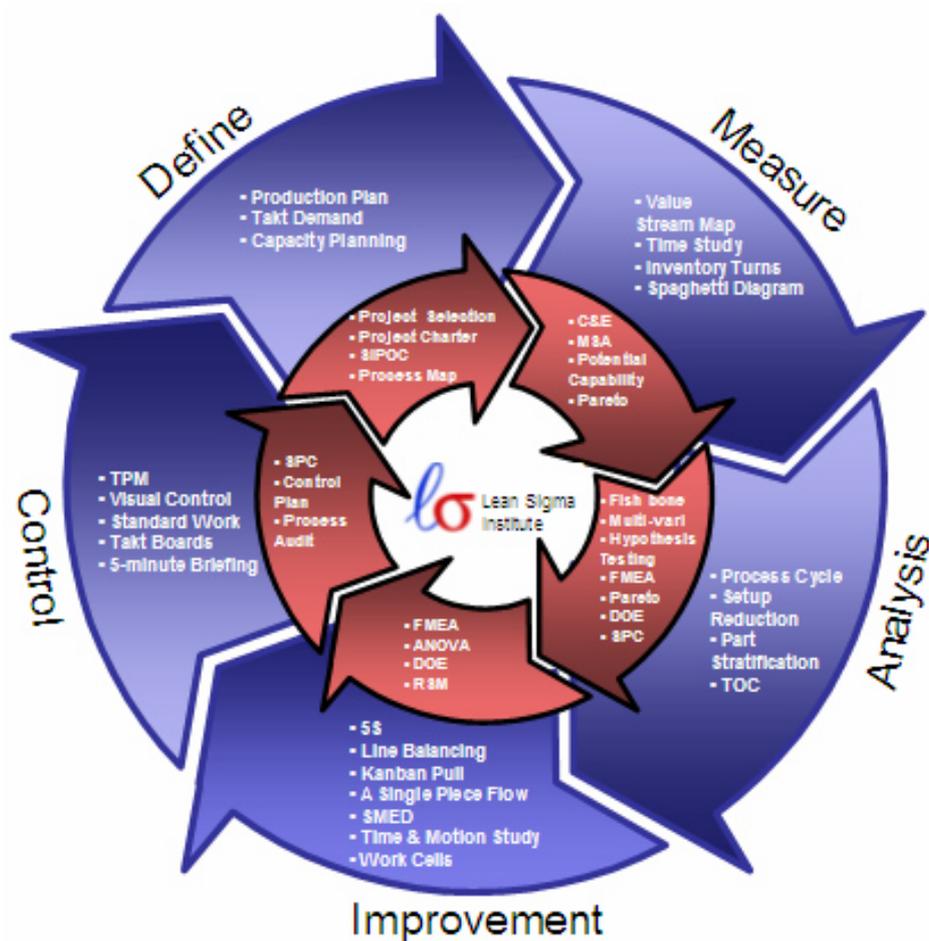


Abbildung 15: Define, Measure, Analysis, Improvement, Control-Kreislauf für Six Sigma Projekte¹⁷³

2.2.2.3 Ramp-Up-Bewertung

Es ist zu betonen, dass es keinen definitiv besten Ansatz gibt, um die Hochlaufphase erfolgreich zu bewältigen. Es gilt jedoch als bewährte Praxis, während dieser Phase

¹⁷¹ Vgl. Kapitel 2.2.2 Ramp-Up-Management

¹⁷² Ahrens 2013.

¹⁷³ Ahrens 2013.

bestimmte Schlüsselindikatoren (KPIs) zu verfolgen, da sie eine entscheidende Rolle bei Managemententscheidungen spielen.¹⁷⁴ Unabhängig von den Zielen logistischer Projekte liegt der Erfolg der Umsetzung im Schaffen von Transparenz und dem intelligenten Einsatz von Kennzahlen. Ohne genaue Kenntnis der relevanten Güter-, Informations- und Finanzströme kann das Projektziel nicht klar definiert werden, und die Planung verliert an Bedeutung.¹⁷⁵

Die Leistungskennzahlen, die im Rahmen des Ramp-Ups betrachtet werden, können in zwei Unterkategorien unterteilt werden:¹⁷⁶

- Kennzahlen, die den Erfolg der Strategieumsetzung messen
- Kennzahlen, die die Ramp-Up-Strategie überprüfen

Es ist von großer Bedeutung, dass der Fortschritt des Projekts, aber auch die Leistung des Systems kontinuierlich während des gesamten Produktionshochlaufs erfasst und bewertet werden.¹⁷⁷

Die Kennzahlen zur Messung des Erfolgs der Strategieumsetzung beziehen sich auf die Effektivität des Ramp-Up-Managements und entsprechen dem klassischen Projektcontrolling. Dabei sind klare Zielvorgaben und ein festgelegtes Entwicklungsende essenziell und soll von einem laufenden Soll- / Ist Vergleich begleitet werden, um Abweichungen vorzeitig zu erkennen und Reaktionsmöglichkeiten mit sich bringt. Die Projektkontrolle umfasst:¹⁷⁸

- Terminkontrolle
- Aufwands- und Kostenkontrolle
- Sachfortschrittskontrolle
- Qualitätssicherung
- Projektdokumentation
- Personalmanagement

Die Sachfortschrittskontrolle ist die bedeutendste, aber auch die anspruchsvollste Kontrolle.¹⁷⁹ Eine einfache Kennzahl zur Endbewertung des Ramp-Up-Projekts ist die benötigte Hochlaufzeit. Eine erhebliche Differenz zwischen Time-to-Market und Time-

¹⁷⁴ Surbier et al. 2014.

¹⁷⁵ Baumgarten 2008.

¹⁷⁶ Doltsinis et al. 2013.

¹⁷⁷ Doltsinis et al. 2013.

¹⁷⁸ Burghardt 2013.

¹⁷⁹ Burghardt 2013.

to-Volume, also eine lange Hochlaufzeit, bedeutet, dass die finanziellen Erfolgsmöglichkeiten nicht vollständig ausgeschöpft werden. Daher ist die Analyse und Modellierung dieses Aspekts für Unternehmen von großem Interesse. Auch wenn diese Kennzahlen die Leistung des Hochlaufs bewerten, sind sie weniger geeignet, um Entscheidungen während des Hochlaufs basierend auf der Systemleistung zu unterstützen.¹⁸⁰

Da sich die Ziele im Laufe des Ramp-Ups häufig ändern, sollten auch die Leistungskennzahlen des Systems regelmäßig überprüft und aktualisiert werden. Der Versuch, jeden Aspekt eines Systems zu quantifizieren, kann zu einer Vielzahl von Kennzahlen führen, die die Komplexität der Entscheidungsfindung erhöhen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird vorgeschlagen, ein Scoreboard zu verwenden, das verschiedene Kennzahlen mit unterschiedlichen Perspektiven kombiniert, um die Anzahl der zu berücksichtigenden Kennzahlen zu reduzieren und dennoch die Komplexität des Systems widerzuspiegeln. Dabei ist zu beachten, dass sich die KPIs je nach Branche unterscheiden können. In der modernen Fertigungsindustrie besteht ein Trend darin, Kennzahlen zu definieren, die Aspekte wie Kosten, Zeit, Qualität, Flexibilität und Produktivität abdecken.^{181 182}

Kostenbezogene KPIs: Diese messen den zusätzlichen Ressourcen- und Arbeitskräftebedarf, der zur Kompensation von Kapazitätsverlusten, zusätzlichen Inspektionen und Korrekturen erforderlich ist.

Qualitätsbezogene KPIs: Hierzu zählen die Ausbeute, die Nacharbeit und die Quote der Erstqualität.

Produktivitätsbezogene KPIs: Diese beziehen sich auf die Kapazitätsauslastung (z. B. die Anzahl der produzierten Produkte im Verhältnis zur geplanten Anzahl) sowie den Anteil der sich in Bearbeitung befindlichen Aufträge (WIP).

Zeitbezogene KPIs: Zeitbezogene KPIs hängen eng mit den Produktivitätsbezogenen zusammen, die Zeitspanne zwischen Projektmeilensteinen und der Zeit bis zur Realisierung der geplanten Produktionsmenge.

Flexibilität: Wie flexibel das System auf Veränderungen im Zuge des Ramp-Ups reagiert

¹⁸⁰ Surbier et al. 2014.

¹⁸¹ Doltsinis et al. 2013.

¹⁸² Surbier et al. 2014.

2.2.3 Fazit: Unternehmenswachstum

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Fertigungsunternehmen in solch ungewissen und turbulenten Phasen mehr denn je durch Anpassungsfähigkeit auszeichnen müssen.¹⁸³ Die erfolgreiche Umsetzung eines ganzheitlichen Ansatzes des Ramp-Up-Managements soll die Unternehmen in die Lage versetzt, ihre Ziele zu erreichen und sich im Wettbewerb zu behaupten. In diesem Kapitel wird deutlich, wie entscheidend es für Unternehmen ist, Cross-Funktionale, sprich Abteilungsübergreifende, Aufgaben- & Tätigkeitsbereiche zu integrieren. Deutlich wird auch die Wichtigkeit für Unternehmen ihre Manager mit den richtigen Informations-, Planungs- und Kontrollsystemen zu unterstützen, um fundierte Entscheidungen in dieser kritischen Phase treffen zu können. Jedoch geht auch hervor, dass es bis dato nur wenige solcher messgestützter Entscheidungsunterstützungstools gibt, welche explizit für das Managen des Produktionshochlaufs konzipiert worden sind.

Eine Schwierigkeit bei der Erstellung einer geeigneten Lösung ist, dass dieses System nahezu alle Unternehmensziele unterstützen und die Gesamtleistung des Produktionssystems verbessern soll, anstatt in lokale Optima zu laufen.¹⁸⁴ Ebenfalls soll dieses System flexibel sein, um sich an veränderte Umstände anzupassen, damit es zu keinem Hemmschuh für Veränderung werde. Die Abbildung der Gesamtleistung des Produktionssystems, sowie die Anforderung der Flexibilität des Systems bilden einen Zielkonflikt bei der Festlegung der Größe eines solchen Systems. Zum einen gibt es viele Beziehungen in einem Unternehmen, welche sich gegenseitig beeinflussen¹⁸⁵ und somit die gewünschte Größe des Systems steigert. Gleichzeitig werden die Anpassungen entsprechend den Anforderungen und der Ziele des Unternehmens mit steigender Größe komplexer und zeitaufwendiger.¹⁸⁶

In der Literatur ist man sich einig, um in der Phase des Produktionshochlaufs effektiv und effizient zu sein, benötige man ein skalierbares Workflow-Management-System, welches bei der antizipativen Identifizierung und Analyse von Störungen unterstützt.¹⁸⁷ Ein vielversprechender Weg ist die digitale Abbildung des Fertigungs-Logistiksystems,¹⁸⁸ mit welcher sich die betrieblichen Aktivitäten und Materialflüsse

¹⁸³ Surbier et al. 2014.

¹⁸⁴ Kunath und Winkler 2018.

¹⁸⁵ Vgl. Kapitel 2.1 „Logistisches Produktionssystem“

¹⁸⁶ Forslund 2011.

¹⁸⁷ Kuhn et al. 2002.

¹⁸⁸ Kunath und Winkler 2018.

steuern lassen und so ein logistikgerechtes Werkslayout gestalten werden kann.^{189 190} Dies ermöglicht Vor- und Nachteile verschiedener Lösungen prognosebasiert zu analysieren und unterstützt die Planung im Hinblick auf zukünftige Anforderungen an die Fertigung, sowie auf die individuellen und wechselnden Unternehmensziele. Darüber hinaus könnte ein solches System automatisch die optimale Lösung an das Fertigungssystem zurückgeben, wenn der Benutzer dies zulässt.^{191 192}

Dieses Kapitel hat gezeigt, dass die richtige Auswahl und Implementierung von Informations-, Planungs- und Kontrollsystemen sowie die Integration von Entscheidungsunterstützungstools für Unternehmen in einer Phase des rasanten Wachstums von entscheidender Bedeutung sind. In der Zukunft liegt der Fokus darauf, diese Erkenntnisse weiterzuentwickeln und praxisorientierte Lösungen zu finden, die den Unternehmen dabei helfen, ihre Unternehmensziele zu erreichen und sich erfolgreich im Wettbewerb zu behaupten.^{193 194}

2.3 Computerbasierte Modellierung von Logistik- und Produktionssysteme

Die Verwendung von Modellen hat stets einen integralen Platz in der menschlichen Erfahrung eingenommen. Wir erschaffen Modelle unserer Umwelt auf Basis unserer fünf bekannten Sinneswahrnehmungen: visuell, auditiv, taktil, olfaktorisch und gustatorisch. Sie liefern Informationen über Veränderungen in unserer unmittelbaren Wahrnehmung und helfen, diese im Vergleich zu vergangenen Ereignissen zu verstehen.¹⁹⁵ Heute verwenden und schaffen alle Naturwissenschaftlicher und Ingenieure Modelle, um allgemein gültige Aussagen zu treffen und um ihre Vermutungen zu konkretisieren.¹⁹⁶ Ein Modell kann als Vereinfachung eines komplexen Systems definiert werden, um bestimmte Details zu veranschaulichen. In dieser Hinsicht agiert ein Modell wie eine Linse, indem es die Aufmerksamkeit auf spezifische Aspekte lenkt, während es alles andere ausblendet oder vernachlässigt.¹⁹⁷

¹⁸⁹ Bogusław Śliwczyński 2010.

¹⁹⁰ Baumgarten 2008.

¹⁹¹ Kunath und Winkler 2018.

¹⁹² Surbier et al. 2014.

¹⁹³ Kuhn et al. 2002.

¹⁹⁴ Surbier et al. 2014.

¹⁹⁵ Lieberman 2003.

¹⁹⁶ Ludewig und Lichter 2023.

¹⁹⁷ Lieberman 2003.

Modelle sind abstrahierte Darstellungen eines untersuchten Systems mit definierten Grenzen, Einschränkungen und einem klaren Zweck oder einer definierten Fragestellung. Gemäß dem konstruktivistischen Modellbegriff kann ein System aus miteinander verbundenen Elementen mit definierten Eigenschaften bestehen und gleichzeitig ein Subsystem sein, das Teil eines übergeordneten Systems ist. Netzwerke stellen diese Beziehungen zwischen den Subsystemen und deren Verbindungen dar.¹⁹⁸ Modelle sollen helfen, Systemverhalten und Wechselwirkungen zwischen Komponenten zu analysieren und zu verstehen, besonders wenn die Wechselbeziehungen zu komplex für das menschliche Verständnis werden. Dabei ist ein Modell immer eine Vereinfachung der Realität. Die Entscheidung darüber, welche Systemeigenschaften wesentlich sind, und welche vernachlässigt werden können, hängt vom Zweck des Modells ab. Modelle können beschreibend (deskriptiv) oder vorschreibend (präskriptiv) sein.¹⁹⁹ Die Herausforderung besteht darin, die optimale Lösung zu finden, die das erforderliche Maß an Effizienz zu angemessenen Kosten bietet.²⁰⁰ Abbildung 16 stellt ein Modell als Experiment für eine geplante Änderung dar.

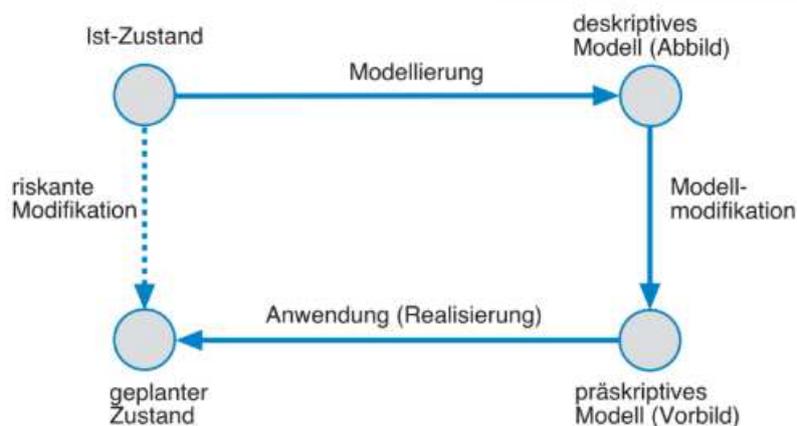


Abbildung 16: Modell als Experiment für eine geplante Änderung²⁰¹

Seit den 1970er Jahren wurden Computeranwendungen in die Produktionsplanungsprozesse integriert, um den gestiegenen Anforderungen von Kunden und Behörden gerecht zu werden. Der erhöhte Wettbewerb führte zu verstärkter Softwareunterstützung durch verbesserte Rechenleistung, wodurch

¹⁹⁸ Sayer 2013.

¹⁹⁹ Ludewig und Lichter 2023.

²⁰⁰ Wozniakowski et al. 2018.

²⁰¹ Ludewig und Lichter 2023.

Algorithmen effizienter und leistungsfähiger wurden.²⁰² Angesichts sich ändernder Kundenbedürfnisse, steigender Ressourcenkosten und zunehmender Unsicherheiten müssen Fertigungsunternehmen von heute flexibel reagieren. Eine vielversprechende Strategie zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist die Digitalisierung des Fertigungssystems.²⁰³ Jedes Informationssystem stellt ein Modell der Realität dar.²⁰⁴ Ein präzises virtuelles Modell ermöglicht die Bewertung verschiedener Szenarien eines realen Systems, ohne kostspielige und zeitaufwändige Experimente am physischen System durchführen zu müssen.²⁰⁵ Das Ziel ist eine umfassende Planung, Bewertung und kontinuierliche Verbesserung aller wesentlichen Prozesse und Ressourcen. Daher sind computerbasierte Modelle für die Planung von Produktions- und Logistiksystemen heute unverzichtbar.²⁰⁶

Die computerbasierte Modellierung umfasst eine breite Palette von Methoden und Anwendungen. In der Analyse von Produktions- und Logistiksystemen werden häufig mathematische Modelle verwendet.²⁰⁷ Mathematische Modelle sind formell und deskriptiv,²⁰⁸ repräsentieren ein System in Bezug auf logische und quantitative Beziehungen und können durch mathematische Gleichungen und Algorithmen manipuliert werden, um zu sehen, wie das Modell reagiert und folglich, wie das physische System reagieren würde – unter der Annahme, dass das mathematische Modell valide ist.^{209 210}

Man kann mathematische Modelle in deterministische und stochastische Modelle sowie in statische und dynamische Modelle unterteilen:^{211 212}

Deterministische Modelle basieren auf exakten Annahmen und beinhalten keine zufälligen Komponenten. Sie versuchen, das Verhalten eines Systems unter vollständig bestimmten Bedingungen vorherzusagen, ohne Unsicherheiten.

Stochastische Modelle berücksichtigen Unsicherheiten und zufällige Komponenten. Sie verwenden Wahrscheinlichkeiten, um die Variabilität in einem System zu

²⁰² Simchi-Levi et al. 2005.

²⁰³ Kunath und Winkler 2018.

²⁰⁴ Denert 1991.

²⁰⁵ Law 2013.

²⁰⁶ Tempelmeier 2018.

²⁰⁷ Nyhuis 2003.

²⁰⁸ Ludewig und Lichter 2023.

²⁰⁹ Subhashini Ganapathy et al. 2003.

²¹⁰ Law 2013.

²¹¹ Subhashini Ganapathy et al. 2003.

²¹² Law 2013.

modellieren. Die Ausgabe eines stochastischen Modells ist selbst zufällig und wird als Schätzung betrachtet.

Statische Modelle repräsentieren einen Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt, ohne zeitliche Veränderungen zu berücksichtigen. Sie erfassen den Momentaufnahme-Zustand eines Systems, ohne dessen Entwicklung im Laufe der Zeit zu modellieren – ideal für analytische Zwecke, wenn das Interesse einem spezifischen Zeitpunkt gilt.

Dynamische Modelle repräsentieren ein System in seiner zeitlichen Entwicklung. Sie berücksichtigen zeitliche Veränderungen und modellieren die Entwicklung von Zuständen im Verlauf der Zeit. Diese Modellierungsmethode wird für die Simulation von Systemen mit sich ändernden Bedingungen und Interaktionen über die Zeit verwendet. Dabei unterscheidet man zwischen diskreten dynamischen Modellen und kontinuierlichen dynamischen Modellen. Letztere repräsentieren ein System, bei dem Zustandsänderungen kontinuierlich über die Zeit erfolgen. Zeitdiskrete Modelle betonen hingegen Zustandsänderungen, die durch Ereignisse oder Aktivitäten zu diskreten Zeitpunkten auftreten.

Die Planung der Logistik in der Lieferkette ist ein komplexer Prozess. Eine schlechte Planung kann zu Systeminstabilität führen. Daher müssen korrekte Entscheidungen getroffen werden, um die Leistung des Systems zu optimieren. Wichtig ist, dass die richtigen Informationen an die betroffene Einheit übermittelt werden, die die richtigen Informationen erhalten muss.²¹³ Insbesondere können computerbasierte Modelle dazu verwendet werden, die Fertigbarkeit bestimmter Produkte oder Produktsequenzen zu zeigen, den optimalen Zeitpunkt für die Module und Linien zu bestimmen, Engpässe zu vermeiden, das Layout und die Leistung der Anlage zu optimieren sowie die Kosten pro Einheit und die Verwaltungskosten zu berechnen.²¹⁴ Solche Modelle können auch aus schlanken Abbildungswerkzeugen, deskriptiven Modellen, wie Wertstromanalyse stammen, einer visuellen Modellierung von Wertstromoperationen, die als Bildschirmfoto fungiert. Diese können nützlicher gestaltet werden, indem sie sie als Eingabe für einen Systemdynamik-Ansatz verwenden.²¹⁵

²¹³ Subhashini Ganapathy et al. 2003.

²¹⁴ Böhm 2021.

²¹⁵ Rocha und Lopes 2022.

Es ist von enormer Bedeutung, dass während des Entwicklungsprozesses eines Modells, die Verifizierung und Validierung dieses sichergestellt ist, sodass alle relevanten Eigenschaften abgedeckt sind.²¹⁶

2.3.1 Entwicklungsprozess nach Verifizierung- und Validierungsstandards

Wie bereits erläutert wurde, stellt ein Modell eine abstrahierte Darstellung der Realität mit einem spezifischen Zweck dar. Daher kann die Gültigkeit eines Modells nur im Hinblick auf das definierte Ziel beurteilt werden. Der Statistiker und professionelle Modellierer Box erkannte 1987 treffend an: "Alle Modelle sind falsch, die praktische Frage ist, wie falsch sie sein dürfen, um nicht nützlich zu sein." Diese Erkenntnis unterstreicht, dass es wahrscheinlich immer eine gewisse Abweichung zwischen einem Modell und der Realität geben wird. Die zentrale Frage liegt jedoch darin, welche Fehlertoleranz akzeptabel ist, um daraus gültige Schlussfolgerungen zu ziehen.²¹⁷

2.3.1.1 Entwicklungsprozess

Die Erstellung einer computerbasierten mathematisch-analytischen Modellierung erfordert den Einsatz von Software-Tools. Diese Tools ermöglichen die Nachbildung eines Systems in Form eines computergesteuerten Modells. Die Vielfalt solcher Tools kann in folgende Klassen unterteilt werden:^{218 219 220}

- **Stufe 0:** reine Programmiersprachen (Implementierungssprache) ohne vordefinierte Komponenten/Bausteine
- **Stufe 1:** Programmiersprachen einschließlich simulationsrelevanter Grundkomponenten
- **Stufe 2:** allgemeine Simulationswerkzeuge
- **Stufe 3:** spezialisierte Werkzeuge für bestimmte Anwendungsbereiche, einschließlich speziell entwickelter Modellkomponenten für z. B. Produktion und Logistik
- **Stufe 4:** Software, die auf Teile bestimmter Teilbereiche von Anwendungsfeldern spezialisiert ist, einschließlich mehr vordefinierter Modellkomponenten für diesen spezifischen Teilbereich

²¹⁶ Page und Kreutzer 2005.

²¹⁷ Box und Draper 1987.

²¹⁸ Page und Kreutzer 2005.

²¹⁹ Rabe et al. 2008.

²²⁰ Tempelmeier 2018.

Es ist wichtig zu betonen, dass es viele verschiedene Entwicklungsprozessmodelle für eigens erstellte Modellierungssoftware der Stufe 0 und 1, sowie Modellierungen mit existierender Simulationssoftware der Stufen 3 bis 5 gibt. In dieser Arbeit wird ein häufig zitiertes Verfahrensmodell für computerbasierte Modelle mit Verifikation und Validierung (V&V) in der Produktion und Logistik von Rabe, Spieckermann und Wenzel vorgestellt, wie in Abbildung 17 ersichtlich. Die genannten Autoren entwarfen dieses Verfahrensmodell basierend auf den Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure VDI (VDI 2008).²²¹

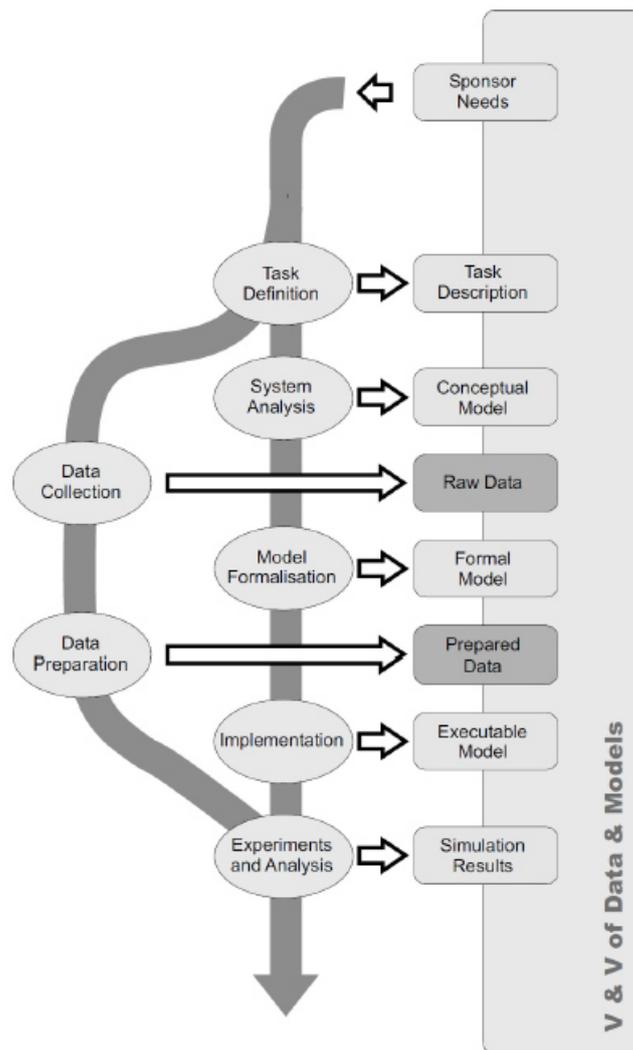


Abbildung 17: Entwicklungsprozess eines computerbasierten Modells nach Verifikations- und Validierungsstandards²²²

Ausgehend von den Bedürfnissen des Auftraggebers eines Modellierungsprojekts (Sponsors Needs) wird die genaue Aufgabenbeschreibung (Task Description) definiert.

²²¹ Rabe et al. 2008.

²²² Rabe et al. 2008.

Sind der Modellzweck einmal definiert, konzentriert sich das V&V-Modell auf vier Phasen der Modellerstellung und ihren Ergebnissen, und unterteilt den Umgang mit Daten und den Modellerstellungsprozess. Die Phasen Datensammlung (Data Collection) und Datenaufbereitung (Data Preparation) sowie ihre Ergebnisse Rohdaten (Raw Data) und aufbereitete Daten (Prepared Data) sind aus der Abfolge der Modellierungsschritte ausgeschlossen, da sie separat neben dem Modellierungsprozess behandelt werden können. Aufgrund des komplexen Charakters der meisten Simulationsmodelle muss die V&V ein ständiger Prozess während des Modellerstellungsprozesses sein, anstatt V&V erst nach Abschluss eines Modells durchzuführen. Die Verifizierung und Validierung werden als Tests an Aufgabenergebnissen durchgeführt, anstatt an den Aufgaben selbst, was auch in Abbildung 17 visualisiert wird.²²³

Nachdem klar ist, welche Aufgabe das Modell haben soll, ist der nächste Schritt, das untersuchte System zu analysieren. Ziel der Analyse ist, das bestehende Problem zu durchdringen und zu verstehen und ein konzeptuelles Modell (Conceptual Model) aus diesen Erkenntnissen zu entwerfen. Bei der Erstellung des konzeptuellen Modells wird auch geklärt, inwieweit die Software eingesetzt werden kann, um das Problem zu lösen, und welche Aufgaben von dem zu entwickelnden Modell übernommen werden sollen.^{224 225 226} Somit ist das konzeptuelle Modell symbolisch und nicht direkt ausführbar, beschreibt jedoch die Systemgrenzen und relevante Eigenschaften. Im Softwareengineering (Stufe 0 und 1) wird in dieser Phase, aufbauend auf dem Problem Statement, also dem Modellzweck, das Lastenheft erstellt. Es beschreibt die funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen an das zu entwickelnde System. Funktionale Anforderungen beschreiben die spezifischen Funktionen, Dienstleistungen oder Aufgaben, die ein System erfüllen muss. Sie definieren, was das System tun soll, um den Benutzeranforderungen und den Geschäftszielen gerecht zu werden. Nichtfunktionale Anforderungen legen die Eigenschaften und Qualitätsmerkmale fest, die das System erfüllen muss, jedoch nicht unbedingt in Bezug auf spezifische Funktionen.²²⁷

²²³ Rabe et al. 2008.

²²⁴ Sommerville 2020.

²²⁵ Rabe et al. 2008.

²²⁶ Page und Kreutzer 2005.

²²⁷ Sommerville 2020.

“The hardest single part of building a software system is deciding precisely what to build. No other part of the conceptual work is as difficult as establishing the requirements ... No other part of the work so cripples the resulting system if done wrong. No other part is as difficult to rectify latter“ - (Brooks 1975)

Deutsche Übersetzung des Zitats von Brooks: Der schwierigste einzelne Teil beim Aufbau eines Softwaresystems besteht darin, genau zu entscheiden, was gebaut werden soll. Kein anderer Teil der konzeptionellen Arbeit ist so schwierig wie die Festlegung der Anforderungen ... Kein anderer Teil der Arbeit beeinträchtigt das resultierende System so stark, wenn er falsch gemacht wird. Kein anderer Teil ist so schwer zu korrigieren später.²²⁸

Die meisten Modelle werden erstellt, um komplexe Systeme zu beschreiben. Dies trifft besonders auf das Feld der Softwareentwicklung zu. Durch ihre Natur besteht ein Computersystem aus einer Vielzahl von miteinander interagierenden Teilen, die alle zusammenwirken. Um sichtbares Verhalten zu erzeugen, soll man entweder textuelle Systembeschreibungen erstellen, oder sich diagrammatische halbformale Beschreibungen wie Petri-Netze, Wertstromkarten (VSM) oder UML bedienen.^{229 230} UML (Unified Modeling Language) ist eine standardisierte Modellierungssprache, die in der Softwareentwicklung verwendet wird. Sie umfasst verschiedene Diagrammtypen, wie Klassendiagramme, Sequenzdiagramme und Aktivitätsdiagramme, um komplexe Systeme zu visualisieren und zu analysieren.²³¹

Aufbauend auf den Ergebnissen der Systemanalyse und dem resultierenden konzeptuellen Modell werden in den folgenden Phasen Modellformalisierung und Implementierung weitere Schritte unternommen, um ein ausführbares Modell (Executable Model) zu erstellen. Ein formales Modell (Formal Model) umfasst Vorbereitungen für die bevorstehende Modellimplementierung. Dokumente, die zur Formulierung des konzeptuellen Modells verwendet wurden, wie das Lastenheft, werden zum Pflichtenheft erweitert, welches die technischen Details spezifiziert.²³² Jedes Softwaresystem hat eine Softwarearchitektur, einen systematisch strukturierten, sachgerechten und modularen Komponentenaufbau, die miteinander die Gesamtfunktionalität des Systems bieten. Dieser Aufbau spiegelt sich nicht nur in dem

²²⁸ Übersetzt durch den Autor

²²⁹ Lieberman 2003.

²³⁰ Page und Kreuzer 2005.

²³¹ InfraSoft GmbH - Die Profis 2003.

²³² Sommerville 2020.

maschinell lesbaren und verarbeitbaren Code wider, sondern er drückt sich vor allem auch in der begleitenden Dokumentation aus. Die Schnittstellen der Komponenten werden so präzise wie möglich festgelegt, damit diese am Ende problemlos integriert werden können.²³³ ²³⁴ Die Umsetzung und Implementierung eines ausführbaren Modells erfolgen durch die Erweiterung des bestehenden konzeptionellen und formalen Modells zu einer digitalen Darstellung mithilfe eines zuvor beschriebenen Software-Tool. Die neun V&V-Kriterien Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit, Aktualität, Anwendbarkeit, Plausibilität, Klarheit, Machbarkeit und Zugänglichkeit sollen ständig berücksichtigt werden.²³⁵

Die Phase der Datensammlung bezieht sich auf Aufgaben, die die tatsächliche Beschaffung der benötigten Eingaben umfassen, einschließlich der Definition von Dateneinheitstypen und deren Attribute sowie Datentypen. Oft stehen die Dateninputs nicht im benötigten Eingabeformat oder in der erforderlichen Granularität zur Verfügung. Daher müssen während der Data Preparation-Phase oft zusätzliche Daten generiert, konvertiert, gefiltert oder verarbeitet werden, um Informationen so verfügbar zu haben, wie sie benötigt werden. ²³⁶

Nachdem ein verifiziertes und gültiges Modell entworfen wurde, kann die abschließende und gewünschte Aufgabe durchgeführt werden: Experimente durchführen und Analysen durchführen, die zu sinnvollen Simulationsergebnissen führen sollen. Dennoch ist eine sinnvolle Interpretation dieser Ergebnisse und die Ableitung von Maßnahmen für das untersuchte System nur möglich, wenn die Variationen der Experimentparameter gezielt und systematisch erfolgen. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt immer in Zusammenarbeit zwischen dem Planer oder Kunden und dem Simulationsexperten. Die Verarbeitung der Ergebnisse zur Interpretation sollte während oder direkt nach jedem Simulationslauf durchgeführt werden. Kategorisch wird zwischen tabellarischer und graphischer Darstellung kumulierter Ergebnisse unterschieden, einschließlich der Visualisierung von Fortschrittsdaten. Die Wahl der grafischen Darstellung muss individuell für die gewünschte Aussage des Simulationsexperiments bestimmt werden. Heutzutage steht

²³³ Denert 1991.

²³⁴ Sommerville 2020.

²³⁵ Rabe et al. 2008.

²³⁶ Rabe et al. 2008.

eine große Auswahl an Diagrammtypen wie Linien-, Säulen-, Kreis-, Torten- oder Sankey-Diagrammen in verschiedenen Bibliotheken zur Verfügung.^{237 238}

2.3.1.2 Verifizierung und Validierung

Validierung bezieht sich auf die Beurteilung, ob ein Modell in Bezug auf das Verhalten und die repräsentative Genauigkeit korrekt ist. Besonders relevant ist dies, wenn die Realität zunächst in ein konzeptionelles Modell zerlegt wird, auch als konzeptionelle Modellvalidierung bekannt. Operative Validierung hingegen zielt darauf ab festzustellen, ob die Ausgabe eines ausführbaren computerisierten Modells ausreichende Genauigkeit aufweist.²³⁹

Parallel zur Validierung ist es für den Modellentwickler entscheidend, sicherzustellen, dass ein verifiziertes Modell vorliegt. Verifizierung bezieht sich auf die Richtigkeit der angewendeten Regeln, Funktionen und Komponenten. Anders als die Validierung betrifft die Verifizierung nicht das korrekte Verhalten eines Modells, sondern vielmehr die korrekte Übertragung des konzeptionellen Modells in eine computerisierte Umgebung.²⁴⁰

Das National Institute of Standards and Technology der USA (NIST) beschreibt Software-Verifizierung und -Validierung (V&V) als "einen umfassenden ingenieurtechnischen Ansatz, um die Softwarequalität sicherzustellen und optimale Softwareleistung zu erzielen". V&V unterstützt die Anforderungen an Projektmanagement und Qualitätssicherung und hilft, sichere, zuverlässige und wartbare Softwareprogramme zu erstellen, wenn es zusammen mit anderen Softwaretechnikstandards verwendet wird.²⁴¹

Um die erwarteten Ziele eines Modells zu erreichen, haben Rabe, Spieckermann und Wenzel Verifizierungs- und Validierungskriterien festgelegt. Dazu gehören:²⁴²

- **Vollständigkeit:** In Bezug auf Inhalt, Struktur und Daten.
- **Konsistenz:** In Bezug auf semantische Abhängigkeiten, Inhalt und Struktur.
- **Genauigkeit:** In Bezug auf Modellierung, richtige Wahl des Detaillierungsgrads, Granularität der Daten und Verteilung der Variablen.

²³⁷ Rabe et al. 2008.

²³⁸ Tempelmeier 2018.

²³⁹ Page und Kreuzer 2005.

²⁴⁰ Rabe et al. 2008.

²⁴¹ Wallace und Fujii 1989.

²⁴² Rabe et al. 2008.

- **Aktualität:** In Bezug auf die Gültigkeit von Inhalt und Zeit über verwendete Informationen und Daten, einschließlich der Gültigkeit eines Modells für einen bestimmten Zweck.
- **Anwendbarkeit:** In Bezug auf Passgenauigkeit, Eignung und Nutzbarkeit von Modellergebnissen, Zweckmäßigkeit des Modellzwecks und Nutzen für Benutzer.
- **Plausibilität:** In Bezug auf Transparenz von Abhängigkeiten und Modellergebnissen.
- **Klarheit:** In Bezug auf Reproduzierbarkeit für Benutzer, Transparenz bei der Modellierung und Lesbarkeit.
- **Durchführbarkeit:** In Bezug auf technische Anforderungen, Erreichbarkeit von Projektzielen und Projektzeitplänen.
- **Zugänglichkeit:** In Bezug auf die Verfügbarkeit von Daten und Dokumenten, Glaubwürdigkeit von Informations- und Datenquellen sowie Beschaffungsaufwand.

Die Glaubwürdigkeit und das Vertrauen in das Modell sind entscheidend für den Erfolg jedes Modellierungsprojekts. Regelmäßige Tests sollten sicherstellen, dass das Modell eine plausible Darstellung des realen Systems bietet und alle im Problemstatement (Lastenheft) aufgeworfenen Fragen beantworten kann. Es ist essentiell, dass solche Tests dokumentiert werden, und im Falle negativer Ergebnisse sollten betroffene Bereiche überarbeitet werden.^{243 244} Die Anwendung von Methodologien wie Test Driven Development (TDD) ist dabei besonders relevant, insbesondere wenn die Modellsoftware neu erstellt wird. TDD beinhaltet die Erstellung von Tests vor der eigentlichen Implementierung, um sicherzustellen, dass das Modell die spezifizierten Anforderungen erfüllt und unerwünschte Veränderungen verhindert. Durch kontinuierliches Testen können Entwickler sicherstellen, dass Änderungen im Modell nicht unbeabsichtigt zu Fehlern führen und die Validität und Verifizierung konsequent aufrechterhalten bleibt.²⁴⁵

Wichtige Validierungsschritte während des gesamten Modellierungszyklus sind:²⁴⁶

- **Qualität der gesammelten Daten:** Vor ihrer Verwendung sollten die Daten des realen Systems auf ihre Qualität hin überprüft werden.

²⁴³ Page und Kreutzer 2005.

²⁴⁴ Rabe et al. 2008.

²⁴⁵ Sommerville 2020.

²⁴⁶ Page und Kreutzer 2005.

- **Validierung von Theorien:** Informelle konzeptionelle Modelle müssen gegen Daten und andere relevante Theorien validiert werden.
- **Überprüfung des Transformationsprozesses:** Der Übergang von einem konzeptionellen Modell zur finalen Implementierung muss überprüft werden.
- **Operative Modellvalidierung:** Pilotläufe sollten durchgeführt werden, um das Verhalten des Modells zu überprüfen und mit Referenzdaten zu vergleichen.
- **Modellkalibrierung:** Im Falle von Diskrepanzen sollten Modellparameter angepasst werden, um die Vorhersagen des Modells zu verbessern.

Weitere Ansätze und Techniken zur Modellverifizierung & -Validierung sind beispielsweise in (Wallace und Fujii 1989), (Rabe et al. 2008) oder (Balci 2003) zu finden.

3 Hauptteil der Arbeit

In diesem Kapitel soll auf Basis des gewonnenen Wissens der theoretischen Forschung und in Kooperation mit einem rasant wachsenden Industriepartner ein Planungsunterstützungstool für den Produktionshochlauf erarbeitet werden und im Anschluss eine objektive Bewertung der Funktionalitäten erfolgen.

Im Kapitel 2.1 „Logistisches Produktionssystem“ wird auf theoretische Grundlagen eingegangen, um die Komplexität und die Zusammenhänge eines solchen Systems zu veranschaulichen. Diese verdeutlichen einerseits die Schwierigkeit des Produktionshochlaufs, gleichzeitig wird dieses theoretische Wissen benötigt, um ein möglichst effizientes Planungsunterstützungstool zu erarbeiten.

Im Kapitel 2.2 „Unternehmenswachstum“ werden die Schwierigkeiten und Herausforderungen dieses Prozesses erläutert. Dabei wird explizit auf das Ramp-Up-Management eingegangen, welche Faktoren für die Strategieentwicklung entscheiden sind, es werden Umsetzungsmaßnahmen erläutert, und es wird auf die Messung des Erfolges eingegangen. Es wird aber auch erforscht, welche Eigenschaften ein für das Management entwickelte Planungs- und Entscheidungsunterstützungstool haben soll, um dieses beim Hochfahren eines Produktionssystems möglichst effizient zu unterstützen.

Das Kapitel 2.3 „Computerbasierte Modellierung von Logistik- und Produktionssysteme“ schließt mit dem Entwicklungsprozess einer computerbasierten Modellierung die benötigte Theorie zur Erstellung eines analytischen Modells, welches beim Ramp-Up unterstützen soll, ab.

Ein Planungsunterstützungstool für das Ramp-Up ist maßgeblich von der Ramp-Up-Strategie abhängig, welche wiederum von den definierten Unternehmenszielen sowie von den Einflussfaktoren Zeit, Kosten, Komplexität und Ungewissheit geprägt wird. Diese Einflussfaktoren werden sowohl durch die spezifische Unternehmenssituation als auch durch das betrachtete logistische Produktionssystem beeinflusst.²⁴⁷ Aus diesem Grund wird das vorliegende Kapitel in zwei Abschnitte unterteilt. Im ersten Abschnitt wird der Industriepartner vorgestellt, wobei sowohl die aktuelle Unternehmenssituation als auch die angewandte Ramp-Up-Strategie erläutert werden. Dadurch wird der Startpunkt des Entwicklungsprozesses nach Abbildung 17: Entwicklungsprozess eines computerbasierten Modells nach Verifikations- und Validierungsstandards“ markiert,

²⁴⁷ Vgl. Kapitel 2.2.2 “Ramp-Up-Management“

indem die Bedürfnisse des Industriepartners und somit des Auftraggebers detailliert analysiert werden. Der zweite Teil dieses Kapitels widmet sich dem praktischen Aspekt und stellt das eigentliche Ziel der Arbeit dar, nämlich die Entwicklung einer IT-gestützten Methodik für das Ramp-Up-Management unter Berücksichtigung des betrachteten Produktionssystems. Dabei wird ein konzeptionelles Modell vorgestellt und die Anwendung sowie die erzielten Ergebnisse werden diskutiert.

3.1 Industriepartner

Das betreffende Unternehmen hat seinen Sitz in Bozen (Italien) und ist seit 2018 in der Produktion von Ladesäulen für die Elektromobilität tätig. Es verzeichnet ein bemerkenswertes Wachstum. In der Tabelle 4: Unternehmensentwicklung von 2018 bis 2024“ wird dieses Wachstum anhand konkreter Zahlen und Fakten dargestellt.

Tabelle 4: Unternehmensentwicklung von 2018 bis 2024

| Jahr | Event | Produzierte Ladesäulen | Mitarbeiter zum 31/12 |
|-------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| 2016 | <ul style="list-style-type: none"> • Beginn R&D Ladesäulen | 0 | 21 |
| 2017 | / | 0 | 26 |
| 2018 | <ul style="list-style-type: none"> • Launch Ladesäule 150 kW • Launch Ladesäule 300 kW • Eröffnung Produktionsstandort mit 250 qm • Eröffnung Produktionslager mit 150 qm | 78 | 40 |
| 2019 | <ul style="list-style-type: none"> • Erweiterung der Produktionsstätte um 500 qm • Erweiterung Produktionslager um 800 qm | 858 | 68 |
| 2020 | <ul style="list-style-type: none"> • Eröffnung Lagerhalle mit 500 qm | 1.759 | 122 |
| 2021 | <ul style="list-style-type: none"> • Eröffnung Produktionsstandort mit 2.500 qm • Eröffnung Produktionslager mit 200 qm • Eröffnung Lagerhalle mit 300 qm | 5.203 | 224 |

| | | | |
|-------------|---|-------------------|-----|
| 2022 | <ul style="list-style-type: none"> • Eröffnung Produktionsstandort mit 10.000 qm • Eröffnung Produktionslager mit 500 qm • Eröffnung Lagerhalle mit 1.000 qm | 10.521 | 420 |
| 2023 | <ul style="list-style-type: none"> • Launch Ladesäule 50 kW • Launch Ladesäule 400 kW • Eröffnung Lagerhalle mit 500 qm | 24.097 | 890 |
| 2024 | <ul style="list-style-type: none"> • Launch Ladesäule 200 kW • Produktionsende Ladesäule 150 kW • Produktionsende Ladesäule 300 kW • Eröffnung Produktionsstandort mit 11.000 qm • Eröffnung Produktionslager mit 1.200 qm | 35.000 geplant | |

Wie Anhand der Absatzzahlen aus der Tabelle 4 zu entnehmen ist, erlebt dieses Unternehmen ein Wachstum, welches relativ mit dem Anstieg der verkauften Elektroleichtfahrzeugen korreliert.²⁴⁸

Mittlerweile hat der Industriepartner seine Aktivitäten auf globaler Ebene ausgeweitet, beispielsweise durch die Errichtung eines Produktionsstandorts in Charlotte (USA) im Jahr 2023 für den amerikanischen Markt. Diese Arbeit konzentriert sich jedoch auf den Standort Bozen, der seit 2018 einen komplexen Produktionshochlauf erlebt und als eigenständiges Produktionssystem mit über vier Produktionsstätten sowie Produktionslager und vier externe Lager verfügt.²⁴⁹ Die globale Expansion wird nicht behandelt, da sie unter anderem von geopolitischen Bedingungen abhängt und den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde.

Das schnelle Wachstum und der Innovationsdruck in der Branche erschweren jegliche Prognosen und langfristige Planungen von Kapazitätserweiterungen. Neue Stücklisten erfordern fortlaufendes Re-Engineering der Fertigungsprozesse, und das Wachstum der Mitarbeiterzahl in allen Abteilungen verändert interne Kommunikations- und Koordinationsprozesse. Es ergibt sich ein unternehmensinterner Wandel, der schneller voranschreitet, als geplant und gesteuert werden kann.

²⁴⁸ Vgl. Abbildung 1: Geschätzter weltweiter Absatz von Elektroleichtfahrzeugen von 2015 bis 2022

²⁴⁹ Vgl. Abbildung 21: Landkarte des standortübergreifenden Produktionssystems

3.1.1 Beurteilung aus Wachstumswissenschaftlicher Sicht:

Eingliederung und Probleme

Die Unternehmensentwicklung von 2018 bis 2024, wie sie in Tabelle 4 dargestellt ist, zeigt deutlich eine Zunahme der Mitarbeiterzahl sowie eine häufige Erweiterung der Produktionskapazitäten. Dies legt nahe, dass sich das Unternehmen eindeutig in einer Expansionsphase befindet. Angesichts der prognostizierten weiteren Zunahme der Nachfrage liegt der Fokus des Unternehmens darauf, seine Produktionskapazitäten an die Leistungsnachfrage anzupassen. Dabei sieht sich der Industriepartner mit klassischen Problemen konfrontiert, die Unternehmen in dieser Phase des Wachstums typischerweise bewältigen müssen. Daher wird im Rahmen dieses Abschnitts auf die in Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“ beschriebenen Hauptschwierigkeiten eines Unternehmens in dieser entscheidenden Phase am Beispiel des Industriepartners eingegangen.

3.1.1.1 Personalszuwachs

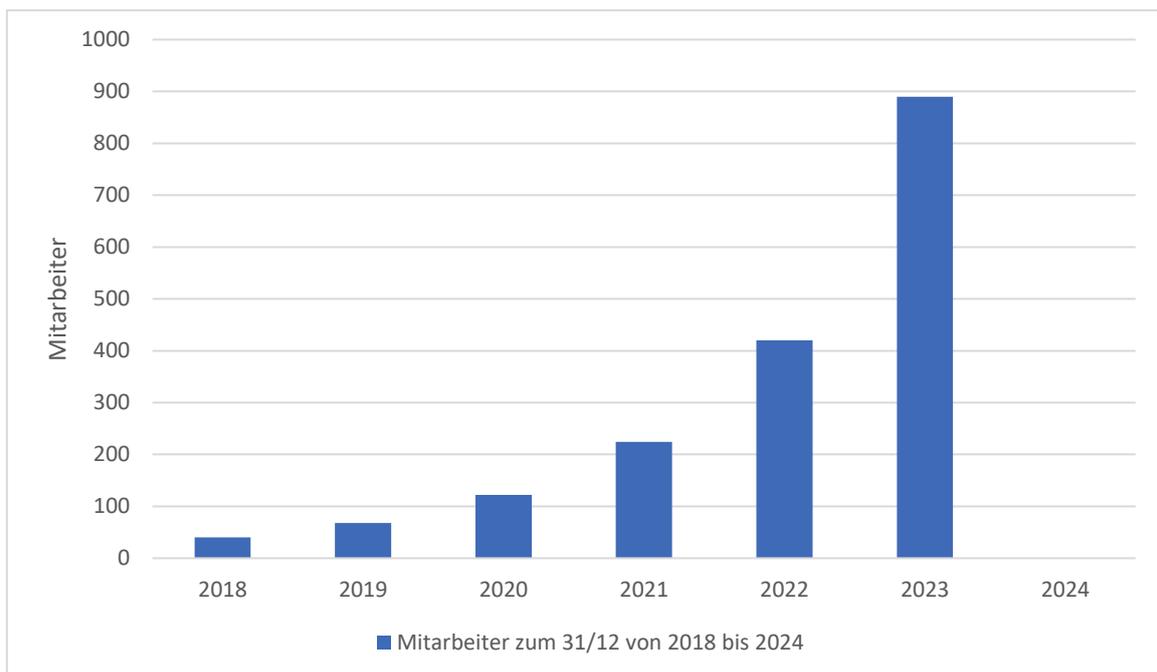


Abbildung 18: Entwicklung der Beschäftigung von 2018 bis 2024

Die Entwicklung der Beschäftigung, wie in Abbildung 18 dargestellt, zeigt eine nahezu jährliche Verdoppelung des Personals, was verschiedene Herausforderungen mit sich gebracht hat. Eine dieser Herausforderungen besteht in der Integration neuer Mitarbeiter. Das bestehende Personal ist durch die zunehmende Arbeitslast, die mit der steigenden Leistungserbringung einhergeht, überlastet und hat gleichzeitig

Schwierigkeiten, die neuen Mitarbeiter einzuarbeiten. Dies führt unmittelbar zu einem weiteren Problem, nämlich der Motivation der Mitarbeiter. Die erhöhte Stressbelastung senkt die Motivation des bereits integrierten Personals, während die mangelnde Integration die Motivation der neuen Mitarbeiter beeinträchtigt. Darüber hinaus kann die Nichterreichung der Unternehmens- oder Abteilungsziele demotivierend wirken. Ein weiteres Problem ist die Vergabe von Positionen an Personen, die möglicherweise mit den rasch wechselnden Umständen überfordert sind. Beispielsweise macht es einen Unterschied, ob jemand die Koordination von fünf Arbeitern an einer Arbeitsstation oder die Leitung von 100 Arbeitern an einem Produktionsstandort übernehmen muss.²⁵⁰

Neben dem personellen Wachstum bringen auch die häufige Gründung neuer Abteilungen zusätzliche Herausforderungen in Bezug auf Kommunikation und Koordination mit sich. Verantwortungsbereiche werden übertragen und zugewiesen, was dazu führen kann, dass bestimmte Aufgaben entweder mehrfach oder überhaupt nicht ausgeführt werden. Gleichzeitig erfordern einige Aufgaben die Zusammenarbeit von größeren Teams aus verschiedenen Abteilungen, was zu Verzögerungen führen kann.²⁵¹ Ein Mitgründer und aktueller CEO des Kooperationsunternehmens kommentierte diese Entwicklung wie folgt: "Kaum vorstellbar, wie langsam und unflexibel wir in so kurzer Zeit geworden sind".

Die in Abbildung 19 rot gekennzeichneten Abteilungen der Organisationsstruktur für das Jahr 2023 wurden erst im Laufe des Jahres 2022 von der Produktionsabteilung abgespalten.

²⁵⁰ Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

²⁵¹ Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

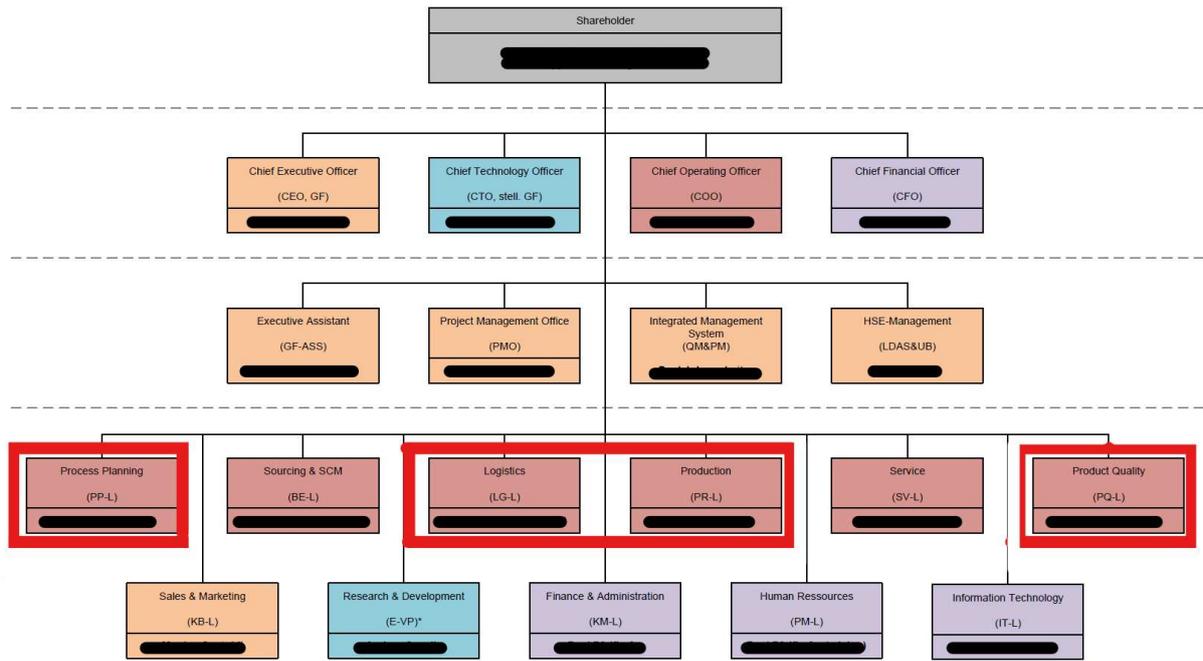


Abbildung 19: Organisationsstruktur 2023

Da sich diese Arbeit auf das Ramp-Up-Management konzentriert, wird nicht näher auf die interne Bewältigung dieser Herausforderungen eingegangen. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass eine Etablierung von Querschnittsfunktionen erforderlich ist, um ganzheitliches Denken zu fördern und zwischen den Abteilungen zu koordinieren und zu vermitteln.²⁵² Wie aus Abbildung 19 ersichtlich ist, wurden im Jahr 2022 die Abteilung für Prozessplanung und die Logistikabteilung als eigenständige Funktionen in die Organisationsstruktur aufgenommen. Wie in Kapitel 2.1.2 näher erläutert, spiegelt das Logistikmanagement eine solche Rolle als Querschnittsfunktion wider, indem es als Vermittlungsinstanz zwischen Produktion, Einkauf, Verkauf und IT fungiert. Ebenso bildet die Prozessplanung eine Vermittlungsinstanz zwischen F&E sowie Produktion.

3.1.1.2 Infrastruktur

Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, ist das rationale Ziel eines jeden Unternehmens Überlebensfähig zu bleiben und seine Wettbewerbsposition zu stärken. Gleiches gilt für den Industriepartner, der bestrebt ist, sein Wachstumspotenzial zu nutzen und die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens zu steigern. Abbildung 20 veranschaulicht die Entwicklung der Produktion von Ladesäulen seit dem Launch der ersten Ladesäule 2018 entwickelt hat. Der letzte Eintrag von 35.000 Ladesäulen im Jahr 2024 ist die geplante Menge für den Produktionsstandort Bozen.

²⁵² Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

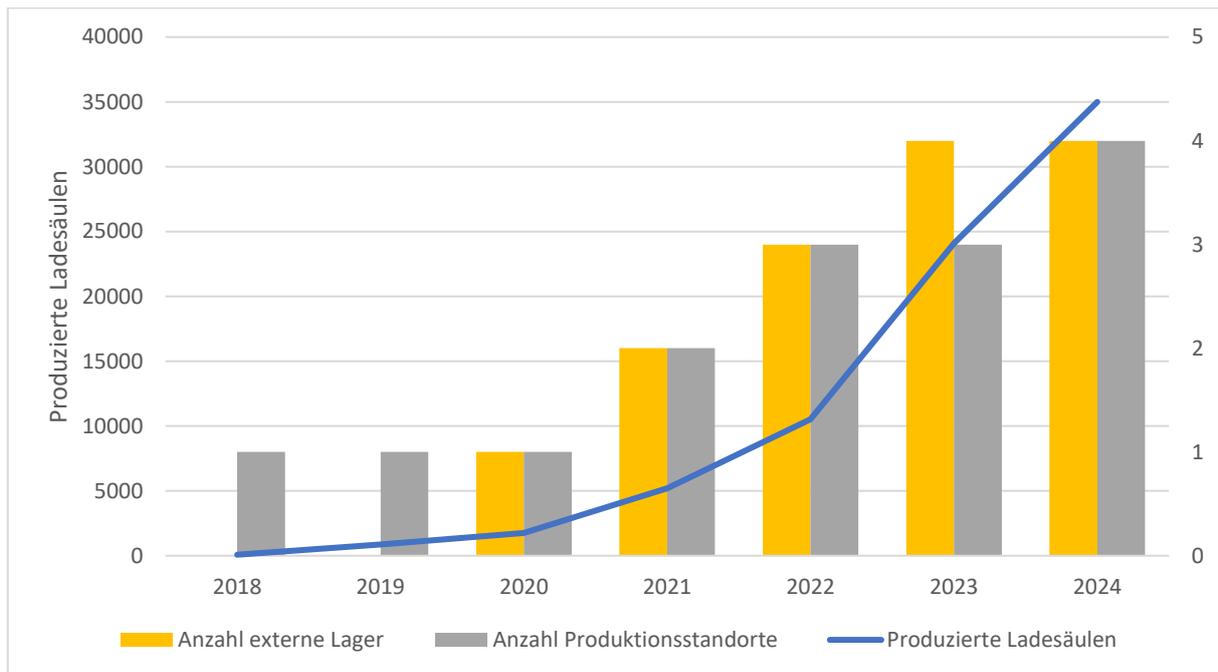


Abbildung 20: Produzierte Ladesäulen, Anzahl Produktionsstandorte und Anzahl externe Lagerhallen

Wie in Abbildung 20 ersichtlich ist, wurden die Produktionskapazitäten in kurzer Zeit erheblich ausgebaut. Seit 2021 ist geplant, am Standort Bozen ein neues Hauptquartier mit modernem Produktionssystem zu errichten. Der Baubeginn wurde jedoch aufgrund bürokratischer und politischer Hindernisse bisher nicht realisiert. Um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden, wurden oft kurzfristige Entscheidungen getroffen und sofort umsetzbare Kapazitätserweiterungen durchgeführt, indem beispielsweise verfügbare Produktionsstandorte und Lagerhallen zugekauft wurden. Dadurch hat sich ein standortübergreifendes Produktionssystem entwickelt, welches täglich viele Transporte zwischen den Produktionsstandorten und Lagern erfordert. Dieses Produktionsnetzwerk ist in Abbildung 21 dargestellt, wobei die Buchstaben die Produktionsstandorte und die Ziffern die externen Lagestätten kennzeichnen. Heute fungiert das Lager „1“, „2“ und „4“ als Zentrallager für den Wareneingang, während das Lager „3“ als Distributionslager fungiert.

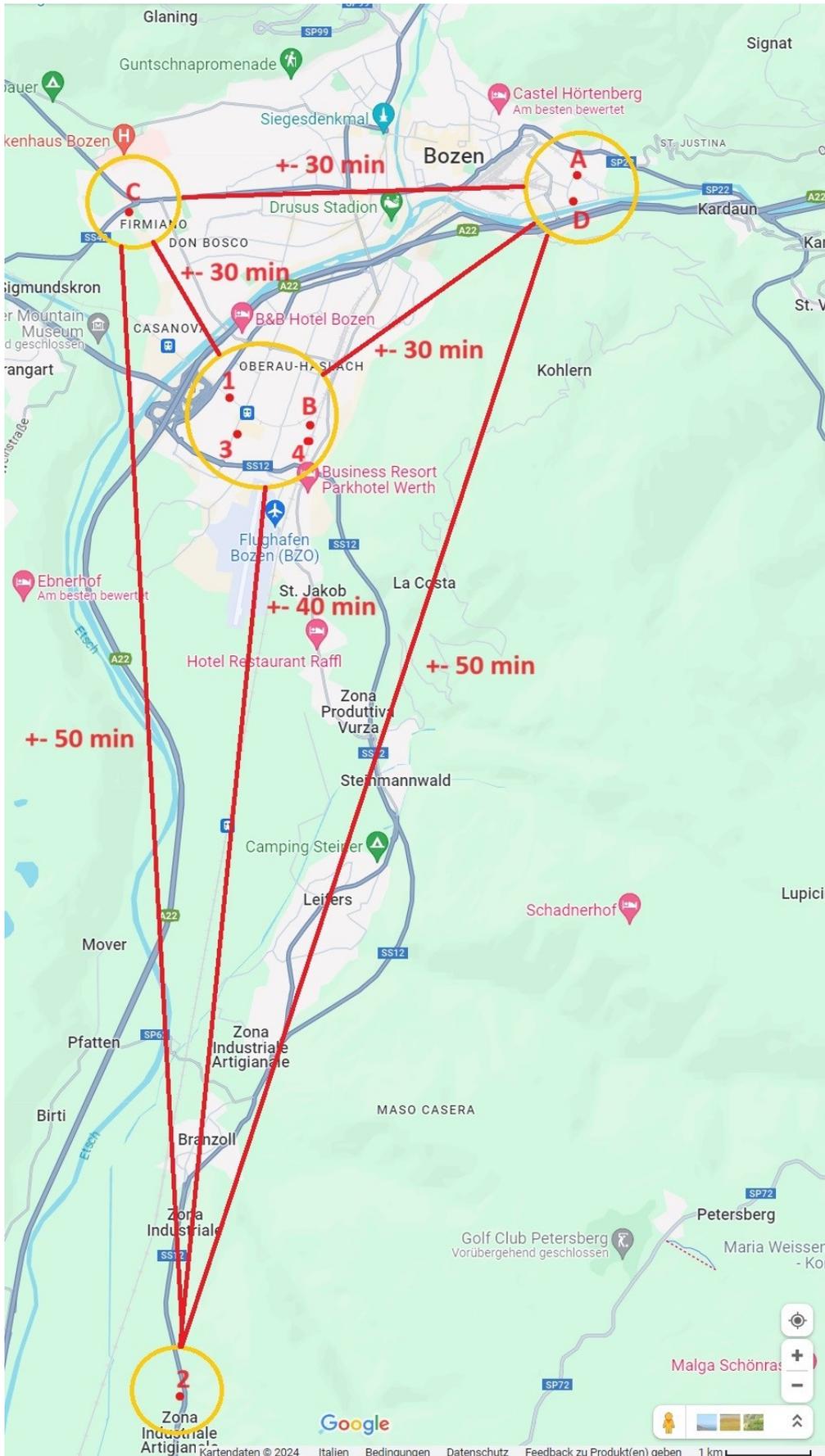


Abbildung 21: Landkarte des standortübergreifenden Produktionssystems

Ein weiterer Aspekt ist die IT-Infrastruktur des Industriepartners. Ähnlich wie die physische Infrastruktur hat sich auch die IT-Infrastruktur des Unternehmens an neue Bedürfnisse angepasst und hochfrequent weiterentwickelt. Neben dem herkömmlichen ERP-System wurde ein eigens entwickeltes Trackingsystem eingeführt. Als ein neues ERP-System mit mehr integrierten Modulen benötigt wurde, entschied man sich zu Beginn 2022 für ein System, das den damaligen Anforderungen entsprach. Jedoch haben sich bis zum Zeitpunkt des "Go-Live" im Jahr 2023 die Unternehmensstruktur und interne Prozesse erheblich verändert, was zu unerwarteten Komplexitäten und Herausforderungen bei der Implementierung und Nutzung führte. Insbesondere beeinträchtigt dies die Übersicht und Kontrolle über die verfügbaren Kapazitäten, die Auslastungen von Fertigungslinien und Lagern sowie den reibungslosen Informationsfluss innerhalb des Unternehmens. Auch das integrierte MRPII-System ermittelt aufgrund häufiger Änderungen der Stücklisten falsche Bedarfe, was zu Stillständen, Überfüllung der Lager, unnötigen Transporten und nicht voll ausgenutzten Kapazitäten führt. Laut Literatur sind die Fähigkeiten und Kenntnisse der Manager in dieser Phase des Unternehmens von entscheidender Bedeutung, was die Notwendigkeit eines adaptiven Planungs- und Informationssystems zur Unterstützung deutlich macht.²⁵³

Zusammenfassend ist zu erkennen, dass der Industriepartner den klassischen Herausforderungen gegenübersteht, die in der Literatur erforscht und im Kapitel 2.2 detailliert dargestellt wurden. Es ist zu beobachten, dass diese Phase des Industriepartners durch hohe Investitionskosten und eine zunehmende Einschränkung der Flexibilität des Produktionssystems und der Organisationsstruktur gekennzeichnet ist.

3.1.2 Ramp-Up-Management des Industriepartners

Wie in Kapitel 2.2 „Unternehmenswachstum“ und folgende erläutert wird, müssen Unternehmen, die ein rasantes Wachstum erfahren, sich besonders durch hohe Anpassungsfähigkeit auszeichnen. Zu den weiteren Erfordernissen zählen:

- Die Integration von Querschnittsfunktionen in die Organisationsstruktur
- Ein ganzheitlicher Ansatz des Ramp-Up-Managements
- Speziell für den Ramp-Up angeschneiderte Planungs- und Kontrollsysteme, um die Fähigkeiten und Kenntnisse der Manager optimal zu nutzen

²⁵³ Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

Beim Industriepartner wurden mit der Gründung der Abteilungen Prozessplanung und Logistik bereits Querschnittsfunktionen in die Organisationsstruktur integriert.²⁵⁴ Durch ihre Einbindung in das Ramp-Up-Projekt folgt der Industriepartner den Vorgaben von Surbier et al. (2014) und verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz des Ramp-Up-Managements.²⁵⁵ In Tabelle 5 wie veranschaulicht, dass die Geschäftsführung, gemeinsam mit den Abteilungen Prozessplanung und Logistik, das Projektmanagement übernimmt und dabei den Fortschritt der Umsetzung verfolgt. Die Logistik und der Einkauf binden Lieferanten frühzeitig in den Produktionshochlauf ein, während die Qualitätsabteilung und die Prozessplanung für das Qualitätsmanagement verantwortlich sind. Prozess- und Changemanagement werden von den Abteilungen Prozessplanung, Produktion und Forschung und Entwicklung vorangetrieben. Geschäftsführung, Controlling, Prozessplanung und Logistik kümmern sich um das Kostenmanagement und Controlling.

Tabelle 5: Ramp-Up Projektteam des Industriepartners

| Fachkompetenz | Beschreibung | Zuständige Abteilung |
|------------------------------|--|---|
| Projektmanagement | Projektrealisierung | Prozess Planung, Logistik & Geschäftsführung |
| Lieferantenmanagement | Lieferanteneinbindung | Einkauf & Logistik |
| Qualitätsmanagement | Qualitätssicherung der Prozesse und Produkte | Qualitätsmanagement & Prozess Planung |
| Prozessmanagement | Konzeption & Verbesserung der Prozesse | Prozess Planung, Produktion & F&E |
| Changemanagement | Planung & Kontrolle von Neuerungen | Prozess Planung, Produktion & F&E |
| Kostenmanagement | Budgetplan | Geschäftsführung, Controlling, Prozess Planung & Logistik |
| Controlling | Ergebnisorientierte Analysen | Geschäftsführung, Controlling, Prozess Planung & Logistik |

²⁵⁴ Vgl. Kapitel 3.1.1.1 „Personalzuwachs“

²⁵⁵ Surbier et al. 2014.

Wie in Kapitel 2.2.2 „Ramp Up Management“ erläutert, besteht das Projektziel des Ramp-Up-Managements darin, Qualitäts- und Quantitätsziele innerhalb vorgegebener Zeit zu minimalen Kosten zu erreichen. Diese Ziele lassen sich aus der Unternehmensstrategie ableiten. Angesichts der globalen Nachfrage nach Ladeinfrastruktur, die das Angebot übersteigt,²⁵⁶ liegt das übergeordnete Ziel des Ramp-Up-Projekts darin, das Produktionsvolumen schnellstmöglich zu maximieren, um von Spitzenpreisen zu profitieren und langfristig eine starke Wettbewerbsposition zu sichern.²⁵⁷ Laut Schuh, Desoi und Tücks (2005) ist die Ramp-Up-Zeit neben der Produktvielfalt, der gewünschten Auslastung der Produktion während des Hochlaufs und dem Entkopplungsgrad einer von vier Faktoren, die die Strategie des Produktionshochlaufs beeinflussen. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren und den Tatsachen, dass die Produktvielfalt gering ist, die gewünschte Auslastung hoch, aber der Entkopplungsgrad auch hoch ist, hat das Projektteam ein Planungstableau für die gewünschte Steigerung des Produktionsvolumen um ca. 11.000 Endprodukte erstellt, welches der Hochlaufkurve der Slow-Motion Strategie ähnelt. Es sollen die Prozesse besser beherrscht werden, bevor ein paralleles Hochfahren aller Varianten vonstattengeht.²⁵⁸

Nun gilt es, einen Umsetzungsplan zu erstellen, um die Ziele zu erreichen. Dafür soll unter anderem ein speziell für den Ramp-Up angeschneiderte Planungs- und Kontrollsysteme entwickelt werden, welches die Manager dabei unterstützt, ihre Fähigkeiten und Kenntnisse auszuschöpfen. Ein computergestütztes Planungs- und Informationssystem, das bei der Grobplanung der standortübergreifenden Produktionsprozesse sowie der logistischen Prozesse zur Materialversorgung auf flexibler Art und Weise unterstützt, kann einen entscheidenden Beitrag zum nachhaltigen Erfolg von Unternehmen in einer soeben beschriebenen Ausgangssituation leisten.

²⁵⁶ Vgl. Kapitel 1.1

²⁵⁷ Vgl. Kapitel 2.2.2 “Ramp-Up-Management“

²⁵⁸ Vgl. Kapitel 2.2.2.1 „Ramp-Up-Strategie“

3.2 Praxisteil: Entwicklung eines Planungsunterstützungssystems für das Ramp-Up- Management des Industriepartners

Dieses Kapitel zielt darauf ab, die übergeordnete Fragestellung der Arbeit zu beantworten:

Welche Eigenschaften sollte ein Planungsunterstützungssystem aufweisen, um ein rasant wachsendes Unternehmen bei der Planung des Produktionshochlaufs zu unterstützen?

Diese Frage wird durch die Ausarbeitung eines konzeptionellen mathematischen Modells behandelt. Zur Entwicklung eines umfassenden und gleichzeitig validierten und verifizierten Planungsunterstützungssystems wird der Entwicklungsprozess gemäß Abbildung 17: Entwicklungsprozess eines computerbasierten Modells nach Verifikations- und Validierungsstandards“ in Kapitel 2.3.1.1 gehalten werden.

Vor dem Hintergrund, dass der Fokus der Arbeit nicht primär auf dem Softwareentwicklungsprozess liegt, sondern vielmehr auf der Umsetzung der vorgestellten Funktionen, werden lediglich die Phasen "Task Definition", "System Analysis" und "Experiments and Analysis" ausführlich dargestellt. Die Phasen "Model Formalization", "Implementation" sowie "Datensammlung und Datenaufbereitung" werden aus Gründen der Verständlichkeit sowie der Vollständigkeit lediglich kurz umrissen.

3.2.1 Aufgabenbeschreibung und Konzeptentwurf des Modells

Die Bedürfnisse des Auftraggebers (Sponsors Needs) sind in Kapitel 3.1.2 näher geschildert. Zusammengefasst strebt der Auftraggeber an, das Produktionsvolumen anhand eines Planungstableau erhöhen. Dabei ist sein Ziel, durch Rationalisierungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der vorhandenen Ressourcen optimal vorzugehen und schrittweise dort Maßnahmen zur Kapazitätserweiterung zu ergreifen, wo sie am dringendsten erforderlich sind. Es wird angestrebt, ein computergestütztes Planungs- und Informationssystem zu implementieren, das flexibel bei der Grobplanung der standortübergreifenden Produktionsprozesse und der logistischen Prozesse zur Materialversorgung unterstützt. Dieses Tool soll dem

Projektteam des Produktionshochlaufs²⁵⁹ dabei helfen die Quantitätsanforderungen zu erreichen, indem frühzeitig Störungen identifiziert werden, gleichzeitig soll es den Grundstein für eine kontinuierliche Verbesserung bei der Durchführung des DMAIC-Kreislaufs gemäß Abbildung 15: Define, Measure, Analysis, Improvement, Control-Kreislauf für Six Sigma Projekte der Ramp-Up-Planung unterstützen.

Um ein konzeptionelles Modell zu erstellen, ist eine umfassende Systemanalyse des logistischen Produktionssystems erforderlich, um sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen an das zu entwickelnde Modell zu ermitteln.²⁶⁰

3.2.1.1 Systemanforderungen an das Modell

Laut Literatur sollte ein Planungsunterstützungstool für das Ramp-Up-Management folgende Eigenschaften haben:²⁶¹

- Es soll die Gesamtleistung des Produktionssystems wiedergeben
- Es soll flexibel in Anwendung sein
 - Nebenbemerkung: Diese beiden ersten Anforderungen können einen Zielkonflikt bei der Größe des virtuellen Systems ergeben
- Es soll ein skalierbares Workflow Management System sein
- Es soll die antizipative Identifizierung von Störungen unterstützen
- Die digitale Abbildung des Fertigungssystems soll eine logistikgerechte Werklayoutgestaltung der Materialflüsse ermöglichen
- Der Vergleich verschiedener Lösungen soll möglich sein
- Im Idealfall automatisch die optimale Lösung vorschlagen

3.2.1.2 Analyse des logistischen Produktionssystems

Wie im Kapitel 3.1 über den Industriepartner dargestellt wurde, hat das Produktionssystem in den letzten Jahren einen bedeutenden Wandel durchlaufen und befindet sich nach wie vor in einer Situation des Wandels. In den letzten Jahren hat sich die Auftragsgröße von Einzelfertigung zu Sortenfertigung verschoben und als Reaktion darauf hat sich das Produktionssystem von einer Werkstattfertigung am Standort "A" zu einer standortübergreifenden Inselfertigung entwickelt, bei der

²⁵⁹ Vgl. Kapitel 3.1.2 "Ramp-Up-Management des Industriepartners"

²⁶⁰ Vgl. Kapitel 2.3.1.1 „Entwicklungsprozess“

²⁶¹ Vgl. Kapitel 2.2.3 „Fazit: Unternehmenswachstum“

versucht wird, an jedem Standort eine Fließfertigung einzurichten. Dies führte zu einer Verringerung der Flexibilität des Produktionssystems.²⁶²

Im Rahmen der Errichtung eines Produktionsstandorts in den USA im Jahr 2023 wurde in Kooperation mit einem weltweit tätigen Auftragsfertigungsunternehmen und einem in Deutschland ansässigen Beratungsunternehmen eine umfassende Systemanalyse durchgeführt. Ziel war es, einerseits die Erzeugnisstruktur, Produktvarianten sowie Prozesse zu analysieren, um dem beauftragten Auftragsfertiger die erforderlichen Informationen zur Verfügung zu stellen. Gleichzeitig wurde die Ist-Situation erfasst, um Engpässe und Verschwendung zu identifizieren. Dabei wurden Lean-Werkzeuge genutzt, um Arbeitsplätze und Fertigungslinien zu optimieren.

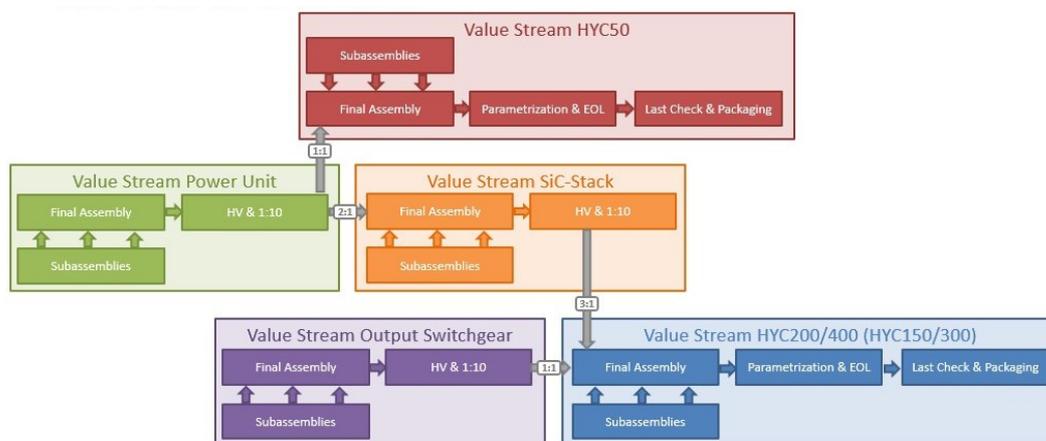


Abbildung 22: Vereinfachte Erzeugnisstruktur der Produkte

Abbildung 22 veranschaulicht die vereinfachte Erzeugnisstruktur der Produkte. Aufgrund der Datenschutzrichtlinien des Industriepartners kann in dieser Arbeit nur begrenzt auf Details eingegangen werden. Dennoch wird deutlich, dass die Produkte modular aufgebaut sind. Die Power Unit, die 50 kW transformiert und als Halbfabrikat in alle Endprodukte einfließt, dient als Ausgangspunkt. Sie wird im Verhältnis 1:1 im Wertstrom der Ladesäule mit 50 kW (HVC50) und im Verhältnis 2:1 in den Wertstrom des SiC-Stacks eingesetzt, der 100 kW transformieren kann. Der SiC-Stack kann je nach Kundenwunsch im Verhältnis 1:1, 2:1, 3:1 oder 4:1 in den Wertstrom des HVC200/HVC400 fließen. Die Produkte HVC200 und HVC400 unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die Abmessungen ihrer Gehäuse und durchlaufen daher denselben Wertstrom. Im HVC200 können 1 bis 2 SiC-Stacks integriert werden, während im HVC400 1 bis 4 SiC-Stacks verbauen werden können. Eine statistische Erhebung ergab, dass im Schnitt 2,9 SiC-Stacks pro Ladesäule des Wertstroms HVC200/HVC400

²⁶² Vgl. Kapitel 2.1.1 „Das Produktionssystem“

benötigt werden. Die Produkte HYC150 und HYC300, welche im laufenden Jahr 2024 aus dem Sortiment gestrichen werden, unterscheiden sich von den Produkten HYC200 und HYC400 nur durch eine neue SiC-Stack-Technologie, die 100 kW statt zuvor 75 kW transformiert. Neben der Anzahl an SiC-Stacks pro Ladesäule, sind die Anzahl und die Länge der Ladekabel, die Auswahl der Ladestecker sowie die gewünschte Lackierung der Säule als wesentliche Individualisierungen für Kunden relevant. Dementsprechend folgt die Produktion dem Assembly-To-Order-Prinzip (ATO), welches vereinfacht als Make-To-Stock-Prinzip (MTS) betrachtet werden kann, wo durch eine „postponement“-Strategie individuelle Anpassungen durch wenige Montageschritte an abschließenden Arbeitsschritten umgesetzt werden.

Im Rahmen der Systemanalyse wurde für jeden Produktionsprozess eigene Value Stream Maps erstellt, wie in Abbildung 23 für das Produkt HYC200/HYC400 dargestellt.

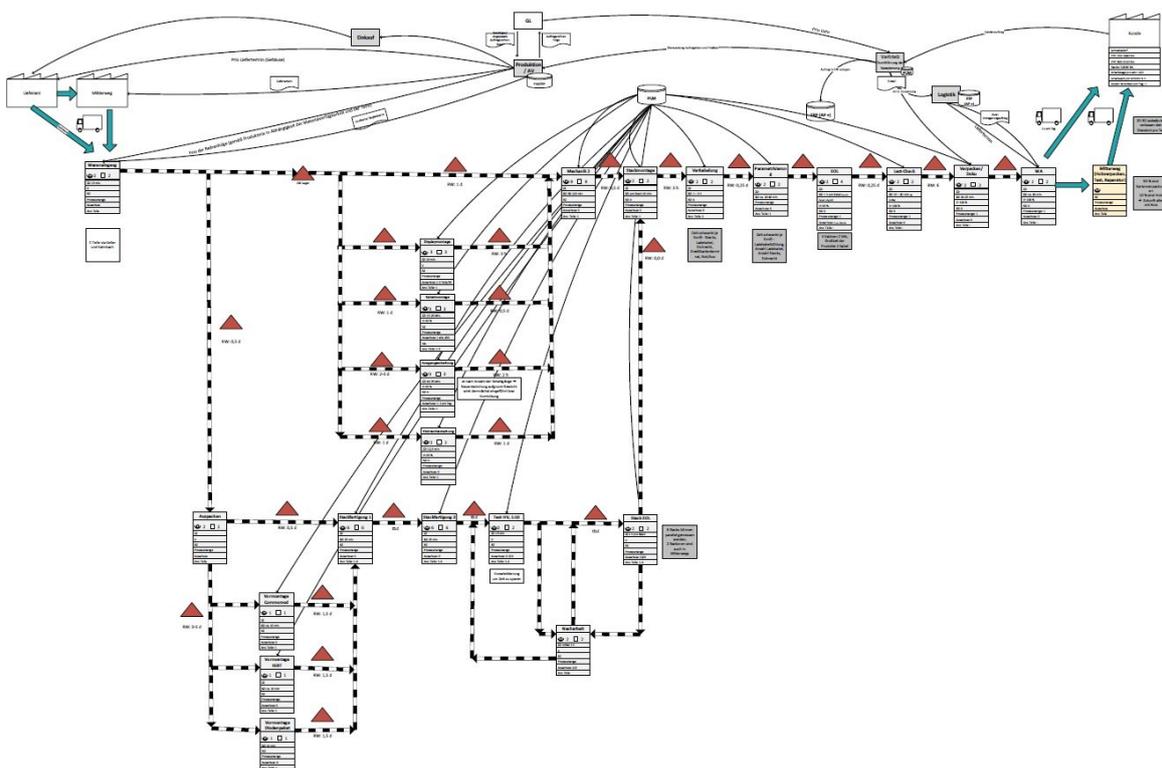


Abbildung 23: Value Stream Map HYC200/HYC400

Für die Erstellung der Value Stream Maps wurde eine detaillierte Prozessanalyse aller Fertigungslinien und Arbeitsstationen durchgeführt, wobei alle relevanten Prozesskennzahlen erfasst wurden.²⁶³ Eine eingehende Produktvariantenanalyse wurde durchgeführt, statistische Häufigkeiten wurden berücksichtigt und Unterschiede

²⁶³ Vgl. Kapitel 2.1.1.1 „Prozessanalyse“

in den Prozesskennzahlen wurden verglichen. Basierend darauf wurde für jede Prozesskennzahl ein sinnvoller Wert unter Berücksichtigung der Häufung von Produktvarianten festgelegt. Im Rahmen dieser Analyse wurden Engpässe und Verschwendungen identifiziert und diskutiert, wobei Arbeitsplatzänderungen und Verbesserungen im Sinne des Lean-Managements erörtert wurden.²⁶⁴



Abbildung 24: Identifizierte Verschwendung im Zuge der Systemanalyse

Im Rahmen des Ramp-Up Projects haltet sich das Projektteam an den DMAIC Kreislauf, um Verbesserungen umzusetzen und die in Abbildung 24 dargestellten identifizierten Verschwendungen zu eliminieren.

3.2.1.3 Konzeptionelles Modell

Unter Berücksichtigung der Bedürfnisse des Auftraggebers,²⁶⁵ den Anforderungen an das System²⁶⁶ und der Analyse des logistischen Produktionssystem,²⁶⁷ haben sich der Modellierer, sowie das Ramp-Up Projektteam des Industriepartners für eine statische, deterministisch analytische Modellierung²⁶⁸ entschieden. Dieses Modell umfasst alle in Kapitel 3.2.1.2 „Analyse des logistischen Produktionssystems“ beschriebenen Produktionsprozesse, somit reichen die festgelegten Systemgrenzen vom Eingangslager „1“, „2“ und „4“ über alle welche in Kapitel 3.1.1.2 „Infrastruktur“ genannten Produktionsstandorte bis hin zum Distributionslager „3“.

²⁶⁴ Vgl. Kapitel 2.1.1.2 „Lean Management“

²⁶⁵ Vgl. Kapitel 3.1.2 „Ramp-Up-Management des Industriepartners“

²⁶⁶ Vgl. Kapitel 3.2.1.1 „Systemanforderungen an das Modell“

²⁶⁷ Vgl. Kapitel 3.2.1.2 „Analyse des logistischen Produktionssystems“

²⁶⁸ Vgl. Kapitel 2.3 „Computerbasierte Modellierung von Logistik- und Produktionssysteme“

Modellbeschreibung und Modellvalidierung

Gemäß den Projektvorgaben für das Ramp-Up-Management, das Produktionsvolumen mithilfe eines Planungstableaus zu erhöhen, soll das geforderte Produktionsvolumen als variable Systemeingabe definiert werden können. Das entwickelte Modell repräsentiert das physische Produktionssystem des Industriepartners und legt quantitative Beziehungen zwischen Arbeitsstationen, Lagern und dem Transportbedarf zwischen den Standorten fest. Es soll für jedes beliebige Produktionsvolumen eine Momentaufnahme der folgenden Kennzahlen liefern:

- **Arbeitsstationen:**
 - Auslastungen aller Arbeitsstationen des Produktionssystem.
 - Anzahl gefertigter Produkte pro Arbeitsstation.
 - Geleistete Arbeitszeit der Arbeitsstation zur Erfüllung des Produktionsvolumens.
- **Lager:**
 - Auslastungen aller Lager im Logistiksystems.
 - Durchschnittlicher Bestand in Paletten und in Euro.
 - Verbrauch pro Tag in Paletten für die Produktionsversorgung.
 - Verbrauch pro Tag pro Artikel.
 - Sicherheitsbestände aller Artikel.
- **Transport:**
 - Anzahl von Transporten pro Tag zwischen allen Standorten
 - Auslastung der Tore aller Standorte
 - Eingänge in Paletten pro Standort pro Tag
 - Ausgänge in Paletten pro Standort pro Tag

Das Modell soll dem Ramp-Up-Team dabei helfen, seine Ziele zu erreichen, indem es zukünftige Engpässe identifiziert, wenn das Produktionsvolumen anhand des Planungstableaus erhöht wird. In diesem Zusammenhang wird auf die Theory of Constraints (TOC) zurückgegriffen, die ein Produktionssystem als eine Anordnung von Gliedern betrachtet, die alle ein Gesamtziel verfolgen, wobei das schwächste Glied die Gesamtleistung des Systems bestimmt. Gemäß der TOC werden nicht nur Arbeitsstationen, sondern auch überfüllte Lager oder ausgelastete Handling Depots als Engpässe betrachtet.²⁶⁹ Aus diesem Grund soll das System die Auslastungen der

²⁶⁹ Vgl. Kapitel 2.1.2.2 „Theory of Constraints (TOC)“

Arbeitsstationen, aber auch der Lager und der Tore des Warenein- und ausgangs ausgeben. Zur Verwaltung und Beseitigung von Engpässen an Arbeitsstationen wurden verschiedene Methoden erläutert.²⁷⁰ Eine übersichtliche Ausgabe der freien Arbeitszeiten pro Arbeitsstation bei gegebenem Produktionsvolumen soll dabei helfen, die Produktivität der Engpässe durch Umverteilung der Arbeitskräfte zu erhöhen.

Gemäß der Systemanalyse erfolgt die Produktion nicht unmittelbar aufgrund konkreter Kundenaufträge.²⁷¹ In dieser Hinsicht stehen eine hohe Auslastung und niedrige Bestände als betriebliche Zielgrößen im Vordergrund.²⁷² Angesichts der zentralen Bedeutung der Sicherstellung der Materialversorgung, um eine hohe Auslastung zu gewährleisten,²⁷³ und der damit verbundenen Wichtigkeit der Einbindung von Lieferanten in das Ramp-Up-Projekt,²⁷⁴ ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Modell den zukünftigen Bedarf ermittelt und auf dieser Grundlage den Sicherheitsbestand pro Artikel berechnet.²⁷⁵ So kann der Sicherheitsbestand zeitgerecht im ERP-System aktualisiert werden.

Information zum Bestand soll ausgegeben werden, da er sowohl als Grundlage für weitere Analysen sowie Kennzahlenermittlung dient, als auch die gebundenen Kapitalbestände veranschaulicht.²⁷⁶ Insbesondere in Expansionsphasen müssen Unternehmen erhebliche Investitionen tätigen, um der steigenden Nachfrage gerecht zu werden.²⁷⁷ Vor solchen Investitionsentscheidungen ist es von entscheidender Bedeutung zu wissen, wie viel Kapital im Umlaufvermögen gebunden ist. Es ist ebenso vorteilhaft zu verstehen, wie viel Kapital bei einer angestrebten Produktionsmenge in naher Zukunft gebunden sein wird. Dies ermöglicht es Unternehmen, ihre Beschaffungsstrategien gegebenenfalls anzupassen.

Eine weitere Anforderung an das Modell ist seine hohe Anpassungsfähigkeit, ohne dabei großen Aufwand zu erfordern. Das bedeutet zum einen, dass das Modell problemlos erweitert werden kann, sowohl hinsichtlich der Größe des Systems (z. B. Anzahl und Größe der Arbeitsstationen) als auch in Bezug auf neue Produktionsstandorte und Lager, die möglicherweise in Zukunft hinzugefügt werden.

²⁷⁰ Vgl. Kapitel 2.1.1.1 "Produktionsmanagement", 2.2.2.1 „Ramp-Up-Strategie“, 2.1.2.2 „Theory of Constraints (TOC)“

²⁷¹ Vgl. Kapitel 3.2.1.2 „Analyse des logistischen Produktionssystems“

²⁷² Vgl. Kapitel 2.1.2.2 „Das Dilemma der Ablaufplanung“

²⁷³ Vgl. Kapitel 2.1.2.2 "Produktionslogistik"

²⁷⁴ Vgl. Kapitel 2.2.2 „Ramp-Up-Management“

²⁷⁵ Vgl. Kapitel 2.1.2.3 „Bestandsmanagement“

²⁷⁶ Vgl. Kapitel 2.1.2.3 „Bestandsmanagement“

²⁷⁷ Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

Zum anderen ermöglicht diese Flexibilität auch die einfache Integration neuer Prozesskennzahlen, sei es durch die Implementierung effizienterer Arbeitsstationen, die Auswahl des Standorts einer Arbeitsstation, die Einführung neuer Arbeitspläne oder die Entwicklung neuer Produkte. Diese Merkmale des Modells gewährleisten, dass es auch bei veränderten Umständen des physischen Systems relevant bleibt,²⁷⁸ und bieten gleichzeitig eine Vielzahl weiterer Anwendungsmöglichkeiten.

Ein solch flexibles Modell ermöglicht es, verschiedene Lösungen zu vergleichen, um ein logistikgerechtes Werkslayout zu ermitteln und festzustellen, welche Maßnahmen erforderlich sind, um den geforderten Produktionsmengen gemäß dem Planungstableau gerecht zu werden. Wie in Kapitel 3.2.1.2 dargelegt, hat sich das Produktionssystem innerhalb weniger Jahre von einer herkömmlichen Werkstattfertigung am Standort "A" grundlegend verändert. Die Werkstattfertigung wurde aufgrund steigender Auflagen Schritt für Schritt in eine Fließfertigung umgewandelt. Mit der Einführung neuer Produkte wie dem HVC50 und der Einrichtung neuer Produktionsstandorte hat sich eine standortübergreifende Inselfertigung entwickelt. Angesichts der Komplexität und der hohen Kosten für Eingriffe in das physische System ist eine modellbasierte Analyse verschiedener Organisationstypen von entscheidender Bedeutung.

Der Transport wurde bereits im Rahmen der Systemanalyse als eine problematische Verschwendung des Industriepartners identifiziert.²⁷⁹ Aufgrund der hohen Transportkosten sowie ihres erheblichen Beitrags zur Durchlaufzeit²⁸⁰ und zum Bestand an WIP²⁸¹ soll die vom Modell ausgegebene Transportmatrix sowie die Anzahl der transportierten Paletten bei der Bewertung verschiedener Lösungen helfen.

Die letzte Anforderung an das System besteht darin, dass es die Grundlage für eine kontinuierliche Verbesserung gemäß dem DMAIC-Kreislauf legen soll. Das Modell ist statisch und deterministisch und repräsentiert das physische System durch logische und quantitative Beziehungen. Es basiert auf idealen Kennwerten und stellt somit ein perfektes schlankes Produktionssystem oder eine Verschwendung dar.²⁸² Daher ist es für die Define-Phase geeignet und ermöglicht eine Soll-Ist-Abweichungsanalyse als Basis zur kontinuierlichen Verbesserung. Wie in Abbildung 25 dargestellt, besteht die

²⁷⁸ Vgl. Kapitel 2.2.3 „Fazit: Unternehmenswachstum“

²⁷⁹ Vgl. Abbildung 24: Identifizierte Verschwendung im Zuge der Systemanalyse

²⁸⁰ Vgl. Abbildung 21: Landkarte des standortübergreifenden Produktionssystems

²⁸¹ Vgl. Kapitel 2.1.1.1 „Prozessanalyse“

²⁸² Nyhuis 2003.

Möglichkeit, das aktuelle physische System, den Ist-Zustand, 1:1 nachzubilden. Der Soll-Zustand stellt den idealen Zustand des Systems dar. Durch die Analyse von produzierten Produkten, Anzahl von Transporten und anderen ermittelten Kennzahlen können Verschwendungen und Verbesserungspotenziale identifiziert werden. Der Vergleich verschiedener Lösungen erfolgt im Soll-Soll-Vergleich, wie im vorherigen Absatz erläutert. Nach der Implementierung von Änderungsmaßnahmen kann der Prozess der Identifizierung von Verbesserungspotenzialen erneut durchgeführt werden.

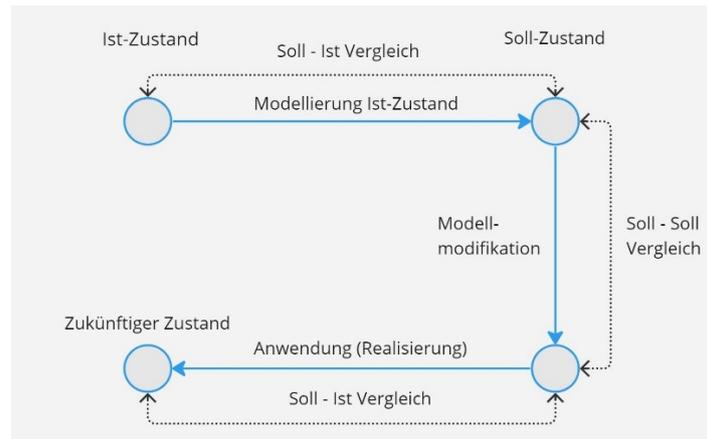


Abbildung 25: Anwendungsmethodik im Rahmen der kontinuierlichen Verbesserung

3.2.2 Modellformalisierung und Implementierung

Basierend auf den Ergebnissen der Systemanalyse und dem konzeptionellen Modell werden nun die ersten Schritte unternommen, um ein formales Modell zu formulieren. Das Hauptziel dieses Kapitels besteht darin, einen generischen Rahmen zu schaffen, der es ermöglicht, das im vorherigen Abschnitt 3.2.1.3 beschriebene konzeptionelle Modell zu modellieren. Daher erfordert die Modellformalisierung mehrere technische Entscheidungen, um die nachfolgende Implementierung vorzubereiten. Dazu gehört die Auswahl geeigneter Software-Tools, die Definition von Schnittstellen zu anderen Anwendungen sowie die Festlegung von Eingabemethoden für das System.²⁸³

Aufgrund der Notwendigkeit, dass das System flexibel und anpassungsfähig für zukünftige Veränderungen sein muss,²⁸⁴ wird Java als primäres Software-Tool der Stufe 0 "reine Programmiersprache"²⁸⁵ ausgewählt. Diese Entscheidung basiert auf umfassenden Überlegungen, die im Rahmen dieses Kapitels erörtert werden. Zur Digitalisierung des mathematischen Modells wird ergänzend zum Java-Programm

²⁸³ Vgl. Kapitel 2.3.1.1 „Entwicklungsprozess“

²⁸⁴ Vgl. Kapitel 3.2.1.1 „Systemanforderungen an das Modell“

²⁸⁵ Vgl. Kapitel 2.3.1.1 „Entwicklungsprozess“

auch Excel eingesetzt. Excel eignet sich, um eine ganzheitliche Lösung mit entsprechender Eingabe- und Ausgabemöglichkeiten zu gewährleisten und flexibel unterschiedliche Analysetools wie beispielsweise Power BI zu integrieren.

Java ist eine objektorientierte und universelle Programmiersprache, die für eine Vielzahl von Anwendungen verwendet wird. In Abbildung 26 wird dargestellt, dass man zur Entwicklung und Ausführung von Java-Projekten lediglich eine Entwicklungsumgebung und eine Java Virtual Machine (JVM) benötigt. Die Entwicklungsumgebung enthält den Java-Compiler, der den Quellcode in Bytecode umwandelt, während die JVM den Bytecode ausführt. Sie ist eine Laufzeitumgebung, die den Java-Bytecode in Maschinencode für das spezifische Betriebssystem übersetzt. Die JVM ist für jedes gängige Betriebssystem verfügbar und bildet die Grundlage für die plattformübergreifende Fähigkeit von Java.²⁸⁶ Java bietet eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, was es zu einer beliebten Wahl für die Entwicklung von Softwareprojekten macht.

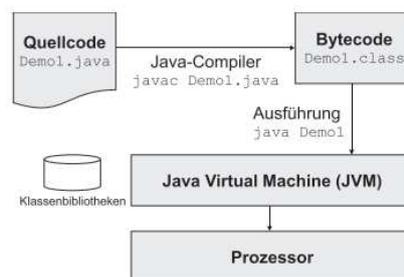


Abbildung 26: Übersetzung und Ausführung von Java Programme

Das Java SE Development Kit (JDK SE) ist eine kostenlose Software-Sammlung, die für die Entwicklung und Ausführung von Desktop-Anwendungen verwendet wird. Es integriert sowohl die Entwicklungsumgebung als auch die Java Virtual Machine (JVM). Das JDK enthält alle erforderlichen Werkzeuge und Bibliotheken für die Entwicklung, Übersetzung, Ausführung und das Testen von Java-Programmen. Darüber hinaus bietet es Entwicklungs- und Diagnosewerkzeuge wie den Java-Compiler, die Java-Laufzeitumgebung (JRE), den Java Debugger (jdb) und die Java Monitoring and Management Console (jconsole). Es ist jedoch zu beachten, dass das JDK keine grafische Benutzeroberfläche bietet und die Programme über die Kommandozeile aufgerufen werden müssen.²⁸⁷

²⁸⁶ Abts 2013.

²⁸⁷ Abts 2013.

Um die Entwicklung von Java-Anwendungen zu erleichtern, bieten verschiedene Hersteller kostenlose integrierte Entwicklungsumgebungen (Integrated Development Environment, IDE) an. Diese Softwareanwendungen stellen eine Vielzahl von Werkzeugen und Funktionen zur Verfügung, darunter Texteditoren, Compiler, Debugger, Versionskontrollsysteme und visuelle Gestaltungswerkzeuge.²⁸⁸ Im Rahmen dieses Modellierungsprojekts wird Visual Studio Code als IDE verwendet, wobei die Wahl der IDE von individuellen und subjektiven Präferenzen abhängt.

Java bietet verschiedene Merkmale und Stärken, darunter:²⁸⁹

- Modularer Aufbau und Objektorientierung, die eine breite und einfache Anwendbarkeit ermöglichen.
- Java steht jedem kostenlos zur Verfügung und bietet eine hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit, was es zu einer beliebten Wahl für die Entwicklung von Softwareprojekten macht.
- Plattformunabhängigkeit dank der Java Virtual Machine (JVM) nach dem Motto "Write once – run anywhere".
- Internet-Fähigkeit, die es ermöglicht, Daten aus dem Browser zu extrahieren, was in diesem Projekt von Vorteil ist, da das ERP-System des Industriepartners browserbasiert ist.
- Die in einem Programm benutzten Klassen können als Dateien an unterschiedlichen Orten liegen und werden erst zur Laufzeit des Programms bei Bedarf geladen.
- Automatisches Speichermanagement durch die Garbage Collection, wodurch nicht mehr benötigte Objekte während der Laufzeit freigegeben werden.
- Die Java-Klassenbibliotheken stellen eine Vielzahl nützlicher APIs (Application Programming Interfaces) in Form von Klassen und Interfaces für die Anwendungsentwicklung zur Verfügung.
- Eine umfangreiche Open-Source-Bibliothek von Klassen und Interfaces (wie java.io), welche verschiedene Funktionen wie Dateiverarbeitung, Tastatureingabe, Bildschirmausgabe und Netzwerkkommunikation ermöglichen.

Wie bereits erwähnt, bietet das JDK keine grafische Benutzeroberfläche. Stattdessen können verschiedene Bibliotheken genutzt werden, um eine solche zu erstellen. Unter

²⁸⁸ Abts 2013.

²⁸⁹ Abts 2013.

Verwendung der Apache POI-Bibliothek wird eine Excel-Arbeitsmappe als grafische Benutzeroberfläche und allgemeine Eingabemöglichkeit erstellt, welche mit allen erforderlichen Parametern gefüllt wird. Apache POI ist eine Open-Source-Bibliothek, die es ermöglicht, Programme zu schreiben, die mit den verschiedenen Dateiformaten interagieren können. So ist es möglich Microsoft-Dokumente wie Excel-Arbeitsmappen, Word-Dokumente und PowerPoint-Präsentationen in Java zu erstellen, zu lesen und zu manipulieren. Die Bibliothek bietet eine API (Application Programming Interface), die Entwicklern eine Reihe von Klassen und Methoden bereitstellt, um auf die Inhalte dieser Dokumente zuzugreifen und sie zu bearbeiten. So ermöglicht es ebenfalls mit Microsoft-Dokumenten zu arbeiten, ohne auf Microsoft Office selbst angewiesen zu sein.

Das erstellte Eingabedokument enthält verschiedene Stammdaten, wie die gewünschte Anzahl an zu fertigende Produkte, die zu testende Netzwerkkonfiguration des Logistik- und Produktionssystems, sowie Informationen zu Produkten, Arbeitsstationen, Standorten und Artikeln. Diese Stammdaten des Eingabedokuments werden im Kapitel 3.2.3 „Datensammlung und -vorbereitung“ näher beschrieben. Wie soeben erwähnt, dient das Eingabedokument auch dazu, dem Programm das Modell des zu testenden Systems zu übergeben, dargestellt in Tabelle 6 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** Dieses Arbeitsblatt unterteilt sich in drei Informationsbereiche. Im Bereich "Linieninformationen" werden dem Programm die vorhandenen Arbeitsstationen, ihre Standorte und Betriebszeiten übermittelt. Im Bereich "Lagerinformationen" wird festgelegt, ob ein Lager ausschließlich für die Produktion oder auch als Wareneingangslager genutzt werden soll, sowie die gewünschte Lagerreichweite. Im letzten Bereich wird der gewünschte Output pro Produkt und die gewünschte Location für das Distributionslager angegeben.

Tabelle 6: Excel Sheet "Netzwerk Konfiguration"

| Linieninformationen: | | | | | | Lagerinformationen: | | | Final Location: 3 |
|----------------------|-------------------|--------------------|-----------|-----------|-------------|---------------------|------|------------------------|----------------------|
| Standort | Produkt | Linie | Bemerkung | Nr. Lines | Stunden [h] | Standort | Type | Lagerreichweite [Tage] | Produktionsplan: Yes |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Aufbringen der Fcx | | 1 | 8 | A | P | 2 | Produkt |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 1 | x | 1 | 8 | 1 | W | 30 | HYC-400 |
| B | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | line | 1 | 8 | B | P | 2 | HYC-50 |
| B | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | x | 1 | 8 | C | P | 2 | HYC-200 |
| C | HYC-400 / HYC-200 | Cabling | x | 1 | 8 | 2 | W | 30 | |
| C | HYC-400 / HYC-200 | Eichrecht | x | 1 | 8 | 3 | W | 30 | |
| D | HYC-400 / HYC-200 | Stack Mount | x | 1 | 8 | D | P | 2 | |
| D | HYC-400 / HYC-200 | Parametrization | x | 1 | 8 | 4 | W | 30 | |

Die Modellierungsergebnisse des Java-Programms, welche im Kapitel 3.2.1.3 „Modellbeschreibung und Modellvalidierung“ sowie Kapitel 3.2.4 „Experimente und Analyse“ näher geschildert sind, werden ebenfalls als Excel-Datei ausgegeben. Dies

bietet die erforderliche Flexibilität in der Datenanalyse für unterschiedliche Zwecke der verschiedenen Funktionsbereiche des Ramp-Up-Projektteams.

Um die angestrebten Ziele des Modells zu erreichen, wurden verschiedene Vereinfachungen vorgenommen, wobei die 9 V&V-Kriterien (Vollständigkeit, Konsistenz, Genauigkeit, Aktualität, Anwendbarkeit, Plausibilität, Klarheit, Machbarkeit und Zugänglichkeit)²⁹⁰ berücksichtigt wurden:

- Vernachlässigung des internen Materialflusses: Das Modell basiert auf einem idealen Zustand, in dem eine kontinuierliche Materialbereitstellung an den Fertigungslinien gewährleistet ist, gemäß dem Just-in-Time-Prinzip, bei dem keine Bestände vor oder nach den Arbeitsstationen anfallen.²⁹¹ Aufgrund der signifikanten Bedeutung werden benötigte Halbfabrikate zur Erfüllung des täglichen Produktionsvolumens wie Artikel betrachtet, welche die Lagerkapazitäten der Standorte beanspruchen.
- Bei der Überprüfung, ob die angegebenen Arbeitsstationen flächentechnisch am Produktionsstandort untergebracht werden können, wird lediglich die Fläche der Arbeitsstationen in Quadratmeter von der Gesamtfläche des Produktionsstandorts in Quadratmeter abgezogen. Es werden dabei keine spezifischen Formgebungen von Arbeitsstationen und Produktionshallen berücksichtigt. Diese Entscheidung beruht auf der Annahme, dass es sich bei dem realen System größtenteils um flexible Montagestationen handelt, die unterschiedlich konfiguriert werden können. Darüber hinaus wurden bei der Ermittlung der Arbeitsflächen, welche im Eingabedokument gelistet sind, auch Platz für Transportwege und Bedienung berücksichtigt. Die Produktionsfläche wurde ebenfalls unter Berücksichtigung von Bereichen für den Wareneingang und -ausgang ermittelt. Sowohl die Fläche des Produktionsstandorts als auch der Arbeitsstationen können bei Bedarf in der Eingabedatei flexibel angepasst werden.
- Vernachlässigung von Produktvarianten: Im Rahmen der Systemanalyse wurde eine Produktvariantenanalyse durchgeführt, die eine statistisch ausgewertete Variante für die Berechnung der Produktionsprozesskennzahlen liefert.²⁹² Somit

²⁹⁰ Vgl. Kapitel 2.3.1.2 „Verifizierung und Validierung“

²⁹¹ Vgl. Kapitel 3.2.1.3 „Konzeptionelles Modell“

²⁹² Vgl. Kapitel 3.2.1.2 „Analyse des logistischen Produktionssystems“

werden nur Wertströme unterschiedlicher Produkte mit mittleren Kennzahlen herangenommen.

- Vernachlässigung unterschiedlicher Aufträge im Produktionsplan: Diese Maßnahme basiert auf der Entscheidung, Produktvarianten außer Acht zu lassen. Dies hat zur Folge, dass die verwendeten Kennzahlen für die Produktionsprozesse unverändert bleiben. Eine weitere Bestärkung der Maßnahme ist, dass das Modell von einem idealen System ausgeht und die Auslastung im Vordergrund steht, wobei die Materialbereitstellung sichergestellt ist.²⁹³

Nachdem alle vorherigen Phasen durch kontinuierliche Überprüfungs- und Validierungsmaßnahmen auf eine überprüfbare und valide Weise durchgeführt wurden, wird das Kernelement für zukünftige Aussagen und Schlussfolgerungen als ausführbares Modell eingerichtet. In dieser Phase wird das gesamte Modell realisiert und eingerichtet. Das vollständige Verzeichnis aller beteiligten Klassen dieses Systems, einschließlich ihrer Beziehungen, kann im UML-Diagramm in Abbildung 27 und Abbildung 28 gefunden werden. Das Programm wird über die Klasse "App" gestartet, welche die Main-Methode enthält. An dieser Stelle muss dem Programm der Pfad der Eingabedatei übermittelt werden, damit es auf diese zugreifen kann. Die "App" erstellt zwei Objekte: eines der Klasse "FileReader" und eines der Klasse "ManufacturingSystem". Der "FileReader" extrahiert alle Daten der Eingabedatei und erstellt Objekte für alle Artikel, Produkte, Standorte, Arbeitsstationen und Fertigungslinien des Modells. Die extrahierten Daten und erstellten Objekte des "FileReader" werden an das "ManufacturingSystem" übergeben, welches interne Berechnungen durchführt und die Ergebnisse speichert. Der "FileReader" wiederum greift auf diese gespeicherten Berechnungsergebnisse zu und schreibt sie in eine neue Excel-Arbeitsmappe, welche als Ausgabedatei fungiert und als Grundlage für weitere manuelle Analysen der Simulationsergebnisse dient.

²⁹³ Vgl. Kapitel 3.2.1.3 „Konzeptionelles Modell“

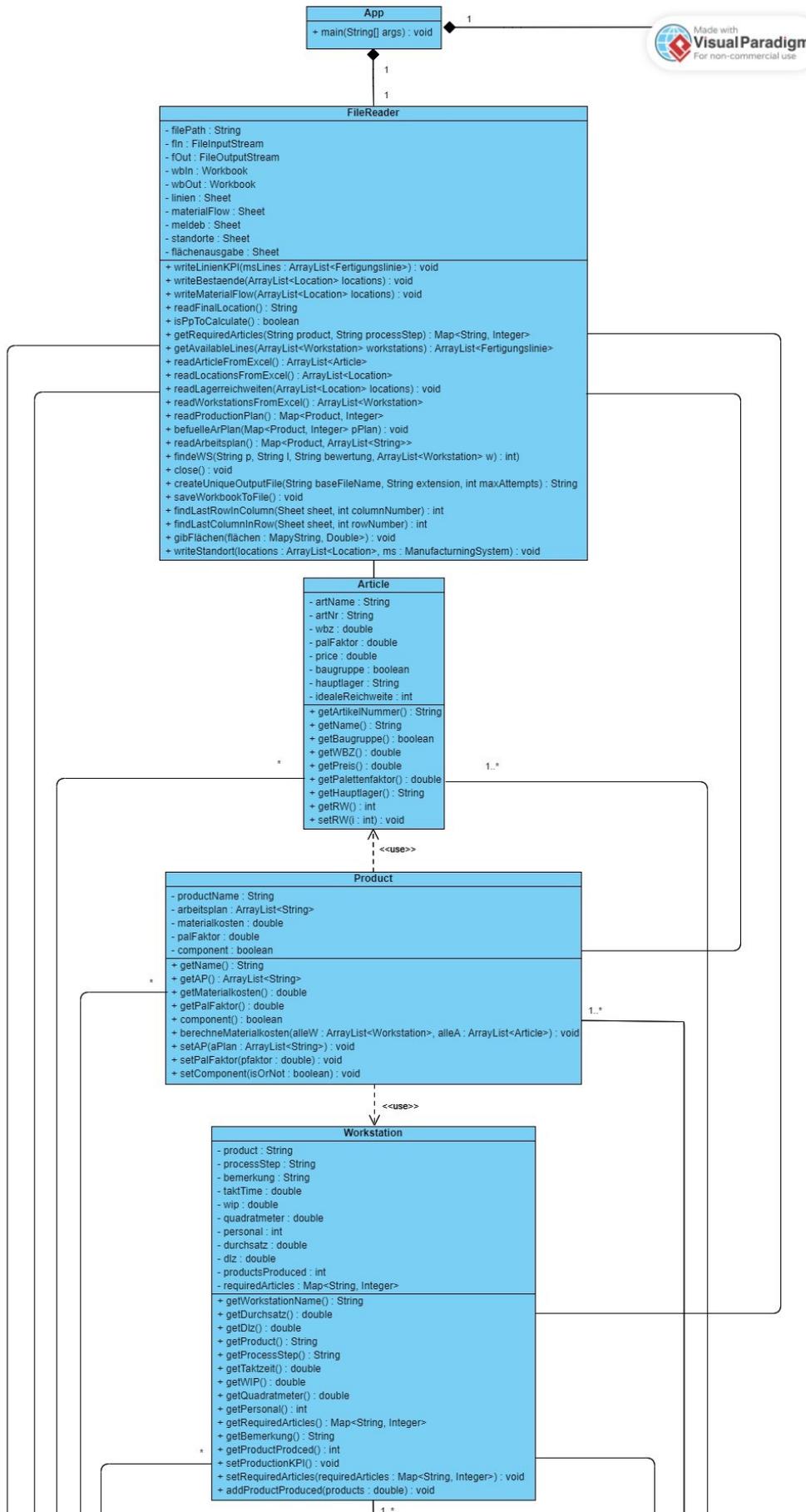


Abbildung 27: Klassendiagramm Teil 1/2

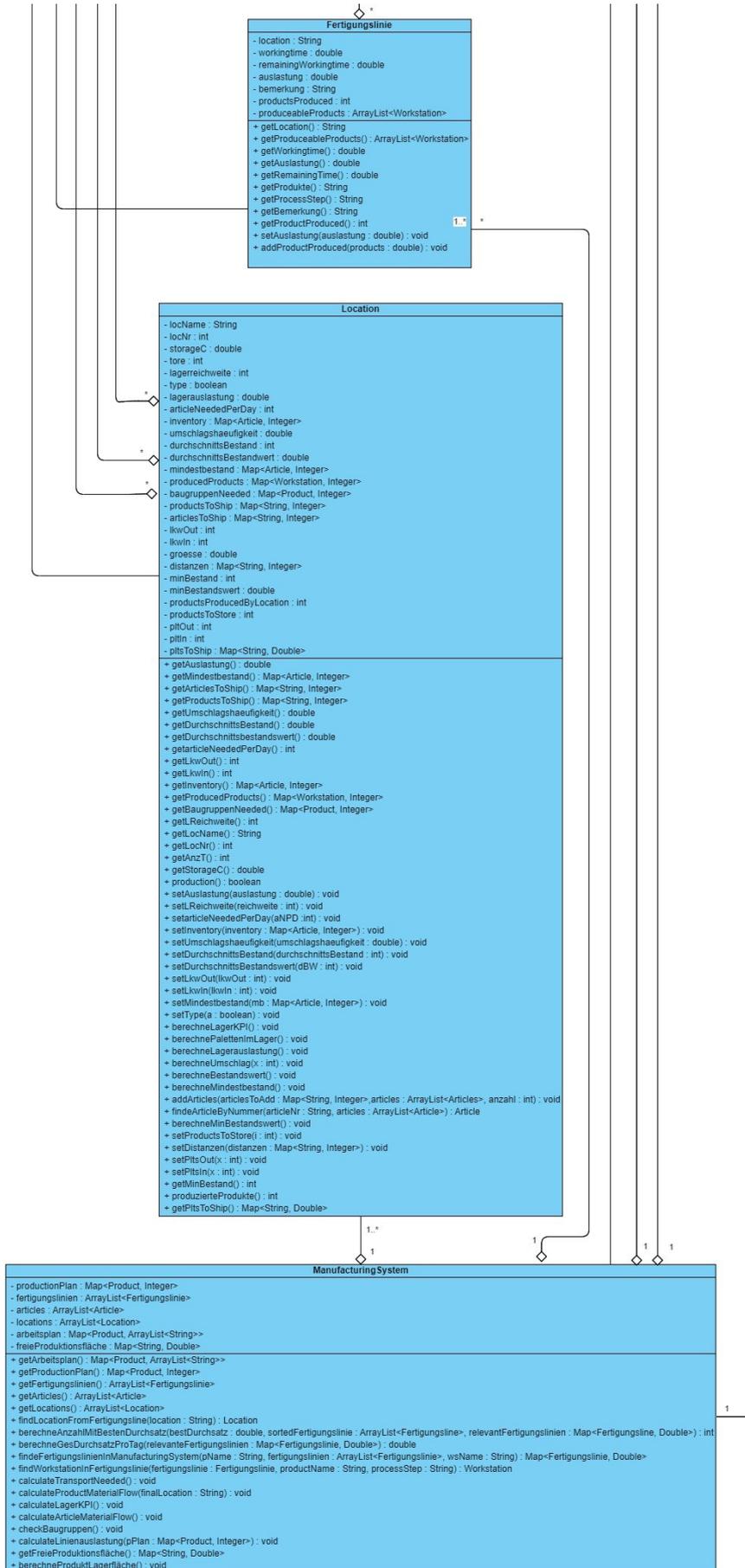


Abbildung 28: Klassendiagramm Teil 2/2

Wie soeben erklärt, erstellt die „App“ das „ManufacturingSystem“ mit den vorhandenen Arbeitsstationen, Standorten, Artikeln und Produkten und übergibt diesem den Produktionsplan, also die Anzahl der zu erzeugenden Produkte.

Zunächst wird überprüft, ob das Modell in die Realität übertragbar ist, oder ob die benötigte Fläche der Fertigungslinien die verfügbare Fläche der Produktionsstandorte überschreitet. Falls dies der Fall ist, gibt das System eine Liste aus, wo ersichtlich ist, um welche Standorte und um wie viel Quadratmeter es sich handelt.

Anschließend wird eine Methode ausgeführt, die die Auslastungen der Fertigungslinien, deren Betriebszeit und die Anzahl der produzierten Produkte pro Fertigungslinie ermittelt. Währenddessen wird dem Lager der Standorte, wo sich die benutzten Fertigungslinien befinden, der Tagesbedarf aller Artikel übermittelt, um die erforderliche Menge an Produkten fertigen zu können.

Das Programm durchläuft dabei das Produktionsprogramm der Eingabedatei, beginnend mit dem ersten Produkt und endend mit dem letzten Eintrag. Für jedes Produkt wird der Arbeitsplan betrachtet und die Berechnung beginnt mit dem letzten notwendigen Arbeitsschritt und endet mit dem ersten Arbeitsschritt. Dabei wird überprüft, welche verfügbaren Fertigungslinien diesen Arbeitsschritt ausführen können. Die Auswahl der Fertigungslinien erfolgt anhand verschiedener Kriterien, wobei unterschieden wird, ob sich die gewünschte Produktionsmenge mit den Vorhandenen Kapazitäten ausgeht. Wenn die verfügbaren Fertigungslinien genügend Kapazität für das Produktionsprogramm haben, wird die Fertigungslinie mit dem höchsten Durchsatz zuerst gewählt. Wenn eine Fertigungslinie das Produktionsprogramm erfüllen kann, wird ihre Auslastung und Arbeitszeit berechnet und gespeichert und dem lokalen Produktionslager die benötigte Menge an Artikeln sowie die Menge an fertigen Produkten übermittelt, die an diesem Tag am Standort zwischengelagert werden müssen. Wenn eine Fertigungslinie allein nicht ausreicht, werden selbe Berechnungen getätigt, wobei die Auslastung auf 100% gesetzt wird, bevor die nächstbeste Fertigungslinie verwendet wird, bis das Produktionsprogramm erfüllt ist. Für den Fall, dass die Summe der Kapazitäten aller verfügbaren Fertigungslinien für das Produktionsprogramm nicht ausreichen, wird mit der durchschnittlich schlechtesten Fertigungslinie begonnen und nach und nach zur besten Fertigungslinie fortgeschritten. Bei der besten Fertigungslinie angekommen, wird die fehlende Menge gleichmäßig auf die Anzahl der besten Fertigungslinien aufgeteilt, sodass alle besten

Fertigungslinien die gleiche Auslastung von $> 100\%$ haben. Diese wird erneut mit der zu leistenden Betriebszeit gespeichert.

Im nächsten Schritt wird das Produktionslager jedes Standortes, welches nach erster Methode alle Artikel zur Erfüllung des Produktionsprogramm enthalten, nach Baugruppen durchsucht. Falls welche gefunden werden, werden sie aus dem fiktiven Artikellager entfernt und dem fiktiven Produktlager hinzugefügt. Gleichzeitig wird erneut die Methode, welche im vorherigen Abschnitt erklärt wurde, aufgerufen, um die Linienauslastungen der Arbeitsstationen für die Produktion der Baugruppen zu ermitteln und die benötigten Artikel dem Artikellager zu übermitteln. Dieser Prozess wiederholt sich, bis kein Artikel aus dem Artikellager eine Baugruppe ist, die im Haus produziert wird.

Nach Ausführung dieser beiden Methoden sind alle Produkte erzeugt und die gewünschten Berechnungen der Fertigungslinien abgeschlossen. Des Weiteren wurden die erforderlichen Artikelmengen und Mengen der Baugruppen und Halbfabrikate für die Produktion, sowie die Menge der produzierten Produkte an jedem Produktionsstandort zwischengelagert. Der nächste Schritt besteht darin, den Transportbedarf zu berechnen. Hierfür werden drei verschiedene Methoden verwendet: eine zur Ermittlung der Artikelbewegungen zwischen den Standorten, eine weitere für die Bewegungen von Produkten/Baugruppen zwischen den Standorten, und eine letzte, welche die gewünschten Berechnungen zu Transportbedarf durchführt.

Zur Ermittlung der Artikelbewegungen durchläuft eine Schleife alle Standorte und eine zweite Schleife alle Artikel des fiktiven Artikellagers der Standorte. Basierend auf die im Artikelobjekt gespeicherten Informationen zum Hauptlager und den Paletten-Faktor wird die Anzahl der Paletten berechnet, die täglich von den Zentrallagern zu den Produktionslagern transportiert werden müssen. Für die Ermittlung der Produkt-/Baugruppenbewegungen durchlaufen zwei Schleifen jeden Arbeitsschritt vom Arbeitsplan von jedem Produkt, beginnend mit dem letzten Arbeitsschritt und endend mit dem ersten Arbeitsschritt. Pro Arbeitsschritt wird eine weitere Schleife über alle Fertigungslinien des Produktionssystems laufen, die diesen Arbeitsschritt ausführen können. Wenn der letzte Arbeitsschritt eines Arbeitsplans betrachtet wird, wird geprüft, wie viele Produkte gefertigt wurden und der Transportbedarf zum Distributionslager ermittelt. Gleichzeitig wird gespeichert, an welchem Standort wie viele dieser Produkte gefertigt worden sind und somit auch der Bedarf an Halbfabrikaten gespeichert.

Anschließend wird die nächstgelegene Fertigungslinie gesucht, die den vorherigen Arbeitsschritt durchgeführt hat. Wenn es sich um denselben Standort handelt und die Menge ausreichend ist, ist kein Transport erforderlich. Andernfalls wird der Transportbedarf in Paletten gespeichert. Diese Schleifen werden so lange durchlaufen, bis jede Fertigungslinie des Produktionssystems betrachtet wurde und darauf aufbauend ermittelt die dritte Methode die gesamten standortübergreifenden Transporte.

An diesem Punkt verfügt das System über Informationen zu den Linien sowie zu den erforderlichen Artikeln und Baugruppen pro Tag und Standort, um das Produktionsprogramm aus der Eingabedatei zu realisieren. Ebenso sind dem System die Produktionsmengen an Baugruppen und Endprodukten pro Standort pro Tag bekannt, welche ebenfalls Lagerkapazität beanspruchen. Basierend auf diesen Informationen wurde berechnet, wie viele Paletten täglich zwischen den Standorten des Produktionssystems transportiert werden müssen, wie viele Transporte dies bedarf und wie ausgelastet die Handling-bereiche der Standorte sind.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Berechnungen durchgeführt, um Lagerkennzahlen zu ermitteln. Zum aktuellen Zeitpunkt verfügt jedes Produktionslager jene Menge an Artikeln, Halbfabrikaten und Baugruppen, welche an diesem Tag benötigt werden, um das Produktionsprogramm zu erfüllen. Während die Wareneinganslager jene Menge an Artikel besitzt, um den Tagesbedarf der Produktionslager zu decken. Zusätzlich existiert ein mit der Eingabedatei gewähltes Lager, welches die gesamten Fertigprodukte vor Distribution lagert.

Zunächst wird jedes Produktionslager betrachtet und der durchschnittliche Lagerbestand der Artikel ermittelt, indem die gewünschte Lagerreichweite mit dem durchschnittlich täglichen Verbrauch multipliziert wird. Aufbauend darauf wird mit Hilfe des Palettenfaktors, sowie der Anzahl an Halbfabrikate/Baugruppen die Menge an Paletten im Lager ermittelt. Weiters wird der durchschnittliche Bestandswert ermittelt, indem die Mengen der Artikel mit ihren Materialkosten multipliziert und dann summiert werden. Dies gibt Aufschluss über den durchschnittlichen Wert der im Lager befindlichen Artikel. Anschließend wird die Lagerauslastung berechnet, indem der Bestand ins Verhältnis zur Lagerkapazität gesetzt und das Ergebnis mit 100 multipliziert wird. Diese Kennzahl kann ebenfalls über 100% liegen, was bei gewünschter Reichweite auf eine potenzielle Überlastung des Lagers hinweisen kann. Des Weiteren

wird der Lagerumschlag pro Jahr berechnet. Dadurch erhält man einen Einblick in die Geschwindigkeit, mit der sich die Lagerbestände ändern.

Schließlich werden die Zentrallager betrachtet, diese werden mit jedem Artikel befüllt, sodass die Gesamtmenge pro Artikel in jedem Lager der Mindestbestandsmenge entspricht. Diese wird ermittelt, indem die Wiederbeschaffungszeit eines Artikels mit dem täglichen Verbrauch multipliziert wird. In diesem Modell wird bei der Ermittlung der Mindestbestände kein Sicherheitskoeffizient berücksichtigt. Die einzige Möglichkeit im gesamten Produktionssystem das Mindestbestandsniveau zu überschreiten ist, wenn die gewünschte Reichweite der Produktionslager dem Mindestbestand übertrifft. In diesem Fall ist der Bestand im Hauptlager gleich null. Im Anschluss der Bestandsermittlung, wird wie im Produktionslager der Bestand in Paletten und in Euro, sowie die Lagerauslastung und der Lagerumschlag ermittelt.

Um die Verifizierung des Modells sicherzustellen, wurde Test Driven Development betrieben. Durch kontinuierliches Testen und Debuggen wurde gewährleistet, dass das Modell eine plausible Darstellung der quantitativen Beziehungen bietet und ausreichend genau ist. Zudem wurde sichergestellt, dass Änderungen am Modell keine unbeabsichtigten Fehler verursachen und die Validität und Verifizierung kontinuierlich aufrechterhalten bleibt. Während dieses Prozesses wurden kleine Änderungen am Modell manuell berechnet und mit den Ergebnissen des Programms verglichen. Auch wurden die Modellparameter der Eingabedatei auf verschiedene Kalibrierungen getestet, einschließlich unterschiedlicher Datentypen oder fehlender Einträge, um potenzielle Laufzeitfehler zu identifizieren und entsprechende Maßnahmen zu ergreifen. Die Testergebnisse von durchgeführten Pilotläufen wurden mit Referenzdaten verglichen. Hierbei wurden sowohl Feedback und Erkenntnisse der lokalen Prozessexperten einbezogen, die bereits Leistungsbewertungen durchgeführt haben, als auch die Ergebnisse der Systemanalyse berücksichtigt. Durch diese Methoden wurden umfassende Überprüfungen getätigt und die Validierung des Modells sichergestellt.²⁹⁴

3.2.3 Datensammlung und -vorbereitung

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Erfassung und Aufbereitung der Daten, die erforderlich sind, um das mathematischen Modell zu verwenden. Gemäß des

²⁹⁴ Vgl. Kapitel 2.3.1.2 „Verifizierung und Validierung“

Entwicklungsprozessmodells aus Abschnitt 2.3.1.1 können diese Aufgaben parallel zum Modellierungsprozess durchgeführt werden.

Um sicherzustellen, dass das Modell während der gesamten Projektlaufzeit von Ramp-Up dauerhaft nützlich ist, ist es für den Modellierer während der Datensammlungs- und Datenvorbereitungsphase wesentlich, die Datenquellen und eventuelle Verarbeitungsschritte zu automatisieren. Auf diese Weise liegen stets verifizierte Daten der Modellierung zugrunde, auch nach Veränderungen im realen System.

Die notwendigen Daten für die Implementierung eines Modells mit den zuvor beschriebenen Funktionen lassen sich in folgende Informationskategorien unterteilen:

- Stammdaten zu Artikeln
- Stammdaten zu Produkten
- Stammdaten zu Arbeitsstationen
- Stammdaten zu den Standorten des Produktionssystems

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, wird aus Gründen der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit eine Excel-Arbeitsmappe als generische Eingabemöglichkeit verwendet. Daher werden alle diese Informationen in einer Excel-Arbeitsmappe gesammelt und vorbereitet. Es ist anzumerken, dass im Rahmen dieses Kapitels Abbildungen der Arbeitsmappe präsentiert werden, wobei die Einträge fiktive Werte sind und lediglich zur Veranschaulichung dienen.

Die folgenden Unterabschnitte sind nach den verwendeten Datenquellen unterteilt, die auf die beschriebene Weise gesammelt und anschließend vorbereitet werden.

3.2.3.1 Datenquelle: Workshop und Systemanalyse

Im Rahmen der Systemanalyse, wie in Kapitel 3.2.1.2 beschrieben, wurden wesentliche Stammdaten bezüglich der Produktionsprozesse, der Arbeitsstationen und der verfügbaren Infrastruktur erhoben. Diese Informationen werden aufbereitet und als Stammdaten zu den Entitäten in der Excel-Arbeitsmappe festgehalten.

Tabelle 7 zeigt die erfassten Stammdaten von Arbeitsstationen im Excel-Sheet "Masterdata Workstation". Es ist zu beachten, dass die drei Spalteneinträge "Produkt", "Prozess Step" und "Bemerkung" den Schlüssel dieses Sheets bilden und einen eindeutig zuweisbaren Datensatz darstellen. Dieser Schlüssel aus drei Werten ist notwendig, da beispielsweise Teststationen für mehrere Produkte verwendet werden können und Unterschiede in Kennzahlen und Details bestehen können, sei es aufgrund von

Automatisierung oder anderen Gründen. Im Rahmen der Erhöhung des Produktionsvolumens arbeitet das gesamte Ramp-Up-Projektteam daran, die Arbeitsstationen effizienter zu gestalten. Daher ist es wichtig, dass dieses Excel-Sheet stets aktualisiert wird, um Veränderungen im realen System widerzuspiegeln.

Tabelle 7: Excel Sheet "Masterdata Workstations"

| Produkt | Prozess Step | Bemerkung | Taktzeit [sec] | WIP [Stk] | Fläche [m ²] | Personal |
|------------|----------------|-----------|----------------|-----------|--------------------------|----------|
| Stack | Stack Assembly | No | 300 | 2 | 5 | 2 |
| Power Unit | Montage | Automatic | 200 | 30 | 30 | 7 |
| Power Unit | Montage | No | 500 | 30 | 30 | 7 |
| HYC-400 | Final Assembly | No | 500 | 1 | 6 | 1 |
| HYC-400 | Packaging | No | 500 | 1 | 2 | 1 |
| HYC-400 | Packaging | Automatic | 200 | 5 | 6 | 1 |
| HYC-400 | Test | No | 500 | 1 | 3 | 2 |
| HYC-400 | Vormontage | No | 800 | 1 | 5 | 2 |
| HYC-300 | Test | No | 500 | 1 | 3 | 2 |
| HYC-200 | Final Assembly | No | 400 | 1 | 4 | 1 |
| HYC-200 | Packaging | No | 300 | 1 | 8 | 4 |
| HYC-200 | Test | No | 500 | 1 | 2 | 2 |
| HYC-200 | Vormontage | No | 800 | 1 | 7 | 6 |
| HYC-200 | Packaging | Automatic | 200 | 5 | 6 | 1 |

Im Zuge der Systemanalyse wurden auch wichtige Informationen zu den Standorten erhoben. Relevante Daten für dieses Modellierungsprojekt sind die Produktionsfläche, die Lagerkapazitäten, die Tore für die Be- und Entladung von LKWs sowie die Distanz zwischen diesen Standorten in Minuten. Tabelle 8 spiegelt diese Stammdaten zu Standorten in der Arbeitsmappe wider. Auch hier ist festzuhalten, dass diese Tabelle vom Projektteam aktualisiert werden muss, falls Umbauten die Fläche, die Lagerkapazität oder die Anzahl der Tore erhöhen. Ebenso ist eine Aktualisierung erforderlich, wenn neue Standorte hinzukommen.

Tabelle 8: Excel Sheet "Masterdata Locations"

| Nummer | Name | Fläche [m ²] | Lagerkapazität [Pal.] | Tore | Tran |
|--------|------|--------------------------|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | A | 750 | 500 | 2 | 0 | 30 | 30 | 10 | 30 | 55 | 30 | 30 | |
| 2 | B | 2500 | 250 | 2 | 30 | 0 | 30 | 30 | 5 | 40 | 10 | 5 | |
| 3 | C | 10000 | 500 | 4 | 30 | 30 | 0 | 30 | 30 | 50 | 30 | 30 | |
| 4 | D | 11000 | 700 | 2 | 10 | 30 | 30 | 0 | 30 | 55 | 30 | 30 | |
| 5 | 1 | 0 | 300 | 1 | 30 | 5 | 30 | 30 | 0 | 40 | 10 | 10 | |
| 6 | 2 | 0 | 1000 | 3 | 55 | 40 | 50 | 55 | 40 | 0 | 40 | 40 | |
| 7 | 3 | 0 | 300 | 1 | 30 | 10 | 30 | 30 | 10 | 40 | 0 | 10 | |
| 8 | 4 | 0 | 600 | 2 | 30 | 5 | 30 | 30 | 10 | 40 | 10 | 0 | |

3.2.3.2 Datenquelle: Vorhandene IT-Infrastruktur

Vom ERP-System können alle benötigten Artikelinformationen mithilfe einer SQL-Abfrage extrahiert und als Excel-Tabelle exportiert werden. Diese Artikeldaten können

mit derselben SQL-Abfrage aktualisiert werden, solange keine neuen Informationen für neue Modellfunktionen benötigt werden. Die gewonnenen Daten umfassen unter anderem:

- Baugruppe
- Artikelnummer (ID)
- Artikelname
- Materialkosten
- Paletten-Faktor
- Wiederbeschaffungszeit
- Hauptlager

Baugruppen sind Komponenten einer Stückliste, die wiederum eine eigene Stückliste haben können. Der Paletten-Faktor gibt die Anzahl der Artikel pro Palette an. Das Hauptlager ist die gespeicherte Lieferadresse, die automatisch an den Lieferanten übermittelt wird, wenn eine Bestellung aufgegeben wird.

Des Weiteren können mithilfe des ERP-Systems die Arbeitspläne und Stücklisten der Produkte und Baugruppen gewonnen werden. Durch eine weitere SQL-Abfrage ist es möglich, ein Excel-Sheet zu exportieren, das jedem Arbeitsschritt die benötigten Artikel in der erforderlichen Menge zuweist. Mit einem speziell entwickelten VBA-Code wird dieses Arbeitsblatt automatisch mit dem Arbeitsblatt, das die Artikelinformationen enthält, abgeglichen und um diese Informationen ergänzt. Dadurch wird sichergestellt, dass alle notwendigen Informationen zu den Artikeln in einem einzigen Arbeitsblatt zusammengeführt werden.

Dieser Prozess liefert ein Excel-Sheet, das in Tabelle 9 dargestellt wird und alle notwendigen Artikelinformationen enthält. Das letzte benötigte Excel-Sheet der Eingabedatei ist in Tabelle 10 dargestellt und beinhaltet lediglich die Arbeitspläne der einzelnen Produkte.

Tabelle 9: Excel Sheet "Masterdata Articles"

| Product | Prozess Step | Anzal | Baugruppe | Artikelnummer | Artikelname | Materialkosten | Palettenfaktor | Wiederbeschaffungszeit [Tage] | Hauptlager |
|------------|----------------|-------|-----------|---------------|-------------|----------------|----------------|-------------------------------|------------|
| HYC-400 | Packaging | 2 | no | 12.456 | a | 2,00 € | 50 | | 10 PLS |
| HYC-400 | Final Assembly | 2 | yes | 55555 | Stack | | 60 | | |
| HYC-400 | Final Assembly | 1 | no | 15 | c | | 5 | 70 | 30 Obi |
| HYC-400 | Vormontage | 10 | no | 768 | e | | 5 | 90 | 50 Obi |
| HYC-400 | Vormontage | 1 | no | 7 | f | | 8 | 300 | 60 Obi |
| HYC-200 | Packaging | 2 | no | 6 | h | | 7 | 100 | 80 PLS |
| HYC-200 | Final Assembly | 2 | no | 5 | i | | 99 | 300 | 90 PLS |
| HYC-200 | Final Assembly | 1 | no | 44 | j | | 9 | 140 | 100 PLS |
| HYC-200 | Final Assembly | 10 | no | 33 | k | | 78 | 150 | 110 PLS |
| Stack | Stack Assemly | 2 | yes | 1231 | Power Unit | | | 50 | |
| Stack | Stack Assemly | 1 | no | 86874 | Gehäuse | | 3 | 100 | 20 PLS |
| Power Unit | Montage | 2 | no | 98742 | Platine | | 100 | 500 | 90 PLS |

Tabelle 10: Excel Sheet "Masterdata Routing sheet"

| Product | HYC-400 | HYC-200 | HYC-50 | Sic-Stack | Power Unit | Display | SCH-OUT-400 | SCH-OUT-200 |
|------------------|----------------------|--|-----------------|-----------|------------|---------|-------------|-------------|
| Last Step | Verpacken | Verpacken | Verpacken | EOL | EOL | Mount | EOL | EOL |
| -1 | Last Check | Last Check | Last Check | Mount 2 | Mount | | Mount | Mount |
| -2 | EOL | EOL | EOL | Mount 1 | | | | |
| -3 | Parametrization | Parametrization | Parametrization | | | | | |
| -4 | Stack Mount | Stack Mount | Cabling | | | | | |
| -5 | Eichrecht | Eichrecht | Assembly | | | | | |
| -6 | Cabling | Cabling | | | | | | |
| -7 | Mechanical 2 | Mechanical 2 | | | | | | |
| -8 | Mechanical 1 | Mechanical 1 | | | | | | |
| -9 | Aufbringen der Folie | Aufbringen der Folie + Reflektorenstreifen | | | | | | |
| -10 | | | | | | | | |

Es ist anzumerken, dass diese SQL-Abfragen regelmäßig wiederholt werden sollten, da sich Stücklisten und Artikelinformationen in dieser schnelllebigen Unternehmensphase häufig ändern können.

3.2.4 Experimente und Analyse

Nachdem ein verifiziertes und gültiges Modell entwickelt wurde, wird nun die finale Aufgabe angegangen: Experimente durchführen, Ergebnisse interpretieren und Handlungsempfehlungen ableiten. Wie in Kapitel 3.2.1.2 erwähnt, werden in dieser Arbeit keine Originaldaten des Industriepartners veröffentlicht. Stattdessen wird ein realistisches Szenario geschaffen, indem die Experimentparameter gezielt und systematisch variiert werden. Der Schwerpunkt liegt auf der Anwendung und den Funktionalitäten des entwickelten Modells, um eine objektive Bewertung zu ermöglichen. In Kapitel 3.1.2 wurde das Ziel für das laufende Jahr 2024 festgelegt: Das jährliche Produktionsvolumen soll von 24.000 auf 35.000 Endprodukte erhöht werden. Dies wird durch eine "Slow-Motion-Strategie" erreicht, bei der das gesamte Sortiment zuerst langsam und dann schneller parallel hochgefahren wird. Basierend darauf wurden das Planungstableau in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** und die Hochlaufkurve in Abbildung 29 erstellt.

Tabelle 11: Planungstableau vom Produktionshochlauf des Experiments

| | HYC-400 | HYC-200 | HYC-50 | Gesamt/Tag | Gesamt/Periode | Gesamt/Jahr |
|------------|---------|---------|--------|------------|----------------|-------------|
| 01.01.2024 | 32 | 32 | 32 | 96 | 2080,0 | 24960 |
| 01.02.2024 | 33 | 33 | 33 | 99 | 2145,0 | 25740 |
| 01.03.2024 | 34 | 34 | 34 | 102 | 2210,0 | 26520 |
| 01.04.2024 | 36 | 36 | 36 | 108 | 2340,0 | 28080 |
| 01.05.2024 | 38 | 38 | 38 | 114 | 2470,0 | 29640 |
| 01.06.2024 | 40 | 40 | 40 | 120 | 2600,0 | 31200 |
| 01.07.2024 | 42 | 42 | 42 | 126 | 2730,0 | 32760 |
| 01.08.2024 | 45 | 45 | 45 | 135 | 2925,0 | 35100 |
| 01.09.2024 | 50 | 50 | 50 | 150 | 3250,0 | 39000 |
| 01.10.2024 | 56 | 56 | 56 | 168 | 3640,0 | 43680 |
| 01.11.2024 | 63 | 63 | 63 | 189 | 4095,0 | 49140 |
| 01.12.2024 | 70 | 70 | 70 | 210 | 4550,0 | 54600 |

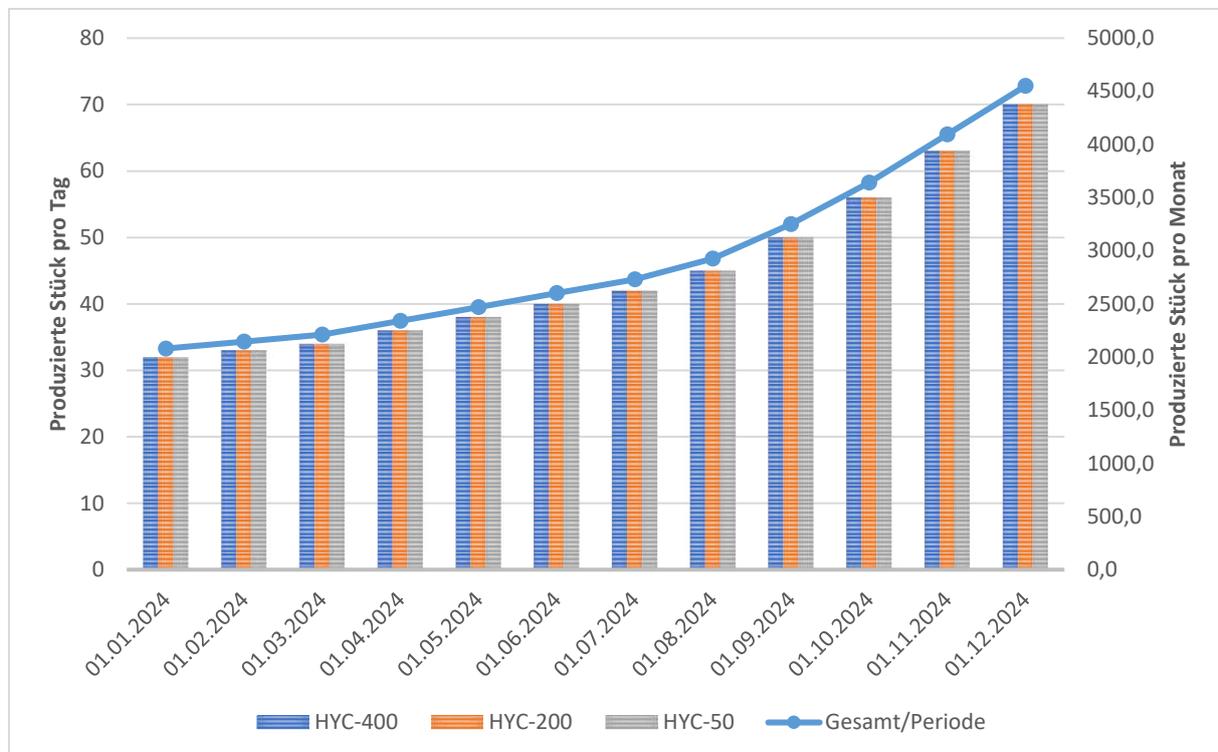


Abbildung 29: Hochlaufkurve des Experiments

Im Rahmen dieses Experiments wird die Hochlaufkurve aus dieser Arbeit verwendet. Zunächst wird ein Modell des Produktionssystems erstellt, das ab dem 01.01.24 in der Lage ist, die Anforderungen von 32 Stück/Tag für jedes der drei Endprodukte zu erfüllen. Anschließend wird das Produktionsvolumen bis zum 01.07.24 auf das Niveau von 42 produzierten Stücken pro Tag für jedes Produkt erhöht und schließlich bis zum 01.12.2024 auf das Niveau von 70 produzierten Stücken pro Tag gesteigert. Das Ziel besteht darin zu zeigen, welche Auswirkungen diese Steigerung des Produktionsvolumens auf das reale System hat und welche Kapazitätsgrenzen

Engpässe darstellen könnten, die die Erhöhung des Produktionsvolumens behindern. Im zweiten Schritt werden Anpassungen am Modell vorgenommen, um das Zielproduktionsvolumen zu erreichen. Diese Anpassungen werden verglichen, um eine Entscheidungsgrundlage für die tatsächliche Umsetzung zu schaffen.

3.2.4.1 Modellkonfiguration 1

Für das Experiment werden die 8 Arbeitspläne aus Tabelle 10, sowie die 4 Produktionsstandorte und zusätzliche 4 Lagerhallen aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** verwendet. Von den 8 Arbeitsplänen repräsentieren HYC-400, HYC-200 und HYC-50 Endprodukte, während die übrigen 5 individuell hergestellte Baugruppen sind, die in die Montageschritte der Endprodukte oder anderer Baugruppen integriert werden, wie in Tabelle 13 ersichtlich ist. Jeder Montageschritt erfordert mindestens eine Arbeitsstation, die diesen Schritt durchführen kann. Tabelle 12 zeigt die Arbeitsstationen, die als Stammdaten für das Experiment erstellt wurden. Wie in Kapitel 3.2.3 erläutert, bezieht sich die erste Spalte „Produkt“ auf den Arbeitsplan, die zweite Spalte „Prozessschritt“ auf den jeweiligen Montageschritt, und die dritte Spalte „Bemerkung“ hilft bei der Identifizierung einer Fertigungslinie. Beispielsweise wurden für das Modell in den Zeilen 4 und 5 der Tabelle 12 zwei Datensätze für den Montageschritt „HYC-200 Mechanical 2“ erstellt. Ein Datensatz repräsentiert eine Fertigungslinie für diesen Schritt, gekennzeichnet mit der Bemerkung "Linie", die sich in den Kennzahlen "Taktzeit", "WIP", "Personal" und "Fläche" vom zweiten Datensatz unterscheidet.

Tabelle 12: Stammdaten der Arbeitsstationen des Experiments

| Produkt | Prozess Step | Bemerkung | Taktzeit [sec] | WIP [Stk] | Fläche [m ²] | Personal |
|-------------|------------------------|------------|----------------|-----------|--------------------------|----------|
| Display | Mount | x | 600 | 1 | 8 | 1 |
| HYC-200 | Aufbringen der Folie + | x | 1000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-200 | Mechanical 1 | x | 2000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-200 | Mechanical 2 | line | 1000 | 5 | 150 | 5 |
| HYC-200 | Mechanical 2 | x | 2400 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-200 | Cabling | x | 1000 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-200 | Eichrecht | x | 1500 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-200 | Stack Mount | x | 1200 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-200 | Parametrization | x | 1200 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-200 | Parametrization | new | 800 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-200 | EOL | x | 3000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-200 | Last Check | x | 1000 | 6 | 25 | 2 |
| HYC-200 | Verpacken | x | 1000 | 1 | 25 | 2 |
| HYC-400 | Aufbringen der Folie + | x | 1000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Mechanical 1 | x | 2000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Mechanical 2 | line | 1200 | 5 | 150 | 5 |
| HYC-400 | Mechanical 2 | x | 2400 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-400 | Cabling | x | 1000 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-400 | Eichrecht | x | 1500 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-400 | Stack Mount | x | 1200 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-400 | Parametrization | x | 1200 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Parametrization | new | 800 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | EOL | x | 3000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Last Check | x | 1000 | 3 | 25 | 2 |
| HYC-400 | Verpacken | x | 1000 | 1 | 25 | 2 |
| HYC-50 | Assembly | x | 2400 | 1 | 30 | 1 |
| HYC-50 | Cabling | x | 600 | 1 | 30 | 1 |
| HYC-50 | Parametrization | x | 1200 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-50 | EOL | x | 3000 | 1 | 15 | 1 |
| HYC-50 | EOL | new | 1800 | 1 | 15 | 1 |
| HYC-50 | Last Check | x | 600 | 1 | 30 | 1 |
| HYC-50 | Verpacken | x | 600 | 1 | 25 | 1 |
| Power Unit | Mount | Manuell | 4600 | 1 | 20 | 1 |
| Power Unit | Mount | Automatic | 1800 | 8 | 60 | 4 |
| Power Unit | EOL | x | 2500 | 1 | 14 | 1 |
| SCH-OUT-200 | Mount | x | 3000 | 1 | 30 | 1 |
| SCH-OUT-200 | EOL | x | 1440 | 3 | 30 | 1 |
| SCH-OUT-400 | Mount | x | 3000 | 1 | 30 | 1 |
| SCH-OUT-400 | EOL | x | 1440 | 6 | 30 | 1 |
| Sic-Stack | Mount 1 | x | 3000 | 1 | 20 | 1 |
| Sic-Stack | Mount 2 | Manuell | 4800 | 1 | 20 | 1 |
| Sic-Stack | Mount 2 | Automatic1 | 3200 | 8 | 70 | 2 |
| Sic-Stack | Mount 2 | Automatic2 | 2800 | 10 | 80 | 2 |
| Sic-Stack | EOL | x | 3000 | 1 | 20 | 1 |

Für das Experiment wurden 48 Artikel erstellt, die in verschiedenen Montageschritten bis zu 1055-mal benötigt werden. Zusätzlich zu den Artikeln gibt es 5 Baugruppen, wie in den ersten Datensätzen der Tabelle 13 ersichtlich.

Tabelle 13: Stammdaten der Artikel des Experiments

| Product | Prozess Step | Anzal | Baugruppe | Artikelnummer | Artikelname | Materialkosten | Palettenfaktor | Wiederb | Hauptlager |
|------------|--------------|-------|-----------|---------------|-------------|----------------|----------------|---------|------------|
| HYC-200 | Stack Mount | 3 | yes | Sic-Stack | Sic-Stack | | | 4 | |
| HYC-400 | Stack Mount | 3 | yes | Sic-Stack | Sic-Stack | | | 4 | |
| HYC-400 | Mechanical 1 | 1 | yes | SCH-OUT-400 | SCH-OUT-400 | | | 5 | |
| HYC-200 | Mechanical 1 | 1 | yes | SCH-OUT-200 | SCH-OUT-200 | | | 10 | |
| HYC-50 | Assembly | 1 | yes | Power Unit | Power Unit | | | 20 | |
| Sic-Stack | Mount 2 | 2 | yes | Power Unit | Power Unit | | | 6 | |
| HYC-200 | Mechanical 2 | 1 | yes | Display | Display | | | 10 | |
| HYC-400 | Mechanical 2 | 1 | yes | Display | Display | | | 10 | |
| Display | Mount | 1 | no | 20 | Screen | 400,00 € | | 20 | 60 |
| Power Unit | Mount | 1 | no | 19 | Blech | 300,00 € | | 30 | 50 |
| Power Unit | Mount | 1 | no | 18 | Platine | 1.000,00 € | | 20 | 60 |
| Sic-Stack | Mount 2 | 200 | no | 17 | Schrauben | 0,50 € | | 2000 | 20 |
| Sic-Stack | Mount 2 | 2 | no | 16 | Drossel | 500,00 € | | 20 | 40 |

Wie in Tabelle 13 dargestellt, wurden insgesamt 178 Arbeitsstationen als variable Eingabeparameter auf die vier verfügbaren Produktionsstandorte verteilt, um die Erfüllung aller Arbeitspläne sicherzustellen. Einige dieser Arbeitsstationen arbeiten in Doppel- oder Dreischichtbetrieb. Darüber hinaus wurden alle 8 Standorte in das Modell integriert. Standorte A, B, C und D sind als Typ "P" für Produktionsstandorte gekennzeichnet, während die gewünschte Lagerreichweite festgelegt wurde. Standorte 1, 2, 3 und 4 sind als Typ "W" für reine Lagerhäuser gekennzeichnet. Zusätzlich wurde Lager 3 als "Endstandort" ausgewählt, an dem die Fertigprodukte für die Distribution gesammelt werden. Wie zuvor erwähnt, werden mit dieser Konfiguration drei Szenarien analysiert. Szenario 1 stellt den 01.01.24 dar, an dem die drei Endprodukte jeweils 32 Mal pro Tag produziert werden sollen. Szenario 2 repräsentiert den 01.07.24 mit jeweils 42 Stück pro Tag, während Szenario 3 den Stichtag 01.12.24 darstellt, an dem die tägliche Produktionsmenge pro Produkt auf 70 Stück beläuft.

Tabelle 14: Variable Eingabeparameter des Experiments

| Linieninformationen: | | | | | | Lagerinformationen: | | | Final Location: 3 | |
|----------------------|---------------------------|---------------------------|------------|-----------|-------------|---------------------|------|------------------------|-------------------|--------------|
| Standort | Produkt | Linie | Bemerkung | Nr. Lines | Stunden [h] | Standort | Type | Lagerreichweite [Tage] | Produktionsplan: | Yes |
| | | | | | | | | | Produkt | Anzahl / Tag |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Aufbringen der Folie + Fx | | 3 | 8 | A | P | 15 | | |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 1 | x | 5 | 8 | 1 | W | 0 | HYC-400 | 32 |
| B | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | line | 1 | 16 | B | P | 1 | HYC-50 | 32 |
| B | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | x | 3 | 8 | C | P | 10 | HYC-200 | 32 |
| C | HYC-400 / HYC-200 | Cabling | x | 3 | 8 | 2 | W | 0 | | |
| C | HYC-400 / HYC-200 | Eichrecht | x | 5 | 8 | 3 | W | 0 | | |
| D | HYC-400 / HYC-200 | Stack Mount | x | 3 | 8 | D | P | 10 | | |
| D | HYC-400 / HYC-200 | Parametrization | x | 2 | 8 | 4 | W | 0 | | |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Parametrization | new | 1 | 8 | | | | | |
| B | HYC-400 / HYC-200 | EOL | x | 8 | 8 | | | | | |
| D | HYC-400 / HYC-200 | Last Check | x | 3 | 8 | | | | | |
| A | HYC-400 / HYC-200 | Verpacken | x | 3 | 8 | | | | | |
| B | HYC-50 | Assembly | x | 5 | 8 | | | | | |
| B | HYC-50 | Cabling | x | 1 | 8 | | | | | |
| C | HYC-50 | Parametrization | x | 2 | 8 | | | | | |
| C | HYC-50 | EOL | x | 2 | 8 | | | | | |
| C | HYC-50 | EOL | new | 1 | 8 | | | | | |
| C | HYC-50 | Last Check | x | 1 | 8 | | | | | |
| D | HYC-50 | Verpacken | x | 1 | 8 | | | | | |
| D | SCH-OUT-400 / SCH-OUT-200 | Mount | x | 10 | 8 | | | | | |
| D | SCH-OUT-400 / SCH-OUT-200 | EOL | x | 4 | 8 | | | | | |
| D | Sic-Stack | Mount 1 | x | 20 | 8 | | | | | |
| B | Sic-Stack | Mount 2 | Manuell | 20 | 8 | | | | | |
| B | Sic-Stack | Mount 2 | Automatic1 | 2 | 16 | | | | | |
| B | Sic-Stack | Mount 2 | Automatic2 | 2 | 16 | | | | | |
| A | Sic-Stack | EOL | x | 15 | 16 | | | | | |
| C | Power Unit | Mount | Manuell | 20 | 8 | | | | | |
| C | Power Unit | Mount | Automatic | 10 | 24 | | | | | |
| D | Power Unit | EOL | x | 20 | 16 | | | | | |
| B | Display | Mount | x | 2 | 8 | | | | | |

Bei den Testläufe der soeben geschilderten Szenarien generierte das System Informationen zu den Linien, den Standorten, dem Transportbedarf sowie den Mindestabständen der Artikel.²⁹⁵ Im Folgenden werden diese verschiedenen Informationen der Reihe nach behandelt, um Erkenntnisse daraus zu gewinnen.

3.2.4.2 Testläufe der Modellkonfiguration 1 für Szenario 1, 2, 3

Die Testläufe lieferten detaillierte Informationen über die Arbeitslinien im Produktionsprozess, einschließlich ihrer Effizienz, Auslastung und potenzieller Engpässe. Es wurde festgestellt, dass einige Linien besonders stark belastet waren und mögliche Engpässe im System darstellten. Diese Erkenntnisse ermöglichen gezielte Maßnahmen zur Beseitigung von Engpässen und zur Steigerung der Gesamteffizienz.

Um die Analyse übersichtlich zu gestalten und eine Datenüberlastung zu vermeiden, fokussiert sich diese Arbeit bei der Auswertung der Linieninformationen der Modellergebnisse auf den Wertstrom HYC-400 / HYC-200. Die Ergebnisse für die Szenarien 1 bis 3 sind in Tabelle 15 dargestellt.

²⁹⁵ Vgl. Kapitel 3.2.1.3 „Konzeptionelles Modell“

Tabelle 15: Modellergebnis - Linieninformationen vom Wertstrom HYC-400 / HYC-200

| Linienauslastung: | | Bemerkung | Betriebszeit | Personal | Szenario 1: | | Szenario 2: | | Szenario 3: | |
|-------------------|--|-----------|--------------|----------|------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|----------------|
| Standort | Fertigungslinie | | | | Betriebszeit [h] | Auslastung [%] | Betriebszeit [h] | Auslastung [%] | Betriebszeit [h] | Auslastung [%] |
| A | HYC-400 / HYC-200 Aufbringen der Folie + | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Aufbringen der Folie + | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,7 | 91,7 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Aufbringen der Folie + | x | 8 | 1 | 6,2 | 22,2 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 1 | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 1 | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 1 | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 1 | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 1 | x | 8 | 1 | 4,4 | 44,4 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| B | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 2 | line | 16 | 5 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -15,5 | 196,7 |
| B | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 2 | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| B | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 2 | x | 8 | 1 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| B | HYC-400 / HYC-200 Mechanical 2 | x | 8 | 1 | 7,5 | 6,7 | 0,8 | 90,0 | 0,0 | 100,0 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Cabling | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,7 | 91,7 | -5,0 | 162,0 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Cabling | x | 8 | 1 | 6,2 | 22,2 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Cabling | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Eichrecht | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 5,0 | 37,5 | -3,7 | 145,8 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Eichrecht | x | 8 | 1 | 8,0 | 0,0 | 0,0 | 100,0 | -3,7 | 145,8 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Eichrecht | x | 8 | 1 | 5,3 | 33,3 | 0,0 | 100,0 | -3,7 | 145,8 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Eichrecht | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -3,7 | 145,8 |
| C | HYC-400 / HYC-200 Eichrecht | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -3,7 | 145,8 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Stack Mount | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Stack Mount | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Stack Mount | x | 8 | 1 | 2,7 | 66,7 | -1,3 | 116,7 | -7,6 | 194,4 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Parametrization | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Parametrization | x | 8 | 1 | 6,7 | 16,7 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Parametrization | new | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -12,4 | 255,6 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 8,0 | 0,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 2,7 | 66,7 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| B | HYC-400 / HYC-200 EOL | x | 8 | 1 | 0,0 | 100,0 | -0,8 | 109,4 | -6,6 | 182,3 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Last Check | x | 8 | 2 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Last Check | x | 8 | 2 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| D | HYC-400 / HYC-200 Last Check | x | 8 | 2 | 6,2 | 22,2 | 0,7 | 91,7 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Verpacken | x | 8 | 2 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Verpacken | x | 8 | 2 | 0,0 | 100,0 | 0,0 | 100,0 | -5,0 | 162,0 |
| A | HYC-400 / HYC-200 Verpacken | x | 8 | 2 | 6,2 | 22,2 | 0,7 | 91,7 | -5,0 | 162,0 |

Die Analyse der Tabelle 15 zeigt, dass Szenario 1 realisierbar ist, da keine Auslastung über 100% erforderlich ist, um die gewünschte Produktmenge zu erreichen. Unter Berücksichtigung der Annahme, dass das Produktionssystem Ende 2023 bereits in der Lage war, 32 Stück pro Tag der drei Produkte herzustellen, zeigt der Soll-Ist-Vergleich,²⁹⁶ dass von den insgesamt 328 Betriebsstunden der 40 Arbeitsstationen ganze 78,1 Stunden nicht Wertschöpfend sind. Dies entspricht einem Anteil von $78,1/328 * 100 = 23,80\%$. Hier ist das Planungsteam²⁹⁷ gefragt, geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um diese nicht wertschöpfende Zeit zu eliminieren, was nach den Prinzipien des Lean-Managements als Verschwendung betrachtet wird.²⁹⁸

Für Szenario 2 zeigt sich, dass die Montageschritte "Mechanical 1" um 6,7 Stunden, "Stack Mount" um 4 Stunden und "EOL" um 6 Stunden Engpässe für die tägliche Produktion darstellen werden. Es ist nun angebracht, Maßnahmen zu ergreifen. Ob die Engpässe des Idealfalls beseitigt werden sollen oder ein Faktor wie im Szenario 1 von

²⁹⁶ Vgl. Kapitel 3.2.1.3 „Konzeptionelles Modell“

²⁹⁷ Vgl. Kapitel 3.1.2 „Ramp-Up-Management des Industriepartners“

²⁹⁸ Vgl. Kapitel 2.1.1.2 „Lean Management“

0,238 berücksichtigt werden soll, um die Ziele zu erreichen, obliegt dem Planungsteam. In dieser Arbeit wird aus Vereinfachungsgründen darauf verzichtet.

Wie im Kapitel 2.2.2.1 beschrieben, besteht die Möglichkeit der Erhöhung des Produktionsvolumens durch Anpassung der Betriebszeiten, Verbesserung der Liniengeschwindigkeiten oder Erhöhung der Anzahl an Linien. Es gibt jedoch auch Montagestationen, die nicht zu 100% ausgelastet sind und in Summe eine nicht wertschöpfende Zeit der Arbeitsstationen von 8,5 Stunden sowie eine nicht wertschöpfende Zeit des Personals von 9,9 Stunden generieren. Eine Methode zur Engpasseliminierung ist die Umverteilung des Personals, um den Produktionsengpass stärker zu entlasten, wie im Kapitel 2.1.2.2 beschrieben. Selbst wenn eine solche Strategie verfolgt wird, bleibt ein Defizit von 6,6 Arbeitsstunden pro Tag bestehen. Hier stellt sich die Frage, ob eine Engpass-Arbeitsstation in Zweifachschicht betrieben werden soll, ob eine weitere Arbeitsstation errichtet werden soll oder ob der Produktionsprozess eines der Engpässe bis zum 01.07.2023 verbessert werden kann.

Für Szenario 3 ist ersichtlich, dass bei keinem Arbeitsschritt genügend Produktionskapazitäten vorhanden sind, um die geplanten 70 Stück pro Produkt pro Tag zu produzieren. Um eine fundierte Entscheidung zu treffen, wie das Produktionsvolumen entsprechend des Bedarfs erhöht werden kann, sind weitere Informationen notwendig.

Die Datenanalyse lieferte bedeutende Erkenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Produktionsstandorte und Lagerhäuser im Rahmen der Erhöhung des Produktionsvolumens, wie in Szenario 1 bis Szenario 3 dargestellt in Tabelle 16. Es wird verdeutlicht, wie effizient die Standorte genutzt wurden und wo es Optimierungspotenzial gibt.

Tabelle 16: Modellergebnis - Standort- und Lagerinformationen

| Standort- & Lagerinformation: | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|-----------------|----|----------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Standort | Freie Pr. Fläche | Stk. Produziert | RW | Lagerkapazität [Pal] | Art. Verbrauch/Tag [Pal] | Mittlerer Artikelbestand [Pal] | Halb-fabrikatbestand [Pal] | Lagerauslastung [%] | Bestands-wert [€] | Umschlagshäufigkeit |
| Szenario 1: | | | | | | | | | 69.792.746 € | |
| A | 100 | 412 | 15 | 1900 | 77 | 1115 | 137 | 65,9 | 1.133.220 € | 26 |
| B | 104 | 442 | 1 | 400 | 69 | 69 | 165 | 58,5 | 488.019 € | 365 |
| C | 5475 | 629 | 10 | 1000 | 69 | 674 | 94 | 76,8 | 12.934.220 € | 40 |
| D | 6600 | 911 | 10 | 2400 | 141 | 1369 | 199 | 65,3 | 5.428.205 € | 40 |
| 1.0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 21 | 578 | 0 | 96,3 | 29.374.000 € | 13 |
| 2.0 | 0 | 0 | 0 | 2000 | 144 | 1070 | 0 | 53,5 | 13.145.864 € | 52 |
| 3.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 32 | 448 | 94 | 54,2 | 379.600 € | 26 |
| 4.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 60 | 836 | 0 | 83,6 | 6.909.619 € | 28 |
| Szenario 2: | | | | | | | | | 91.564.551 € | |
| A | 100 | 529 | 15 | 1900 | 100 | 1453 | 168 | 85,3 | 1.477.350 € | 26 |
| B | 104 | 574 | 1 | 400 | 89 | 89 | 209 | 74,5 | 640.078 € | 365 |
| C | 5475 | 823 | 10 | 1000 | 90 | 886 | 124 | 101,0 | 17.032.760 € | 40 |
| D | 6600 | 1207 | 10 | 2400 | 183 | 1781 | 255 | 84,8 | 7.055.935 € | 40 |
| 1.0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 26 | 757 | 0 | 126,2 | 38.488.000 € | 12 |
| 2.0 | 0 | 0 | 0 | 2000 | 189 | 1406 | 0 | 70,3 | 17.383.709 € | 52 |
| 3.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 42 | 588 | 124 | 71,2 | 497.600 € | 26 |
| 4.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 78 | 1086 | 0 | 108,6 | 8.989.119 € | 28 |
| Szenario 3: | | | | | | | | | 152.072.809 € | |
| A | 100 | 901 | 15 | 1900 | 162 | 2402 | 304 | 142,4 | 2.440.830 € | 26 |
| B | 104 | 965 | 1 | 400 | 149 | 149 | 357 | 126,5 | 1.066.272 € | 365 |
| C | 5475 | 1367 | 10 | 1000 | 150 | 1474 | 205 | 167,9 | 28.424.625 € | 40 |
| D | 6600 | 1961 | 10 | 2400 | 295 | 2916 | 428 | 139,3 | 11.489.950 € | 40 |
| 1.0 | 0 | 0 | 0 | 600 | 43 | 1259 | 0 | 209,8 | 64.105.000 € | 12 |
| 2.0 | 0 | 0 | 0 | 2000 | 308 | 2333 | 0 | 116,7 | 29.035.123 € | 52 |
| 3.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 70 | 980 | 205 | 118,5 | 828.000 € | 26 |
| 4.0 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 128 | 1764 | 0 | 176,4 | 14.683.009 € | 28 |

Die Analyse der Tabelle 16 zeigt, dass in der Modellkonfiguration 1 dieses Experiments insbesondere am Standort C und D noch beträchtliche freie Produktionsflächen vorhanden sind, was die Installation weiterer Arbeitsstationen ermöglicht. Für Szenario 2 wird deutlich, dass die Lager der Standorte C, 1 und 4 über 100% ausgelastet sind, während bei Szenario 3 alle Lagerhallen überlastet sind.

Für die Optimierung der Lagerauslastungen stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung: die Erweiterung der Lagerkapazität oder die Reduzierung des mittleren Bestands. Eine Methode zur Reduzierung des Lagerbestands ist die Vermeidung des Bedarfs an Halbfabrikaten durch eine gezielte Verteilung der Arbeitsstationen. So zeigt beispielsweise Tabelle 14, dass in der Modellkonfiguration 1 am Standort B die Arbeitsstationen "Mechanical 2" platziert sind, wobei die Halbfabrikate dann zum Standort C transportiert werden, bevor sie schließlich für die Arbeitsstation "EOL" erneut zum Standort B gelangen und dabei den Lagerbestand erhöhen. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Bestands greift über den Artikelbestand. Zum Beispiel könnte im Szenario 2 der mittlere Bestand der Artikel im Produktionslager C durch Verlagerung von Arbeitsstationen von Standort C zu einem anderen Standort reduziert werden. In diesem Beispiel gibt es sowohl in den Produktionsstandorten A, B und D noch freie Produktionsfläche als auch freien Lagerplatz. Auf diese Weise kann der Artikelbedarf und somit der Bestand auf einen anderen Standort verschoben werden. Eine weitere Option ist die Anpassung der gewünschten Lagerreichweite dieses

Produktionslagers, die in der Modellkonfiguration 1 in Tabelle 14 auf 10 Tage festgelegt ist. Durch die Abhängigkeit des Bestands vom Mindestbestand ist der effizienteste Weg zur Reduzierung der Lagerauslastung die Verringerung der Wiederbeschaffungszeiten der Artikel.

Die Analyse der Mindestabstände zwischen den einzelnen Artikeln ist ebenfalls von großer Bedeutung. Dies ist besonders wichtig, um die Lieferanten frühzeitig in das Ramp-Up-Management einzubeziehen und eine kontinuierliche Produktivität sicherzustellen. Des Weiteren ist das Wissen über zukünftige Mindestbestände entscheidend für die Planung und Gestaltung der Lagerfläche. Durch die systematische Analyse dieser Informationen aus den Testläufen können wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden, um das Gesamtsystem zu optimieren und eine effiziente Produktion sowie Logistik sicherzustellen.

Tabelle 17: Modellergebnis - Artikelinformationen für Szenario 1

| Artikelnummer | Artikelname | Hauptlager | WBZ | Mindestbestand [Stk] | Mindestbestand [Pal] | Mindestbestand in € |
|---------------|---------------|------------|-----|----------------------|----------------------|---------------------|
| 3 | Kabel | 1.0 | 40 | 10320 | 688 | 36.120.000 € |
| 7 | Eichrecht | 1.0 | 20 | 1340 | 45 | 536.000 € |
| 12 | Blech | 2.0 | 12 | 1656 | 11 | 33.120 € |
| 18 | Platine | 2.0 | 30 | 12570 | 419 | 12.570.000 € |
| 9 | Karton200 | 2.0 | 15 | 975 | 39 | 48.750 € |
| 19 | Blech | 2.0 | 25 | 10475 | 233 | 3.142.500 € |
| 13 | Blech | 2.0 | 17 | 20060 | 1337 | 5.015.000 € |
| 1 | Blech | 2.0 | 12 | 768 | 10 | 15.360 € |
| 5 | Spannstreifen | 2.0 | 5 | 490 | 0 | 980 € |
| 2 | Schrauben | 2.0 | 10 | 945340 | 315 | 472.670 € |
| 10 | Blech | 2.0 | 12 | 1668 | 11 | 33.360 € |
| 8 | Karton400 | 2.0 | 15 | 975 | 65 | 53.625 € |
| 6 | Folien | 2.0 | 15 | 1950 | 13 | 29.250 € |
| 20 | Screen | 2.0 | 30 | 1950 | 65 | 780.000 € |
| 4 | Karton50 | 2.0 | 15 | 960 | 32 | 33.600 € |
| 92 | Gehäuse50 | 3.0 | 15 | 480 | 480 | 336.000 € |
| 90 | Gehäuse200 | 3.0 | 15 | 495 | 495 | 495.000 € |
| 91 | Gehäuse400 | 3.0 | 15 | 495 | 495 | 495.000 € |
| 17 | Schrauben | 4.0 | 10 | 384020 | 128 | 192.010 € |
| 15 | Schrauben | 4.0 | 10 | 576200 | 192 | 288.100 € |
| 16 | Drossel | 4.0 | 20 | 7720 | 257 | 3.860.000 € |
| 11 | Drosseln | 4.0 | 20 | 8240 | 110 | 412.000 € |
| 14 | Trafo | 4.0 | 25 | 10500 | 700 | 4.725.000 € |

Tabelle 17 zeigt eine Liste von Artikelinformationen für Szenario 1, die einen Teil der vorhandenen Artikel im System umfasst. Diese Liste soll unter anderem dem Einkauf bei der Einbindung der Lieferanten in das Ramp-Up-Projekt unterstützen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Informationen zum Transportbedarf zwischen den Standorten. Hier wird untersucht, wie viele Transporte zwischen den verschiedenen Produktionsstandorten und Lagern erforderlich sind und welche

Mengen transportiert werden müssen. Diese Daten sind entscheidend für die Planung von Transportkapazitäten und -zeiten, um Engpässe zu vermeiden sowie Bestände und Kosten zu minimieren.

Tabelle 18: Modellergebnis - Transportinformationen für Szenario 1, 2 und 3

| Standort | Tore: | Ankünfte/ Tag: | Abfahrten /Tag: | Auslastung bei 20 min/LKW | Zu A: [Pal] | Zu B: [Pal] | Zu C: [Pal] | Zu D: [Pal] | Zu 1: [Pal] | Zu 2: [Pal] | Zu 3: [Pal] | Zu 4: [Pal] |
|--------------------|-------|-------------------|--------------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Szenario 1: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 8 | 6 | 29,2 | 0 | 96 | 0 | 32 | 0 | 0 | 62 | 0 |
| B | 2 | 10 | 6 | 33,3 | 32 | 0 | 94 | 60 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 4 | 6 | 4 | 10,4 | 0 | 0 | 0 | 107 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 2 | 12 | 8 | 41,7 | 105 | 69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 2 | 8,3 | 0 | 5 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 7 | 9,7 | 9 | 5 | 52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 3 | 3 | 25,0 | 66 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 3 | 6,3 | 0 | 26 | 0 | 53 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Szenario 2: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 10 | 9 | 39,6 | 0 | 116 | 0 | 42 | 0 | 0 | 84 | 0 |
| B | 2 | 13 | 9 | 45,8 | 4 | 0 | 124 | 72 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 4 | 8 | 5 | 13,5 | 0 | 0 | 0 | 141 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 2 | 17 | 9 | 54,2 | 127 | 93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 2 | 8,3 | 0 | 6 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 9 | 12,5 | 11 | 6 | 69 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 5 | 5 | 41,7 | 86 | 42 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 5 | 10,4 | 0 | 34 | 0 | 69 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Szenario 3: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 17 | 15 | 66,7 | 0 | 226 | 0 | 68 | 0 | 0 | 140 | 0 |
| B | 2 | 18 | 14 | 66,7 | 67 | 0 | 205 | 127 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 4 | 13 | 8 | 21,9 | 0 | 0 | 0 | 233 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 2 | 25 | 15 | 83,3 | 237 | 131 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 3 | 12,5 | 0 | 10 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 12 | 16,7 | 18 | 10 | 115 | 181 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 8 | 8 | 66,7 | 142 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 0 | 12,5 | 0 | 57 | 0 | 112 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 18 zeigt die Transportinformationen der Modellkonfiguration 1 für Szenario 1, Szenario 2 und Szenario 3. Es ist ersichtlich, dass keines der Szenarien eine Überlastung der Be- und Entladetore an den Standorten aufweist. Diese Information basiert auf Durchschnittswerten, wobei der Lade- und Entladevorgang im Durchschnitt 20 Minuten in Anspruch nimmt. Diese Mittelwerte wurden während der Systemanalyse ermittelt und berücksichtigen das Milk-Run-Konzept für die Versorgung der Produktionsstandorte. Dabei wird ein LKW an einem Standort entladen und gleichzeitig beladen. Die präsentierten Daten sollen den Transportbedarf bei der gewählten

Modellkonfiguration veranschaulichen und dienen als Ausgangspunkt für weitere Optimierungskonzepte.

3.2.4.3 Modellkonfiguration 2

Die Testläufe der Modellkonfiguration 1 in Szenario 2 haben gezeigt, dass die Arbeitsschritte "Mechanical 1", "Stack Mount" und "EOL" Engpässe für das geplante Produktionsvolumen ab dem 01.07.2023 darstellen werden. Im Gegensatz dazu wird bei Szenario 3 klar, dass jeder Arbeitsschritt einen Engpass für das geplante Produktionsvolumen bis zum Jahresende darstellt. Um diese Engpässe zu bewältigen, können zunächst Umschichtungen von freiem Personal ausreichen. Bis zum 01.07.2023 muss jedoch die Anzahl der Arbeitsstationen an den Engpässen erhöht werden oder ihre Betriebszeit oder Geschwindigkeit angepasst werden. In diesem Experiment wurde die Taktzeit der "EOL" von 3000 auf 2500 Sekunden reduziert. Gleichzeitig wurde eine neue Fertigungslinie für "Mechanical 1" und eine automatische Linie für "Stack Mount" entworfen. Tabelle 19 zeigt die aktualisierten Stammdaten für die Linieninformationen dieser Modellkonfiguration.

Tabelle 19: Aktualisierte Stammdaten für Linieninformationen

| Produkt | Prozess Step | Bemerkung | Taktzeit [sec] | WIP [Stk] | Fläche [m ²] | Personal |
|---------|--------------|-----------|----------------|-----------|--------------------------|----------|
| HYC-400 | EOL | x | 2500 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Mechanical 1 | x | 2000 | 1 | 25 | 1 |
| HYC-400 | Mechanical 1 | line | 1700 | 7 | 150 | 7 |
| HYC-400 | Stack Mount | x | 1200 | 1 | 50 | 1 |
| HYC-400 | Stack Mount | automatic | 900 | 5 | 150 | 5 |

Für die Erreichung der Ziele von Szenario 3 ist eine umfassende Steigerung der Produktivität aller Komponenten des gesamten Produktionssystems erforderlich. Die Anzahl der Arbeitsstationen für die einzelnen Arbeitsschritte und ihre Betriebszeit können durch mehrere Testläufe des Modells schnell analysiert werden. Die Entscheidung, welcher Hebel genutzt werden soll, ist eine strategische Unternehmensentscheidung, die von verschiedenen Faktoren abhängt, wie zum Beispiel der verfügbaren freien Produktionsfläche für die Errichtung weiterer Arbeitsstationen oder der Personalverfügbarkeit bei Mehrschichtbetrieb. In Tabelle 20 wurde die Anzahl der Arbeitsstationen der Modellkonfiguration 1 von 178 auf 264 erweitert, um das Produktionsvolumen von Szenario 3 zu erreichen. Bei einem standortübergreifenden Produktionssystem ist es wichtig zu wissen, wo diese Arbeitsstationen platziert werden sollen, um Bestände und Logistikkosten zu minimieren. In diesem Experiment werden drei Varianten verglichen. In Variante 1

bleibt die Lokalisierung der Arbeitsstationen unverändert, solange genügend freie Produktionsfläche vorhanden ist. Neue Arbeitsstationen werden am selben Standort errichtet, wenn dort noch Platz ist. Wenn am gewünschten Standort keine freie Produktionsfläche vorhanden ist, werden die verbleibenden Arbeitsstationen an einem anderen Standort installiert. In Variante 2 und Variante 3 wird die herkömmliche Konfiguration des Produktionssystems vernachlässigt, was unter anderem zu Übersiedlungskosten und Leerständen führt. Diese Entscheidung muss vom Ramp-Up Projektteam entsprechend bewertet werden. Bei Variante 2 wird versucht, den gesamten Wertstrom eines Erzeugnisses auf einen Standort zu konzentrieren, während bei Variante 3 eine standortübergreifende Reihenfertigung angestrebt wird. Dabei werden Wertströme von Baugruppen an jenem Standort lokalisiert, an dem sich der Arbeitsschritt der Endprodukte befindet, an dem diese benötigt werden. Nähere Details dazu finden sich im Kapitel 3.2.4.4.

Tabelle 20: Arbeitsstationen der Modellkonfiguration 2

| Linieninformationen: | | | | | |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|------------|-----------|-------------|
| Standort | Produkt | Linie | Bemerkung | Nr. Lines | Stunden [h] |
| | HYC-400 / HYC-200 | Aufbringen der Folie + F | x | 5 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 1 | x | 6 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 1 | line | 2 | 16 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | line | 2 | 16 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Mechanical 2 | x | 4 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Cabling | x | 5 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Eichrecht | x | 8 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Stack Mount | x | 4 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Stack Mount | automatic | 1 | 16 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Parametrization | x | 2 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Parametrization | new | 3 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | EOL | x | 6 | 16 |
| | HYC-400 / HYC-200 | EOL | x | 2 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Last Check | x | 5 | 8 |
| | HYC-400 / HYC-200 | Verpacken | x | 5 | 8 |
| | HYC-50 | Assembly | x | 6 | 8 |
| | HYC-50 | Cabling | x | 2 | 8 |
| | HYC-50 | Parametrization | x | 3 | 8 |
| | HYC-50 | EOL | x | 2 | 8 |
| | HYC-50 | EOL | new | 4 | 8 |
| | HYC-50 | Last Check | x | 2 | 8 |
| | HYC-50 | Verpacken | x | 2 | 8 |
| | SCH-OUT-400 / SCH-OUT-200 | Mount | x | 6 | 16 |
| | SCH-OUT-400 / SCH-OUT-200 | Mount | x | 4 | 8 |
| | SCH-OUT-400 / SCH-OUT-200 | EOL | x | 4 | 16 |
| | Sic-Stack | Mount 1 | x | 22 | 16 |
| | Sic-Stack | Mount 2 | Manuell | 20 | 8 |
| | Sic-Stack | Mount 2 | Automatic1 | 2 | 8 |
| | Sic-Stack | Mount 2 | Automatic2 | 14 | 16 |
| | Sic-Stack | EOL | x | 22 | 16 |
| | Power Unit | Mount | Manuell | 20 | 8 |
| | Power Unit | Mount | Automatic | 25 | 16 |
| | Power Unit | EOL | x | 41 | 16 |
| | Display | Mount | x | 3 | 8 |

Weitere Erkenntnisse aus den Testläufen der Modellkonfiguration 1 zeigen, dass bei dem gegebenen Mindestbestand des Produktionsvolumens von Szenario 3 jedes Lager im Produktionssystem seine Kapazität überschreitet. In diesem Experiment wird angenommen, dass kleinere Lagerkapazitätserweiterungen durchgeführt wurden, indem am Standort B ein neues Lagersystem im vorhandenen Lager errichtet wurde und am Standort C und D freie Produktionsfläche in Lagerfläche umgewandelt wurde. Diese Veränderung wird in Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21: Aktualisierte Stammdaten für Standortinformationen

| Nummer | Name | Fläche [m ²] | Lagerkapazität [Pal.] | Tore |
|--------|------|--------------------------|-----------------------|------|
| 1 | A | 700 | 1900 | 2 |
| 2 | B | 1500 | 575 | 2 |
| 3 | C | 6000 | 2500 | 4 |
| 4 | D | 7000 | 3000 | 2 |
| 5 | 1 | 0 | 750 | 1 |
| 6 | 2 | 0 | 2000 | 3 |
| 7 | 3 | 0 | 1000 | 1 |
| 8 | 4 | 0 | 1000 | 2 |

Es wird außerdem angenommen, dass durch die Einbindung des Lieferantenmanagements in das Ramp-Up Projekt die Wiederbeschaffungszeiten für Artikel 13 von 17 auf 12 Tage und für Artikel 3 von 40 auf 30 Tage reduziert wurden, dargestellt in Tabelle 21. Diese verkürzten Wiederbeschaffungszeiten reduzieren den benötigten Mindestbestand im Produktionssystem und somit den Artikelbestand in den Lagern der Standorte.

Tabelle 22: Aktualisierte Stammdaten für Artikelinformationen

| Product | Prozess Step | Anzal | Baugruppe | Artikelnummer | Artikelname | Einkaufspreis | Palettenfaktor | Wiederb | Hauptlager |
|-----------|--------------|-------|-----------|---------------|-------------|---------------|----------------|---------|------------|
| Sic-Stack | Mount 1 | 6 | no | 13 | Blech | 250,00 € | 15 | 12 | 2 |
| HYC-200 | Cabling | 2 | no | 3 | Kabel | 3.500,00 € | 15 | 30 | 1 |
| HYC-400 | Cabling | 4 | no | 3 | Kabel | 3.500,00 € | 15 | 30 | 1 |
| HYC-50 | Cabling | 2 | no | 3 | Kabel | 3.500,00 € | 15 | 30 | 1 |

Als letzte Maßnahme zur Reduzierung der Lagerauslastung wird die Vermeidung der Lagerung von Halbfabrikaten durch eine ausgeklügelte Modellkonfiguration untersucht. Dies wird durch die Testläufe der Varianten 1 bis 3 analysiert.

3.2.4.4 Testläufe der Varianten 1, 2 und 3 für das Szenario 3

Wie bereits in vorherigen Abschnitten erwähnt, basiert Variante 1 auf der Modellkonfiguration 1. In dieser Variante wurden zusätzliche Arbeitsstationen an den bereits vorhandenen Standorten installiert. Falls die verfügbare Produktionsfläche erschöpft war, wurden die weiteren Arbeitsstationen an einem Standort platziert, an dem sich die Arbeitsstationen des nächsten Arbeitsschrittes befinden.

Für Variante 2 wurden die Wertströme wie in Tabelle 23 dargestellt auf die Standorte verteilt. auf die Standorte verteilt. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die freie Produktionsfläche an Standorten dieser Konfiguration des Produktionssystems eine weitere Skalierung für die kommenden Jahre ermöglicht.

Tabelle 23: Konfiguration der Arbeitsstationen nach Variante 2

| Value Stream | Location |
|-----------------|----------|
| HYC-200/400 | C |
| HYC-50 | B |
| Sch-Out-200/400 | A |
| Sic-Stack | D |
| Power Unit | D |
| Display | A |

Bei Variante 3 wurden die Arbeitsstationen wie in Abbildung 30 verteilt. Die gestrichelt umrandeten Felder in unterschiedlichen Farben stellen die Standorte dar, während die durchgängig umrandeten Felder in Schwarz die Wertströme inklusive der Arbeitsstationen darstellen. In dieser Variante wird versucht, den Wertstrom der Endprodukte ähnlich einer Reihenfertigung über die Standorte zu verteilen. Dabei sollen die Wertströme der Baugruppen an jenem Standort lokalisiert werden, an dem sich der Arbeitsschritt der Endprodukte befindet, an dem sie benötigt werden. An dieser Stelle könnte das Ramp-Up-Projektteam eine Prozessoptimierung am HYC-50 vornehmen, indem die Station "Cabling" vor dem Arbeitsschritt "Assembly" platziert wird und am Standort A durchgeführt wird, während das "Assembly" gemeinsam mit dem Produktionsprozess der Power Unit am Standort C durchgeführt wird.

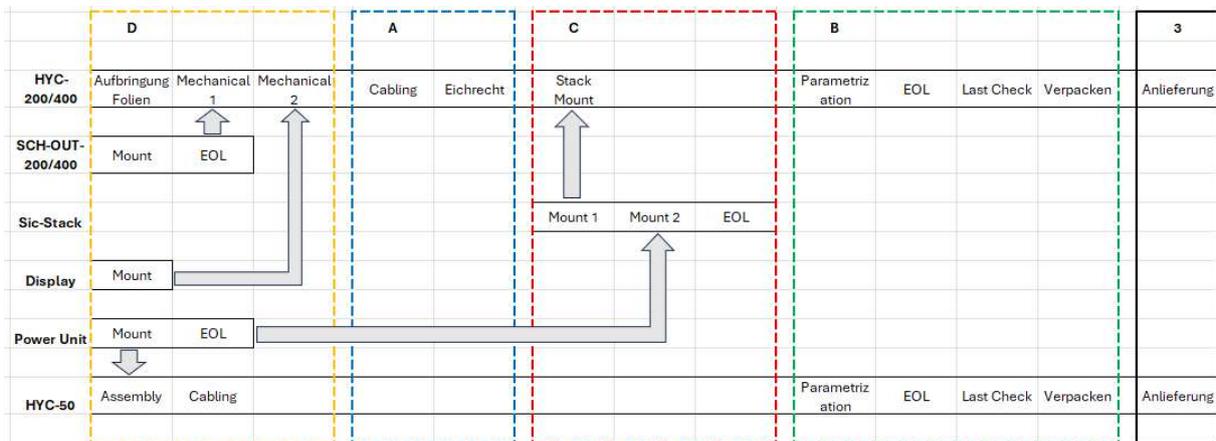


Abbildung 30: Konfiguration der Arbeitsstationen nach Variante 3

Die ermittelte Auslastung der einzelnen Arbeitsstationen bleibt in den verschiedenen Varianten gleich, weshalb sie in dieser Arbeit vernachlässigt wird. Der wesentliche Unterschied der verschiedenen Modellkonfigurationen zeigt sich bei logistischen Tätigkeiten wie Lagerhaltung und Transport. Tabelle 24 zeigt wichtige Kennzahlen zur Lagerentwicklung der zuvor beschriebenen Varianten bei einer Produktionsvolumensteigerung auf 70 Stück pro Produkt pro Tag.

Tabelle 24: Testergebnisse - Standortinformationen Variante 1, 2 und 3

| Standort- & Lagerinformation: | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------------|----|----------------------|-------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------|------------------|----------------------|--|
| Standort | Freie Pr. Fläche | RW | Lager-kapazität [Pa] | Art. Verbrauch/Tag [Pa] | Mittlerer Artikelbestand [Pa] | Halb-fabrikat-bestand [Pa] | Lager-auslastung [%] | Bestandswert [€] | Umschlags-häufigkeit | |
| Variante 1: | | | | | | | | | | |
| A | 0 | 10 | 1900 | 154 | 1518 | 240 | 92,5 | 1.554.015 € | 40 | |
| B | 36 | 1 | 575 | 114 | 114 | 258 | 64,7 | 793.936 € | 365 | |
| C | 2700 | 14 | 2500 | 151 | 2089 | 268 | 94,3 | 39.958.555 € | 28 | |
| D | 3841 | 7 | 3000 | 337 | 2327 | 422 | 91,6 | 9.994.656 € | 60 | |
| 1.0 | 0 | 0 | 750 | 43 | 752 | 0 | 100,3 | 38.248.400 € | 21 | |
| 2.0 | 0 | 0 | 2000 | 257 | 1902 | 0 | 95,1 | 23.246.002 € | 52 | |
| 3.0 | 0 | 0 | 1000 | 212 | 1690 | 210 | 189,6 | 1.396.000 € | 52 | |
| 4.0 | 0 | 0 | 1000 | 170 | 1896 | 0 | 189,6 | 14.484.561 € | 33 | |
| Variante 2: | | | | | | | | | | |
| A | 256 | 76 | 1900 | 26 | 1878 | 0 | 98,8 | 8.961.198 € | 5 | |
| B | 985 | 6 | 575 | 89 | 519 | 3 | 90,8 | 3.283.560 € | 73 | |
| C | 3350 | 12 | 2500 | 199 | 2345 | 93 | 97,5 | 20.457.264 € | 33 | |
| D | 1986 | 6 | 3000 | 443 | 2634 | 0 | 87,8 | 17.167.884 € | 73 | |
| 1.0 | 0 | 0 | 750 | 43 | 771 | 0 | 102,8 | 38.876.200 € | 21 | |
| 2.0 | 0 | 0 | 2000 | 248 | 2269 | 0 | 113,5 | 31.954.321 € | 40 | |
| 3.0 | 0 | 0 | 1000 | 212 | 1056 | 210 | 126,2 | 867.000 € | 91 | |
| 4.0 | 0 | 0 | 1000 | 158 | 1762 | 0 | 176,2 | 13.727.574 € | 33 | |
| Variante 3: | | | | | | | | | | |
| A | 50 | 50 | 1900 | 36 | 1736 | 136 | 98,5 | 77.067.600 € | 7 | |
| B | 650 | 18 | 575 | 22 | 359 | 210 | 99,0 | 362.322 € | 22 | |
| C | 3110 | 7 | 2500 | 328 | 2275 | 166 | 97,6 | 10.847.242 € | 60 | |
| D | 2767 | 8 | 3000 | 368 | 2926 | 0 | 97,5 | 16.961.520 € | 52 | |
| 1.0 | 0 | 0 | 750 | 0 | 0 | 0 | 0,0 | 2.028.900 € | 0 | |
| 2.0 | 0 | 0 | 2000 | 306 | 2101 | 0 | 105,1 | 30.036.029 € | 60 | |
| 3.0 | 0 | 0 | 1000 | 212 | 1484 | 210 | 169,0 | 1.337.000 € | 52 | |
| 4.0 | 0 | 0 | 1000 | 170 | 1745 | 0 | 174,5 | 13.289.618 € | 36 | |

Bei diesem Experiment wurde darauf abgezielt, die maximale Reichweite der Produktionslager zu ermitteln. Diese Herangehensweise führt dazu, dass der Gesamtbestand im System steigt, da der Bestand bestimmter Artikel in den Produktionslagern das Mindestbestandsniveau überschreitet. Dieses Verhältnis wird in Tabelle 25 veranschaulicht. Durch diese Methode werden die Wareneingangslager maximal entlastet, und es lässt sich modellieren, ab welchem Produktionsvolumen Maßnahmen erforderlich sind. Dazu könnten Maßnahmen wie die Schaffung neuer Lagerkapazitäten, verbesserte Lieferbedingungen für die Artikel oder - wie es für dieses Experiment relevant ist - eine Strategieänderung gehören, bei der das Produktionssystem auch als Wareneingangslager für bestimmte Artikel fungiert. Dieses Experiment berücksichtigt jedoch nicht dieses Verfahren, da der Industriepartner die Wareneingangslager zum Kommissionieren nutzen möchte und spezifische Ladungsträger gezielt eingesetzt werden.

Tabelle 25: Bestandsentwicklung bei maximal möglicher Reichweite

| | Bestandswert [€] |
|------------------------|------------------|
| Mindestbestand: | 129.234.330 € |
| Variante 1: | 129.676.124 € |
| Variante 2: | 135.295.001 € |
| Variante 3: | 151.930.231 € |

Tabelle 26 stellt die Transportbedarfe der verschiedenen Varianten gegenüber, während Tabelle 27 die benötigten Lade- & Endladezeiten, sowie die benötigte Transportzeiten vergleicht.

Tabelle 26: Testergebnisse - Transportinformationen Variante 1, 2 und 3

| Standort | Tore: | Ankünfte/ Tag: | Abfahrten /Tag: | Auslastung bei 20 min/LKW | Zu A: [Pal] | Zu B: [Pal] | Zu C: [Pal] | Zu D: [Pal] | Zu 1: [Pal] | Zu 2: [Pal] | Zu 3: [Pal] | Zu 4: [Pal] |
|--------------------|-------|-------------------|--------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Variante 1: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 14 | 14 | 58,3 | 0 | 140 | 108 | 48 | 0 | 0 | 83 | 0 |
| B | 2 | 16 | 11 | 56,3 | 29 | 0 | 154 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| C | 4 | 16 | 10 | 27,1 | 0 | 48 | 0 | 239 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 2 | 26 | 15 | 85,4 | 214 | 75 | 10 | 0 | 0 | 0 | 127 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 3 | 12,5 | 0 | 10 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 12 | 16,7 | 10 | 10 | 117 | 188 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 7 | 8 | 62,5 | 140 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 6 | 12,5 | 0 | 24 | 0 | 144 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Variante 2: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 2 | 1 | 6,3 | 0 | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 2 | 6 | 3 | 18,8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 70 | 0 |
| C | 4 | 12 | 5 | 17,7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 140 | 0 |
| D | 2 | 14 | 4 | 37,5 | 0 | 3 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 3 | 12,5 | 0 | 10 | 34 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 12 | 16,7 | 14 | 7 | 21 | 283 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 8 | 8 | 66,7 | 0 | 70 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 6 | 12,5 | 12 | 0 | 0 | 156 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Variante 3: | | | | | | | | | | | | |
| A | 2 | 8 | 5 | 27,1 | 0 | 0 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B | 2 | 9 | 7 | 33,3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 210 | 0 |
| C | 4 | 17 | 5 | 22,0 | 0 | 140 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| D | 2 | 14 | 9 | 47,9 | 140 | 70 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1.0 | 1 | 0 | 3 | 12,5 | 34 | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2.0 | 3 | 0 | 13 | 18,1 | 2 | 20 | 170 | 133 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3.0 | 1 | 7 | 7 | 58,3 | 0 | 0 | 0 | 210 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4.0 | 2 | 0 | 6 | 12,5 | 0 | 0 | 156 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabelle 27: Kennzahlen des logistischen Aufwands

| | Variante 1 | Variante 2 | Variante 3 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Summe Be- & Entladezeit [h]: | 52,7 | 28,0 | 36,7 |
| Summe Transportzeit [h]: | 39,1 | 23,3 | 28,2 |

Ein Vergleich der verschiedenen Varianten zeigt, dass sowohl Variante 2 als auch Variante 3 logistisch effizienter sind als Variante 1, bei der das Produktionssystem vom Anfang des Jahres unverändert blieb und gezielt erweitert wurde. Zudem ist aus diesen Informationen ersichtlich, dass Variante 2 mit 42 täglich benötigten Transporten und einer Transportzeit von 23,3 Stunden weniger Transportaufwand erfordert als Variante 3 mit 55 Transporten und einer Transportzeit von 28,2 Stunden. Dies führt auch zu einer geringeren Anzahl von Be- und Entladeprozessen, was das Lagerpersonal entlastet. In dieser Hinsicht ist die Umsetzung von Variante 2 vorteilhafter als Variante 3.

Anhand dieser Informationen kann das Ramp-Up-Projektteam eine Schätzung der möglichen Einsparungen vornehmen, wenn eine Umstellung auf eine Konfiguration des Produktionssystems wie in Variante 2 erfolgt. Anschließend muss individuell abgewogen werden, ob der Umzugsaufwand und die damit verbundenen Kosten diesen potenziellen Einsparungen gegenüberstehen.

Sollte eine Umsetzung erfolgen, können diese Testergebnisse dem Ramp-Up-Projektteam zur Festlegung der Projektziele und dem kontinuierlichen Projektcontrolling dienen.

3.2.4.5 Bewertung

Im letzten Abschnitt wird eine objektive Bewertung des Planungsunterstützungstools vorgenommen, wobei auch auf mögliche weiterführende Forschungsfragen eingegangen wird.

Um eine objektive Bewertung zu ermöglichen, wird auf die in Kapitel 3.2.1.1 erläuterten Anforderungen an ein Planungsunterstützungstool für den Produktionshochlauf eingegangen:

1. Das System soll die Gesamtleistung des Produktionssystems wiedergeben

Ein Produktionssystem kann anhand der Faktoren Produktivität, Kosten, Qualität und Flexibilität bewertet werden.²⁹⁹ Das entwickelte System stellt den Faktor Produktivität in

²⁹⁹ Vgl. Kapitel 2.1.1 „Das Produktionssystem“

den Vordergrund, indem es Informationen zur Auslastung der Arbeitsstationen liefert und bei der Identifizierung von Engpässen bei gewünschter Produktivität hilft. Da Logistikkosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten haben,³⁰⁰ trägt es zur Ermittlung des Logistikbedarfs und der Bestände bei. In Bezug auf die Qualität liefert es Soll-Zahlen, die als Grundlage zur Ermittlung der Prozessqualität und für die Identifizierung von Verschwendung dienen können und somit Verbesserungsmaßnahmen im Qualitätsmanagement unterstützen können.³⁰¹ Die Flexibilität wird nicht direkt berücksichtigt, aber es gibt zwei Grundsätze zu beachten: Erstens kann Automatisierung die Produktivität steigern, führt aber oft zu einer Reduzierung der Flexibilität.³⁰² Zweitens steigern kürzere Durchlaufzeiten die Agilität und Flexibilität von Produktionssystemen.³⁰³ Somit liefert das System einen indirekten Beitrag zur Steigerung der Flexibilität, da es standortübergreifende Transporte zeigt, die die Durchlaufzeit stark beeinflussen. Allerdings besteht Verbesserungsbedarf bei der Ermittlung von dynamischen Engpässen, Produktionsbeständen und Durchlaufzeiten. Zu viele Kennzahlen könnten sich als kontraproduktiv für die Informationsgewinnung erweisen.³⁰⁴

2. Das System soll flexibel in der Anwendung sein, um keine Hemmschwelle für Veränderungen zu bilden

Diese Flexibilität wird durch die Basis in einer reinen Programmiersprache gewährleistet. Dadurch ist es kostenlos und unbegrenzt vervielfachbar sowie auf allen Servern verwendbar. Ebenso bietet es die Möglichkeit einer leichten Erweiterung der Funktionalitäten und Anpassung an sich ändernde Bedürfnisse. Die Nutzung über Excel als Eingabe und Ausgabe macht das System für jeden zugänglich und erlaubt eine flexible Datenauswertung für unterschiedliche Zwecke. Allerdings entsteht beim Versuch, die Gesamtleistung des Produktionssystems abzubilden, ein Zielkonflikt mit der Flexibilität aufgrund seiner Größe.³⁰⁵

3. Vergleich verschiedener Lösungen

Das System ermöglicht den flexiblen Vergleich verschiedener Modellkonfigurationen.

³⁰⁰ Vgl. Kapitel 2.1.2.1 „Betriebswirtschaftliche Sicht des Logistikmanagements“

³⁰¹ Vgl. Kapitel 2.1.1.2 „Lean Management“

³⁰² Vgl. Kapitel 2.2.1 „Die Expansionsphase“

³⁰³ Vgl. Kapitel 2.1.1.3 „Das agile Produktionssystem“

³⁰⁴ Vgl. Kapitel 2.2.2.3 „Ramp-Up-Bewertung“

³⁰⁵ Vgl. Kapitel 2.2.2.3 „Ramp-Up-Bewertung“

4. Es soll eine digitale Abbildung des Produktionssystems sein und ein logistikgerechtes Werkslayout ermöglichen

Das System bietet eine digitale Abbildung des Produktionssystems in tabellarischer Form. Durch den flexiblen Vergleich des Lager- und Transportbedarfs verschiedener Modellkonfigurationen ermöglicht es die Gestaltung eines logistikgerechten Layouts. Aktuell ist dies jedoch nur standortübergreifend und nicht standortintern möglich.

5. Es soll ein skalierbares Workflow Management System sein

Das System bietet eine skalierbare Darstellung des Produktionssystems und ermöglicht ebenfalls die Erweiterung von Funktionalitäten. Es handelt sich jedoch nicht um ein dynamisches Workflow-Management-System.

6. Es soll ermöglichen, antizipativ Störungen zu identifizieren

Das System ermöglicht die antizipative Identifizierung von Engpässen während des Produktionshochlaufs. Es prognostiziert jedoch keine weiteren möglichen Störungen wie beispielsweise Lieferausfälle von Lieferanten. Stattdessen ermöglicht es durch die zukünftige Bedarfsermittlung eine zeitgerechte Informationsbereitschaft, um diesen Störungen entgegenzuwirken

7. Automatisch optimale Lösung anzeigen

Das System erfordert manuelle Identifizierung verschiedener Lösungen durch Testläufe. Eine Implementierung von Algorithmen zur automatischen Lösungsfindung wäre möglich, jedoch mit großem Aufwand und könnte die Flexibilität des Systems einschränken.

Die Bewertung des Planungsunterstützungstools zeigt, dass es in vielen Bereichen einen positiven Beitrag zur Planung des Produktionshochlaufs leistet. Es bietet die Möglichkeit, verschiedene Lösungen auf flexible Art und Weise zu vergleichen und kann die kontinuierliche Verbesserung unterstützen. Verbesserungspotenzial besteht vor allem in der Automatisierung von Lösungsfindungen, aber auch bei der Identifizierung von Störungen eines dynamischen Systems, den nicht zu vernachlässigenden Produktionsbeständen³⁰⁶ und dem damit verbundenen standortinternen Materialfluss.³⁰⁷

³⁰⁶ Vgl. Kapitel 2.1.2.3 „Bestandsmanagement“

³⁰⁷ Vgl. Kapitel 2.1.2.2 „Produktionslogistik“

Conclusio

Diese Arbeit untersucht die Herausforderungen des rasanten Unternehmenswachstums und konzentriert sich dabei auf das Management des Produktionshochlaufs. Im Rahmen dessen werden die Anforderungen an ein Planungsunterstützungstool für den Produktionshochlauf erforscht. Ziel ist es, ein computergestütztes mathematisches Modell zu entwickeln, das dem Management in dieser entscheidenden Phase der Planung unterstützt.

Rasant wachsende Unternehmen müssen sich durch hohe Anpassungsfähigkeit ihrer Produkte und Produktionsvolumina auszeichnen, um langfristig auf dem Wachstumspfad zu bleiben. In dieser Phase sind häufige Herausforderungen die kontinuierliche Anpassung der Produktionskapazitäten, die Bereitstellung einer geeigneten IT-Infrastruktur sowie die Erweiterung der Organisationsstruktur ohne Koordinations- und Kommunikationsverluste. Das Ziel ist es, die Produktionshochlaufzeit kurz und die Investitionskosten niedrig zu halten. Dies wird jedoch durch die Komplexität der Produkte und Produktionsprozesse sowie die Unsicherheit des Marktes stark beeinflusst. Es ist essenziell, dass das Ramp-Up-Management von einem Projektteam durchgeführt wird, das unterschiedliche Standpunkte vertritt und von geeigneten Informationssystemen unterstützt wird.

Die Eigenschaften und Funktionalitäten eines solchen Planungsunterstützungstools hängen von der gewählten Ramp-Up-Strategie ab. Die Auswahl der Strategie wiederum hängt von der Produktvielfalt des Unternehmens, dem Entkopplungsgrad des Produktionssystems, dem Zeitdruck zur Erhöhung des Produktionsvolumens und der Notwendigkeit einer hohen Auslastung ab. Diese Arbeit entwickelt ein Planungsunterstützungstool für einen Industriepartner mit geringer Produktvielfalt und dem Ziel, die Hochlaufzeit kurz zu halten. Da sich der Kundenentkopplungspunkt nahe beim Kunden befindet, stehen die Faktoren Auslastung und Bestand im Vordergrund des Systems. Das System ermittelt Auslastungen, Engpässe und den Mindestbestand eines Produktionssystems bei gegebenen Produktionsvolumina. Es kann bei einer standortübergreifenden Grobplanung des Produktionshochlaufs unterstützen, weist jedoch einige Einschränkungen auf.

Das System berechnet statische quantitative Relationen auf Basis von Mittelwerten, berücksichtigt jedoch nicht das dynamische Verhalten des Produktionssystems. Daher erfordert es eine sorgfältige Überlegung und Abschätzung der Genauigkeit der

Prognosen. Auch verwendet es Wiederbeschaffungszeiten als Grundlage für die Ermittlung der benötigten Bestände, welche in der Realität nicht konstant sind und saisonale Schwankungen aufweisen können, was die Genauigkeit der Prognosen beeinträchtigt. Für den Soll-Ist-Vergleich und die kontinuierliche Verbesserung hin zu einem schlanken Produktionssystem müssen Ist-Daten aus einem anderen Informationssystem wie beispielsweise einem ERP-System gewonnen werden. Diese Datengewinnung kann sich für ein Unternehmen in der Expansionsphase als aufwendig erweisen.

Es besteht weiterhin Forschungsbedarf bei der Entwicklung eines Planungstools, das automatisiert optimale Lösungen ermittelt und in der Lage ist, das dynamische Verhalten des Produktions- und Logistiksystems zu berücksichtigen.

4 Literaturverzeichnis

- Abts, Dietmar (2013): Grundkurs JAVA. Von den Grundlagen bis zu Datenbank- und Netzanwendungen. 7., aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Ahrens, Benjamin (2013): Anlaufmanagement in der Serienfertigung. Leuphana Universität, Lüneburg.
- Altiok, Tayfur (1997): Performance Analysis of Manufacturing Systems. New York, NY: Springer (Springer eBook Collection Mathematics and Statistics).
- Arnold, Dieter; Isermann, Heinz; Kuhn, Axel; Tempelmeier, Horst; Furmans, Kai (2008): Handbuch Logistik. 3., neu bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-/Buch]). Online verfügbar unter http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=015921412&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA.
- Arnolds, Hans; Heege, Franz; Röh, Carsten; Tussing, Werner (2013): Materialwirtschaft und Einkauf. Grundlagen – Spezialthemen – Übungen. 12., aktualisierte und überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Balci, O. (2003): Verification, validation, and certification of modeling and simulation applications.
- Bauer, Jürgen (2017): Produktionscontrolling und -management mit SAP® ERP. Effizientes Controlling, Logistik- und Kostenmanagement moderner Produktionssysteme. 5., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg (IT-Professional).
- Baumgarten, Helmut (Hg.) (2008): Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=016446852&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA.
- Berglund, Martina; Harlin, Ulrika; Säfsten, Kristina: Knowledge gained from product introduction and implications for organizational learning. In: . Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1739102>, zuletzt geprüft am 23.02.2023.

- Bichler, Klaus (2011): Gabler Kompaktlexikon Logistik. 1.900 Begriffe nachschlagen, verstehen, anwenden. 2nd ed. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=747735>.
- Bogusław Śliwczyński (2010): The Reference Model Of Supply Chain Operational Controlling In Value Management. LogForum 6, 1, 3. In: *Electronic Scientific Journal of Logistics*.
- Böhm, Wolfgang (2021): Model-Based Engineering of Collaborative Embedded Systems. Extensions of the SPES Methodology. Unter Mitarbeit von Manfred Broy, Cornel Klein, Klaus Pohl, Bernhard Rumpe und Sebastian Schröck. Cham: Springer International Publishing AG.
- Box, George E. P.; Draper, Norman Richard (1987): Empirical model-building and response surfaces. [7. Dr.]. New York: Wiley (Wiley series in probability and mathematical statistics. Applied probability and statistics).
- Braglia, Marcello; Gabbrielli, Roberto; Marrazzini, Leonardo (2019): Overall Task Effectiveness: a new Lean performance indicator in engineer-to-order environment. In: *International Journal of Productivity and Performance Management* (2), S. 407–422. DOI: 10.1108/IJPPM-05-2018-0192.
- Brooks, Frederick (1975): The Mythical Man Month. Essays on Software Engineering.
- Burghardt, Manfred (Hg.) (2013): Einführung in Projektmanagement. Definition, Planung, Kontrolle, Abschluss. Siemens Aktiengesellschaft. 6., überarb. und erw. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/subhamburg/Doc?id=10769002>.
- Carrillo, Janice E.; Franza, Richard M. (2006): Investing in product development and production capabilities: The crucial linkage between time-to-market and ramp-up time. In: *European Journal of Operational Research* 171 (2), S. 536–556. DOI: 10.1016/j.ejor.2004.08.040.
- Castellano, Davide; Gallo, Mosè; Grassi, Andrea; Santillo, Liberatina C. (2019): Batching decisions in multi-item production systems with learning effect. In: *Computers & Industrial Engineering*, S. 578–591. DOI: 10.1016/j.cie.2018.12.068.
- CHOW, H.; CHOY, K.; LEE, W.; CHAN, F. (2005): Design of a knowledge-based logistics strategy system. In: *Expert Systems with Applications* (2), S. 272–290. DOI: 10.1016/j.eswa.2005.04.001.

- Council of Supply Chain Management Professionals: Definitionen. Online verfügbar unter https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx, zuletzt geprüft am 10.01.2024.
- Denert, Ernst (1991): Software-Engineering. Methodische Projektabwicklung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).
- Doltsinis, Stefanos C.; Ratchev, Svetan; Lohse, Niels (2013): A framework for performance measurement during production ramp-up of assembly stations. In: *European Journal of Operational Research* 229 (1), S. 85–94. DOI: 10.1016/j.ejor.2013.02.051.
- Elfriede Krauth, Hans Moonen, Viara Popova, Martijn Schut (2005): Performance Measurement And Control In Logistics Service Providing.
- Express, American (2022): Zu schnelles Unternehmenswachstum: Diese Anzeichen und Tipps sollten Sie beachten. In: *American Express*, 27.07.2022. Online verfügbar unter <https://www.americanexpress.com/de-de/business/trends-and-insights/articles/zu-schnelles-unternehmenswachstum-anzeichen/>, zuletzt geprüft am 21.06.2023.
- Fojt, Martin (1996): Strategic logistics management. In: *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* (26 (7)), S. 1–61. DOI: 10.1108/09600035199600001.
- Forslund, Helena (2011): The size of a logistics performance measurement system. School of Business and Economics, Linnaeus University, Växjö, Sweden.
- Gleißner, Harald; Femerling, J. Christian (2008): Logistik. Grundlagen — Übungen — Fallbeispiele. Wiesbaden: Gabler (Springer eBook Collection Business and Economics).
- Gözaçan, Nazlıcan; Lafci, Çisem (2020): Evaluation of Key Performance Indicators of Logistics Firms. In: *Logistics & Sustainable Transport* 11 (1), S. 24–32. DOI: 10.2478/jlst-2020-0002.
- Günther, Hans-Otto (Hg.) (2005): Supply Chain Management und Logistik. Optimierung, Simulation, Decision Support ; mit 84 Tabellen. Gesellschaft für Operations-Research. Heidelberg: Physica-Verlag. Online verfügbar unter <http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?application=DIGITOO>

3&owner=resourcediscovery&custom_att_2=simple_viewer&user=GUEST&pid=1505054.

Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst (2009): Produktion und Logistik. 8., überarb. u. erw. Aufl. Dordrecht, Berlin, Heidelberg: Springer.

Heyne, Jean-Christoph (2001): Moderne Organisationskonzepte als Erfolgsfaktoren schnellen Wachstums. Ihre Eignung für schnell wachsende Unternehmen in dynamischen, wettbewerbsintensiven Märkten: Diplomica Verlag GmbH, zuletzt geprüft am 20.06.2023.

Hompel, Michael ten; Schmidt, Thorsten; Nagel, Lars (Hg.) (2007): Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 3., völlig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Intralogistik).

Hosp, Gerald (2001): Marie Luise Kiefer: Medienökonomik. DOI: 10.17192/EP2001.3.2433.

InfraSoft GmbH - Die Profis (2003): Übersicht der UML Diagramme. Unter Mitarbeit von Harald Pichler.

Juerging, Jan; Milling, P. (2006): Interdependencies of product development decisions and the production ramp-up, zuletzt geprüft am 30.06.2023.

Klocke, F.; Stauder, J.; Mattfeld, P.; Müller, J. (2016): Modeling of Manufacturing Technologies During Ramp-up. In: *Procedia CIRP* 51, S. 122–127. DOI: 10.1016/j.procir.2016.05.098.

Koch, Susanne (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Kolinski, Adam; Trojanowska, Justyna; Pajak, Edward (2010): Theory of Constraints as Supporting Element of Logistics Controlling. Poznan School of Logistics; Poznan University of Technology.

Kuhn, Axel; Wiendahl; Schuh, Günther (Hg.) (2002): "Fast ramp up". Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Dortmund: Verl. Praxiswissen.

Kummer, Sebastian; Grün, Oskar; Jammerneegg, Werner (2006): Grundzüge der Beschaffung, Produktion und Logistik: Pearson Studium.

Kunath, Martin; Winkler, Herwig (2018): Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process. In: *Procedia CIRP* 72, S. 225–231. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.192.

- Law, Averill M. (2013): Simulation modeling and analysis. Fifth edition. Dubuque: McGraw-Hill Education (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science).
- Lieberman, Ben (2003): The Rational Edge. The art of modeling Part I: Constructing an analytical framework.
- Lödding, Hermann (2016): Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).
- Ludewig, Jochen; Lichter, Horst (2023): Software Engineering. Grundlagen, Menschen, Prozesse, Techniken. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag.
- Mankiw, Nicholas Gregory (1998): Principles of economics. [Nachdr.]. Fort Worth, Tex.: Dryden Press.
- Mehrabi, M. G.; Ulsoy, A. G.; Koren, Y.; Heytler, P. (2002): Trends and perspectives in flexible and reconfigurable manufacturing systems. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 13 (2), S. 135–146. DOI: 10.1023/A:1014536330551.
- Milling, P. (1974): Der technische Fortschritt beim Produktionsprozeß. Ein dynamisches Modell für innovative Industrieunternehmen: Wiesbaden: Gabler, zuletzt geprüft am 21.06.2023.
- Nyhuis, Peter (2003): Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Unter Mitarbeit von Hans-Peter Wiendahl. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg (VDI-Buch Ser). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6281602>.
- Oberhofer, Albert F.; Engelhardt-Nowitzki, Corinna; Wolfbauer, Jürgen (2005): Gelebtes Netzwerkmanagement. Festschrift für Albert F. Oberhofer zum 80. Geburtstag. 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier.
- Page, Bernd; Kreutzer, Wolfgang (2005): The Java simulation handbook. Simulating discrete event systems with UML and Java. Unter Mitarbeit von Björn Gehlsen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Informatik).
- Pfohl, Hans-Christian (2018): Logistiksysteme. Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 9. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (SpringerLink Bücher).
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und

- Techniken. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=364359>.
- Reinhart, Gunther (Hg.) (2017): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser.
- Rocha, Eugénio M.; Lopes, Maria J. (2022): Bottleneck prediction and data-driven discrete-event simulation for a balanced manufacturing line. In: *Procedia Computer Science* 200, S. 1145–1154. DOI: 10.1016/j.procs.2022.01.314.
- Saaty, Thomas L.; Vargas, Luis G. (2001): Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process: Springer Science and Business Media LLC.
- Sayer, Martin (2013): Leitfaden für die prozeßorientierte Optimierung unternehmensübergreifender Supply Chains am Beispiel eines Logistikdienstleisters. Dissertation. Montanuniversität Leoben. Wirtschafts- und Betriebswissenschaften.
- Schuh, Günther; Desoi, Jens-Christian; Tücks, Gregor (2005): HOLISTIC APPROACH FOR PRODUCTION RAMP-UP IN AUTOMOTIVE INDUSTRY. In: Alan N. Bramley (Hg.): Advances in integrated design and manufacturing in mechanical engineering: Springer.
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2013): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Simchi-Levi, David; Chen, Xin; Bramel, Julien (2005): The logic of logistics. Theory, algorithms, and applications for logistics and supply chain management. 2. ed. New York, NY: Springer (Springer Series in Operations Research).
- Sommerville, Ian (2020): Modernes Software-Engineering. Entwurf und Entwicklung von Softwareprodukten. München: Pearson Deutschland (Studium IT). Online verfügbar unter <https://elibrary.pearson.de/book/99.150005/9783863268923>.
- Statista (2023a): CO2-Ausstoß weltweit nach Sektoren | Statista. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/>, zuletzt aktualisiert am 19.06.2023, zuletzt geprüft am 19.06.2023.
- Statista (2023b): Global plug-in electric light vehicle sales | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/665774/global-sales-of-plug-in-light-vehicles/>, zuletzt aktualisiert am 19.06.2023, zuletzt geprüft am 19.06.2023.

- Statista (2023c): Global venture capital investments in e-mobility start-ups by stage and technology | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/1387929/global-venture-capital-investments-in-e-mobility-start-ups-by-stage-and-technology/>, zuletzt aktualisiert am 19.06.2023, zuletzt geprüft am 19.06.2023.
- Statista (2023d): Worldwide revenue from electric vehicles 2027 | Statista. Online verfügbar unter <https://www.statista.com/statistics/271537/worldwide-revenue-from-electric-vehicles-since-2010/>, zuletzt aktualisiert am 19.06.2023, zuletzt geprüft am 19.06.2023.
- Straube, Frank; Pfohl, Hans-Christian (Hg.) (2008): Trends und Strategien in der Logistik. Globale Netzwerke im Wandel ; Umwelt, Sicherheit, Internationalisierung, Menschen. Bundesvereinigung Logistik. Hamburg: DVV Media Group Dt. Verkehrs-Verl.
- Subhashini Ganapathy; S. Narayanan; and Krishnamurthy Srinivasan (2003): SIMULATION BASED DECISION SUPPORT FOR SUPPLY CHAIN LOGISTICS.
- Surbier, Laurène; Alpan, Gülgün; Blanco, Eric (2014): A comparative study on production ramp-up: state-of-the-art and new challenges, S. 1264–1286. DOI: 10.1080/09537287.2013.817624.
- Tempelmeier, Horst (2005): Material-Logistik. Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen. 6. neubearb. Aufl. Berlin: Springer-Verl.
- Tempelmeier, Horst (Hg.) (2018): Modellierung logistischer Systeme. 1. Aufl. 2018. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Fachwissen Logistik). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1574838>.
- Umweltbundesamt (2023): Anteil des Verkehrs an den Treibhausgasemissionen in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#das-mehr-an-pkw-verkehr-hebt-den-fortschritt-auf->.
- Wagner, Karl Werner; Lindner, Alexandra (2022): WPM - Wertstromorientiertes Prozessmanagement. Effizienz steigern - Verschwendung reduzieren - Abläufe optimieren. 3., überarbeitete Auflage. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG (Hanser eLibrary).
- Wallace, Dolores R.; Fujii, Roger U. (1989): Software verification and validation. Its Role in Computer Assurance and Its Relationship with Software Project

Management Standards, Washington. National Institute of Standards and Technology.

Wannenwetsch, Helmut (2010): Integrierte Materialwirtschaft und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wiklund, Johan; Shepherd, Dean (2003): Aspiring for, and Achieving Growth: The Moderating Role of Resources and Opportunities*. In: *Journal of Management Studies* (40).

Wohlrab, Rebekka; Pelliccione, Patrizio; Knauss, Eric; Larsson, Mats (1993): Boundary Objects and their Use in Agile Systems Engineering. In: *Research in Engineering Design* 5 (1), S. 1–20. DOI: 10.1007/BF01608394.

Wozniakowski, Tomasz; Jalowiecki, Piotr; Zmarzłowski, Krzysztof; Nowakowska, Magdalena (2018): ERP Systems and Warehouse Management by WMS. In: *Information Systems in Management* (7), S. 141–151. DOI: 22630.

Zsifkovits, Helmut E. (2012): Logistik. 1. Aufl. Stuttgart, München: UTB GmbH; UVK Lucius (utb-studi-e-book, 3673). Online verfügbar unter <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838536736>.