



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Diplomarbeit

Entwicklung einer Vorgehensweise für den Einsatz von Sensorsystemen für die Fabrikplanung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirtsch.-Ing. Prof. eh. Dr. h.c. Wilfried Sihn

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

Dr. techn. Thomas Sobottka

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

Jan-Niklas Beicher, M.Sc.

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

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Nikolaus Kremslehner, BSc

01526141 (066 482)

Rooseveltplatz 14/1/7

1090 Wien

Wien, im Oktober 2021

Nikolaus Kremslehner



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

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

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

Wien, im Oktober 2021

Nikolaus Kreamslehner

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit begleitet und unterstützt haben.

Großen Dank möchte ich meinen Betreuern, Jan-Niklas Beicher und Thomas Sobottka, dafür aussprechen, dass sie während der Erstellung meiner Arbeit immer ein offenes Ohr für mich hatten und mit ihrem konstruktiven Feedback mir oft neue Möglichkeiten aufgezeigt haben. Ohne ihren Einsatz und ihre Expertise wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Mein Dank gilt auch meinen Kollegen bei Fraunhofer Austria, von denen ich während meines Masterstudiums viel lernen durfte und die so maßgeblich zu meiner fachlichen und menschlichen Entwicklung beigetragen haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Studienkollegen, die mich durch den Großteil meines Studiums begleitet haben: für die Hilfsbereitschaft in Lerngruppen und Gruppenarbeiten, aber vor allem auch für die Freude, die sie mir selbst in den trockensten Fächern bereitet haben.

Besonders dankbar bin ich aber für die Liebe, die mir durch meine Familie und meine Freundin Laura geschenkt wurde. Sie haben mir auch in den stressigsten Zeiten Rückhalt gegeben und die Sicherheit, dass alles gut wird.

Gender Erklärung

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei beide Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

Kurzfassung

Kürzer werdende Produktlebenszyklen, steigende Variantenvielfalt und zunehmend turbulente Umfeldbedingungen stellen die Produktionsunternehmen heute vor ständig neue Herausforderungen. Um diesen begegnen zu können, müssen Unternehmen auch die Prozesse und Strukturen in ihrer Fabrik immer häufiger anpassen. Etablierte Methoden und Modelle der Fabrikplanung sind allerdings auf ein statisches Umfeld mit geringer Komplexität ausgerichtet. Insbesondere die Datenerfassung stellt einen wesentlichen Teil des Aufwands für Fabrikplanungsprojekte dar. Gerade mittelständische Unternehmen verfügen in der Regel über eine schlechte Datenqualität und können daher nicht in der nötigen Frequenz Fabrikplanungen durchführen.

Allerdings ist mittlerweile ein breites Angebot an intelligenten Sensoren kostengünstig verfügbar, die das Potenzial haben, die Datenverfügbarkeit wesentlich zu erhöhen. Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Vorgehensweise zu entwickeln, anhand der Sensoren zielgerichtet für die Fabrikplanung eingesetzt werden können. Dazu wurden auf Basis der Grundlagenrecherche sowohl die Anforderungen ermittelt, die ein Sensorsystem für die Fabrikplanung erfüllen muss, als auch die technischen Möglichkeiten, die dafür existieren. Dabei wurden Real-Time Locating Systems (RTLS) als geeignetste Technologie identifiziert.

Daher wurde eine Vorgehensweise entwickelt, um ein RTLS effizient für einen abgegrenzten Zeitraum in einer Fabrik einzusetzen und die Daten zu geeigneten Planungsgrundlagen auszuwerten. Die Validierung in einer Versuchsumgebung zeigte, dass auf diese Weise schnell und zuverlässig jene Daten ermittelt werden können, die in der Regel besonders schlecht verfügbar sind. Darüber hinaus konnte eine Vielzahl an Auswertungen durchgeführt werden, die als reproduzierbarer Programmcode jederzeit mit neuen Datensätzen durchgeführt werden können. Diese Auswertungen ermöglichen es, zahlreiche Optimierungspotenziale in den Produktionsprozessen und Strukturen zu erkennen.

Abstract

Shorter product life cycles, increasing number of variants and more and more turbulent environmental conditions are constantly posing new challenges for production companies today. In order to meet these, companies must also adapt the processes and structures in their factory more and more frequently. Established factory planning methods and models, however, are designed for a static environment with low complexity. Data acquisition in particular accounts for a significant part of the time and effort required for factory planning projects. Medium-sized companies usually have poorer data quality and therefore cannot carry out factory planning with the necessary frequency.

However, a wide range of intelligent sensors is now available at low cost, which have the potential to significantly increase data availability. The aim of this work is therefore to develop an approach that allows sensors to be used in a systematic way for factory planning. For this purpose, both the requirements that a sensor system for factory planning must fulfil and the technical possibilities that exist to achieve this were determined on the basis of literature research. Real-Time Locating Systems (RTLS) were identified as the most suitable technology.

Therefore, an approach was developed to use RTLS efficiently for a limited period of time in a factory and to process the data into a suitable planning basis. The validation in a test environment showed that in this way those data can be determined quickly and reliably that are usually particularly poorly available. In addition, a large number of analyses could be carried out, which can be run as reproducible programme code with new data sets at any time. These analyses make it possible to identify numerous optimization potentials in the production processes and structures.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Forschungsfragen und Zielsetzung der Arbeit	2
1.3	Aufbau und Struktur der Arbeit	3
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Anforderungsanalyse Fabrikplanung	5
2.1.1	Definitionen und Grundlagen	5
2.1.2	Planungsvorgehen	12
2.1.3	Grundlagenermittlung	14
2.1.4	Prozessanalyse und -optimierung	18
2.1.5	Datenanforderungen	24
2.1.6	Vorhandene Datenquellen	26
2.2	Analyse der Sensortechnologien	32
2.2.1	Definitionen und Grundlagen	32
2.2.2	Real-Time Locating Systems	35
2.2.3	Automatische Identifikation	40
3	State-of-the-Art	45
3.1	Datenerfassung für die Fabrikplanung	45
3.1.1	Bestehende Lösungsansätze	45
3.1.2	Relevante Publikationen	46
3.2	Einsatz von Sensorsystemen für die Fabrikplanung	51
3.3	Fazit der State-of-the-Art-Recherche	55
4	Vorgehensweise	57
4.1	Bestimmung geeigneter Technologien	57
4.1.1	Datenanforderungen und -verfügbarkeit	57
4.1.2	Vorauswahl der Technologie	61
4.2	Ergänzung durch Kontextinformationen	70
4.2.1	Bedarf an Kontextinformationen	70
4.2.2	Einbindung der Kontextinformationen	71
4.3	Einsatz der Sensoren in der Fabrik	72

4.3.1	Analyse der räumlichen Gegebenheiten	72
4.3.2	Planung der Anbringung der Tags	73
4.3.3	Installation und Initialisierung.....	74
4.3.4	Schulung der Anwender und Datenaufnahme	75
4.3.5	Datenanforderungsliste.....	75
4.4	Nutzung der Sensordaten für die Fabrikplanung	76
4.4.1	Informationsauswertung.....	77
4.4.2	Strukturplanung.....	78
4.4.3	Dimensionierung und Idealplanung.....	79
5	Experimentelle Validierung des Vorgehens	83
5.1	Versuchsdesign.....	83
5.1.1	Anforderungen an den Versuch	83
5.1.2	Versuchsaufbau	85
5.2	Datenaufnahme.....	89
5.2.1	Eingesetzte Sensoren.....	89
5.2.2	Installation und Initialisierung.....	90
5.2.3	Durchführung der Datenaufnahme.....	93
5.3	Verwertung der Sensordaten.....	94
5.3.1	Informationsauswertung.....	94
5.3.2	Strukturplanung.....	97
5.3.3	Dimensionierung	100
5.3.4	Idealplanung	103
6	Auswertung und Resultate	106
6.1	Qualität und Validität der Daten.....	106
6.2	Effizienz der Datenerfassung	108
6.3	Nutzung für die Fabrikplanung	109
7	Diskussion und Ausblick	112
7.1	Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen.....	112
7.2	Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse	115
7.3	Weiterführender Forschungsbedarf	116
7.3.1	Weiterentwicklung für die Fabrikplanung	116
7.3.2	Weitere Einsatzmöglichkeiten für die Produktionsoptimierung	117

7.4	Kritische Würdigung	118
8	Anhang.....	120
8.1	R-Skript zur Datenauswertung	120
9	Literaturverzeichnis	132
10	Abbildungsverzeichnis	139
11	Formelverzeichnis.....	141
12	Tabellenverzeichnis	142
13	Abkürzungsverzeichnis	143

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Problemstellung

Der Begriff Fabrikplanung beschreibt einen systematischen, zielorientierten Prozess zur Planung einer Fabrik und beinhaltet sowohl den Prozess von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion als auch die Planung und Umsetzung späterer Anpassungen im laufenden Betrieb.¹ Allerdings basieren diese Vorgehensweisen häufig noch auf klassischen Planungsprinzipien, die für ein statisches Umfeld mit überschaubarer Komplexität ausgelegt sind.²

Insbesondere in den letzten zwei Jahrzehnten sind die Umfeldbedingungen für Unternehmen jedoch turbulenter geworden, indem sich alle für die Produktion relevanten Parameter wie Produktaufbau, Wettbewerber, Absatzzahlen und verfügbare Technologien sehr schnell, kurz-zyklisch und sprunghaft ändern. Diese Entwicklung macht sich besonders in einer Verkürzung der Produktlebenszyklen bemerkbar. Außerdem ist zu beobachten, dass die Anzahl an Varianten pro Produkt stetig zunimmt.³

Aus der Beschleunigung der Veränderung der Einflussgrößen auf die Fabrik ergeben sich auch neue Herausforderungen für die Fabrikplanung. Genügte es früher diese einmalig zu einem sich zufällig ergebenden Anlass durchzuführen, wird die Fabrikplanung nun zu einer permanenten, interdisziplinären Aufgabe mit dementsprechend höherem Aufwand.⁴ Daraus ergibt sich die Anforderung an die Planungsprozesse schnell, effizient und fehlerfrei zu funktionieren. Dies erfordert eine kontinuierliche Erfassung und Bewertung des Zustandes, um die Notwendigkeit für neue Fabrikkonfigurationen beurteilen zu können.⁵

Dazu müssen die Produkt- und Prozessdaten analysiert werden, um für eine Reorganisation Schwächen und Potenziale des Ist-Zustandes der Fabrik oder für eine Neuplanung Referenzprozesse zu ermitteln. Erfahrungsgemäß kann allein die Datenaufnahme und -analyse bis zu 50% des gesamten Projektaufwands in Anspruch nehmen.⁶

Allerdings ergibt sich durch die stetige Leistungssteigerung von Sensoren bei gleichzeitiger Preisreduktion das Potenzial, eine Vielzahl von Daten automatisiert zu erfassen und so detaillierte und aktuelle Informationen über die Produktion zu

¹ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

² vgl. Pawellek 2014, S. 11.

³ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 8.

⁴ vgl. Pawellek 2014, S. 11.

⁵ vgl. Westkämper und Löffler 2016, 114ff.

⁶ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 450.

gewinnen. So kann neben der Erhöhung der Datenqualität auch der Aufwand für die Datenerhebung reduziert werden.

Es zeigt sich jedoch, dass trotz der Verfügbarkeit preisgünstiger Technologien zur Datenerfassung und -auswertung die Datenqualität besonders in mittelständischen Unternehmen häufig sehr gering ist. Darüber hinaus wird oft keine systematische Vorgehensweise zur Erfassung und Analyse der Daten verfolgt.⁷ Besonders Prozess- und Maschinendaten aus der Produktion werden selten erfasst und noch seltener vollständig aufgezeichnet.^{8, 9}

Es lässt sich somit zusammenfassen, dass Technologien verfügbar sind, um den Aufwand für die Datenaufnahme für die Fabrikplanung zu reduzieren und so kurze Planungszyklen realisieren zu können, welche die steigende Volatilität des Fabrikumfelds verlangt. Allerdings kommen diese Technologien gerade in mittelständischen Unternehmen aktuell noch wenig zum Einsatz.

1.2 Forschungsfragen und Zielsetzung der Arbeit

Aus der skizzierten Problemstellung lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten, die im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden sollen:

1. Welche Anforderungen muss ein Sensorsystem erfüllen, um die Fabrikplanung optimal zu unterstützen?
2. Welche Sensoren sind dafür geeignet, die Fabrikplanung optimal zu unterstützen und wie können diese effizient und zielgerichtet eingesetzt werden?
3. Welche Kontextinformationen sind zur Interpretation der erfassten Rohdaten nötig und wie können diese eingebunden werden?
4. Welcher Nutzen ergibt sich durch den Einsatz des Sensorsystems für die Fabrikplanung und weitere Produktionsoptimierungen?
5. Welche Rolle kann sensorbasierte Datenerfassung für die Fabrikplanung spielen, im Verhältnis zu anderen verfügbaren Datenquellen?

Ziel dieser Arbeit ist die Beantwortung der Forschungsfragen, indem eine Vorgehensweise entwickelt wird, mit der Sensorensysteme gezielt für die Erfassung von Prozessdaten im Rahmen der Fabrikplanung eingesetzt werden können. Dazu sollen die sich daraus ergebenden Anforderungen an ein Sensorsystem ermittelt und nötige ergänzende Informationsquellen bestimmt werden. Darauf aufbauend soll definiert werden, wie die Sensorik im Rahmen einer Fabrikplanung eingesetzt werden kann und

⁷ vgl. Bischoff et al. 2015, S. 75–82.

⁸ vgl. Lichtblau et al. 2015, S. 37.

⁹ vgl. Bischoff et al. 2015, 237f.

in welchem Umfang und an welchen Stellen in der Fabrik dafür die Sensoren eingesetzt werden müssen.

Schließlich soll die entwickelte Vorgehensweise anhand eines Versuchsaufbaus, der die für den Anwendungsfall wesentlichen Elemente einer Fabrik aufweist, validiert werden.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Im ersten Schritt sollen durch eine Recherche relevanter Fachliteratur die grundlegenden Konzepte und Methoden der Fabrikplanung aufbereitet werden, um die daraus folgenden Anforderungen an die Datenerfassung zu definieren. Außerdem werden durch eine weitere Literaturrecherche die Eigenschaften und Möglichkeiten in Frage kommender Sensortechnologien ermittelt. Durch die Aufbereitung der methodischen und technologischen Grundlagen sollen sowohl die Anforderungen der Fabrikplanung dargelegt werden als auch die technologischen Möglichkeiten, diese zu erfüllen.

Um ein besseres Bild über die Ausgangssituation zu gewinnen und Einsatzmöglichkeiten und Schwächen bestehender Lösungen zu identifizieren, wird in weiterer Folge der Stand der Wissenschaft und Technik der Datenerfassung für die Fabrikplanung und des Einsatzes von Sensorsystemen mithilfe einer systematischen Literaturrecherche beschrieben.

Basierend auf diesen Vorarbeiten kann anschließend eine Vorgehensweise für den Einsatz von Sensorsystemen in der Fabrikplanung entwickelt werden. Dazu werden zunächst die in der Grundlagenrecherche ermittelten Anforderungen an ein Sensorsystem mit den gefundenen technischen Lösungen verglichen, um geeignete Technologien zu identifizieren und ggf. eine bestehende Forschungslücke auszumachen. Außerdem soll basierend auf diesem Vergleich bestimmt werden, welche Kontextinformationen nötig sind, um die Rohdaten der Sensoren für die Fabrikplanung nutzbar zu machen.

Aus diesen Betrachtungen soll wiederum abgeleitet werden, wie die Daten, die mithilfe der identifizierten Technologien erfasst werden können, im Fabrikplanungsprozess zum Einsatz kommen sollen und an welchen Stellen in der Fabrik und in welchem Umfang die Sensoren dafür eingesetzt werden müssen.

Im nächsten Schritt wird die entwickelte Vorgehensweise validiert, indem sie an einem geeigneten Versuchsaufbau umgesetzt wird. Dazu werden als erstes die Anforderungen an den Versuch definiert, um zu bestimmen, welche Eigenschaften einer realen Fabrik das Modell abbilden soll. Anhand dieser Anforderungen wird das Modell aufgebaut und beschrieben, wie der physische Aufbau gestaltet ist und welche

simulierten Produktionsabläufe darin stattfinden. Nach der Durchführung des Versuchs werden die erfassten Daten der entwickelten Vorgehensweise folgend mithilfe geeigneter Kontextinformationen zu einem für die Fabrikplanung verwertbaren Ergebnis aufbereitet.

Schließlich werden die Ergebnisse des Experiments im Hinblick auf die Qualität und Validität der erfassten Daten, die Effizienz der Datenerfassung und den für die Fabrikplanung generierten Mehrwert ausgewertet. Abschließend werden die Ergebnisse und die Einschränkungen der gewählten Methodik noch diskutiert. Außerdem sollen die Einsatzmöglichkeiten der gefundenen Lösung in Bezug auf weitere Produktionsoptimierungen diskutiert und weiterer Forschungsbedarf abgeleitet werden.

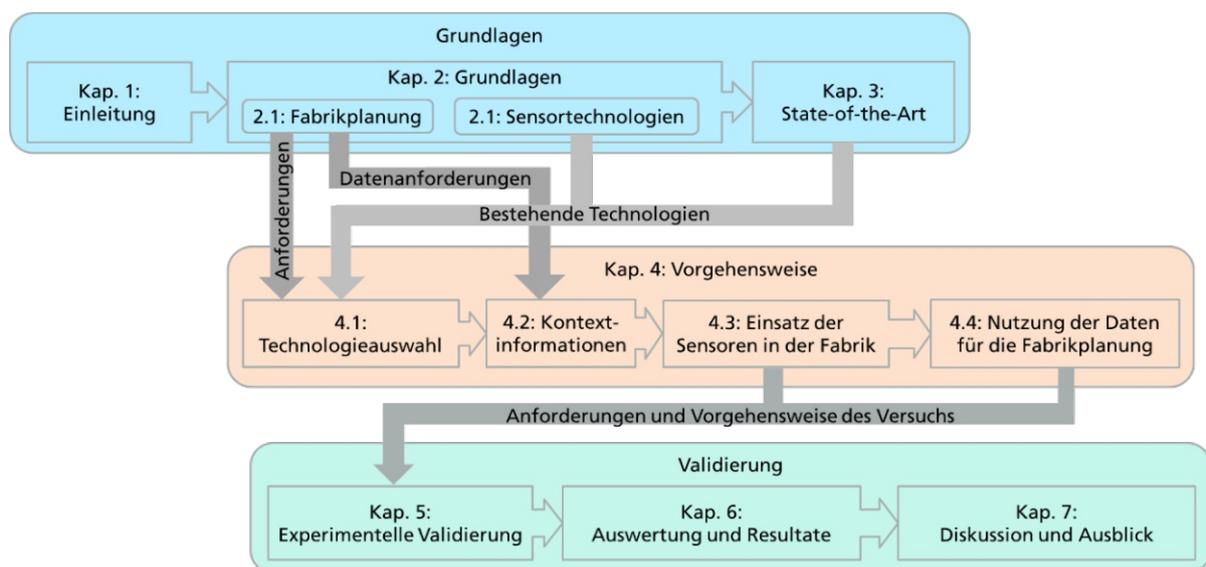


Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen beschrieben, deren Kenntnis für die Konzeption eines Sensorsystems für den Einsatz in der Fabrikplanung notwendig ist. Dafür werden einerseits die grundlegenden Definitionen und Konzepte der Fabrikplanung beschrieben, um daraus Anforderungen an die Datengenerierung abzuleiten. Andererseits werden die Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten bestehender Sensortechnologien recherchiert, um geeignete Technologien zu identifizieren.

2.1 Anforderungsanalyse Fabrikplanung

2.1.1 Definitionen und Grundlagen

Im Folgenden sollen die wesentlichen Definitionen, Ziele und Konzepte der Fabrikplanung erläutert werden, um ein grundlegendes Verständnis über den Betrachtungsbereich dieser Arbeit zu vermitteln.

Fabrik

Der Begriff Fabrik wird vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert, als

„Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren stattfindet.“¹⁰

Die Fabrik lässt sich ergänzend auch als System beschreiben, innerhalb dessen verschiedene Elemente in ihrem Zusammenwirken eine Leistung bzw. ein Produkt erzeugen. Diese Elemente umfassen Arbeits- und Betriebsmittel, menschliche Arbeitsleistung und Werkstoffe, die mithilfe von Anweisungen und Regeln zu einem Produktionsprozess kombiniert werden. Aus der Kombination dieser Faktoren entstehen die Material-, Informations- und Energieflüsse, aus denen die betriebliche Leistung resultiert.¹¹

Etwas detaillierter kann eine Fabrik auch definiert werden als örtlich fixierte, funktionelle, technische und räumliche Wirkungsstätte der Produktion, in der Produkte unterschiedlicher oder gleicher Größe, Art und Menge hergestellt, wiederhergestellt oder verwertet werden. Dies geschieht mit naturwissenschaftlichen Wirkprinzipien, technologischen Verfahren und Methoden durch wertschöpfende technische und menschliche Arbeit sowie durch Material-, Betriebsmittel-, Energie- und Informationseinsatz.¹²

¹⁰ VDI 5200-1:2011-02.

¹¹ vgl. Pawellek 2014, 2f.

¹² vgl. Helbing 2018, S. 3.

Planung

Im Rahmen einer Planung wird ein angestrebtes Ergebnis einschließlich der zur Erreichung erforderlichen Handlungsfolge gedanklich vorweggenommen. Die dafür notwendigen Entscheidungen müssen dabei in befristeter Zeit unter Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussfaktoren vorbereitet werden.¹³

Fabrikplanung

Fabrikplanung beschreibt den systematischen, zielorientierten, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierten Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion. Die dabei anfallenden Aufgaben werden unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen in Form von Projekten im Team bearbeitet.¹⁴ Die Fabrikplanung betrachtet im Rahmen eines kreativen Prozesses alle Planungsphasen und -strukturen des Fabriklebenszyklus und schließt auch die permanente Anpassung bei Veränderungen in der Planung der Fabrik und des Fabrikbetriebes mit ein.¹⁵

Planungsfälle

Fabrikplanungsprojekte lassen sich in fünf Grundfälle gliedern, die durch unterschiedlichen Aufgabencharakter, Problemumfang, Schwierigkeitsgrad sowie spezielle Lösungskonzepte und Inhalte der Planungsmethodik gekennzeichnet sind:

- a) Neubau eines Industriebetriebs auf der „grünen Wiese“: Dieser Planungsfall benötigt einen hohen zeitlich-inhaltlichen Planungsvorlauf und umfasst im Gegensatz zu den anderen Grundfällen sowohl die Bestimmung eines optimalen Standorts als auch die Generalbebauungsplanung. Die hohen Freiheitsgrade im Gestaltungsprozess ermöglichen die Erzielung optimaler Prozesslösungen. Dieser Grundfall ist zwar im Vergleich zu Umplanungen bestehender Betriebe relativ selten, wird aber durch die zunehmende Globalisierung von Märkten und Standorten häufiger.
- b) Umgestaltung eines bestehenden Industriebetriebs: Hierbei handelt es sich um den mit Abstand häufigsten Planungsfall, der oftmals sogar eine betriebliche Daueraufgabe darstellt („rollende Fabrikplanung“, siehe aktuelle Entwicklungstendenzen). Ziel ist es, die bestehenden Fertigungskomplexe durch Rationalisierung und Modernisierung an Änderungen im Produktionsprogramm oder kostenwirksame Prozess- und Anlageninnovationen anzupassen. Dementsprechend sind im Allgemeinen auch relativ genaue Vorgaben zum Produktionsprogramm und dessen zeitlicher Entwicklung möglich.

¹³ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

¹⁴ vgl. ebenda

¹⁵ vgl. Schenk et al. 2014, S. 28.

- c) Erweiterung eines bestehenden Industriebetriebs: Dieser Grundfall hat die Schaffung zusätzlicher Produktionskapazitäten zum Ziel, um beispielsweise die Abdeckung eines Auftragswachstums zu ermöglichen. Mit dieser Erweiterung gehen oftmals auch eine Modernisierung und Rationalisierung der zu erweiternden Prozesse einher. Die zusätzlichen Kapazitäten werden zumeist durch eine Intensivierung der Flächen- und Raumnutzung am bestehenden Standort erreicht, andernfalls ist eine Standortbestimmung und Generalbebauungsplanung für den Neuaufbau der Zusatzkapazitäten nötig.
- d) Rückbau von Industriebetrieben: Bei diesem Grundfall kommt es zu einer Neudimensionierung der Kapazitäten und Strukturen der Produktions- und Nebengebäude. Dies ist im Regelfall die Folge von Umsatzrückgängen, des Abbaus der Fertigungstiefe, der Auslagerung von Produktionsstufen oder der Konzentration auf Kernprodukte. Dieser Grundfall beinhaltet die Neudimensionierung von Produktions- und Logistikausrüstungen sowie die Neustrukturierung der Organisationslösungen der Fertigungskomplexe.
- e) Revitalisierung von Industriebetrieben: Hierbei wird ein stillgelegter Industriebetrieb einer neuen industriellen Nutzung zugeführt. Dies beinhaltet eine Sanierung der bestehenden Flächen- und Raumstrukturen und ermöglicht die Erzielung optimaler Prozesslösungen dank hoher Freiheitsgrade.¹⁶

Planungsinhalt

Die Aufgabeninhalte der Fabrikplanung umfassen im Allgemeinen die Planung von Strategien, Strukturen und Systemen der Fabrik. Stets Bestandteil der Fabrikplanung sind dabei die Erfassung der Produktstruktur, die Verteilung der Wertschöpfung im Produktionsnetz, Fertigungs- und Materialflussprozesse am Produktionsstandort sowie deren Ver- und Entsorgung.¹⁷

Etwas detaillierter betrachtet, können sich Fabrikplanungsprojekte über die folgenden vier Planungsbereiche erstrecken:¹⁸

- Ziele: In diesem Bereich werden aus der Unternehmensstrategie eine Produktions- und Standortstrategie abgeleitet und die Rahmenbedingungen und Zielsetzungen für die weitere Planung festgelegt.
- Standort: Inhalt dieses Bereichs ist die Suche, Bewertung und Auswahl eines geografischen Orts für die Fabrik bzw. den Teilbereich der Fabrik.
- Externe Logistik: Dieser Bereich umfasst die Anbindung der Fabrik an externe Logistiknetze bis hin zur Gesamtplanung der Logistik des Produktionsnetzes.
- Fabrik und Produktionslogistik: Hierbei handelt es sich um die Planung der Fabrik im engeren Sinn samt aller der Produktion zugehörigen Funktionen und

¹⁶ vgl. Grundig 2018, 17ff.

¹⁷ vgl. Pawellek 2014, S. 18.

¹⁸ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

Hilfsfunktionen. Ebenso eingeschlossen ist die Planung der Werkstruktur und die Anbindung des Werks an externe Infrastruktur.

Außerdem können die Inhalte der Fabrikplanung einer oder mehrerer der folgenden fünf Planungsebenen zugeordnet sein:¹⁹

- Arbeitsplatz: Elementarer Produktionsbereich einschließlich Betriebsmittel und Nebeneinrichtungen.
- Segment: Geschlossener Produktionsbereich aus mehreren Arbeitsplätzen mit definierten Produktionsaufgaben.
- Gebäude: Architektonisch-räumlich abgeschlossener Produktionsbereich mit definierten, aber nicht unbedingt abgeschlossenen Produktionsaufgaben, der mehrere Segmente enthalten kann.
- Werk: Örtlich-räumlich abgeschlossener Produktionsbereich an einem Standort, der aus mehreren Gebäuden, internen Wegnetzen und der Anbindung an externe Infrastruktur bestehen kann.
- Produktionsnetz: Konfigurierter Verbund von mehreren Standorten eines oder mehrerer Unternehmen.

Der Inhalt einer Fabrikplanungsaufgabe ist somit durch den jeweiligen Planungsbereich und die jeweilige Planungsebene sowie die Planungstiefe von „grob“ bis „fein“ bestimmt. Die verschiedenen Planungsbereiche und Ebenen sind in Abbildung 2 dargestellt.

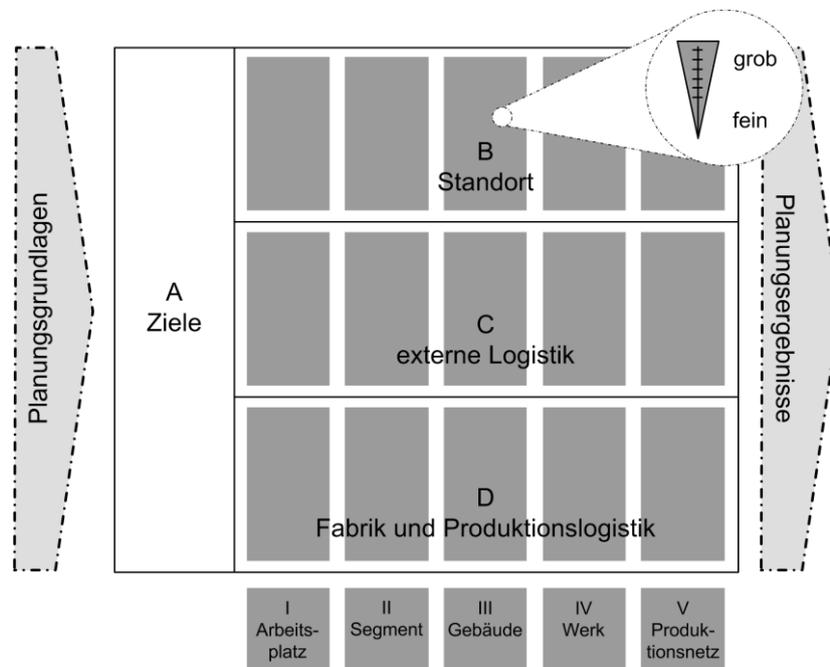


Abbildung 2: Planungsbereiche und -ebenen²⁰

¹⁹ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

²⁰ ebenda.

Ziele der Fabrikplanung

Die Zielsetzungen für eine Fabrik können in drei wesentliche Zielfelder zusammengefasst werden:²¹

- **Wirtschaftlichkeit:** Mithilfe eines logistikgerechten Produktions- und Materialflusses sowie bestmöglicher Ressourcenausnutzung soll die Herstellung der Produkte bei minimalen Durchlaufzeiten und Beständen termin- und qualitätsgerecht unter weitgehender Vermeidung nicht wertschöpfender Tätigkeiten erfolgen.
- **Flexibilität und Wandlungsfähigkeit:** Um permanente Anpassungsfähigkeit zu sichern, sind die Strukturen, Ressourcen und Prozesse an die Turbulenz äußerer und innerer Einflüsse flexibel und wandlungsfähig auszulegen.
- **Attraktivität:** Diese kann gesichert werden durch motivierende Arbeits-, Entlohnungs- und Sozialbedingungen, die Gewährleistung geringer Umweltbelastungen und eine ästhetische Industriearchitektur.
- **Energie- und Ressourceneffizienz:** Diese Aspekte gewinnen durch aktuelle Entwicklungen zunehmend an Bedeutung und haben sich so als eigenes Zielfeld etabliert.

Eine weitere, ganzheitlichere Einteilung möglicher Fabrikziele unterscheidet in funktionelle, menschliche, betriebswirtschaftliche, volkswirtschaftliche und gesellschaftliche Zielaspekte.²²

Aktuelle Entwicklungstendenzen

Aus einer Vielzahl unterschiedlicher Einflüsse auf moderne Produktionen ergeben sich auch neue Herausforderungen an die Fabrikplanung. Diese haben ihren Ursprung in technischen Innovationen, wie neuen Informations- und Kommunikationstechnologien, erhöhten Kundenanforderungen, insbesondere nach individualisierten Produkten und gesamtgesellschaftlichen Veränderungen, die sich z. B. aus zunehmenden Anforderungen an die Umweltverträglichkeit oder dem demografischen Wandel ergeben.²³ Die folgende Abbildung stellt eine Übersicht dieser Einflüsse dar:

²¹ vgl. Grundig 2018, S. 12.

²² vgl. Pawellek 2014, S. 26.

²³ vgl. Schenk et al. 2014, S. 14.

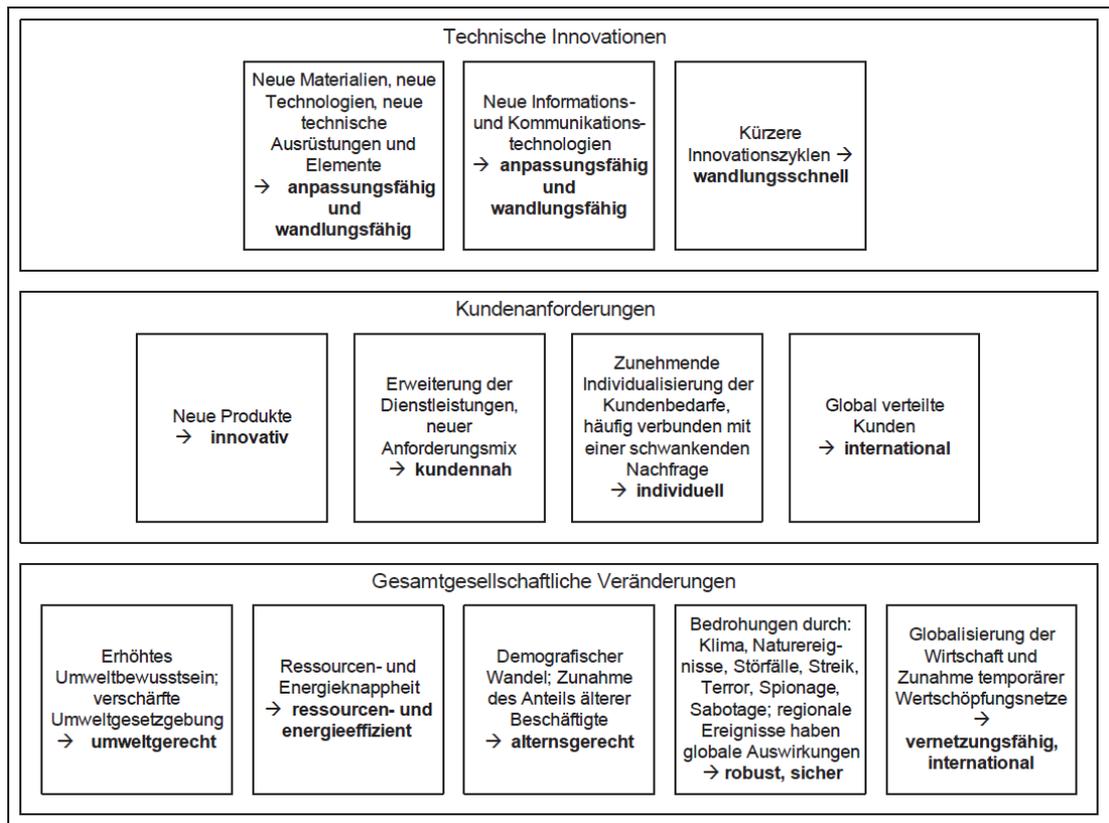


Abbildung 3: Einflüsse auf die Fabrikplanung²⁴

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen haben sich neue Entwicklungstendenzen herausgebildet, von denen einige hier kurz vorgestellt werden sollen:

- **Wandlungsfähige Fabrik:** Die zunehmende Dynamik und Turbulenz von Märkten, Produkten und Technologien stellen höhere Anforderungen an die Anpassungsfähigkeit von Fabriken. Dementsprechend kommt der Fabrikplanung die Aufgabe zu, bereits im Planungsprozess proaktiv die nötige Wandlungsfähigkeit zu implementieren.²⁵ Der Begriff Wandlungsfähigkeit beschreibt das Potenzial, schnelle Anpassungen mit geringem Investitionsaufwand auch jenseits vorgehaltener Korridore umsetzen zu können. Im Gegensatz dazu wird mit Flexibilität die Möglichkeit zur Veränderung innerhalb der vorgehaltenen Korridore verstanden.²⁶ Flexibilität umfasst somit Veränderungsfähigkeiten, die auf den Grundstrukturen der bestehenden Fabrik beruhen, wie z. B. Kapazitätsausweitung, Rekonfigurierbarkeit und begrenzte Eingriffe in Materialflusststrukturen. Wandlungsfähigkeit hingegen umfasst die Gesamtheit und Komplexität vernetzter Prozess- und Gebäudestrukturen.²⁷ Für die Realisierung einer wandlungsfähigen Fabrik muss diese die wandlungsbefähigenden

²⁴ Schenk et al. 2014, S. 14.

²⁵ vgl. Grundig 2018, 30f.

²⁶ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 121.

²⁷ vgl. Grundig 2018, S. 31.

Eigenschaften Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität aufweisen.²⁸ In Abbildung 4 ist das Zusammenspiel von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit grafisch dargestellt.

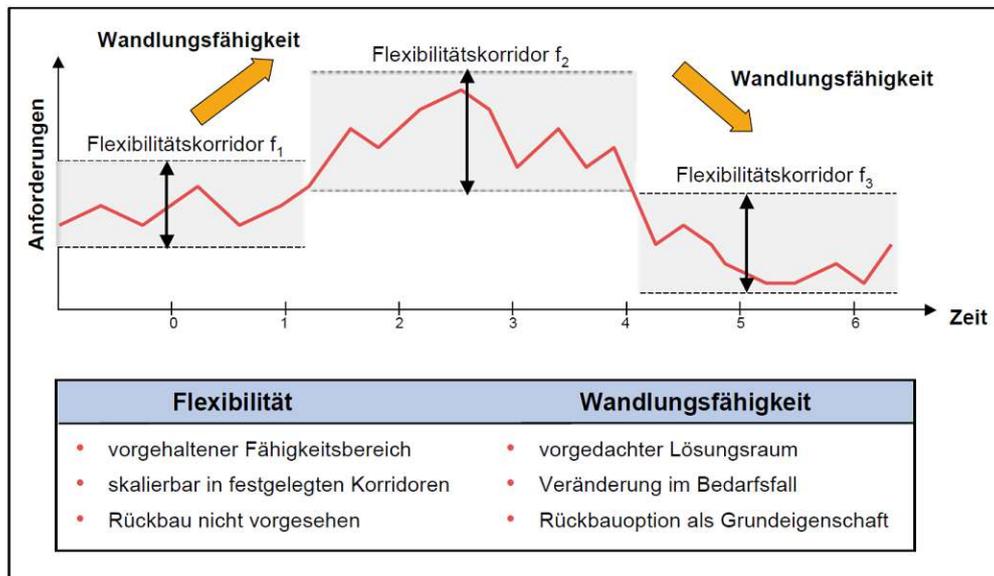


Abbildung 4: Gegenüberstellung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit²⁹

- Digitale Fabrik: Die Erhöhten Anforderungen an die Planung und den Betrieb von Fabriken durch u.a. kürzere Planungsintervalle und höhere Variantenvielfalt erfordern den Einsatz neuer informationstechnischer Werkzeuge. Ein solches Werkzeug ist die Digitale Fabrik.³⁰ Diese beschreibt einen Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Die Digitale Fabrik soll eine mit allen Unternehmensprozessen frühzeitig und sorgfältig abgestimmte Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik ermöglichen.³¹ Dies soll durch die Schaffung eines virtuellen Abbildes einer Fabrik erreicht werden, das eine durchgängige Visualisierung und Simulation der Strukturen und Prozesse ermöglicht und diese mithilfe realer Planungsdaten unabhängig von einem realen System digital darstell- und veränderbar macht. Somit dienen Systeme der Digitalen Fabrik in der Regel dem Testen der erarbeiteten Lösungen und als Kommunikationsplattform für das Projektteam.³²
- Globale Fabrikplanung: Durch die Tendenzen zur internationalen Vernetzung von Produktions- und Logistikprozessen sowie zunehmend marktnahen Produktionsstandorten nimmt die Bedeutung von Fabrikplanungsprojekten für international verteilte Standorte unterschiedlicher Kulturen zu. Diese erfordern

²⁸ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 126.

²⁹ ebenda, S. 121.

³⁰ vgl. Grundig 2018, S. 29.

³¹ vgl. VDI 4499-1:2008-02.

³² vgl. Grundig 2018, S. 29.

die Einbindung in das bestehende Produktions- und Logistiknetzwerk sowie die Berücksichtigung kultureller, sozialer und/oder klimatischer Unterschiede.³³

- **Fraktale Fabrik:** Dieser Ansatz versucht die steigende Komplexität und Dynamik industrieller Produktion gezielt in Wettbewerbsvorteile umzusetzen. Eine Fraktale Fabrik wird aus der Zusammenfassung selbstständig agierender und netzartig, flexibel kooperierender Unternehmenseinheiten, sogenannter Fraktale, gebildet. Daraus ergeben sich ganzheitlich offene, vitale Systeme, die selbstoptimierend hinsichtlich Ablaufgestaltung und Zielerreichung sind.³⁴
- **Rollende Fabrikplanung:** Die zunehmende Geschwindigkeit der Veränderung der Einflussgrößen auf das Fabrikssystem erfordert eine ständige, reaktionsschnelle, agile Anpassungsfähigkeit von Unternehmens- und Fabrikstrukturen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, eine Fabrikplanung nicht nur einmalig zu einem sich zufällig ergebenden Anlass durchzuführen, sondern diese als permanente, interdisziplinäre Aufgabe zu betrachten.³⁵ Durch rollende Fabrikplanung kann mittels permanenter Anpassung der Fabrikanlage an die aktuellen Produktionserfordernisse eine wirtschaftliche Produktion gesichert werden.³⁶

2.1.2 Planungsvorgehen

Die Anforderungen an den Fabrikplanungsprozess sind von verschiedenen Faktoren abhängig, wie dem Anlass, dem Betrachtungsbereich oder den organisatorischen Rahmenbedingungen und können sich somit von Projekt zu Projekt wesentlich unterscheiden. Es lassen sich dennoch grundsätzliche Planungsphasen bestimmen, die je nach Projekt mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad durchlaufen werden müssen.³⁷ Diese enthalten definierte Planungsinhalte, wobei die nachfolgende Planungsphase in der Regel auf den Ergebnissen der vorhergehenden Phase aufbaut und diese konkretisiert. In der Fachliteratur wurden unterschiedliche Fabrikplanungsabläufe vorgestellt, die sich hinsichtlich Anzahl, Benennung und Detaillierung der einzelnen Phasen unterscheiden. Es hat sich jedoch hinsichtlich des planungsmethodischen Vorgehens eine verallgemeinerungsfähige Systematik herausgebildet.³⁸

Der VDI hat unter Mitwirkung der fachlich einschlägigen Institute aus Wissenschaft und angewandter Forschung sowie mehrerer namhafter Planungsbüros folgende sieben

³³ vgl. Grundig 2018, 27f.

³⁴ vgl. ebenda, S. 33.

³⁵ vgl. Pawellek 2014, S. 11.

³⁶ vgl. Grundig 2018, S. 22.

³⁷ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 427.

³⁸ vgl. Grundig 2018, S. 37.

Phasen der Fabrikplanung definiert, wobei je nach Planungsinhalt und -tiefe ggf. nur ein Teil der Phasen durchlaufen wird:³⁹

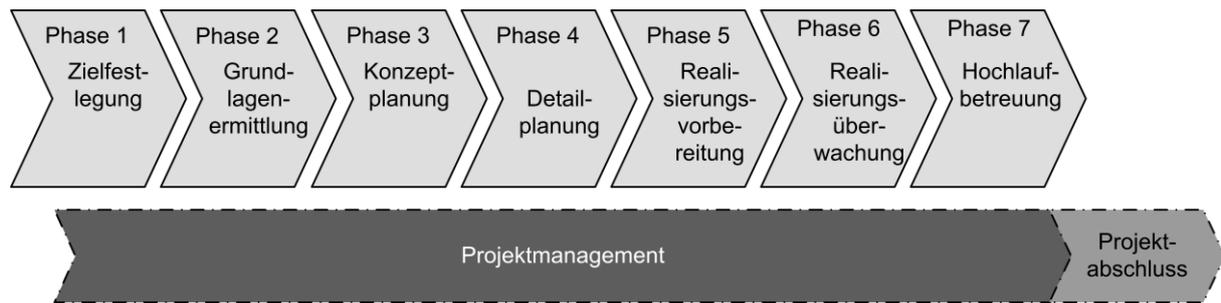


Abbildung 5: Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses⁴⁰

1. **Zielfestlegung:** Der Zweck dieser Phase ist es, die fabrikplanerische Aufgabenstellung zu klären und das Planungsobjekt zu strukturieren, um eine zielgerichtete Abarbeitung des Projekts und eine Bewertung des Planungsergebnisses zu ermöglichen. Dazu ist es nötig, vier Schritte sequenziell und zum Teil iterativ zu durchlaufen:
 - a. Analyse der Unternehmensziele und Rahmenbedingungen,
 - b. Festlegung der Fabrik- und Projektziele,
 - c. Aufstellung der Bewertungskriterien,
 - d. Festlegung der Arbeitspakete.
2. **Grundlagenermittlung:** Ziel der Grundlagenermittlung ist es, die notwendigen Daten und Informationen für alle weiteren Planungsschritte zu erfassen und zu analysieren. Dadurch können Schwächen und Potenziale der bestehenden Fabrik sowie Referenzprozesse einer neu zu planenden Fabrik ermittelt werden.⁴¹ Dafür sind folgende Schritte nötig:
 - a. Informationsbeschaffung,
 - b. Informationsauswertung.
3. **Konzeptplanung:** In der Konzeptplanung wird basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenermittlung ein Fabrikkonzept entworfen, das den festgelegten Zielen bestmöglich genügt. Dabei werden folgende Schritte durchlaufen:
 - a. In der *Strukturplanung* werden die funktionalen und organisatorischen Einheiten der Fabrik mit ihren wechselseitigen Beziehungen festgelegt.
 - b. Die *Dimensionierung* dient der Auslegung der Ressourcen, des Logistikkonzepts der Fabrik und der Erstellung eines flächenmaßstäblichen Funktionsschemas.
 - c. In der *Idealplanung* werden Layoutvarianten entworfen, die den Fabrikzielen sowie den Anforderungen des Kommunikations- und

³⁹ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

⁴⁰ VDI 5200-1:2011-02.

⁴¹ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 450.

Logistikkonzepts optimal entsprechen, aber keine Restriktionen berücksichtigen.

- d. Die *Realplanung* hat zum Ziel, realisierbare Layoutvarianten unter Einbeziehung von Restriktionen zu entwerfen und zu bewerten.
- 4. Detailplanung:** In dieser Phase wird das in der Realplanung ausgewählte Fabrikkonzept zu einem Feinlayout mit den zugehörigen Gebäudeplänen und Kostenberechnungen ausgeplant. Außerdem werden Lastenhefte für die Betriebsmittel und die erforderlichen behördlichen Genehmigungsanträge erstellt. Dabei werden die folgenden drei Schritte durchlaufen:
 - a. Feinplanung,
 - b. Erstellung von Genehmigungsanträgen,
 - c. Erstellung der Leistungsbeschreibung.
 - 5. Realisierungsvorbereitung:** Die Realisierungsvorbereitung umfasst zum einen die Umsetzungsplanung, bei der die Maßnahmen für den Umstieg zur neuen Fabrik geplant werden, zum anderen erfolgt parallel dazu die Vergabe an die Lieferanten in folgenden Schritten:
 - a. Angebotseinholung,
 - b. Vergabe,
 - c. Überwachung der Ausführungsplanung.
 - 6. Realisierungsüberwachung:** Diese Phase dient der Sicherstellung und Dokumentation der ordnungsgemäßen Ausführung der Gebäude und Betriebsmittel zur Einhaltung der vereinbarten Qualitätsstandards. Dazu werden zwei Schritte sequenziell durchlaufen:
 - a. Koordination, Überwachung und Dokumentation der Realisierung,
 - b. Abschlussdokumentation.
 - 7. Hochlaufbetreuung:** Ziel dieser Phase ist die Inbetriebnahme und das Hochfahren der Fabrik, bis zu ihrer angestrebten Leistungsfähigkeit und die anschließende Bewertung der Erfüllung der Fabrikziele. Dementsprechend werden dabei folgende Phasen durchlaufen:
 - a. An- und Hochlaufbetreuung,
 - b. Bewertung der Fabrik.

2.1.3 Grundlagenermittlung

Die Erhebung und Analyse der für die Fabrikplanung notwendigen Daten geschieht im Zuge der Grundlagenermittlung, weshalb die Ziele und Methoden dieser Planungsphase hier näher beschrieben werden sollen.

Das primäre Ziel der Grundlagenermittlung ist die Schaffung einer geeigneten Datenbasis für die Fabrikplanung. Dazu wird die bestehende Fabrikstruktur hinsichtlich ihrer Planungselemente systematisch analysiert, um Schwachstellen zu ermitteln, die

als Grundlage für die Konzeption der neuen Fabrikstruktur dienen.⁴² Die in dieser Phase erarbeiteten Planungsgrundlagen bestimmen maßgeblich die Qualität der in den folgenden Phasen ermittelten Lösungen.⁴³

Im ersten Schritt müssen die Untersuchungsbereiche der Analyse ausgewählt werden, um anschließend den Untersuchungsaufwand und die Methoden zur Datenerfassung und -auswertung festzulegen. Als Untersuchungsbereiche können beispielhaft Erzeugnisstrukturen, Ausrüstungen, Bearbeitungsabläufe oder Informationssysteme genannt werden, wobei der Analyse der Flusssysteme häufig das größte Interesse zukommt. Denn die Sicherung eines störungsfreien, stau- und lagerarmen Materialflusses mit kurzen Durchlaufzeiten bei hochflexibler Auftragsumsetzung ist eine Kernaufgabe moderner Fabrikplanung.

Für die ausgewählten Untersuchungsbereiche wird der Untersuchungsaufwand so festgelegt, dass sowohl ein genügender Detaillierungsgrad als auch ein vertretbarer Personal- und Zeitaufwand erzielt werden kann. Der Zeitraum der Untersuchung hängt dabei vor allem von der vorliegenden Datenqualität und -verfügbarkeit ab. Müssen die Daten erst noch erhoben werden, ist ein größerer Zeitraum nötig, um genügend Daten für ein repräsentatives Abbild der Fabrik zu erheben. Bei der Datenerfassung kommen sowohl direkte Methoden, bei denen die Daten im laufenden Betrieb, z. B. durch Messungen oder Befragungen erhoben werden, als auch indirekte Methoden, bei denen vorhandene Unterlagen und Datenträger ausgewertet werden, zur Anwendung. Letztere sind im Allgemeinen zwar weniger aufwendig, setzen aber eine ausreichende Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Aktualität der vorhandenen Daten voraus.⁴⁴

Die Datenermittlung stützt sich auf die drei Säulen Produktdaten, Produktionsdaten und Immobiliendaten.⁴⁵ Diese werden mithilfe verschiedener Methoden und Hilfsmittel analysiert, sodass sie als Grundlage für die weiteren Planungsphasen eingesetzt werden können.^{46, 47}

Die *Produkte* werden hinsichtlich der Produkt- und Teilevielfalt und der Kundenentkopplungspunkte untersucht. Außerdem werden die erforderlichen Stückzahlen der Produkte und deren Schwankungen anhand des Produktionsprogramms erhoben. In der Varianten- und Einzelfertigung ist es in der Regel aufgrund der großen Anzahl an Produkten nicht möglich, jedes Produkt einzeln zu analysieren. In diesem Fall müssen

⁴² vgl. Pawellek 2014, S. 167.

⁴³ vgl. Grundig 2018, S. 56.

⁴⁴ vgl. ebenda, S. 57ff.

⁴⁵ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

⁴⁶ vgl. Pawellek 2014, S. 169.

⁴⁷ vgl. Grundig 2018, S. 60.

die Produkte zuerst zu Produktfamilien zusammengefasst werden. Folgende Methoden können zur Analyse der Produktdaten eingesetzt werden:^{48, 49}

- ABC-Analyse: Produkte werden nach einem gewissen Merkmal (z. B. Kosten oder Umsatz) geordnet und in einer Summenkurve dargestellt. Dies ermöglicht eine Klassifizierung der Produkte ihrer Bedeutung nach. Abbildung 6 zeigt eine ABC-Analyse für den Lagerbelastungswert.
- XYZ-Analyse: In Ergänzung zur ABC-Analyse können die Produkte zusätzlich nach qualitativen Merkmalen, wie der Schwankung des Bedarfs unterteilt werden.
- PQ-Analyse (Produkt-Quantum-Analyse): Diese Analyse stellt das Produktionsprogramm vergleichend über verschiedene Faktoren, wie Umsatz, Gewinn, Herstellungskosten oder Durchlaufzeiten dar, woraus Konsequenzen auf die Produktpolitik abgeleitet werden können.
- Wertanalysen: Die Erfassung der Wertstrukturen der Produkte dient der Konzentration der Produktion auf wirtschaftliche Programmstrukturen.
- Produktfamilienbildung: Es stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, wie Teilefluss-, Komplettbearbeitungs- oder Clusteranalyse, jeweils mit spezifischen Vor- und Nachteilen. Zweck ist die Reduktion der Komplexität der weiteren Planungsschritte.

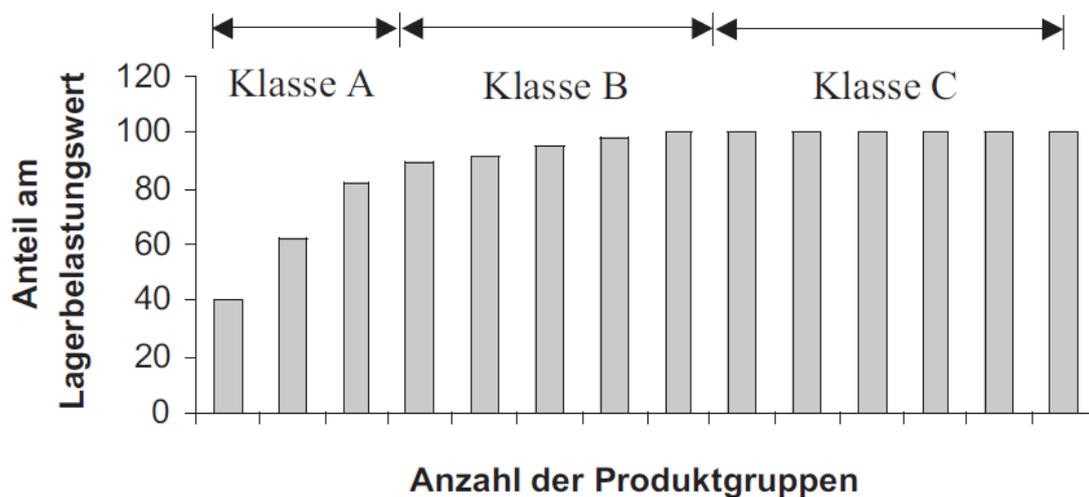


Abbildung 6: Beispiel einer ABC-Analyse⁵⁰

Ziel der Erfassung von *Produktionsdaten* ist die Analyse der Produktions- und Materialflussprozesse. Bei Ersteren ist vor allem die Abfolge der Bearbeitungsschritte der Produkte für die spätere Bestimmung der notwendigen Funktionseinheiten im Rahmen der Strukturplanung relevant. Außerdem werden die Kapazitäten der

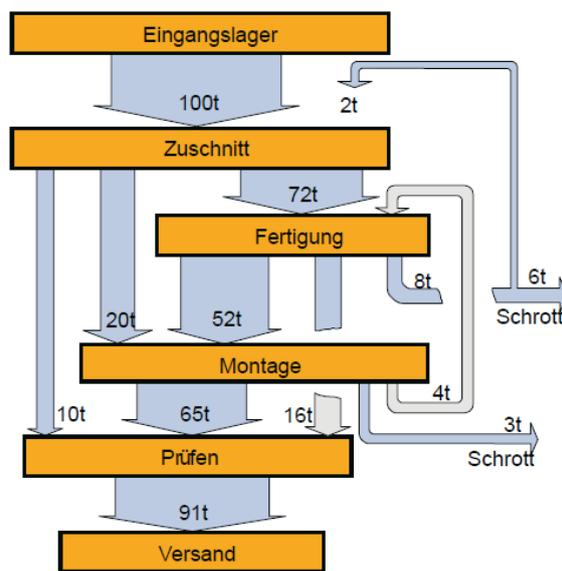
⁴⁸ vgl. Pawellek 2014, S. 169f, S. 191ff.

⁴⁹ vgl. Grundig 2018, S. 60ff.

⁵⁰ ebenda, S. 61.

verfügbaren Fertigungs- und Montageeinrichtungen sowie deren durchschnittliche Auslastung erhoben. Neben der Abfolge der einzelnen Prozessschritte sollten auch Verbesserungspotenziale der Prozesse und des organisatorischen Aufbaus ermittelt werden, z. B. durch Ermittlung des wertschöpfenden Zeitanteils des Gesamtprozesses. Auch die Materialflüsse werden auf Schwachstellen, wie lange Transportwege und Verschwendungen, analysiert, sowie die dafür nötigen Transport- und Lagerkapazitäten. Die Analyse der Produktionsdaten wird häufig durch folgende Methoden unterstützt:^{51, 52, 53}

- **Materialflussanalyse:** Sie dient der Darstellung und Optimierung der Transportbewegungen zwischen den einzelnen Arbeitsstationen und Bereichen. Der Materialfluss wird oft graphisch als Sankey-Diagramm oder tabellarisch als Von-Nach-Matrix bzw. Materialflussmatrix dargestellt, wie in Abbildung 7 zu sehen ist.
- **Prozessanalyse:** Es existieren verschiedene Methoden und Darstellungsformen von Prozessanalysen, wie die Wertstromanalyse oder die Primär-Sekundär-Analyse. Besonders geeignet sind Prozessbeschreibungen, die die logistischen Prozesse und Verknüpfungen berücksichtigen.



a) Sankey-Diagramm

nach \ von	Eingangslager	Zuschnitt	Fertigung	Montage	Prüfen	Versand	Schrott	Summe
Eingangslager		100						100
Zuschnitt			72	20	10			102
Fertigung		2		52	16		6	76
Montage			4		65		3	72
Prüfen						65		65
Versand								
Schrott								
Summe		102	76	72	91	65	9	

Einheiten in [t / Monat]

b) Materialflussmatrix

Abbildung 7: Darstellung von Materialflüssen⁵⁴

*Immobilien*daten können sich beispielsweise auf das Grundstück, das Gebäude, die vorhandenen Installationen und Versorgungseinrichtungen sowie Produktions- und Logistikausrüstungen beziehen. Eine Methode zur Aufdeckung von

⁵¹ vgl. Pawellek 2014, S. 171f.

⁵² vgl. Grundig 2018, S. 60.

⁵³ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 454ff.

⁵⁴ ebenda, S. 458.

Optimierungspotenzialen in diesem Bereich ist das Aufstellen einer Flächenbilanz. Dabei werden die vorhandenen Hallenflächen in Lager- und Pufferflächen, Funktionsflächen, Produktionsflächen sowie Transportflächen unterteilt und die Anteile der jeweiligen Flächentypen mit branchenüblichen Kennzahlen verglichen. Häufig wird daraus eine Reduktion des Anteils an Lager- und Pufferflächen zur Optimierung der Flächennutzung abgeleitet.^{55, 56}

2.1.4 Prozessanalyse und -optimierung

Ein Prozess beschreibt die inhaltliche und sachlogische Folge von Funktionen, die zur Erzeugung eines Outputs – also eines Objektes in einem spezifizierten Zustand – notwendig ist. Für diesen Output sollte es mindestens einen Kunden mit spezifischen Anforderungen an das Ergebnis geben. Zur Erzeugung dieser Ausgangsgrößen benötigt ein Prozess bestimmte Eingangsgrößen, die durch einen Lieferanten zur Verfügung gestellt werden. Ein Prozess ist in der Regel mit anderen Prozessen verknüpft, z. B. als Start- oder Endpunkt bzw. als Kunde oder Lieferant anderer Prozesse.⁵⁷ Abbildung 8 zeigt eine Visualisierung dieser Definition.

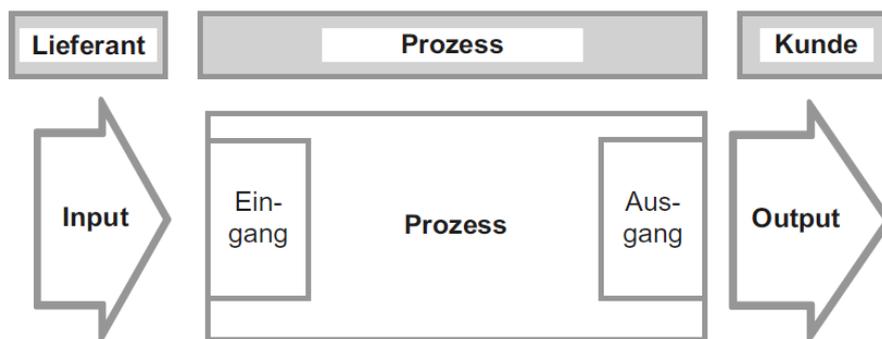


Abbildung 8: Prozessdefinition⁵⁸

Eine Prozessanalyse wird in der Fabrikplanung zur Beschreibung von Geschäftsprozessen, Material-, Informations- und Wertflüssen eingesetzt. Die Analysephase sollte allerdings auch für Optimierungen der Prozesse genutzt werden, damit aktuell unwirtschaftliche Abläufe nicht einfach in die neue Fabrikstruktur übernommen werden.⁵⁹

Zur Prozessoptimierung ist es somit nötig, die bestehenden Prozesse zu analysieren und darauf aufbauend neue Prozesse zu gestalten. Es existieren verschiedene Prozessanalysemethoden, die im Allgemeinen die Prozesse mit einer Abbildung grafisch darstellen, welche die Sequenz von Aktivitäten oder Tätigkeiten in einer

⁵⁵ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 452f.

⁵⁶ vgl. Pawellek 2014, S. 172f.

⁵⁷ vgl. Becker 2018, S. 7f.

⁵⁸ ebenda, S. 8.

⁵⁹ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 454ff.

zeitlichen oder logischen Reihenfolge mit vordefinierten Symbolen zeigt. Um auch bei komplexeren Prozessen die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, muss der richtige Detaillierungsgrad gewählt werden. Durch einen hierarchischen Aufbau lassen sich Übersichts- und Detaildarstellungen kombinieren, sodass sowohl Gesamtziele des Prozesses als auch die einzelnen Schritte zur Zielerreichung betrachtet werden können. Eine Prozessabbildung dient dazu, einen bestehenden Prozess zu verstehen, um ihn neu gestalten und seine Leistung charakterisieren zu können. Mithilfe einer Prozessabbildung können Probleme im Ist-Zustand identifiziert werden. Dazu zählen mitunter:

- Nicht wertschöpfende Tätigkeiten,
- Doppelarbeit,
- Ineffizientes Arbeiten,
- Redundante Schritte,
- Fehlermöglichkeiten,
- Schattensysteme,
- Nicht anwendbare Aufgabenbeschreibungen und Richtlinien.

In der Regel wird der Soll-Zustand in der gleichen Darstellungsmethode wie der Ist-Zustand abgebildet, wodurch sich leicht Änderungen in der Prozesskomplexität ableiten lassen.⁶⁰

Modellierungsmethoden:

Für die Darstellung von Prozessen existieren einige verschiedene Notationen, die in Abbildung 9 übersichtlich dargestellt sind. In der Praxis der Geschäftsprozessmodellierung werden nicht formalisierte Flussdiagramme am häufigsten eingesetzt. Unter diesem Begriff werden alle nicht formalisierten Methoden aus beliebig zusammengestellten Symbolen, wie Kreisen, Rechtecken oder Pfeilen, zusammengefasst. Sie zeichnen sich vor allem durch ihre einfache, aufwandsarme Anwendung aus. Sollen mehrere Personen zeitlich und örtlich verteilt auf die Prozessdarstellungen zugreifen können, müssen allerdings formalisierte Modellierungssprachen eingesetzt werden. Die einfachste Methode ist die Wertschöpfungskette, die jedoch nur eine rudimentäre Darstellung von Prozessfolgen zulässt und daher lediglich als Überblicksdarstellung auf Managementebene eingesetzt wird. Die Swimlane-Methode erlaubt zusätzlich die Modellierung von Verantwortlichkeiten und einfachen Ja/Nein-Entscheidungen. Mithilfe einer erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) lassen sich sowohl verschiedene Arten von Verzweigungen als auch Datenstrukturen und Informationssysteme einbinden. Die eEPK-Methode kommt dementsprechend häufig in der Entwicklung von Informationssystemen zum Einsatz. Die umfassendste Notation bietet die Business

⁶⁰ vgl. Becker 2018, S. 133ff.

Process Model and Notation (BPMN). Neben der Möglichkeit einer umfassenden Modellierung von logischen Verknüpfungen und Informationsflüssen zeichnet sich BPMN auch durch eine bessere Anschaulichkeit als z. B. eEPK aus. Sie lässt sich sowohl für die betriebswirtschaftliche Modellierung als auch für die informationstechnische Umsetzung der Prozesse einsetzen, verlangt aber im Vergleich zu anderen Notationen einen höheren Einarbeitungsaufwand. Weiters zu erwähnen ist die Unified Modeling Language (UML), die eher auf den Einsatz in der Softwareentwicklung als auf die Prozessmodellierung ausgerichtet ist.⁶¹

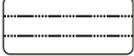
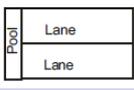
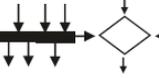
Methode	Ereignis / Zustand	Funktion / Prozess	Organisation	Software	Daten	Verzweigung / Konnektor	Kontroll-, Daten-, Nachrichtenfluss	
WKD	 Startprozess	 Prozess					 Kontrollfluss	
eEPK	 Ereignis	 Funktion	 und weitere	 Anwendungssystem	 Information	 UND XOR ODER	 Kontrollfluss	 Datenfluss
Swim-lane		 Prozessschritt	 Lanes		 Dokument	 Regel	 Kontrollfluss	
BPMN	 Start-,  Zwischen-,  Endereignis	 Aktivität	 Lane Lane		 Dokument	 UND XOR ODER Event Komplex	 Kontrollfluss	 Nachrichtenfluss
UML Activity Diagram	 Start	 Ende	 Aktivität				 Kontrollfluss	

Abbildung 9: Vergleich der Notationen von Modellierungsmethoden⁶²

Es ist festzuhalten, dass die oben angeführten Modellierungsmethoden nicht primär für die Modellierung von Materialflüssen ausgelegt sind. Hierfür bietet sich z. B. die Wertstromanalyse an.⁶³

Wertstromanalyse:

Die Wertstromanalyse zeichnet sich durch eine am Gesamtablauf einer Produktion orientierte Sichtweise aus. Ziel ist neben der punktuellen Verbesserung einzelner Produktionsprozesse die ganzheitliche Betrachtung und Optimierung der Produktion, indem die Produktionsprozesse aufeinander abgestimmt und logistisch verknüpft werden. Dementsprechend zielt die Erfassung des Ist-Zustandes nur auf eine grobe Datenerfassung ab. Primär sollen alle Produktionsprozesse, Material- und Informationsflüsse umfassend dargestellt und verstanden werden, wobei differenzierte

⁶¹ vgl. Gadatsch 2020, S. 100ff.

⁶² ebenda, S. 148.

⁶³ vgl. Becker 2018, S. 177f.

Datenanalysen zur Aufwandsreduktion durch abgeschätzte Erfahrungs- oder Durchschnittswerte ersetzt werden können.

Mittels einer Momentaufnahme wird versucht, einen typischen Zustand der Fabrik und seiner Prozesse aufzunehmen. Die Aufnahme erfolgt in zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen, in denen jeweils ausgehend vom Kunden zuerst der Produktionsfluss und anschließend der Auftragsfluss durch Befragen, Messen und Zählen erfasst und per Hand skizziert wird. Durch die überblickshafte Betrachtung und die einfachen Methoden beschränkt sich der Zeitaufwand im Allgemeinen auf wenige Tage.⁶⁴ In Abbildung 10 ist ein beispielhaftes Ergebnis einer Wertstromanalyse mit der typischen Notation zu sehen.

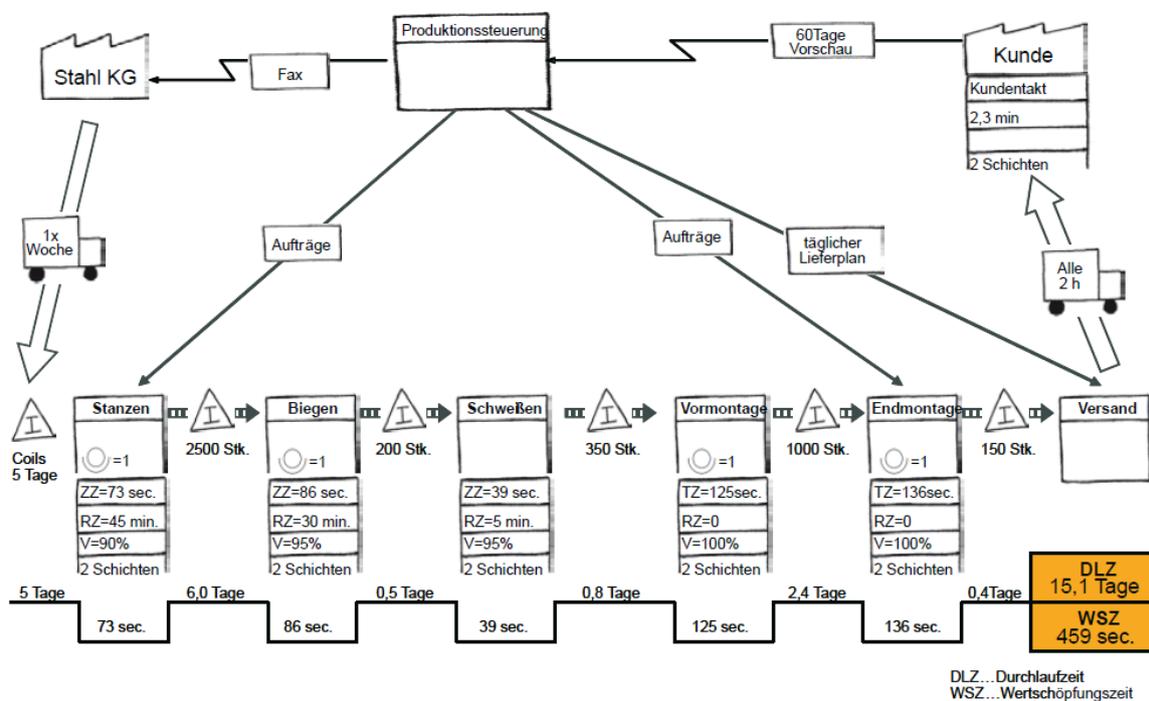


Abbildung 10: Beispiel einer Wertstromdarstellung⁶⁵

Die Wertstromanalyse hat sich durch ihre einfache Anwendbarkeit und ihre Eigenschaft, schnell einen Überblick über die Produktion zu bieten, etabliert. Allerdings weist die Methode auch bestimmte Schwachstellen auf:^{66, 67, 68}

- Durch die manuelle Aufnahme aller Abläufe und Kennzahlen ergibt sich ein erheblicher Zeit- und Personalaufwand. Dies ist vor allem von Nachteil, wenn die Wertstromaufnahme aufgrund sich ändernder Produktionsbedingungen wiederholt durchgeführt werden soll.

⁶⁴ vgl. Erlach 2020, S. 31ff.

⁶⁵ Wiendahl et al. 2010, S. 457.

⁶⁶ vgl. be Isa et al. 2019.

⁶⁷ vgl. Urnauer und Metternich 2019.

⁶⁸ vgl. Klenk 2019.

- Die manuelle Erfassung der Prozesse ist zudem fehleranfällig und hängt von der Erfahrung der Anwender ab.
- Die Wertstromanalyse bietet nur ein statisches Abbild der Produktion und erfasst keine Variabilität der einzelnen Größen.
- Komplexe Wertströme mit vielen Verzweigungen oder gar mehreren Produktfamilien können nicht abgebildet werden.
- Administrative Prozesse in IT-Systemen können nur erfragt und sehr vereinfacht dargestellt werden, obwohl sie einen großen Anteil an der Durchlaufzeit eines Auftrags verursachen.

Prozessoptimierung:

Aufbauend auf der Analyse und Abbildung der Prozesse lassen sich Schwachstellen identifizieren und neue Sollprozesse erarbeiten. Zur Identifikation und Gestaltung von Verbesserungsansätzen für die Produktion als Ganzes existieren verschiedene Ansätze wie Lean Production oder die Theory of Constraints (TOC).⁶⁹

Grundlegendes Gestaltungsprinzip der *Lean Production* ist die Vermeidung von Verschwendung, indem alle nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten im Produktionsprozess eliminiert werden. Dafür lassen sich acht Arten von Verschwendung unterscheiden. Vier davon – Produktion von Schlechtteilen, ungünstige Bewegungsabläufe der Mitarbeiter, ungünstige Bearbeitungsprozesse der Maschinen und Wartezeiten – sind unmittelbar auf Verschwendungen im Produktionsprozess zurückzuführen. Überproduktion, Lagerhaltung und Transporte hingegen sind die drei Verschwendungsarten, die sich auf Verschwendungen im Produktionsablauf beziehen. Als achte Verschwendungsart kann die Verschwendung durch ungeeignete und aufwendige Geschäftsprozesse sowie IT-Werkzeuge in der Auftragsabwicklung gesehen werden.⁷⁰

Die Methode des Wertstromdesigns baut auf den Prinzipien der Lean Production auf und legt den Fokus vor allem auf die Verschwendungen in Produktionsablauf und Auftragsabwicklung. Dazu existiert ein Set von zehn Gestaltungsrichtlinien, um den im Ist-Zustand aufgenommenen Wertstrom systematisch auf ein Gesamtoptimum des Produktionsablaufs auszurichten:⁷¹

1. Ausrichtung am Kundentakt: Das Kapazitätsangebot einer Produktion ist durchgängig am Kundentakt auszurichten.
2. Prozessintegration: Produktionsprozesse sind soweit möglich in einem integrierten Produktionsprozess oder in einer kontinuierlichen Fließfertigung zusammenzufassen.

⁶⁹ vgl. Becker 2018, S. 239.

⁷⁰ vgl. Erlach 2020, S. 124ff.

⁷¹ vgl. ebenda, S. 131ff.

3. FIFO-Verkopplung: Aufeinanderfolgende Produktionsprozesse, die aus technologischen oder organisatorischen Gründen nicht zur Fließfertigung integriert werden können, sind, soweit möglich, in einer Reihenfertigung mit Bestandsobergrenze zu verkoppeln.
4. Kanban-Regelung: Produktionsprozesse sind bei Wiederholteilen über eine Losfertigung mit Supermarkt-Lägern zu verknüpfen, wenn mehrere Wertstromzweige zu synchronisieren oder größere Rüstzeitdifferenzen zu überbrücken sind.
5. Schrittmacher-Prozess: Jeder Wertstrom ist an genau einem eindeutig festgelegten Schrittmacher-Prozess im Kundentakt zu steuern.
6. Festlegung der Freigabeeinheit: Die Freigabe von Produktionsaufträgen hat in kleinen, einheitlich dimensionierten Umfängen zu erfolgen und so für ein gleichmäßiges Produktionsvolumen zu sorgen.
7. Produktionsmix-Ausgleich: Die Reihenfolge von Produktionsaufträgen ist hinsichtlich der Varianten sinnvoll zu durchmischen.
8. Engpass-Steuerung: Die Freigabe von Produktionsaufträgen ist ggf. abhängig von nachgelagerten kapazitiven oder restriktiven Engpass-Prozessen hinsichtlich Menge oder Reihenfolge zu steuern.
9. Trennung von Produktionsprozess und Materialfluss: Wertschöpfende Tätigkeiten im Produktionsprozess sind von den unterstützenden, logistischen Tätigkeiten räumlich und personell abzutrennen.
10. Flussorientiertes, modulares Ideallayout: Die Betriebsmittel in einer Fabrik sind als modularisierte Flächenelemente möglichst nah zueinander entsprechend ihrer Abfolge im Wertstrom anzuordnen. Dabei sind die Monumente möglichst an den Ecken im Layout zu platzieren.

Die *Theory of Constraints* bietet einen ganzheitlichen Prozessoptimierungsansatz, der auf Steuerungsprinzipien beruht. Dabei wird die gesamte Prozessleistung verbessert, indem der Engpass des Gesamtprozesses identifiziert und optimiert wird. Denn nur dieser hat eine Auswirkung auf die Gesamtleistung, während Verbesserungen bei den Nicht-Engpässen verpuffen. Nach der Beseitigung des Engpasses wird der nächste Engpass gesucht, um eine weitere Verbesserung zu ermöglichen. Der Engpass kann sowohl in den Einrichtungen des Unternehmens liegen – z. B. durch den Produktionsschritt mit geringster Kapazität – als auch durch Zulieferer oder Kunden bestimmt werden. Auch eine Beschränkung durch Vorschriften und Richtlinien, mit denen das Unternehmen gesteuert wird, sind denkbare Engpässe. Die *Theory of Constraints* bietet über dieses Vorgehensmodell hinaus Standardlösungen und Hilfsmittel zur Lösungsentwicklung für verschiedene Bereiche wie Produktionssteuerung oder Produktentwicklung.⁷²

⁷² vgl. Becker 2018, S. 57ff.

2.1.5 Datenanforderungen

Für die Analyse der *Produktdaten* ist vor allem das Produktionsprogramm maßgeblich. Dieses fasst die in den nächsten drei bis fünf Jahren zu produzierenden Produkte mit ihren Stückzahlen zusammen und bildet damit z. B. die Grundlage für ABC-Analysen. Dadurch ist es möglich, die Produktion in weiterer Folge nach „Rennern“ mit hohen Stückzahlen, „Läufern“ mit mittleren Stückzahlen und Exoten mit niedrigen Stückzahlen zu segmentieren.⁷³ Weiters von Interesse sind die Schwankungen der Ausbringungs- bzw. Bedarfsmengen, die Herstellkosten und Preise pro Produkt sowie die Struktur der Erzeugnisse, z. B. in Form von Stücklisten. Eine Gliederung des Produktprogramms nach Produktfamilien ist, falls vorhanden, zu erheben und andernfalls selbst vorzunehmen.^{74 75}

Für die Fabrikplanung ist ebenso die Erfassung diverser *Produktionsdaten* wesentlich. Um im Rahmen der Strukturplanung die funktionalen und organisatorischen Einheiten festlegen zu können, muss zunächst ermittelt werden, welche Fertigungsfunktionen, -module und -stufen Teil der Fabrik sind bzw. sein sollen. Darüber hinaus sind auch die technisch relevanten Daten der zur Verfügung stehenden Produktions- und Logistikausrüstungen von Interesse. Dazu zählen insbesondere die Technologien und Kapazitäten der Produktions- und Förderanlagen. Die Abmessungen und die durchschnittliche Auslastung der jeweiligen Betriebsmittel sind ebenso relevant, um die nötigen Funktionseinheiten bestimmen und dimensionieren zu können.

Um die wechselseitigen Beziehungen zwischen den Funktionseinheiten bestimmen zu können, müssen Daten zu den Prozessen der Fabrik erhoben werden. Hierbei ist neben der Bearbeitungsfolge der verschiedenen Produktgruppen auch die physische und organisatorische Verknüpfung der einzelnen Produktionsschritte zu erheben. Dies ermöglicht einerseits die Umsetzung von Verbesserungen in der Produktionsorganisation und andererseits die Ermittlung der innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse. Zur Berechnung und Darstellung der Materialflüsse ist zusätzlich eine Layoutdarstellung nötig, aus der die Anordnung und Größe der Flächen für Lager, Puffer, Produktion, Transport und Nebenfunktionen hervorgehen. Im Falle eines überschaubaren Produktspektrums können die Prozesse für jedes Produkt einzeln betrachtet werden, ansonsten muss aus historischen Belastungsdaten ein repräsentatives Produktionsprogramm zusammengestellt werden.^{76, 77, 78}

*Immobilien*daten werden z. B. erhoben, um einen Überblick über die aktuelle Struktur des Werksgeländes und der einzelnen Gebäude zu erhalten. Auf Ebene des

⁷³ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 451f.

⁷⁴ vgl. Pawellek 2014, S. 168.

⁷⁵ vgl. Grundig 2018, S. 58.

⁷⁶ vgl. Pawellek 2014, S. 168ff.

⁷⁷ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

⁷⁸ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 451ff.

Werksgeländes ist neben der Anordnung der einzelnen Gebäude und Flächen auch die infrastrukturelle Anbindung für die spätere Realplanung relevant. Auf Gebäudeebene müssen einerseits die aktuellen Abmessungen der Hallen und vorhandenen Räume ermittelt werden. Andererseits ist für etwaige Erweiterungen auch das Hallenraster von Interesse sowie die Art und Belastbarkeit des Hallenbodens. Oftmals stellen auch die bestehenden Installationen und Versorgungsanlagen Restriktionen für die Realplanung dar.^{79, 80}

In der folgenden Tabelle sind die beschriebenen Datenforderungen der Fabrikplanung noch einmal aufgelistet. Außerdem ist dargestellt, wie die Daten im weiteren Planungsprozess genutzt werden können.

Tabelle 1: Datenanforderungen der Fabrikplanung^{81, 82, 83, 84}

	Datenanforderung	Beschreibung	Nutzen
Produkt- daten	Produkte und Produktgruppen	Auflistung der zu produzierenden Produkte ggf. zusammengefasst zu Produktgruppen	Segmentierung
	Ausbringungsmengen pro Produkt	Anzahl und Schwankung der jährlich produzierten Einheiten pro Produkt	Dimensionierung, Segmentierung
	Herstellkosten und Preise pro Produkt	Herstellkosten und Preise der Produkte	Segmentierung, Optimierung des Produktionsprogramms
	Erzeugnisstruktur	Bestandteile (Rohmaterial, Komponenten) der Produkte	Strukturplanung
Produktions- daten	Fertigungsfunktionen, -module und -stufen	Aufgaben, die von der Produktion erfüllt werden z. B. Mischen, Pressen, etc.	Strukturplanung
	Technologien der Produktions- und Logistikanlagen	Fertigungsfunktionen die mit den Anlagen erfüllt werden können	Strukturplanung
	Kapazitäten der Produktions- und Logistikanlagen	Vorhandene Anlagen, deren Leistungsfähigkeit und Auslastung	Dimensionierung
	Abmessungen der Produktions- und Logistikanlagen	Platzbedarf für die Anlagen und deren Bedienung	Dimensionierung, Realplanung
	Bearbeitungsfolge der Produkte	Abfolge der Produktionsschritte, die für die Erzeugung eines Produkts nötig sind	Strukturplanung, Dimensionierung

⁷⁹ vgl. Pawellek 2014, S. 169ff.

⁸⁰ vgl. Grundig 2018, S. 58.

⁸¹ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

⁸² vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 451ff.

⁸³ vgl. Pawellek 2014, S. 168ff.

⁸⁴ vgl. Grundig 2018, S. 58.

	Produktions- und Materialflusssteuerung	Organisatorische Verknüpfung der einzelnen Produktionsschritte	Strukturplanung, Prozessoptimierung
	Durchlauf- und Prozesszeiten	Benötigte Zeit für die einzelnen Produktionsprozesse sowie den gesamten Auftragsdurchlauf	Dimensionierung, Prozessoptimierung
	Bestände	Durchschnitt und Verlauf der Bestände in Material- und Pufferlagern	Dimensionierung, Prozessoptimierung
	Flächenlayout	Anordnung und Größe der verschiedenen Flächen für z. B. Lager, Produktion, etc.	Dimensionierung, Realplanung
	Materialflüsse	Menge des zwischen den verschiedenen Bereichen oder innerhalb der Bereiche transportierten Materials	Dimensionierung, Realplanung
	Belastungsdaten	Auslastung der Produktions- und Logistikausrüstungen	Dimensionierung
Immobilien	Werksstruktur	Anordnung der Gebäude auf dem Werksgelände	Realplanung
	Infrastrukturelle Anbindung	Anbindung des Werksgeländes an das Straßen- und Versorgungsnetz	Realplanung
	Gebäudestruktur	Abmessungen und Anordnung von Hallen und anderen Räumen	Realplanung
	Konstruktionsraster	Raster, auf Grundlage dessen die Hallen erweitert werden können	Realplanung
	Hallenboden	Oberfläche und Belastbarkeit des Hallenbodens	Realplanung
	Installationen	Installierte Leitungen für Klimatisierung, Elektrotechnik etc.	Realplanung

2.1.6 Vorhandene Datenquellen

Die für die Fabrikplanung benötigten Daten werden nach Möglichkeit aus vorhandenen Informationssystemen generiert, da dies im Allgemeinen weniger aufwendig ist, als die Daten direkt durch Messen oder Befragen zu ermitteln.^{85, 86} Daher sollen hier gängige Informationssysteme für Produktionsunternehmen betrachtet werden und welche Daten aus diesen zu erfassen sind.

⁸⁵ vgl. Pawellek 2014, S. 167.

⁸⁶ vgl. Grundig 2018, S. 59.

Informationssysteme:

Den Kern der betrieblichen IT-Landschaft bildet in der Regel ein sogenanntes Enterprise-Resource-Planning-System (ERP-System). Diese stellen eine Weiterentwicklung von Systemen zur Mengen-, Termin- und Kapazitätsplanung dar, da sie diese um zusätzliche Funktionalitäten wie Rechnungs- und Personalwesen erweitern. Die marktgängigen ERP-Systeme unterscheiden sich allerdings beispielsweise hinsichtlich ihres generellen Funktionsumfangs oder der jeweiligen Branchenneigung. Im Kontext des Produktionsmanagements existieren dementsprechend auch einige Zusatzsysteme, die den Umfang der ERP-Funktionalitäten kontextbezogen erweitern. Die jeweiligen Systeme unterstützen auf verschiedenen Ebenen des Unternehmens(-netzwerks) bestimmte Funktionen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist.⁸⁷

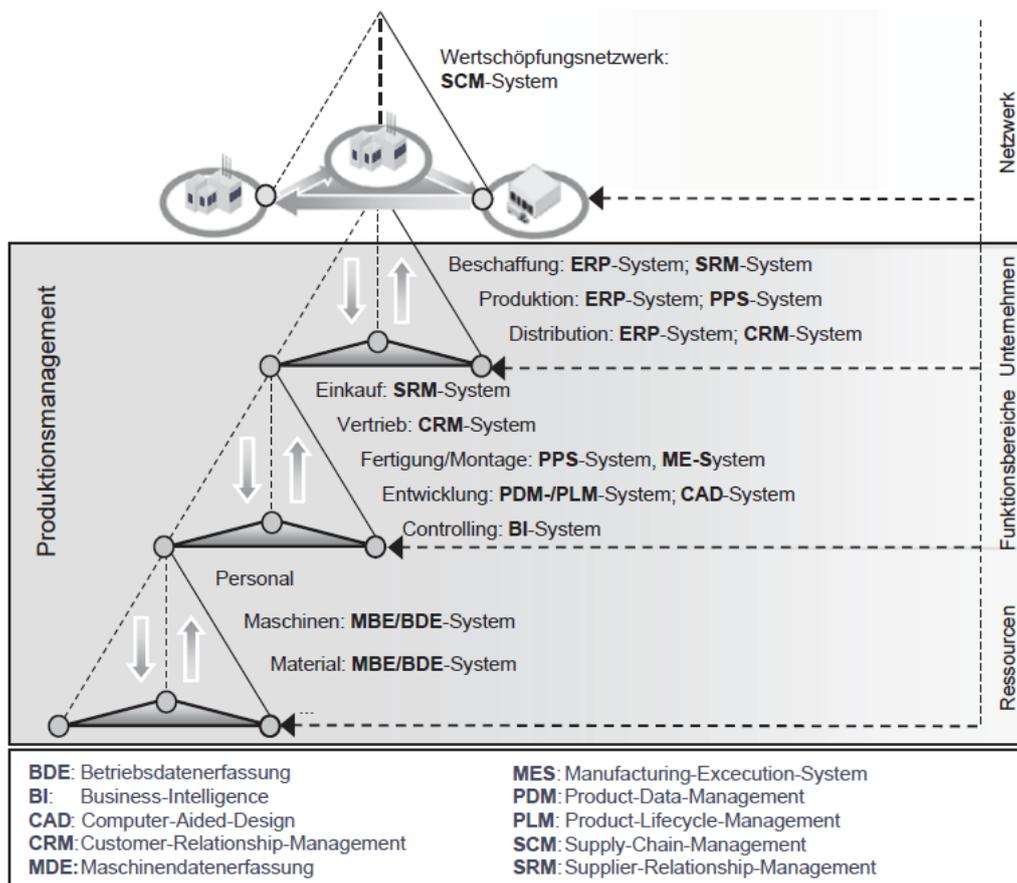


Abbildung 11: IT-Systeme für das Produktionsmanagement⁸⁸

Das Wirkungsfeld von Systemen zur Produktionsplanung und -steuerung (*PPS-Systemen*) konzentrierte sich ursprünglich auf die Mengen- und Terminplanung in der Produktion, wurde aber mittlerweile erweitert, um die gesamte technische Auftragsabwicklung vom Eingang der Kundenanfrage bis zur Auslieferung des fertigen

⁸⁷ vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 282f.

⁸⁸ ebenda, S. 283.

Erzeugnisses abzudecken. Ein PPS-System unterstützt somit die Administration und Disposition des Material- und Wertflusses in einem Produktionsunternehmen.

Eine Ergänzung bzw. Weiterentwicklung zu den PPS-Systemen bieten die *ERP-Systeme*, da sie neben den PPS-Funktionen noch sämtliche betriebswirtschaftlichen Fragestellungen, wie Rechnungswesen und Personal unterstützen. Sie werden dafür abteilungsübergreifend genutzt, konzentrieren sich aber auf die innerbetriebliche Sicht.⁸⁹ Zur Erfüllung dieser Funktionen ist die Verfügbarkeit gewisser Grunddaten Voraussetzung, zu denen z. B. zählen:⁹⁰

- Stammdaten bleiben mittel- bis langfristig unverändert. Unterschieden wird zwischen:
 - Stücklisten,
 - Kunden- und Lieferantenstammdaten,
 - Materialstammdaten,
 - Arbeitsplatzstammdaten,
 - Arbeitspläne.
- Bewegungsdaten ergeben sich aus einem bestimmten Ereignis oder Prozess und greifen dabei auf die hinterlegten Stammdaten zurück. Beispiele hierfür sind:
 - Anfang und Ende von Arbeitsvorgängen,
 - Lagerbestände (Lagerort, Disposition),
 - Lagerzugänge und -abgänge,
 - Bestellaufträge.
- Aufbereitete Daten, wie Übersichten zu Maschinenbelegungen, Lagerbestand oder Auftragsfortschritt

Systeme für das Customer-Relationship-Management (*CRM-Systeme*) unterstützen die systematische Gestaltung der Beziehungen zu Kunden sowie die Umsetzung einer konsequenten Kundenorientierung. Analog dazu existieren auch Systeme für das Supplier-Relationship-Management (*SRM-Systeme*) auf Beschaffungsseite.

Product-Data-Management-Systeme (*PDM-Systeme*) sind Organisations- und Verwaltungsprogramme für Produktdaten. Diese werden in der Regel im Rahmen der Entwicklung bzw. Konstruktion z. B. von Computer-Aided-Design-Systemen (*CAD-Systemen*) erzeugt und umfassen unter anderem Konstruktionszeichnungen, Stücklisten und Artikelstammsätze. Product-Lifecycle-Management-Systeme (*PLM-Systeme*) ermöglichen mithilfe ein oder mehrerer PDM-Systeme die informationstechnische Unterstützung sämtlicher konstruktiver Aufgaben über den ganzen Produktlebenszyklus. Ein Dokumentenmanagement-System verwaltet

⁸⁹ vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 284.

⁹⁰ vgl. Wannewetsch 2021, S. 442f.

hingegen die produktbeschreibenden Stammdaten, wie z. B. Konstruktionszeichnungen, Stücklisten oder Informationen über den Fertigungsprozess. PDM- und PLM-Systeme können auch Funktionalitäten zur Überwachung und Steuerung der Prozesse rund um das Produkt sowie Schnittstellen zu ERP- oder PPS-Systemen aufweisen.⁹¹

Manufacturing-Execution-Systeme (MES) ergänzen die ERP-Systeme um detaillierte Möglichkeiten der Planung, Optimierung und Überwachung der Produktion. Ein MES übernimmt dafür grob terminierte Fertigungsaufträge aus dem ERP-System, unterstützt die Feinplanung und -steuerung und meldet die Fertigstellung der Aufträge anschließend zurück. Durch die Zusammenführung von Planung, Verfolgung und Organisation aller Produktionsschritte verbinden MES so die Auftragsbearbeitung der ERP-Systeme auf Unternehmensebene mit den Steuerungssystemen auf Ausführungsebene.⁹²

Dieses Zusammenspiel wird durch Einteilung der IT-Systeme auf Basis der Automatisierungspyramide verdeutlicht, die in Abbildung 12 dargestellt ist. Diese zeigt die für die Planung, Steuerung und Ausführung eines Produktionsprozesses wesentlichen Ebenen von der Unternehmensebene, der das ERP-System zugeordnet ist, bis zur Ebene der einzelnen Signale, der Feldebene.⁹³

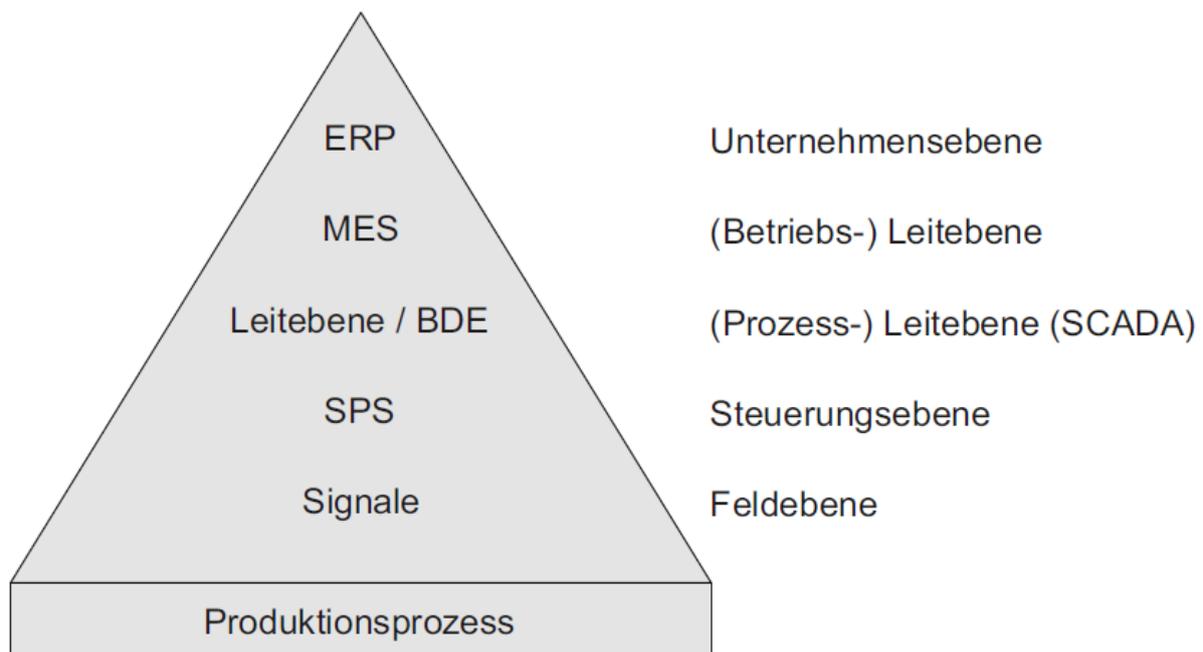


Abbildung 12: Automatisierungspyramide⁹⁴

⁹¹ vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 285f.

⁹² vgl. ebenda, S. 286.

⁹³ vgl. Mayer et al. 2020, S. 327.

⁹⁴ vgl. ebenda, S. 328.

Ein MES nimmt eine Vielzahl an Daten von den angrenzenden Ebenen der Automatisierungspyramide auf. Zu den wichtigsten Daten, die aus einem MES gewonnen werden können, zählen:^{95, 96}

- Auftragsdaten, allgemein und pro Produktions- und Zeiteinheit,
- Geplante und historisierte Arbeitszeitmodelle,
- Zählpunktinformationen: Informationen zu den Teilen oder Aufträgen an bestimmten Punkten im Produktionssystem,
- Lagerbestände,
- Abrufreihenfolgen,
- Produktionsstruktur,
- Mengengerüste und Betriebszeiten, die aus Maschinentakten, Zählimpulsen, Betriebssignalen, Maschinenstatus, Messwerten und Prozessdaten aggregiert werden.

In den Aufgabenbereich der Maschinendatenerfassung (*MDE*) fällt das Auslesen und Speichern von Betriebszuständen und Mengensignalen. Die meisten heute eingesetzten Maschinen können allerdings nur zwischen den Betriebszuständen „unbegründeter Stillstand“, „Produktion“ und ggf. noch „Rüsten“ unterscheiden. Details zu den einzelnen Stillständen können dann auf einer Benutzeroberfläche, dem Shop Floor Terminal, vom Fertigungspersonal manuell angegeben werden. Die Erfassung der produzierten Menge kann entweder über einen Zähler in der Maschine erfolgen oder auf Basis der Maschinenzyklen errechnet werden. Das Fertigungspersonal hat dann im Shop Floor Terminal noch die Möglichkeit, die ausgebrachten Mengen als sog. Gutmenge, Ausschuss und Nacharbeit zu klassifizieren.

Die Betriebsdatenerfassung (*BDE*) hat zur Aufgabe, die aufgezeichneten Maschinendaten den einzelnen Vorgängen und ihren entsprechenden Fertigungsaufträgen zuzuordnen. Dafür kann das Fertigungspersonal aus einer Liste durchzuführender Vorgänge denjenigen auswählen, der gerade abgearbeitet wird. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Prozessdaten, wie z. B. Temperatur oder Spindeldrehzahl, zu erfassen und auf die einzelnen Vorgänge abzubilden. Mithilfe der BDE ist es durch die Abbildung der Prozessdaten auf einzelne Produkte oder Chargen möglich, jedes Einzelteil bzw. für jede Charge die gesamte Produkthistorie entlang des Wertschöpfungsprozesses rückzuverfolgen.⁹⁷

MDE- und BDE-Systeme erfassen somit eine Vielzahl an Daten aus den folgenden Bereichen:⁹⁸

⁹⁵ vgl. Kletti 2015, S. 47.

⁹⁶ vgl. Mayer et al. 2020, S. 328.

⁹⁷ vgl. Sinsel 2020, S. 48ff.

⁹⁸ vgl. Schuh und Schmidt 2014, S. 287.

- Auftragsdaten: Start- und Endtermine von Arbeitsgängen, Liege-, Transport-, Bearbeitungs-, Kontroll- und Unterbrechungszeiten sowie die jeweiligen Bearbeitungszustände, produzierte Mengen und den Personal- bzw. Materialeinsatz,
- Personalbezogene Daten: An- und Abwesenheitszeiten sowie die zeitliche Zuordnung von Mitarbeitern zu Betriebsmitteln und Fertigungsaufträgen oder Art der Tätigkeit,
- Maschinendaten: Informationen über Stillstands- und Laufzeiten, Nutzungsgrade, Störungen und deren Ursachen und die auf der Ressource gefertigten Mengen,
- Werkzeug- und Vorrichtungsdaten: Einsatzort und -zeit der Werkzeuge und Vorrichtungen sowie deren Entnahme, die Zustände und ggf. Defekte,
- Lager- und Materialdaten: Zugänge, Bestand und Verbräuche von Roh-, Hilfs-, und Betriebsstoffen,
- Qualitätsdaten: Mess- und Prüfwerte der Prozessdaten, z. B. Temperatur, Druck, Spannung sowie Ausschussgründe.

Sowohl in MES als auch in MDE-/BDE-Systemen fallen sehr große Datenmengen an, bei Letzteren in der Regel mehrere Millionen Datensätze pro Tag. Dementsprechend sind eine Validierung und Verifizierung der Daten unumgänglich, um relevante Kennzahlen zu ermitteln. Außerdem ist es für die Weiterverwendung der Daten in Simulationsmodellen oder für die Kennzahlenentwicklung häufig nötig, die Daten länger zu archivieren, als es im Quellsystem möglich ist, was die Anbindung einer zusätzlichen Datenbank nötig macht.⁹⁹

Verfügbarkeit der Datenquellen

Besonders ERP-Systeme sind in Produktionsunternehmen bereits weitestgehend etabliert. So gaben in einer Studie aus dem Jahr 2016 82,5% der Teilnehmer an, IT-Systeme auf Unternehmensebene zu nutzen. MES, MDE- oder BDE-Systeme kamen dagegen bei 70,5% der befragten Unternehmen zum Einsatz.¹⁰⁰ Dazu passend gaben auch in einer anderen Befragung zwei Drittel der Unternehmen an, Maschinen- und Prozessdaten zu erfassen. Allerdings zeichnen nur 10,9% der Unternehmen diese Daten auch vollständig auf.¹⁰¹

Es lässt sich feststellen, dass der Einsatz von ERP-Systemen in mittelständischen Produktionsunternehmen mittlerweile Standard ist. Dementsprechend sind Auftragsdaten, wie Produktdaten, Produktspezifikationen, Stückzahlen, Liefermengen und -termine, Produktidentifikation, Produkthistorie und Preise in der Regel verfügbar. Es ist jedoch zu betonen, dass in vielen Produktionen noch ein Großteil der

⁹⁹ vgl. Mayer et al. 2020, S. 328ff.

¹⁰⁰ vgl. Müller et al. 2016, S. 34.

¹⁰¹ vgl. Lichtblau et al. 2015, S. 37.

Dokumentation auf Papier basiert, wodurch der Wert der innewohnenden Daten ungenutzt bleibt. Durch die geringere Verbreitung von MES und MDE-/BDE-Systemen, ist auch die Erfassung von Produktionsdaten wie Fertigmeldungen, Prozessquittierungen, Störungen oder Stückzahlen wesentlich seltener. Dies liegt unter anderem an fehlenden Normen und Möglichkeiten zur einfachen, sicheren Datenablage. In Unternehmen, die Produktions- und Auftragsdaten erheben, ist allerdings die Datenqualität in der Regel mangelhaft und es werden die vorhandenen Daten nur selten für Verbesserungen genutzt. Kapazitätsdaten wie Maschinenauslastungen und Stillstandszeiten werden ebenfalls nur sehr sporadisch oder gar nicht erhoben. Auch Auswertungen sind meist nur mit hohem manuellen Aufwand möglich, außer wenn bestimmte Auswertungen Teil der Funktionalitäten der Maschine sind. Diese Auswertungen können dann allerdings mangels Normung der Daten nur schwer von anderen Systemen genutzt werden.¹⁰²

2.2 Analyse der Sensortechnologien

In diesem Abschnitt werden zunächst die Definitionen und Grundlagen industrieller Sensorik erläutert, um in weiterer Folge die Eigenschaften relevanter Technologien zu beschreiben und wie diese in ein Gesamtsystem integriert werden können.

2.2.1 Definitionen und Grundlagen

Sensoren:

Ein Sensor ist ein technisches Bauteil, das bestimmte physikalische oder chemische Eigenschaften oder die stoffliche Beschaffenheit seiner Umgebung qualitativ oder quantitativ erfassen kann. Die zu messenden Größen werden mittels physikalischer oder chemischer Effekte erfasst und in ein elektrisches Signal umgeformt.

In der Stückfertigungsindustrie werden vor allem Sensoren zum Erfassen geometrischer Größen und Texturen in automatisierten Maschinen und Anlagen eingesetzt. Am häufigsten kommen Sensoren mit geringster Komplexität, wie induktive Annäherungsschalter und Lichtschranken zum Einsatz, wobei auch Systeme zur Erfassung ein- oder mehrdimensionaler Geometrien in den letzten 20 Jahren an Bedeutung gewonnen haben. In der Prozessindustrie werden vor allem Sensoren zur Messung der physikalischen Prozessgrößen Temperatur, Druck, Füllstand und Durchfluss eingesetzt.¹⁰³

Die elektrischen Signale der Sensoren werden klassischerweise vom Sensor zu Messdaten ausgewertet und über eine entsprechende Schnittstelle an übergeordnete Systeme, wie Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), eingebettete Systeme

¹⁰² vgl. Bischoff et al. 2015, S. 257ff.

¹⁰³ vgl. Kegel et al. 2019, S. 2.

oder Industrie-PCs zur weiteren Verarbeitung übergeben. Diese Messdaten können aufgrund der fehlenden semantischen Beschreibung nicht direkt interpretiert und zur Vernetzung des Sensors mit Aktoren oder anderen Sensoren eingesetzt werden, sondern müssen mittels Expertenwissens in die Steuerungssoftware des jeweiligen Systems explizit eingebunden werden.¹⁰⁴ Abbildung 13 zeigt die Komponenten eines typischen Sensors.

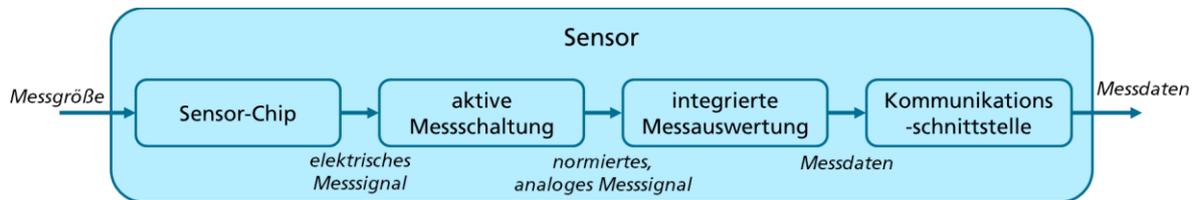


Abbildung 13: Schema eines typischen Sensors¹⁰⁵

Intelligente Sensoren:

Ist ein Sensor mit einem kleinen Speicher und einer standardisierten physischen Verbindung ausgestattet, welche die Kommunikation mit einem Prozessor und Datennetzwerk ermöglicht, so spricht man von einem „intelligenten Sensor“. Diese Sensoren verfügen somit über einen Mikroprozessor, der die gemessenen Daten direkt weiterverarbeitet, speichert und in regelmäßigen Intervallen wieder löscht. Eine weitere wichtige Eigenschaft intelligenter Sensoren ist die drahtlose Verbindung mit dem Internet, die eine Echtzeit-Verarbeitung der erfassten Daten in Cloud- oder Edge-Netzwerken ermöglicht.¹⁰⁶ Intelligente Sensoren ermöglichen es Maschinen und Objekte mit Intelligenz und Kommunikationsfähigkeit auszustatten, wodurch komplexe Wertschöpfungsnetzwerke gebildet werden können, in denen sich die Fertigungseinheiten autonom und dezentral organisieren. In der klassischen Automatisierungspyramide kann diese Art der Steuerung nicht mehr umgesetzt werden, weshalb sie von flexiblen, dezentralen Steuerungsnetzwerken abgelöst werden muss.¹⁰⁷

Internet of Things:

Unter dem Begriff „Internet of Things“ (IoT) versteht man die Vernetzung von physischen Geräten mithilfe von Sensoren, Aktoren und Software. Diese Geräte können dadurch miteinander kommunizieren, interagieren, Daten austauschen und verarbeiten. Die physischen Dinge werden durch IoT zu intelligenten Objekten, die sich über das Netzwerk z. B. überwachen und steuern lassen.¹⁰⁸

¹⁰⁴ vgl. Hompel et al. 2020, S. 391f.

¹⁰⁵ vgl. ebenda, S. 392.

¹⁰⁶ vgl. Misra et al. 2021, S. 85f.

¹⁰⁷ vgl. Bauernhansl et al. 2014, S. 571ff.

¹⁰⁸ vgl. Misra et al. 2021, S. 3f.

Die Architektur einer IoT-Plattform setzt sich aus den folgenden vier Schichten zusammen:¹⁰⁹

- Die *Sensorschicht* besteht aus IoT-Geräten, die dank intelligenter Sensoren Daten erfassen, verarbeiten und in Echtzeit übermitteln können. Diese Sensoren benötigen wenig Energie und niedrige Datenübertragungsraten und formen gemeinsam ein Wireless Sensor Network (WSN).
- Die *Netzwerkschicht* ermöglicht die Kommunikation der IoT-Geräte mit anderen Geräten und verwaltet die generierten Daten. Aufgrund der potenziell sehr großen Datenmengen müssen gewisse Anforderungen an die Qualität der Datenübertragung gewährleistet sein, wie z. B. ausreichende Bandbreite.
- Die *Dienstschicht* integriert die Dienste und Anwendungen in die IoT-Plattform. Dazu führt sie den Austausch von Informationen und die Datenverwaltung sowie verschiedene vorausschauende Analysen durch.
- Die *Schnittstellenschicht* stellt die erfolgreiche Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten sicher, die zum Teil über unterschiedliche Protokolle kommunizieren.

Arten von Sensoren:

Die Betrachtung des Weltmarkts zeigt, dass insbesondere folgende Sensoren global zum Einsatz kommen:¹¹⁰

- Temperatursensoren,
- Drucksensoren,
- Durchflusssensoren,
- Binäre Positionssensoren,
- Positionssensoren,
- Flüssigkeits-Chemosensoren,
- Füllstandssensoren,
- Geschwindigkeitssensoren,
- Gas-Chemosensoren.

Für die Erfüllung der in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Datenanforderungen kommen insbesondere (binäre) Positionssensoren infrage. Daher sollen im Folgenden zunächst Real-Time Locating Systems (RTLS) näher beschrieben werden, durch die eine laufende Positionsbestimmung erfolgt. Anschließend werden Systeme zur automatischen Identifikation beschrieben, mit denen die Anwesenheit eines Objekts an bestimmten Lesepunkten erfasst wird.

¹⁰⁹ vgl. Misra et al. 2021, S. 4ff.

¹¹⁰ vgl. Hesse und Schnell 2018, S. 25.

2.2.2 Real-Time Locating Systems

RTLS ermöglichen die Positionsbestimmung in geschlossenen Räumlichkeiten, z. B. bei intralogistischen Prozessen innerhalb von Produktions- und Lagerhallen, wo eine Ortung mittels GPS nicht in der geforderten Genauigkeit möglich ist.¹¹¹

Ein RTLS besteht im Wesentlichen aus drei Komponenten:

- Einem kleinen batteriebetriebenen Gerät auch genannt *Tag*, das an dem Objekt angebracht ist, das geortet werden soll.
- Eine Gruppe von Referenzpunkten oder *Anchors* mit bekannter, fixer Position und einem Ortungsmodul zur Berechnung des aktuellen Standorts des Objekts. Mithilfe einer Funkverbindung tauschen die Tags mit den Anchors Signale aus.
- Das *Ortungsmodul* errechnet anhand der Position der Anchors und einer oder mehrerer Charakteristiken des Signals, wie der Signalstärke oder der Übermittlungsdauer, die aktuelle Position des Tags.¹¹²

Ortungstechnologien:

Zur kabellosen Übertragung der Signale zwischen Tags und Anchors sind verschiedene Technologien im Einsatz. Obwohl optische und Ultraschall-Technologien prinzipiell für diese Aufgabe in Frage kommen, hat sich vor allem die Übertragung über Radiowellen auf Basis von Standards wie Bluetooth, WLAN und Ultra-Wideband (UWB) durchgesetzt. Bei der Auswahl eines Standards werden zumeist Kriterien wie Positionsgenauigkeit, Energieverbrauch oder Kosten herangezogen.

WLAN wird sowohl im industriellen als auch im nicht-industriellen Umfeld sehr häufig eingesetzt, um in Form eines lokalen Netzwerkes Geräten eine Internetverbindung zu ermöglichen. Aufgrund der sehr weiten Verfügbarkeit und der guten Widerstandsfähigkeit gegenüber Bedingungen ohne direkte Sichtverbindung (engl. Non-Line-of-Sight oder NLOS) bietet sich auch der Einsatz als RTLS an. Dafür werden in der Regel bestehende Router als Referenzpunkte genutzt. Zur Verfolgung der Objekte können beispielsweise WLAN-fähige Geräte wie Mobiltelefone oder spezielle Tags eingesetzt werden.¹¹³

Bluetooth ist ein Standard, der auf Peer-to-Peer-Kommunikation über kurze Distanz mit geringem Energieverbrauch ausgelegt und vor allem in der Unterhaltungselektronik sehr beliebt ist. Ähnlich wie mit WLAN können daher bereits verfügbare Bluetooth-fähige Geräte wie Mobiltelefone eingesetzt werden. Falls das nicht möglich ist, sind auch günstige und energieeffiziente Bluetooth-Chips erhältlich. Bei

¹¹¹ vgl. Harris et al. 2019, S. 6.

¹¹² vgl. Toro et al. 2021, S. 26.

¹¹³ vgl. ebenda, S. 34.

ausreichender Dichte an Anchors kann Bluetooth auch in NLOS-Bedingungen eingesetzt werden.¹¹⁴

UWB basiert auf Signalen mit einer Bandbreite, die größer als 0,5 GHz oder 20% der Mittenfrequenz ist. Dadurch werden hohe Datenübertragungsraten auf kurzen Distanzen ermöglicht. UWB zeichnet sich insbesondere durch eine hohe räumliche Auflösung von wenigen Centimetern bei Sichtkontakt aus. Wichtig für die Erfüllung dieser Genauigkeit ist, dass Signale, die auf dem Weg zwischen Tag und Anchor abgelenkt wurden, herausgefiltert werden. Dies ist zwar prinzipiell möglich, erfordert aber eine ausreichende Zahl an Anchors, um stets eine Übertragung mit Sichtkontakt sicherzustellen.¹¹⁵

Radio Frequency Identification (RFID) ist eine Übertragungstechnologie, die ebenfalls oft in Verbindung mit RTLS genannt wird. Im Unterschied zu den anderen Technologien lässt sich mit RFID die Position der Tags lediglich punktuell bestimmen, da das RFID-Lesegerät nicht die Entfernung des Tags erfassen kann. RFID ist vor allem auf die Identifikation ausgelegt (siehe Kapitel 2.2.3), die Ortung kann nur indirekt über den Standort des Lesegeräts und den Kontext erfolgen.¹¹⁶

Tabelle 2 zeigt eine Gegenüberstellung wesentlicher Kriterien der einzelnen Technologien. WLAN und Bluetooth ermöglichen zwar keine so genaue Ortung wie UWB, dafür sind sie robuster gegenüber Sichtbehinderungen. Bluetooth hat außerdem gegenüber WLAN den Vorteil günstigerer Hardware und geringeren Energieverbrauchs. Es ist zudem zu berücksichtigen, dass bei WLAN die nötige Infrastruktur häufig schon vorhanden ist. UWB-Lösungen können eine um Größenordnungen genauere Ortung bieten, als mit den anderen Technologien möglich wäre. Sie erfordern dafür jedoch einen höheren Investitionsbedarf, da die Komponenten teurer sind und außerdem mehr Anchors benötigt werden, um Sichtbehinderungen zu vermeiden.

Tabelle 2: Eigenschaften der RTLS-Technologien^{117 118}

Technologie	Kosten für Tag	Kosten für Modul	Genauigkeit	Energieverbrauch	NLOS-Empfindlichkeit
WLAN	Hoch	Hoch	~ 1-5 m	Hoch	Mittel
Bluetooth	Niedrig	Niedrig	~ 1-5 m	Niedrig	Mittel
UWB	Hoch	Hoch	~ 0.1-1 m	Hoch	Hoch
RFID	Niedrig	Hoch	~ 5-10 m	Niedrig	Niedrig

¹¹⁴ vgl. Toro et al. 2021, S. 34f.

¹¹⁵ vgl. ebenda, S. 35f.

¹¹⁶ vgl. ebenda, S. 33f.

¹¹⁷ vgl. Rácz-Szabó et al. 2020.

¹¹⁸ vgl. Toro et al. 2021, S. 33.

Die von den Anchors empfangenen Signale müssen vom Ortungsmodul anhand ihrer Stärke, ihrer Übertragungsdauer oder ihres Eintreffwinkels analysiert werden, um die Position des Tags zu bestimmen. Die Tags können dabei als Empfänger und/oder Sender von Signalen agieren. Die Ortung geschieht anhand eines oder mehrerer der folgenden Prinzipien:¹¹⁹

- **Two-Way-Ranging (TWR):** Bei dieser Technik sendet der Anchor eine Nachricht an den Tag und erhält nach einer gewissen Zeit eine Antwort von diesem. Die Distanz zwischen Anchor und Tag kann dann anhand der Zeit, die dieser Austausch benötigt, berechnet werden. TWR erlaubt eine leichte Implementierung, da die Referenzpunkte nicht synchronisiert werden müssen. Allerdings ist die Anzahl der Tags, die eingebunden werden können, limitiert.
- **Time of Arrival (ToA):** Hierbei wird ebenso die Distanz zwischen Tag und Anchor durch Messen der Übertragungszeit errechnet. Im Unterschied zu TWR sind hier die Referenzpunkte synchronisiert und verschicken Datenpakete mit Zeitstempeln. Anhand der Informationen der einzelnen Anchors wird die Position des Tags mithilfe von Trilateration berechnet.
- **Angle of Arrival (AoA):** Bei dieser Methode wird die Position anhand des Winkels des eintreffenden Signals abgeschätzt. Die genaue Position wird dann mithilfe der Winkel zu mehreren Referenzpunkten (mindestens drei für dreidimensionale Ortung) durch Triangulation errechnet. Dies hat zum Vorteil, dass keine Synchronisation der Anchors erforderlich ist. Andererseits wird komplexe Hardware mit Antennengruppen und hoher Präzision benötigt.
- **Time Difference of Arrival (TDoA):** Hierbei sendet der Tag ein Signal an mehrere Anchors aus, wodurch dessen Position anhand des Zeitunterschiedes zwischen dem Eintreffen der Signale an den verschiedenen Referenzpunkten bestimmt werden kann. Im Vergleich zu TWR können mehr Tags länger im Betrieb sein, da weniger Datenpakete verschickt werden müssen. Anders als bei ToA müssen nur die Referenzpunkte zueinander synchronisiert sein. Ein Nachteil gegenüber ToA und AoA ist, dass ein Referenzpunkt mehr benötigt wird, also z. B. vier Punkte für dreidimensionale Ortung.
- **Fingerprinting:** Bei dieser Technik wird das Profil des erfassten Signals mit verschiedenen bereits aufgezeichneten Profilen verglichen, um die Position des Tags zu bestimmen. Dazu wird in der Regel die sog. Received Signal Strength (RSS) herangezogen, um die Stärke des Signals auszuwerten. Die Erstellung der dafür nötigen Datenbank bringt einen erhöhten manuellen Aufwand mit sich, der eventuell regelmäßig wiederholt werden muss, um die Datenbank an Umgebungsveränderungen anzupassen. Vorteilhaft ist allerdings die Möglichkeit, praktisch unlimitiert Tags anzubinden.

¹¹⁹ vgl. Toro et al. 2021, S. 37ff.

Industrieller Einsatz:

RTLS bieten verschiedene Einsatzmöglichkeiten in der industriellen Fertigung. Im Bereich der Produktionsplanung und -steuerung ist z. B. die Überwachung und Optimierung von Durchlaufzeiten und das Erkennen von Stauungspunkten von Interesse. Durch die Ausstattung von Halbfertigprodukten mit RTLS-Tags wird die Nachverfolgung innerhalb der Produktion möglich. Hieraus lassen sich die folgenden Informationen ableiten:¹²⁰

- Die Zeit, die ein bestimmtes Produkt an einer Arbeitsstation verbringt,
- Die Bearbeitungsreihenfolge,
- Welche Produkte in Nacharbeit oder Qualitätssicherung sind oder waren,
- Durchschnittliche Durchlaufzeit eines Produkttyps,
- Echtzeit-Status der Güter in der Produktion.

In der Logistik lassen sich kürzere Durchlaufzeiten und Effizienzgewinne durch die Verfolgung der Bewegungen von z. B. Gabelstaplern oder Hubwagen erreichen. Informationen, die dadurch gewonnen werden können, sind:¹²¹

- Routen und Verweilzeiten in bestimmten Bereichen,
- Geschwindigkeiten der Gabelstapler,
- Auslastung der Gabelstapler,
- Daten für vorausschauende Instandhaltung.

Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich beispielsweise noch für das Qualitätsmanagement, da Ursachen für Fehler besser rückverfolgt werden können, oder für die Arbeitssicherheit, da der Einsatz persönlicher Schutzausrüstung sowie die Kontakte zwischen Mitarbeitern nachvollzogen werden können.¹²²

Aktuelle Herausforderungen:

Probleme in Bezug auf die Genauigkeit treten vor allem durch Signale auf, die nicht auf direktem Weg zwischen Tag und Anchor verlaufen, sondern dazwischen abgelenkt werden und deren Übertragung dementsprechend länger dauert. Diese können die direkten Signale dämpfen und bei zeitbasierten Ortungsmethoden die Messungen verfälschen. Dies ist besonders schwerwiegend, wenn keine direkte Sichtverbindung zwischen Anchor und Tag besteht (siehe Abbildung 14). Dieser Effekt kann durch Erhöhung der Anzahl an Referenzpunkten minimiert, aber nicht komplett vermieden werden. Im industriellen Umfeld ist die Vorhersage der Genauigkeit eines RTLS besonders schwierig, da eine Reihe von Störfaktoren zu erwarten sind. Dazu gehören

¹²⁰ vgl. Rácz-Szabó et al. 2020.

¹²¹ vgl. ebenda.

¹²² vgl. ebenda.

beispielsweise metallische Objekte, sich bewegende Menschen und Objekte, elektromagnetische Störsignale und Interferenzen durch andere drahtlose Geräte.¹²³

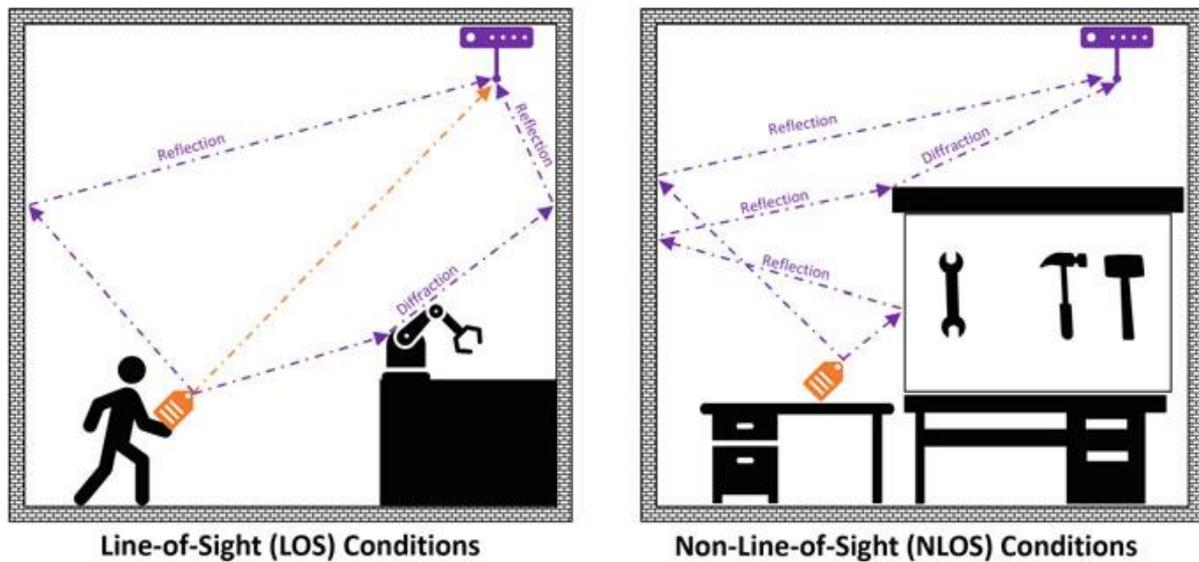


Abbildung 14: Signalübertragung bei unterschiedlichen Bedingungen¹²⁴

Ein weiteres Hindernis bei der Einführung eines RTLS ist der Aufwand für Installation und Betrieb des Systems, da im Allgemeinen spezielle Hard- und Software dafür nötig sind. Außerdem müssen die bestehenden Prozesse angepasst werden, damit die Tags angebracht und wiederverwendet werden können. Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass durch die Einführung des RTLS die Privatsphäre des Personals gewahrt bleibt.¹²⁵

Aktuell werden mehrere Ansätze verfolgt, um die Genauigkeit der RTLS zu verbessern. Ein Ansatz ist die Hybridisierung der Systeme, indem entweder unterschiedliche Ortungsprinzipien, Arten von Sensoren oder RTLS-Technologien miteinander kombiniert werden. Diese Kombination mehrerer Datenströme ist zwar vielversprechend, sorgt aktuell aber noch für zusätzliche Kosten sowie Komplexität für Hard- und Software. Eine weitere Verbesserung kann die Filterung der Daten bewirken. Dadurch lassen sich stochastische Störungen in den Daten minimieren, die besonders dann entstehen, wenn der Tag in Bewegung ist. Filterung kann Störungen zwar nur abschwächen, dafür auch gut mit anderen Techniken kombiniert werden. Der Einsatz von Machine Learning zur Optimierung der Ortungsgenauigkeit ist ebenfalls Gegenstand zahlreicher Forschungen. Es wurden bereits verschiedenste Machine-Learning-Modelle für diesen Zweck erfolgreich getestet, wobei noch kein allgemein anwendbarer Algorithmus identifiziert wurde.¹²⁶

¹²³ vgl. Toro et al. 2021, S. 39ff.

¹²⁴ ebenda, S. 40.

¹²⁵ vgl. ebenda, S. 41f.

¹²⁶ vgl. ebenda, S. 42ff.

2.2.3 Automatische Identifikation

Definition und Grundlagen:

Die Identität eines Objektes bezeichnet im technisch-organisatorischen Sinne einen dem Objekt eigenen Merkmalsatz, der es erlaubt, dieses eindeutig zu erkennen und von anderen (gleichartigen) Objekten zu unterscheiden. Der Begriff Automatische Identifikation (Auto-ID) bezeichnet diverse Verfahren, die zur eindeutigen Identifizierung von Objekten und zur Erhebung sowie Übertragung der entsprechenden Daten dienen. Als Identifikationsmerkmale kommen prinzipiell sowohl natürliche als auch künstliche Merkmale in Frage. Zur Identifikation von Personen werden häufig natürliche Merkmale wie Fingerabdrücke erfasst, bei technischen Objekten ist dies z. B. anhand der einzigartigen Strukturen der Oberflächen von Gussteilen möglich. Im technisch-logistischen Bereich kommen jedoch vor allem künstliche symbolische Merkmale wie 1D-Barcodes, 2D-Matrix-Codes oder RFID zum Einsatz.^{127, 128}

In Produktionsunternehmen erfolgt die Kennzeichnung von Objekten in der Regel durch eine einfache numerische Zeichenfolge, einer sogenannten Material- oder Sachnummer. Diese Kennzeichnung ist in den meisten Fällen ausreichend zur Abwicklung der innerbetrieblichen Abläufe. Sie allein ermöglicht allerdings weder die Identifikation außerhalb des Unternehmens noch die Erfassung weiterer Informationen zum Objekt. Dazu wäre eine alphanumerische Zeichenfolge, deren Semantik interpretierbar ist, nötig. Eine weitere Information, die häufig mithilfe von Auto-ID-Systemen gespeichert und ausgelesen wird, ist der Zeitstempel des Lesepunktes. Dies ist vor allem nützlich für Überwachung und Nachvollziehung der Materialflüsse.¹²⁹

Optische Identifikationsmerkmale:

Als natürliches Merkmal für die Identifikation eines physischen Objekts ist insbesondere bei Gussteilen die Textur der Oberfläche geeignet. Dazu ist eine genügende Qualität der Bildaufnahme und Bildausleuchtung nötig. Außerdem sollten die Grenzen des aufzunehmenden Feldes sinnvollerweise optisch erkennbar sein. Für Sortieraufgaben, bei denen das Objekt nicht eindeutig identifiziert werden muss, können auch andere natürliche Merkmale, wie Gestalt, Gewicht oder Farbe herangezogen werden.¹³⁰

¹²⁷ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 11ff.

¹²⁸ vgl. Pistorius 2020, S. 13.

¹²⁹ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 13ff.

¹³⁰ vgl. ebenda, S. 20f.

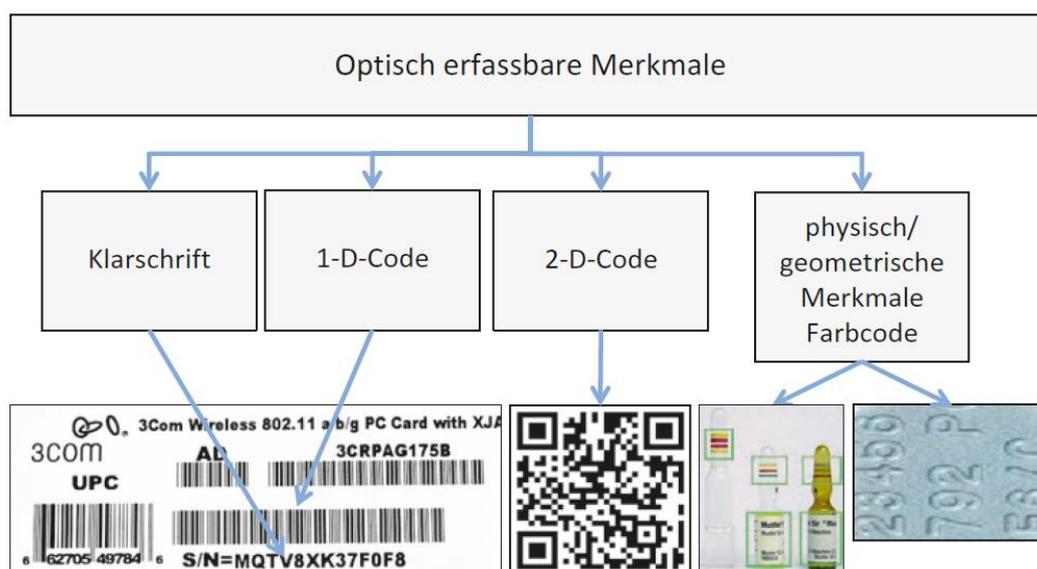


Abbildung 15: Optisch erfassbare Identifikationsmerkmale¹³¹

Optisch erfassbare, künstliche Merkmale nutzen ein Reflexionsmuster zur Kennzeichnung der Objekte. Die Zuverlässigkeit der Erfassung dieser Codes hängt vor allem vom Reflexionsgrad der hellen und dunklen Elemente und der Größe und Störungen der Bildelemente ab. Durch die hohen Rechenleistungen, die mittlerweile auch in kleinen Lesegeräten für die Bildauswertung zur Verfügung stehen, wirken sich andere technische Eigenschaften, wie die Art der Codierung weniger aus. Die zweidimensionale Codierung hat gegenüber den einfacheren Barcodes den Vorteil einer höheren Speicherkapazität und geringeren Fehleranfälligkeit. Die Arten und Spezifikationen der einzelnen Codierungen sind international genormt und somit weltweit anwendbar.^{132, 133} In Abbildung 15 sind Beispiele für die verschiedenen Arten optisch erfassbarer Identifikationsmerkmale zu sehen.

Die Identifikation optisch erfassbarer, künstlicher Merkmale erfolgt mithilfe des Scanner- oder Kameraprinzips. Bei (Laser-)Scannern wird die Oberfläche durch einen sich bewegenden, feinen Lichtpunkt abgetastet und die reflektierte elektrische Strahlung mit einem photoelektrischen Wandler aufgenommen. Besonders bei ortsfesten Geräten können mit diesem System sehr hohe Abtastraten von bis zu 2000 Hz erreicht werden, was diese Geräte für schnell bewegte Objekte z. B. im Rahmen der Materialflussautomation prädestiniert. Zu Problemen kann es bei Laserscannern kommen, wenn der abtastende Lichtstrahl in einem zu großen Winkel zum Barcode verfährt. In diesem Fall wird der Code zeitversetzt und nur in Teilen erfasst. Nur durch einen erheblichen technischen Aufwand kann aus diesen Fragmenten der gesamte Code wiedergewonnen werden. Aus diesem Grund haben sich für diese Anwendungen und insbesondere handgeführte Lesegeräte Kamera-Scanner

¹³¹ Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 22.

¹³² vgl. Pistorius 2020, S. 13.

¹³³ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 22f.

durchgesetzt. Ein Problem beider Prinzipien ist, dass der Code nur in einem bestimmten Entfernungsbereich korrekt erfasst werden kann.

Durch die Verfügbarkeit leistungsfähiger Mikroelektronik und LED-Beleuchtungstechnik kommen zunehmend Lesegeräte zum Einsatz, die nach dem Kameraprinzip arbeiten. Eine mögliche Bauform der Lesegeräte ist der „Zeilensensor“, der ähnlich wie ein Laser-Scanner eine einzige Bildzeile abtastet. Er kommt vor allem dort zum Einsatz, wo eine kleine Bauform oder hohe Abtastraten wichtig sind. Die andere Grundform ist der 2-D-Kamerachip, der dank immer besser werdender Auflösungen zunehmend an Bedeutung gewinnt. Diese Technik ermöglicht Farberkennung und bildet heute die Basis für eine Reihe moderner Code-Erfassungssysteme, die praktisch alle Arten von Codierungen verarbeiten können.¹³⁴

Elektronische Identifikationsmerkmale (RFID):

Bei RFID-Systemen werden Informationen auf einem Halbleiterchip gespeichert, der gleichzeitig einige Steuerungs- und Stromversorgungsfunktionen übernimmt. Dadurch ist es möglich, mehrere Kilobyte an Daten pro Tag zu speichern und sogar zu verschlüsseln, was im Vergleich zu optischen Identifikationsmerkmalen einen wesentlichen Vorteil bietet. Über eine mit dem Chip verbundene Antenne können die Informationen mit einem entsprechenden Lesegerät kontaktlos ausgelesen werden. RFID-Systeme können hinsichtlich ihrer Arbeitsfrequenzen in Hochfrequenz-Systeme (HF-Systeme) mit 125 kHz oder 13,56 MHz und Ultra-Hochfrequenz-Systeme (UHF-Systeme) mit 850 MHz oder 2,45 GHz unterschieden werden. Während HF-Systeme mittels induktiver Kopplung der Antennen von Tag und Lesegerät betrieben werden, strahlen bei UHF-Systemen die Antennen elektromagnetische Wellen aus. Für HF-Systeme ist somit die Ausbildung eines magnetischen Feldes zwischen Tag und Lesegerät wesentlich. Dies kann jedoch durch magnetisch aktive Gegenstände (ferromagnetische oder gut leitende metallische Materialien) hinter dem Tag gestört werden, sodass eine Kopplung und damit eine Identifikation nicht möglich ist. UHF-Systeme wiederum werden vor allem durch unter der Antenne liegende Objekte mit absorbierenden Eigenschaften gestört. Bei 870 MHz sind in erster Linie Kunststoffschichten, bei 2,45 GHz Flüssigkeiten mit einem hohen Wassergehalt problematisch. HF- und UHF-Systeme unterscheiden sich auch wesentlich in der maximal erreichbaren Leseentfernung. Während diese bei HF-Systemen weniger als einen halben Meter beträgt, können UHF-Systeme Funktionsreichweiten von bis zu 30 Metern erreichen. Durch Antennen mit Richtcharakteristik sind darüber hinaus räumlich abgegrenzte Strahlungsfelder möglich. RFID-Systeme können weiters in passive Systeme, bei denen der Tag das vom Lesegerät erzeugte, elektromagnetische Feld als Energiequelle nutzt, und aktive Systeme, bei denen die Tags eine eigene

¹³⁴ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 47ff.

Stromversorgung benötigen, unterteilt werden. In der produktionsnahen Logistik kommen zumeist passive Tags zum Einsatz.^{135, 136}

Die in der Logistik angewendeten Lese-Systeme lassen sich in drei Kategorien unterteilen:¹³⁷

- Handgeführte Geräte („Handterminals“),
- Systeme für automatisierte Materialflusssysteme mit geringen Anforderungen, wie Fördersysteme mit niedrigen Geschwindigkeiten und konstantem Leseabstand, Montagesysteme, Prüfsysteme etc.,
- Systeme für automatisierte Materialflusssysteme bei extremen Anforderungen, z. B. bei hohen Fördergeschwindigkeiten, großen Erfassungsabständen oder völlig unbestimmter Objektlage.

Industrieller Einsatz:

Mithilfe von Auto-ID lassen sich vielfältige Potenziale in der Produktion realisieren. Eine Studie aus dem Jahr 2018 kam zu dem Ergebnis, dass Unternehmen nach der Einführung der RFID-Technologie ihre Bestandsgenauigkeit, Materialverfügbarkeit und Bestellgenauigkeit wesentlich steigern konnten.¹³⁸ Dementsprechend deutlich ist auch der Anstieg der Anzahl der global eingesetzten Transponder, die 2010 noch auf 2,4 Milliarden geschätzt wurde und bis 2022 auf 125 Milliarden ansteigen soll.¹³⁹

Zentraler Einsatzbereich der RFID-Technologie ist die Logistik. Hier ergeben sich Effizienzsteigerungen beispielsweise dadurch, dass im Wareneingang mehrere Objekte im Pulk erfasst werden können oder der Standort von Behältern nachvollzogen werden kann. Darüber hinaus können Produkte entlang der Wertschöpfungskette verfolgt und deren aktueller Status abgerufen werden. Dies ermöglicht die Synchronisation von Prozessen, sowohl innerbetrieblich als auch zwischen Kunden und Lieferanten. Dies bewirkt auch eine größere Transparenz der internen Materialflüsse und Prozesse, da Durchlauf- und Aufenthaltszeiten erfasst und Abweichungen im Produktionsprozess erkannt werden können. Es wird sogar eine dezentrale Steuerung möglich, bei der die Ausgangsbauteile durch den RFID-Tag mit sämtlichen Daten beschrieben werden, die anschließend bei jeder einzelnen Station ausgelesen werden. Für die Qualitätssicherung ist ebenso die Nachverfolgbarkeit der Produkte interessant, da so Fehlerquellen identifiziert werden können. Die

¹³⁵ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 24ff.

¹³⁶ vgl. Pistorius 2020, S. 14.

¹³⁷ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 58.

¹³⁸ vgl. Auburn University 2018, S. 5ff.

¹³⁹ vgl. Pistorius 2020, S. 15.

Instandhaltung kann ebenfalls von RFID-Systemen profitieren, wenn Nutzungszeiten erfasst werden und die nötigen Ersatzteile schneller identifiziert werden können.^{140 141}

Ist der Einsatz von Auto-ID-Technologien geplant, müssen im ersten Schritt die Prozessketten und Materialflüsse der Produktion erhoben werden. Dies ermöglicht es, im nächsten Schritt Erfassungspunkte zu definieren, die den größten Nutzen für z. B. die Auftragssteuerung oder die Qualitätssicherung bieten. Für diese Punkte muss in weiterer Folge definiert werden, welche Daten erfasst und ausgegeben werden sollen und ob an diesem Punkt eine Objektkennzeichnung erforderlich ist. Um eine sinnvolle Kennzeichnung zu ermöglichen, muss eine Analyse der Stammdaten mit ihrem bestehenden Nummern- und Namensystem erfolgen und eine eindeutige Systematik zur Kennzeichnung bestimmt werden. Anschließend wird der Hardware-Aufbau ausgelegt. Dies umfasst einerseits die Art und Aufbringung der Identifikationsmerkmale und andererseits die Systemintegration. Für letztere bietet sich besonders der Einsatz kabelloser, über WLAN vernetzbarer Geräte an, die eine einfache Integration ins bestehende Firmennetzwerk ermöglichen. Software-seitig ist vor allem zu bestimmen, welchen Datenfluss das Lesegerät erzeugen soll und wie diese Daten gespeichert und für konkrete Anwendungen genutzt werden sollen.¹⁴²

¹⁴⁰ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 4ff.

¹⁴¹ vgl. Pistorius 2020, S. 14f.

¹⁴² vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 65ff.

3 State-of-the-Art

3.1 Datenerfassung für die Fabrikplanung

3.1.1 Bestehende Lösungsansätze

Datenerhebungen können sowohl mittels einer Primär- als auch einer Sekundärerfassung erfolgen. Bei einer Primärerfassung werden die Daten eigens für die Planung erzeugt, indem sie bei laufendem Betrieb erfasst werden. Eine Sekundärerfassung hat wiederum zum Ziel, die benötigten Daten aus vorhandenen Unterlagen zu ermitteln. Somit ist eine Sekundärerfassung im Allgemeinen mit weniger Aufwand verbunden und daher vorzuziehen, setzt aber eine ausreichende Verfügbarkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Daten voraus.¹⁴³ Dementsprechend muss zunächst geprüft werden, ob die Qualität der verfügbaren Unterlagen für den Anwendungsfall genügt. Dazu müssen die Daten auf Plausibilität, Vollständigkeit, Redundanz und Konsistenz geprüft werden.¹⁴⁴ Es ist allerdings festzuhalten, dass die Qualitätskontrolle und Nachbereitung der Daten in der Regel ebenfalls einen wesentlichen Aufwand erfordern, besonders wenn die Daten nicht ins eigentliche Planungsraster passen. Eine Auflistung möglicher Datenquellen für Materialflussanalysen ist z. B. der VDI-Norm 2689 zu entnehmen.¹⁴⁵

Bei einer Primärerhebung können die Daten mithilfe von Messungen, Beobachtungen, Befragungen oder Planwertverfahren (z. B. REFA, AWF oder MTM) ermittelt werden.¹⁴⁶ Für die Ableitung statistisch valider Aussagen aus stichprobenartig durchgeführten Beobachtungen kommen häufig Multimomentverfahren zum Einsatz. Beim Multimoment-Häufigkeitszähl-Verfahren wird das Vorkommen der verschiedenen Betriebszustände gezählt. Daraus können dann Abschätzungen für den Zeitanteil der verschiedenen Zustände inklusive deren Streumaßen getroffen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass keine sehr seltenen Betriebszustände auftreten. Bei dem Multimoment-Zeitmess-Verfahren werden zusätzlich zu den Zuständen auch die Zeitpunkte erfasst, um Abschätzungen für die Dauer von Vorgängen treffen zu können. Wichtig hierbei ist, dass die Beobachtungsintervalle klein genug gewählt werden, damit nicht einzelne Vorgänge zwischen zwei Beobachtungen übersehen werden.¹⁴⁷

¹⁴³ vgl. Grundig 2018, S. 59.

¹⁴⁴ vgl. Arnold und Furmans 2019, S. 255f.

¹⁴⁵ vgl. VDI 2689:2019-02.

¹⁴⁶ vgl. Grundig 2018, S. 59.

¹⁴⁷ vgl. Arnold und Furmans 2019, S. 263ff.

3.1.2 Relevante Publikationen

Neben den in Kapitel 3.1.1 beschriebenen, etablierten Methoden wurden im Rahmen einer systematischen Literaturrecherche aktuelle Ansätze zur Datenerfassung für die Fabrikplanung analysiert. Dazu wurde sowohl auf www.scopus.com als auch auf link.springer.com nach relevanten Publikationen aus den letzten zehn Jahren durch Verknüpfung der Suchbegriffe „factory planning“ und „data“ gesucht. Dies führte zu 53 bzw. 100 Suchergebnissen in den beiden Bibliotheken. In der folgenden Tabelle sind alle relevanten Publikationen aufgeführt. Zusätzlich lässt sich ablesen, mit welcher Methode die Datenerfassung durchgeführt wurde, für welches Anwendungsgebiet die Daten erhoben wurden und in welcher Form das vorgestellte Konzept praktisch umgesetzt wurde.

Tabelle 3: Publikationen zur Datenerfassung in der Fabrikplanung

Erstautor	Jahr	Methode zur Datenerfassung	Anwendungsgebiet	Umsetzung
Burggräf	2021	Daten aus BIM-System	Planung der Produktion und Medienversorgung	Industrie-Umgebung
Petschnigg	2021	Stationäre Laser-Scanner/ Photogrammetrie	Umplanung einer Fabrik	Industrie-Umgebung
Hellmuth	2020	Laser-Scan/Photogrammetrie mit Smartphone	Update von BIM-Modellen	Test-Umgebung
Melcher	2020	Laser-Scan/Photogrammetrie mit Drohne	Umplanung einer Fabrik	Simulation und Test-Umgebung
Dombrowski	2019	Daten aus Planungswerkzeugen und RTLS-/RFID-Daten	Produktionsanlauf	Test-Umgebung
Kim	2019	Infrarotsensoren	Layout-Rekonfiguration	Test-Umgebung
Mieth	2019	RTLS	Fabrik- und Produktions-optimierung	Konzept
Barth	2018	Photogrammetrie mit Drohne	Fabrikplanung	Industrie-Umgebung
Block	2018	NFC-Reader, Bar-/QR-Code-Scanner	Automatisierte Simulationserstellung	Test-Umgebung
Uhlemann	2017	RTLS, Bilderkennung	Digital Twin	Konzept für Test-Umgebung
Goerzig	2015	Plattform zur Datenverwaltung, MDE-Applikation	Fabrikplanung	Industrie-Umgebung
Hoffmann	2013	Daten aus IT-Systemen	Fabrikplanung	Industrie-Umgebung

Im Folgenden werden die oben angeführten Publikationen kurz vorgestellt.

Burggräf et al. (2021): Achieving Parametric Transparency in Model-Based Factory Planning

Ziel dieser Publikation ist es die Abstimmung zwischen der Fertigungsplanung und der Planung der Medienversorgung mithilfe von Building Information Modeling (BIM) Systemen zu erleichtern. Dazu wurde auf Basis von Interviews mit Experten aus verschiedenen Domänen ein Informationsmodell für die Planung einer Pumpe für Schneidflüssigkeit ein schematisches Informationsmodell entwickelt. Anhand dieses Modells ist es möglich, Softwaremodule zu programmieren, die einen automatischen Abgleich der Informationen aus den verschiedenen Planungsdomänen ermöglichen.¹⁴⁸

Petschnigg et al. (2021): From a Point Cloud to a Simulation Model – Bayesian Segmentation and Entropy Based Uncertainty Estimation for 3D Modelling

In diesem Artikel wird eine Methodik beschrieben, die eine teil-automatisierte Erstellung eines statischen 3D-Modells einer Fabrik ermöglicht. Dabei werden Punktwolken der Fabrik mithilfe von Laser-Scannern und Photogrammetrie erstellt. Diese werden mithilfe verschiedener statistischer Methoden zu einem 3D-Modell weiterverarbeitet. Die Methodik wurde anhand eines Anwendungsfalls in der Automobilindustrie validiert. Die Aufnahmen wurden dafür mit stationären Scannern in der produktionsfreien Zeit erstellt, um sich bewegende Objekte und die Verletzung der Privatsphäre der Mitarbeiter zu vermeiden. Das derart generierte 3D-Modell bietet im Falle einer Umplanung der Fabrik eine aktuelle Grundlage anhand der Planungsoptionen getestet werden können.¹⁴⁹

Hellmuth et al. (2020): Approach for an Update Method for Digital Factory Models

In dieser Publikation werden ebenfalls durch Laser-Scannen und Photogrammetrie 3D-Modelle von Objekten einer Fabrik erstellt, um die in BIM-Systemen gespeicherten 3D-Modelle aktuell halten zu können. Für die Aufnahme werden Smartphones eingesetzt. Es werden verschiedene Smartphones und Methoden zur Datenverarbeitung getestet und verglichen. Anhand der erhobenen Daten kann gezeigt werden, dass 3D-Modelle auch mithilfe kostengünstiger Hardware erstellt werden können.¹⁵⁰

Melcher et al. 2020: Automated Data Acquisition and Processing for Factory Layout Planning

¹⁴⁸ vgl. Burggräf et al. 2021.

¹⁴⁹ vgl. Petschnigg et al. 2021.

¹⁵⁰ vgl. Hellmuth et al. 2020.

Die Autoren dieser Publikation beschreiben eine Methodik, um mithilfe einer Drohne automatisiert ein 3D-Modell einer Fabrik zu erstellen. Dazu wird zunächst die Fabrik von einer manuell gesteuerten Drohne durchflogen, um den Aufbau der Fabrik soweit zu erfassen, dass im nächsten Schritt der 3D-Scan in einem autonom gesteuerten Flug möglich ist. Anschließend müssen die aufgenommenen Punktwolken noch durch Photogrammetrie zu 3D-Modellen verarbeitet werden. Die so entstehenden Modelle können in weiterer Folge in CAD-Systemen flexibel bearbeitet und angeordnet werden. Die Autoren konnten mit einem manuellen Flug bereits erste 3D-Modelle erstellen, ein automatisierter Flug wurde allerdings erst in einer Simulation erfolgreich getestet.¹⁵¹

Dombrowski et al. (2019): Bidirectional Data Management in Factory Planning and Operation

Diese Publikation legt den Fokus auf das Datenmanagement in der Phase des Produktionsanlaufs. In der vorgeschlagenen Methodik werden Daten aus den digitalen Werkzeugen für die Fabrikplanung mit Daten aus dem laufenden Betrieb kombiniert, um die Lücke zwischen Planungsdaten und Daten aus der realen Fabrik zu schließen. Dazu wurde in Interviews mit Experten eines Automobilproduzenten untersucht, welche realen Daten aus der Fabrik für den Produktionsanlauf besonders wichtig sind. Die Methodik wurde im Rahmen eines Workshops in einer Lernfabrik validiert. Dabei konnten die Teilnehmer mithilfe digitaler Planungswerkzeuge eine Produktion planen und bis zum Sollbetrieb anlaufen lassen. Nach Produktionsstart wurden die Daten aus den Planungswerkzeugen mit Echtzeitdaten von den RTLS- und RFID-Tags der Produkte, Betriebsmittel und Arbeitsstationen angereichert, sodass das Layout weiter optimiert und die Zeit für den Produktionsanlauf um 30% verkürzt werden konnte. Die Autoren weisen daher auf die Notwendigkeit hin, für einen erfolgreichen Produktionsanlauf sowohl digitale Planungswerkzeuge als auch Daten aus dem laufenden Betrieb heranzuziehen.¹⁵²

Kim et al. (2019): A Modular Factory Testbed for the Rapid Reconfiguration of Manufacturing Systems

In dieser Publikation wurde eine Lernfabrik entwickelt, die aus verschiedenen modularen Arbeitsstationen besteht, die beliebig angeordnet werden können. Änderungen im Layout der Fabrik werden dabei automatisch durch Infrarotsensoren erkannt. Dabei erkennt jede Station über das Infrarotmodul, wenn eine andere Station, an sie angeschlossen ist und übermittelt die Information an ein zentrales Koordinationsmodul. Die Änderungen werden dann über ein definiertes Nachrichtenprotokoll allen Stationen berichtet, sodass die Steuerungslogiken der Stationen und die Koordination zwischen diesen neu konfiguriert werden können. Auf

¹⁵¹ vgl. Melcher et al. 2020.

¹⁵² vgl. Dombrowski et al. 2019.

diese Weise können Rekonfigurationen des Fabriklayouts wesentlich schneller durchgeführt werden.¹⁵³

Mieth et al. (2019): A Survey on the Potentials of Indoor Localization Systems in Production

Die Autoren entwickelten anhand der Befragung von Experten aus Maschinenbauunternehmen ein fünf-stufiges Modell, um die Potenziale zu kategorisieren, die sich durch die Nutzung von RTLS für die Unternehmen ergeben. Es wurden folgende fünf Stufen identifiziert, die nach der Schwierigkeit ihrer Implementierung aufsteigend geordnet sind:

1. Prozesstransparenz: Aufzeichnung und Analyse von Prozesszeiten als Entscheidungsgrundlage für Produktionsleiter,
2. Assistenzsysteme: Assistenz für die Kommissionierung und Priorisierung in Lagern,
3. Fehlermanagement: Aufzeichnung und Vorhersage von Störungen im Produktionsprozess,
4. Optimierung: Aufzeichnung und Analyse von Materialflüssen zur Prozessoptimierung und Fabrikplanung,
5. Produktionssteuerung: Anpassung der Produktion durch (teil-)autonome Entscheidungen basierend auf Echtzeitdaten.

Das Modell soll Anwendern eine Grundlage bieten, um den nächsten Anwendungsfall für ihr RTLS auszuwählen.¹⁵⁴

Barth et al. (2018): Drohneneinsatz in der digitalen Fabrikplanung

Dieser Artikel befasst sich mit der Erstellung von 3D-Modellen mithilfe von Photogrammetrie auf Basis von Drohnenaufnahmen. Der Fokus liegt hierbei auf der Erfassung der Gebäude des gesamten Fabrikgeländes. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass mit der kommerziell verfügbaren Hard- und Software ein 3D-Modell der Fabrikgebäude in zufriedenstellender Qualität erzeugt werden kann. Allerdings muss für jeden Anwendungsfall geprüft werden, ob ein Drohnenflug in diesem Gebiet nicht eine Einzelerlaubnis benötigt.¹⁵⁵

Block et al. (2019): Digital Factory Implementation Approach Starting from the Macroscopic Perspective with an Example for Holistic Planning in Assembly Systems

In dieser Publikation wird ein Modell zur Implementierung einer Digitalen Fabrik in drei Phasen vorgestellt. In der ersten Phase wird auf Basis einer vordefinierten Syntax und

¹⁵³ vgl. Kim et al. 2020.

¹⁵⁴ vgl. Mieth et al. 2019.

¹⁵⁵ vgl. Barth und Michaeli 2018.

Semantik ein Simulationsmodell aus dezentral erfassten Daten erstellt. In der zweiten Phase wird eine halbautomatische simulationsbasierte Planungsunterstützung etabliert. In der letzten Phase ist das Produktionssystem aus verteilten cyber-physischen Systemen aufgebaut, die autonom Simulationen abrufen können. Die erste Phase wird in dieser Arbeit näher behandelt und durch die praktische Umsetzung in einer Montagezelle in einer Lernfabrik validiert. Die einzelnen Montagetische sind mit NFC-Readern und handgeführten Scannern ausgestattet, die Echtzeitdaten liefern. Diese Daten werden in einer vorgegebenen Struktur übergeben und von einer Simulationssoftware in ein Simulationsmodell übertragen. Der Nutzer kann dann in weiterer Folge das Modell ausführen, bearbeiten und auswerten.¹⁵⁶

Uhlemann et al. (2017): The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems

Ziel dieser Publikation ist es, die Vorteile und Umsetzungsmöglichkeiten eines Digital Twin anhand einer Lernfabrik zu demonstrieren. Dabei können Teilnehmer im Rahmen eines Workshops die Optimierung mit einer Wertstromanalyse einerseits und einem Digital Twin andererseits an der dortigen Produktion ausprobieren. Die Bewegungsdaten für den Digital Twin werden von einem RTLS und einem Bilderkennungssystem geliefert und in einer Cloud gespeichert. Anhand der Datenbasis aus der Cloud wird eine Simulation mit verschiedenen Optimierungsszenarien erstellt. Die Publikation beschreibt das Lernkonzept und den Aufbau des Digital Twins, der aber noch in der Lernfabrik implementiert werden muss.¹⁵⁷

Goerzig et al. (2015): Engineering Environment for Production System Planning in Small and Medium Enterprises

In dieser Publikation wird eine Plattform vorgestellt, die es mittelständischen Unternehmen erlauben soll, verschiedene Softwaretools und heterogene Datenquellen für die Fabrikplanung zu koordinieren und zu vereinen. Als zentrale Schnittstelle und Datenspeicher der Plattform dient Microsoft SharePoint aufgrund seiner niedrigen Investitionskosten und geringen Know-How-Anforderungen. Von diesem Portal aus werden die verschiedenen Softwaretools entweder lokal oder als Web-Applikation aufgerufen. Die Softwaretools umfassen ein Programm, das die Analyse von NC-Dateien zur Unterstützung der Prozessplanung ermöglicht, ein Programm zur Erstellung von Materialflussmodellen und ein Programm für das Erstellen und Ausführen von Simulationsmodellen. Darüber hinaus wird eine Web-Applikation zur Verfügung gestellt, mit der die Maschinenbediener ihre Aktionen sowie

¹⁵⁶ vgl. Block und Kühlenkötter 2019.

¹⁵⁷ vgl. Uhlemann et al. 2017.

Maschinenzustände aufzeichnen können, die z. B. genutzt werden können, um die Simulationsergebnisse zu validieren.¹⁵⁸

Hoffmann et al. (2013): Multi-Dimensional Production Planning using a Vertical Data Integration Approach

Die Autoren stellen eine Plattform vor, die Daten aus verschiedenen Geschäfts- und Produktionsprozessen sowie aus Simulationen zu einer gemeinsamen Datenbasis vereint. Dazu werden die Daten aus verschiedenen IT-Systemen und Ebenen auf der Automatisierungspyramide über ein Informationsmodell interpretiert. An diese Datenbasis wird darüber hinaus ein Softwaretool angebunden, das aus ERP-Daten die häufigsten Prozessketten analysiert und optimale Maschinenzuordnungen ermittelt.¹⁵⁹

3.2 Einsatz von Sensorsystemen für die Fabrikplanung

Nach der Recherche zu den aktuellen Methoden und Forschungsansätzen zur Datenerfassung in der Fabrikplanung wurde spezifisch nach Publikationen gesucht, bei denen Sensorsysteme für die Fabrikplanung eingesetzt werden. Dazu wurde nach Artikeln oder Conference Papers gesucht, die entweder den Begriff „factory planning“ oder „layout planning“ und einen der Begriffe "sensor", "rfid", "auto-id", "real-time locating system", "rtls" oder "indoor positioning" enthalten. Diese Suchen führten zu 18 Ergebnissen auf scopus.com und 190 Ergebnissen auf link.springer.com. Die dabei gefundenen relevanten Publikationen sind einschließlich der Methode zur Datenerfassung, dem Anwendungsgebiet und dem Stand der Umsetzung in Tabelle 4 aufgeführt.

¹⁵⁸ vgl. Goerzig et al. 2015.

¹⁵⁹ vgl. Hoffmann et al. 2013.

Tabelle 4: Publikationen zum Einsatz von Sensorsystemen für die Fabrikplanung

Erstautor	Jahr	Methode zur Datenerfassung	Anwendungsgebiet	Umsetzung
Guo	2021	SPS-Daten	Digital Twin zur Layoutplanung	Industrie-Umgebung
Kuwamoto	2020	Laser-Scanner	Simulation von Personenbewegungen	Büro
Peron	2020	3D-Mapping, RTLS, Motion Capture, Immersive Reality	Fabrikplanung	Test-Umgebung
Ajay	2019	PDM-System	Layoutplanung	Industrie-Umgebung
Pei	2017	Verkaufsmengen, RFID	Layoutplanung, Terminplanung	Konzept
Hurzig	2014	Sensorsysteme	Planung von Sensorsystemen	Konzept
Jiang	2014	AR-Brille	Layoutplanung	Industrie-Umgebung

Diese Publikationen werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Guo et al. (2021): A Digital Twin-Based Layout Optimization Method for Discrete Manufacturing Workshop

Die Autoren stellen eine Methodik zur Optimierung des Layouts einer Werkstattfertigung mithilfe eines Digital Twin vor, der die Echtzeit-Rückmeldungen aus der Produktion heranzieht, um eine selbstständige Anpassung des Layouts durchzuführen. Zur Umsetzung des Digital Twins wurden mehrere Sub-Frameworks entwickelt, die verschiedene Aspekte abdecken. Diese ermöglichen jeweils die Aufteilung der Werkstatt in verschiedene Bereiche, die Optimierung der Anordnung der Ausrüstungen und die Optimierung der Transportrouten. Das resultierende Gesamt-Framework besteht aus einer physischen Schicht mit den Ressourcen, Aktivitäten und den Sensoren, welche die Daten liefern, einer digitalen Schicht zur Verarbeitung der Daten und einer Schicht, die die Daten analysiert und Optimierungsentscheidungen trifft. Die Methodik wird anhand einer Schweißerei in einem Produktionsunternehmen validiert. Die Daten für den Digital Twin, wie das Layout, die Prozessrouten und die Produktions- und Logistikressourcen, werden aus den SPS übermittelt. In dem Praxisszenario konnten mithilfe der Methodik wesentliche Verbesserungen bezüglich der Produktionskapazität, der Bestände und der Arbeitsdauern erzielt werden.¹⁶⁰

Kuwamoto et al. (2020): Machine-learning-based People-flow Simulation for Facility Layout Planning

¹⁶⁰ vgl. Guo et al. 2021.

In dieser Publikation werden mithilfe von Laserscannern Personenbewegungen in einem Büro erfasst und daraus ein Simulationsmodell erstellt, anhand dessen die Layoutplanung unterstützt werden kann. Die von den Scannern ermittelten Positionsdaten werden verwendet, um ein Machine-Learning-Modell zu trainieren, das die jeweils nächste Position voraussagen kann. Dieses kann wiederum genutzt werden, um die Personenbewegungen zu simulieren. Durch das Experiment in einem realen Büro konnte gezeigt werden, dass die so erstellte Simulation sowohl die aktuelle Situation als auch den Effekt von Veränderungen im Layout zuverlässig wiedergeben kann.¹⁶¹

Peron et al. (2020): Digital Facility Layout Planning

In diesem Artikel wurde untersucht, welche Möglichkeiten verschiedene neuartige Technologien für die Fabrikplanung in Bezug auf die ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit bieten. Die untersuchten Technologien waren 3D-Mapping, RTLS, Motion-Capture und Immersive Reality (Augmented und Virtual Reality). Ihre Nützlichkeit für die Fabrikplanung wurde durch die Anwendung in einer Lernfabrik getestet und bewertet. 3D-Mapping ist besonders in der Realplanung hilfreich, um die Abmessungen der anzuordnenden Objekte zu erfassen. RTLS können eingesetzt werden, um die Materialflüsse in der Fabrik zu erfassen. Im Vergleich zu der klassischen Erfassung der Materialflüsse auf Basis der Stücklisten und Arbeitspläne, bieten RTLS den Vorteil, die realen Materialflüsse einschließlich Stauungen und Nacharbeiten abzubilden. Motion-Capture und Immersive Reality können bei der Planung der Arbeitsstationen zum Einsatz kommen. Die Kombination beider Technologien ermöglicht die Simulation und ergonomische Bewertung künftiger Arbeitsplätze und trägt so zur Verbesserung der sozialen Nachhaltigkeit bei.¹⁶²

Ajay et al. (2019): How to Establish Digital Thread Using 3D Factory

Die Autoren schlagen eine Methodik zur integrierten Planung von Produkten, Prozessen und Anlagen vor. Dabei wird das Fabriklayout auf Basis einer PDM-Software erstellt und verwaltet. Dies hat den Vorteil, dass die Änderungen in den Layouts über verschiedene Versionen nachvollzogen werden können. Die Objekte in dem Layout können anhand einer Stückliste erstellt und das Layout anschließend in der Umgebung für die Prozessplanung direkt genutzt werden. Durch die Implementierung konnten wesentliche Effizienzgewinne erzielt werden. Darüber hinaus wird auf die Möglichkeit verwiesen, die implementierte Methodik zu einem Digital Twin auszubauen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass über intelligente

¹⁶¹ vgl. Kuwamoto et al. 2020.

¹⁶² vgl. Peron et al. 2020.

Sensoren und Geräte eine Verbindung zwischen der physischen und digitalen Welt erzeugt wird.¹⁶³

Pei et al. (2017): Research on Design of The Smart Factory for Forging Enterprise in the Industry 4.0 Environment

In dieser Publikation wird eine Architektur und Methodik für eine intelligente Fabrik für ein bestimmtes Schmiedeunternehmen vorgeschlagen. Als Teil dieser Architektur wird ein etabliertes Vorgehen zur Layoutplanung basierend auf den Verkaufsmengen der Produkte und den bekannten Produktionsprozessen vorgestellt. Andere Elemente sind die Datenerfassung mit RFID-Sensoren, die Filterung der Daten durch Clustering-Methoden und die Terminplanung durch Genetische Algorithmen. Die Publikation bietet eine Vorlage für die Implementierung einer intelligenten Fabrik, die aber noch nicht umgesetzt wurde.¹⁶⁴

Hurzig et al. (2014): Methodological Implementation of Sensor Networks for Smart Manufacturing and Smart Factories

Diese Publikation bietet eine Methodik für Gestaltung und Betrieb von Sensornetzwerken zur Unterstützung von Fabrikplanung und Produktionsmanagement. Dazu wurden verschiedene Prozessmodelle, die unterschiedliche Aspekte der Sensorauswahl berücksichtigen, zu einer umfassenden Methodik kombiniert, anhand derer die Auswahl der Sensorsysteme ihren Anforderungen entsprechend erfolgen kann. Dabei können die Grenzen des Betrachtungsbereichs über ein hierarchisches Vorgehen flexibel gewählt werden und sowohl Top-Down als auch Bottom-Up gestaltet werden. Die Methodik ist noch auf einer Konzeptebene und wurde bisher noch nicht getestet oder in einem Softwaresystem implementiert.¹⁶⁵

Jiang et al. (2014): An AR-based Hybrid Approach for Facility Layout Planning and Evaluation for Existing Shop Floors

In diesem Artikel wird eine Methodik beschrieben, um durch Augmented Reality (AR) interaktiv digitale 3D-Modelle der Fabrik zu erstellen, die für den weiteren Planungsprozess genutzt werden können. Dabei kann der Anwender mithilfe einer AR-Brille die Abmessungen von realen Objekten durchführen, um in Kombination mit der Ortung der Brille im Raum, ein 3D-Modell der Fabrik zu erstellen. Darüber hinaus wird beschrieben, wie auf Basis dieser 3D-Modelle verschiedene Layoutvarianten automatisch oder manuell erstellt und bewertet werden können. Dabei wird über einen Analytic Hierarchy Process die Gewichtung der Kriterien für die Layouts bestimmt, die

¹⁶³ vgl. Ajay und Shashank 2020.

¹⁶⁴ vgl. Pei et al. 2017.

¹⁶⁵ vgl. Hurzig und Müller 2014.

entweder durch einen Genetischen Algorithmus oder manuell erstellt werden. Die Methodik wird außerdem in einem Praxisbeispiel evaluiert.¹⁶⁶

3.3 Fazit der State-of-the-Art-Recherche

Klassischerweise wird versucht die Planungsdaten für die Fabrikplanung aus bestehenden Daten und Dokumenten aufzubereiten. Ist dies aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit oder Qualität der Daten nicht möglich, sind Primärerhebungen nötig, wie z. B. durch Multimomentaufnahmen oder Planwertverfahren. Diese sind in der Regel aber mit einem größeren Aufwand verbunden. Außerdem besteht die Gefahr, dass seltener auftretende Ereignisse nicht berücksichtigt werden.

Aktuelle Forschungsansätze zur Datenerfassung für die Fabrikplanung beschäftigen sich einerseits mit der Integration verschiedener Datenquellen, wie ERP- oder BIM-Systemen, um eine umfassende Planungsumgebung zu schaffen, die unter anderem auch die integrierte Planung von Produkten, Prozessen und Anlagen ermöglichen soll. Andererseits wurden einige Ansätze zur Datenerfassung mit Sensoren beschrieben. Diese Ansätze haben zum Großteil das Ziel, 3D-Modelle der Fabrik zu erstellen, ohne die in der Fabrik ablaufenden Prozesse zu berücksichtigen. Dabei kommen insbesondere Laser-Scanner und Photogrammetrie zum Einsatz. Die dafür benötigten Scanner oder Kameras wurden entweder stationär, in Smartphones oder auf Drohnen installiert. In einer Publikation wurden die 3D-Modelle interaktiv mit einer AR-Brille erstellt. Die Publikationen beschäftigten sich dabei mit verschiedenen Ebenen der Fabrik von einzelnen Arbeitsplätzen bis hin zum gesamten Fabriksgelände.

RTLS bieten zwar vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für die Produktionsoptimierung, haben sich aber bislang noch nicht weitreichend etabliert (siehe Kapitel 2.2.2). Forschungsansätze für die Datenerfassung mit RTLS für die Fabrikplanung sind ebenfalls noch selten. Mieth et al. (2019) beschreiben verschiedene Potenziale, die mit RTLS erschlossen werden können, unter anderem auch die Aufzeichnung und Analyse von Materialflüssen zur Prozessoptimierung und Fabrikplanung. Dombrowski et al. (2019) stellen eine Methodik für das Datenmanagement während des Produktionsanlaufs vor, die Daten aus den Planungstools und Echtzeitdaten von RTLS- und RFID-Tags vereint und in einer Lernfabrik evaluiert wurde. Uhlemann et al. (2017) entwickelten ein Konzept für einen Digital Twin in einer Lernfabrik, der basierend auf RTLS und Bilderkennung Simulationen verschiedener Fabriklayouts ermöglicht. Peron et al. (2020) evaluierten neben 3D-Mapping, Motion-Capture und Immersive Reality auch den Nutzen von RTLS für die Fabrikplanung. Über den Einsatz in einer Lernfabrik kamen sie zum

¹⁶⁶ vgl. Jiang et al. 2014.

Schluss, dass die Analyse der Materialflüsse mit RTLS Vorteile gegenüber klassischen Methoden bietet.

Obwohl Technologien zur automatischen Identifikation in der industriellen Praxis besser etabliert sind als RTLS, existieren ebenso wenige Publikationen, die ihre Anwendbarkeit für die Fabrikplanung untersuchen. Dombrowski et al. (2019) setzen RFID-Systeme neben RTLS zur Ergänzung der Datenbasis ein. Bei Block et al. (2019) kommen Auto-ID-Systeme in einer Montagezelle einer Lernfabrik zum Einsatz, um die daraus gewonnenen Daten für die Erstellung einer Simulation zu verwenden.

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass es zwar einzelne Ansätze für den Einsatz von Sensoren zur Unterstützung der Fabrikplanung gibt, diese sich jedoch zumeist auf die Erstellung von statischen 3D-Modellen beschränken. Die Erfassung von Bewegungsdaten wird nur selten betrachtet, es wird aber in mehreren Publikationen auf das Potenzial von RTLS und RFID für die Erfassung von Materialflüssen und Prozessdaten hingewiesen. Dombrowski et al. (2019) konnten den Nutzen einer Materialflussoptimierung mit RTLS und RFID-Daten im Rahmen eines Planspiels zeigen. Ihre Methodik beschränkt sich allerdings auf die Optimierung während des Produktionsanlaufs und liefert kein konkretes Vorgehen, wie die Sensoren in eine bestehende Produktion integriert werden können. Der von Uhlemann et al. (2017) vorgestellte Digitale Zwilling einer Lernfabrik bietet zwar eine Architektur, um eine Simulation der Fabrik auf Basis von RTLS-Daten zu erstellen, aber kein Vorgehen für die Nutzung im Rahmen einer Fabrikplanung. Ähnliches gilt für Block et al. (2019), die dafür allerdings RFID-Daten nutzen. Guo et al. (2021) wiederum beschreiben eine Methodik zur datenbasierten Layoutoptimierung, gehen aber nicht näher auf die Möglichkeiten zur Datenerfassung ein. Eine Methodik, die die Erfassung von Bewegungsdaten mit Sensoren und deren Verwertung im Rahmen des Phasenmodells der Fabrikplanung beschreibt, konnte in dieser Recherche nicht gefunden werden.

4 Vorgehensweise

4.1 Bestimmung geeigneter Technologien

4.1.1 Datenanforderungen und -verfügbarkeit

Die in Kapitel 2.1.5 beschriebenen Datenanforderungen der Fabrikplanung sollen nun hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit und Qualität in bestehenden Informationssystemen und Dokumenten evaluiert werden. Darauf aufbauend kann anhand der in Kapitel 2.2 beschriebenen Technologiefähigkeiten bestimmt werden, welche der beschriebenen Sensortechnologien in Frage kommen, um diese Daten zu erfassen.

Aus dem Bereich der *Produktdaten* ist zu erheben, welche Produkte, in welcher Menge über die nächsten Jahre und zu welchen Kosten und Preisen hergestellt werden sollen. Eine weitere wichtige Information ist die Struktur der Produkte, die beispielsweise in Form einer Stückliste dargestellt werden kann. Diese Informationen sind in der Regel alle in einem ERP-System zu finden. Da ERP-Systeme mittlerweile auch in mittelständischen Unternehmen zum Standard geworden sind, kann davon ausgegangen werden, dass diese Daten in den meisten Unternehmen gut verfügbar sind. In Tabelle 5 sind die relevanten Produktdaten mit deren klassischen Datenquellen und deren Verfügbarkeit aufgeführt.^{167, 168}

Hinsichtlich der *Produktionsdaten* ist von Interesse, welche Fertigungsfunktionen, -module und -stufen die zu planende Fabrik beinhalten soll. Diese Daten sind im Allgemeinen aus ERP-Systemen erhebbar und somit gut verfügbar.¹⁶⁹ Darüber hinaus müssen die Technologien, Kapazitäten und Abmessungen der verschiedenen Produktions- und Logistikeinrichtungen ermittelt werden. Diese sind in den sogenannten Maschinendatenblättern zu finden. Da diese die Basis zur Bestimmung des Anlagevermögens sind, ist davon auszugehen, dass diese in der Regel vorhanden sind.¹⁷⁰

¹⁶⁷ vgl. Wannenwetsch 2021, S. 443.

¹⁶⁸ vgl. Bischoff et al. 2015, S. 257f.

¹⁶⁹ vgl. Wannenwetsch 2021, S. 443.

¹⁷⁰ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 452.

Tabelle 5: Verfügbarkeit der Produktdaten

	Datenanforderung	Bestehende Datenquelle	Verfügbarkeit & Qualität (Gut-Mittel-Schlecht)
Produktdaten	Produkte und Produktgruppen	ERP	Gut
	Ausbringungsmengen pro Produkt	ERP	Gut
	Herstellkosten und Preise pro Produkt	ERP	Gut
	Erzeugnisstruktur	ERP	Gut

Die Abfolge der einzelnen Bearbeitungsschritte und Planwerte für deren Rüst- und Bearbeitungszeiten werden im Allgemeinen im Arbeitsplan des Produktes dokumentiert. Existieren viele unterschiedliche Produkte, ist es allerdings nicht mehr möglich die Arbeitspläne einzeln auszuwerten, weshalb Belastungsdaten aus abgerechneten Aufträgen herangezogen oder Typenvertreter der einzelnen Produktfamilien bestimmt werden müssen.¹⁷¹ Arbeitspläne werden unter anderem in ERP-Systemen verwaltet.¹⁷² Da die Erstellung und Aktualisierung von Arbeitsplänen mit einem signifikanten manuellen Aufwand verbunden ist, erfüllen diese häufig nicht die geforderten Qualitätskriterien. In einer Studie der RWTH Aachen aus dem Jahr 2017 gaben nur 55% der Unternehmen an, dass diese zu mehr als 80% vollständig, korrekt und aktuell sind. Eine weitere Einschränkung für die Qualität der Arbeitspläne ergibt sich daraus, dass diese zum Großteil auf Erfahrungswerten basieren und nur in wenigen Unternehmen mithilfe von Rückmeldedaten validiert und aktualisiert werden.¹⁷³

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass sich die Bearbeitungsfolge der Produkte im Allgemeinen anhand der Arbeitspläne bestimmen lässt, die Qualität der Daten aber zum Teil mangelhaft ist. Dies betrifft insbesondere die Bearbeitungs- und Rüstzeiten, denen für die Fabrikplanung ebenfalls eine große Bedeutung zukommt. Wie in Kapitel 2.1.6 erläutert, können diese ähnlich wie Durchlaufzeiten zwar prinzipiell von MES bzw. MDE-/BDE-Systemen erfasst werden. Dies geschieht allerdings in vielen Unternehmen noch nicht oder nicht durchgängig oder basierend auf Strichlisten oder Tabellenkalkulationsprogrammen, was eine mangelhafte Datenqualität zur Folge hat. Besonders die Speicherung und Auswertung der Daten erfolgt nur sporadisch. Ähnlich verhält es sich mit den Belastungsdaten. Diese können zwar vereinzelt von modernen Maschinen erfasst und ausgewertet werden, die Zusammenführung der Belastungsdaten aus verschiedenen Quellsystemen scheitert allerdings häufig an der fehlenden Normung der Daten. Zumeist erfolgt die Kapazitätsverwaltung ohnehin mit Magnettafeln, Stecksystemen oder Tabellenkalkulationsprogrammen. Die aktuellen

¹⁷¹ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 452.

¹⁷² vgl. Wannewetsch 2021, S. 443.

¹⁷³ vgl. Schuh et al. 2017.

Bestände und deren Verläufe weisen dank Scan-Systemen und Lagerverwaltungssystemen (LVS) eine bessere Datenqualität auf. Dies gilt vor allem für abgeschlossene Lager, Bestandsdaten aus Lagern in der Produktion haben in der Regel eine geringere Qualität.¹⁷⁴

Die Materialflüsse innerhalb einer Fabrik sind im Allgemeinen nicht explizit in einem Informationssystem vorhanden, sondern müssen aus den Produktdaten und der Abfolge der Fertigungs- und Lagerprozesse abgeleitet werden.¹⁷⁵ Die hierfür relevanten Produktdaten, die Ausbringungsmengen und Erzeugnisstrukturen der Produkte, können meistens einem ERP-System entnommen werden, während die Informationen zu Fertigungs- und Lagerprozessen in Arbeitsplänen hinterlegt und somit von deren Qualität abhängig sind. Weitere nützliche Informationen sind die Losgrößen, in denen die Produkte produziert werden, sowie die Kapazitäten der Fördermittel.¹⁷⁶

Für die Optimierung der Produktionsprozesse und Materialflüsse muss darüber hinaus bekannt sein, wie die einzelnen Produktionsschritte organisatorisch verknüpft sind. Dazu gehören neben den Steuerungsprinzipien, nach denen die Teile durch die Produktion fließen und bereitgestellt werden, die Informationsflüsse, die zur Umsetzung der Produktionsplanung und -steuerung nötig sind. Diese Informationen können in einer Prozessdokumentation abgebildet werden, sofern das Unternehmen über eine solche verfügt. In einer Studie unter österreichischen und deutschen Unternehmen aus verschiedenen Branchen wurde ermittelt, dass rund 40% aller Unternehmen ihre Prozesse systematisch erfassen.¹⁷⁷ Ist keine entsprechende Dokumentation vorhanden, müssen diese Informationen erst in Form von Prozessaufnahmen z. B. durch eine Wertstromanalyse erhoben werden (siehe Kapitel 2.1.4). In Tabelle 6 sind die oben beschriebenen Datenanforderungen mit deren Verfügbarkeiten noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

¹⁷⁴ vgl. Bischoff et al. 2015, S. 260ff.

¹⁷⁵ vgl. Pawellek 2014, S. 172.

¹⁷⁶ vgl. Grundig 2018, S. 114.

¹⁷⁷ vgl. Thome et al. 2011.

Tabelle 6: Verfügbarkeit der Produktionsdaten

	Datenanforderung	Bestehende Datenquelle	Verfügbarkeit & Qualität (Gut-Mittel-Schlecht)
Produktionsdaten	Fertigungsfunktionen, -module und -stufen	ERP	Gut
	Technologien der Produktions- und Logistikanlagen	Maschinendatenblätter	Gut
	Kapazitäten der Produktions- und Logistikanlagen	Maschinendatenblätter	Gut
	Abmessungen der Produktions- und Logistikanlagen	Maschinendatenblätter	Gut
	Bearbeitungsfolge der Produkte	Arbeitspläne (ERP)	Mittel
	Produktions- und Materialflusststeuerung	Prozessdokumentation	Schlecht
	Durchlauf- und Prozesszeiten	MES	Schlecht
	Bestände	ERP, LVS	Mittel
	Flächenlayout	Gebäudeplan	Gut
	Materialflüsse	Arbeitspläne, ERP	Mittel
Belastungsdaten	MES	Schlecht	

Für die Materialflüsse ist ebenso ein räumlicher Bezug in Form eines Flächenlayouts nötig. Dieses kann anhand des Gebäudeplans schnell erstellt werden. Ähnliches gilt für die *Immobilien*daten. Diese gehen aus den Grundstücks- und Gebäudeplänen hervor, die nahezu immer vorhanden sind, da sie für die Errichtung der Fabrik bzw. Umbauten an dieser nötig sind. Tabelle 7 zeigt die Verfügbarkeit der benötigten Immobilien

Tabelle 7: Verfügbarkeit der Immobilien

	Datenanforderung	Bestehende Datenquelle	Verfügbarkeit & Qualität (Gut-Mittel-Schlecht)
Immobilien	Werksstruktur	Grundstücksplan	Gut
	Infrastrukturelle Anbindung	Grundstücksplan	Gut
	Gebäudestruktur	Gebäudeplan	Gut
	Konstruktionsraster	Gebäudeplan	Gut
	Hallenboden	Gebäudeplan	Gut
	Installationen	Gebäudeplan	Gut

4.1.2 Vorauswahl der Technologie

Kriterien:

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, sind im Allgemeinen bei der Erfassung der folgenden Daten Probleme in Bezug auf Verfügbarkeit oder Qualität zu erwarten:

- Bearbeitungsfolge der Produkte: Diese sollte zwar aus den Arbeitsplänen hervorgehen, oft ist die Qualität aber mangelhaft.
- Produktions- und Materialflusststeuerung: Informationen zu diesem Punkt sind häufig nicht explizit vorhanden und müssen daher erfragt werden.
- Durchlauf- und Prozesszeiten: Für Bearbeitungs- und Rüstzeiten gibt es zwar häufig Planwerte aus Arbeitsplänen, aber keine aktuellen Werte basierend auf Rückmeldedaten.
- Bestände: Bestandsdaten werden in abgeschlossenen Lagern besser dokumentiert, in Lagern in der Produktion ist die Datenqualität schlechter.
- Materialflüsse lassen sich bei überschaubarer Produktvielfalt über die Produktstrukturen und Bearbeitungsfolgen aus Arbeitsplänen errechnen. Bei größerer Vielfalt an Produkten können Belastungsdaten herangezogen werden. Dementsprechend gelten für die Materialflüsse die gleichen Einschränkungen wie für Arbeitspläne und Belastungsdaten.
- Belastungsdaten können von modernen Maschinen zwar erfasst werden, eine durchgängige, fabrikweite Erfassung ist allerdings sehr selten.

Die zentrale Anforderung an ein Sensorsystem für die Fabrikplanung ist somit die Fähigkeit, diese Daten zu erheben.

Darüber hinaus soll das Sensorsystem die Anforderungen der aktuellen Entwicklungstendenzen der Fabrikplanung zu erfüllen. In Kapitel 2.1.1 wurden die folgenden Entwicklungstendenzen beschrieben:

- Wandlungsfähige Fabrik,
- Digitale Fabrik,
- Globale Fabrikplanung,
- Fraktale Fabrik,
- „Rollende“ Fabrikplanung.

Um die *Wandlungsfähigkeit* der Fabrik zu fördern, muss das System die Kriterien Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität bestmöglich erfüllen. Universalität beschreibt die Fähigkeit zur Gestaltung und Dimensionierung für verschiedene Anforderungen hinsichtlich der Produkte oder Technologien. Mobilität ist bei der örtlich uneingeschränkten Bewegbarkeit von Objekten gegeben. Skalierbarkeit bezieht sich auf die technische, räumliche oder personelle Erweiter- und Reduzierbarkeit. Modularität wird mithilfe von standardisierten, funktionsfähigen

Einheiten oder Elementen realisiert. Kompatibilität beschreibt die Vernetzungsfähigkeit bzgl. Material, Information, Medien und Energie.¹⁷⁸

Ziel der *Digitalen Fabrik* ist die Planung und Evaluierung der Fabrik mithilfe von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.¹⁷⁹ Somit ist ein weiteres relevantes Kriterium für das Sensorsystem ein durchgängiges Datenmanagement. Dieses ist durch einen medienbruchfreien Datenaustausch zwischen allen Anwendungsprogrammen gekennzeichnet.¹⁸⁰ Um eine Datendurchgängigkeit innerhalb der Fabrik zu erreichen, sollen daher die Daten des Systems für andere Anwendungsprogramme möglichst gut verwendbar sein.

In Bezug auf die *Globale Fabrikplanung* ergibt sich durch den Einsatz eines Sensorsystems der Vorteil gegenüber Beobachtungen und Befragungen, eine objektive Methode zur Datenerhebung zu haben, die unabhängig von Sprache oder kulturellem Umfeld in jeder Fabrik eines Produktionsnetzwerks gleich anwendbar ist. Daraus wird geschlussfolgert, dass der Einsatz eines Sensorsystems an sich von Vorteil ist, unabhängig von dem gewählten System.

Um die flexible Kooperation selbstständiger Unternehmenseinheiten in einer *Fraktalen Fabrik* zu ermöglichen, ist eine hohe Informations- und Kommunikationsintensität nötig.¹⁸¹ Daraus ergibt sich die Anforderung an ein Sensorsystem eine Datendurchgängigkeit über die ganze Fabrik zu ermöglichen.

Das Sensorsystem sollte auf jeden Fall die laufende Anpassung der Fabrikanlage an das sich verändernde Umfeld im Rahmen der *rollenden Fabrikplanung* ermöglichen. Dazu muss es einerseits die Kriterien der Wandlungsfähigkeit erfüllen, um bei Anpassungen der Fabrik weiter einsatzfähig zu bleiben. Andererseits sollen Veränderungen in der Fabrikstruktur und -organisation, die sich im laufenden Betrieb ergeben, möglichst schnell erfasst werden können.

Die Entwicklung einer Lösung ist prinzipiell an produktbezogene Ziele, Terminziele und Kostenziele gebunden.¹⁸² Die Erfüllung der produktbezogenen Ziele wird anhand der oben beschriebenen Kriterien evaluiert. Das Terminziel für das Sensorsystem ist ein möglichst kurzer Zeitaufwand für die Installation und Inbetriebnahme, das Kostenziel sind möglichst geringe Kosten für die Komponenten des Systems. Dementsprechend werden als zusätzliche Kriterien der Zeitaufwand für Installation und Inbetriebnahme

¹⁷⁸ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 126.

¹⁷⁹ vgl. VDI 4499-1:2008-02.

¹⁸⁰ vgl. Bracht et al. 2018, S. 175.

¹⁸¹ vgl. Grundig 2018, S. 33.

¹⁸² vgl. Bender und Gericke 2021, S. 172.

und die Kosten für die Kosten des Systems evaluiert. Zusammenfassend werden für den Vergleich folgende Kriterien bewertet:

K1. Möglichkeit der Erfassung folgender Daten:

- K1.1. Bearbeitungsfolge der Produkte
- K1.2. Produktions- und Materialflusssteuerung
- K1.3. Durchlauf- und Prozesszeiten
- K1.4. Bestände
- K1.5. Materialflüsse
- K1.6. Belastungsdaten

K2. Wandlungsfähigkeit anhand der Teilkriterien:

- K2.1. Universalität
- K2.2. Mobilität
- K2.3. Skalierbarkeit
- K2.4. Modularität
- K2.5. Kompatibilität

K3. Durchgängiges Datenmanagement

K4. Möglichkeit, Veränderungen in der Fabrikstruktur und -organisation zu erkennen

K5. Zeit für Installation und Inbetriebnahme

K6. Kosten des Systems

Gewichtung der Kriterien:

Die Möglichkeit, die benötigten Daten zu erfassen, ist dabei eine unbedingt erforderliche Eigenschaft. Deshalb sollen nur Sensoren betrachtet werden, die diese Möglichkeit bieten. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, kommen dafür RTLS und Auto-ID-Systeme in Frage, die anhand dieser Kriterien verglichen werden sollen. Dafür müssen zunächst die Kriterien gewichtet werden. Hierfür eignet sich das Rangfolgeverfahren, bei dem paarweise verglichen wird, ob ein Kriterium wichtiger („+“), gleich wichtig („0“) oder weniger wichtig („-“) ist als ein anderes. Aus der Summe der „+“-Bewertungen je Zeile kann eine Rangfolge der Kriterien ermittelt und diese gewichtet werden.¹⁸³

Die Erfassung der benötigten Daten (K1) ist der zentrale Zweck des Sensorsystems und wird somit als wichtiger als alle anderen Kriterien bewertet. Die Wandlungsfähigkeit (K2) des Systems ist ebenfalls von zentraler Bedeutung, da das System die Fabrikplanung auch bei künftigen Anpassungen ohne großen Mehraufwand unterstützen können soll. Für diese Anforderung ist das Erkennen von Änderungen (K4) ebenso von Bedeutung weshalb K2 und K4 als gleichbedeutend eingestuft werden. Ein durchgängiges Datenmanagement (K3) ist eine Voraussetzung für die optimale Unterstützung des Fabrikbetriebs, kann aus Sicht der Fabrikplanung

¹⁸³ vgl. Bender und Gericke 2021, S. 322.

allerdings hinter die Kriterien der Wandlungsfähigkeit und rollenden Fabrikplanung zurückgestellt werden. Die Dauer für Installation- und Inbetriebnahme (K5) wird ebenfalls als weniger wichtig als die Wandlungsfähigkeit und Möglichkeit zur Erkennung von Änderungen angenommen, da es sich bei Ersterer um einen einmaligen Aufwand handelt und Letztere einen immer wiederkehrenden Aufwand adressieren. Dementsprechend wird auch die Durchgängigkeit des Datenmanagements (K3) als wichtiger als die Installationsdauer (K5) angenommen. Da Fabrikplanungen in der Regel mit einem sehr hohen Investitionsvolumen verbunden sind, werden die Kosten des Systems (K6) als am wenigsten wichtiges Kriterium festgelegt. Die hier erörterte Rangfolge der Kriterien wurde darüber hinaus durch die Befragung von Fabrikplanungsexperten von Fraunhofer Austria validiert.

Die einzelnen Sub-Kriterien der Datenerfassung (K1.1-K1.6) und der Wandlungsfähigkeit (K2.1-K2.5) werden jeweils gleich gewertet, da von keinem prinzipiellen Unterschied in ihrer Bedeutung ausgegangen werden kann.

Die Bewertung der Kriterien ist in der folgenden Tabelle dargestellt. Die Gewichtung erfolgt anhand der Anzahl der „+“ pro Zeile. Diese Anzahl wird mit 1 addiert, damit kein Kriterium vernachlässigt wird und das Ergebnis durch die Summe aller mit 1 addierten Zeilensummen dividiert, um das Gewicht des Kriteriums zu erhalten.

Tabelle 8: Rangfolgematrix der Bewertungskriterien

Kriterien	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Summe	Rangfolge	Gewicht
K1		+	+	+	+	+	5	1	30%
K2	-		+	0	+	+	3	2	20%
K3	-	-		-	+	+	2	4	15%
K4	-	0	+		+	+	3	2	20%
K5	-	-	-	-		+	1	5	10%
K6	-	-	-	-	-		0	6	5%

Bewertung der Technologien

Nach dem Festlegen der Gewichtung der Bewertungskriterien können die verschiedenen Technologien bewertet werden. Für die Bewertung wird eine Punkteskala von 0 bis 4 gewählt, um einen ausreichenden Detaillierungsgrad zu erreichen und eine Scheingenauigkeit zu vermeiden. Die Bewertungsstufen werden entsprechend der VDI-Norm 2225 definiert¹⁸⁴:

- 4: Sehr gut (ideal)
- 3: gut
- 2: ausreichend
- 1: gerade noch tragbar

¹⁸⁴ vgl. VDI 2225-3:1998-11.

- 0: unbefriedigend

K1.1: Die Bearbeitungsfolge der Produkte kann prinzipiell sowohl mithilfe von RTLS als auch Auto-ID erfasst werden.¹⁸⁵ Für den Einsatz von Auto-ID ergibt sich allerdings die Einschränkung, dass im Vorhinein Lesepunkte festgelegt werden müssen, wofür im Allgemeinen bereits Informationen über die Prozessketten und Materialflüsse nötig sind.¹⁸⁶ Sind die Lesegeräte installiert, können die Bearbeitungsfolgen über die Datenpunkte mit Ort, Identifikation und Zeitstempel errechnet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Tags oder Codes entweder manuell gescannt werden oder im Rahmen eines Logistikprozesses zu einem Lesegerät gebracht werden. Insgesamt kann Auto-ID mit zwei Punkten bewertet werden, da die Erfassung nur mit einigen Einschränkungen möglich ist. Bei RTLS entfallen diese Einschränkungen weitgehend. Allerdings müssen die Positionsdaten präzise genug sein, um den Tag einer Station im Produktionsprozess zuzuordnen zu können. Insgesamt wird RTLS mit drei Punkten bewertet, da die Bearbeitungsfolgen unter der Voraussetzung ausreichender Genauigkeit und einer entsprechenden Datenverarbeitung werden können.

K1.2: Informationsflüsse im Rahmen der Produktions- und Materialflusssteuerung können mithilfe der Sensoren nicht direkt erfasst werden. Auf die Steuerungsprinzipien, wie Losgrößen oder Dispositionsregeln, kann indirekt anhand von Bewegungsdaten geschlossen werden.¹⁸⁷ Daher werden beide Technologien mit je einem Punkt bewertet.

K1.3: Sowohl RTLS als auch Auto-ID-Systeme eignen sich zur Erfassung von Durchlauf- und Prozesszeiten. Beim Einsatz von Auto-ID wird über die Wahl der Lesepunkte bestimmt, welche Prozess- oder Durchlaufzeiten gemessen werden. Bei RTLS können – ausreichende Genauigkeit vorausgesetzt – ähnlich dazu die Zeiten ermittelt werden, indem die Positionsdaten verschiedenen Stationen zugeordnet werden.¹⁸⁸ Eine Einschränkung beider Systeme ist, dass im Allgemeinen nicht unterschieden werden kann, ob die Verweilzeiten bei einer Station das Ergebnis von Rüst-, Warte- oder Bearbeitungszeiten sind. Dementsprechend werden beide Technologien mit zwei Punkten bewertet.

K1.4: Es ist empirisch belegt, dass mithilfe von RFID-Systemen erhebliche Verbesserungen in der Genauigkeit der Bestandsdaten möglich sind.¹⁸⁹ Auch RTLS sind hierfür gut geeignet, da sie ohne manuelle Eingaben in Echtzeit Bestandsdaten liefern. Einzige Einschränkung ist, dass abhängig von der Größe der Teile eventuell nur Behälter mit mehreren Teilen verfolgt werden können.¹⁹⁰ Insgesamt sind beide

¹⁸⁵ vgl. Rácz-Szabó et al. 2020.

¹⁸⁶ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 65.

¹⁸⁷ vgl. Bergmann et al. 2017.

¹⁸⁸ vgl. Bergmann et al. 2020.

¹⁸⁹ vgl. Auburn University 2018.

¹⁹⁰ vgl. Toro et al. 2021, S. 27f.

Systeme also nahezu ideal, um zuverlässige Bestandsdaten zu liefern und werden folglich mit vier Punkten bewertet.

K1.5: Materialflüsse können durch das punktuelle Scannen bei Auto-ID-Systemen auf jeden Fall transparenter werden.¹⁹¹ Hier gilt allerdings wiederum die Einschränkung, dass die Lesepunkte vorher definiert werden müssen und dafür bereits Informationen zum Materialfluss nötig sind. RTLS bieten viele Vorteile für die Erfassung der Materialflüsse gegenüber klassischen Möglichkeiten, da auch Staubbildungen oder Abweichende Materialwege erkannt werden können.¹⁹² RTLS wird daher mit vier Punkten bewertet, während Auto-ID mit zwei Punkten bewertet wird, da nur eine punktuelle Erfassung an vorher definierten Orten möglich ist.

K1.6: Durch die Erfassung der Aufenthaltszeiten der Teile durch RTLS oder Auto-ID-Systeme können auch Rückschlüsse auf die Auslastungen der Produktions- und Logistikausrüstungen gemacht werden, bei denen die Tags geortet bzw. erkannt werden. Als Einschränkung ergibt sich hier wieder, dass sich im Allgemeinen mit keinem der Systeme erfassen lässt, wie groß der Anteil an Bearbeitungs-, Rüst- und Wartezeiten an der Auslastung ist. Daher werden beide Systeme mit drei Punkten bewertet.

K2.1: Universalität beschreibt die Möglichkeit das System für verschiedene Anforderungen oder Aufgaben einsetzen zu können.¹⁹³ Kennzeichnungen zur automatischen Identifikation lassen sich aufgrund ihrer geringen Größe leicht auf verschiedenartigen Teilen oder Behältern anbringen. Das Lesen der Kennzeichnungen kann zum Teil durch die Beschaffenheit des Teils oder Behälters behindert werden, was durch die Wahl des richtigen Funktionsprinzips aber vermieden werden kann.¹⁹⁴ Auto-ID-Systeme sind somit universell einsetzbar und können mit vier Punkten bewertet werden. Eine Einschränkung für den Einsatz von RTLS ist, dass die Tags größer und damit schwieriger auf Teilen oder Behältern zu montieren sind. Da sie ansonsten aber theoretisch überall zum Einsatz kommen können, solange eine ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann, werden sie mit drei Punkten bewertet.

K2.2: Einschränkungen hinsichtlich der Mobilität eines Auto-ID-Systems ergeben sich durch ortsfeste Lesepunkte, die für den Einsatz für die Fabrikplanung nötig wären, um den genauen Ort der Erfassung zu bestimmen. Ansonsten zeichnen sich beide Technologien durch eine sehr gute Mobilität aus, da die Tags oder Kennzeichnungen mobil ausgelegt sind. Daher wird RTLS mit vier Punkten und Auto-ID mit drei Punkten bewertet.

¹⁹¹ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 6.

¹⁹² vgl. Peron et al. 2020.

¹⁹³ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 126.

¹⁹⁴ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, S. 25.

K2.3: Die Anzahl der verfolgten Produkte kann mit beiden Technologien sehr flexibel erweitert werden, da dazu einfach neue Tags angebracht werden müssen. Auto-ID-Systeme haben gegenüber RTLS den Nachteil, dass für die Erweiterung der Stationen zusätzliche Lesepunkte installiert werden müssen.¹⁹⁵ Daher wird die Skalierbarkeit von RTLS mit vier und von Auto-ID mit drei Punkten bewertet.

K2.4: Modularität eines Systems wird durch standardisierte, funktionsfähige Einheiten oder Elemente erreicht.¹⁹⁶ Da jeder Tag bzw. jede Kennzeichnung unabhängig von den anderen Tags oder Kennzeichnungen funktionsfähig ist, wird die Modularität beider Systeme mit vier Punkten bewertet.

K2.5: Kompatibilität beschreibt die Vernetzungsfähigkeit bezüglich Material, Information, Medien und Energie.¹⁹⁷ Die Kompatibilität gegenüber dem Material, das nachverfolgt werden soll, hängt davon ab, wie einfach die Tags am Objekt angebracht werden können. Wie für Kriterium K2.1 beschrieben, sind hier Auto-ID-Systeme im Vorteil. Um die Informationsflüsse zu ermöglichen, können Auto-ID-Lesegeräte in der Regel über ein bestehendes Firmennetzwerk angebunden werden. Zusätzlich sind je nach Anwendung noch Schnittstellen zum ERP-System und/oder anderen Datenbanken nötig.¹⁹⁸ Ähnliche Herausforderungen bestehen auch für ein RTLS. Insgesamt wird daher RTLS mit zwei Punkten und Auto-ID mit drei Punkten bewertet, da letztere Technologie hinsichtlich der Materialkompatibilität im Vorteil ist.

K3: Um ein durchgängiges Datenmanagement zu ermöglichen, müssen die von dem System erzeugten Daten für alle Anwendungsprogramme verwendbar sein. Die von einem Erfassungsgerät für Auto-ID auszugebenden Daten umfassen in der Regel zumindest eine Kennzeichnung des erfassenden Gerätes, eine Kennzeichnung des erfassten Datensatzes, die vom Gerät gelesene Zeichenfolge, den Codetyp der Zeichenfolge und einen Zeitstempel.¹⁹⁹ RTLS übermitteln ähnliche Daten, wie die Position, eine Identifikationsnummer, einen Zeitstempel oder den Batteriestatus, als Zeichenfolgen, die ggf. in ein anderes Dateiformat gebracht und gefiltert werden.²⁰⁰²⁰¹ Insgesamt sind demnach beide Technologien einem durchgängigen Datenmanagement zuträglich, da sie innerhalb der ganzen Fabrik Daten liefern, die von anderen Anwendungen weiterverwertet werden können. Voraussetzung hierfür ist die entsprechende Formatierung der Daten. Daher werden beide Technologien mit drei Punkten bewertet.

¹⁹⁵ vgl. Rácz-Szabó et al. 2020.

¹⁹⁶ vgl. Wiendahl et al. 2010, S. 126.

¹⁹⁷ vgl. ebenda, S. 126.

¹⁹⁸ vgl. Hippenmeyer und Moosmann 2016, 69ff.

¹⁹⁹ vgl. ebenda, S. 70.

²⁰⁰ vgl. Slovak et al. 2019.

²⁰¹ vgl. Gyulai et al. 2020.

K4: Mithilfe von Auto-ID-Systemen können Änderungen in den Produktionsabläufen erkannt werden, indem z. B. erfasst wird, dass Produkte die Lesepunkte in einer anderen Reihenfolge durchlaufen. Das automatische Erkennen von Änderungen in der Fabrikstruktur, wie z. B. neue Plätze für Pufferlager, ist allerdings nicht möglich, da sich die Lesepunkte nicht von allein anpassen. Hier sind RTLS im Vorteil, da durchgehend aufgezeichnet wird, wo sich der Tag befindet, und somit neue Materialflüsse oder Änderungen des Layouts schnell erkannt werden können.²⁰² Dementsprechend wird RTLS mit vier Punkten bewertet und Auto-ID mit zwei Punkten, da das Erkennen von Layoutänderungen nicht unterstützt wird.

K5: Durch eine einfache, z. B. magnetische, Montage der Sensoren und die Vermeidung von infrastrukturellen Anpassungen ist ein sehr geringer Zeitaufwand für die Installation eines Ortungssystems möglich. Zusätzlich ist es ratsam kurze Funktionstests unter Laborbedingungen und am Einsatzort durchzuführen.²⁰³ Auch Auto-ID-Systeme können schnell implementiert werden, eine Standard-RFID-Lösung z. B. innerhalb weniger Wochen.²⁰⁴ Da beide Systeme einen relevanten, aber nicht übermäßigen Aufwand für die Implementierung aufweisen, werden sie mit je drei Punkten bewertet.

K6: Die Kosten des Systems lassen sich in Personal-, Hardware- und Softwarekosten unterteilen.²⁰⁵ Da die Personalkosten vom Aufwand für die Implementierung abhängig sind und damit indirekt schon im Kriterium K5 miteinbezogen sind, werden diese hier nicht gesondert betrachtet. Hinsichtlich der Softwarekosten wird von keinem Unterschied zwischen Auto-ID und RTLS ausgegangen, da beide Systeme ähnliche Daten zur Weiterverarbeitung liefern (siehe auch K3). Für die Hardwarekosten sind einerseits die Kosten der Tags und andererseits die Kosten der Lese- oder Ortungsmodule relevant. Bei Auto-ID-Systemen sind besonders die Kosten der Tags oder Codes besonders niedrig. Vergleichsweise teuer sind dagegen nur die RFID-Lesegeräte. Dies wiegt umso schwerer, da für jeden Identifikationspunkt ein Lesegerät nötig ist. Vergleichsweise kostengünstig sind RTLS-Tags und Anchors, die auf BLE basieren. Falls eine Genauigkeit von unter einem Meter gefordert ist, wird allerdings der Einsatz von UWB nötig sein, wodurch wesentlich höhere Kosten anfallen.²⁰⁶ Insgesamt lassen sich somit – besonders im Verhältnis zu den Investitionen für eine Fabrikplanung – die Kosten eines Auto-ID-Systems als gut (drei Punkte) bewerten. Da in bestimmten Fällen ein RTLS basierend auf BLE nicht ausreichend genau ist, wird RTLS mit nur zwei Punkten bewertet.

²⁰² vgl. Ruppert und Abonyi 2020.

²⁰³ vgl. Pascher, S. 112f, 137.

²⁰⁴ vgl. Deploying an RFID System: 20 Questions and Answers 2021.

²⁰⁵ vgl. Pascher, S. 68.

²⁰⁶ vgl. Rác-Szabó et al. 2020.

Tabelle 9: Bewertung der Technologien

Kriterium	Sub-Kriterium	RTLS	Auto-ID	Gewicht	Gewichtete Bewertung RTLS	Gewichtete Bewertung Auto-ID
K1	K1.1	3	2	5%	0,15	0,1
	K1.2	1	1	5%	0,05	0,05
	K1.3	2	2	5%	0,1	0,1
	K1.4	4	4	5%	0,2	0,2
	K1.5	4	2	5%	0,2	0,1
	K1.6	3	3	5%	0,15	0,15
K2	K2.1	3	4	4%	0,12	0,16
	K2.2	4	3	4%	0,16	0,12
	K2.3	4	4	4%	0,16	0,16
	K2.4	4	4	4%	0,16	0,16
	K2.5	2	3	4%	0,08	0,12
K3		3	3	15%	0,45	0,45
K4		4	2	20%	0,8	0,4
K5		3	3	10%	0,3	0,3
K6		2	3	5%	0,1	0,15
Summe		46	43	100%	3,18	2,72

In Tabelle 9 ist die Bewertung der Technologien in den verschiedenen Kriterien dargestellt. Die gewichtete Bewertung ergibt sich aus dem Produkt der Punktezahl und dem Gewicht jedes Kriteriums. Insgesamt erhält somit RTLS 3,18 und Auto-ID 2,72 von 4 maximalen Punkten. Daraus lässt sich schließen, dass RTLS für den Einsatz für die Fabrikplanung gut geeignet sind. Ein großer Vorteil von RTLS ist, dass diese nicht an fixe Lesepunkte gebunden sind. Dadurch können Produktionsabläufe und Materialflüsse schnell und flexibel erfasst werden. Somit werden auch Änderungen in der Fabrikstruktur oder -organisation schnell sichtbar. Auto-ID-Systeme haben andererseits den Vorteil kleiner, kostengünstiger Tags, die sehr leicht an Teile oder Behälter angebracht werden können. Größte Schwachstelle beider Technologien ist die Erfassung von Informationen zur Produktions- und Materialflusssteuerung, da es nicht möglich ist Informationsflüsse aufzuzeichnen.

Für die Auswahl einer RTLS-Technologie wurden bereits verschiedene Modelle entwickelt.²⁰⁷ Für deren Anwendung ist jedoch eine genaue Definition des Untersuchungsbereichs nötig, weshalb die pauschale Auswahl einer Technologie für alle Anwendungsfälle der Fabrikplanung nicht möglich ist. Um die benötigten Daten zu erfassen, muss die Technologie jedenfalls die nötige Genauigkeit und Reichweite erfüllen, um die Tags jederzeit einem Bereich zuordnen zu können.

²⁰⁷ vgl. Pascher, S. 31ff.

4.2 Ergänzung durch Kontextinformationen

4.2.1 Bedarf an Kontextinformationen

Ein RTLS liefert in regelmäßigen Abständen die Position der Tags und deren Identifikationsnummer. Um die in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Datenanforderungen zu erfüllen, sind demnach ergänzende Informationen nötig, um eine sinnvolle Planungsgrundlage zu schaffen.

Bestände:

Die Aufzeichnung der Bestände ist vor allem für (Zwischen-)Lager innerhalb der Produktion wichtig, da hier die Datenqualität schlechter ist als in abgegrenzten Lagern. Eine wichtige Information, um die Bestände in diesen Lagern zu erfassen, ist die Anordnung der Lagerplätze in der Fabrik. So kann unterschieden werden, ob ein Ort, an dem die Tags länger verweilen, ein Lagerplatz oder eine Bearbeitungsstation ist.

Durchlauf- und Prozesszeiten:

Analog zu den Bestandsdaten müssen zur Erfassung der Prozesszeiten der einzelnen Maschinen die Standorte der Maschinen in der Fabrik bekannt sein. Weiters sollte bekannt sein, welches Produkt gerade mit dem Tag verfolgt wird, um die Prozess- und Durchlaufzeiten für die verschiedenen Produkte erheben zu können. Dazu kann der ID des Tags z. B. eine Material-, Artikel- oder Typennummer zugewiesen werden, je nachdem welche Kennzeichnung verfügbar ist und den richtigen Detaillierungsgrad für den Anwendungsfall aufweist. Um die Durchlaufzeiten eines ganzen Auftrags zu erfassen, kann darüber hinaus auch eine Auftragsnummer sinnvoll sein.

Belastungsdaten:

Um Auslastungen der Maschinen zu ermitteln, ist ebenso Kenntnis über deren Standorte in der Fabrik nötig, um den Aufenthaltsort eines Tags einer Maschine zuordnen zu können. Um die Belastungsdaten nicht nur für den Aufzeichnungszeitraum, sondern auch für zukünftig erwartete Produktionsmengen ermitteln zu können, müssen weiters auch Absatzprognosen für den relevanten Zeitraum verfügbar sein. Darüber hinaus muss auch das Schichtmodell der jeweiligen Maschine erhoben werden, um neben der belegten Zeit der Maschine auch die theoretisch verfügbare Zeit zu ermitteln.

Die Auslastung der Transportmittel kann entweder durch Montage eines Tags auf dem Transportmittel erfolgen oder aus den Bewegungen des Materials geschlossen werden. Für letztere Variante ist es nötig zu wissen, welche Transportmittel sich auf welchen Routen bewegen oder welche Produkte befördern.

Bearbeitungsfolge der Produkte:

Zur Nachverfolgung des Produktionsablaufs eines Produktes ist es ebenfalls nötig, den IDs der Tags eine geeignete Nummer zu Produktidentifikation zuzuordnen. Durch die Festlegung der Lager- und Bearbeitungsstationen lässt sich so der Weg des Produkts durch die Fertigung verfolgen.

Materialflüsse:

Die Materialflüsse werden direkt durch die Aufzeichnung der Positionsdaten sichtbar und lassen sich anhand der Lage der Maschinen und Lagerplätze weiter analysieren.

Produktions- und Materialflusssteuerung:

Hinsichtlich der Produktionssteuerung können die Größen der einzelnen Lose erfasst werden. Dazu muss dem Tag eine Losnummer zugewiesen werden. Werden mehrere gleichartige Teile z. B. in einem Behälter mit demselben Tag verfolgt, muss die Menge der verfolgten Teile pro Tag bekannt sein.

Tabelle 10 fasst die oben beschriebenen Kontextinformationen noch einmal zusammen.

Tabelle 10: Kontextinformationen

Datenbedarf	Kontextinformation	Informationsquelle
Bestände	Lagerplätze in der Fabrik	Ist-Layout der Fabrik
Durchlauf- und Prozesszeiten	Standorte der Maschinen	Ist-Layout der Fabrik
	Material-/Artikel-/Typennummer	Laufzettel, Bar-/QR-Code
	Auftragsnummer	
Belastungsdaten	Schichtmodell	Befragung
	Absatzprognose	Befragung
	Transportmittel	Befragung
Bearbeitungsfolge	Material-/Artikel-/Typennummer	Laufzettel, Bar-/QR-Code
Materialflüsse	Lagerplätze und Maschinenstandorte	Ist-Layout der Fabrik
Materialfluss- und Produktionssteuerung	Losnummer	Laufzettel, Bar-/QR-Code
	Anzahl Teile pro Tag	

4.2.2 Einbindung der Kontextinformationen

Die nötigen Kontextinformationen lassen sich in zwei Kategorien einteilen. Einerseits sind Stammdaten nötig, die einmalig erfasst bzw. festgelegt werden können. Dazu zählen:

- Die Anordnung der Lagerplätze in der Fabrik,
- Die Anordnung der Maschinen in der Fabrik,
- Die Zuordnung der Transportmittel zu Routen oder Produkten,
- Absatzprognose der Produkte,
- Das Schichtmodell der verschiedenen Anlagen.

Diese können alle durch Befragung erhoben oder aus einem Gebäudeplan der aktuellen Fabrik abgelesen werden. Andererseits sind aber auch Bewegungsdaten nötig, die laufend den Tags neu zugewiesen werden müssen. Dazu zählen:

- Eine Nummer zur Zuordnung des Teiles oder Produkts, z. B. Material-, Artikel- oder Typennummer,
- Die Auftragsnummer,
- Die Losnummer.

4.3 Einsatz der Sensoren in der Fabrik

Im Folgenden sollen jene Schritte näher beschrieben werden, die nötig sind, um die Sensoren effizient einzusetzen und die gewünschten Daten zu erfassen. Abbildung 16 zeigt eine schematische Übersicht dieser Schritte.

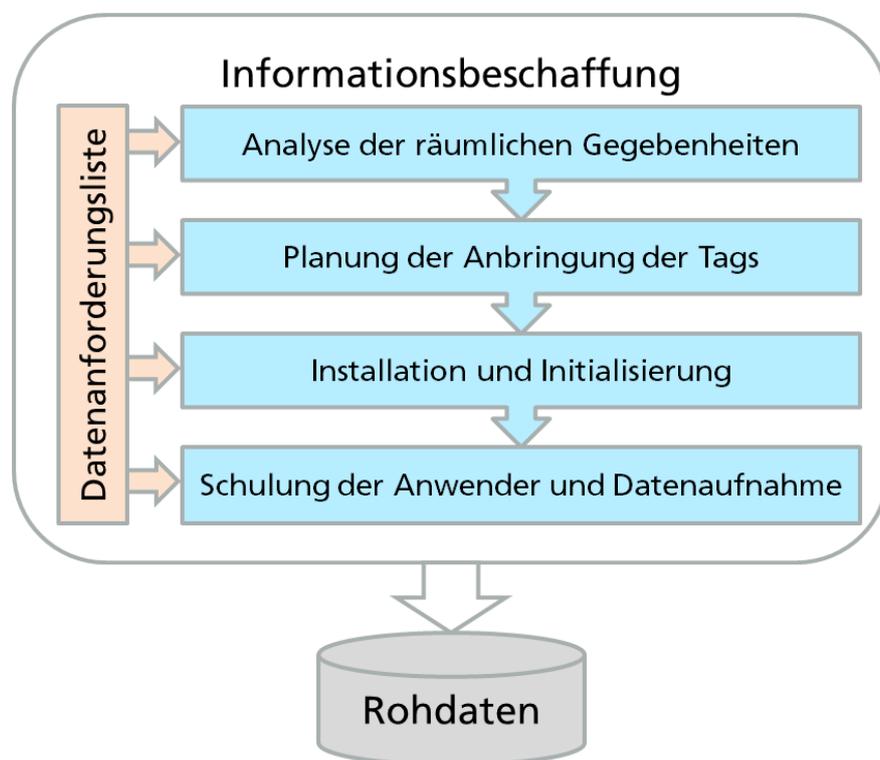


Abbildung 16: Methodik der Informationsbeschaffung²⁰⁸

4.3.1 Analyse der räumlichen Gegebenheiten

Für den ersten Schritt ist eine Darstellung des Fabriklayouts, z. B. als Gebäudeplan nötig. Anhand dessen lässt sich die nötige Genauigkeit und Reichweite der Ortung bestimmen, wodurch die Auswahl der idealen RTLS-Technologie möglich wird. Die Genauigkeit des RTLS-Systems sollte jedenfalls die eindeutige Zuordnung der Tags zu den Arbeitsplätzen, an denen sie sich befinden, ermöglichen. Dazu sollte im

²⁰⁸ Eigene Darstellung

Fabriklayout auch die derzeitige Anordnung der einzelnen Fertigungs- und Logistikbereiche erkennbar sein.

Weiters kann anhand des Fabriklayouts bestimmt werden, an welchen Punkten Anchors angebracht werden müssen. Diese müssen dabei ein Raster bilden, sodass die Tags innerhalb der Fabrik zu jedem Zeitpunkt geortet werden können. Dafür dürfen die Abstände zwischen den Anchors nicht größer sein als die Reichweite der Signale. Außerdem sollten die Anchors so hoch angebracht werden, dass möglichst durchgehend Line-of-Sight-Bedingungen gewährleistet werden können. Dazu können sie an geeigneten bestehenden Fabrikstrukturen oder auf Stativen befestigt werden. Falls möglich sollten die Anchors direkt an das Stromnetz angeschlossen werden. Andernfalls sollten die Batterien ausreichend dimensioniert sein, damit für den Zeitraum der Datenerfassung kein Batterietausch nötig ist.

Weiters kann es abhängig vom eingesetzten System nötig sein, zusätzliche Gateways zu installieren, die die Positionsdaten an eine Datenbank zur weiteren Verarbeitung übermitteln. Deren Installationsorte sollten bei der Planung der Anchors gleich mitberücksichtigt werden. Für diese ist ebenso ein notwendiges Kriterium, dass die Reichweite der Signale genügt, um die Datenübertragung durchgehend aufrecht zu halten. Außerdem benötigen die Gateways im Allgemeinen einen Anschluss an das Stromnetz sowie eine WLAN- oder LAN-Verbindung zu dem Server, mit dem sie kommunizieren.

4.3.2 Planung der Anbringung der Tags

Da die Tags die Bewegungen der Werkstücke durch die Fabrik abbilden sollen, werden diese falls möglich direkt an das Werkstück selbst oder an Transportbehälter mit einem oder mehreren gleichartigen Werkstücken befestigt. Die Befestigung an Behältern bietet einerseits den Vorteil mehrere Werkstücke mit einem Tag verfolgen zu können. Außerdem können die Tags so im Idealfall für alle verschiedenen Werkstücke eingesetzt werden, da die Einsetzbarkeit nur von der Geometrie der Behälter und nicht von den Werkstücken abhängt. In diesem Schritt muss demnach festgelegt werden, wie die Tags an den Werkstücken oder Behältern befestigt werden sollen.

Außerdem sind die Punkte in der Fabrik zu identifizieren, an denen die Tags an die Werkstücke oder Behälter angebracht und wieder abgenommen werden. Um die Produktionsabläufe vollständig zu erfassen, sollte das Anbringen möglichst bald nach dem Eintreffen der Werkstücke in der Fabrik und die Abnahme möglichst kurz vor dem Verlassen der Fabrik erfolgen. Idealerweise sind die Punkte des Anbringens und Abnehmens der Tags örtlich sehr nahe zueinander, um unnötige Transporte der Tags zu vermeiden. Andernfalls sollte die Rückführung der Tags mitberücksichtigt werden und z. B. mit den Transportbehältern erfolgen. Nach dem Abnehmen besteht die Möglichkeit, die Tags falls nötig neu aufzuladen.

Ein weiterer Fall, der im Allgemeinen betrachtet werden muss, ist die Zusammenführung verschiedenartiger Teile. Dazu sind zunächst die Punkte in der Fabrik zu identifizieren, an denen eine Zusammenführung erfolgt. An diesen Punkten müssen die nicht mehr benötigten Tags gemeinsam mit den leeren Behältern zum Punkt des Anbringens der Tags zurückgeführt werden.

Beim Anbringen der Tags müssen diese einem Produkt, einem Los und einem Auftrag zugeordnet werden. Dazu ist zunächst eine Analyse der Nummernsysteme in dem betrachteten Unternehmen nötig, um die geeigneten Arten von Nummern auswählen zu können, die den Tags zugeordnet werden sollen. Idealerweise kann dem Tag eine eindeutige Kennzeichnung des jeweiligen Teils zugewiesen werden, die im Nachhinein einem bestimmten Produkt, Los und Auftrag zugeordnet werden können.

4.3.3 Installation und Initialisierung

Die Anchors und Gateways können nun an der bestehenden Infrastruktur oder auf eigenen Ständern angebracht und angeschlossen werden. Nach der Installation der Anchors sind deren Positionen in der Fabrik in der Ortungssoftware zu hinterlegen, damit in weiterer Folge die Positionen der Tags errechnet werden können. Dazu kann z. B. das Fabriklayout in die Ortungssoftware hochgeladen werden.

Ein weiterer Parameter, der zu Beginn festzulegen ist, ist die Frequenz, mit der die RTLS-Signale gesendet werden sollen. Diese bestimmt die erreichbare zeitliche Auflösung der Ortung. Die Frequenz sollte einerseits möglichst niedrig gewählt werden, um den Stromverbrauch zu minimieren. Andererseits muss sie hoch genug sein, um alle Materialflüsse korrekt aufzuzeichnen. Der zeitliche Abstand zwischen zwei Ortungssignalen darf dafür maximal halb so groß sein wie die kürzeste Transportdauer. Dementsprechend kann die minimal nötige Frequenz wie folgt ermittelt werden:

$$f_{min} = \frac{v_{max}}{3,6 * d_{min}}$$

mit

f_{min} ... minimal nötige Ortungsfrequenz [Hz]

v_{max} ... Maximalgeschwindigkeit der Transportmittel [km/h]

d_{min} ... kürzeste Transportstrecke des Transportmittels [m]

Formel 1: Berechnung der minimalen Ortungsfrequenz

Die Eingangswerte für diese Formel können geschätzt werden und die Frequenz zur Sicherheit etwas höher angesetzt werden.

Schließlich ist auch der Punkt für die Anbringung und Registrierung der Tags einzurichten. Dazu kann dort ein mobiler Rechner aufgestellt werden, auf dem ein Mitarbeiter die Tags mit einer neuen Kennzeichnungsnummer versehen kann. Die Nummer kann dafür von dem Laufzettel abgelesen oder falls vorhanden durch Scannen eines Bar- oder QR-Codes erfasst werden.

4.3.4 Schulung der Anwender und Datenaufnahme

Nach der Einrichtung des Systems ist die Einschulung jener Mitarbeiter nötig, die für die Anbringung und Abnahme der Tags zuständig sind. Sie müssen in der Lage sein, die Software zu bedienen, mit der die Tags registriert werden, und außerdem Bescheid wissen, wann Tags angebracht und abgenommen werden sollen und wie diese bedient und aufgeladen werden können.

Die Dauer der Datenaufnahme sollte ebenfalls im Vorhinein festgelegt werden. Hinsichtlich der Datenqualität wäre eine Dauer von einem Jahr ideal, um alle saisonalen Effekte zu erfassen, was den zeitlichen Rahmen eines Fabrikplanungsprojektes aber klar überschreiten würde. Daher ist ein Kompromiss zwischen Datenqualität und Aufwand für die Umsetzung zu finden. Die Aufzeichnung sollte jedenfalls deutlich länger sein als die typische Durchlaufzeit der in der Fabrik erzeugten Produkte, um deren Produktionsablauf zumindest einmal komplett zu erfassen. Idealerweise werden mehrere komplette Durchläufe jedes Produkts erfasst, um abweichende Abläufe wie z. B. durch Nacharbeiten erkennen zu können. Sind kurzzyklische Schwankungen in der Produktion zu erwarten, empfiehlt es sich die Aufzeichnung lang genug durchzuführen, um diese Zyklen komplett zu erfassen zu können. Werden beispielsweise an bestimmten Wochentagen größere Mengen oder andere Produkte ausgebracht, sollte die Aufzeichnung mindestens eine Woche dauern.

Schließlich kann die Datenaufnahme starten. Während der Datenaufnahme ist neben der laufenden Registrierung neuer Tags im Allgemeinen nur ein neues Starten der Aufzeichnung am Beginn einer neuen Schicht nötig, falls das System nach der letzten Schicht heruntergefahren wurde.

4.3.5 Datenanforderungsliste

Aus den oben genannten Schritten für den Einsatz des Sensorsystems, lässt sich folgende Liste an Informationen ableiten, die für die Implementierung des Systems nötig sind und vom betrachteten Unternehmen eingeholt werden müssen:

- Räumliche Gegebenheiten:
 - Fabriklayout mit Bereichen, Arbeitsplätzen und Entfernungen,
 - Anbindung von Strom-, LAN- oder WLAN-Netz,

- Befestigungsmöglichkeiten für Anchors,
- Befestigungsmöglichkeiten an Produkten oder Behältern,
- Ort der Produktkennzeichnung im Wareneingang,
- Orte, an denen Produkte zusammengeführt werden,
- Ort, an dem die Tags vor dem Versand abgenommen werden müssen,
- Vorhandene Nummernsysteme inklusive Kennzeichnung des bestimmten Teils, Produktnummer, Losnummer und Auftragsnummer,
- Kennzeichnung der Teile in der Fabrik (z. B. Laufzettel, Bar-/QR-Code),
- Maximale Geschwindigkeit der Transportmittel (geschätzt),
- Kürzeste Transportstrecken pro Transportmittel (geschätzt),
- Mitarbeiter, die für Anbringen und Abnehmen der Tags zuständig sind,
- Längste typische Durchlaufzeit der Produkte,
- Typische zyklische Schwankungen in der Produktion.

4.4 Nutzung der Sensordaten für die Fabrikplanung

Betrachtet man die Phasen der Fabrikplanung, so wird durch die Datenerfassung mit dem Sensorsystem die Phase der Informationsbeschaffung im Rahmen der Grundlagenermittlung unterstützt. Die von dem Sensorsystem generierten Daten müssen demzufolge noch verdichtet werden, um in weiterer Folge im Rahmen der Konzeptplanung ein Fabrikkonzept erarbeiten zu können (siehe Abbildung 17).



Abbildung 17: Phasen der Grundlagenermittlung und Konzeptplanung²⁰⁹

In diesem Abschnitt soll beschrieben werden, wie die erfassten Positionsdaten zu einem Prozess- und Materialflussmodell aufbereitet werden können. Dieses soll als Grundlage für die Erstellung von Layoutvarianten in der Ideal- und Realplanung dienen. Die dafür nötigen Schritte, Inputs und Outputs sind in Abbildung 18 dargestellt.

²⁰⁹ vgl. VDI 5200-1:2011-02.

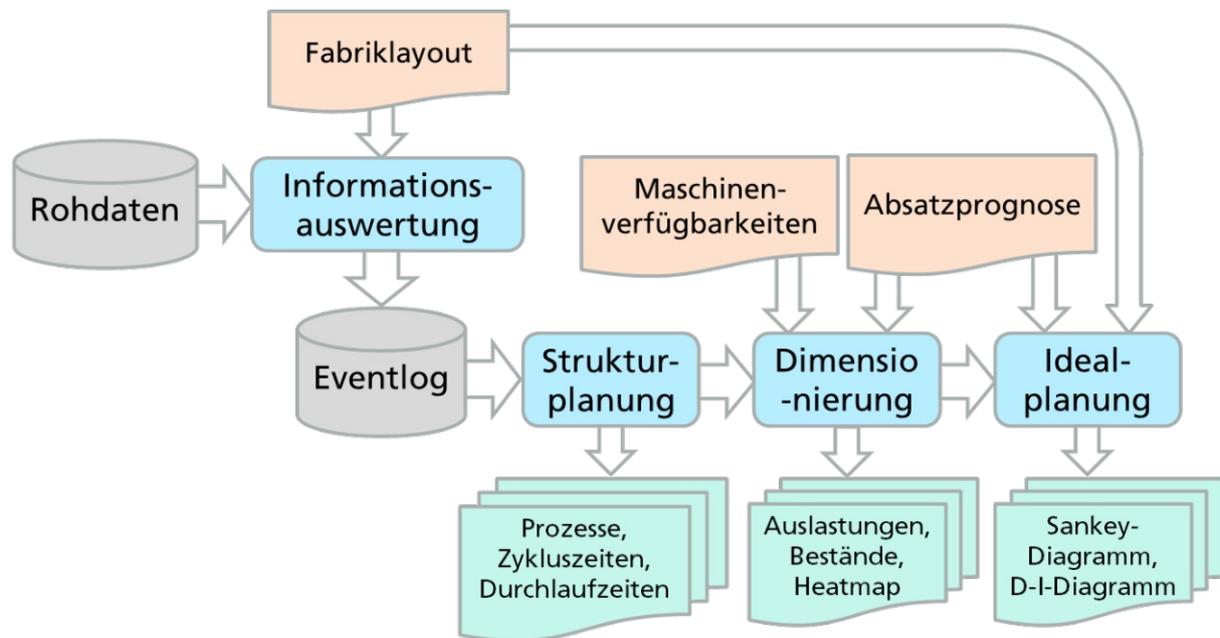


Abbildung 18: Methodik zur Nutzung der Sensordaten²¹⁰

4.4.1 Informationsauswertung

Ein RTLS-Sensor liefert in regelmäßigen Abständen Datenpunkte, die die Position des Sensors, dessen Identifikationsnummer und einen Zeitstempel enthalten. Um Informationen für die Fabrikplanung zu gewinnen, muss aus diesen Daten ermittelt werden, wann und wie lange, welches Teil, bei welcher Ressource war. In der einfachsten Form kann das erreicht werden, indem jeder Ressource ein Bereich zugewiesen wird. Somit kann anhand der Positionsdaten jeder Datenpunkt einer Ressource zugeordnet werden. Das Ergebnis ist dann ein Ereignisprotokoll oder „Event Log“. Dieser enthält, wie in Tabelle 11 dargestellt, die ID des Ereignisses, die ID des Tags, eine eindeutige Kennzeichnung des verfolgten Teils z. B. als Materialnummer, die benutzte Ressource und daraus abgeleitet den Vorgang, der stattgefunden hat, sowie den Zeitstempel von Start und Ende des Vorgangs.

Tabelle 11: Beispielhafte Struktur eines Event Logs²¹¹

Ereignis-ID	Tag	Material-Nr.	Ressource	Vorgang	Start	Ende
1	T1	M1	Fräse	Fräsen	09:00:00	09:35:00
2	T2	M2	Stapler	Transport	09:30:00	10:15:00
...

Bevor die weiteren Analysen durchgeführt werden, sollte an dieser Stelle die Qualität der erfassten Daten und des generierten Event Logs evaluiert werden. Durch Darstellung der Positionsdaten als Punktdiagramm oder als Heatmap über dem

²¹⁰ Eigene Darstellung

²¹¹ Eigene Darstellung

Fabriklayout kann überprüft werden, ob die Tags an den zu erwartenden Stellen geortet wurden oder es eine größere Zahl an Ausreißern gibt.

4.4.2 Strukturplanung

In der Strukturplanung wird die Abfolge der zur Wertschöpfung notwendigen Aktivitäten festgelegt, wodurch die Beziehungen der funktionalen Einheiten der Fabrik bestimmt werden.²¹² Dazu müssen zunächst aus dem Event Log die Prozesse jedes Produkts ermittelt werden. Bei einer großen Anzahl unterschiedlicher Produkte ist es sinnvoll, im Sinne einer besseren Übersichtlichkeit, Produktgruppen zu bilden. Falls nicht anders vorgegeben, können hierfür Produkte mit ähnlichen Produktionsabläufen zusammengefasst werden.²¹³

Die gefundenen Prozessmodelle können nun weiter ausgewertet werden, um Optimierungen für die Produktionsabläufe zu identifizieren. So ist es möglich, die Durchlauf- und Prozesszeiten der Arbeitsschritte und die Warte- und Transportzeiten zwischen diesen auszuwerten. Die Prozesszeiten ergeben sich aus der Differenz von Start- und Endzeit jedes Ereignisses, die Warte- und Transportzeiten aus der Differenz zwischen dem Ende des vorigen und dem Start des nachfolgenden Arbeitsschritts. Die Durchlaufzeit eines Produkts wird als Zeitdifferenz zwischen dem Eintreffen des Tags im Wareneingang und dem Verlassen des Warenausgangs errechnet. Lange Durchlauf- und Wartezeiten bei bzw. zwischen einzelnen Prozessschritten können auf Probleme im Produktionsablauf wie Bottlenecks hinweisen und die Stellhebel für die Verkürzung der Durchlaufzeit aufzeigen. Außerdem kann der Flussgrad als Verhältnis der Summe der Prozesszeiten der einzelnen Produktionsschritte zur Gesamtdurchlaufzeit eines Produkts ermittelt werden. Der Flussgrad beschreibt somit das Potenzial zur Reduktion der Durchlaufzeit.²¹⁴

Eine weitere aufschlussreiche Auswertung ist die Gegenüberstellung der Zykluszeiten der einzelnen Prozessschritte in Form des sogenannten Operator Balance Chart. Ziel dieser Auswertung ist es, ein Kapazitätsprofil über die verschiedenen Produktionsschritte zu erstellen und zu erkennen, welche Schritte zu schnell oder zu langsam zur Erfüllung des Kundenwunschs sind und wo der Engpass in der Produktion liegt. Die Zykluszeit entspricht dem Quotienten von Prozesszeit zu der Menge, die in einer Charge produziert wird, und ist ein wichtiger Indikator für das Kapazitätsangebot eines Produktionsprozesses.²¹⁵

²¹² vgl. VDI 5200-1:2011-02.

²¹³ vgl. Erlach 2020, S. 39f.

²¹⁴ vgl. Erlach 2020, S. 104ff.

²¹⁵ vgl. ebenda, S. 64ff.

4.4.3 Dimensionierung und Idealplanung

Nach der Festlegung der Produktionsabläufe im Rahmen der Strukturplanung können nun die notwendigen Kapazitäten für die Produktions- und Logistikeinrichtungen bestimmt werden. Als Grundlage für die Dimensionierung der Produktionskapazitäten wird die Auslastung der aktuellen Produktionsressourcen errechnet. Dazu wird die benötigte Bearbeitungskapazität mit der vorhandenen Verfügbarkeit der Produktionsressourcen verglichen. Die benötigte Bearbeitungskapazität wird anhand der Prozesszeiten und der Bedarfsmengen der verschiedenen Produkte errechnet. Da der Zeitraum der Datenaufnahme weder etwaige saisonale Schwankungen noch Änderungen der Absatzmengen in der Zukunft abdeckt, werden die Bedarfsmengen aus Absatzprognosen für den Planungshorizont der Fabrik entnommen. Die Auslastung einer Produktionsressource kann somit wie folgt errechnet werden:²¹⁶

$$\text{Auslastung} = \frac{\Sigma(m_i * t_i)}{A * h * S * \eta}$$

mit

m_i ... prognostizierte jährliche Absatzmenge des Produkts i

t_i ... Prozesszeit für das Produkt i auf der betrachteten Ressource

A ... Anzahl der Arbeitstage

h ... geplante Einsatzzeit der Ressource pro Tag und Schicht

S ... Anzahl geplanter Schichten pro Tag

η ... Zeitnutzungsgrad

Formel 2: Berechnung der Auslastung²¹⁷

Der Zeitnutzungsgrad berücksichtigt ungeplante Stillstandzeiten infolge von Störungen oder Ausschuss und muss aus spezifischen Auswertungen oder Erfahrungswerten entnommen oder geschätzt werden. Anhand dieser Auslastungen kann nun bestimmt werden, ob bestimmte Produktionsressourcen eine andere Kapazität, z. B. durch mehr oder weniger Maschinen oder ein anderes Schichtmodell, benötigen oder ob bestimmte Arbeitsinhalte auf andere Ressourcen verteilt werden sollen.

Die Dimensionierung der Lagerkapazitäten erfolgt auf Basis der Verläufe und statistischen Verteilung der Bestände.²¹⁸ Der aktuelle Bestand eines Lagers kann über die Anzahl der sich dort befindlichen Tags ermittelt werden. Aus den RTLS-Daten kann somit der Verlauf des Bestands jedes Lagers visualisiert werden. Außerdem können die statistische Verteilung des Bestands über die Zeit als Dichtefunktion visualisiert und Mittelwert und Standardabweichung berechnet werden. Abbildung 19 zeigt eine Möglichkeit zur Visualisierung des zeitlichen Verlaufs und der Dichtefunktion des Bestands. Diese Auswertungen sind insbesondere für Zwischenlager in der Produktion

²¹⁶ vgl. Grundig 2018, S. 86.

²¹⁷ vgl. ebenda.

²¹⁸ vgl. Arnold und Furmans 2019, S. 182ff.

relevant, für die häufig keine Daten zu Beständen vorhanden sind. Für größere, abgeschlossene Lager ist es womöglich nicht umsetzbar oder zielführend, alle vorhandenen Teile mit Tags zu versehen, um den kompletten Lagerbestand erfassen zu können. Für diese sind allerdings in der Regel bereits Bestandsdaten vorhanden.

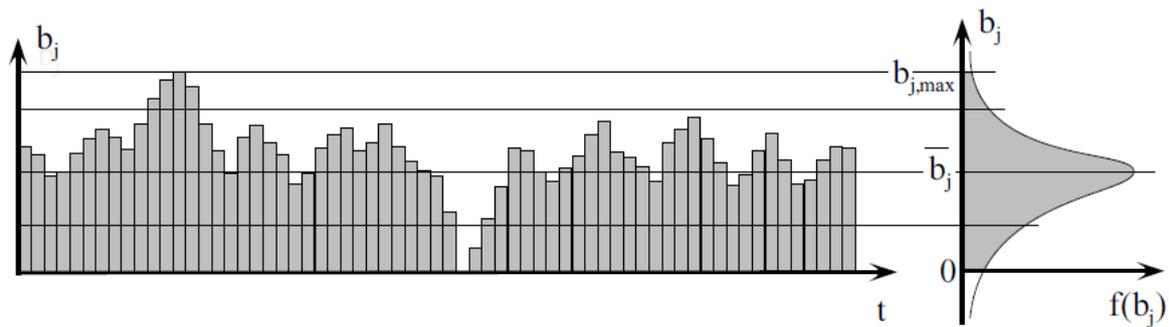


Abbildung 19: Visualisierung des Bestandsverlaufs²¹⁹

Für die Dimensionierung der Logistikeinrichtungen müssen die Materialflüsse zwischen den einzelnen Funktionseinheiten betrachtet werden. Eine Möglichkeit zur Darstellung der Transportbewegungen ist eine sogenannte Heatmap, bei der die Verteilung der Ortungssignale im Fabriklayout farblich gekennzeichnet wird. Eine Heatmap kann direkt aus den Positionsdaten, die das RTLS liefert, gewonnen werden und wird von manchen RTLS standardmäßig erstellt.²²⁰ Anhand der Heatmap können Zonen mit besonders hoher Transportintensität und Stauungspunkte identifiziert werden. Daraus kann z. B. geschlossen werden, welche Transportwege mehrspurig sein müssen und welche nicht. In Abbildung 20 ist eine Heatmap auf Basis RTLS-Daten zu sehen.

²¹⁹ Arnold und Furmans 2019, S. 183

²²⁰ vgl. <https://intranav.com/digital-solution-areas/intranav-industrial-starter-kit> (gelesen am 08.07.2021)



Abbildung 20: Heatmap auf Basis eines RTLS²²¹

Weitere Erkenntnisse bietet die Darstellung des Materialflusses mithilfe eines in das Layout eingezeichnetem Sankey-Diagramms. Aus diesem lassen sich leicht die Verläufe und Intensitäten der Materialflüsse zwischen den Bereichen und Stationen erkennen. Abbildung 21 zeigt ein Beispiel für ein solches Diagramm. Zur Erstellung dieses Diagramms müssen die Transportmengen zwischen jedem Bereich errechnet werden. Dazu können anhand der bereits ermittelten Produktionsabläufe die Transporte zwischen den Bereichen pro Produkt ermittelt und diese mit den prognostizierten Absatzmengen pro Produkt multipliziert werden. Transportmengen können dann z. B. in eine Transportmatrix eingetragen und von einem geeigneten Software-Tool visualisiert werden.

²²¹ <https://intranav.com/digital-solution-areas/intranav-industrial-starter-kit> (gelesen am 08.07.2021)

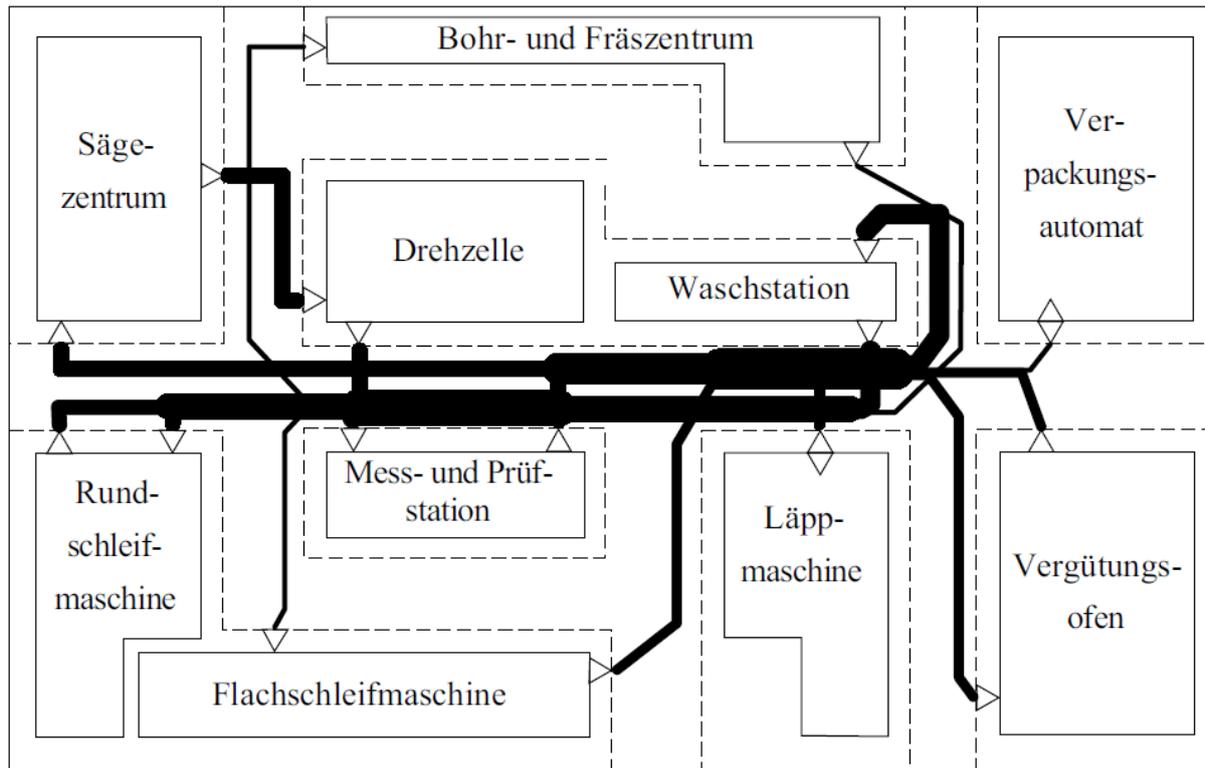


Abbildung 21: Sankey-Diagramm in ein Layout eingebettet²²²

Das ermittelte Materialflussmodell kann einerseits als Basis für die Auslegung der Logistikeinrichtungen herangezogen werden. Andererseits ermöglicht es, die Anordnung der Bereiche im Layout zu optimieren, indem verschiedene Layoutvarianten hinsichtlich ihres Materialflusses bewertet werden können.

5 Experimentelle Validierung des Vorgehens

5.1 Versuchsdesign

5.1.1 Anforderungen an den Versuch

Der Versuch dient der Validierung der entwickelten Vorgehensweise. Er soll der Evaluierung sowohl der Durchführung der Datenaufnahme als auch der Verwertung der erfassten Sensordaten dienen. Hinsichtlich der Durchführung der Datenaufnahme sollen die in Kapitel 4.3 beschriebenen Schritte möglichst vollständig durchgeführt werden, um zu untersuchen, ob auf diese Art eine effiziente Installation und Inbetriebnahme des Sensorsystems möglich ist. Im Detail sollen durch den Versuch folgende Fragestellungen beantwortet und die daraus folgenden Anforderungen erfüllt werden können:

- Ist es möglich, anhand des Fabriklayouts eine RTLS-Technologie auszuwählen und die Anordnung der Anchors und Gateways zu planen?
→ Die Abmessungen des Aufbaus müssen ausreichend groß sein, um unterschiedliche Bereiche zu identifizieren. Ein Layout des Aufbaus muss vorhanden sein.
- Ist das Anbringen und Abnehmen der Tags einschließlich der Zuweisung einer Materialnummer effizient durchführbar?
→ Die Tags müssen während des Versuchs mehrmals angebracht und einer Materialnummer zugewiesen werden. Dazu sollten auch verschiedenartige Teile zu einem Produkt zusammengeführt werden.
- Können die Anchors und Gateways problemlos angebracht und initialisiert werden?
→ Die Möglichkeit zur Installation und Inbetriebnahme der Anchors muss gegeben sein.
- Ermöglicht die nach Formel 1 errechnete Ortungsfrequenz eine ausreichende Auflösung der Produktions- und Transportprozesse?
→ Abstände und Transportmöglichkeiten zwischen den Stationen müssen definiert sein.
- Kann die nötige Dauer für die Datenaufnahme im Vorhinein bestimmt werden?
→ Die Durchlaufzeiten der Produkte müssen ausreichend kurz sein, um die Dauer der Datenaufnahme wesentlich länger als diese wählen zu können.

Bezüglich der Verwertung der erfassten Sensordaten soll untersucht werden, ob es möglich ist, die vom RTLS gelieferten Daten entsprechend den in Kapitel 4.4 beschriebenen Schritten auszuwerten und ein valides Bild der realen Produktion zu

gewinnen. Daher ergeben sich folgende weitere Fragestellungen und Anforderungen an den Versuch:

- Ist es möglich, die Sensordaten bestimmten Prozessschritten zuzuordnen?
→ Die Produktionsprozesse müssen mehrere Stationen umfassen.
- Ist es möglich, aus den Sensordaten die folgenden Informationen über den Produktionsprozess zu gewinnen:
 - Produktionsabläufe und Prozesszeiten der verschiedenen Produkte:
→ Die Produkte müssen mehrere Stationen mit unterschiedlicher Bearbeitungszeit durchlaufen.
 - Die Zykluszeiten der Produkte:
→ Die Produkte müssen zum Teil in Losen gefertigt werden, damit sich die Zykluszeit von der Prozesszeit unterscheidet.
 - Die Auslastungen der einzelnen Stationen unter Berücksichtigung der Absatzprognosen:
→ Die einzelnen Stationen sollen unterschiedlich stark ausgelastet werden.
 - Die Bestände der Pufferlager in der Produktion:
→ Einzelne Stationen müssen so stark ausgelastet werden, dass sich teilweise eine Warteschlange vor ihnen bildet.
- Kann ein Materialflussmodell aus den Sensordaten und prognostizierten Absatzmengen erstellt und visualisiert werden?
→ Absatzprognosen für die verschiedenen Produkte müssen definiert werden.
- Ermöglichen die auf den Sensordaten basierenden Auswertungen die folgenden Optimierungen:
 - Identifikation von Engpässen und problematischen Prozessen anhand des Prozessmodells und des Operator Balance Chart:
→ Die Produktionsprozesse sollen deutlich unterschiedliche Zykluszeiten haben.
 - Optimale Auslegung der Kapazitäten von Produktionsschritten:
→ Die einzelnen Stationen sollen unterschiedlich stark ausgelastet werden.
 - Richtige Dimensionierung der Pufferlager:
→ Einzelne Stationen müssen so stark ausgelastet werden, dass sich teilweise eine Warteschlange vor ihnen bildet.
 - Optimale Auslegung der Transportmittel und -wege:
→ Es muss definierte Transportwege geben.
 - Optimierung der Anordnung der Produktions- und Logistikbereiche:
→ Es soll zwischen den Stationen unterschiedliche Transportintensitäten geben.

5.1.2 Versuchsaufbau

Der Versuch soll die Elemente einer realen Fabrik soweit abbilden, dass die genannten Fragestellungen beantwortet werden können. Im Folgenden wird der gewählte Aufbau hinsichtlich des Layouts, der Produktions- und der Logistikprozesse beschrieben.

Layout:

Der Versuch wurde in der Pilotfabrik der Technischen Universität Wien durchgeführt. Diese bietet die Möglichkeit die Umsetzbarkeit der Datenaufnahme unter realistischen Störfaktoren, wie metallischen Objekten und interferierenden Signalen, zu testen. Für den Versuchsaufbau wurde ein abgegrenzter Bereich der Pilotfabrik herangezogen, in dem Produktionsprozesse nachgestellt werden können, die den Anforderungen an den Versuch gerecht werden. Es sind ausreichend Steckdosen verfügbar, um Anchors und Gateways mit Strom zu versorgen. Die erhöhte Montage der Anchors ist auf Stativen oder bestehender Infrastruktur wie Montagetischen möglich. Da für den Versuch ein eigenes Setting mit eigenen relevanten Punkten und Bereichen aufgebaut wurde, wurde der Versuchsaufbau vermessen und ein eigener Grundrissplan erstellt, der in Abbildung 22 dargestellt ist.

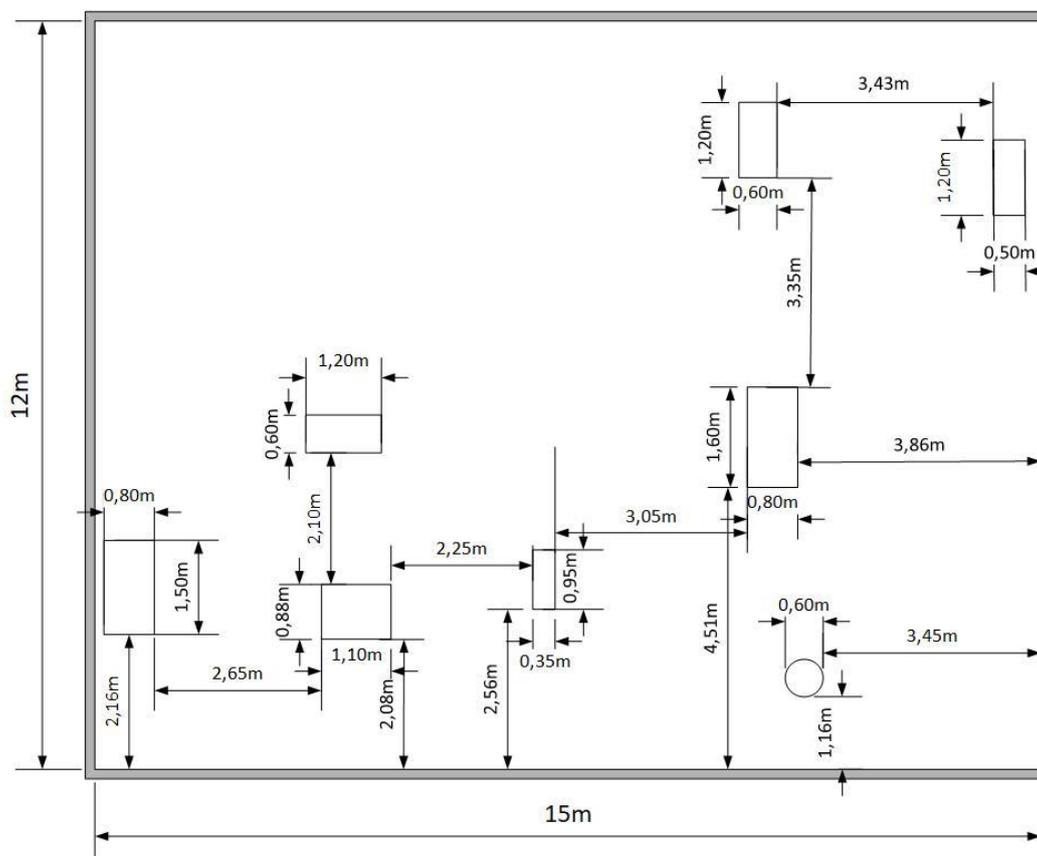


Abbildung 22: Layout des Versuchsaufbaus²²³

²²³ Eigene Darstellung

Produktion:

Es werden zwei Produkttypen mit unterschiedlichen Produktionsabläufen definiert, von denen einer die Zusammenführung von zwei verschiedenen Teilen beinhaltet. Die Produktionsabläufe beginnen im Wareneingang, führen zu verschiedenen Arbeitsstationen und enden schließlich im Warenausgang. An den Arbeitsstationen werden die Produkte abgelegt und es wird ein Produktionsprozess simuliert, indem ein Timer gestartet wird, sobald die Bearbeitung des nächsten Produkts starten kann. So können die mit dem RTLS ermittelten Prozesszeiten mit den Zeiten verglichen werden, die auf den Timern eingestellt sind. In der Nähe der Arbeitsstationen gibt es zudem vorgesehene Pufferflächen, an denen Produkte gelagert werden können, bis die Station verfügbar ist. Zu Beginn des Versuchs sind die verschiedenen Produkte gleichmäßig auf die Arbeitsstationen verteilt, wie es auch in einer echten Produktion der Fall wäre. Neue Produkte werden im Wareneingang im Abstand von einer Minute in die Produktion geschleust. Welches Produkt gerade als nächstes in die Produktion gelangt, wird ebenfalls durch Würfeln entschieden, wobei beide Produkte die gleiche Chance haben an die Reihe zu kommen. Teil B wird in der Montagestation mit dem Produkt B vereint. Davor durchläuft es einen Chargenprozess mit der Losgröße 2, weshalb bei jedem zweiten Produkt B, das in die Produktion gelangt, auch ein Los des Teils B im Wareneingang bereitgestellt werden soll. In der folgenden Tabelle sind die Parameter der verschiedenen Produkte und Stationen aufgeführt:

Tabelle 12: Produktionsdaten²²⁴

Station	Prozesszeit	Losgröße	Anfangsbestand
Wareneingang	-	1	-
Zuschnitt	60 s	1	1 Prod. A
Bearbeitungszentrum	120 s	1	1 Prod. A + 1 Prod. B
Ofen	100 s	2	2 Teil B (1 Los)
Montage	80 s	1	1 Prod. B
Qualitätskontrolle	50 s	1	
Warenausgang	-	1	

Als Werkstücke kommen Klemmbausteine in verschiedenen Farben und Größen zum Einsatz. Diese ermöglichen eine leichte Unterscheidung der Produkte und die Montage verschiedener Werkstücke aufeinander. In Abbildung 23 sind die unterschiedlichen Werkstücke auf den eingerichteten Produktionsstationen zu sehen.

²²⁴ Eigene Darstellung

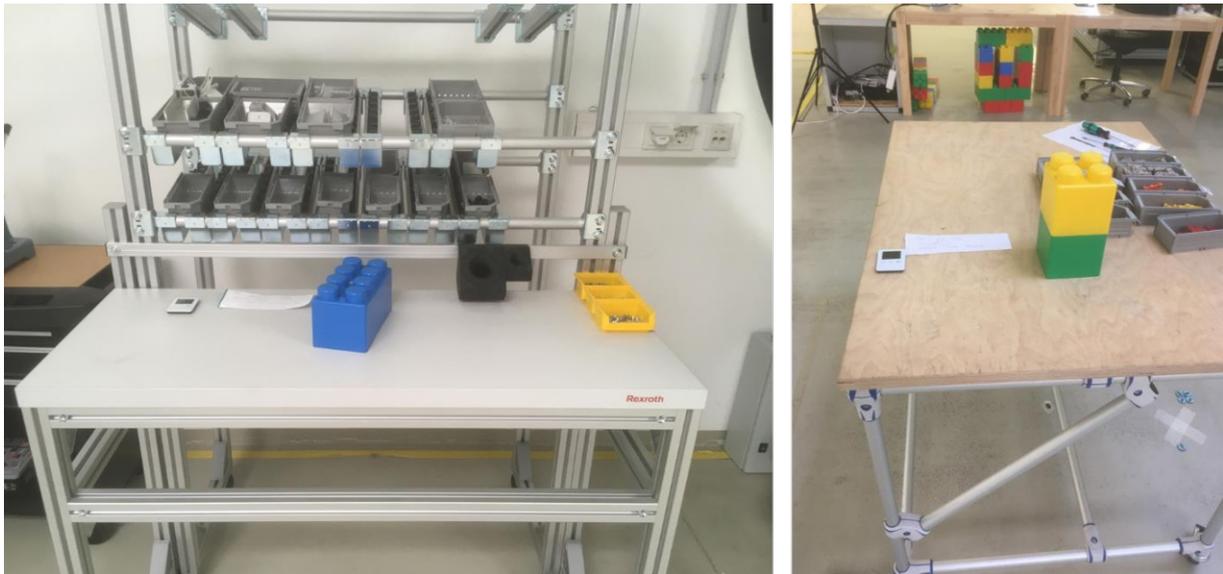


Abbildung 23: Produktionsstationen mit Werkstücken²²⁵

Logistik:

Für den Transport und die Handhabung und Registrierung der Tags stehen zwei Personen zur Verfügung, die die Werkstücke händisch von Station zu Station transportieren.

Datenanforderungsliste

Die für die Durchführung der Datenaufnahme wesentlichen Informationen sind in der Datenanforderungsliste zusammengefasst:

- Räumliche Gegebenheiten:
 - Fabriklayout mit Bereichen, Arbeitsplätzen und Entfernungen: siehe Abbildung 24

²²⁵ Eigene Darstellung

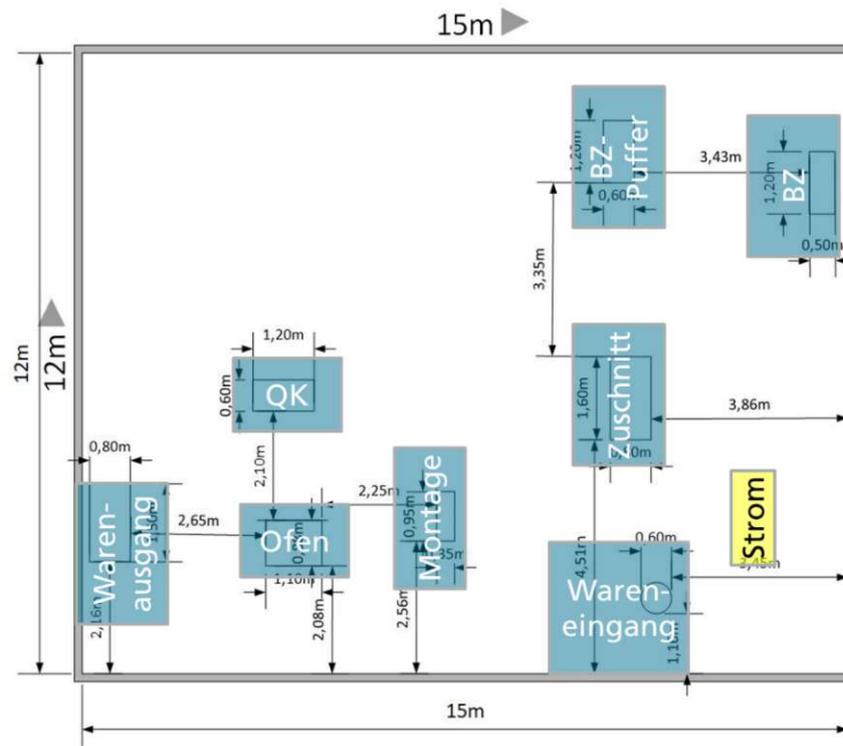


Abbildung 24: Fabriklayout mit Bereichen²²⁶

- Anbindung von Strom-, LAN- oder WLAN-Netz:
Ein Stromanschluss des Gateways und des WLAN-Routers ist an der in Abbildung 24 gelb markierten Stelle möglich. Ein WLAN-Netz wäre zwar vor Ort verfügbar, ist allerdings aufgrund des gewählten Systems nicht nötig.
- Befestigungsmöglichkeiten für Anchors: Die erhöhte Montage der Anchors ist auf Montagetischen, Regalen und Stativen möglich. Eine externe Stromversorgung kann nicht umgesetzt werden.
- Befestigungsmöglichkeiten an Produkten oder Behältern: Die Produkte werden ohne Behälter transportiert, besitzen aber ausreichend große glatte Oberflächen, an denen die Tags befestigt werden können.
- Ort der Produktkennzeichnung im Wareneingang: Der Wareneingang eignet sich als erster Schritt aller Produktionsdurchläufe für die Anbringung der Tags an den Produkten.
- Orte, an denen Produkte zusammengeführt werden: In der Montagestation wird ein Teil B auf einem Produkt B montiert. Dementsprechend müssen dort die nicht mehr verwendeten Tags zurückgeführt werden.
- Ort, an dem die Tags vor dem Versand abgenommen werden müssen: Im Warenausgang müssen die Tags wieder abgenommen und zum Wareneingang zurückgeführt werden, da alle Produktionsdurchläufe hier enden.

²²⁶ Eigene Darstellung

- Vorhandene Nummernsysteme inklusive Kennzeichnung des bestimmten Teils, Produktnummer, Losnummer und Auftragsnummer: Die eindeutige Kennzeichnung jedes Werkstücks erfolgt mithilfe einer fortlaufenden Nummer. Die Aufträge werden mit einer Zeichenkette bestehend aus dem Produkttyp (A oder B) und einer fortlaufenden Nummer gekennzeichnet.
- Kennzeichnung der Teile in der Fabrik (z. B. Laufzettel, Bar-/QR-Code): Der Produkttyp ist durch Form und Farbe der Teile leicht erkennbar. Ansonsten existieren keine Kennzeichnungen.
- Maximale Geschwindigkeit der Transportmittel (geschätzt): Die Transporte erfolgen mit Schrittgeschwindigkeit, für die etwa 5 km/h angenommen werden.
- Kürzeste Transportstrecken pro Transportmittel (geschätzt): Die kürzeste Entfernung zwischen zwei Stationen beträgt etwa 2 m.
- (Mitarbeiter, die für Anbringen und Abnehmen der Tags zuständig sind)
- Längste typische Durchlaufzeit der Produkte: Die Summe der Bearbeitungszeiten eines Produkts beträgt etwas mehr als vier Minuten. Für die realen Durchlaufzeiten existieren noch keine Erfahrungswerte.
- Typische zyklische Schwankungen in der Produktion: Es gibt keine zyklischen Schwankungen in der Produktion.

5.2 Datenaufnahme

5.2.1 Eingesetzte Sensoren

Da die zu unterscheidenden Bereiche zum Teil nur etwa zwei Meter voneinander entfernt sind, sollte die Ortungsgenauigkeit weniger als einen Meter betragen. Daher kommt nur UWB als Technologie in Frage.

Zum Einsatz kommt das *Module Development & Evaluation Kit for the Decawave DWM1001* der Firma Decawave, das in Abbildung 25 dargestellt ist. Dieses beinhaltet zwölf UWB-Module in Kunststoffgehäusen, die wahlweise als Anchor oder Tag eingesetzt werden können und laut Hersteller eine typische Genauigkeit von weniger als 10 cm bieten. Die Tags ermitteln ihre Position mittels Two-Way-Ranging und übermitteln diese an ein anderes UWB-Modul, das als sogenannter Listener alle Positionsdaten aufzeichnet und mit einem Raspberry Pi 3 zur weiteren Verarbeitung verbunden ist. Das UWB-Modul ist auf einer Leiterplatte verlötet, über die das Modul per Batterie oder USB-Anschluss mit Strom versorgt werden kann. Außerdem sind auf der Leiterplatte verschiedene LEDs angebracht, die den Zustand des Moduls anzeigen und ein Bluetooth-Modul, das der Initialisierung über eine Smartphone App dient.²²⁷

²²⁷ vgl. Decawave Ltd 2017b, S. 8ff.



Abbildung 25: UWB-Modul mit Gehäuse²²⁸

5.2.2 Installation und Initialisierung

Der betrachtete rechteckige Bereich hat Abmessungen von etwa 12 x 15 m. Laut Hersteller können die eingesetzten Anchors in einem Abstand von maximal 25-30 m zueinander positioniert werden. Somit sind vier Anchors jedenfalls ausreichend.

Die Anchors konnten alle auf ähnlicher Höhe in nahezu einem Rechteck positioniert werden. Wie Abbildung 26 zeigt, konnten die Anchors auf Montagetischen, Regalen und Stativen ohne weitere Befestigungsmaßnahmen aufgestellt werden.



Abbildung 26: Positionierung der Anchors²²⁹

Mithilfe der Smartphone-App *Decawave DRTLS Manager* wurden die Koordinaten der Anchors bestimmt. Die Initialisierung der Anchors und Tags sowie die Datenaufzeichnung erfolgte mit einer von Fraunhofer Austria im Rahmen einer Bachelorarbeit entwickelten App. In dieser wurde auch die Anbindung an eine lokale Datenbank und die Netzwerkarchitektur mit Gateway und WLAN-Router entwickelt.²³⁰ Abbildung 27 zeigt einen Screenshot der App mit den Positionen der Anchors.

Der als Gateway fungierende Raspberry Pi wurde ebenso an der in Abbildung 24 gelb markierten Stelle an das Stromnetz angeschlossen wie ein WLAN-Router. Der WLAN-Router dient hierbei der Datenübertragung zwischen dem Gateway und dem Rechner, auf dem die App läuft.

²²⁹ Eigene Darstellung

²³⁰ Gremsl 2021.

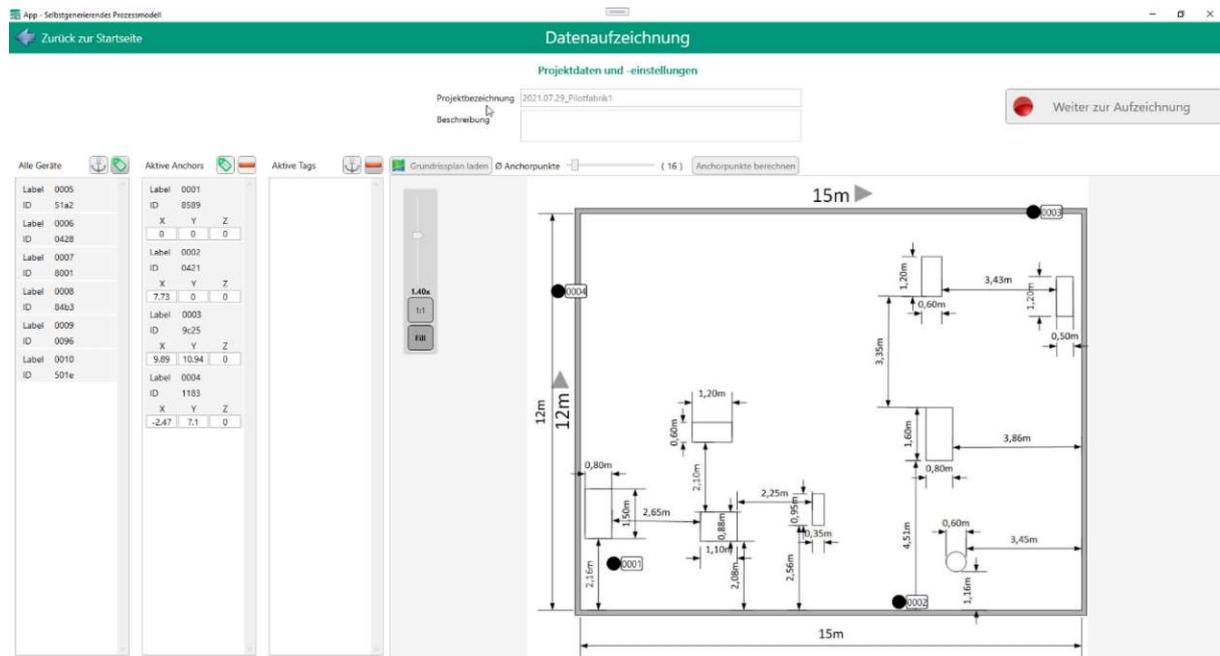


Abbildung 27: Initialisierung der Anchors²³¹

Mithilfe der Decawave-App wird wiederum eingestellt, welche Module als Anchors und als Tags aktiv sein sollen und mit welcher Ortungsfrequenz diese arbeiten sollen. Nach Formel 1 muss die Ortungsfrequenz bei einer minimalen Distanz von 2 Metern und einer maximalen Geschwindigkeit von 5 km/h mindestens 0,7 Hz betragen. Als Frequenz werden 2 Hz gewählt, da die Batteriekapazität aufgrund der kurzen Aufnahmedauer kein kritischer Faktor ist und so die zeitliche Auflösung verbessert werden kann. Laut Hersteller hat nämlich ein Tag im inaktiven Zustand einen Stromfluss von 24 μA und beim Sendevorgang einen Stromfluss von durchschnittlich 132 mA.²³² Bei der eingesetzten Stromversorgung mit Lithium-Ionen-Akkus mit 750 mAh Kapazität und einer Sendedauer von 3 ms laut Hersteller²³³ lässt sich die Akkulaufzeit somit auf 32,56 Tage bei einer Ortungsfrequenz von 2 Hz abschätzen.²³⁴

Die Tags wurden mithilfe von Klebeband im Wareneingang an den Werkstücken befestigt und im Warenausgang wieder abgenommen. In der Montagestation wurde ein Teil B mit einem Produkt B zusammengeführt und der Tag des Teils B abgenommen und zum Wareneingang rückgeführt.

Die Registrierung der Tags erfolgte im Wareneingang mithilfe eines Online-Formulars, von dem ein Ausschnitt in Abbildung 28 zu sehen ist. Immer wenn ein neues Werkstück mit einem Tag versehen wurde, wurden dort die Hardware-ID des Tags sowie die

²³¹ Eigene Darstellung

²³² vgl. Decawave Ltd 2017a, S. 14.

²³³ vgl. Decawave Ltd 2018, S. 20f.

²³⁴ vgl. <http://oregonembedded.com/batterycalc.htm> (gelesen am 20.09.2021)

Material- und Auftragsnummer des Werkstücks, der Produkttyp und die Losgröße eingegeben.

The screenshot shows an online form with four sections:

- 1. Hardware-ID des Tags:** A text input field with the placeholder text "Ihre Antwort eingeben".
- 2. Materialnummer:** A text input field with the placeholder text "Ihre Antwort eingeben".
- 3. Produkt:** Three radio button options: "blau", "groß", and "klein".
- 4. Losgröße:** A text input field with the error message "Der Wert muss eine Zahl sein." displayed below it.

Abbildung 28: Screenshot des Online-Formulars²³⁵

5.2.3 Durchführung der Datenaufnahme

Den Personen, die den Materialtransport durchführten, wurde das Online-Formular und das Anbringen, Abnehmen und Rückführen der Tags erklärt, um eine zuverlässige Umsetzung der Datenaufnahme zu gewährleisten.

Da für die Gesamtdurchlaufzeiten der Aufträge vorab keine Abschätzungen bekannt sind, muss die nötige Dauer der Datenaufnahme anhand der Summe der Prozesszeiten geschätzt werden. Diese beträgt für beide Produkte etwa 4 Minuten. Da die Abläufe nicht durchgetaktet und aufeinander abgestimmt sind, sind gewisse Staueffekte in der Produktion zu erwarten, die zu längeren Durchlaufzeiten führen. Daher wird die Dauer der Datenaufnahme auf 30 Minuten angesetzt, um auf jeden Fall mehrere Produktionsdurchläufe aufzeichnen zu können.

²³⁵ Eigene Darstellung

5.3 Verwertung der Sensordaten

5.3.1 Informationsauswertung

Die Auswertung der erfassten Daten erfolgt mithilfe der Programmiersprache R, da diese frei erhältlich ist und sehr benutzerfreundliche Bibliotheken für die Verarbeitung und Visualisierung von Daten bietet. Außerdem sind dadurch alle Auswertungen reproduzierbar und können für andere Anwendungsfälle schnell angepasst werden. Da während der Aufzeichnung bei einem Tag Probleme mit der Stromversorgung auftraten, die dazu führten, dass dieser zwischenzeitlich ausfiel, ist es nötig, im ersten Schritt alle Daten herauszufiltern, die von diesem Tag stammen. Andernfalls würden diese Daten falsche Abläufe und Prozesszeiten liefern. Dazu werden alle Tags identifiziert, bei denen Datenpunkte mehr als 30 Sekunden auseinanderliegen und deren Daten verworfen. Die übrigen Daten werden zu einem Event Log weiterverarbeitet, indem für jede Station ein rechteckiger Bereich definiert wird. Fallen Datenpunkte in diesen Bereich und ist die Geschwindigkeit des Tags unter einem vorgegebenen Maximalwert, werden sie dieser Station zugeordnet. Als Maximalgeschwindigkeit wurde 0,5 m/s gewählt, damit scheinbare Ortsänderungen durch Messfehler nicht als Transport gewertet werden. Anschließend wird den Datenpunkten eine eindeutige Ereignisnummer zugewiesen. Haben aufeinanderfolgende Datenpunkte die gleiche Tag-ID und die gleiche Station, werden sie demselben Ereignis zugeordnet, andernfalls wird ein neues Ereignis zugewiesen. Durch Zusammenfassung der Datenpunkte pro Ereignis kann so ein Event Log mit Start- und Endzeit erstellt werden.

Anschließend wird der entstandene Event Log mit den Eingaben aus dem Online-Formular verknüpft. Dazu werden die Eingaben des Formulars in eine Excel-Datei exportiert und in R eingelesen. Die Verknüpfung der Eingaben des Formulars mit dem Event Log erfolgt anhand der Tag-IDs und der Zeitstempel.

Die Qualität der ermittelten Prozessdaten kann evaluiert werden, indem die erfassten Abläufe betrachtet werden. Dabei zeigt sich, dass es möglich war, mehrere unterschiedliche komplette Prozessdurchläufe durchzuführen. Außerdem gibt es einzelne unvollständige Durchläufe, die noch in Arbeit waren, als die Aufzeichnung beendet wurde. Damit keine unvollständigen Abläufe oder falsche Aufzeichnungen die Ergebnisse verfälschen, wird der Event Log weiter bereinigt, indem nur Durchläufe vom Wareneingang zum Warenausgang für die weiteren Auswertungen herangezogen werden. Außerdem werden Abläufe herausgefiltert, bei denen auf den Puffer des Bearbeitungszentrums nicht das Bearbeitungszentrum als nächste Station folgt, um nur valide Abläufe zu betrachten. So bleiben schließlich die obersten drei Produktionsabläufe in Abbildung 29 für die weiteren Betrachtungen übrig.

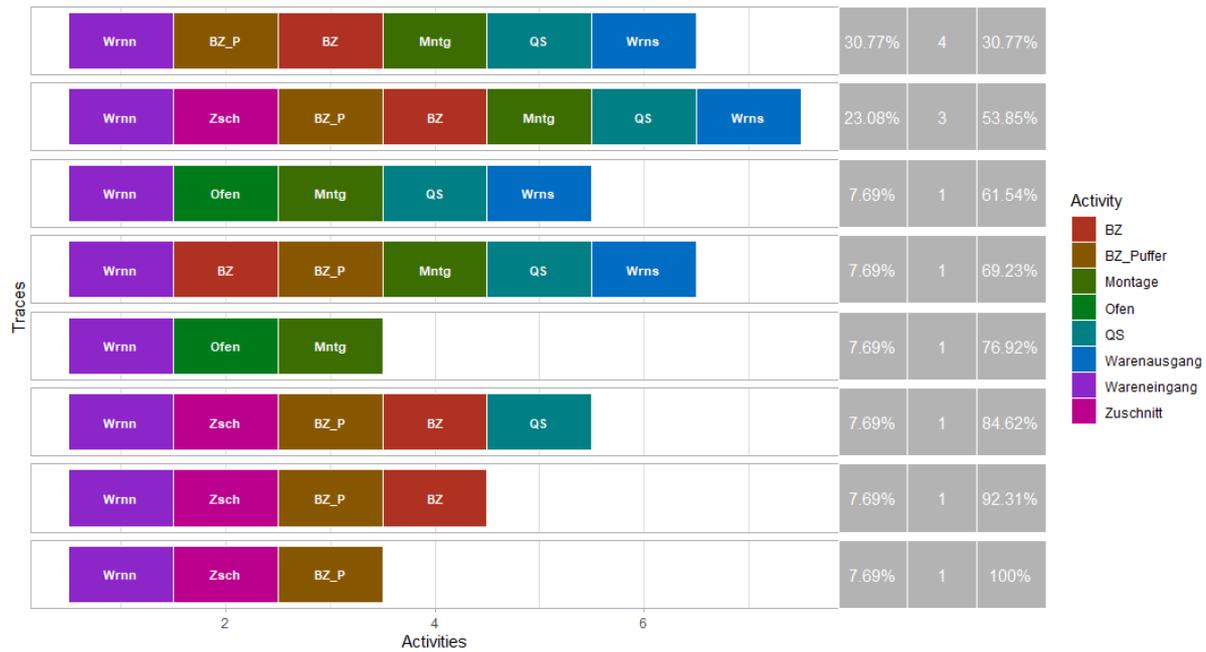


Abbildung 29: Erfasste Prozessabläufe²³⁶

Die Sensoren erfassen laufend eine Abschätzung für die Signalqualität auf einer Skala von 0 bis 100, wobei 100 der optimale Wert ist. Als Punktdiagramm dargestellt zeigt sich, dass die Signalqualität in den zentralen Bereichen der Fabrik durchwegs gut war (siehe Abbildung 30). An den Rändern und insbesondere in der Nähe der Anchors nimmt sie jedoch ab. Da im Bereich des Puffers vor dem Bearbeitungszentrum zumeist eine gute Signalqualität aufgezeichnet wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sich mehrere Tags in unmittelbarer Nähe nicht negativ auf die Signalqualität ausgewirkt haben.

²³⁶ Eigene Darstellung

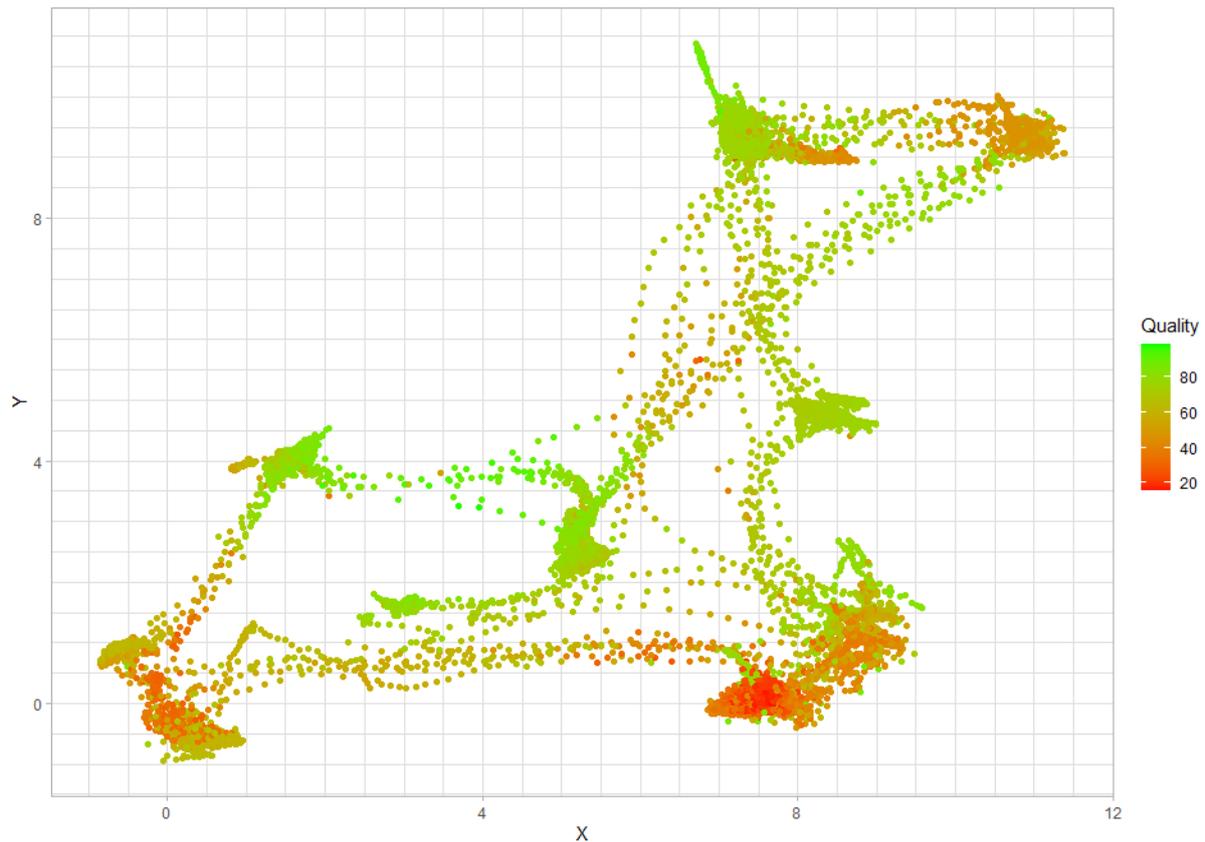
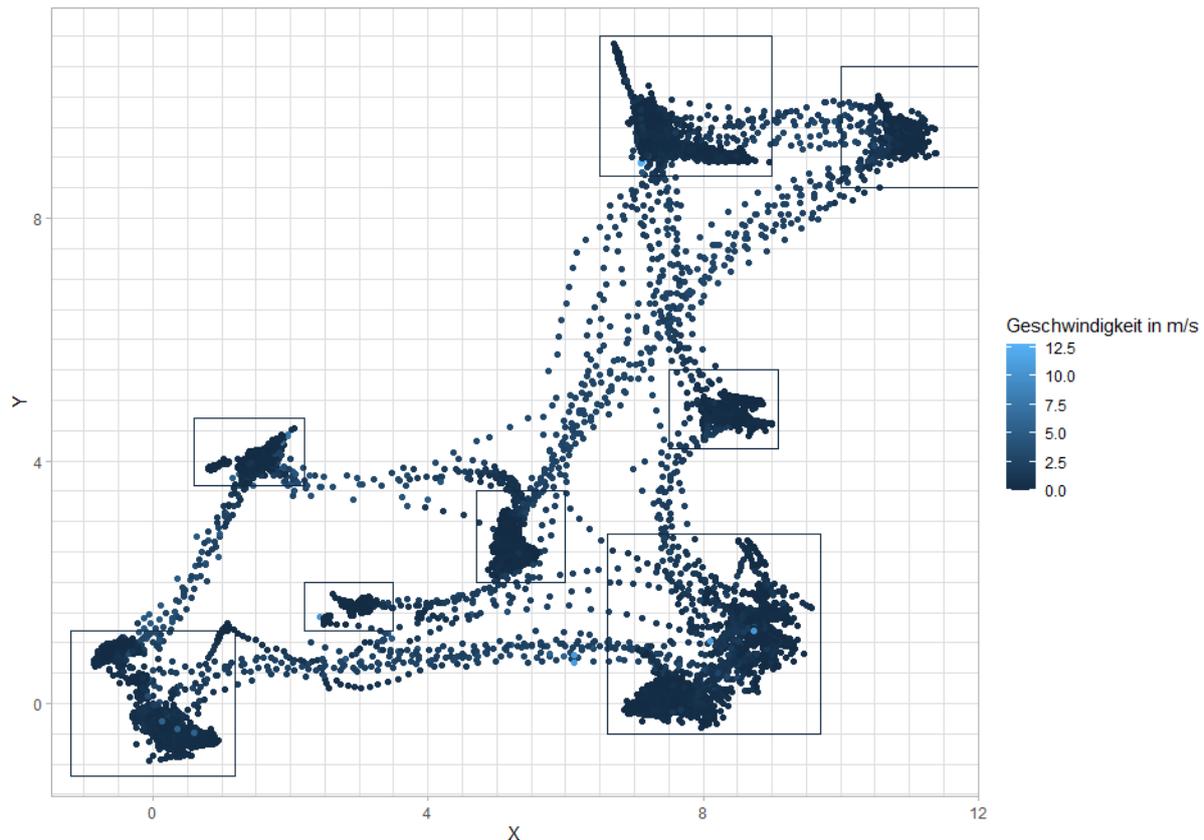


Abbildung 30: Qualität der Ortungssignale²³⁷

Eine weitere Möglichkeit, die Datenqualität zu evaluieren, ist die Darstellung der Positionsdaten als Punktdiagramm mit farblicher Darstellung der Geschwindigkeit. Diese Darstellung legt nahe, dass die Ortungsfrequenz ausreichend hoch gewählt wurde, da alle Transportstrecken durch mehrere Datenpunkte erfasst wurden. Außerdem fallen keine Datenpunkte auf, die an unerwarteten Stellen geortet wurden. Durch die farbliche Darstellung der Geschwindigkeit lassen sich nur vereinzelt Punkte erkennen, die eine wesentlich höhere Geschwindigkeit als ihre Umgebung haben, die wohl auf Ortungsfehler zurückzuführen sind. Außerdem lassen sich durch die Kombination von Ort und Geschwindigkeit die verschiedenen Verweilorte der Tags deutlich erkennen, die in Abbildung 31 durch Rechtecke markiert sind.

Abbildung 31: Erfasste Datenpunkte und Bereiche²³⁸

5.3.2 Strukturplanung

Auf Basis des mit Kontextinformationen angereicherten Event Logs können nun leicht Prozessmodelle erstellt werden. Dafür wird der Event Log zunächst mithilfe der Auftragsnummer nach Produkttypen (Produkt A bzw. Produkt B mit Teil B) gefiltert. Die Prozessdiagramme werden mithilfe der Process-Mining-Bibliothek *bupaR* erstellt. Diese bietet Funktionen, mit denen aus Event Logs Prozessabläufe ausgewertet, visualisiert und mit verschiedenen Metriken ergänzt werden können. Daraus ergibt sich der Vorteil gegenüber anderen Process-Mining-Tools, dass alle Auswertungen reproduzierbar sind und somit jederzeit mit neuen Daten durchgeführt werden können.²³⁹

Die in einer Bachelorarbeit entwickelte App zur Datenaufzeichnung beinhaltet zwar auch Funktionen zur Erfassung von Prozessen, allerdings erfüllen diese nicht alle gewünschten Anforderungen oder Anpassungsmöglichkeiten. Es können z. B. keine komplexeren Prozesse, bei denen manche Stationen mehrmals durchlaufen werden, erkannt werden. Auch die Zusammenfassung von unterschiedlichen Prozesspfaden

²³⁸ Eigene Darstellung

²³⁹ vgl. Janssenswillen et al. 2019.

zu einem Gesamtprozess, wie sie z. B. für Produkte mit mehreren Komponenten nötig ist, ist nicht möglich.²⁴⁰

In den Prozessdiagrammen (Abbildung 32 und 33) wird der Median der Prozesszeit der einzelnen Prozessschritte angegeben, um etwaige Probleme im Produktionsprozess erkennbar zu machen. An den Verbindungen zwischen den Prozessschritten wird darüber hinaus die relative Häufigkeit der Verbindungen ausgewiesen, um deutlich zu machen, welche Abfolgen regelmäßig und welche nur vereinzelt auftreten.

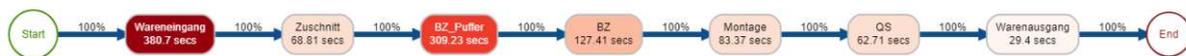


Abbildung 32: Prozessmodell für den Produkttyp A²⁴¹



Abbildung 33: Prozessmodell für den Produkttyp B²⁴²

Aus beiden Prozessmodellen lassen sich dominierende Abfolgen erkennen, wobei auch einige abweichende Pfade vorhanden sind. In Kombination mit der Farbkennzeichnung lässt sich schnell feststellen, dass in beiden Prozessmodellen die Produkte in Relation zu den anderen Stationen eine lange Zeit im Eingangspuffer vor dem Bearbeitungszentrum verbringen müssen, was auf einen Engpass an dieser Stelle hinweist.

Eine weitere Möglichkeit, diesen Engpass zu analysieren ist das Operator Balance Chart. Dazu werden die Zykluszeiten berechnet, indem für einen Produkttyp der Median der Bearbeitungszeiten ermittelt und durch die Losgröße dividiert wird. Dabei werden nur Prozesspfade herangezogen, die bis zum Warenausgang durchlaufen wurden, damit keine nicht zur Gänze aufgezeichneten Prozesse das Ergebnis verfälschen. Anhand des OBC in Abbildung 34 (hier am Beispiel des Produkttyps B) lässt sich sofort erkennen, dass das Bearbeitungszentrum (BZ) eine deutliche längere Zykluszeit als die anderen Prozessschritte aufweist und somit ein Engpass ist.

²⁴⁰ Gremsl 2021.

²⁴¹ Eigene Darstellung

²⁴² Eigene Darstellung

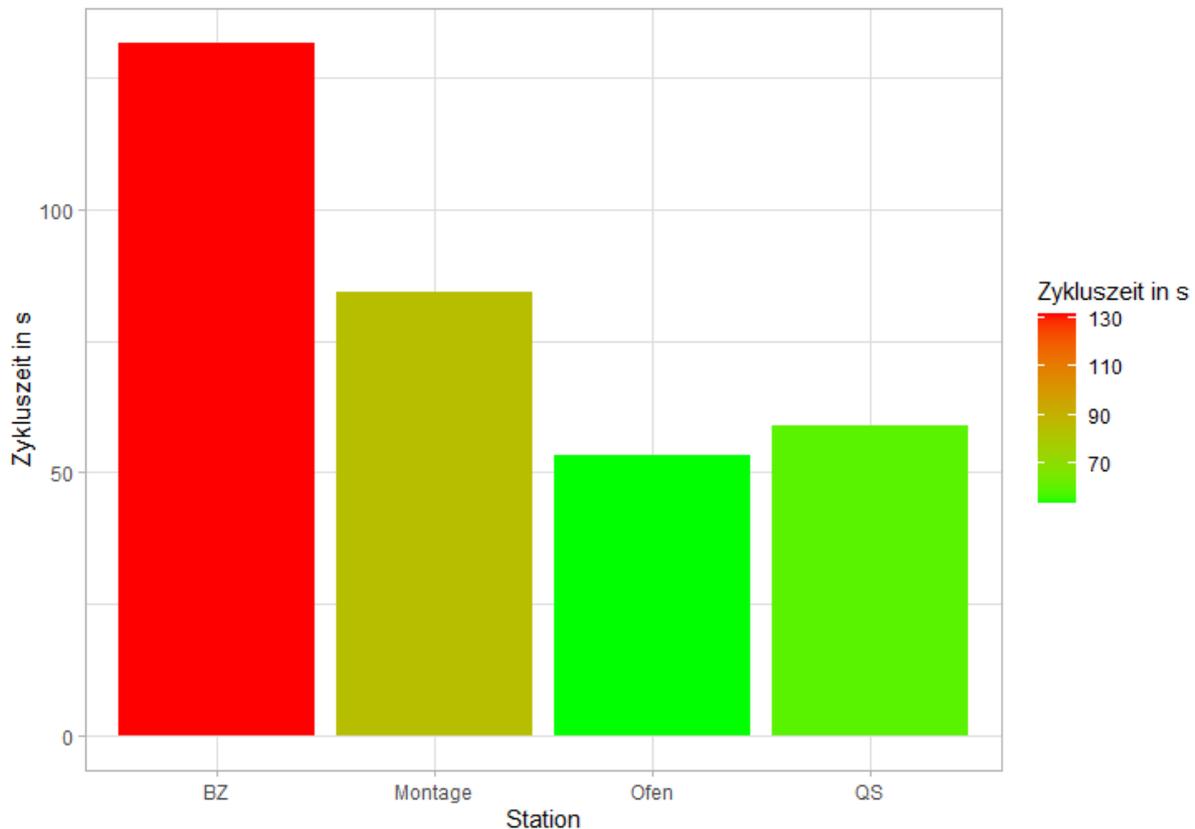


Abbildung 34: Operator Balance Chart für Produkt B²⁴³

Anhand Betrachtung der Durchlaufzeiten der verschiedenen Produkte lassen sich weitere Optimierungspotenziale identifizieren. Die Durchlaufzeit wird als Dauer vom ersten bis zum letzten Ereignis eines Produktdurchlaufs berechnet, wobei nur ganze Durchläufe vom Wareneingang bis zum Warenausgang betrachtet werden, um aussagekräftige Durchlaufzeiten zu erhalten. Die Verteilung der Durchlaufzeiten ist in Abbildung 35 als Boxplot dargestellt. Darüber hinaus lässt sich der Flussgrad als das Verhältnis der Summe der Prozesszeiten zur gesamten Durchlaufzeit errechnen. Dazu werden alle Prozesszeiten eines Durchlaufs, mit Ausnahme der Zeiten in Zwischenlagern, herangezogen. So ergibt sich für Produkt A ein Flussgrad von 62,8% und für Produkt B von 56,5%. Somit könnten bei beiden Produkten die Durchlaufzeiten theoretisch durch organisatorische Maßnahmen um rund 40% verringert werden. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass Wartezeiten auf den Stationen zum Teil zu den Prozesszeiten gerechnet werden, da bis auf das Bearbeitungszentrum keine örtlich getrennten Pufferlager vorhanden waren.

²⁴³ Eigene Darstellung

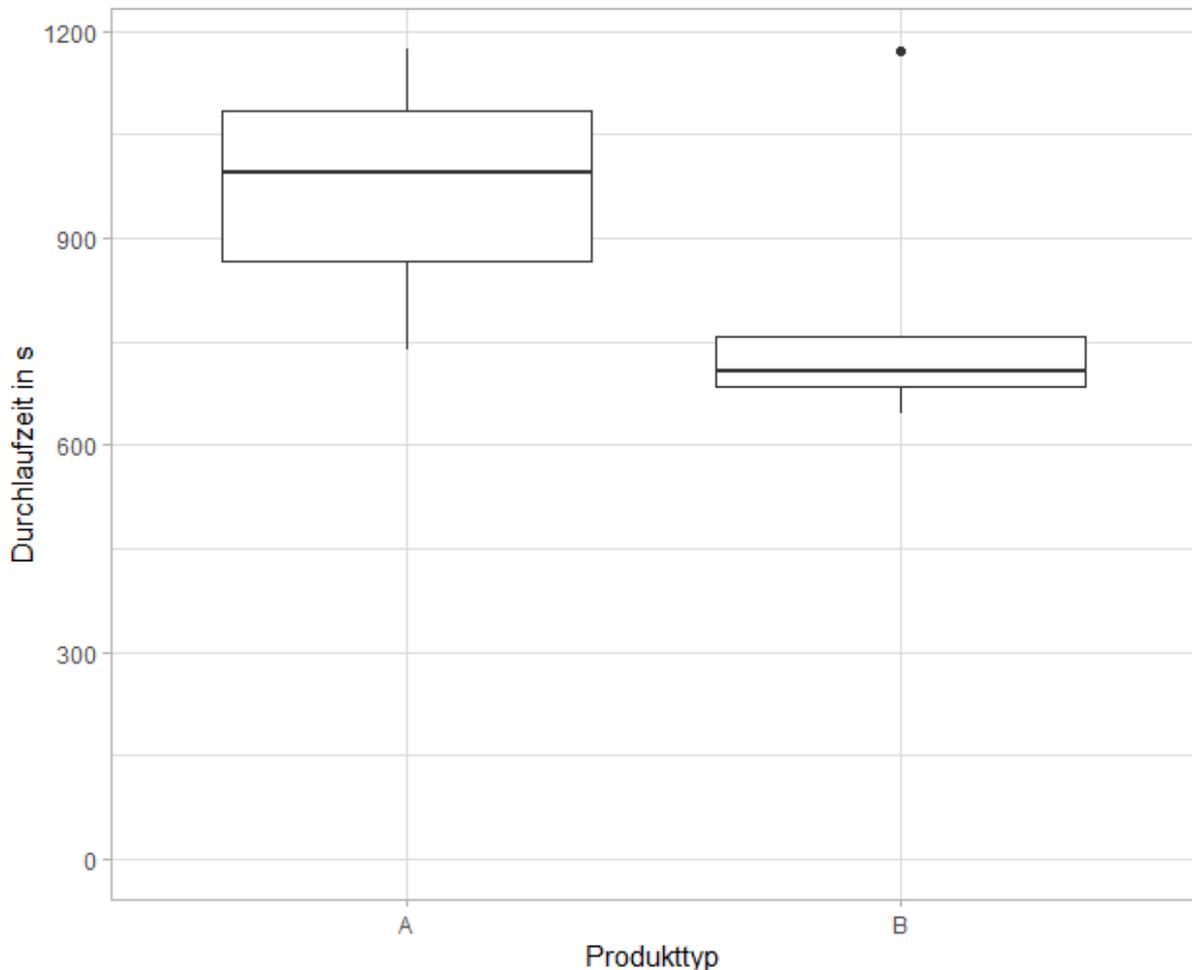


Abbildung 35: Durchlaufzeiten der verschiedenen Produkte²⁴⁴

5.3.3 Dimensionierung

Zur Dimensionierung der Produktions- und Logistikeinrichtungen muss sowohl für jedes Produkt eine angestrebte jährliche Produktionsmenge als auch für jede Station die Zahl der jährlich verfügbaren Stunden definiert werden. Es wird für beide Produkte eine jährliche Produktionsmenge von 40.000 Stück angenommen und für alle Stationen eine jährliche Verfügbarkeit von 1.800 Stunden. Letztere ergibt sich für 5 Schichten pro Woche zu je 8 Stunden für 45 Wochen. Diese Planungsgrundlagen können direkt über Excel-Dateien eingelesen werden, um sie ohne Programmierkenntnisse leicht anpassen zu können. Die Auslastungen können anhand dieser Eingangswerte und der mittleren Prozesszeiten und Häufigkeiten aus den Prozessmodellen nach Formel 2 errechnet werden. In Abbildung 36 ist zu sehen, dass das Bearbeitungszentrum etwas über 100 % ausgelastet wäre, weshalb auf dieser Station zusätzliche Kapazität z. B. durch eine weitere Maschine oder ein anderes

²⁴⁴ Eigene Darstellung

Schichtmodell nötig wäre. Der Ofen andererseits ist zu nicht einmal 25% ausgelastet, weshalb man hier falls möglich die Kapazität reduzieren könnte.

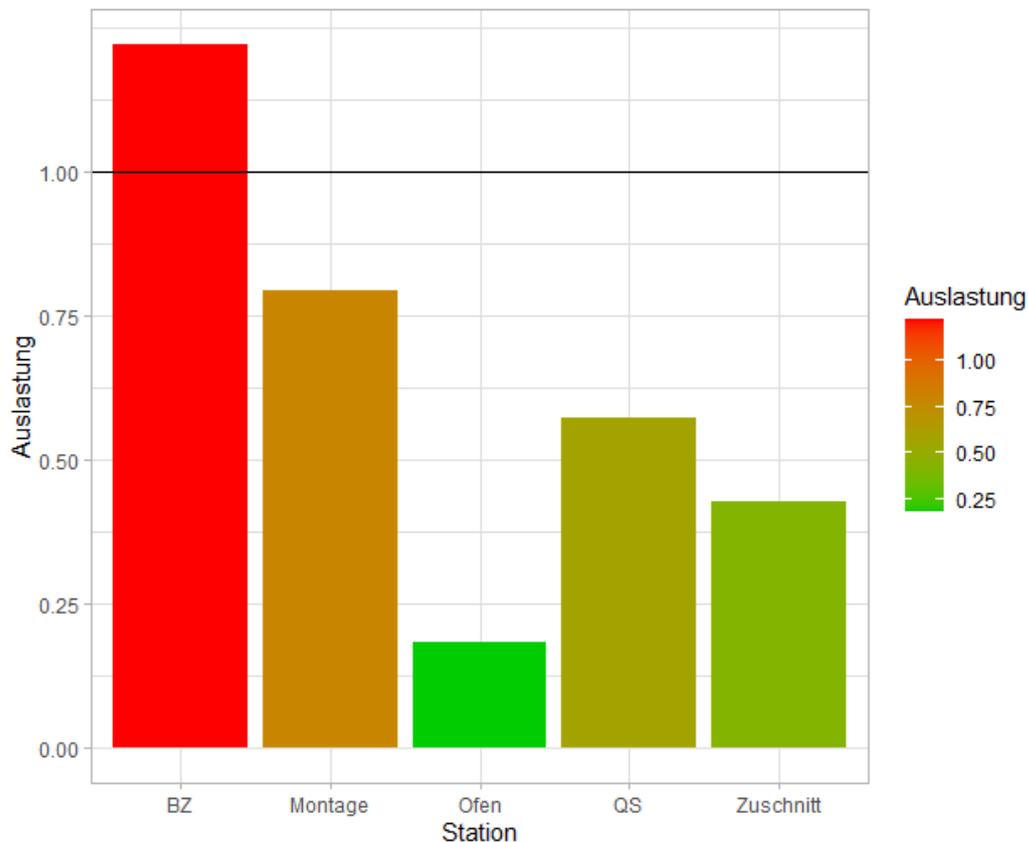


Abbildung 36: Auslastungen der Stationen²⁴⁵

Die Bestände im Eingangspuffer der Bearbeitungsstation können anhand des Event Logs im Zeitverlauf dargestellt werden. Dazu wird von einem Anfangsbestand ausgehend der Bestand bei jedem Eintreffen eines Tags entsprechend der Losgröße erhöht und bei jedem Verlassen verringert. Da zu Beginn zwei Produkte dem Bearbeitungszentrum zugewiesen sind (siehe Tabelle 10), befindet sich eines davon als Anfangsbestand in dem betrachteten Pufferlager. In Abbildung 37 ist sowohl der zeitliche Verlauf des Bestands als auch die daraus abgeleitete Dichtefunktion dargestellt. Daraus lässt sich erkennen, dass das Lager zumeist nicht mehr als drei Werkstücke fassen muss, gelegentlich aber auch mit einem vierten belegt ist.

²⁴⁵ Eigene Darstellung

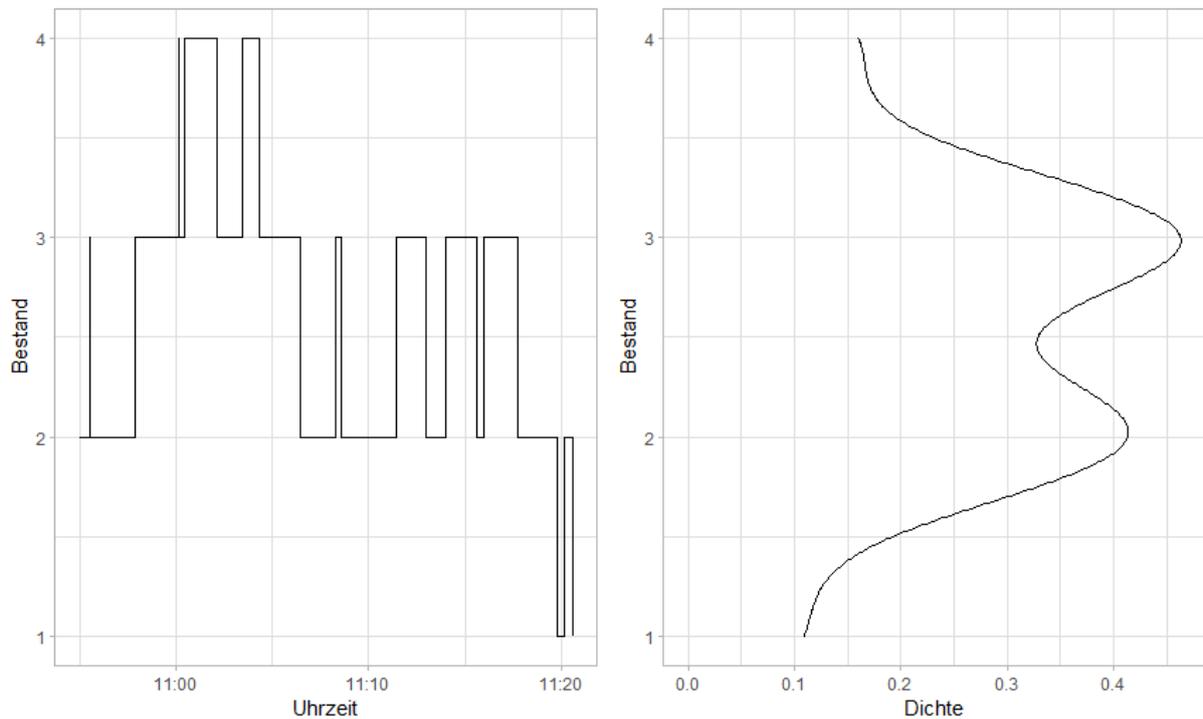
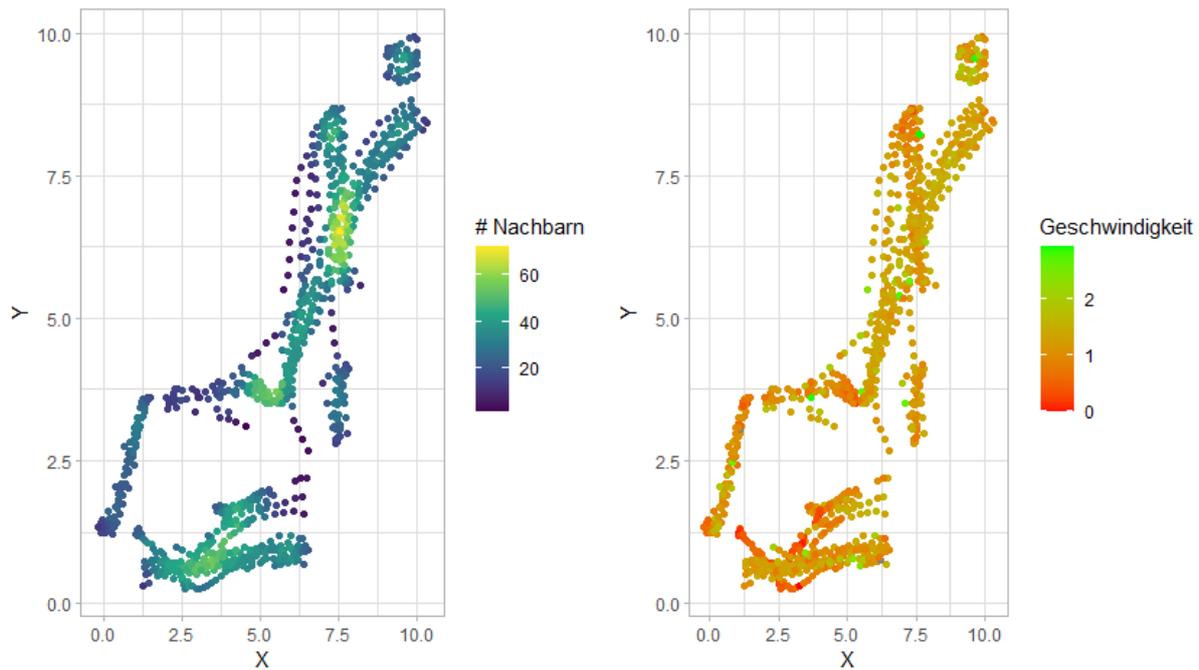


Abbildung 37: Bestandsverlauf des Pufferlagers vor dem Bearbeitungszentrum²⁴⁶

Zur Auslegung der Transportwege können die Stauungspunkte anhand einer Heatmap sichtbar gemacht werden. In einer Heatmap wird die Anzahl anderer Datenpunkte in der unmittelbaren Umgebung farblich dargestellt. Daher werden nur die Datenpunkte betrachtet, die nicht einer Station zugeordnet sind, da die Stauungen auf den Transportwegen ansonsten nicht deutlich genug sichtbar wären. Anhand der Heatmap (Abbildung 38 links) lässt sich erkennen, dass in der Nähe des Pufferlagers des Bearbeitungszentrum die meisten Transporte vorbeiführen, da sich dort zwei Wege kreuzen. Stauungen an dieser Stelle könnten z. B. durch eine andere Routenführung vermieden werden. Werden die Datenpunkte in Abhängigkeit ihrer Geschwindigkeit eingefärbt (siehe Abbildung 38 rechts), lässt sich allerdings keine Verlangsamung an dieser Stelle feststellen, weshalb nicht anzunehmen ist, dass es zu Stauungen kommt.

²⁴⁶ Eigene Darstellung

Abbildung 38: Heatmaps der Transportstrecken²⁴⁷

5.3.4 Idealplanung

Ein in das Layout eingebettetes Sankey-Diagramm dient nicht nur der Auslegung der benötigten Logistikausrüstungen, sondern ermöglicht es auch eine optimale Anordnung der Ressourcen in der Fabrik. Das Sankey-Diagramm wird mit der Layoutplanungssoftware *visTABLE* erstellt. Diese ist in der Fabrikplanungspraxis weit verbreitet und ermöglicht die einfache Darstellung und Manipulation von Materialflüssen. Dazu muss aus dem Event Log eine Materialflussmatrix erstellt werden. Diese kann ebenfalls mithilfe *bupaR* ermittelt werden. Dafür werden nur komplette Produktdurchläufe herangezogen, damit die Transportbeziehungen zu Beginn der Produktion nicht fälschlicherweise stärker gewichtet werden. Für jede Produktgruppe werden die Materialflüsse ermittelt und anschließend wird die Häufigkeit der Transportbewegungen im Verhältnis zur häufigsten Transportbewegung jedes Produkts gesetzt. Diese relativen Häufigkeiten können anschließend mit den jährlichen Produktionsmengen der Produkte multipliziert werden, um das jährliche Transportaufkommen zu erhalten. Diese Ergebnisse werden in eine Excel-Datei exportiert, die ein geeignetes Format hat, um direkt in *visTABLE* eingelesen zu werden. Nach dem Import der Layoutdatei und der manuellen Anordnung der Stationen im Layout wird so automatisch das Sankey-Diagramm in Abbildung 39 erstellt. Die blauen Pfeile kennzeichnen hierbei Transportbewegungen der Produktgruppe A und die roten Pfeile der Produktgruppe B. Die schwarz markierten Routen werden von beiden

²⁴⁷ Eigene Darstellung

Produktgruppen benutzt. Darüber hinaus wird ein jährlicher Gesamttransportaufwand von 2.378,97 km errechnet.

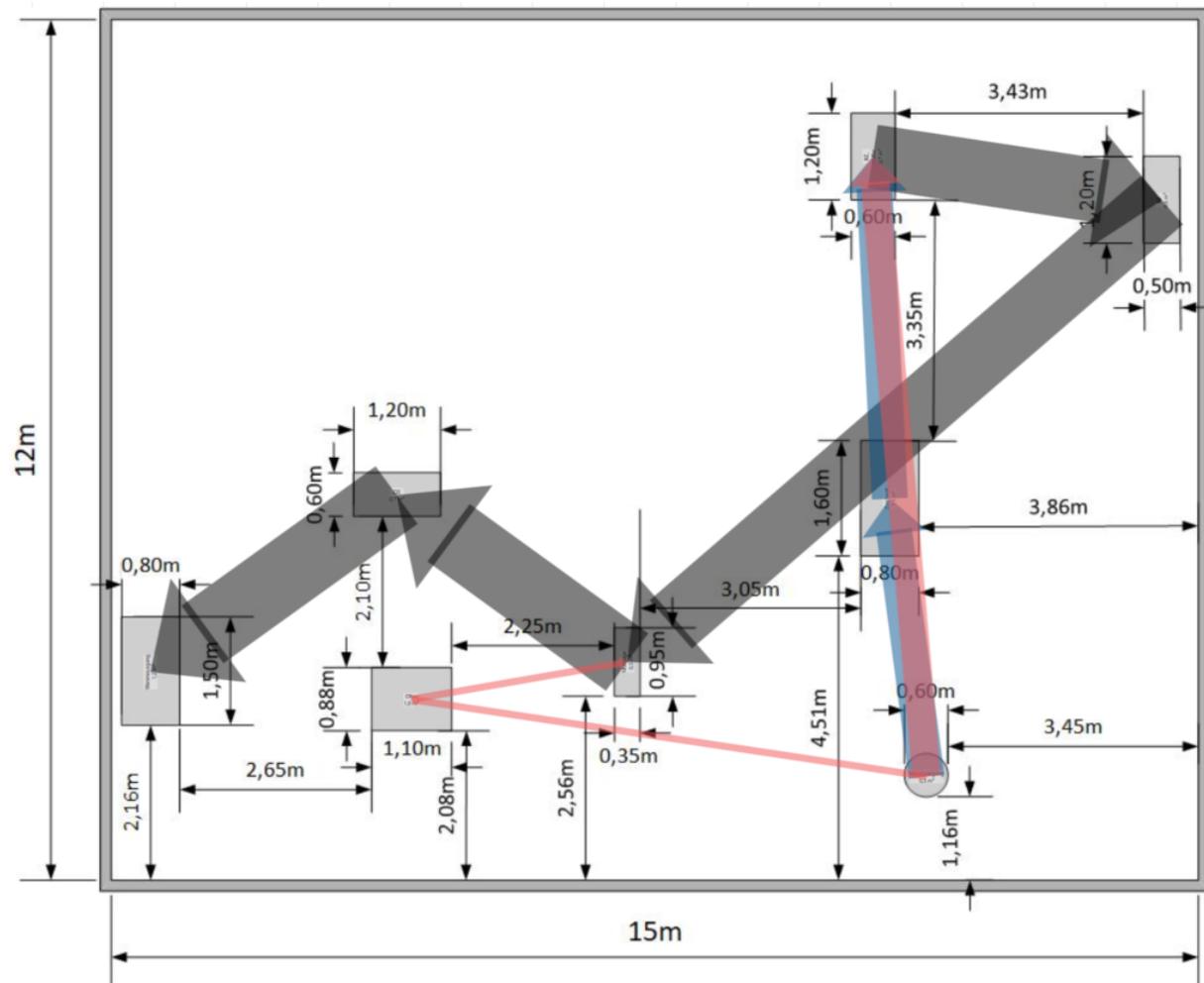


Abbildung 39: Sankey-Diagramm eingebettet in das Layout des Versuchsaufbaus²⁴⁸

Nun kann versucht werden eine optimale Anordnung der verschiedenen Stationen zu finden. Eine Möglichkeit hierfür ist es, zunächst die Transportbeziehungen zu optimieren, die sowohl eine hohe Intensität als auch Distanz haben. Zur Identifikation dieser kann die jährliche Anzahl an Transporten über der Distanz der jeweiligen Transportroute in einem sogenannten Distanz-Intensitäts-Diagramm aufgetragen werden. In Abbildung 40 lässt sich im rechten oberen Bildrand eine besonders ungünstige Transportbeziehung erkennen. Diese verläuft von dem Bearbeitungszentrum zur Montage. Dementsprechend wird als Erstes versucht diesen Abstand zu minimieren und anschließend die anderen Stationen ihren Transportintensitäten entsprechend anzuordnen.

²⁴⁸ Eigene Darstellung

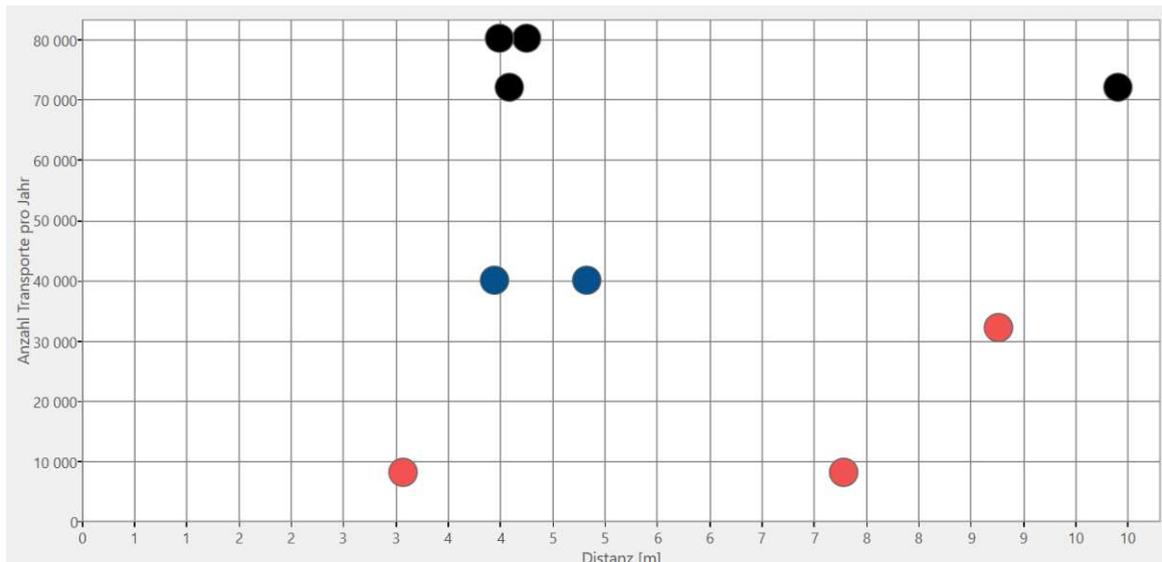


Abbildung 40: Distanz-Intensitäts-Diagramm²⁴⁹

Mithilfe dieses Materialflussmodells lassen sich schnell verschiedene Veränderungen in Hinblick auf den Transportaufwand evaluieren. So zeigt sich z. B., dass bereits durch einen Ortstausch des Bearbeitungszentrums mit dem Puffer des Bearbeitungszentrums der Transportaufwand um 5% oder 111,43 km sinkt. Die daraus resultierenden Materialflüsse sind in Abbildung 41 zu sehen.

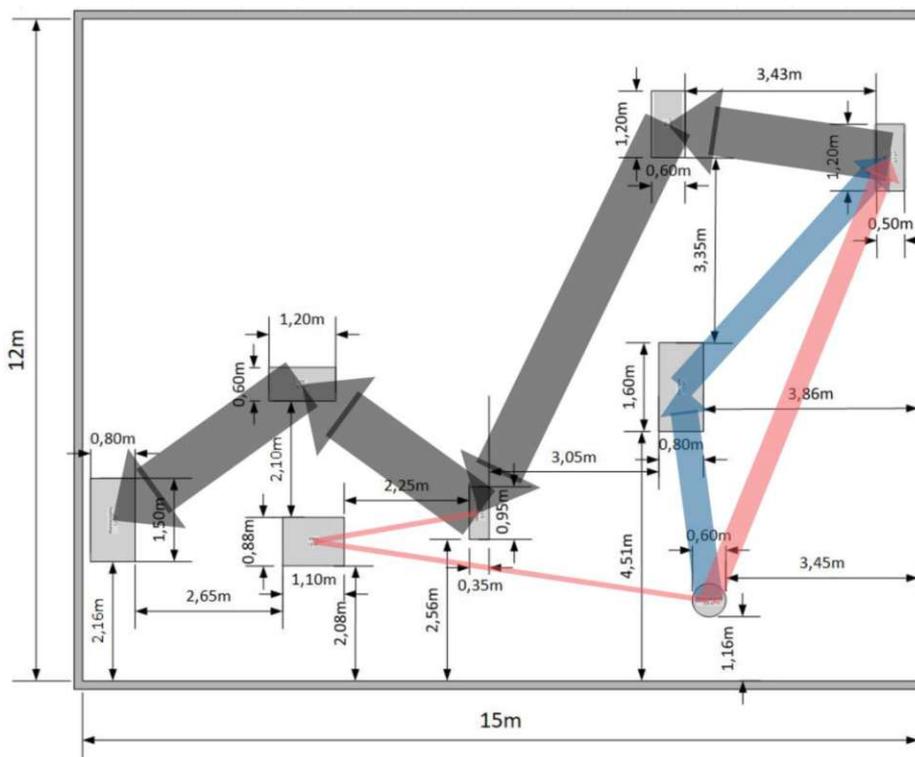


Abbildung 41: Optimiertes Layout²⁵⁰

²⁴⁹ Eigene Darstellung

²⁵⁰ Eigene Darstellung

6 Auswertung und Resultate

6.1 Qualität und Validität der Daten

Im Rahmen der Informationsauswertung wurden bereits Betrachtungen zur Qualität der erfassten Daten angeführt. Sowohl der aufgezeichnete Qualitätsindikator als auch die gemessenen Geschwindigkeiten lassen in Kombination mit den Positionsdaten keine Fehlmessungen im relevanten Ausmaß vermuten. Die Darstellung einer Heatmap über dem Layout der Fabrik in Abbildung 42 legt ebenfalls nahe, dass die verschiedenen Stationen in der Fabrik korrekt aufgezeichnet wurden, da die Orte mit einer hohen Konzentration an Datenpunkten den Stationen im Layout entsprechen.

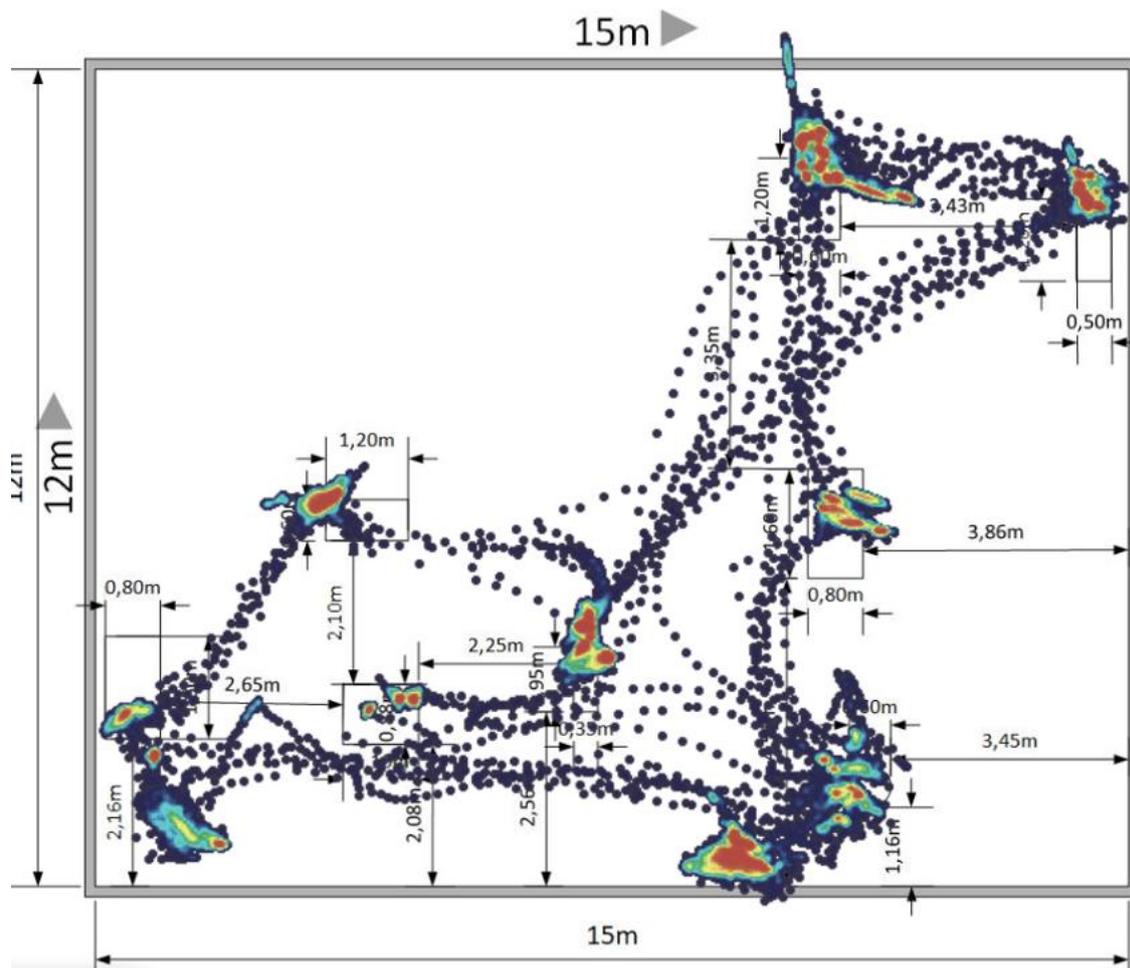


Abbildung 42: Heatmap über dem Fabriklayout²⁵¹

Die Validität des aus den Positionsdaten generierten Event Logs lässt sich anhand der aufgezeichneten Produktionsabläufe untersuchen. Die Prozessmodelle für beide Produkttypen (siehe Abbildungen 32 und 33) geben plausibel die durchgeführten Prozessschritte für jedes Produkt wieder. Der einzige nicht-plausible Ablauf wurde

²⁵¹ Eigene Darstellung

mithilfe einer einfachen logischen Regel genauso wie die unvollständigen Abläufe herausgefiltert.

Hinsichtlich der Dauer der Datenaufnahme wurde in Abbildung 29 gezeigt, dass mehrere unterschiedliche Produktionsabläufe aufgezeichnet werden konnten. Allerdings wurde kein Ablauf mehr als drei Mal durchlaufen. Daher wäre eine längere Aufzeichnungsdauer von Vorteil, um statistisch fundiertere Daten zu erhalten.

Ein Vorteil des gewählten Versuchsaufbaus ist, dass die gemessenen Prozesszeiten mit jenen verglichen werden können, die durch die Timer vorgegeben sind. Abbildung 43 zeigt, dass die auf den Timern eingestellten Prozesszeiten alle zwischen 3 und 12 Sekunden kürzer sind als die im Mittel gemessenen Zeiten. Diese Differenzen lassen sich gut durch die Verzögerungen für das Starten des Timers und den Weitertransport des Produkts erklären. Daher kann angenommen werden, dass die gemessenen Zeiten die Realität gut widerspiegeln.

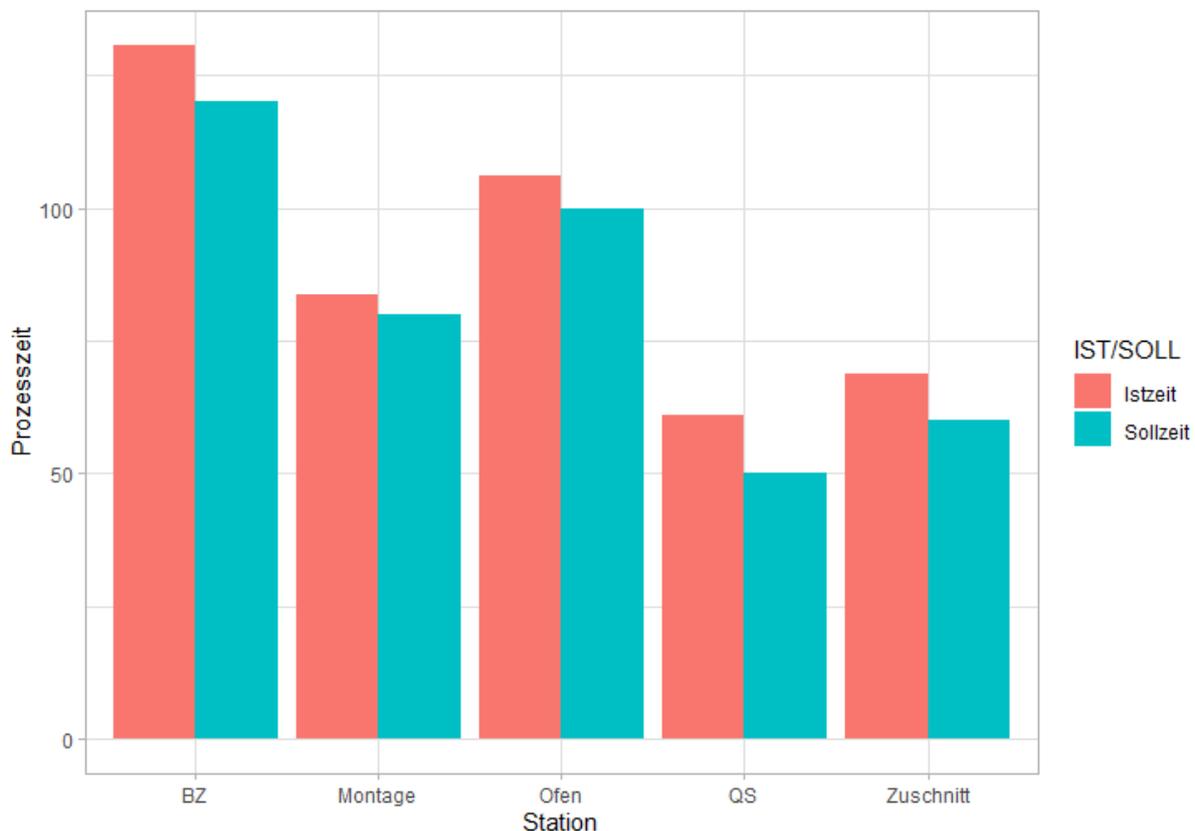


Abbildung 43: Vergleich der IST- und SOLL-Zeiten²⁵²

²⁵² Eigene Darstellung

6.2 Effizienz der Datenerfassung

Die Effizienz der Durchführung der Datenerfassung lässt sich anhand der in Kapitel 5.1.1 angeführten Fragestellungen bewerten.

Ist es möglich, anhand des Fabriklayouts eine RTLS-Technologie auszuwählen und die Anordnung der Anchors und Gateways zu planen?

Aufgrund der geringen Distanzen zwischen den verschiedenen Stationen kam für den Versuch nur UWB als RTLS-Technologie in Frage. Für die Auswahl einer Technologie in weniger eindeutigen Fällen wurden bereits verschiedene Modelle entwickelt, die zum Einsatz kommen können.

Aus den Abmessungen des betrachteten Fabrikbereichs ließ sich ableiten, dass vier Anchors genügen, was durch die zufriedenstellende Datenqualität bestätigt werden kann. Daher ist aufgrund der Skalierbarkeit des Systems anzunehmen, dass die Anzahl der Anchors a priori gut festgelegt werden kann. Der genaue Aufstellort lässt sich jedoch nicht allein aus dem Fabriklayout ableiten, sondern muss vor Ort festgelegt werden.

Ist das Anbringen und Abnehmen der Tags einschließlich der Zuweisung einer Materialnummer effizient durchführbar?

Anbringen und Abnehmen der Tags mittels Klebebands funktionierten einfach und zuverlässig, es kam zu keinem Herunterfallen von Tags. Die Zuweisung der Materialnummer zu den Tags über das Online-Formular war einfach und intuitiv, sodass sie nach einer kurzen Erklärung fehlerfrei durchgeführt werden konnte. Somit lässt sich festhalten, dass diese Arbeitsschritte effizient durchführbar sind.

Können die Anchors und Gateways problemlos angebracht und initialisiert werden?

Es war möglich, die Anchors ohne weitere Befestigungsmaßnahmen auf der bestehenden Infrastruktur aufzustellen. Da die Anbringung der Anchors auf jedem erhöhten Objekt ohne weiteres möglich ist, sind hier auch im Allgemeinen keine Probleme zu erwarten. Das Gateway konnte an einem Stromanschluss in Reichweite der Anchors problemlos platziert werden. Die Initialisierung funktionierte ebenfalls ohne Schwierigkeiten.

Ermöglicht die nach Formel 1 errechnete Ortungsfrequenz eine ausreichende Auflösung der Produktions- und Transportprozesse?

Wie in Kapitel 5.3.1 bereits ausgeführt wurde, war die gewählte Ortungsfrequenz ausreichend hoch, um alle Transportbewegungen und Produktionsprozesse aufzulösen. Da die Eingangswerte für die Formel im Allgemeinen immer zumindest

grob abgeschätzt werden können, sollte sie auch sonst zufriedenstellende Ergebnisse liefern.

Kann die nötige Dauer für die Datenaufnahme im Vorhinein bestimmt werden?

Da a priori keine Information zu den realen Durchlaufzeiten vorlag, konnte die nötige Dauer für die Datenaufnahme nur anhand der Prozesszeiten der Produktionsschritte abgeschätzt werden. Die gewählte Dauer war ausreichend, um den Durchlauf jedes Produkts mindestens einmal aufzuzeichnen. Durch eine längere Aufzeichnungsdauer könnten allerdings noch bessere Abschätzungen über die Prozesszeiten getroffen werden. Die Bestimmung der nötigen Dauer der Datenaufnahme im Vorhinein ist somit ohne Kenntnis über die Durchlaufzeiten nur schwierig möglich, weshalb im Zweifel eine längere Aufnahmedauer zu wählen ist.

6.3 Nutzung für die Fabrikplanung

Zur Bewertung der Nutzung der erfassten Daten für die Fabrikplanung werden ebenfalls die in Kapitel 5.1.1 definierten Fragestellungen herangezogen.

Ist es möglich, die Sensordaten bestimmten Prozessschritten zuzuordnen?

Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, wurde erfolgreich ein Event Log auf Basis der Sensordaten erstellt. Die Auswertung der erfassten Produktionsabläufe zeigt darüber hinaus, dass sowohl die Reihenfolge als auch die Dauer der Prozessschritte weitgehend den aufgrund des Versuchsaufbaus erwarteten Ergebnissen entsprechen. Die Ergebnisse legen somit nahe, dass die vorgestellte Methodik die Prozessschritte korrekt erfasst.

Ist es möglich, aus den Sensordaten die folgenden Informationen über den Produktionsprozess zu gewinnen:

- *Produktionsabläufe und Prozesszeiten der verschiedenen Produkte,*
- *Die Zykluszeiten der Produkte,*
- *Die Auslastungen der einzelnen Stationen unter Berücksichtigung der Absatzprognosen,*
- *Die Bestände der Pufferlager in der Produktion.*

Die Produktionsabläufe und Prozesszeiten jedes Produkttyps konnten mithilfe der Process-Mining-Bibliothek *bupaR* einfach ermittelt und visualisiert werden und sind angesichts der Vorgaben des Versuchsaufbaus plausibel. Die Zykluszeiten der verschiedenen Produkte konnten in Kombination mit den über ein Online-Formular mitdokumentierten Losgrößen ebenfalls leicht berechnet werden und liefern plausible Ergebnisse, da die Zykluszeit des Ofens, als einziger Station mit einer Losgröße von zwei, der Hälfte seiner Prozesszeit entspricht (vgl. Abbildungen 34 und 43). Aus dem

zeitlichen Verlauf des Bestands des Pufferlagers konnte entnommen werden, dass der Bestand zumeist 2-3 Werkstücke ausmacht. Die Größenordnung entspricht nicht nur der subjektiven Wahrnehmung während des Versuchs, sondern auch der aus Bestandsreichweite und Prozesszeit berechneten Bestandsmenge. Bei einer mittleren Bestandsreichweite von 238 Sekunden und einer mittleren Prozesszeit von 130 Sekunden lässt sich eine mittlere Bestandsmenge von 1,83 Stück errechnen.²⁵³ Da diese Berechnungen reproduzierbar in R implementiert wurden, ist es für alle Anwendungsfälle möglich diese Informationen zu gewinnen, sofern die Prozessschritte korrekt erfasst wurden und die nötigen Eingangsdaten vorliegen.

Kann ein Materialflussmodell aus den Sensordaten und prognostizierten Absatzmengen erstellt und visualisiert werden?

Eine aus dem Event Log generierte Materialflussmatrix konnte in ein Excel-File exportiert werden, das direkt von der Layoutplanungssoftware *visTABLE* eingelesen werden kann. Manuell angepasst werden musste lediglich die Lage der verschiedenen Stationen im Layout. Das erstellte Sankey-Diagramm bildet die erfassten Prozesse ab und stellt die Transportbeziehungen übersichtlich dar. Aufgrund der reproduzierbaren Implementierung kann diese Visualisierung ebenfalls immer erstellt werden, sofern die nötigen Eingangsdaten verfügbar sind.

Ermöglichen die auf den Sensordaten basierenden Auswertungen die folgenden Optimierungen:

- *Identifikation von Engpässen und problematischen Prozessen anhand des Prozessmodells und des Operator Balance Chart,*
- *Optimale Auslegung der Kapazitäten von Produktionsschritten,*
- *Richtige Dimensionierung der Pufferlager,*
- *Optimale Auslegung der Transportmittel und -wege,*
- *Optimierung der Anordnung der Produktions- und Logistikbereiche.*

Aus den Prozessdiagrammen geht deutlich hervor, dass im Pufferlager vor dem Bearbeitungszentrum lange Wartezeiten auftreten, die den Produktionsablauf wesentlich verzögern. Das OBC liefert eine Erklärung dafür, da diese Station eine deutlich längere Zykluszeit aufweist als die anderen. So konnte das Bearbeitungszentrum eindeutig als Engpass identifiziert werden. Diese Betrachtungen lassen sich im Allgemeinen immer durchführen, mit der Einschränkung, dass bei komplexeren Prozessen die Engpässe unter Umständen schwerer zu identifizieren sind.

Durch die Darstellung der Auslastungen in einem Säulendiagramm mit zusätzlicher farblicher Kennzeichnung in Abhängigkeit der Auslastung, kann auf den ersten Blick

²⁵³ vgl. Erlach 2020, S. 84.

festgestellt werden, dass das Bearbeitungszentrum bei den vorgegebenen Absatzmengen mehr als 100 % ausgelastet wäre und somit weitere Kapazitäten nötig wären. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die Sensordaten keine Informationen über Maschinenverfügbarkeiten liefern, sondern diese aus einer anderen Quelle bezogen werden müssen. Unter der Voraussetzung zuverlässiger Annahmen für die Verfügbarkeit der Maschinen und die Ausbringungsmengen der Produkte, kann somit eine Kapazitätsauslegung erfolgen.

Die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Bestände im Pufferlager erlaubt es, die maximal benötigte Kapazität des Pufferlagers zu bestimmen. Außerdem lassen sich aus der daraus abgeleiteten Dichtefunktion Aussagen darüber treffen, welche Kapazität mit welcher Wahrscheinlichkeit genügt, um alle Werkstücke aufzunehmen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass der Bestand des Lagers bekannt sein muss und alle Werkstücke, die während der Aufzeichnung in das betreffende Lager gelangen mit einem Tag versehen sein müssen.

Über eine Heatmap der Datenpunkte zwischen den einzelnen Stationen konnten die Punkte mit dem größten Transportaufkommen identifiziert werden. Durch die Betrachtung der Transportgeschwindigkeiten konnte allerdings festgestellt werden, dass es an diesen Punkten zu keinen Stauungen kommt, die eine Änderung der Transportroute erforderlich machen würden. Diese Betrachtungen können immer durchgeführt werden, da sie direkt aus den Rohdaten ableitbar sind.

Durch die Kombination des ins Layout eingebetteten Sankey-Diagramms und des Distanz-Intensitäts-Diagramm konnten sowohl suboptimale Anordnungen im Fabriklayout identifiziert als auch die Auswirkung der Optimierungsmaßnahmen automatisch berechnet werden. Basierend auf diesem Materialflussmodell kann auch leicht ein komplett neues Ideallayout erstellt und evaluiert werden.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Diskussion der Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen

Im Folgenden wird diskutiert, inwiefern die eingangs definierten Forschungsfragen durch die Ergebnisse dieser Arbeit beantwortet werden können.

Welche Anforderungen muss ein Sensorsystem erfüllen, um die Fabrikplanung optimal zu unterstützen?

Aus der Recherche der relevanten Fachliteratur der Fabrikplanung konnte eine umfassende Aufstellung der Daten gewonnen werden, die für die Fabrikplanung benötigt werden. Diese lassen sich in Produkt-, Produktions- und Immobiliendaten gliedern. Aus der Recherche der möglichen Datenquellen konnten in weiterer Folge jene Daten identifiziert werden, bei denen häufig Probleme bezüglich der Verfügbarkeit oder Qualität zu erwarten sind. Dies trifft vor allem für folgende Daten zu:

- Bearbeitungsfolge der Produkte
- Produktions- und Materialflusssteuerung
- Durchlauf- und Prozesszeiten
- Bestände
- Materialflüsse
- Belastungsdaten

Weitere Anforderungen wurden aus den aktuellen Trends, die die Fabrikplanung wesentlich beeinflussen, abgeleitet. Daraus ergaben sich die Anforderungen an die Wandlungsfähigkeit, an ein durchgängiges Datenmanagement und an die Fähigkeit, Änderungen in der Fabrik zu erkennen. Weiters wurden die Zeit für die Installation und die Kosten des Systems bewertet.

Welche Sensoren sind dafür geeignet, die Fabrikplanung optimal zu unterstützen und wie können diese effizient und zielgerichtet eingesetzt werden?

Aus der Grundlagenrecherche zu den in Produktionsumgebungen eingesetzten Sensoren wurde abgeleitet, dass RTLS- und Auto-ID-Sensoren prinzipiell geeignet sind, die Datenanforderungen zu erfüllen. Die Bewertung dieser Technologien im Hinblick auf die definierten Anforderungen ergab, dass zwar beide Systeme gut geeignet sind, aber RTLS noch etwas besser abschneiden.

Für den Einsatz im Rahmen einer Fabrikplanung müssen zunächst einige Informationen zum Untersuchungsobjekt eingeholt werden (siehe Kapitel 4.3.5). Anhand dieser kann dann ohne großen Aufwand das RTLS installiert und die

Datenaufnahme durchgeführt werden. Dazu müssen die Tags im Wareneingang an Werkstücke angebracht und der Versuch solange durchgeführt werden, dass mehrere komplette Produktionsdurchläufe aufgezeichnet werden können.

Durch die praktische Umsetzung konnte gezeigt werden, dass die gewählten Sensoren tatsächlich für die Erfassung der gewünschten Daten geeignet sind. In der gewählten Umgebung lagen ähnliche Störfaktoren wie in einem realen Produktionsunternehmen vor und die geforderte Genauigkeit war, aufgrund der geringen Abmessungen des Aufbaus, sehr hoch. Daher kann geschlussfolgert werden, dass die gewählten Sensoren auch für den Einsatz in einer realen Produktionsumgebung geeignet sind.

Welche Kontextinformationen sind zur Interpretation der erfassten Rohdaten nötig und wie können diese eingebunden werden?

Durch den Vergleich der beschriebenen Datenanforderungen mit den Daten, die von einem RTLS geliefert werden, konnten die nötigen Kontextinformationen abgeleitet werden. Dazu zählen einerseits Stammdaten, die nur einmal erhoben werden müssen, wie die Anordnung der Produktions- und Logistikbereiche oder Absatzprognosen. Andererseits müssen auch bei jeder neuen Anbringung eines Tags Identifikationsnummern des jeweiligen Produkts und die Größe des Loses erfasst werden.

Die Stammdaten werden im Rahmen der Datenauswertung eingebunden, indem sie z. B. als Excel-Tabellen eingelesen werden. Die Erfassung der Identifikationsnummern und Losgrößen kann sehr unkompliziert über ein Online-Formular erfolgen, in dem der Bediener bei der Anbringung der Tags nur wenige Eingaben tätigen muss.

Welcher Nutzen ergibt sich durch den Einsatz des Sensorsystems für die Fabrikplanung und weitere Produktionsoptimierungen?

Durch die praktische Umsetzung der Vorgehensweise konnte gezeigt werden, dass mit nur wenigen, in der Regel gut verfügbaren Informationen der Fabrikplanungsprozess von der Informationsbeschaffung bis zur Idealplanung auf Basis der Sensordaten durchgeführt werden konnte. Die Umsetzung der Datenaufnahme war außerdem ohne großen Installationsaufwand möglich und auch die Logistikprozesse wurden kaum beeinträchtigt. Die sensorbasierte Erfassung der Planungsdaten bietet darüber hinaus folgende Vorteile:

- Die für die Fabrikplanung verwendeten Daten können gerade durch ein volatileres Produktionsumfeld und Produktprogramm schnell veraltet sein und nicht mehr den tatsächlichen aktuellen Abläufen entsprechen. Die Sensordaten hingegen bilden immer die aktuellen Prozesse ab und können auch ungeplante Prozessschritte wie Nacharbeiten quantitativ erfassen.

- Dynamische Effekte wie etwa Stauungen in der Produktion können im Allgemeinen aus statischen Daten nicht erkannt werden, sondern müssten z. B. mithilfe einer Simulation ausgewertet werden. Durch die Datenerfassung im laufenden Betrieb werden auch diese vollständig erfasst.
- Die vorgestellte Methodik lässt sich einfach auf andere Anwendungsfälle übertragen. Dazu müssen lediglich die Datenanforderungsliste angeführten Informationen erhoben und die Datenaufnahme wie beschrieben durchgeführt werden. Da die so erhobenen Daten immer das gleiche Format haben, können die Auswertungen nahezu auf Knopfdruck erfolgen. Dies ist besonders nützlich, wenn eine hohe Planungsfrequenz gefordert ist, da so sehr schnell eine neue Planungsgrundlage geschaffen werden kann.

Einige der Auswertungen, die im Rahmen dieser Vorgehensweise ermittelt wurden, lassen sich auch außerhalb eines Fabrikplanungsprojekts für Optimierungen nutzen. Beispielsweise lassen sich aus den Prozessdarstellungen und dem OBC der verschiedenen Produkte Engpässe und andere Probleme im Produktionsprozess ermitteln. Anhand der Auslastungen lässt sich außerdem erkennen, welche Ressourcen zusätzliche Kapazitäten z. B. durch andere Schichtmodelle benötigen. Potenziale für weitere Produktionsoptimierungen sind in Kapitel 7.3.2 beschrieben.

Welche Rolle kann sensorbasierte Datenerfassung für die Fabrikplanung spielen, im Verhältnis zu anderen verfügbaren Datenquellen?

Aus der Übersicht der Datenanforderungen für die Fabrikplanung in den Tabellen 5-7 lässt sich erkennen, welche Daten aus welchen klassischen Quellen gewonnen werden können. Das Sensorsystem und die durchgeführten Auswertungen wurden so ausgelegt, dass genau jene Daten erhoben werden, die in den klassischen Datenquellen besonders schlecht verfügbar sind. Die übrigen Daten müssen weiterhin mit den klassischen Methoden erhoben werden. Sind Daten, die vom Sensorsystem geliefert werden, bereits in den IT-Systemen des Unternehmens verfügbar, ergibt sich darüber hinaus die Möglichkeit, beide Datenquellen abzugleichen und so zu validieren. Beispielsweise könnte der von dem RTLS erzeugte Event Log mit den Aufzeichnungen aus einem MDE-/BDE-System verglichen werden. So könnten z. B. auch die vom MDE-System erfassten Maschinenzustände um die Informationen zu den Logistikprozessen aus dem RTLS erweitert werden. Durch die zunehmende Digitalisierung von Unternehmen wird diese Kopplung des Sensorsystems mit bestehenden Systemen weiter an Bedeutung gewinnen. Jedoch wird der flexible Einsatz eines zusätzlichen Sensorsystems durch diese Entwicklung nicht redundant werden, da er eine Möglichkeit bietet, schnell zu einem abgegrenzten Betrachtungsbereich Daten zu liefern.

7.2 Einschränkungen der Ansätze und Ergebnisse

Die entwickelte Vorgehensweise ist allgemein für Fabrikplanungsprojekte in Unternehmen, die Stückgüter produzieren, anwendbar. Die Anwendung in der Prozessindustrie ist nicht ohne weitere Anpassungen möglich, da das Rohmaterial nicht einfach mit Tags nachverfolgt und diskrete Ereignisse aufgezeichnet werden können. Für die Anwendung bei Unternehmen mit besonders langen Durchlaufzeiten, wie sie z. B. im Anlagenbau üblich sind, ist zu beachten, dass es nicht möglich sein wird komplette Produktdurchläufe aufzuzeichnen. Dementsprechend muss die Auswertung dahingehend angepasst werden, dass die Prozesse nicht auf Produktebene ausgewertet werden, sondern auf Ebene der Rohteile und Halbfertigerzeugnisse.

Bezüglich der Aufzeichnung der Prozesszeiten ist anzumerken, dass Wartezeiten und Bearbeitungszeiten nur unterschieden werden können, wenn die Warte- und Bearbeitungsplätze örtlich ausreichend weit voneinander entfernt sind. Außerdem lassen sich Maschinenstillstände mit dem Sensorsystem nicht erfassen. Diese müssten bei Bedarf aus anderen Systemen ausgelesen werden, um z. B. die Maschinenverfügbarkeiten zu berechnen. Die Aufzeichnung der Bestände in der Produktion gibt den aktuellen Stand wieder, lässt sich aber nicht einfach auf zukünftige Produktionsmengen extrapolieren. Hierzu wären zusätzliche Berechnungen anhand von Warteschlangenmodellen oder Simulationen nötig.

Der Versuch in einem vorgegebenen Setting ermöglichte es sehr effizient die wesentlichen Elemente der Vorgehensweise zu testen. Nichtsdestotrotz gibt es bestimmte Charakteristiken eines realen Produktionsunternehmens, die auf diese Weise nicht nachgestellt werden konnten. Einerseits weisen Fabriken in der Regel wesentlich größere Abmessungen auf, die die Installation eines größeren Rasters von Anchors und Gateways erfordern. Das eingesetzte System ist allerdings skalierbar aufgebaut, sodass diesbezüglich keine Probleme zu erwarten sind. Andererseits mussten im Rahmen des Versuchs höhere Genauigkeiten erreicht werden, als in einer echten Fabrik zu erwarten sind. Daher kann es sich lohnen auch andere Übertragungstechnologien wie BLE oder WLAN über die in der Literatur beschrieben Auswahlmodelle zu evaluieren.

Ein weiterer Aspekt ist, dass in einem realen Produktionsunternehmen eine wesentlich größere Anzahl an Personen mit dem RTLS in Berührung kommt und dementsprechend eingeschult werden müsste. Der komplexeste Teil der Bedienung, die Registrierung der Tags, muss jedoch ohnehin nur von wenigen Personen durchgeführt werden. Außerdem werden die Durchlaufzeiten echter Produkte in der Regel länger als im durchgeführten Versuch sein, weshalb längere Aufnahmedauern nötig sein werden. Dies könnte wiederum häufigeres Aufladen der Batterien erfordern, idealerweise zwischen den Schichten und die Verarbeitung größerer Datenmengen.

Schließlich ist noch anzumerken, dass in der industriellen Praxis unterschiedliche Werkstücke und Transportbehälter anzutreffen sind und somit die Befestigung der Tags nicht immer in gleicher Weise optimal möglich sein wird. In diesem Zusammenhang könnte es sinnvoll sein, die Tags an Behälter zu befestigen, da bei diesen weniger unterschiedliche Ausführungen zu erwarten sind.

7.3 Weiterführender Forschungsbedarf

7.3.1 Weiterentwicklung für die Fabrikplanung

Ein naheliegender nächster Schritt in der Weiterentwicklung der vorgestellten Vorgehensweise ist die praktische Umsetzung in einem Produktionsunternehmen, um jene Aspekte zu evaluieren, die in dem gewählten Versuchsaufbau noch nicht betrachtet werden konnten (siehe dazu Kapitel 7.2).

Weiteres Optimierungspotenzial ergibt sich durch die Anwendung von Methoden zur Verbesserung der Genauigkeit der Ortungssignale z. B. durch Filterung oder Machine Learning. So könnten die Prozessabläufe und -zeiten noch zuverlässiger ermittelt oder die Kosten gesenkt werden, da billigere Hardware eingesetzt werden kann. Andere Möglichkeiten zur Verbesserung der Ortungsgenauigkeit bestehen in der Kombination verschiedener Sensoren. Beispielsweise können die Tags mit einen zusätzlichen Beschleunigungssensor ausgestattet werden, um genauere Abschätzungen der aktuellen Position zu liefern. Auch die Kombination mit anderen Systemen wie RFID oder Bilderkennung ist möglich und Gegenstand aktueller Forschungen.²⁵⁴

Die Speicherung der Positionsdaten erfolgte im Rahmen des Versuchs auf einem lokalen Rechner. Für längere Aufzeichnungsdauern wäre es hilfreich, wenn die Daten direkt in einer Cloud abgespeichert würden. So würde nicht nur Speicherplatz auf dem lokalen Rechner gespart, sondern auch die Überwachung und Analyse aus der Ferne in Echtzeit ermöglicht.

Die Auswertungen wurden als Skript in der Programmiersprache R implementiert. Dieses kann ohne Anpassungen für neue Datensätze direkt ausgeführt werden und liefert alle in Kapitel 5.3 angeführten Grafiken und Metriken. Sollte ein Unternehmen bereits über einen geeigneten Event Log z. B. aus einem MDE-/BDE-System verfügen, könnten aus diesem ebenfalls direkt alle Auswertungen gewonnen werden. Um die Durchführung dieser Auswertungen auch gänzlich ohne Programmierkenntnisse zu ermöglichen, kann der Programmcode z. B. in eine Web- oder Desktop-Applikation integriert werden.

²⁵⁴ vgl. Toro et al. 2021, S. 42ff.

Die durchgeführten Auswertungen bieten ein umfassendes Bild der aktuellen Situation in der Fabrik und ermöglichen darüber hinaus Auslastungen und Materialflüsse mit den für den Auslegungszeitraum erwarteten Absatzmengen zu skalieren. Allerdings hängen manche Größen wie die Warteschlangen vor Stationen von dem dynamischen Verhalten der Fabrik ab und können daher nicht einfach hochskaliert werden. Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens eignen sich insbesondere Simulationen. Die detaillierte Datenaufnahme durch die entwickelte Vorgehensweise bietet hierfür eine gute Grundlage, da bereits einige der für die Simulationserstellung benötigten Daten erfasst werden. Andere Informationen wie die Dispositions- und Prioritätsregeln müssten allerdings noch aus den Daten abgeleitet oder anders erhoben werden.²⁵⁵ Die standardisierte Datenerhebung und -auswertung bietet darüber hinaus eine geeignete Basis dafür den Prozess der Simulationserstellung zu vereinfachen und zu automatisieren.

7.3.2 Weitere Einsatzmöglichkeiten für die Produktionsoptimierung

Die erhobenen Daten und Auswertungen lassen sich auch außerhalb von Fabrikplanungsprojekten für Optimierungen der Produktionsorganisation einsetzen. So können ermittelte Kennzahlen wie Maschinenauslastungen oder Durchlaufzeiten in regelmäßigen Abständen neu evaluiert werden, um Probleme in der Produktion frühzeitig zu erkennen. Außerdem werden durch die entwickelte Vorgehensweise bereits einige der wesentlichen Daten für eine Wertstromanalyse geliefert. Dazu zählen z. B. die Zykluszeiten, Wartezeiten und Durchlaufzeiten sowie die nötigen Produktionsschritte der verschiedenen Produkte. Ergänzt werden müssten insbesondere noch die Informationsflüsse, da diese nicht aus den Sensordaten ausgelesen werden können. Außerdem können die Prozessdarstellungen in die Notation der Wertstromanalyse übertragen werden, um eine übersichtliche Darstellung zu erreichen, die im Produktionsmanagement sehr etabliert ist. Die Durchführung einer Wertstromanalyse auf Basis von Sensordaten könnte dazu beitragen, den Schwächen der klassischen Wertstromanalyse zu begegnen. Durch das Wegfallen manueller Prozessaufnahmen sinkt der Aufwand für die Datenaufnahme beträchtlich und das Ergebnis wird unabhängig von menschlichen Fehlern oder Vorurteilen. Dadurch können die Wertstromanalysen wesentlich häufiger durchgeführt werden, was angesichts kürzer werdender Produktlebenszyklen einen großen Vorteil bedeutet. Des Weiteren können auch sehr komplexe Wertströme mit vielen Verzweigungen und mehreren Produktfamilien erfasst werden.

Weitere Potenziale ergeben sich, wenn das RTLS nicht nur kurzfristig für abgegrenzte Analysen eingesetzt, sondern fix in die Produktionsabläufe integriert wird. Idealerweise werden dazu die Daten aus dem RTLS direkt in die bestehenden IT-Systeme des

²⁵⁵ vgl. Grundig 2018, S. 225ff.

Unternehmens eingebunden. So stehen diese auch direkt anderen Anwendungen wie der Produktionsplanung zur Verfügung, die den Fortschritt der Aufträge in der Produktion in Echtzeit überwachen kann.

Die dauerhafte Integration des RTLS bietet darüber hinaus die Basis für einen Digitalen Zwilling der Produktion. Dieser könnte basierend auf den RTLS-Daten und aufbauend auf die bereits implementierten Auswertungen selbstständig Optimierungen durchführen. In einem rekonfigurierbaren Produktionssystem könnte so eine optimale Anordnung der Produktionsressourcen anhand des generierten Materialflussmodells durch einen geeigneten Optimierungsalgorithmus erfolgen.

7.4 Kritische Würdigung

Die in dieser Arbeit vorgestellte Vorgehensweise bietet eine Ergänzung zu den etablierten Methoden der Fabrikplanung, die für ein statisches Umfeld ausgelegt sind und bei fehlenden Daten auf aufwendige oder ungenaue Methoden der Primärerhebung zurückgreifen müssen. Die Nutzung von Sensoren zu diesem Zweck wurde zwar bereits in einigen Publikationen beschrieben, jedoch wurden dabei zumeist nur statische 3D-Modelle der Fabrik erzeugt und keine Informationen über die Prozesse erhoben. Eine praktisch validierte Methodik, die sensorbasierte Datenerhebung mit dem etablierten Phasenmodell der Fabrikplanung zu verknüpfen, konnte nicht gefunden werden.

Durch die Grundlagenrecherche ist es gelungen, sowohl ein umfangreiches Bild der Datenanforderungen für die Fabrikplanung zu gewinnen als auch zu identifizieren, welche Daten am schlechtesten verfügbar sind. Basierend auf diesem Ergebnis und den in der Literatur beschriebenen Trends der Fabrikplanung, konnte systematisch evaluiert werden, dass RTLS sehr gut für den Einsatz in der Fabrikplanung geeignet sind.

Eine weitere Herausforderung war die Anreicherung der Rohdaten mit Kontextinformationen, da eine Einbindung in bestehende IT-Systeme für die temporäre Anwendung einen zu großen Aufwand bedeutet hätte. Auf Basis der Datenanforderungen konnte eine Lösung gefunden werden, die ohne relevanten Mehraufwand die Ergänzung der Rohdaten ermöglicht. Die Durchführung der kompletten Vorgehensweise in einer Versuchsumgebung zeigte darüber hinaus, dass sämtliche Schritte problemlos durchgeführt werden konnten und die Produktions- und Logistikprozesse weitgehend ungestört blieben.

In Kombination mit den Auswertungen, die die wichtigsten Grundlagen für das weitere Fabrikplanungsvorgehen lieferten, lässt sich somit feststellen, dass die Vorgehensweise effizient und zielgerichtet funktionierte. Aus der umfangreichen

Validierung der Daten lässt sich weiters erkennen, dass die ermittelten Kennzahlen und Prozesse durchwegs ein realistisches Abbild der Fabrik liefern.

8 Anhang

8.1 R-Skript zur Datenauswertung

```
require(readxl)
require(readr)
require(dplyr)
require(ggplot2)
require(lubridate)
require(ggpointdensity)
require(stringr)

df_raw <- read_csv2("positions-bewegungsdaten.csv") %>%
  select(-x17) %>%
  mutate(Timestamp = ymd_hms(Timestamp))

areas <- read_csv2("Bereiche.csv")

df_raw %>%
  ggplot(aes(X, Y, color = `Geschwindigkeit-2D-Block`)) +
  geom_point() +
  theme_light() +
  scale_x_continuous(minor_breaks = seq(-2, 15, 0.5)) +
  scale_y_continuous(minor_breaks = seq(-2, 15, 0.5)) +
  scale_color_continuous(name = "Geschwindigkeit in m/s") +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][1], xmax = areas[[3]][1], ymin = areas[[4]][1],
            ymax = areas[[5]][1], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][2], xmax = areas[[3]][2], ymin = areas[[4]][2],
            ymax = areas[[5]][2], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][3], xmax = areas[[3]][3], ymin = areas[[4]][3],
            ymax = areas[[5]][3], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][4], xmax = areas[[3]][4], ymin = areas[[4]][4],
            ymax = areas[[5]][4], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][5], xmax = areas[[3]][5], ymin = areas[[4]][5],
            ymax = areas[[5]][5], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][6], xmax = areas[[3]][6], ymin = areas[[4]][6],
            ymax = areas[[5]][6], alpha = 0) +
  geom_rect(xmin = areas[[2]][7], xmax = areas[[3]][7], ymin = areas[[4]][7],
            ymax = areas[[5]][7], alpha = 0) +
```

```
geom_rect(xmin = areas[[2]][8], xmax = areas[[3]][8], ymin = areas[[4]][8],
ymax = areas[[5]][8], alpha = 0)
```

```
ggplot(df_raw, aes(X, Y, color = Quality)) +
  geom_point() +
  theme_light() +
  scale_x_continuous(minor_breaks = seq(-2, 15, 0.5)) +
  scale_y_continuous(minor_breaks = seq(-2, 15, 0.5)) +
  scale_color_gradient(low = "red", high = "green")
```

```
# Erstellen des Event logs aus Rohdaten
```

```
#####
```

```
# Tags herausfiltern, die ausgefallen sind
```

```
df_bad <- df_raw %>%
  arrange(TagID, Timestamp) %>%
  mutate(Ausfall = if_else(Timestamp - lag(Timestamp) > 30, 1, 0)) %>%
  group_by(TagID) %>%
  summarise(Ausfaelle = sum(Ausfall, na.rm = T)) %>%
  filter(Ausfaelle > 0)
```

```
vmax <- 0.5 # Maximale Geschwindigkeit für Station
```

```
df_ext <- df_raw %>%
  filter(Projekt == "") %>%
  mutate(Station = "") # leeres df
```

```
# Datenpunkte zu Station zuweisen
```

```
for(i in 1:nrow(areas)) {
  df_temp <- df_raw %>%
    filter(!(TagID %in% df_bad$TagID))
```

```

        & X > areas$xmin[i] & X < areas$xmax[i]
        & Y > areas$ymin[i] & Y < areas$ymax[i]
        & `Geschwindigkeit-2D` < vmax) %>%
      mutate(Station = areas[[1]][i])
    df_ext <- add_row(df_ext, df_temp)
  }

# Validierung der Stationszuordnung
ggplot(df_ext, aes(X, Y, color = Station)) +
  geom_point()

df_ext %>%
  filter(TagID == "0096") %>%
  ggplot(aes(X, Y, color = Station)) +
  geom_point()

# Zusammenfassung der Datenpunkte zu Ereignissen

df_prep <- df_ext %>%
  arrange(TagID, TotalFramenumber) %>%
  mutate(Event = 0)

for(i in seq_along(df_prep$Event)) {
  if(i == 1) {
    df_prep$Event[i] = 1
  }
  if(i > 1) {
    if(df_prep$TagID[i] == df_prep$TagID[i-1] & df_prep$Station[i] ==
df_prep$Station[i-1]) {
      df_prep$Event[i] = df_prep$Event[i-1]
    } else {
      df_prep$Event[i] = df_prep$Event[i-1] + 1
    }
  }
}

```

```
df_event <- df_prep %>%
  group_by(Event) %>%
  summarise(TagID = max(TagID), Station = max(Station),
            Start = min(Timestamp), Ende = max (Timestamp))

# Verknuepfung mit Formular

init <- read_excel("Versuch Pilotfabrik 29.07.2021_(1-21).xlsx") %>%
  select(-`E-Mail`, -Name) %>%
  mutate(`Hardware-ID des Tags` = str_to_lower(`Hardware-ID des Tags`))

df_prod <- df_event %>%
  mutate(ProdID = 0, ProdTyp = 0, LG = 0, Auftrag = 0)

ind <- 0
for(i in seq_along(df_prod$Event)) {
  init_temp <- filter(init, `Hardware-ID des Tags` == df_event$TagID[i])
  if(i == 1) {
    ind <- 0
  } else if(df_prod$TagID[i] != df_prod$TagID[i-1]) {
    ind <- 0
  }
  if(df_prod$Station[i] == "Wareneingang") {
    ind <- ind+1
  }
  df_prod$ProdID[i] <- init_temp$Materialnummer[ind]
  df_prod$ProdTyp[i] <- init_temp$Produkt[ind]
  df_prod$LG[i] <- init_temp[[8]][ind]
  df_prod$Auftrag[i] <- init_temp$Auftragsnummer[ind]
}

## Auswertungen
```

```

#Auswertungen
#####
require(bupaR)
require(processmapR)
require(tidyr)

# Event Log initialisieren
elog <- df_prod %>%
  mutate(act_inst_id = 1:nrow(.), res = NA) %>%
  gather(key = "status", value = "Time", Start, Ende) %>%
  eventlog(case_id = "ProdID",
           activity_id = "Station",
           activity_instance_id = "act_inst_id",
           lifecycle_id = "status",
           timestamp = "Time",
           resource_id = "res")

require(processcheckR)
# Herausfiltern falscher Einträge
elog_prep <- elog %>%
  filter_trim(start_activities = "Wareneingang", end_activities =
"Warenausgang") %>%
  filter_rules(response("BZ_Puffer", "BZ"))

## Prozessmodell
elog %>%
  trace_explorer(coverage = 1)

elog_prep %>%
  trace_explorer(coverage = 1)

# Prozessmodell Produkt A
elog_prep %>%
  filter(str_detect(Auftrag, "A")) %>%
  process_map(type_nodes = performance(median, "secs"),
             type_edges = frequency("relative_case"))

```

```

# Prozessmodell Produkt B
elog_prep %>%
  filter(str_detect(Auftrag, "B")) %>%
  process_map(type_nodes = performance(median, "secs"),
             type_edges = frequency("relative_case"))

# Durchlaufzeiten

elog_prep %>% #nur volle Durchlaeufe
  filter_trim(start_activities = "wareneingang", end_activities =
"warenausgang") %>%
  mutate(Produkttyp = if_else(str_detect(Auftrag, "A"), "A", "B")) %>%
  group_by(Produkttyp) %>%
  throughput_time(level = "case", units = "secs") %>%
  ggplot(aes(Produkttyp, throughput_time, color = Produkttyp)) +
  geom_boxplot() +
  scale_y_continuous(limits = c(0, NA), name = "Durchlaufzeit in s") +
  theme_light()

#Flussgrad

elog_prep %>%
  filter(Station != "BZ_Puffer") %>%
  filter_trim(start_activities = "wareneingang", end_activities =
"warenausgang") %>%
  mutate(Produkttyp = if_else(str_detect(Auftrag, "A"), "A", "B")) %>%
  throughput_time(level = "case", units = "secs", append = T) %>%
  processing_time(level = "case", units = "secs", append = T) %>%
  mutate(Flussgrad = processing_time_case/throughput_time_case) %>%
  group_by(Produkttyp) %>%
  summarise(median(Flussgrad))

## Operator Balance Chart
require(processmonitr)

```

```
# OBC Produkt A
```

```
eelog_prep %>%
```

```
  filter(str_detect(Auftrag, "A") & Station != "Wareneingang" & Station !=  
"Warenausgang") %>%
```

```
  processing_time(level = "activity", units = "secs", append = T) %>%
```

```
  mutate(cycle_time = median_activity_processing_time/as.numeric(LG)) %>%
```

```
  filter(Station != "BZ_Puffer") %>%
```

```
  group_by(Station) %>%
```

```
  summarise(cycle_time = max(cycle_time)) %>%
```

```
  ggplot(aes(Station, cycle_time)) +
```

```
  geom_col() +
```

```
  scale_y_continuous(limits = c(0, NA), name = "Zykluszeit in s") +
```

```
  theme_light()
```

```
# OBC Produkt B
```

```
eelog_prep %>%
```

```
  filter(str_detect(Auftrag, "B") & Station != "Wareneingang" & Station !=  
"Warenausgang") %>%
```

```
  processing_time(level = "activity", units = "secs", append = T) %>%
```

```
  mutate(cycle_time = median_activity_processing_time/as.numeric(LG)) %>%
```

```
  filter(Station != "BZ_Puffer") %>%
```

```
  group_by(Station) %>%
```

```
  summarise(cycle_time = max(cycle_time)) %>%
```

```
  ggplot(aes(Station, cycle_time, fill = cycle_time)) +
```

```
  geom_col() +
```

```
  scale_fill_gradient(low = "green", high = "red", name = "Zykluszeit in s")  
+
```

```
  scale_y_continuous(limits = c(0, NA), name = "Zykluszeit in s") +
```

```
  theme_light()
```

```
## Auslastungen
```

```
# Absatzprognose einlesen
```

```
prog <- read_excel("Absatzprognose.xlsx")
```

```
#prog <- tibble(Produkt = c("A", "B"), Menge_pro_Jahr = c(40000, 40000))
```

```
kapa <- read_excel("Stationen_Kapa.xlsx") %>%
  mutate(Stunden_pro_Jahr = dhours(Stunden_pro_Jahr))

# Berechnung der Prozesszeiten und Haeufigkeiten
require(Diagrammer)

auslast <- kapa %>%
  mutate(Auslastung = 0)

for(i in 1:nrow(prog)) {

zeit <- eelog %>%
  filter(str_detect(Auftrag, prog$Produkt[i])) %>%
  process_map(type = performance(median, "secs"), render = F) %>%
  get_node_df() %>%
  select(label) %>%
  separate(label, into = c("Station", "Dauer"), sep = "\n") %>%
  filter(Station %in% kapa$Station) %>%
  mutate(Dauer = duration(Dauer))

colnames(zeit)[2] <- paste0("Dauer_", prog$Produkt[i])

freq <- eelog %>%
  filter(str_detect(Auftrag, prog$Produkt[i])) %>%
  process_map(type = frequency("relative_case"), render = F) %>%
  get_node_df() %>%
  select(label) %>%
  separate(label, into = c("Station", "Anteil"), sep = "\n") %>%
  filter(Station %in% kapa$Station) %>%
  mutate(Anteil = as.numeric(str_remove(Anteil, "%"))/100)

colnames(freq)[2] <- paste0("Anteil_", prog$Produkt[i])

auslast <- auslast %>%
```

```

left_join(zeit, by = "Station") %>%
left_join(freq, by = "Station") %>%
mutate(Auslastung = if_else(is.na(get(paste0("Dauer_", prog$Produkt[i]))),
                           Auslastung,
                           get(paste0("Dauer_", prog$Produkt[i]))*
                               prog$Menge_pro_Jahr[i]/Stunden_pro_Jahr*get(paste0("Anteil_",
prog$Produkt[i]))
                               + Auslastung))

```

```

}

```

```

ggplot(auslast, aes(Station, Auslastung)) +
  geom_col(aes(fill = Auslastung)) +
  scale_fill_gradient(low = "green3", high = "red") +
  geom_hline(yintercept = 1, show.legend = T) +
  scale_y_continuous(breaks = c(0, 0.25, 0.5, 0.75, 1)) +
  theme_light()

```

```

## Bestaende

```

```

init_best <- 1 # Anfangsbestand
best <- elog %>%
  filter(Station == "BZ_Puffer") %>%
  mutate(counter = if_else(status == "start", 1, -1)) %>%
  arrange(Time) %>%
  mutate(Bestand = init_best + cumsum(counter))

```

```

best_plot1 <- ggplot(best, aes(Time, Bestand)) +
  geom_step() +
  xlab("Uhrzeit") +
  theme_light()

```

```

best_plot2 <- ggplot(best, aes(Bestand)) +
  geom_density() +
  coord_flip() +
  ylab("Dichte") +

```

```

theme_light()

require(ggpubr)
ggarrange(best_plot1, best_plot2, nrow = 1, ncol = 2)

## Materialflussmodell

#Vorbereiten des Input-Files fuer visTABLE
# Materialfluesse
Matfluss <- read_excel("warenstrom_Bsp.xlsx", sheet = 2) %>%
  filter(Quelle == "")

# erstellen der Materialflussmatrix
for(i in 1:nrow(prog)){

temp_log <- elog_prep %>%
  filter(str_detect(Auftrag, prog$Produkt[i])) %>%
  precedence_matrix(type = "absolute") %>%
  filter(antecedent != "Start" & consequent != "End") %>%
  transmute(Quelle = antecedent, Senke = consequent,
            Operation_Quelle = antecedent,
            Operation_Senke = consequent,
            Produktfamilie = prog$Produkt[i],
            Teilenummer = NA,
            Behaelter = NA,
            Teile_pro_Behaelter = 1,
            Behaelter_pro_Transport = 1,
            Menge_pro_Produkt = 1,
            Transportanzahl_berechnet = n/max(n),
            Transportanzahl_eingegeben
Transportanzahl_berechnet*prog$Menge_pro_Jahr[i],
            Transportmittel = "manuell")

colnames(temp_log) <- colnames(Matfluss)

```

```
Matfluss <- Matfluss %>%
  add_row(temp_log)
}

# Anlegen der Produktfamilien mit Absatzzahlen
PFs <- read_excel("warenstrom_Bsp.xlsx", sheet = 1) %>%
  filter(Farbe == "")

Produktfamilien <- prog %>%
  mutate(Farbe = "Farbe")

colnames(Produktfamilien) <- colnames(PFs)

# Export des Input-Excels
require(writexl)
write_xlsx(list(Produktfamilien, Matfluss), path = "warenstrom_Output.xlsx")

# Transportstrecken
#Data Frame mit allen Datenpunkten im Stationsbereich filtern
df_stat <- filter(df_raw, Projekt == "")

for(i in 1:nrow(areas)) {
  df_temp <- df_raw %>%
    filter(X > areas$xmin[i] & X < areas$xmax[i]
           & Y > areas$ymin[i] & Y < areas$ymax[i])

  df_stat <- add_row(df_stat, df_temp)
}

# Datenpunkte ausserhalb von Stationen plotten
plot_trans1 <- df_raw %>%
  anti_join(df_stat, by = c("TotalFramenumber" = "TotalFramenumber", "TagID"
= "TagID")) %>%
```

```

ggplot(aes(X, Y)) +
  geom_pointdensity() +
  scale_color_viridis_c(name = "# Nachbarn") +
  theme_light()

plot_trans2 <- df_raw %>%
  anti_join(df_stat, by = c("TotalFramenumber" = "TotalFramenumber", "TagID"
= "TagID")) %>%
  ggplot(aes(X, Y, color = `Geschwindigkeit-2D`)) +
  geom_point() +
  scale_color_gradient(low = "red", high = "green", name = "Geschwindigkeit")
+
  theme_light()

ggarrange(plot_trans1, plot_trans2, nrow = 1, ncol = 2)

# Evaluierung der Daten

#Vergleich Zeiten der Timer mit Messungen
soll <- tibble(Station = c("BZ", "Montage", "Ofen", "QS", "Zuschnitt"),
  sollzeit = c(120, 80, 100, 50, 60))

elog_prep %>%
  filter(Station != "Wareneingang" & Station != "Warenausgang") %>%
  processing_time(level = "activity", units = "secs", append = T) %>%
  filter(Station != "BZ_Puffer") %>%
  group_by(Station) %>%
  summarise(Istzeit = max(median_activity_processing_time)) %>%
  left_join(soll, by = "Station") %>%
  gather(key = "IST/SOLL", value = "Prozesszeit", -Station) %>%
  ggplot(aes(Station, Prozesszeit, fill = `IST/SOLL`)) +
  geom_col(position = "dodge") +
  scale_y_continuous(limits = c(0, NA)) +
  theme_light()

```

9 Literaturverzeichnis

Ajay, Holey; Shashank, Alandikar (2020): How to Establish Digital Thread Using 3D Factory. In: ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. Online verfügbar unter

<https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings/IMECE2019/59384/Salt%20Lake%20City,%20Utah,%20USA/1072833>.

Arnold, Dieter; Furmans, Kai (2019): Materialfluss in Logistiksystemen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Auburn University (2018): „Project Zipper“: EPC-Enabled Item-Level RFID Supply Chain Brand / Retailer Data Exchange Study. Online verfügbar unter <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/469262/AuburnEPCEnabledItemLevelRFIDDataExchangeZipperPaper-1.pdf>, zuletzt geprüft am 07.10.2021.

Barth, Julius; Michaeli, Philipp (2018): Drohneneinsatz in der digitalen Fabrikplanung. In: *ZWF* 113 (9), S. 596–600. DOI: 10.3139/104.111978.

Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (2014): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

be Isa, Johannes; Segerer, Bernd; Miller, Anja; Kaffenberger, Christopher; Dräger, Tobias; Korn, Clemens et al. (2019): Automatisierte Wertstromanalyse auf Basis mobiler Sensornetzwerke. In: *ZWF* 114 (11), S. 711–714. DOI: 10.3139/104.112193.

Becker, Torsten (2018): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren: Springer Berlin Heidelberg.

Bender, Beate; Gericke, Kilian (2021): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bergmann, Júlia; Gyulai, Dávid; Morassi, Dávid; Váncza, József (2020): A stochastic approach to calculate assembly cycle times based on spatial shop-floor data stream. In: *Procedia CIRP* 93, S. 1164–1169. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.052.

Bergmann, S.; Feldkamp, N.; Strassburger, S. (2017): Emulation of control strategies through machine learning in manufacturing simulations. In: *Journal of Simulation* 11 (1), S. 38–50. DOI: 10.1057/s41273-016-0006-0.

Bischoff, J.; Hegmanns, T.; Braun, S. (2015): Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand. Hg. v. agiplan GmbH. Mülheim an der Ruhr. Online verfügbar unter

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der->

potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D5.

Block, Christian; Kuhlenkötter, Bernd (2019): Digital Factory Implementation Approach Starting from the Macroscopic Perspective with an Example for Holistic Planning in Assembly Systems. In: Robert Schmitt und Günther Schuh (Hg.): Advances in Production Research. Proceedings of the 8th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), Aachen, November 19-20, 2018. Cham, 2019. Cham: Springer International Publishing, S. 178–187.

Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2018): Digitale Fabrik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Burggräf, Peter; Bergs, Thomas; Dannapfel, Matthias; Korff, Andreas; Ebade Esfahani, Matthias; Splettstoesser, Antonia; Steinlein, Julius (2021): Achieving parametric transparency in model-based factory planning. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 15 (1), S. 57–67. DOI: 10.1007/s11740-020-01010-6.

Decawave Ltd (2017a): DWM1001 Datasheet. Hg. v. Decawave Ltd (Version 1.6). Online verfügbar unter <https://www.decawave.com/dwm1001/datasheet/>.

Decawave Ltd (2017b): MDEK1001 Kit User Manual. Module Development & Evaluation Kit for the DWM1001. Hg. v. Decawave Ltd (Version 1.2). Online verfügbar unter <https://www.decawave.com/mdek1001/usermanual/>.

Decawave Ltd (2017c): MDEK1001 Quick Start Guide. Hg. v. Decawave Ltd (Version 1.2). Online verfügbar unter <https://www.decawave.com/mdek1001/quickstart/>.

Decawave Ltd (2018): DWM1001 System Overview And Performance. Hg. v. Decawave Ltd (Version 2.0). Online verfügbar unter <https://www.decawave.com/dwm1001/systemoverview/>.

Deploying an RFID System: 20 Questions and Answers (2021). Online verfügbar unter <https://www.atlasrfidstore.com/deploying-an-rfid-system/#question17>, zuletzt aktualisiert am 14.06.2021, zuletzt geprüft am 14.06.2021.

VDI 4499-1:2008-02, 2008: Digitale Fabrik.

Dombrowski, Uwe; Wullbrandt, Jonas; Karl, Alexander (2019): Bidirectional Data Management in Factory Planning and Operation. In: Farhad Ameri, Kathryn E. Stecke, Gregor von Cieminski und Dimitris Kiritsis (Hg.): Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems, Bd. 567. Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 303–311.

Erlach, Klaus (2020): Wertstromdesign. Der Weg zur schlanken Fabrik. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

VDI 5200-1:2011-02, 2011: Fabrikplanung.

Gadatsch, Andreas (2020): Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Analyse, Modellierung, Optimierung und Controlling von Prozessen. 9., akt. u. erw. Auflage 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg.

Goerzig, David; Lucke, Dominik; Lenz, Juergen; Denner, Timo; Lickefett, Michael; Bauernhansl, Thomas (2015): Engineering Environment for Production System Planning in Small and Medium Enterprises. In: *Procedia CIRP* 33, S. 111–114. DOI: 10.1016/j.procir.2015.06.021.

Gremsl, Daniel (2021): Funktionsweise der App für das RTLS-Kit. Wien, 13.07.2021. persönliche Korrespondenz an Nikolaus Kremslehner.

Grundig, Claus-Gerold (2018): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 6., neu bearbeitete Auflage. München: Hanser.

Guo, Hongfei; Zhu, Yingxin; Zhang, Yu; Ren, Yaping; Chen, Minshi; Zhang, Rui (2021): A digital twin-based layout optimization method for discrete manufacturing workshop. In: *Int J Adv Manuf Technol* 112 (5-6), S. 1307–1318. DOI: 10.1007/s00170-020-06568-0.

Gyulai, Dávid; Pfeiffer, András; Bergmann, Júlia (2020): Analysis of asset location data to support decisions in production management and control. In: *Procedia CIRP* 88, S. 197–202. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.035.

Harris, Malcolm Anthony; Kaczmarek, Sascha; Feldhorst, Sascha (2019): Sensoren und Algorithmen für die automatische Analyse von manuellen Prozessen in der Logistik 4.0. In: Michael ten Hompel, Birgit Vogel-Heuser und Thomas Bauernhansl (Hg.): Handbuch Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Technik), S. 1–15.

Helbing, Kurt (2018): Handbuch Fabrikprojektierung. 2., aktualisierte und ergänzte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Hellmuth, René; Wehner, Florian; Giannakidis, Alexandros (2020): Approach for an Update Method for Digital Factory Models. In: *Procedia CIRP* 93, S. 280–285. DOI: 10.1016/j.procir.2020.03.042.

Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2018): Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Hippenmeyer, Heinrich; Moosmann, Thomas (2016): Automatische Identifikation für Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hoffmann, M.; Meisen, T.; Schilberg, D.; Jeschke, S. (2013): Multi-dimensional production planning using a vertical data integration approach: A contribution to modular factory design. In: 2013 10th International Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT). 2013 10th International

Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World (CEWIT), S. 1–6.

Hompel, Michael ten; Bauernhansl, Thomas; Vogel-Heuser, Birgit (2020): Handbuch Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hurzig, André; Müller, Egon (2014): Methodological implementation of sensor networks for smart manufacturing and smart factories. In: Proceedings of the 24th International Conference on Flexible Automation & Intelligent Manufacturing. International FAIM Conference, May 20-23, 2014: DEStech Publications, Inc, S. 343–352.

IntraNav GmbH: INTRANAV Industrial Starter Kit. Hg. v. IntraNav GmbH. Online verfügbar unter <https://intranav.com/digital-solution-areas/intranav-industrial-starter-kit/>, zuletzt geprüft am 08.07.2021.

Janssenswillen, Gert; Depaire, Benoît; Swennen, Marijke; Jans, Mieke; Vanhoof, Koen (2019): bupaR: Enabling reproducible business process analysis. In: *Knowledge-Based Systems* 163, S. 927–930. DOI: 10.1016/j.knosys.2018.10.018.

Jiang, S.; Ong, S. K.; Nee, A. Y. C. (2014): An AR-based hybrid approach for facility layout planning and evaluation for existing shop floors. In: *Int J Adv Manuf Technol* 72 (1-4), S. 457–473. DOI: 10.1007/s00170-014-5653-6.

Kegel, Gunther; Rauscher, Benedikt; Otto, Marc-André; Gehlen, Stefan; Nagel, Jörg; Weber, Hinrik (2019): Die Bedeutung der Sensorik für die vierte industrielle Revolution. In: Michael ten Hompel, Birgit Vogel-Heuser und Thomas Bauernhansl (Hg.): Handbuch Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer Reference Technik), S. 1–25.

Kim, D.-Y.; Park, J.-W.; Baek, S.; Park, K.-B.; Kim, H.-R.; Park, J.-I. et al. (2020): A modular factory testbed for the rapid reconfiguration of manufacturing systems. In: *J Intell Manuf* 31 (3), S. 661–680. DOI: 10.1007/s10845-019-01471-2.

Klenk, Eva (2019): Konzept zur systemdatenbasierten Wertstromanalyse. In: *ZWF* 114 (9), S. 513–516. DOI: 10.3139/104.112137.

Kletti, Jürgen (2015): MES - Manufacturing Execution System. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

VDI 2225-3:1998-11, 1998: Konstruktionsmethodik - Technisch-wirtschaftliches Konstruieren.

Kuwamoto, S.; Kitano, Y.; Asahara A. (2020): Machine-learning-based People-flow Simulation for Facility Layout Planning. In: 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data). 2020 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), S. 1362–1367.

VDI 2689:2019-02, 2019: Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.

Lichtblau, Karl; Stich, Volker; Bertenrath, Roman; Blum, Matthias; Bleider, Martin; Millack, Agnes et al. (2015): Industrie 4.0-Readiness. Hg. v. IMPULS-Stiftung. Aachen, Köln.

Mayer, Gottfried; Pöge, Carsten; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (Hg.) (2020): Ablaufsimulation in der Automobilindustrie. Berlin: Springer Vieweg.

Melcher, D.; Kuster, B.; Overmeyer, L. (2020): Automated Data Acquisition and Processing for Factory Layout Planning. In: 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). Singapore, Singapore, 14.12.2020 - 17.12.2020: IEEE, S. 91–95.

Mieth, Carina; Humbeck, Philipp; Herzwurm, Georg (2019): A Survey on the Potentials of Indoor Localization Systems in Production. In: Uwe Clausen, Sven Langkau und Felix Kreuz (Hg.): Advances in Production, Logistics and Traffic. Proceedings of the 4th Interdisciplinary Conference on Production Logistics and Traffic 2019. Cham, 2019. Cham: Springer International Publishing (Lecture Notes in Logistics), S. 142–154.

Misra, Sudip; Roy, Chandana; Mukherjee, Anandarup (2021): Introduction to Industrial Internet of Things and Industry 4.0: Taylor et Francis.

Müller, Felix; Bressner, Markus; Goerzig, David; Röber, Thomas (2016): Industrie 4.0: Entwicklungsfelder für den Mittelstand.

Oregon Embedded - Battery Life Calculator (2019). Online verfügbar unter <http://oregonembedded.com/batterycalc.htm>, zuletzt aktualisiert am 04.10.2019, zuletzt geprüft am 20.09.2021.

Pascher, Rainer: Entwicklung einer modularen Sensorik und Integration in ein Vorgehensmodell zur Durchführung ortungsbasierter Materialflussanalysen. Entwicklung einer modularen Sensorik und Integration in ein Vorgehensmodell zur Durchführung ortungsbasierter Materialflussanalysen. Wien. Ebenda. Online verfügbar unter <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/1306>.

Pawellek, Günther (2014): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Pei, Fengque; Tong, Yifei; He, Fei; Li, Dongbo (2017): Research on Design of the Smart Factory for Forging Enterprise in the Industry 4.0 Environment. In: *mech* 23 (1), S. 146–152. DOI: 10.5755/j01.mech.23.1.13662.

Peron, Mirco; Fragapane, Giuseppe; Sgarbossa, Fabio; Kay, Michael (2020): Digital Facility Layout Planning. In: *Sustainability* 12 (8), S. 3349. DOI: 10.3390/su12083349.

- Petschnigg, Christina; Spitzner, Markus; Weitzendorf, Lucas; Pilz, Jürgen (2021): From a Point Cloud to a Simulation Model-Bayesian Segmentation and Entropy Based Uncertainty Estimation for 3D Modelling. In: *Entropy (Basel, Switzerland)* 23 (3), S. 301. DOI: 10.3390/e23030301.
- Pistorius, Johannes (2020): *Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rácz-Szabó, András; Ruppert, Tamás; Bántay, László; Löcklin, Andreas; Jakab, László; Abonyi, János (2020): Real-Time Locating System in Production Management. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (23). DOI: 10.3390/s20236766.
- Ruppert, Tamas; Abonyi, Janos (2020): Integration of real-time locating systems into digital twins. In: *Journal of Industrial Information Integration* 20, S. 100174. DOI: 10.1016/j.jii.2020.100174.
- Schenk, Michael; Müller, Egon; Wirth, Siegfried (2014): *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl.* Berlin: Springer Vieweg.
- Schuh, Günther; Prote, Jan-Philipp; Luckert, Melanie; Hünnekes, Philipp (2017): *Automatisierungspotenzial in der Arbeitsplanung - Studienergebnisse*. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/322600065_Automatisierungspotenzial_in_der_Arbeitsplanung_-_Studienergebnisse.
- Schuh, Günther; Schmidt, Carsten (2014): *Produktionsmanagement*. Springer Berlin Heidelberg.
- Sinsel, Alexander (2020): *Das Internet der Dinge in der Produktion. Smart Manufacturing für Anwender und Lösungsanbieter. 1. Auflage*. Berlin: Springer Vieweg.
- Slovak, Juraj; Vasek, Pavol; Simovec, Matej; Melicher, Markus; Sismisova, Dana (2019): RTLS tracking of material flow in order to reveal weak spots in production process. In: 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19). 2019 22nd International Conference on Process Control (PC19). Strbske Pleso, Slovakia, 11.06.2019 - 14.06.2019: IEEE, S. 234–238.
- Thome, Rainer; Müller, Thomas; Vogeler, Kai (2011): *Zukunftsthema Geschäftsprozessmanagement. Eine Studie zum Status quo des Geschäftsprozess-managements in deutschen und österreichischen Unternehmen*. Hg. v. PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft. Online verfügbar unter <https://www.pwc.de/de/prozessoptimierung/assets/pwc-gpm-studie.pdf>.
- Toro, Carlos; Wang, Wei; Akhtar, Humza (2021): *Implementing Industry 4.0*. Cham: Springer International Publishing (202).

Uhlemann, Thomas H.-J.; Schock, Christoph; Lehmann, Christian; Freiberger, Stefan; Steinhilper, Rolf (2017): The Digital Twin: Demonstrating the Potential of Real Time Data Acquisition in Production Systems. In: *Procedia Manufacturing* 9, S. 113–120. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.04.043.

Urnauer, Christian; Metternich, Joachim (2019): Die digitale Wertstrommethode. In: *ZWF* 114 (12), S. 855–858. DOI: 10.3139/104.112203.

Wannenwetsch, Helmut (2021): Integrierte Materialwirtschaft, Logistik, Beschaffung und Produktion. Supply chain im... zeitalter der digitalisierung. [S.l.]: MORGAN KAUFMANN.

Westkämper, Engelbert; Löffler, Carina (2016): Strategien der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2010): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 1. Aufl. [s.l.]: Carl Hanser Fachbuchverlag.

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit.....	4
Abbildung 2: Planungsbereiche und -ebenen.....	8
Abbildung 3: Einflüsse auf die Fabrikplanung.....	10
Abbildung 4: Gegenüberstellung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit.....	11
Abbildung 5: Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses.....	13
Abbildung 6: Beispiel einer ABC-Analyse.....	16
Abbildung 7: Darstellung von Materialflüssen.....	17
Abbildung 8: Prozessdefinition.....	18
Abbildung 9: Vergleich der Notationen von Modellierungsmethoden.....	20
Abbildung 10: Beispiel einer Wertstromdarstellung.....	21
Abbildung 11: IT-Systeme für das Produktionsmanagement.....	27
Abbildung 12: Automatisierungspyramide.....	29
Abbildung 13: Schema eines typischen Sensors.....	33
Abbildung 14: Signalübertragung bei unterschiedlichen Bedingungen.....	39
Abbildung 15: Optisch erfassbare Identifikationsmerkmale.....	41
Abbildung 16: Methodik der Informationsbeschaffung.....	72
Abbildung 17: Phasen der Grundlagenermittlung und Konzeptplanung.....	76
Abbildung 18: Methodik zur Nutzung der Sensordaten.....	77
Abbildung 19: Visualisierung des Bestandsverlaufs.....	80
Abbildung 20: Heatmap auf Basis eines RTLS.....	81
Abbildung 21: Sankey-Diagramm in ein Layout eingebettet.....	82
Abbildung 22: Layout des Versuchsaufbaus.....	85
Abbildung 23: Produktionsstationen mit Werkstücken.....	87
Abbildung 24: Fabriklayout mit Bereichen.....	88
Abbildung 25: UWB-Modul mit Gehäuse.....	90
Abbildung 26: Positionierung der Anchors.....	91
Abbildung 27: Initialisierung der Anchors.....	92
Abbildung 28: Screenshot des Online-Formulars.....	93
Abbildung 29: Erfasste Prozessabläufe.....	95
Abbildung 30: Qualität der Ortungssignale.....	96
Abbildung 31: Erfasste Datenpunkte und Bereiche.....	97
Abbildung 32: Prozessmodell für den Produkttyp A.....	98
Abbildung 33: Prozessmodell für den Produkttyp B.....	98
Abbildung 34: Operator Balance Chart für Produkt B.....	99
Abbildung 35: Durchlaufzeiten der verschiedenen Produkte.....	100
Abbildung 36: Auslastungen der Stationen.....	101
Abbildung 37: Bestandsverlauf des Pufferlagers vor dem Bearbeitungszentrum.....	102
Abbildung 38: Heatmaps der Transportstrecken.....	103
Abbildung 39: Sankey-Diagramm eingebettet in das Layout des Versuchsaufbaus.....	104

Abbildung 40: Distanz-Intensitäts-Diagramm.....	105
Abbildung 41: Optimiertes Layout.....	105
Abbildung 42: Heatmap über dem Fabriklayout.....	106
Abbildung 43: Vergleich der IST- und SOLL-Zeiten.....	107

11 Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der minimalen Ortungsfrequenz	74
Formel 2: Berechnung der Auslastung	79

12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Datenanforderungen der Fabrikplanung	25
Tabelle 2: Eigenschaften der RTLS-Technologien	36
Tabelle 3: Publikationen zur Datenerfassung in der Fabrikplanung	46
Tabelle 4: Publikationen zum Einsatz von Sensorsystemen für die Fabrikplanung	52
Tabelle 5: Verfügbarkeit der Produktdaten	58
Tabelle 6: Verfügbarkeit der Produktionsdaten	60
Tabelle 7: Verfügbarkeit der Immobiliendaten	60
Tabelle 8: Rangfolgematrix der Bewertungskriterien	64
Tabelle 9: Bewertung der Technologien	69
Tabelle 10: Kontextinformationen	71
Tabelle 11: Beispielhafte Struktur eines Event Logs	77
Tabelle 12: Produktionsdaten	86

13 Abkürzungsverzeichnis

AoA	Angle of Arrival
AR	Augmented Reality
Auto-ID	Automatische Identifikation
BDE	Betriebsdatenerfassung
BIM	Building Information Modeling
BPMN	Business Process Model and Notation
BZ	Bearbeitungszentrum
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer-Aided-Design
CRM	Customer-Relationship-Management
eEPK	erweiterte Ereignisgesteuerte Prozesskette
ERP	Enterprise-Ressource-Planning
etc.	et cetera
IoT	Internet of Things
LVS	Lagerverwaltungssystem
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing-Execution-System
(N)LOS	(Non-)Line-of-Sight
OBC	Operator Balance Chart
PDM	Product-Data-Management
PLM	Product-Lifecycle-Management
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RFID	Radio Frequency Identification
RSS	Received Signal Strength
RTLS	Real-Time Locating System
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRM	Supplier-Relationship-Management
TDoA	Time Difference of Arrival
ToA	Time of Arrival
TOC	Theory of Constraints
TWR	Two-Way-Ranging
(U)HF	(Ultra-)Hochfrequenz
UML	Unified Modeling Language
UWB	Ultra-Wideband
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
(W)LAN	(Wireless) Local Area Network

WSN	Wireless Sensor Network
z. B.	zum Beispiel