

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Ziel

Die Digitalisierung von Produktionsprozessen gewinnt durch die Forderung nach mehr Flexibilität sukzessive an Bedeutung für Unternehmen. Die Forderung bezieht sich hierbei auf die Fähigkeit des Unternehmens, auf kurzfristige Schwankungen des Marktes und der damit verbundenen Änderungen der Rahmenbedingungen reagieren zu können. Die Veränderungen können sich dabei sowohl auf die Produktionsmengen als auch auf das Spektrum der zu produzierenden Produkte beziehen.¹

Hintergrund der Forderung nach mehr Flexibilität in der Produktion ist die Entwicklung von einem anbieterorientierten Markt hin zu einem käuferorientierten Markt.² Hauptmerkmal eines käuferorientierten Marktes ist die Tatsache, dass der Kunde durch den großen Wettbewerb unter den Anbietern dezidierte Vorgaben hinsichtlich geforderter Produkte und Dienstleistungen und damit verbundenen Rahmenbedingungen definieren kann. Dazu gehören beispielsweise geforderte Flexibilitäten hinsichtlich der Bestellmengen, die Forderung nach Staffelpreisen oder bestimmte Formen der Anlieferung der bestellten Produkte. Produzierende Unternehmen sind daher gefordert, ihre Unternehmensprozesse kontinuierlich zu optimieren um Wettbewerbsvorteile auf internationalen Märkten zu generieren.³ Damit die Steigerung der Flexibilität und die kontinuierliche Verbesserung ermöglicht werden kann, gewinnt die Vernetzung und Digitalisierung von Prozessen und Wertschöpfungsketten immer mehr an Bedeutung. Die Basis bildet hierbei die Nutzung von Informationen und deren Austausch innerhalb der Produktionsumgebung. Der Startpunkt dieses Ansatzes liegt bereits in den 60er und 70er Jahren des 20. Jahrhunderts, wobei erst durch die Entwicklung leistungsstarker Computertechnologien und der Möglichkeit zur kabellosen Vernetzung die flächendeckende Anwendung ermöglicht wird. Durch den Einsatz dieser Technologien ergeben sich neue Möglichkeiten der Gestaltung und Optimierung von Prozessen innerhalb der Produktion entlang der gesamten Wertschöpfungskette.⁴

¹ Vgl. Erlach (2020), S.12

² Vgl. Hinterberger (2002), S.1

³ Vgl. Kletti (2015), S.1

⁴ Vgl. Weber (2021), S. 1

Der Fokus liegt hierbei auf der ganzheitlichen Betrachtung und Verbesserung der Prozesse. Diese Art der Betrachtungsweise ist jedoch nur durch ein hohes Maß an Transparenz in den Unternehmensdaten möglich. Bei der Evaluation von Produktionsprozessen in den Unternehmen fällt jedoch auf, dass speziell die Erhebung von Daten und die damit verbundenen Datenpflege durch manuelle Prozesse geprägt sind. Hierdurch ist die Datenqualität und -verfügbarkeit häufig vom den im Prozess involvierten Mitarbeitern abhängig. Diese Tatsache zeigt sich insbesondere im Bereich der Produktion. Beispielsweise bei der Berechnung von Kennzahlen, wie der Fertigungsleistung, basiert die Erfassung der Grunddaten häufig auf analogen Prozessen. Hierbei hat der Mensch nach wie vor einen grundlegenden Einfluss auf die Qualität der Daten, da diese beispielsweise in Schichtberichten oder digital durch ERP- und BDE-Systeme erfasst werden. Die Eingabemasken in den Systemen ermöglichen häufig nur die Eingabe rudimentärer Daten, weshalb zusätzliche Informationen nicht erfasst werden können. Die Datenauswertung manuell erfasster Dokumente nimmt viel Zeit in Anspruch und deren Ergebnisse liegen erst mit einem entsprechenden Zeitverzug vor. Des Weiteren führen mangelnde oder qualitativ schlechte Stammdaten im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung zu Planungsfehlern. Das Ausmaß unzureichender Planungsdaten ist häufig nicht bekannt, weshalb kaum Ressourcen für die Verbesserung der Daten vor dem Hintergrund der Optimierung der Planungssituation eingesetzt werden. Diese Rahmenbedingungen führen dazu, dass die Ursprünge der Daten, welche die Basis der Produktionsplanung bilden, weit in der Vergangenheit liegen, weshalb die Produktionsplanung häufig nicht auf den realen Prozessen basiert.⁵

Neben der Erhebung von Daten besteht eine entscheidende Herausforderung darin, vorhandene Daten schnell zu evaluieren und den Erkenntnisgewinn in die Planung von Prozessen zu integrieren. Die Generierung von Daten ist kein Selbstzweck, da erst die gewonnenen Erkenntnisse und deren Verarbeitung einen positiven Einfluss auf das Ergebnis haben. Dazu muss der Datenbestand systemseitig so aufbereitet werden, dass die Erkenntnisse aktiv zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden können. Die Daten und deren Verarbeitung ist immer abhängig vom individuellen Anwendungsfall, weshalb die Systeme und Algorithmen zur Verarbeitung flexibel und adaptiv konstruiert werden müssen.⁶

Die Komplexität von heutigen Produktionsprozessen ist auf Grund der Vielzahl an Systemparametern und Schnittstellen sehr hoch, weshalb die Evaluierung von Einflussgrößen im täglichen Ablauf der Produktion im Hinblick auf das Ergebnis immer kom-

⁵ Vgl. Kletti/Schumacher (2014), S. 39

⁶ Vgl. Vogel-Heuser (2014), S. 45-46

plexer werden. Diese Entwicklung führt dazu, dass Produktionssysteme zunehmend nicht mehr mit Hilfe von manuellen oder analogen Werkzeugen oder Methoden bemessen werden können. Die Abbildung 1 visualisiert das Produktionssystem mit deren Einflussgrößen.⁷

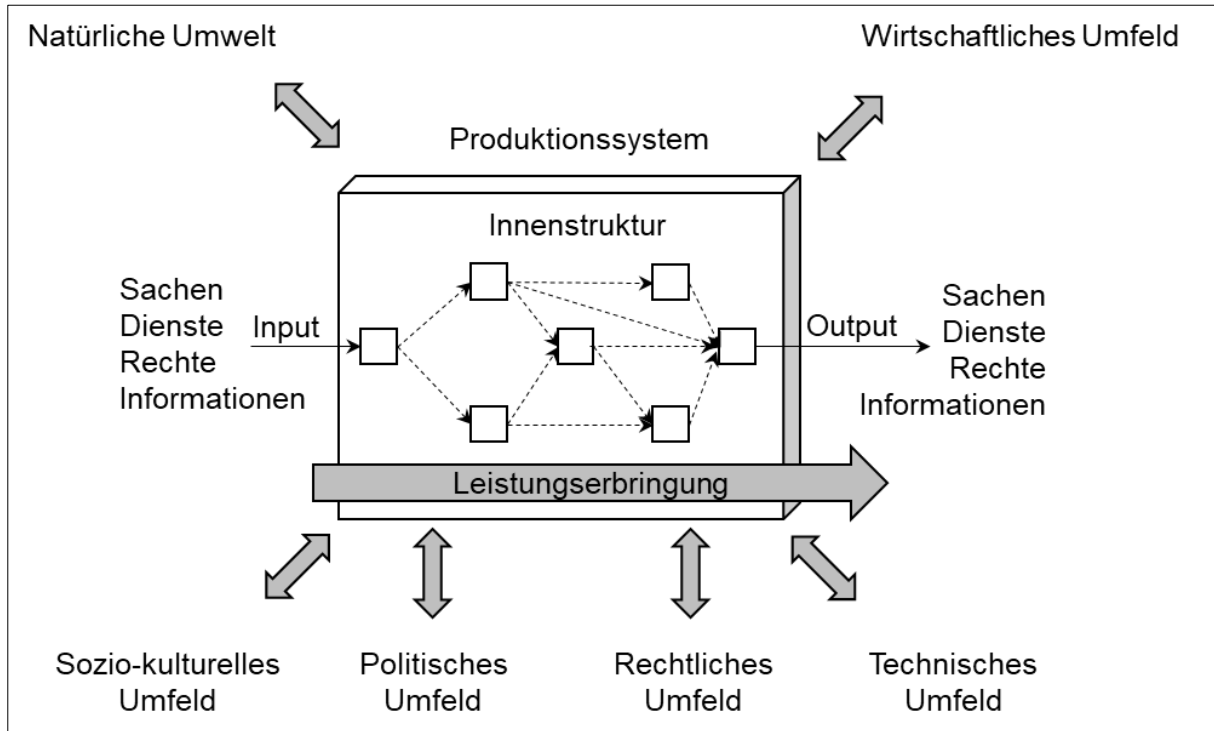


Abbildung 1: Schnittstellen eines Produktionssystems⁸

Basierend auf der Forderung nach einem Werkzeug zur detaillierten und umfassenden Analyse von Produktionssystemen wird der Bereich der ereignisdiskreten Simulation von Wertströmen von Unternehmen als Möglichkeit erkannt. Hierbei besteht jedoch die Herausforderung, dass die Quantifizierung des Aufwands im Hinblick auf die Einführung und den Betrieb nicht ohne eine tiefgehende Analyse bewertet werden kann. Darüber kann die wertschöpfende Integration dieses Werkzeugs unter Berücksichtigung aller betroffenen Bereiche mit einem sehr großen Aufwand verbunden sein, sodass Entscheidungsträger in den Unternehmen sich häufig gegen diese Möglichkeit entscheiden.⁹

Der Einsatz von maschinellen Lernalgorithmen ermöglicht es, große Datenmengen in kurzer Zeit zu analysieren und Zusammenhänge in Form von Datenmustern zu er-

⁷ Vgl. Dyckhoff/Spengler (2010), S. 4-7

⁸ Dyckhoff (2006), S. 5

⁹ Vgl. März/Weigert (2011), S. 4-6

kennen. Diese Erkenntnisse können dann wiederum im Umfeld der Produktion genutzt werden.

Damit im Rahmen dieser Arbeit ein Beitrag zur Einführung maschineller Lernverfahren in die Produktion geleistet werden kann, ist das Ziel der Arbeit wie folgt formuliert:

„Einsatzmöglichkeiten des maschinellen Lernens zur Planung und Steuerung komplexer Produktionssysteme“.

Damit eine ganzheitliche Lösung für den Einsatz maschineller Lernalgorithmen innerhalb der Produktion präsentiert werden kann, müssen für das formulierte Ziel der Arbeit die nachfolgenden Forschungsfragen beantwortet werden. Diese sollen sicherstellen, dass die erarbeitete Lösung im praktischen Umfeld einsetzbar ist.

- 1) Wie können Algorithmen und digitale Assistenzsysteme aufgebaut werden, damit diese als aktives Werkzeug in der Produktion genutzt werden können?
- 2) Für welche spezifischen Aufgaben der PPS können maschinelle Lernalgorithmen genutzt werden?
- 3) Wie können maschinelle Lernalgorithmen in Verbindung mit Simulationssystemen genutzt werden?
- 4) Inwieweit können maschinelle Algorithmen zur Steigerung der Effizienz von Produktionssystemen beitragen?

1.2 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit forscht im Bereich der Anwendung von maschinellen Lernverfahren im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung. Die Möglichkeit der schnellen Evaluierung von Daten soll im Betrieb und der Organisation von Produktionssystemen im praktischen Umfeld eingesetzt werden. Insbesondere werden die Vorteile der im Kontext dieser wissenschaftlichen Arbeit erstellten Lösung gegenüber bestehenden Konzepten dargestellt.

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Hauptkapitel mit den dazugehörigen Unterkapiteln unterteilt. Im ersten Kapitel wird in das Forschungsvorhaben eingeleitet. Dazu wird in erster Instanz die Problemstellung beschrieben, wobei insbesondere auf die Veränderungen der Marktsituation produzierender Unternehmen und der damit einhergehenden Veränderungen im Hinblick auf die PPS eingegangen wird. Auf Basis der veränderten Marktsituation wird die Motivation zur Nutzung neuer Werkzeuge und Verfahren sowie die Zielstellung der vorliegenden Arbeit, einschließlich der formulierten Forschungsfragen, präsentiert.

Darauf aufbauend werden im zweiten Kapitel die Grundlagen des untersuchten Forschungsgebiets vorgestellt. Dazu werden im ersten Unterkapitel die Grundlagen der PPS vorgestellt, wobei auf den Ursprung, die Aufgabenverteilung und auf die systematische Abbildung detailliert eingegangen wird. Die Aufgabenverteilung wird dabei anhand der entsprechenden Referenzsicht des Aachener Modells der PPS umfassend dargelegt. Insbesondere wird hierbei auf die Ausgestaltung von PPS-Systemen in den Unternehmen zur Organisation der produktionstechnischen Abläufe eingegangen. Darauf aufbauend erfolgt im nächsten Schritt die Vorstellung der historischen Entwicklung der systemtechnischen Abbildung der Organisationsprozesse durch Datenverarbeitungssysteme im Rahmen der PPS.

Die Vorstellung der Grundlagen im Bereich der PPS schließt mit der Entwicklung von der ausschließlichen Verarbeitung von Produktionsdaten bis hin zur Evaluierung von Produktionsszenarien mittels Simulationen ab. Auf die Entscheidungsunterstützung der Produktion durch Simulationsmodelle wird durch die Beschreibung der Organisation und Durchführung von Simulationsstudien vertiefend eingegangen. Insbesondere werden die damit einhergehenden Vorteile und Herausforderungen thematisiert, welche die Forderung nach einer übergeordneten Möglichkeit zur Evaluation von großen Datenmengen begründen.

Im Anschluss an die Vorstellung der Grundlagen im Bereich PPS erfolgt die Einführung in den Bereich des maschinellen Lernens vor dem Hintergrund der effizienten Verarbeitung und Auswertung großer Datenmengen. Eingangs werden die unterschiedlichen Arten von maschinellen Lernverfahren und deren spezifischen Anwendungen erläutert. Darauf aufbauend wird die Notwendigkeit zur Vorverarbeitung von Daten als wesentliche Einflussgröße auf die Ergebnisse der maschinellen Lernalgorithmen eingegangen. Basierend auf der Vorstellung des Themengebiets werden einige ausgewählte Algorithmen und deren Vorgehensweisen sowie damit einhergehende Charakteristika vorgestellt. Das Kapitel schließt mit der Analyse bestehender Anwendung von maschinellen Lernalgorithmen im Kontext der Produktion in der Literatur ab. Dazu wird eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten systematischen Literaturanalyse präsentiert. Die Basis der systematischen Literaturanalyse bildet ein mehrstufiger Suchprozess von wissenschaftlichen Beiträgen in unterschiedlichen Literaturdatenbanken und deren sukzessiven Eingrenzung im Hinblick auf das Forschungsgebiet. Die systematische Literaturanalyse zeigt, dass der Einsatz von maschinellen Lernalgorithmen im Bereich der PPS bereits Gegenstand von wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist. Jedoch beschränken sich die Beiträge auf bestimmte Rahmenbedingungen im Hinblick auf den Einsatz im Produktionsumfeld oder fokussieren sich auf definierte Vor-

gangsmodele, sodass der im Kapitel 1.1 vorgestellte Bedarf zur Forschung entsprechend der Fragestellungen bestätigt werden kann.

Das dritte Kapitel leitet in die Anwendung von maschinellen Lernalgorithmen im Bereich der PPS mit der Vorstellung des zugrundeliegenden Betrachtungsgegenstand ein. In diesem Zusammenhang wird explizit auf die Komplexität des Produktionssystems hinsichtlich der eingesetzten Ressourcen und verarbeiteten Bauteile sowie der Schnittstellen eingegangen. Darauf aufbauend wird dargestellt, wie das als Referenz genutzte Produktionssystem planungstechnisch gesteuert wird und welche Herausforderungen sich hierdurch ergeben bzw. welche Möglichkeiten zur Prozessoptimierung bereits eingesetzt werden.

Aufbauend auf der Vorstellung des Betrachtungsgegenstands wird im vierten Kapitel die entwickelte Systemumgebung im Rahmen der Konzeptvalidierung dargestellt. Hierbei wird detailliert auf den Einsatz maschineller Lernverfahren im Hinblick auf den zugrundeliegenden Betrachtungsgegenstand eingegangen. Anhand des ersten von insgesamt zwei Fallbeispielen wird der gesamte Prozess von der Datenbeschaffung über die Merkmalsextraktion und Datenverarbeitung bis hin zur Erstellung von Prognosen durch maschinelle Lernalgorithmen im Rahmen der Produktionsumgebung präsentiert.

Das erste Fallbeispiel thematisiert das Training eines maschinellen Lernalgorithmus anhand von Simulationsdaten und stellt den Einfluss unterschiedlicher Produktionsprogrammpläne auf das Produktionssystem in den Mittelpunkt. Hierbei wird das Verhalten des Produktionssystems in Folge der Variation eines Basis-Produktionsprogrammplans bewertet, sodass maschinelle Lernalgorithmen Muster in den zugrundeliegenden Daten erkennen können. Die trainierten Algorithmen werden im Anschluss im Hinblick auf ihre Prognosefähigkeit bewertet.

Im Rahmen der zweiten Fallstudie werden die Herausforderungen der Personaleinsatzplanung in Bezug auf den operativen Einsatz der Mitarbeiter als auch im Rahmen der mittel- und langfristigen Qualifizierung von Mitarbeitern im untersuchten Produktionssystem thematisiert. Dieses Fallbeispiel soll die universelle Einsetzbarkeit der im Rahmen der ersten Fallstudie entwickelten Systemumgebung darlegen, sowie die Fähigkeit zur Verarbeitung sehr umfangreicher Produktionsdaten nachweisen. Im Anschluss an die Darstellung der Fallstudien wird jeweils die Anwendbarkeit im Produktionsumfeld dargelegt.

Im letzten Kapitel wird im Rahmen der Schlussbetrachtung der Inhalt der Arbeit in Form einer Kurzfassung abschließend präsentiert und die erreichten Forschungsergebnisse thematisch eingeordnet. Auf Basis dessen werden mögliche Forschungspotenziale für

zukünftige Arbeiten im Rahmen eines Forschungsausblicks formuliert. Die Abbildung 2 visualisiert den Aufbau der vorliegenden Arbeit.

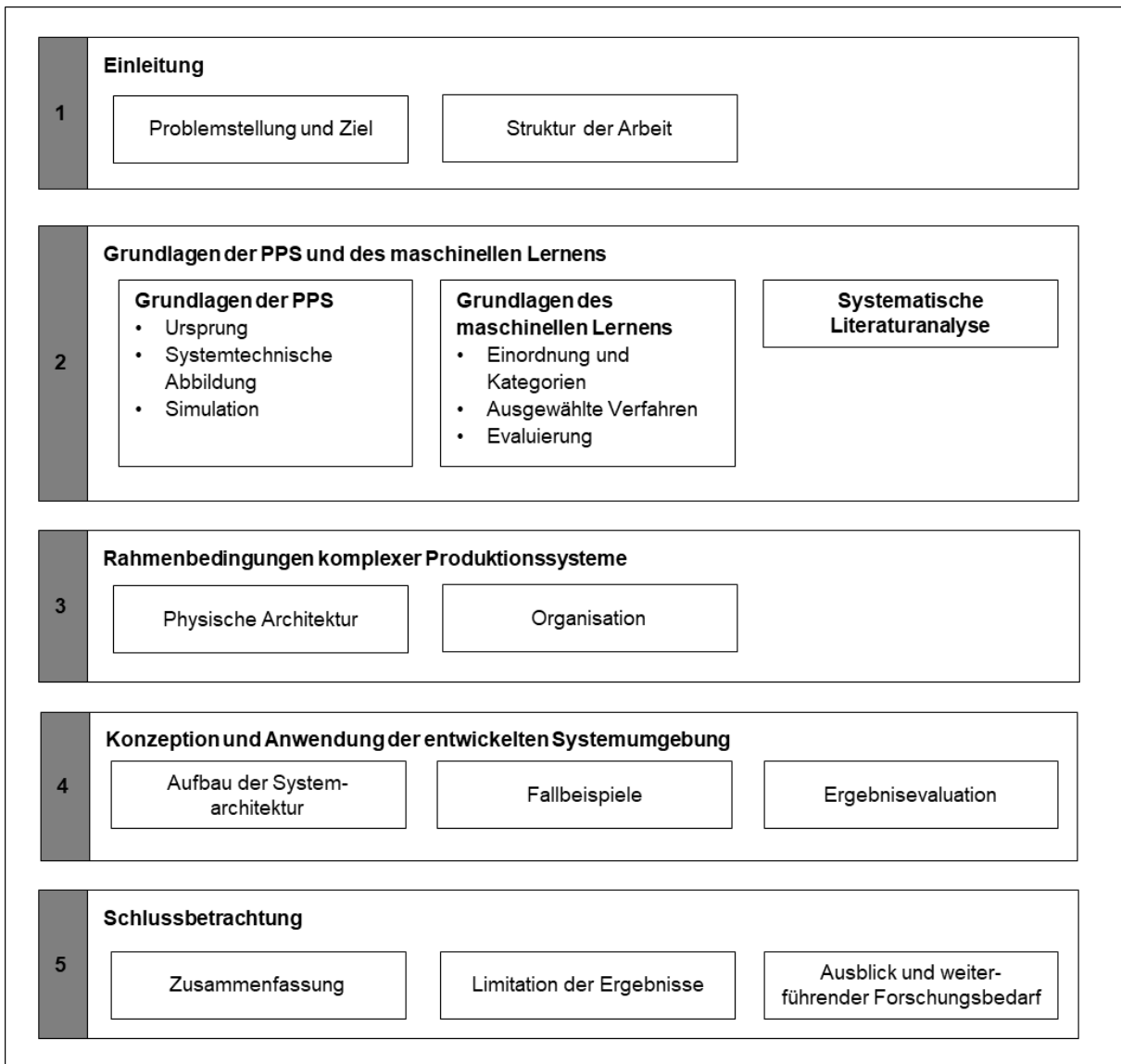


Abbildung 2: Inhaltlicher Aufbau der vorliegenden Arbeit

2 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung und des maschinellen Lernens

2.1 Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung

2.1.1 Ursprung der Produktionsplanung und -steuerung

Der Begriff der Produktionsplanung und -steuerung, kurz PPS, bezeichnet nach seinem Ursprung in den 1980er-Jahre ein Konzept, welches die Material- und Zeitwirtschaft im Rahmen von industriellen Prozessen beschreibt. Innerhalb der letzten Jahrzehnte hat sich der Begriff und das damit einhergehende Konzept als zentrales Element des Produktionsmanagements sowohl in der Industrie als auch in der Forschung etabliert.¹⁰ Ausgangspunkt der PPS bildet eine definierte Menge an zur Verfügung stehenden Ressourcen, welche für die Bearbeitung bzw. Herstellung von Produkten vorgesehen sind. Der Bedarf wird hierbei in Form von Kundenaufträgen oder einer Prognose definiert. Die Aufgabe im Bereich der PPS besteht darin, die Herstellung der Produkte unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu realisieren und die Kundenaufträge termingerecht fertigzustellen.¹¹ Die Unternehmen sind im Rahmen der Auftragsbearbeitung daran interessiert, verfügbare Ressourcen umfassend auszunutzen. Für den Kunden ist im Zuge des Bestellprozesses die schnelle Verfügbarkeit und die damit einhergehende Liefertreue von entscheidender Bedeutung. Hierbei zeigt sich, dass ein Konflikt zwischen den Zielen des Unternehmens und den Zielen des Marktes bzw. des Kunden vorliegen, welche im Rahmen der PPS auf einander abgestimmt werden müssen.¹²

Durch den Wandel des industriellen Umfelds und der damit verbundenen Vernetzung wird der Bereich der Produktionsplanung und -steuerung sukzessive erweitert. Im Zentrum steht nicht mehr das einzelne Unternehmen als isolierte Einheit, sondern der gesamte Wertschöpfungsprozess über die Grenzen einzelner Unternehmen hinweg. Damit ist der Kern der PPS zwar nach wie vor die Beplanung von Ressourcen und -Auslegung von Produktionsprozessen, jedoch haben sich die Betrachtungsgrenzen, entlang der gesamten Lieferkette bis hin zum Endkunden erweitert. Häufig wird diese Betrachtungsweise unter der Bezeichnung „ganzheitliches Produktionssystem“ zusammengefasst.¹³

¹⁰ Vgl. von Schuh/Gierth (2006b), S. 4-5

¹¹ Vgl. Herrmann/Manitz (2021), S. 9

¹² Vgl. Westkämper (2006), S. 181

¹³ Vgl. Schuh/Gierth (2006b), S. 4-5

Hierbei beschreibt das Produktionssystem das Zusammenspiel aus der eingesetzten Fertigungstechnik, der Organisation von Prozessen und Ressourcen und dem Menschen in der Produktion und beschränkt sich damit nicht auf eine rein technische Betrachtungsweise.¹⁴

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Herausforderungen, welche an das Konzept der PPS gestellt werden darin bestehen, komplexe Sachverhalte unter sich ändernden Rahmenbedingungen in der Produktion zu analysieren und konkurrierende oder sogar diametrale Zielstellungen gegeneinander abzuwägen. Die PPS gilt damit als Schlüssel für die flexible Organisation von Unternehmen und Wertschöpfungsketten und ist damit maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit von Unternehmen verantwortlich. Damit die unterschiedlichen Aufgaben in diesem Bereich sowohl praxisnah für die Unternehmen als auch im Hinblick auf die wissenschaftliche Forschung präzise abgebildet werden können, hat sich das Aachener Modell der Produktionsplanung und Steuerung etabliert.¹⁵

2.1.2 Aachener Modell der Produktionsplanung und -steuerung

In diesem Kapitel wird das Aachener Modell der Produktionsplanung und -steuerung vorgestellt. Das Modell wird im Rahmen dieser Arbeit als Referenz zur detaillierten Darstellung der Aufgabenfelder der PPS gewählt. Hintergrund ist die weitreichende Anwendung des Modells und der damit verbundenen Anerkennung.

Das Aachener Modell der Produktionsplanung und -steuerung hat seinen Ursprung am Forschungsinstitut für Rationalisierung an der RWTH Aachen.¹⁶ Der Fokus bei der Entwicklung des Modells lag darin, Praxisvorhaben bei der Entwicklung und Etablierung von PPS-Systemen und -Konzepten zu unterstützen. Dazu gehört die Beschreibung der Bestandteile eines PPS-Systems und die Unterstützung bei der Ermittlung von konkreten Zielstellungen. Darüber hinaus soll das Modell als Unterstützungsmethode im Bereich der Optimierung dienen. Hierbei wird deutlich, dass das Modell auf Grund seiner Vielseitigkeit dafür prädestiniert ist, aktiv in die Bearbeitung von Aufgaben im Bereich der PPS eingebunden zu werden.¹⁷

¹⁴ Vgl. Dombrowski/Mielke (2015), S.3

¹⁵ Vgl. Schuh/Gierth (2006b), S. 5-6

¹⁶ Vgl. Schuh et al. (2012) S. 5-6

¹⁷ Vgl. Schuh/Gierth (2006a), S. 12