

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

Produzierende Unternehmen stehen dauerhaft unter dem Druck, ihre Prozesse zu optimieren und sich an die ändernden Marktgegebenheiten anzupassen, um langfristig konkurrenzfähig zu bleiben. Insbesondere der Wunsch nach individualisierten Produkten, kurze Produktlebenszyklen und die zunehmende Variantenvielfalt der angebotenen Produkte erhöhen hierbei die Komplexität im Auftragsabwicklungsprozess.¹ Zusätzliche Dynamiken, z.B. unvorhergesehene Maschinenausfälle, schwer planbare Auftragseingänge und ungeplante Kundenänderungswünsche, führen zu einer weiteren Erhöhung dieser Komplexität.² Mit Hilfe von Prognosen, statistischen Methoden und Konzepten zur Prozessoptimierung wird versucht, die Abläufe und die Wirtschaftlichkeit in diesem turbulenten Umfeld stabil zu halten. Darüber hinaus setzen Unternehmen verschiedene Informationssysteme ein, z.B. Enterprise Resource Planning (ERP) - Systeme und Manufacturing Execution Systeme (MES), um Fach- und Führungskräfte bei operativen und administrativen Aufgaben zu unterstützen sowie die notwendige Daten- und Informationsgrundlage für das Management des Auftragsabwicklungsprozesses zu bieten. Die Problematik besteht hierbei in der Vielfalt der Systeme und den umfangreichen Datenbeständen, die sinnvoll integriert werden müssen, um komplexe Probleme zu lösen und die Reaktionsgeschwindigkeit auf dynamische Einflüsse zu erhöhen.³

Die Entscheidungsträger in den Unternehmen sind jedoch oftmals mit der hohen Komplexität und den Dynamiken überfordert. Aufgrund der begrenzten kognitiven Fähigkeiten der Menschen, sind diese in der Regel nicht fähig, die große Anzahl der möglichen Handlungsalternativen miteinander zu vergleichen oder überhaupt erst eine ausreichende Anzahl an vergleichbaren Alternativen zu entwickeln sowie objektive Entscheidungen zu treffen.⁴ Gleichzeitig führen die Entwicklungen in Unternehmen dazu, dass Entscheidungsbefugnisse und planerische Tätigkeiten zunehmend an untere Ma-

¹ Vgl. EIMaraghy et al. (2012), S. 798

² Vgl. Ouelhadj/Petrovic (2009), S. 418; Stoop/Wiers (1996), S. 40; Suresh/Chaudhuri (1993), S. 59; Vieira et al. (2003), S. 42

³ Vgl. Chamoni/Gluchowski (2016), S. 4

⁴ Vgl. Hülsmann/Schulenburg (2005), S. 90 f.

nagementebenen oder sogar direkt an Mitarbeiter auf dem Shop-Floor übergeben werden.⁵ Entsprechenden Fachkräften fehlt es jedoch an ausreichend Überblick, um die Folgen einzelner Entscheidungen über ihren Bereich hinaus abschätzen zu können. Insbesondere bei unvorhergesehenen Störungen werden, aufgrund von Zeitdruck und fehlenden Unterstützungssystemen, oftmals Ad-hoc-Lösungen implementiert, die sich sogar negativ auf die Gesamtleistung des Produktionssystems auswirken können.⁶ Den Mitarbeitern sollten geeignete Informationssysteme zur Entscheidungsunterstützung bereitgestellt werden, welche die Auswirkungen lokaler Entscheidungen für das gesamte Produktionssystem überprüfen. Eine im Kontext dieser Arbeit durchgeführte Studie zeigt jedoch, dass die klassischen und modernen Informationssysteme, wie ERP-Systeme, MES und Advanced Planning and Scheduling (APS) - Systeme, hierfür nicht ausreichend geeignet sind. Insbesondere die Reaktion auf dynamische Einflüsse und die Unterstützung durch Vorgabe von Lösungsalternativen werden nicht im notwendigen Umfang abgedeckt.⁷ Neue Lösungen müssen daher die Möglichkeiten der Digitalisierung und der künstlichen Intelligenz aufgreifen, um die Komplexität und die Dynamiken beherrschbar zu machen.⁸

Informationssysteme sollen jedoch nicht nur beim Management der Komplexität im Auftragsabwicklungsprozess helfen. Nach SCHÖNSLEBEN (2001) ist Fortschritt in Unternehmen nur durch gleichzeitige Innovationen im Kontext von Produkten und Prozessen sowie den dazugehörigen Informationstechnologien möglich. Abbildung 1 veranschaulicht diesen Zusammenhang. Wollen Unternehmen heutzutage konkurrenzfähig sein, dürfen sie ihre Innovationsaktivitäten folglich nicht ausschließlich auf Produkte und Prozesse konzentrieren. Ohne den Einsatz oder die spezifische Entwicklung geeigneter Informationssysteme, kann kein maximaler Nutzen der Produkt- und Prozessinnovationen erreicht werden.⁹

⁵ Vgl. Chameni/Gluchowski (2016), S. 6

⁶ Vgl. Hülsmann (2005), S. 49

⁷ Vgl. Kunath/Winkler (2019c), S. 7

⁸ Die vorliegende Arbeit kann den Themengebieten der industriellen Informationssysteme, der Digitalisierung, der Prozesssimulation und teilweise der künstlichen Intelligenz zugeordnet werden. Gleichzeitig grenzt sich die Arbeit vom Gebiet der „Big Data“ ab, das sich mit der generellen Verarbeitung großer Datenmengen beschäftigt. Für das zu entwickelnde Konzept des adaptiven Assistenzsystems werden verschiedene, spezifische Produktionsdaten benötigt. Es ist jedoch keine Verarbeitung „aller“ Daten eines Unternehmens notwendig.

⁹ Vgl. Schönsleben (2001), S. 39 f.

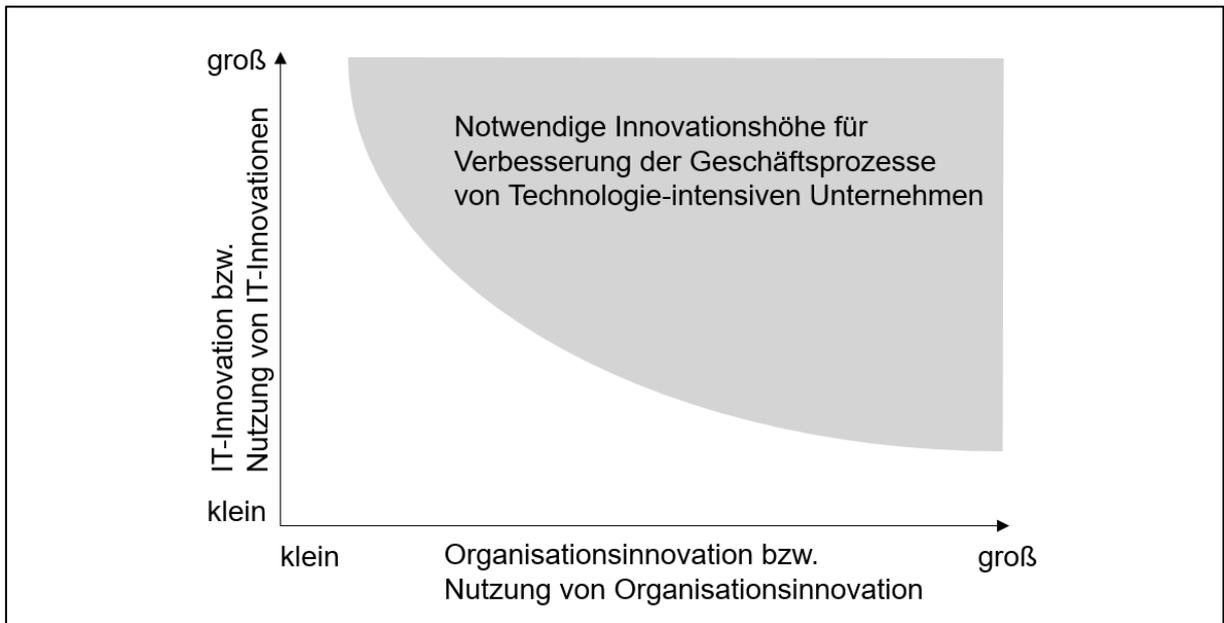


Abbildung 1: Abhängigkeit von Organisationsinnovationen und Innovationen in der Informationstechnik (IT)¹⁰

Seit dem Aufkommen des Begriffes Industrie 4.0 und den hinter diesem Begriff verborgenen Teilkonzepten der Digitalisierung und Vernetzung in der Produktion, haben sich immer mehr Autoren mit der Erweiterung klassischer Konzepte, wie dem Computer-Integrated Manufacturing (CIM), sowie der Verknüpfung und Erweiterung von ERP-Systemen und MES beschäftigt. Es wurde gezeigt, wie ein MES intelligent mit der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie der Auftragsabwicklung verknüpft werden kann.¹¹ Klassische MES wurden um Kennzahlensysteme zu Assistenzsystemen, für eine Entscheidungsunterstützung auf Grundlage von Effizienzkennzahlen, erweitert¹² und es wurde gezeigt, wie in entsprechenden Systemen die Integration von Shop-Floor-Daten realisierbar ist.¹³ Hierbei wird insbesondere der Integration von detaillierten Simulationsmodellen in die verschiedenen Entscheidungsprozesse ein großes Potenzial zugesprochen.¹⁴

¹⁰ Quelle: Schönsleben (2001), S. 39

¹¹ Vgl. Obermaier/Kirsch (2016)

¹² Vgl. Winkler et al. (2016)

¹³ Vgl. Hänel/Felden (2017)

¹⁴ Vgl. Daniluk/Chisu (2010), S. 159

Konzepte der simulationsbasierten PPS wurden bereits in den 1980er Jahren entwickelt und haben sich seitdem durch die zunehmende Rechenleistung weiterentwickelt. In Folge des steigenden Einsatzes der Informationstechnik (IT) in den meisten Unternehmen verbessern sich zunehmend die Anwendungspotenziale simulationsbasierter PPS-Konzepte. Ein Hauptanwendungsgebiet stellt die simulationsbasierte Reihenfolgeplanung dar. In Verknüpfung mit den weiteren Informationssystemen eines Unternehmens können simulationsbasierte Systeme, unter Berücksichtigung stochastischer Modelle und Zustandsdaten des Produktionssystems, bei der Wahl geeigneter Prioritätsregeln oder der Erstellung alternativer Produktionspläne helfen. Wesentliche Voraussetzung entsprechender Konzepte ist die Verfügbarkeit von ausreichend und insbesondere aktuellen Daten des Produktionssystems.¹⁵

Ein weiteres, im Kontext von Industrie 4.0 aufgekommenes Konzept zur Lösung der Informationsverfügbarkeit stellt der Digitale Zwilling dar, welches über die reine Echtzeit-Datenversorgung hinaus geht und insbesondere die vereinfachte Modellierung und Simulation unterstützt.¹⁶ Der Digitale Zwilling soll ein digitales Echtzeit-Abbild eines realen, physischen Systems sein¹⁷ und wurde erstmals 2010 von der National Aeronautics and Space Administration (NASA) aufgegriffen.¹⁸ In den folgenden Jahren wurden die Potenziale des Digitalen Zwillings insbesondere für die Überwachung, Analyse sowie Fernwartung von Maschinen und anderen Objekten erkannt.¹⁹ Eine sinnvolle Konsequenz der Entwicklung einzelner Digitaler Zwillinge im Produktionsumfeld ist die Generierung des Digitalen Zwillings des Produktionssystems. Dieser kann in Verbindung mit den weiteren Informationssystemen die notwendigen Daten für eine detaillierte, simulationsbasierte PPS liefern und bei einem ganzheitlichen sowie zielgerichteten Management des Auftragsabwicklungsprozesses helfen.²⁰ Der Digitale Zwilling selbst weist jedoch keine methodische Intelligenz auf, sodass ein Informationssystem notwendig ist, das den Digitalen Zwilling des Produktionssystems in Entscheidungssituationen integriert.

¹⁵ Vgl. Hopp/Spearman (2001), S. 499

¹⁶ Vgl. Boschert/Rosen (2016), S. 63

¹⁷ Die Definition des Digitalen Zwillings wird in 4.2 in dieser Arbeit untersucht und konkretisiert.

¹⁸ Vgl. Shafto et al. (2010), S. 18

¹⁹ Vgl. z.B. Boschert/Rosen (2016); Denkena et al. (2017); Liu/Xu (2017); Schleich et al. (2017)

²⁰ Vgl. Kunath/Winkler (2018), S. 227

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept eines entsprechenden Informationssystems zu entwickeln, das die Vorteile des Digitalen Zwillings mit den Ansätzen simulationsbasierter PPS-Konzepte verbindet. Da das Konzept über die Funktionen klassischer betrieblicher Informationssysteme hinausgeht, wird in dieser Arbeit von einem Assistenzsystem für den Auftragsabwicklungsprozess gesprochen. In dem beschriebenen turbulenten Unternehmensumfeld muss das System zudem in der Lage sein, auf die Veränderungen des Marktes, möglichen Veränderungen im Produktionssystem und den sich ändernden Anforderungen des Unternehmens reagieren zu können. Die zentrale Forschungsfrage, die diese Arbeit zu beantworten versucht, lautet daher:

Wie kann ein modernes Konzept eines adaptiven Assistenzsystems zum Management dynamischer Auftragssituationen und zur Entscheidungsunterstützung im Auftragsabwicklungsprozess aussehen?

Aus der zentralen Forschungsfrage ergeben sich die nachfolgenden einzelnen Fragestellungen, die es für eine strukturierte Beantwortung der zentralen Fragestellung zu prüfen gilt:

- 1. Sind die existierenden Informationssysteme ausreichend zum Management dynamischer Auftragssituationen geeignet?*
- 2. Welche Anforderungen werden an ein Assistenzsystem für den Auftragsabwicklungsprozess gestellt?*
- 3. Wie können die Potenziale der Digitalisierung und des Digitalen Zwillings im Kontext eines entsprechenden Systems genutzt werden?*
- 4. Welche konkreten Funktionen muss ein entsprechendes Assistenzsystem für den Auftragsabwicklungsprozess bieten?*
- 5. Wie kann die Anpassungsfähigkeit des Assistenzsystems, im Sinne eines adaptiven Assistenzsystems, sichergestellt werden?*
- 6. Welche Anwendungspotenziale bietet das System?*

1.2 Aufbau der Arbeit

Das Vorgehen in der Arbeit orientiert sich an den zuvor aufgestellten, einzelnen Forschungsfragen. Die Arbeit erhebt nicht den Anspruch ein lauffähiges Informationssystem zu entwickeln, sondern ein erstes Systemkonzept. Das Systemkonzept soll die notwendigen Funktionen definieren, anschließend validiert werden und kann bei erfolgreicher Validierung als Grundlage für einen ersten Prototypen dienen. Zudem können die Erkenntnisse für die Weiterentwicklung bereits verfügbarer Informationssysteme genutzt werden. Zur generellen Strukturierung des Vorgehens bietet KURBEL (2008) einen generischen, iterativen Rahmen:²¹

1. Analyse von Problemen und Aufstellung erster Anforderungen an das System.
2. Spezifizierung der Anforderungen für eine grobe Konzeptentwicklung.
3. Entwicklung des groben Systemkonzeptes.
4. Auswahl von Anforderungen und Funktionen, die konkretisiert werden sollen.
5. Entwicklung einer detaillierten Konzeptversion oder von Konzepten einzelner Subsysteme
6. Implementierung, Test und Überarbeitung der Version oder eines Subsystems.
7. Evaluierung der Systemversion oder des Subsystems.
8. Wiederholung ab dem vierten Schritt bis eine zufriedenstellende Lösung erreicht wurde oder erneute Anpassung der Anforderungen.

Da in dieser Arbeit kein lauffähiger Prototyp entwickelt, sondern zunächst der theoretische Rahmen erarbeitet wird, kann der sechste Schritt vernachlässigt werden. Die Validierung des Systemkonzeptes ist trotzdem sinnvoll, um bereits Schwächen zu identifizieren, die zu einem unnötigen Aufwand bei der Prototypenentwicklung führen. Zur Abarbeitung der einzelnen Schritte gliedert sich die Arbeit in sechs Teile.

Der erste Teil umfasst die allgemeine Problem- und Zielspezifizierung in der vorherigen Einleitung. Im zweiten Teil werden die notwendigen Grundlagen erarbeitet. Das System soll für Aufgaben im Auftragsabwicklungsprozess anwendbar sein, weshalb zunächst der Auftragsabwicklungsprozess selbst genauer betrachtet wird. Zudem soll das adaptive Assistenzsystem über die Funktionen bekannter Informationssysteme

²¹ Vgl. Kurbel (2008), S. 168 f.; Der iterative Prozess wird sich sinnvollerweise nicht vollständig in der vorliegenden Arbeit abbilden lassen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass über die einzelnen Forschungsschritte und Veröffentlichungen für die Dissertation eine kontinuierliche Konkretisierung und Anpassung des Systemkonzeptes stattgefunden hat.

hinausgehen. Es ist jedoch nicht sinnvoll, die bereits vorhandenen Funktionen anderer Systeme zu duplizieren, wenn diese bereits in sinnvoller Weise abgedeckt sind. Vielmehr soll das adaptive Assistenzsystem die vorhandenen Informationssysteme eines Unternehmens in Entscheidungssituationen integrieren. Daher werden die wesentlichen Funktionen sowie die Integration betrieblicher Informationssysteme, erweiterter Informationssysteme und von simulationsbasierten Entscheidungsunterstützungssystemen im zweiten Teil betrachtet. Weiterhin erfolgt eine Begriffsabgrenzung von Informationssystemen, Entscheidungsunterstützungssystemen und Assistenzsystemen.

Zur Konkretisierung der Problemstellung und zur Ableitung erster Anforderungen an das Systemkonzept wird im dritten Teil eine strukturierte Literaturrecherche und Studie durchgeführt, welche den Status-Quo betrieblicher Informationssysteme aufarbeitet. Die identifizierten Probleme dienen als Grundlage zur Herleitung des Handlungsbedarfes und für die Ausrichtung des Systemkonzeptes. Durch die Literaturanalyse können entsprechend wissenschaftlich fundierte Probleme erarbeitet werden, die in der Studie durch Unternehmensvertreter mit Produktions- und IT-Bezug bestätigt, konkretisiert und erweitert werden sollen.

Der vierte Teil umfasst die eigentliche Konzeptentwicklung. Dazu werden einleitend die konkreten Anforderungen an das Systemkonzept erarbeitet. Wie bereits kurz beschrieben, soll der Digitale Zwilling des Produktionssystems eine wesentliche Grundlage des adaptiven Assistenzsystems darstellen. Daher werden anschließend das Konzept des Digitalen Zwillings im Allgemeinen, das Konzept des Digitalen Zwillings des Produktionssystems sowie Konzepte Digitaler Zwillinge einzelner Systemelemente untersucht. Auf Grundlage der definierten Anforderungen und der gewonnenen Erkenntnisse zum Konzept des Digitalen Zwillings werden in den wesentlichen Unterkapiteln des vierten Teils zunächst die übergeordnete Architektur des Systemkonzeptes erarbeitet und dann die konkreten Systemmodule genauer spezifiziert. Der vierte Teil schließt mit potenziellen Anwendungsszenarien des adaptiven Assistenzsystems.

Im fünften Teil erfolgt die Systemvalidierung. Da kein technischer Prototyp vorliegen wird, kann die Validierung lediglich auf die theoretische Funktionalität des Assistenzsystems ausgerichtet sein. Dazu wird das Konzept zunächst mit kommerziell verfügbaren Systemen verglichen, die dem adaptiven Assistenzsystems ähneln. Ziel ist es, insbesondere die Neuartigkeit des entwickelten Systemkonzeptes zu belegen. Weiterhin soll die Praxistauglichkeit des Systemkonzeptes validiert werden. Dazu wird eine

Expertenbefragung mit potenziellen Systemanwendern und Entwicklern ähnlicher Systeme durchgeführt.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick. Aufgrund der Komplexität von Informationssystemen kann das zu entwickelnde Systemkonzept nicht alle notwendigen Teilgebiete der IT-Entwicklung abdecken. Zudem kann zum vorliegenden Zeitpunkt bereits davon ausgegangen werden, dass das Konzept des Digitalen Zwillings, als angedachte Voraussetzung des adaptiven Assistenzsystems, nicht oder nur partiell in realen Unternehmen umgesetzt ist. In den Expertenbefragungen werden sich zudem weitere Schwächen oder Probleme des Konzeptes ergeben. Im Ausblick wird entsprechend darauf eingegangen, welche Voraussetzungen zur Überführung des Systemkonzeptes in einen Prototyp notwendig sind. Die Abbildung 2 fasst den beschriebenen Aufbau der Arbeit zusammen.

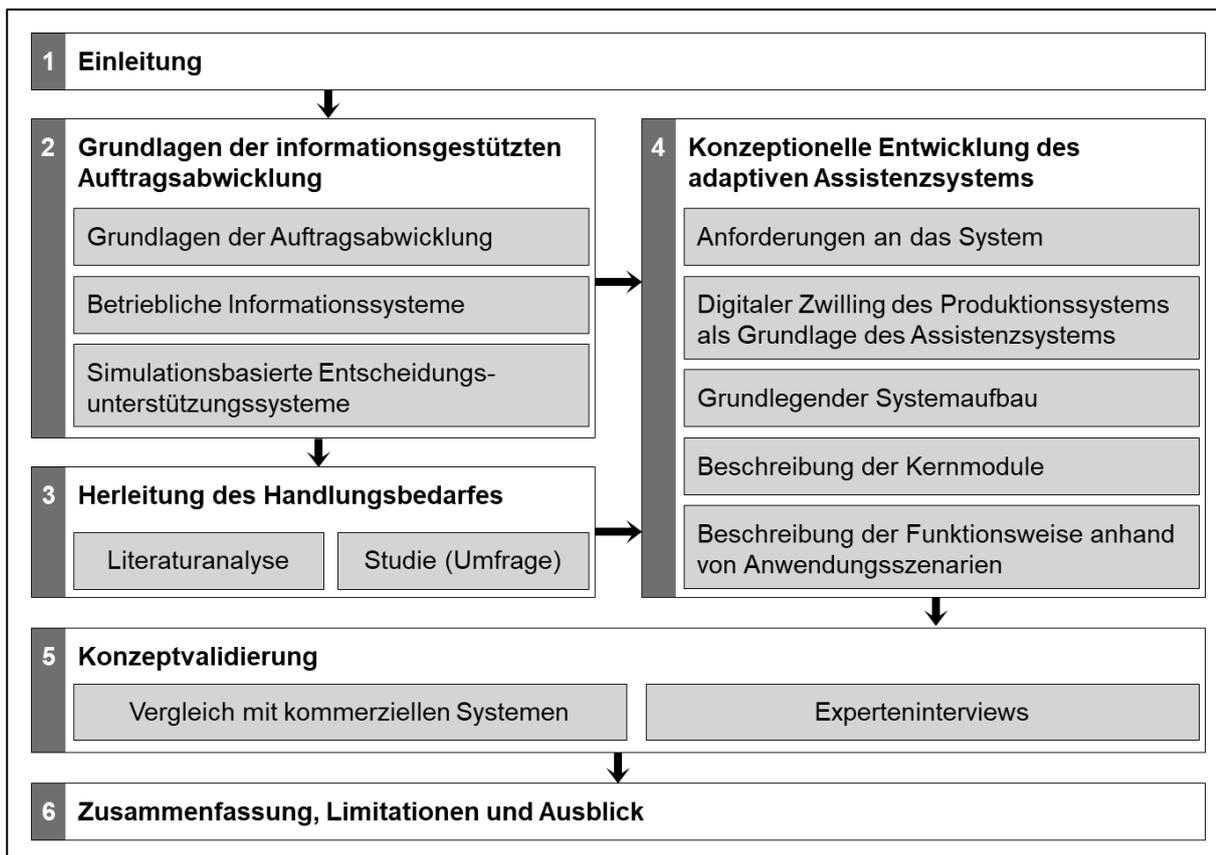


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit²²

²² Quelle: Verfasser

2 Informationsgestütztes Management des Auftragsabwicklungsprozesses

2.1 Grundlagen des Auftragsabwicklungsprozesses

2.1.1 Überblick zu den Funktionen im Auftragsabwicklungsprozess

Zu Beginn dieser Arbeit soll eine Abgrenzung der Inhalte des Auftragsabwicklungsprozesses erfolgen. Da sich die Abläufe zwischen einer rein kundenauftragsbezogenen Produktion und rein erwartungsbezogenen Lagerfertigung, als Extrema der Auftragsabwicklungstypen, unterscheiden²³, ist zur Konkretisierung der Aufgaben eine Fokussierung auf den spezifischen Auftragsabwicklungstyp notwendig.²⁴ Zur Vereinfachung erfolgen die nachfolgenden Erklärungen zunächst unabhängig vom Auftragsabwicklungstyp. An notwendigen Stellen wird jedoch auf Spezifika der kundenauftragsbezogenen Produktion und der kundenanonymen Produktion hingewiesen.

Bevor auf den eigentlichen Auftragsabwicklungsprozess eingegangen wird, sollen der Begriff des Auftrags und die verschiedenen Auftragsarten abgegrenzt werden. Unter einem Auftrag wird im rechtlichen Sinne die Übertragung eines Geschäfts von einem Auftraggeber an einen Auftragnehmer verstanden. Durch die Annahme des Auftrags verpflichtet sich der Auftragnehmer, dem Auftraggeber die definierte Leistung zu erbringen.²⁵ In produzierenden Unternehmen können verschiedene Arten von Aufträgen unterschieden werden. Grundsätzlich kann ein Auftrag als Geschäftsobjekt beschrieben werden, das inhaltlich durch das Unternehmen und mindestens einem weiteren Geschäftspartner, z.B. dem Kunden oder dem Lieferanten, definiert wird. Die inhaltliche Definition umfasst dabei mindestens einen der folgenden Punkte:²⁶

- die zu beschaffenden oder zu fertigenden Produkte, die eindeutig identifizierbar, mengenmäßig quantifiziert und durch einen Liefertermin fixiert sind,
- die zur Produktion bereitzustellenden Rohmaterialien oder Komponenten, die eindeutig identifizierbar, mengenmäßig quantifiziert und terminiert sind oder
- durchzuführende Tätigkeiten, die zeitlich und durch ihre Reihenfolge voneinander abgegrenzt sind.

²³ Vgl. Mertens (2013), S. 43; siehe 2.1.2 für eine Unterscheidung der Auftragsabwicklungstypen

²⁴ Vgl. Schuh/Schmidt (2006), S. 108 ff.

²⁵ Vgl. § 662 BGB

²⁶ Vgl. Schönsleben (2007), S. 16 f.

Ein Auftrag kann wiederum in mehrere Auftragspositionen unterteilt sein, wenn in diesem beispielsweise unterschiedliche Produkte oder Tätigkeiten zusammengefasst sind.²⁷ Neben der Durchführungsphase kann sich ein Auftrag zunächst in der Angebotsphase, im Status der Auftragsbestätigung oder in der finalen Abrechnung befinden.²⁸ Grundsätzlich können folgende Auftragsarten unterschieden werden:²⁹

- **Kundenauftrag:** Geschäftspartner ist ein externer Kunde, der einen Auftrag an das Unternehmen richtet
- **Beschaffungsauftrag:** Auftrag des Unternehmens an einen externen Lieferanten, z.B. zur Beschaffung notwendiger Materialien
- **Produktionsauftrag:** unternehmensinterner Auftrag zur Behandlung von Rohmaterialien oder Komponenten mit dem Ziel ein Produkt oder Zwischenerzeugnis herzustellen oder logistisch zu behandeln
- **Lieferauftrag:** unternehmensinterner Auftrag, der die Auslieferung des Kundenauftrags einleitet und abschließt

In der Auflistung der grundsätzlich zu unterscheidenden Auftragsarten wurde ergänzend zu SCHÖNSLEBEN (2007) und SCHEER (1995) der Lieferauftrag hinzugefügt. Hintergrund ist die bessere Abgrenzung der nachfolgend erläuterten Aufgaben und Abläufe im Auftragsabwicklungsprozess zwischen Beschaffung, Produktion und Distribution in Anlehnung an das Supply Chain Operations Reference (SCOR) - Modell.³⁰

Insbesondere Produktionsaufträge müssen zur zielgerichteten Abarbeitung weiter detailliert werden. Ein Produktionsauftrag benötigt eine oder mehrere Operationen durch spezifischen Maschinen, die in einer bestimmten technologischen Bearbeitungsfolge, mit definierten Prozesszeiten stattfinden. Er hat einen frühesten Startzeitpunkt und einen im Bezug zum Liefertermin definierten Fertigstellungstermin. Zudem können Produktionsaufträge unter Berücksichtigung der Unternehmensziele individuell priorisiert und durch eine Kostenfunktion beschrieben werden.³¹ Einige Autoren unterscheiden

²⁷ Vgl. Schönsleben (2007), S. 842

²⁸ Vgl. Schönsleben (2007), S. 17

²⁹ Vgl. Scheer (1995), S. 86; Schönsleben (2007), S. 17 f.; Wiendahl (2011), S. 85

³⁰ Vgl. APICS (2017), S. 12; Wiendahl (2011), S. 63 f.

³¹ Vgl. Lenstra et al. (1977), S. 346 f.