HELMUT SCHMIDT UNIVERSITÄT
Universität der Bundeswehr Hamburg

Methodik zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von Timo Busert

aus Berlin

Hamburg 2022

Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay
	Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Kersten
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg
Tag der mündlichen Prüfung:	07.07.2022

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automatisierungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, der ich zwischen Oktober 2016 und Mai 2021 nachging.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing Alexander Fay, der es mir ermöglichte an seiner Professur als wissenschaftlicher Mitarbeiter in einem sehr kollegialen Team forschend tätig zu sein. Im Rahmen zahlreicher Diskussionen stand er mir sowohl methodisch als auch fachlich zur Seite und hat somit maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Das entgegengebrachte Vertrauen, die Förderung und Forderung waren nicht nur wesentlich für den erfolgreichen Abschluss der Arbeit, sondern prägten mich auch für meinen weiteren beruflichen Werdegang in hohem Maße.

Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Wolfgang Kersten für das Interesse an der Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg danke ich für den Vorsitz des Promotionsverfahrens.

Ich bedanke mich bei den ehemaligen Partnern, mit denen ich im Rahmen des Projektes „Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Hamburg“ zusammenarbeiten durfte. Die gemeinsamen Veranstaltungen, Workshops und Projekte mit kleinen und mittelständischen Unternehmen aus Hamburg bereiteten mir viel Freude und ermöglichten es mir stets einen aktuellen Einblick in die industrielle Praxis zu bekommen.

Auf die Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Automatisierungstechnik blicke ich sehr gern zurück. Für den starken Teamzusammenhalt, die Hilfsbereitschaft sowie die sozialen Events bin ich sehr dankbar. Ein besonders großer Dank gilt Alexander Hayward, Feras El Sakka, Jan-Philip Beck, C. Steffen Gundlach, Gian Mewes, Artan Markaj und Alaettin Dogan, die mich im Laufe meiner Zeit mit ihrer fachlichen Kompetenz, ihren guten Anregungen und kritischen Fragen enorm unterstützt haben.

Insbesondere bedanke ich mich bei meinen Freunden und meiner Familie, die während meiner Forschungstätigkeit oft auf mich verzichten mussten. Besonders möchte ich mich bei Heike Müller bedanken, die mir stets in stressigen und schwierigen Zeiten eine wichtige Stütze war. Ohne ihr Verständnis, ihren Rückhalt und die liebevolle Unterstützung, wäre die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Ich widme diese Arbeit meinem Sohn Leon sowie meiner Großmutter Ulla, die sich zu Lebzeiten stets am Fortschritt meiner Dissertation erfreut hat.

Hamburg, Juli 2022

Timo Busert

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung ..... **IV**
Abstract ..... **V**
Abkürzungsverzeichnis ..... **VI**
1 Einleitung **1**
1.1 Motivation und Hintergrund der Arbeit 1
1.2 Problemstellung und Zielsetzung 3
1.3 Forschungsansatz: Design Science Research 4
1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit 6
2 Steuerung der Produktionslogistik heutiger Produktionssysteme **8**
2.1 Produktion, Produktionssystem & Logistik: Begriffe und Definitionen 8
2.2 Bevorratungsstrategien und Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme 10
2.2.1 Bevorratungsstrategien und ihr Einfluss auf die Produktionslogistik 10
2.2.2 Steuerungsarchitekturen 12
2.3 Ziele und Aufgaben der Steuerung der Produktionslogistik 13
2.3.1 Abgrenzung der Steuerung der Produktionslogistik 13
2.3.2 Ziele der Steuerung der Produktionslogistik 14
2.3.3 Aufgaben der Steuerung der Produktionslogistik 15
2.3.4 Steuerungsstrategien 19
2.4 Einfluss heutiger Produktionssysteme auf die Steuerung der Produktionslogistik 20
2.4.1 Komplexitätszunahme der Steuerung der Produktionslogistik 20
2.4.2 Gestaltung der Steuerung der Produktionslogistik zur Komplexitätsreduktion 21
2.5 Relevanz von Informationen und Informationsqualität zur Steuerung der Produktionslogistik 24
2.5.1 Informationen als Grundlage der Steuerung der Produktionslogistik 24
2.5.2 Informationsqualität als Schlüsselfaktor zur effektiven und effizienten Steuerung der Produktionslogistik 26
2.6 Funktionale Anforderungen an eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität 33
2.6.1 Anforderungscluster produktionslogistischer Prozess & Steuerung (P) 33
2.6.2 Anforderungscluster Informationen & Informationsflüsse (I) 35
2.6.3 Anforderungscluster Informationsqualität (Q) 38
2.7 Zwischenfazit: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und Zusammenfassung von Anforderungen 39

3 Stand der Erkenntnisse zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik 42
3.1 Strukturierung des Untersuchungsgebietes 42
3.2 Analyse des Stands der Erkenntnisse in den Untersuchungsgebieten 43
3.2.1 Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik 44
3.2.2 Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse 49
3.2.3 Methoden zur Analyse und Harmonisierung von Informationsqualitäten zur Steuerung der Produktionslogistik 56
3.3 Kritische Würdigung des Erkenntnisstands und Ableitung des Forschungsbedarfs 63
3.3.1 Diskussion der Herkunft des Stands der Erkenntnisse 63
3.3.2 Diskussion der Anforderungserfüllung 63
4 Grobkonzeption der Methode 66
4.1 Definition nicht-funktionaler Anforderungen 66
4.2 Konzeptionierung der Struktur der zu entwickelnden Methode 67
4.3 Ableitung von (Teil-)Forschungsfragen 71
5 Schritt 1: Analyse der Ist-Situation 74
5.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes 74
5.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes 74
5.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsgebietes 74
5.2.2 Modellierung des Prozesses 75
5.2.3 Verfeinerung der Modellierung aufgenommener Kennzahlen 79
5.2.4 Identifikation von Verbesserungspotenzialen 85
5.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfragen 87
6 Schritt 2: Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik 88
6.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes 88
6.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes 88
6.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage 92
7 Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen 94
7.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes 94
7.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes 94
7.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage 99
8 Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität 100
8.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes 100
8.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes 100

8.2.1 Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* ... 100
8.2.2 Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* ... 103
8.2.3 Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ... 107
8.3 Abgeleitete Hypothesen zur Beantwortung der Forschungsfrage ... 113
9 Schritt 5: Detailplanung und Implementierung ... 115
9.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes ... 115
9.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes ... 115
9.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage ... 118
10 Schritt 6: Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung ... 120
10.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes ... 120
10.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes ... 120
10.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage ... 121
11 Evaluierung der entwickelten Methode ... 122
11.1 Vorgehen zur Evaluierung der entwickelten Methode ... 122
11.2 Anwendungsbeispiel 1: Reduktion von Transporten ... 123
11.2.1 Beschreibung der Ausgangssituation und Zielstellung ... 123
11.2.2 Anwendung der entwickelten Methode ... 123
11.3 Anwendungsbeispiel 2: Verbesserung der Reihenfolgebildung ... 162
11.3.1 Beschreibung der Ausgangssituation und Zielstellung ... 162
11.3.2 Anwendung der entwickelten Methode ... 162
11.4 Überprüfung der Anforderungserfüllung & kritische Reflexion ... 183
12 Zusammenfassung, kritische Reflexion und Ausblick ... 190
12.1 Zusammenfassung ... 190
12.2 Kritische Reflexion und Ausblick ... 191
Anhang ... 194
Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1 ... 194
Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 2 ... 205
Literaturverzeichnis ... 206

Kurzfassung

Die kontinuierliche Zunahme an Produktvarianten bei gleichzeitig immer geringer werdenden Losgrößen pro Variante steigert die Komplexität innerhalb der Produktion vieler produzierender Unternehmen und stellt diese vor große Herausforderungen. So erfordert die Produktion individueller Produkte eine Planung und Steuerung individueller Produktions- und Logistikabläufe. Durch die Zunahme der Komplexität werden die Produktions- und Logistikabläufe jedoch immer schwieriger nachzuvollziehen und ihre Vorhersagbarkeit sinkt. Für die Produktionslogistik bedeutet dies, dass erstellte Produktionspläne zur Erreichung produktionslogistischer Ziele häufig nur begrenzt Gültigkeit besitzen, sofern die Steuerung der Produktionslogistik nicht in der Lage ist, diesen Plan, trotz auftretender nicht eingeplanter Ereignisse, zu realisieren. Zur Beherrschung der Komplexität und somit auch zur Erreichung produktionslogistischer Ziele ist die Erfassung von Informationen aus den laufenden Prozessen sowie deren Verwendung zur zielgerichteten Steuerung ein entscheidender Faktor. Die richtigen Informationen in der richtigen Form, am richtigen Ort in ausreichender Qualität bilden somit die Grundlage für eine leistungsfähige Steuerung der Produktionslogistik. Dies gilt es im Rahmen von Projekten zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik zu berücksichtigen.

Dazu wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode aus sechs Schritten vorgestellt. Durch die Anwendung der Methode wird die Steuerung der Produktionslogistik systematisch verbessert und die Qualität der für die Steuerung erforderlichen Informationen mit den Anforderungen des Steuerungsverfahrens und des zu steuernden Prozesses harmonisiert. Dies erfolgt, indem zunächst die Ist-Situation eines Ausschnitts eines Produktionssystems mit Hilfe eines Wertstromdiagramms aufgenommen, analysiert und Verbesserungspotenziale identifiziert werden (Schritt 1). Aufbauend auf den identifizierten Verbesserungspotenzialen erfolgt das Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik (Schritt 2), deren Informationsflüsse in einer Erweiterung des klassischen Wertstromdiagramms modelliert werden (Schritt 3). Im Rahmen der anschließenden Harmonisierung der Informationsqualität (Schritt 4) werden die Anforderungen an die Informationsqualitätsdimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* ermittelt, die es bei der Detailplanung und Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik (Schritt 5) unter Berücksichtigung ökonomischer Faktoren zu erfüllen gilt. Abschließend sieht die Methode eine Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik (Schritt 6) vor. Zentrales Element der Methode ist ein erweitertes Wertstromdiagramm, das als durchgängiges Modellierungs- und Kommunikationsmedium dient und innerhalb der Methodenschritte aufeinander aufbauend ergänzt und befüllt wird. Zur Modellierung und Berücksichtigung der vorherrschenden Variabilität von Produkten und Prozessen innerhalb des zu untersuchenden Produktionssystems werden Fuzzy-Zahlen eingesetzt.

Anhand von zwei Anwendungsbeispielen der Methode in einem realen Produktionssystem erfolgt eine Evaluierung der entwickelten Methode, wodurch sich deren Vorteilhaftigkeit gegenüber bereits bestehenden Ansätzen belegen lässt. Der Nachweis der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik gegenüber der Ausgangssituation sowie der Nachweis zur Harmonisierung der Informationsqualität innerhalb der Anwendungsbeispiele erfolgt mittels Simulationsstudien.

Abstract

The continuous increase in the number of variants, coupled with decreasing batch sizes per variant, increases the complexity within the production of many manufacturing companies and present them with major challenges. The production of individual products requires the planning and control of individual production and logistics processes. However, production and logistics processes are becoming increasingly difficult to track and their predictability is declining due to the increase in complexity. For production logistics, this means that production plans often have only limited validity, unless the control of the production logistics can implement this plan despite the occurrence of unplanned events. To master the complexity and thus also to achieve production logistics goals, the collection of information from running processes and its use for a goal-oriented control is a decisive factor. The right information in the right form at the right place in sufficient quality thus forms the basis for an efficient control of production logistics. This must be considered in the context of projects to improve the control of production logistics.

For this purpose, a method consisting of six steps is presented in this thesis. By applying the method, the control of production logistics will be systematically improved, and the quality of the required information for the improvement is harmonized with the requirements of the control procedure and the requirements of the processes to be controlled. This is done by first recording and analyzing the actual situation of a section of a production system with the aid of a value stream diagram and identifying potential for improvement (step 1). Based on the identified improvement potentials, an improved control of the production logistics is designed (step 2). Next, the information flows will be modeled in an extension of the classic value stream diagram (step 3). In the subsequent harmonization of the information quality (step 4), the requirements for the information quality dimensions *granularity*, *frequency* and *reliability* are determined, which must be achieved in the detailed planning and implementation of the design of the improved control of production logistics (step 5), taking economic factors into account. Finally, the method provides an evaluation of the designed and implemented improvement of production logistics control (step 6) to verify the effects of the improvement. The central element of the method is an extended value stream diagram, which serves as a consistent modeling and communication medium and is supplemented and filled within the method steps building on each other. Fuzzy numbers are used to model and consider the prevailing variability of products and processes within the production system under investigation.

Based on two application examples of the method in a real production system an evaluation of the developed method takes place, whereby its advantageousness can be proven in relation to already existing approaches. The proof of the improvement of the control of the production logistics compared to the initial situation as well as the proof of the harmonization of the information quality within the application examples is carried out by means of simulation studies.

Abkürzungsverzeichnis

ADM	Adaptive Data Model
BDE	Betriebsdatenerfassung
CDQIM	Continuous Data Quality Improvement Management
ConWIP	Constant Work-In-Process
CPS	Cyber-Physische Systeme
DQPD	Data Quality-dependent Process Design
DSR	Design Science Research
Ent	Entnahme
FIFO	First In – First Out
HF	Hauptforschungsfrage
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologien
IQ	Informationsqualität
JIT	Just-in-Time
MDE	Maschinendatenerfassung
PL	Produktionslogistik
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
SPC	*statistical process control*
Stk	Stück
TCO	Total-Cost-of-Ownership
TDM	Total Data Model
TFF	(Teil-)Forschungsfrage
TFZ	Trianguläre Fuzzy-Zahl
WoPS	Wertstromorientierte Produktionssteuerung
XWINQ	Extended Work in next Queue

1 Einleitung

1.1 Motivation und Hintergrund der Arbeit

Die industrielle Produktion ist das Rückgrat der Wirtschaft vieler Ökonomien. Sie bezeichnet einen Transformationsprozess, in dem aus verschiedenen Ressourcen unter Verwendung von Informationen und Wissen Produkte hergestellt werden, um eine bestehende Nachfrage zu bedienen [WELÖ16, S. 2]. Getrieben durch sich stetig verändernde Kundenanforderungen wandelte sich insbesondere innerhalb des letzten Jahrhunderts die Art der Produktion entscheidend. Lange Zeit sahen sich produzierende Unternehmen einem „einfachen Markt“ gegenüber, in dem die Nachfrage lediglich durch die Dimension *Volumen* definiert wurde. Die Nachfrage war größer als die durch die produzierenden Unternehmen angebotenen Produkte, die überwiegend handwerklich und mit Unterstützung von Dampfmaschinen gefertigt wurden [YSL18, S. 848]. Produzierende Unternehmen mussten sich also lediglich auf eine effiziente Produktion weniger Produktvarianten fokussieren. Mit der Einführung von arbeitsteiligen Produktionsprozessen mithilfe elektrischer Energie seit Ende des 19. Jahrhunderts wurde eine industrielle Massenproduktion ermöglicht [BAU17, S. 2]. Die Nachfrage konnte somit immer mehr bedient werden und die Nachfragebedürfnisse fingen an, sich zu differenzieren. Die Produktion eines einzelnen Produktes erfüllte nicht mehr alle Nachfragebedürfnisse, sodass sich die Nachfrage um die Dimension *Produktvarianten* erweiterte. Da sich das Angebot jedoch noch immer unter der Nachfrage befand, lässt sich der zu dieser Zeit vorherrschende Markt als „stabiler Markt“ (aus Sicht der produzierenden Unternehmen) bezeichnen [YSL18, S. 849]. Im Übergang zu den 1980er Jahren waren schließlich viele Märkte gesättigt und wandelten sich von Verkäufermärkten zu Käufermärkten. Dies steigerte die Wettbewerbsintensität produzierender Unternehmen, da diese nun immer mehr um die bestehende Nachfrage konkurrieren mussten. Um wettbewerbsfähig zu werden beziehungsweise zu bleiben durften sich produzierende Unternehmen nicht mehr nur auf das Volumen einiger weniger Produktvarianten konzentrieren, sondern waren gefordert, ihr Angebotsspektrum gezielt auf die Nachfrage auszurichten. Getrieben durch den Einsatz von Elektronik und später durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in der Produktion wurde eine fortschreitende Automatisierung der Produktionsprozesse geschaffen, wodurch einerseits rationalisiert, andererseits aber auch eine variantenreiche Serienproduktion erreicht werden konnte bis hin zur sogenannten Mass Customization [BAU17, S. 3; KWH13, S. 17]. Neben Preis und Qualität der Produkte gewannen weitere kundenbezogene Leistungsmerkmale an Bedeutung, um sich am Markt positiv von konkurrierenden Unternehmen zu differenzieren, wie die logistischen Leistungsmerkmale *Lieferzeit* und *Liefertermintreue* [NYWI12, S. 2]. Diese haben sich im Zeitverlauf mit zu einer der zentralen Einflüsse auf die Kaufentscheidungen von Seiten des Kunden entwickelt [HSN17, S. 238]. Die Nachfrage erweiterte sich dadurch um die Dimension *Lieferzeit*. Der sich daraus entwickelte Markt kann als „volatiler Markt“ charakterisiert werden [YSL18, S. 851]. Durch die Zunahme der zu produzierenden Varianten in Verbindung mit der Forderung nach kürzeren Lieferzeiten und einer hohen Liefertermintreue gewann die Produktionslogistik eines Unternehmens immer mehr an Bedeutung, deren Aufgabe die Planung, Steuerung, Durchführung und Überwachung von Materialflüssen innerhalb der Produktion eines Unternehmens ist [PAW07, S. 14]. Somit sorgt die Produktionslogistik für einen effizienten und effektiven Produktionsablauf durch Bereitstellung der richtigen Objekte (Materialien, Informationen, Dienstleistungen, etc.), zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Qualität und Quantität, am richtigen Bedarfsort, auf wirtschaftliche Art und Weise und beeinflusst dadurch maßgeblich die Dauer der internen Lieferzeit beziehungsweise die Einhaltung von Lieferterminen [PAW07, S. 15]. Das Streben nach einer hohen Liefertermintreue hat sich für produzierende Unternehmen bis heute nicht

geändert. So gaben in einer Umfrage 67 % der befragten produzierenden Unternehmen an, sie die Liefertermintreue als wichtigste logistische Zielgröße priorisieren [SCFU15, S. 6].

Die drei zuvor beschriebenen Entwicklungen innerhalb der industriellen Produktion (zusammengefasst in Abbildung 1-1) werden heute retrospektiv als die ersten drei industriellen Revolutionen bezeichnet. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von Informations- und Kommunikationstechnologien und deren Integration in die industriellen Produktionsprozesse wurde 2011 erstmals eine weitere industrielle Revolution ausgerufen, bevor diese tatsächlich stattgefunden hat [HPO16, S. 3928]. Diese vierte industrielle Revolution wird als Industrie 4.0 bezeichnet. Sie basiert auf der Entwicklung und Integration neuer IKT, teilweise auch als Industrie 4.0-Technologien bezeichnet, im industriellen Umfeld, die es ermöglichen sollen, Produktionssysteme derart zu vernetzen, dass diese in der Lage sind, flexibel auf volatile Produktionsbedingungen zu reagieren und individualisierte Kundenwünsche von Kleinstmengen, bis zur Losgröße 1, bei erhöhter Ressourcenproduktivität und -effizienz rentabel zu produzieren [KWH13, 19F.; XXL18, S. 2941]. Das Potenzial von Industrie 4.0 für die Produktionslogistik und insbesondere für deren Steuerung kann im Allgemeinen auf eine verbesserte Datenverfügbarkeit und Datenqualität zurückgeführt werden. Auf Basis von Echtzeitdaten können somit beispielsweise kurzfristige Maßnahmen eingeleitet werden, um schwer vorhersagbaren Ereignissen entgegenzuwirken. In diesem Zusammenhang ist bereits ersichtlich, dass insbesondere die Entscheidungsfindung für die kurzfristige Planung und Steuerung durch den Einsatz von Industrie 4.0-Technologien unterstützt werden kann. Darüber hinaus ermöglichen es diese Technologien jedoch auch, dass Entscheidungen, die eine große Anzahl an Eingabevariablen benötigen, durch eine verbesserte Datenverfügbarkeit positiv beeinflusst werden, da bestimmte Sachverhalte durch zuvor fehlende Informationen weniger abstrahiert werden müssen. [DODI18, S. 116]

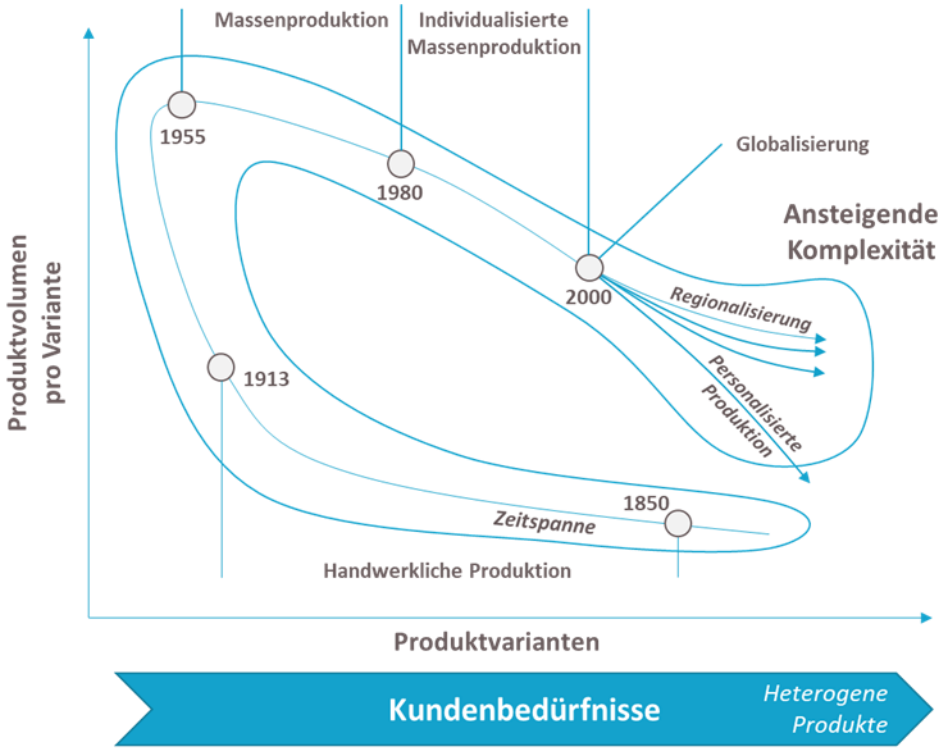

Abbildung 1-1: Wandel der Produktion (in Anlehnung an [KOR10, S. 34])

1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Durch die Zunahme an Varianten bei gleichzeitig immer geringeren Losgrößen pro Variante nimmt die Komplexität innerhalb der Produktion immer weiter zu [SHM15, S. 308]. So erfordert die Produktion individueller Produkte eine Planung und Steuerung individueller Produktionsabläufe sowie der damit verbundenen Materialflüsse. Dies zu bewältigen ist für viele produzierende Unternehmen eine zentrale Herausforderung. Bestätigt wird dies durch eine 2016 veröffentliche Studie[1] in der 53 % der befragten produzierenden Unternehmen beurteilten, dass die Leistungsfähigkeit ihrer eingesetzten Planung und Steuerung weder den aktuellen noch den zukünftigen Aufgaben gewachsen sei. Weitere 31 % gaben an, dass ihre eingesetzte Planung und Steuerung zwar den aktuellen Aufgaben gewachsen sei, jedoch nicht zukünftigen Anforderungen gerecht wird [NMP+16, S. 10]. Als größte Herausforderung wurde dabei die Beherrschung der Komplexität durch Variantenvielfalt angegeben [NMP+16, S. 11].

Durch die Zunahme der Komplexität werden Materialflüsse immer schwieriger nachzuvollziehen und die Vorhersagbarkeit von Produktionsverläufen sinkt [SPR+17, S. 76]. Im Rahmen der Produktionslogistik bedeutet dies, dass erstellte Produktionspläne zur Erreichung produktionslogistischer Ziele nur begrenzte Gültigkeit besitzen, sofern die Steuerung der Produktionslogistik nicht in der Lage ist, diesen Plan, trotz auftretender nicht eingeplanter Ereignisse, zu realisieren. Die richtige Konfiguration und eine schnelle Reaktionsfähigkeit der Steuerung der Produktionslogistik gewinnt im Hinblick auf die Erreichung logistischer Ziele immer mehr an Bedeutung [SHH+18, S. 842]. Um eine schnelle Reaktionsfähigkeit und somit eine hohe Leistungsfähigkeit der Steuerung der Produktionslogistik zu erreichen, ist die Erfassung von Informationen beispielsweise in Form von Rückmeldedaten aus den laufenden Prozessen sowie deren Verwendung zur zielgerichteten Steuerung ein entscheidender Faktor [SNR+15, S. 201]. Die richtigen Informationen in der richtigen Form, am richtigen Ort in ausreichender Qualität bilden somit die Grundlage für eine leistungsfähige Steuerung der Produktionslogistik. Die bedarfsgerechte Informationsbereitstellung ist jedoch keine triviale Aufgabe, sondern stellt eine zentrale Herausforderung dar, die es im Rahmen von Verbesserungsprojekten der Steuerung der Produktionslogistik zu bewältigen gilt [NHQ+17, S. 33]. So gilt der Grundsatz, dass die Ergebnisse im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik nur so gut sind wie die Informationsgrundlage, die zur Ermittlung der Ergebnisse herangezogen wird [SPR+17, S. 82]. Von entscheidender Bedeutung ist in diesem Zusammenhang die Qualität der Informationen. Ist die Informationsqualität nicht ausreichend, so hat dies zur Folge, dass falsche Steuerungsentscheidungen generiert werden. Dies kann zum einen hohe Bestandskosten, lange Durchlaufzeiten sowie eine schlechte Liefertermintreue an den Kunden zur Folge haben [SMN19A, S. 28], zum anderen aber auch das Vertrauen der Produktionsmitarbeitenden in die getroffenen Entscheidungen mindern, sodass diese als Konsequenz eigenständige Entscheidungen vornehmen, mit der Folge, dass Steuerungsstrategien auseinanderlaufen können [SNR+15, S. 201]. In der zuvor genannten Studie gab jedes fünfte Unternehmen an, dass eine unzureichende Informationsqualität eine zentrale Herausforderung für die Steuerung der Produktionslogistik ist und somit noch Bedarf besteht, diese an die Anforderungen der Steuerung der Produktionslogistik anzugleichen [NMP+16, S. 11].

Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität. Harmonisierung der Informationsqualität

[1] Gemeinsame Studie von vier produktionstechnischen Instituten in der 170 Unternehmensvertreter unterschiedlicher Unternehmensgrößen, verschiedener Branchen zu aktuellen Herausforderungen in der Produktionsplanung und -steuerung befragt wurden.

wird in diesem Zusammenhang definiert als die systematische Identifikation von benötigten Informationen und die Definition ihrer erforderlichen Qualität, sodass diese zu den Anforderungen der produktionslogistischen Prozesse und Verfahren passen. Mit dieser Methode sollen produzierende Unternehmen in der Lage sein, die Steuerung der Produktionslogistik unter besonderer Berücksichtigung der Informationsqualität zu verbessern, um somit die zuvor aufgeführten aktuellen Herausforderungen bewältigen zu können.

Aus der definierten Zielstellung lässt sich die (Haupt-)Forschungsfrage ableiten:

(Haupt-)Forschungsfrage (HF):

Aus welchen Schritten muss eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität bestehen und wie sind diese Schritte auszugestalten?

Auf Basis dieser (Haupt-)Forschungsfrage werden verschiedene Teilziele, ebenfalls als (Teil-)Forschungsfragen formuliert, abgeleitet, die es im Rahmen der Arbeit zu beantworten gilt und die im Rahmen der zu entwickelnden Methode abzubilden sind:

- (*Teil-)Forschungsfrage 1:* Welche Dimensionen der Informationsqualität sind für die Steuerung der Produktionslogistik relevant?
- *(Teil-)Forschungsfrage 2:* Wie kann ein Produktionsprozess mit zugehöriger Produktionslogistik hinreichend genau in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden, um effizient Verbesserungspotenziale zur Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren?
- *(Teil-)Forschungsfrage 3:* Wie lassen sich geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ermitteln und gegebenenfalls modifizieren, um identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können?
- *(Teil-)Forschungsfrage 4:* Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?
- *(Teil-)Forschungsfrage 5:* Wie lässt sich die für die Steuerungsverfahren erforderliche Informationsqualität ermitteln, sodass bei Einhaltung der erforderlichen Qualität die Steuerungsentscheidungen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses harmonisiert sind?

1.3 Forschungsansatz: Design Science Research

Zur Entwicklung der Methode und zur Beantwortung der Forschungsfrage(n) wird im Rahmen dieser Arbeit Design Science Research (DSR) als Forschungsansatz verwendet. DSR ist eine Methode zur Etablierung und Operationalisierung von Forschung, wenn ein angestrebtes Ziel die Entwicklung eines Artefakts ist [DLA15, S. 67]. Artefakte, die im Rahmen von DSR entwickelt werden, sind beispielsweise Konstrukte, Modelle, Methoden, Instanzen oder Designvorschläge [DLA15, S. 71]. Im Rahmen der Anwendung von DSR sollten die von Hevner et al. [HMP+04, S. 83] entwickelten Richtlinien berücksichtigt werden:

- Richtlinie 1 - *Design als Artefakt*: DSR muss ein lebensfähiges Artefakt erzeugen in Form einer Methode, eines Konstrukts oder einer Instanz.
- Richtlinie 2 - *Problemrelevanz*: Das Ziel von DSR ist die Entwicklung einer Lösung für wichtige und relevante Probleme.

- Richtlinie 3 - *Design Evaluierung*: Die Nützlichkeit, Qualität und Wirksamkeit des Artefakts müssen rigoros durch Anwendung geeigneter Evaluierungsmethoden nachgewiesen werden.
- Richtlinie 4 - *Wissenschaftlicher Beitrag*: Ein effektives Anwenden von DSR muss einen klaren und verifizierbaren Beitrag in den Bereichen des Designartefakts, der Designgrundlagen und/oder der Designmethoden liefern.
- Richtlinie 5 - *Forschungsstrenge*: DSR beruht auf der Anwendung von rigorosen Methoden sowohl in Bezug auf die Entwicklung des Artefakts als auch in Bezug auf dessen Evaluierung.
- Richtlinie 6 - *Design als Suchprozess*: Die Entwicklung effektiver Artefakte erfordert die Nutzung verfügbarer Mittel zur Erreichung der Ziele und Erfüllung der Anforderungen.
- Richtlinie 7 - *Kommunikation der Forschung:* DSR erfordert eine effektive Kommunikation des Vorgehens und der Ergebnisse sowohl an ein Technologie- als auch an ein Management-orientiertes Publikum, zur Ermöglichung der Nutzung der Vorteile des entwickelten Artefakts.

Zur Anwendung von DSR haben Dresch et al. [DLA15, 118FF.] ein Vorgehen entwickelt, dessen Anwendung unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen Richtlinien eine strukturierte und effiziente Durchführung von DSR ermöglichen soll. Das vorgeschlagene Vorgehen beginnt mit der *Identifikation eines zu untersuchenden Problems*, aus der sich eine Forschungsfrage ableiten lässt. Für das identifizierte Problem muss anschließend ein *Problembewusstsein* geschaffen werden. Dies bedeutet, dass alle erforderlichen Informationen erfasst werden müssen, um ein umfassendes Verständnis des Problems zu erlangen. Die Ergebnisse dieses *Problembewusstseins* sind eine Formalisierung der Aspekte des zu lösenden Problems sowie eine Definition von Anforderungen, die das zu entwickelnde Artefakt zur Problembeseitigung erfüllen muss. Die Entwicklung des *Problembewusstseins* wird unterstützt durch eine *systematische Literaturrecherche*. Das Ziel dieser *systematischen Literaturrecherche* ist es, bestehendes Wissen zu erlangen, das das gleiche oder verwandte Probleme adressiert. Der vierte Schritt des vorgeschlagenen Vorgehens wird als *Identifikation von Artefakten und Konfiguration der Klassen des Problems* bezeichnet. Unter anderem auf Basis der zuvor durchgeführten *systematischen Literaturrecherche* werden in Rahmen dieses Schrittes bereits bestehende Artefakte und Klassen von Problemen identifiziert, die ähnlich zu dem zu lösenden Problem sind. Diese ermittelte Basis ermöglicht es, auf bestehenden Arbeiten aufzubauen und diese im Rahmen der Entwicklung des Artefakts mitzuverwenden. Im nächsten Schritt *Vorschlag von Artefakten zur Lösung des Problems* erfolgt eine Formalisierung, welche Artefakte genutzt beziehungsweise auf welchen Artefakten aufgebaut werden kann, um das Problem zu lösen. Schließlich erfolgt im Rahmen des *Designs des Artefakts* die Definition der Struktur des Artefakts, in der dessen interne Charakteristika sowie der externe Kontext, in dem das Artefakt eingesetzt wird, entwickelt werden. Dies bildet die Grundlage für die eigentliche *Entwicklung des Artefakts*. Im Anschluss an die Entwicklung erfolgt die *Evaluierung des Artefaktes*. In diesem Schritt erfolgt eine Bewertung des Artefakts in Bezug auf das Erreichen einer angestrebten Lösung. Hierbei sei angemerkt (in Anlehnung an Richtlinie 6), dass die *Entwicklung des Artefakts* und die *Evaluierung des Artefakts* ein iterativer Prozess sein kann und sich die Anforderungen und der Umfang des Artefakts innerhalb dieses Prozesses anpassen können [HMP+04, S. 89; WIE14, S. 28]. Nach der *Evaluierung des Artefakts* sieht die vorgeschlagene Methode eine *Klarstellung des erreichten Lernens* vor, wobei Faktoren identifiziert werden sollen, die einen positiven Beitrag zur Zielerreichung beigetragen haben, sowie entsprechend gegenteilige Faktoren. Schließlich erfolgt eine *Zusammenfassung* der Ergebnisse sowie der Entscheidungen im Rahmen der Erarbeitung. Abschließend ist eine *Generalisierung für eine Klasse von Problemen* vorgesehen sowie eine *Veröffentlichung der Ergebnisse.* Die vorgeschlagene Methode von Dresch et al. [DLA15] wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit angewendet und bildet die Grundlage für die Struktur und den Aufbau der Arbeit.

1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit

Aufbauend auf den Ausführungen in Kapitel 1.1 und 1.2 ist das primäre Ziel dieser Arbeit eine Methode zu entwickeln, die die beschriebenen Probleme und Herausforderungen adressiert und diese idealerweise beseitigt. Kapitel 1.1 und 1.2 stellen somit im Rahmen des DSR die *Identifikation eines Problems* dar. In Kapitel 2 erfolgt eine Beschreibung der Steuerung der Produktionslogistik heutiger Produktionssysteme. In diesem Kapitel werden, neben der Einführung der zentralen Terminologie, Anforderungen ermittelt, die bei der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt werden müssen. Im Rahmen des DSR umfasst dieses Kapitel die Schritte *Problembewusstsein* und Teile der *systematischen Literaturrecherche*. Innerhalb dieses Kapitels wird ein Zwischenfazit gezogen, welches das Untersuchungsgebiet und die damit verbundenen Anforderungen klar zusammenfasst. Im darauffolgenden Kapitel 3 „Stand der Erkenntnisse zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik“ erfolgt die Vervollständigung der *systematischen Literaturrecherche*. Es umfasst eine Analyse bestehender Methoden und Ansätze zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik und zur Harmonisierung der Informationsqualität sowie ein Abgleich, inwieweit diese die in Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen erfüllen. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit ab, in dem die bestehende Forschungslücke zur Behandlung der Problemstellung verdeutlicht wird. Basierend auf dem Stand der Erkenntnisse in Kapitel 3 erfolgt in Kapitel 4 „Grobkonzeption der Methode“ der *Vorschlag von Artefakten zur Lösung des Problems* sowie das *Design des ausgewählten Artefakts*. Dazu werden die grundlegenden Schritte der zu entwickelnden Methode vorgestellt sowie die jeweils zugehörigen Anforderungen definiert, die ein Methodenschritt erfüllen muss, um einen Beitrag zum übergeordneten Ziel der Anwendung der zu entwickelnden Methode, nämlich der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität, beizusteuern. In den Kapiteln 5 bis 10 werden die einzelnen Methodenschritte detailliert vorgestellt. Dies umfasst im Rahmen des DSR die eigentliche *Entwicklung des Artefakts*. In Kapitel 11 „Evaluierung der entwickelten Methode“ wird anhand realer industrieller Beispiele die Anwendbarkeit und die Eignung der entwickelten Methode mittels geeigneter Kriterien evaluiert sowie die Erfüllung und Vollständigkeit der in Kapitel 2 aufgestellten Anforderungen überprüft. Folglich umfasst dieses Kapitel im Rahmen des DSR die *Evaluierung*. Die Arbeit schließt in Kapitel 12 mit einer Zusammenfassung, einer kritischen Reflexion und einem Ausblick, der mögliche Weiterentwicklungen der entwickelten Methode skizziert. Innerhalb dieses Kapitels erfolgt die im Rahmen des DSR vorgesehene *Klarstellung des erreichten Lernens*, die *Zusammenfassung* sowie die *Generalisierung für eine Problemklasse*. Die *Kommunikation der Ergebnisse* stellen die vorliegende Dissertation sowie die im Rahmen der Erarbeitung dieser Dissertation erstellten Veröffentlichungen dar. Eine Zuordnung der Schritte des DSR zur Struktur dieser Arbeit ist in Abbildung 1-2 dargestellt.

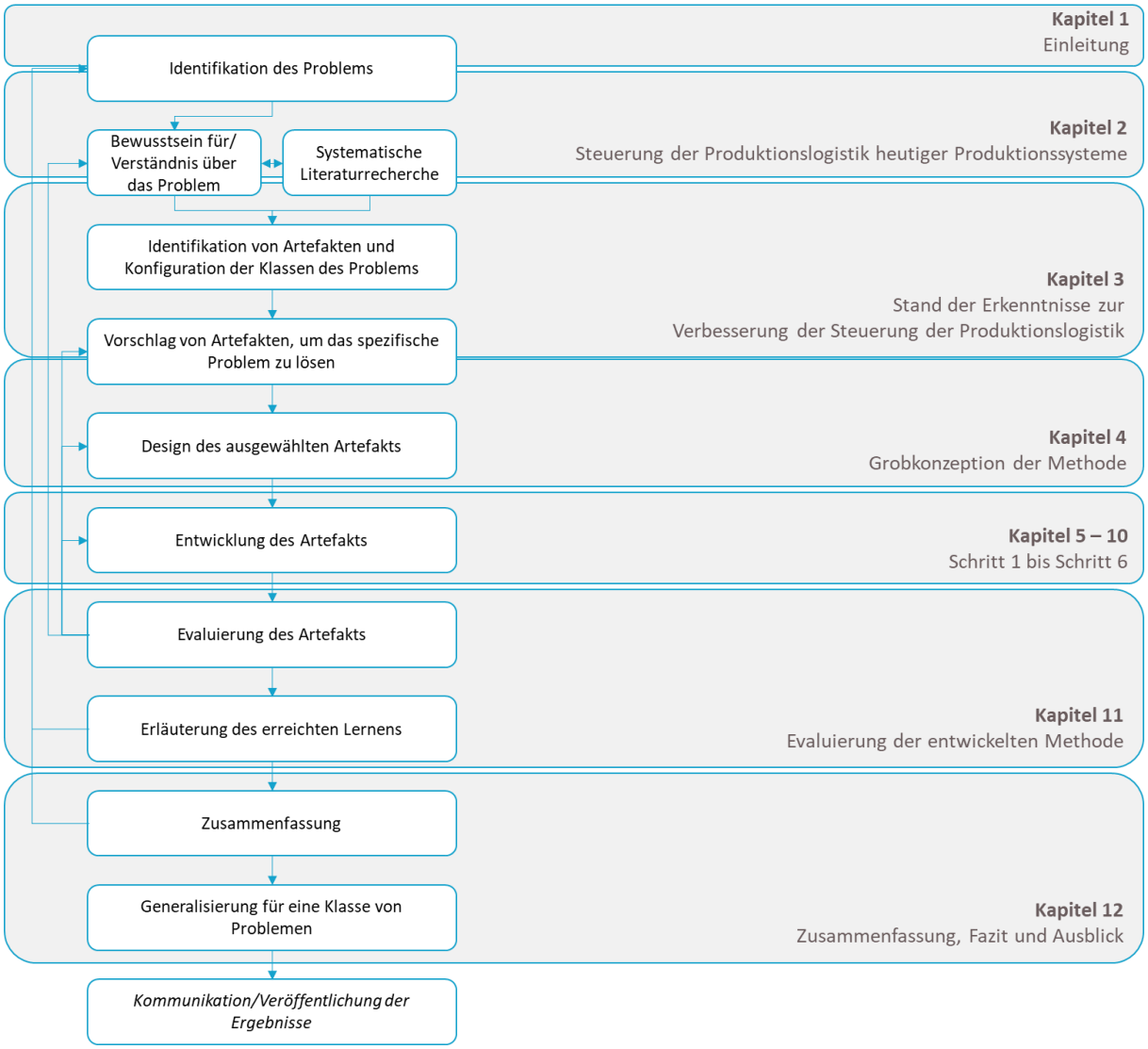

Abbildung 1-2: Zuordnung der Schritte des DSR zur Struktur der Arbeit

2 Steuerung der Produktionslogistik heutiger Produktionssysteme

Die Produktionslogistik hat sich immer mehr zu einem entscheidenden Faktor für produzierende Unternehmen entwickelt, um langfristig am Markt wettbewerbsfähig zu bleiben. In der Literatur werden die Aufgabenfelder der Produktionslogistik unterschiedlich weit gefasst. Zur Abgrenzung des Untersuchungsgebietes im Rahmen dieser Arbeit werden nachfolgend die wichtigsten Begriffe, die Aufgaben und Ziele der Steuerung der Produktionslogistik sowie die Relevanz der Informationslogistik zur Steuerung der Produktionslogistik dargelegt. Im Rahmen des Design Science Research umfasst dieses Kapitel die Schritte *Identifikation des Problems*, *Bewusstsein für/Verständnis über das Problem* und Aspekte der *Systematischen Literaturrecherche*. Dieses Kapitel stellt somit die theoretische Grundlage dieser Arbeit dar. Aus diesen Grundlagen werden Anforderungen an eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität abgeleitet, die es im weiteren Verlauf der Arbeit zu berücksichtigen und zu erfüllen gilt. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit ab, das den Untersuchungsbereich abgrenzt.

2.1 Produktion, Produktionssystem & Logistik: Begriffe und Definitionen

Die (industrielle) *Produktion* ist im Allgemeinen definiert als die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nicht materiellen Produktionsfaktoren nach bestimmten technischen Verfahrensweisen [GÜTE07, S. 6]. Innerhalb eines produzierenden Unternehmens werden alle Bereiche der Produktion zugeordnet, die an der Herstellung der Ausbringungsgüter mittelbar oder unmittelbar beteiligt sind [VDI 2870-1, S. 6]. Diese Bereiche umfassen aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht die Tätigkeiten der technischen Auftragsabwicklung, also den gesamten Auftragsdurchlauf mit technischer Angebotsbearbeitung, Konstruktion, Arbeitsplanung, Produktionsplanung und -steuerung, Fertigung, Montage sowie Funktionen der Materialwirtschaft [EVE96, S. 1535]. Die im Rahmen der Produktion zum Einsatz kommenden Produktionsfaktoren werden in Elementarfaktoren und dispositive Faktoren gegliedert. Elementarfaktoren umfassen Werkstoffe (Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe), aus denen die Produkte bestehen und bei der Produktion laufend verbraucht werden, Betriebsmittel (Maschinen und Anlagen), die langfristig für die Produktion bereitgestellt werden müssen und auf denen die Transformationsprozesse im Rahmen der Produktion ablaufen, sowie die Arbeitsleistungen der Mitarbeitenden [STE13, S. 1]. Als dispositive Faktoren sind die Leitung, Planung, Organisation, Steuerung sowie die Kontrolle und Überwachung der Produktion zu unterscheiden. Durch die dispositiven Faktoren werden die Elementarfaktoren zu produktiven Faktorkombinationen verbunden, deren Art und Weise die Ergiebigkeit der Produktion und somit die Erfüllung produktionswirtschaftlicher Ziele bestimmt [NEB09, S. 9].

Die reale Umsetzung der Produktion erfolgt innerhalb von *Produktionssystemen* mit dem Ziel, auf dem Beschaffungsmarkt erworbene Inputfaktoren in die auf den Absatzmärkten nachgefragten Produkte zu transformieren. Dazu umfassen Produktionssysteme in der Regel eine Vielzahl verschiedener oder gleichartiger Produktionsprozesse, die nicht zwingend am gleichen Produktionsstandort betrieben werden müssen, sowie eine geeignete Infrastruktur, um die Produktionsprozesse im Hinblick auf Material- und Informationsflüsse zu vernetzen. Die innere Struktur eines Produktionssystems lässt sich durch Subsysteme wie Werke, Anlagen oder einzelne Arbeitsplätze beschreiben sowie durch Teilsysteme, die die Beziehungen zwischen den Subsystemen verdeutlichen, wie zum Beispiel Materialfluss- und Informationssysteme. Die Außenstruktur eines Produktionssystems wird durch dessen Einbettung in ein betriebliches und

überbetriebliches Umfeld beschrieben, das durch wirtschaftliche, technische, rechtliche, soziokulturelle, politische und ökologische Rahmenbedingungen gekennzeichnet ist [DYSP05, S. 4].

Zur Strukturierung der Funktionen innerhalb eines Produktionssystems und deren zugehörigen Zeithorizonte bieten sich *Schichtmodelle* an. *Schichtmodelle* ermöglichen eine funktionale Strukturierung von Systemen in Ebenen, die im Einzelnen nicht weiter detailliert sein müssen. Jede Ebene beinhaltet dabei mehrere zusammenwirkende oder zusammengefasste Teilfunktionen, die mit ihren über- und untergeordneten Schichten kommunizieren und kooperieren [SCH99, S. 225]. Schnieder [SCH99, 225F.] unterscheidet bei der Strukturierung von Systemen zwischen vier Ebenen:

- Die *strategische Ebene* enthält für alle Bereiche eines Gesamtsystems die strategischen und informellen Funktionen, die zum Führen des gesamten Systems notwendig sind. Auf dieser Ebene werden die Ziele des Gesamtsystems formuliert.
- Auf der *dispositiven Ebene* treffen administrative, logistische, produktionswirtschaftliche und technische Funktionen zusammen, die beispielsweise zum Führen einer Fabrik notwendig sind.
- Die *taktische Ebene* koordiniert und plant den Einsatz der zur Verfügung stehenden Produktionsfaktoren.
- Auf der *operativen Ebene* finden die Steuerung der vorhandenen Produktionsfaktoren sowie die Ausführung der Produktionsprozesse statt.

In Abbildung 2-1 ist ein *Schichtmodell* dargestellt, das sich zur Strukturierung von Produktionssystemen anbietet. In Bezug auf die zuvor eingeführten Produktionsfaktoren sei angemerkt, dass die Elementarfaktoren auf der Prozessebene einzuordnen sind. Die darüber liegenden Ebenen umfassen hingegen die dispositiven Faktoren.

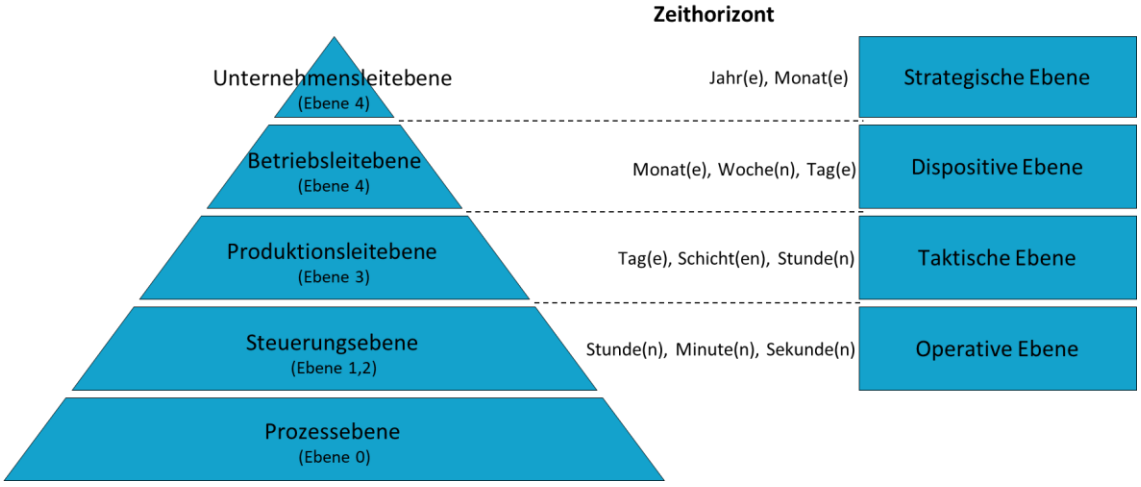

Abbildung 2-1: Schichtmodell eines Produktionssystems erweitert um Zeithorizonte (in Anlehnung an [DIN EN 62264-1, S. 15; NHQ+17, S. 33; SCH13, S. 5])

Die Planung, Steuerung, Durchführung und Überwachung von Objektflüssen (Material- und Informationsflüssen) innerhalb eines Produktionssystems ist Aufgabe der (Unternehmens-)Logistik[2]. Das Fachgebiet der *Logistik* befasst sich mit der wissenschaftlichen Lehre von Material- und Informationsflüssen mit dem generellen Ziel, das richtige Objekt (Produktionsfaktoren, Informationen, etc.), zum richtigen Zeitpunkt, in

[2] In Abgrenzung zur Unternehmenslogistik erfolgt die Planung, Steuerung und Überwachung von Objektflüssen in einem Unternehmensnetzwerk durch das Supply Chain Management [PAW07, S. 15].

der richtigen Qualität und Quantität am richtigen Bedarfsort auf wirtschaftliche Art und Weise bereitzustellen und verfügbar zu machen [PAW07, S. 15]. Eine gängige Unterteilung der Logistik in funktionelle Subsysteme erfolgt durch eine Einteilung der Phasen des Güterflusses innerhalb eines Unternehmens vom Beschaffungsmarkt durch die Produktion zum Absatzmarkt. Durch diese Unterscheidung erhält man die phasenspezifischen Subsysteme der Logistik, bestehend aus Beschaffungslogistik, Produktionslogistik und Distributionslogistik [PFO18, 16F]:[3]

- Die Beschaffungslogistik umfasst sämtliche Tätigkeiten zur Gewährleistung der physischen Verfügbarkeit von Beschaffungsgütern (materiellen und immateriellen Produktionsfaktoren) im Sinne einer Bereitstellung zur Produktion. Die Beschaffungslogistik umfasst somit im Wesentlichen die Informations- und Materialströme in Produktionsnetzwerken vom Warenausgang eines Lieferanten bis zum Wareneingang des produzierenden Unternehmens [SHB13, S. 77].
- Die Aufgabe der Produktionslogistik umfasst die Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle aller Maßnahmen, die für einen optimalen Ablauf des Material- und Informationsflusses von der Übernahme bereitgestellter Materialien und Informationen von der Beschaffungslogistik bis zur Übergabe der fertigen Produkte an die Distributionslogistik notwendig sind [WEDE06, S. 227].
- Durch die Distributionslogistik erfolgt die Planung, Steuerung, Durchführung und Kontrolle der Tätigkeiten zur Übernahme der fertigen Produkte aus der Produktion und deren Weiterleitung an die Kunden und Händler [WEDE06, S. 227].

Im Folgenden wird genauer auf die Produktionslogistik eingegangen, deren Steuerung der Fokus dieser Arbeit ist.

2.2 Bevorratungsstrategien und Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme

2.2.1 Bevorratungsstrategien und ihr Einfluss auf die Produktionslogistik

Die Art und Gestaltung der Produktionslogistik innerhalb eines Produktionssystems wird maßgeblich durch die Art der eingesetzten Bevorratungsstrategie beeinflusst. Die Bevorratungsstrategie bezieht sich darauf, wie ein Produktionssystem organisiert ist, um Aufträge ausgehend von einem (Kunden-)Auftragseindringungspunkt (engl. „Order Penetration Point“, teilweise auch als Kundenauftragsentkopplungspunkt bezeichnet) zu erfüllen [SCH20, S. 197]. Der (Kunden-)Auftragseindringungspunkt beschreibt den Beginn der Phase innerhalb einer Wertschöpfungskette, in dem ein Produkt mit einem bestimmten Kundenauftrag gekoppelt wird [OLH03, S. 319]. Er beschreibt somit den Übergang von einer kundenanonymen zu einer kundespezifischen Produktion und trennt somit zwei logistische Steuerkreise voneinander [THAL11, S. 352].

Ist das Produktionssystem in Form einer marktorientierten Massenfertigung (engl. „Make-to-Stock“) organisiert, erfolgt die Produktion fertiger kundenanonymer Produkte direkt in ein Lager. Es findet somit eine Bevorratung auf der Ebene der Endprodukte statt [NYWI12, S. 4; SCH20, S. 198]. Diese Art der Produktionsorganisation ist häufig durch eine stabile Planungssituation gekennzeichnet, die sich gut in einem Produktionsprogramm abbilden lässt und eine erhöhte Standardisierung von Prozessen ermöglicht [PRW01, S. 271]. Das Produktionssystem muss dadurch nur ein geringes Maß an Flexibilität aufweisen und die Steuerung der Produktionslogistik kann auf Basis effizienter standardisierter Mechanismen arbeiten.

[3] In Ergänzung zu den phasenspezifischen Subsystemen der Logistik wird häufig noch die Entsorgungslogistik mit aufgeführt, die sich mit der Planung, Steuerung und Überwachung der logistischen Leistungsprozesse für Rückstände im Verantwortungsbereich des Unternehmens befasst [WAN10, S. 439]

Dadurch bestehen nur geringe Anforderungen an die Abstimmung und Koordinierung von Produktionsfaktoren und ein geringer Informationsbedarf.

Die auftragsbezogene Einzelfertigung (engl. „Make-to-Order“) zeichnet sich dadurch aus, dass individuelle Produkte hergestellt werden, deren Eigenschaften durch den Kunden festgelegt werden [PRW01, S. 270]. Bei dieser Organisationsform erfolgt eine Bevorratung auf der Ebene der Rohmaterialien oder benötigte Materialien werden direkt nach Eingang eines Kundenauftrags beim Lieferanten beschafft [NYWI12, S. 4; SCH20, S. 198]. Produzierende Unternehmen mit einer auftragsbezogenen Einzelfertigung sind in der Regel mit einer unsicheren Planungssituation konfrontiert. Für das Produktionssystem bedeutet dies, dass dieses ein hohes Maß verschiedener Arten an Flexibilität (siehe dazu beispielsweise Sethi und Sethi [SESE90]) aufweisen muss, um umfassend und schnell auf individuelle Kundenwünsche eingehen zu können [PRW01, S. 271]. Für die Steuerung der Produktionslogistik hat dies zur Folge, dass ein hoher Abstimmungs- und Koordinationsbedarf besteht, um für die kundenindividuellen Produkte mit ihren unterschiedlichen Charakteristika einen effizienten und effektiven Durchlauf zu gewährleisten. Dazu besteht ein hoher Bedarf an aktuellen Informationen.

Die gemischte Serienfertigung (engl. „Assemble-to-Order“) ist eine Mischform der beiden zuvor beschriebenen Produktionsorganisationen [PRW01, S. 271]. Bei der gemischten Serienfertigung erfolgt eine Bevorratungsstrategie auf der Ebene von Einzelteilen oder Baugruppen. Ausgehend von dieser Bevorratungsstufe erfolgt schließlich eine kundenauftragsspezifische Finalisierung der Produkte [SCH20, S. 198].

Auf weitere Ausprägungen der Bevorratungsstrategien, wie beispielsweise „Engineer-to-Order“ oder „Design-to-Order“ sei hier nicht weiter eingegangen, da diese in Bezug auf die Steuerung der Produktionslogistik nur eine untergeordnete Rolle spielen, vergleichen mit den Anforderungen, wie sie durch die auftragsbezogene Einzelfertigung beschrieben werden. In Abbildung 2-2 sind die zuvor vorgestellten Bevorratungsstrategien mit ihren charakteristischen Eigenschaften in Bezug auf Planungssicherheit, Flexibilitätsbedarf, Informationsbedarf sowie Abstimmungs- und Koordinierungsbedarf aufgeführt.

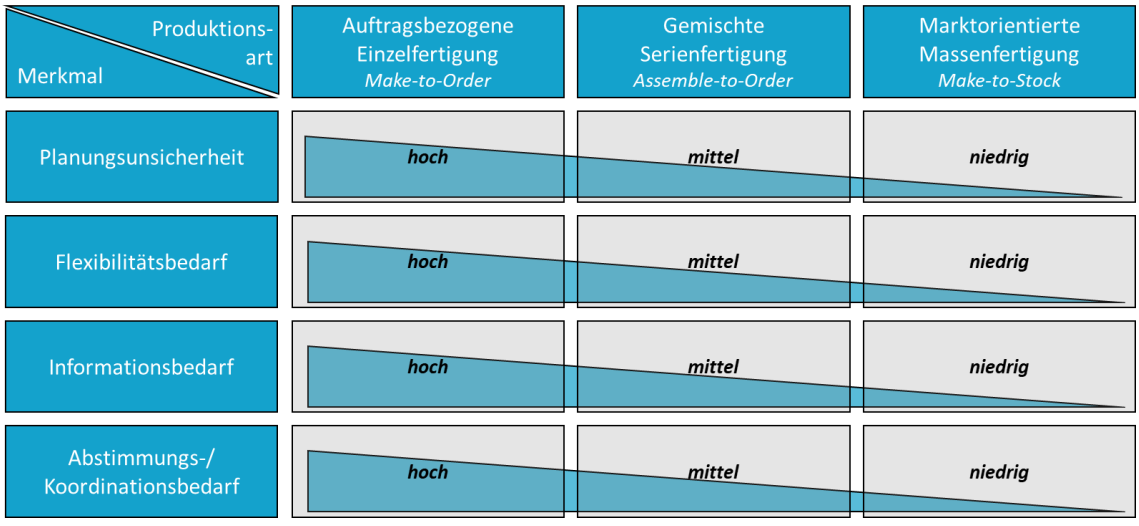

Abbildung 2-2: Charakteristische Eigenschaften ausgewählter Bevorratungsstrategien nach [PRW01, S. 571]

2.2.2 Steuerungsarchitekturen

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Steuerung der Produktionslogistik ist die Steuerungsarchitektur. Eine Steuerungsarchitektur ist eine technologieunabhängige Beschreibung einer Steuerung im Hinblick auf ihre Systemarchitektur, den Ablauf von Steuerungsentscheidungen, die Art und Anzahl der Entscheidungsträger sowie deren Beziehung untereinander zur Entscheidungsfindung [SCH13, S. 11]. Durch die Steuerungsarchitektur wird im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik festgelegt, wo welche Steuerungsentscheidungen getroffen werden und welcher Einflussbereich dabei berücksichtigt wird.

Eine Einteilung von Steuerungsarchitekturen kann grob in die beiden Architekturen hierarchisch und heterarchisch erfolgen. Hierarchische Systeme sind dadurch geprägt, dass übergeordnete Steuerungssysteme Entscheidungen, teilweise untergliedert durch mehrere Hierarchieebenen, für einen Produktionsbereich treffen. Der Begriff heterarchisch ist im deutschen Sprachgebrauch zwar wenig gebräuchlich, dafür jedoch im Englischen umso mehr, und kann als Synonym für „nicht hierarchisch“ aufgefasst werden [SCH13, S. 11]. In heterarchischen Systemen erfolgt die Entscheidungsfindung auf einer Ebene ohne übergeordnete Entscheidungsinstanz. Eng verbunden mit der Unterteilung hierarchische/heterachische Steuerungsarchitekturen ist eine Unterscheidung in die drei Arten zentrale Steuerung, dezentrale Steuerung und hybride Steuerung [MIA17, 166F.]. Diese sind in Abbildung 2-3 dargestellt. Eine Sonderform heterarchischer Steuerungsarchitekturen ist die autonome Steuerung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt wird.

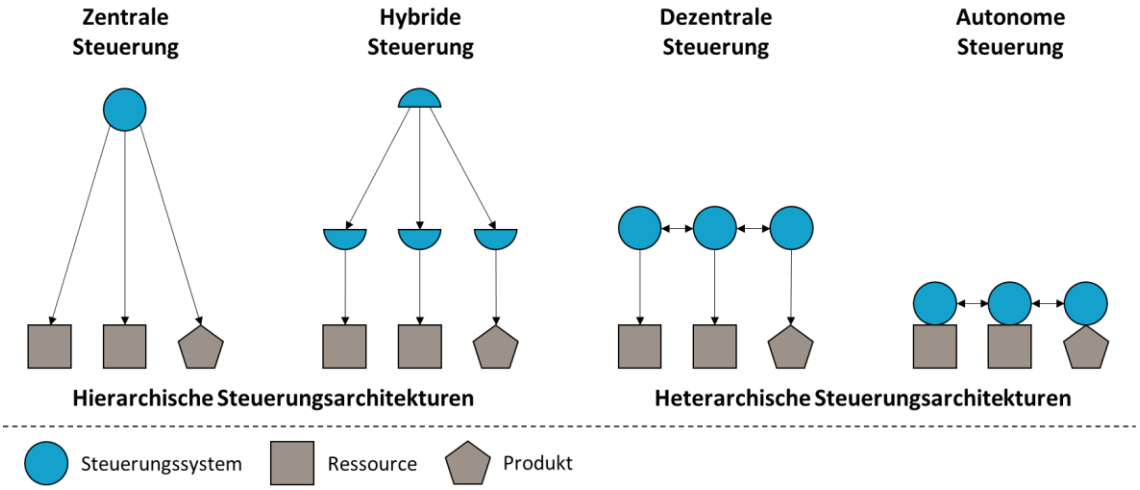

Abbildung 2-3: Steuerungsarchitekturen (in Anlehnung an [MIA17; SCFR07])

Zentralisierte Steuerungsarchitekturen sind dadurch gekennzeichnet, dass alle Entscheidungen durch ein zentrales Steuerungssystem getroffen werden. Dadurch, dass innerhalb eines Systems alle möglichen Einflüsse berücksichtigt werden, weisen die eingesetzten Verfahren oftmals eine sehr hohe Komplexität auf. Zur Beherrschung dieser Komplexität wird das sich hinter der zu treffenden Steuerungsentscheidung befindende Entscheidungsproblem in kleinere Teilprobleme unterteilt und schrittweise gelöst. Der Vorteil einer zentralisierten Steuerungsarchitektur liegt darin, dass diese durch den Zugang zu allen Informationen theoretisch in der Lage wäre, eine Steuerungsentscheidung zu treffen, die einem globalen Optimum in Bezug auf eine verfolgte Zielgröße entspricht. Diesem Vorteil stehen in der Praxis jedoch erhebliche Nachteile gegenüber, sodass beispielsweise für eine zentralisierte Steuerungsarchitektur stabile Bedingungen im Produktionssystem vorherrschen müssen, damit die generierten Steuerungsentscheidungen auch

tatsächlich umgesetzt werden können. Unter dynamischen Bedingungen, die beispielsweise durch Maschinenausfälle auftreten, kommen zentralisierte Steuerungsarchitekturen häufig an ihre Grenzen. Da nur das zentrale Steuerungssystem Entscheidungen trifft, können die Ressourcen häufig nicht unverzüglich reagieren, da sie auf eine Vorgabe in Form der Steuerungsentscheidung warten müssen. Eine Folge dessen ist, dass häufig zentral getroffene Entscheidungen im dynamischen Umfeld bereits veraltet sind, sobald sie generiert werden. Zentral gesteuerte Vorgaben sind theoretisch betrachtet zwar zweckmäßig, aufgrund des häufig erforderlichen hohen Detaillierungsgrads in vielen Fällen jedoch nicht praktikabel [HAHO10, S. 106; MEN07, S. 474; MIA17, S. 167].

Der Nachteil der langwierigen Entscheidungswege einer zentralisierten Steuerungsarchitektur kann durch dezentrale Steuerungsarchitekturen beseitigt werden. Im Rahmen einer dezentralen Steuerungsarchitektur wird die Entscheidungskompetenz in Richtung der Ressourcen verlagert [MIA17, S. 168]. Dies ermöglicht ein unmittelbares Eingreifen der Entscheidungsträger bei Abweichungen von einem vorgesehenen Plan [PAW07, 91F.]. Zudem ergibt sich aus dieser Steuerungsarchitektur der Vorteil, dass die Entscheidungsträger näher am tatsächlichen Prozess sind. Somit können sie den Prozess in einer höheren Detailliertheit betrachten, ohne dass die Steuerungsentscheidung, durch die Eingrenzung des Betrachtungsbereichs, zu komplex wird, wie es im Rahmen einer zentralen Steuerung der Fall wäre [MEN07, S. 474]. Nachteilig an dezentralen Steuerungsarchitekturen ist, dass die einzelnen Steuerungsbereiche teilweise individuelle Ziele verfolgen, deren individuelle Optimierung nicht notwendigerweise zu einem globalen Optimum des Produktionssystems führen. Damit die einzelnen Steuerungsbereiche dennoch gemeinsam an der Erreichung eines Optimums des gesamten Produktionssystems arbeiten, ist ein, im Vergleich zur zentralisierten Steuerung, erhöhter Kommunikationsaufwand erforderlich [MIA17, S. 168].

Zur Ausnutzung der Vorteile und Begrenzung der Nachteile der zentralisierten und dezentralen Steuerungsarchitektur wurden hybride Steuerungsarchitekturen entwickelt. In diesem Fall besitzt das System teilweise hierarchische Strukturen, wodurch einige Entscheidungen zentral getroffen werden, sowie dezentrale Entscheidungsträger, die in einem gewissen Rahmen eigenständig Steuerungsbefugnis besitzen [MIA17, S. 168]. Dies ermöglicht es, sowohl einheitlich übergeordnete Ziele zu verfolgen als auch gleichzeitig eine ausreichend schnelle Reaktionsfähigkeit bei Abweichungen von vorbestimmten Plänen sicherzustellen.

2.3 Ziele und Aufgaben der Steuerung der Produktionslogistik

2.3.1 Abgrenzung der Steuerung der Produktionslogistik

Die Produktionslogistik ist das zentrale Element zur Planung, Steuerung und Kontrolle der Produktionsfaktoren innerhalb eines Unternehmens sowie zur Durchführung der damit verbundenen Aufgaben, um somit einen optimalen Material- und Informationsfluss zu ermöglichen [AIK+08, S. 297]. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik liegt, sei zunächst der Begriff Steuerung von den Begriffen Planung und Kontrolle im Kontext der Produktionslogistik abzugrenzen.

Die *Planung* der Produktionslogistik bezieht sich auf zukünftige Leistungsanforderungen und umfasst die Auswahl, Gestaltung, Organisation, Dimensionierung und Optimierung der produktionslogistischen Prozesse, Netzwerke und Ressourcen mit dem Ziel, die Leistungsanforderungen zu erfüllen. Um dies zu erreichen, arbeitet die Planung in der Regel mit unscharfen Informationen, Durchschnittswerten und unsicheren Erwartungen [GUD12, S. 41]. Die Durchführung der Tätigkeiten der Planung der Produktionslogistik

erfolgt im Schichtmodell auf den Ebenen Betriebs- und Produktionsleitebene (Ebene 4 und Ebene 3 in Abbildung 2-1).

Die *Steuerung* der Produktionslogistik bezieht sich auf die Lenkung des operativen Betriebs und die Regelung der Ausführung der internen Aufträge, deren Menge, Inhalt und Termin fest durch die Planung vorgegeben sind [GUD12, S. 42]. Zur verlässlichen Durchführung dieser Aufgabe werden sichere oder relativ gesicherte Informationen benötigt, die den aktuellen Zustand des zu steuernden Bereichs abbilden. Diese Informationen erhält die Steuerung unter anderem direkt aus den zu steuernden Bereichen des Produktionssystems, wodurch sie sich stark von der Planung unterscheidet, die in der Regel ohne direktes Feedback arbeitet [WOL16, S. 60]. Die Steuerung der Produktionslogistik ist der Planung zeitlich nach- und der Kontrolle vorgelagert und stellt die Verbindung zwischen der Planung und Realisierung innerhalb der Produktion dar [HAHO10, 105FF.].

Die *Kontrolle* der Produktionslogistik hat die Aufgabe, den Grad der Zielerreichung zuvor definierter Zielgrößen zu überwachen und bei der Ableitung effektiver Handlungsempfehlungen durch geeignete Informationen zu unterstützen [HSN17, S. 238]. Somit besitzt die Kontrolle der Produktionslogistik primär eine Informations- und Koordinierungsfunktion [PFO16, S. 175]. Die Aufgaben der Steuerung und Kontrolle der Produktionslogistik finden auf der Steuerungsebene (Ebene 1, 2 in Abbildung 2-1) im zuvor aufgeführten Schichtmodell statt.

2.3.2 Ziele der Steuerung der Produktionslogistik

Die zentrale Aufgabe der Produktionslogistik ist es, die logistischen Zielsetzungen unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten und im Hinblick auf eine hohe Wirtschaftlichkeit der Produktion zu erreichen [AIK+08, S. 324]. Nach VDI 4400-2 ist die primäre Zielsetzung der Produktionslogistik und somit auch der Steuerung der Produktionslogistik das Erreichen einer hohen Logistikeffizienz, die sich durch eine hohe Logistikleistung bei geringen Logistikkosten ausdrückt [VDI 4400-2, S. 6]. Die Logistikleistung lässt sich in die externen Zielgrößen *Liefertreue* bei Auftragsfertigung beziehungsweise *Servicegrad* bei Lagerfertigung sowie *Lieferzeit* unterteilen. Die Logistikkosten setzen sich aus den *Prozess*- sowie den *Kapitalbindungskosten* zusammen. Aus den extern wahrnehmbaren Zielgrößen lassen sich die internen Zielgrößen für die Produktionslogistik ableiten. So erfordert im Bereich der Logistikleistung das Einhalten einer hohen Liefertreue beziehungsweise eines hohen Servicegrades eine hohe interne Termintreue, die Forderung nach schnellen Lieferzeiten erfordert kurze Durchlaufzeiten. In Bezug auf die Logistikkosten können die Prozesskosten durch eine hohe Auslastung der Betriebsmittel reduziert werden, da sich somit Investitions- und Betriebskosten auf eine größere Anzahl an Produkte verteilen lassen, was die Herstellungskosten eines Einzelproduktes reduziert [LÖD16, S. 40]. Die Kapitalbindungskosten hingegen können durch geringe Lager- und Fertigungsbestände erreicht werden [LÖD16, S. 36]. Das Zielsystem der Produktionslogistik ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

Abbildung 2-4: Zielsystem der Produktionslogistik in Anlehnung an [WIE10, S. 252]

Ein gleichzeitiges Optimieren der Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand ist aufgrund teilweise zueinander bestehender Zielkonflikte nicht möglich. So erfordert die Sicherung einer hohen Auslastung hohe Bestände in der Produktion, die ihrerseits wiederum eine Verlängerung der Durchlaufzeit hervorrufen, in Folge einer Ausweitung der Wartezeit vor der Bearbeitung [BAU15, S. 1457; NYWI12, S. 4]. Diese Zielkonflikte werden auch als „Dilemma der Ablaufplanung“ bezeichnet [NYWI12, S. 4]. Die Produktionslogistik muss somit eine Balance zwischen den konfliktären Zielgrößen herstellen. Besteht ein Produktionssystem aus unterschiedlichen Produktionsbereichen, so ist es in der Regel nicht sinnvoll, die Ziele für alle Produktionsbereiche universell festzulegen. Vielmehr ist es zielführend, für jeden einzelnen Bereich die relevanten Zielgrößen zu identifizieren und zu spezifizieren, da sich aus diesen Zielgrößen geeignete Verfahren der Steuerung der Produktionslogistik ableiten lassen [MUNY09, S. 1376]. Aus Kostengründen wird im Rahmen der marktorientierten Massenproduktion häufig die *Auslastung* der Ressourcen als primäre logistische Zielgröße verfolgt [MÜNY10, S. 287]. In Bereichen der auftragsbezogenen Produktion werden überwiegend die logistischen Ziele *kurze Durchlaufzeiten* und *hohe Termintreue* hoch priorisiert [MÜNY10, S. 287].

2.3.3 Aufgaben der Steuerung der Produktionslogistik

Die VDI-Richtlinie 4400-2 unterteilt die Aufgaben der Produktionslogistik in die Hauptprozesse Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sowie die Produktionsversorgung (auch als innerbetrieblicher Transport bezeichnet) [VDI 4400-2, S. 4]. Diese beiden Hauptprozesse, insbesondere deren Steuerung, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit näher betrachtet. Zuvor sei das zentrale Element *Auftrag* im Rahmen der Produktionslogistik einzuführen. Im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik bestehen diese beispielsweise in der Form von Fertigungs- und Transportaufträgen und sind von besonderer Bedeutung, da sie Inhalte über zu bearbeitende Produkte und durchzuführende Tätigkeiten beinhalten. Sie werden beispielsweise in Folge von verbindlichen Kundenzusagen und Vorgaben einer vorausgegangenen Planung erzeugt oder aus kurzfristigen Bedarfsprognosen abgeleitet [GUD12, S. 42]. Ihre Relevanz entsteht dadurch, dass sie Vorgänge und Prozesse auslösen. Damit diese Vorgänge und Prozesse fehlerfrei und fristgerecht durchgeführt werden können, enthalten die Aufträge, je nach Typ und Ausprägung, Lieferanforderungen, Operationsanweisungen und/oder Logistikanforderungen, die ihrerseits wiederum Angaben

über Produkte, Mengen, Orte (beispielsweise Betriebsmittel) und Zeitangaben beinhalten [GUD12, S. 42; LÖD19, S. 112].

Produktionsplanung und -steuerung

Die PPS als Hauptprozess der Produktionslogistik hat die Aufgabe, das laufende Produktionsprogramm in regelmäßigen Abständen nach Art und Menge für mehrere Perioden im Voraus zu planen, daraus Material- und Ressourcenbedarfe abzuleiten und diesen Plan, unter Berücksichtigung gegebener oder zu planender Kapazitäten, trotz unvermeidlicher Störungen, wie beispielsweise Personalausfall, Lieferverzögerungen oder Ausschuss, so wirtschaftlich wie möglich zu realisieren [LÖD16, S. 6; SCSC17, S. 487; WIE10, 251F.]. Dies bedeutet, dass die Produktionsplanung den Inhalt und die Einzelprozesse der Produktion gestaltet. Die Produktionssteuerung hingegen hat die Aufgabe, den Ablauf der Tätigkeiten in der Produktion im Rahmen der Auftragsabwicklung zu regeln. Somit regelt die Produktionssteuerung, unter Berücksichtigung der Vorgaben durch die Produktionsplanung und unter Berücksichtigung vorgegebener logistischer Zielgrößen, wann welche Teilprozesse in welcher Reihenfolge einen Produktionsfaktor beanspruchen [SCST12, S. 29].

Eine detaillierte Strukturierung der Aufgaben der PPS bildet das, insbesondere im deutschsprachigen Raum weit verbreitete, Aachener PPS-Modell, dargestellt in Abbildung 2-5. Dieses unterteilt die Aufgaben der PPS in überbetriebliche Netzwerkaufgaben sowie innerbetriebliche Kern- und Querschnittsaufgaben [SCST12, S. 20].

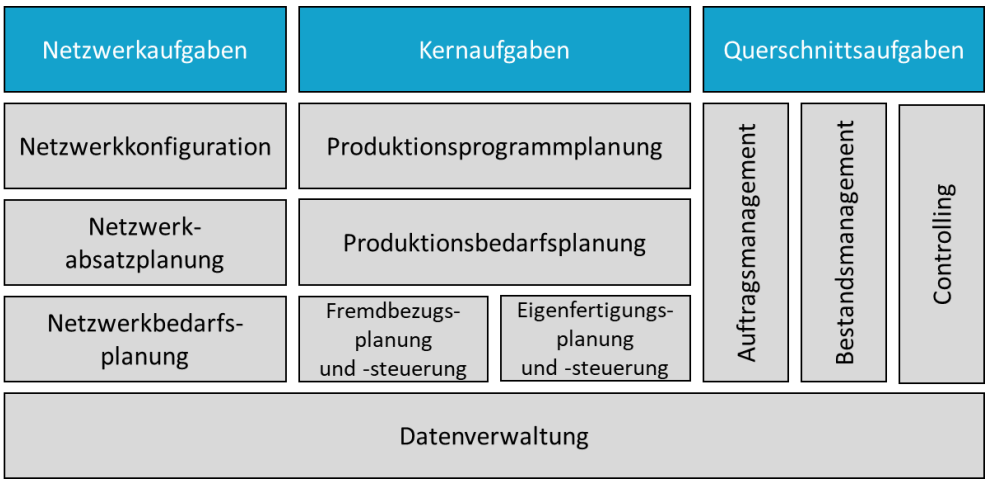

Abbildung 2-5: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modell nach [SCST12, S. 30]

Kernaufgaben der PPS umfassen die *Produktionsprogrammplanung*, die *Produktionsbedarfsplanung*, die *Planung und Steuerung des Fremdbezugs* sowie die *Eigenfertigungsplanung und -steuerung*. Im Rahmen der *Produktionsprogrammplanung* wird bestimmt, welche Erzeugnisse, in welchen Mengen innerhalb der nächsten Planungsperioden produziert werden sollen. Daraus abgeleitet werden, in der sich anschließenden *Produktionsbedarfsplanung,* die zur Umsetzung des Produktionsprogrammplans erforderlichen Material- und Ressourcenbedarfe bestimmt. Dies erfolgt, indem sogenannte Sekundärbedarfe an Komponenten und Teilen ermittelt, Fertigungsaufträge terminiert sowie die Belastung der Kapazitäten der Produktion bestimmt werden. Da nicht alle für den Produktionsprozess notwendigen Komponenten und Teile vom Unternehmen selbst hergestellt werden, wird im Aachener PPS-Modell zwischen der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* und der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* unterschieden. Aufgaben der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* sind unter anderem Aufgaben der Bildung von Bestell-Losgrößen, das

Einholen von Angeboten sowie die Auswahl von Lieferanten. Die *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* umfasst die Aufgaben Losgrößenberechnung, Feinterminierung, Ressourcenfeinplanung, Reihenfolgeplanung, Verfügbarkeitsprüfung und Auftragsfreigabe [LÖD16, 6F.; SCST12, 29FF.]. Die mit der Eigenfertigungssteuerung verbundenen Aufgaben sind im Fokus dieser Arbeit.

Die Querschnittsaufgaben der PPS dienen zur Koordination der Auftragsabwicklung über verschiedene Unternehmensbereiche hinweg (Querschnittsaufgabe: *Auftragskoordination*), sind für die Bereitstellung von Lagergütern verantwortlich (Querschnittsaufgabe: *Bestandsmanagement*) und messen die logistische Zielerreichung (Querschnittsaufgabe: *Controlling*) [LÖD16, S. 7].

Die Gruppe der Netzwerkaufgaben bildet den überbetrieblichen Aspekt der PPS auf strategischer Ebene ab. Die Netzwerkaufgaben umfassen die strategisch ausgelegte *Netzwerkkonfiguration*, die *Netzwerkabsatzplanung* und die *Netzwerkbedarfsplanung*. Die Planungselemente der Netzwerkaufgaben können auf der lokalen Planungsebene im Rahmen der Kernaufgaben entsprechende Pendants haben, sind aber in der Regel weniger detailliert [SCST12, 20F.].

Die im Aachener PPS-Modell aufgeführte *Datenverwaltung* wird allen Aufgabenbereichen zugeordnet, da alle Aufgaben bei ihrer Ausführung auf eine ausreichende, aktuelle und verlässliche Datengrundlage zurückgreifen müssen.

Steuerung der Produktion als Bestandteil der PPS

Die Steuerung der Produktion als Bestandteil der PPS stellt die Schnittstelle zwischen den planenden und den ausführenden Bereichen eines Unternehmens dar. Die wesentlichen Aufgaben der Steuerung der Produktion sowie deren Einfluss auf die zuvor beschriebenen logistischen Zielgrößen werden durch das *Modell der Fertigungssteuerung* von Lödding [LÖD12] beschrieben. Dieses *Modell der Fertigungssteuerung* ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

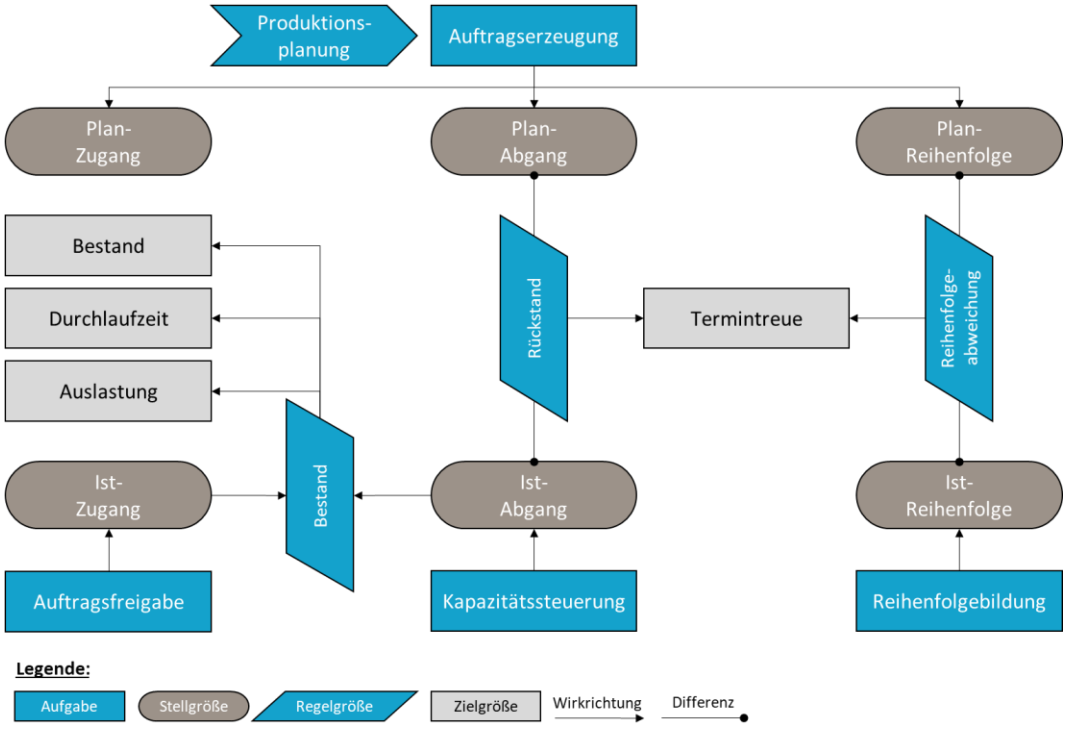

Abbildung 2-6: Modell der Fertigungssteuerung nach [LÖD19, S. 114]

Es umfasst die Aufgaben *Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe*, *Kapazitätssteuerung* und *Reihenfolgebildung* und beschreibt, wie diese über die Stellgrößen Plan-Zugang, Plan-Abgang, Plan-Reihenfolge, Ist-Zugang, Ist-Abgang und Ist-Reihenfolge die Regelgrößen *Bestand*, *Rückstand* und *Reihenfolgeabweichung* beeinflussen, welche wiederum auf die logistischen Zielgrößen einwirken [LÖD19, S. 113]. Die Aufgabe der *Auftragserzeugung* wird vielfach auch, in Abhängigkeit der Gestaltung des Produktionssystems, der Produktionsplanung zugeordnet. Innerhalb der Aufgaben der Produktionssteuerung kommen verschiedene Verfahren der Produktionssteuerung zum Einsatz, durch welche die Stellgrößen beeinflusst werden.

Über die *Auftragsfreigabe* werden die Zeitpunkte bestimmt, ab denen ein Auftrag in der Produktion bearbeitet werden darf. Sie löst in der Regel die Bereitstellung des Materials aus. Dadurch legt die Auftragsfreigabe den Ist-Zugang in den zu steuernden Produktionsbereich fest und beeinflusst somit den Bestand und über die Wechselwirkungen der Zielgrößen auch die Auslastung und die Durchlaufzeit [LÖD19, S. 115]. Eingesetzte Verfahren im Rahmen der Auftragsfreigabe sind beispielsweise die Auftragsfreigabe nach Plantermin, die Engpasssteuerung oder das Verfahren ConWIP [SWH90].

Die *Kapazitätssteuerung* bestimmt kurzfristig den tatsächlichen Einsatz und die Zuordnung von Kapazitäten. Sie ist maßgeblich von der vorhandenen Kapazitätsflexibilität abhängig, die die Fähigkeit der Produktion beschreibt, wie schnell, kostengünstig und in welchem Ausmaß sich diese verändern kann [LÖD16, S. 537]. Häufig entscheidet die Kapazitätssteuerung in diesem Rahmen über die Arbeitszeiten und darüber, welchem Arbeitssystem mehrfach qualifizierte Mitarbeitende zugeordnet werden [LÖD16, S. 531]. Verfahren der Kapazitätssteuerung sind zum Beispiel die Rückstandsregelung, die terminorientierte Kapazitätssteuerung oder die bestandsregelnde Kapazitätssteuerung [LÖD16, S. 535].

Die *Reihenfolgebildung* bestimmt die tatsächliche Ist-Reihenfolge der Auftragsbearbeitung. Dazu werden die Aufträge, die sich in einer Warteschlange zur Bearbeitung durch ein Betriebsmittel befinden, nach logistischen Zielsetzungen priorisiert. Über diese Priorisierung kann es zu einer Abweichung der Ist-Reihenfolge von der ursprünglichen Plan-Reihenfolge kommen. Dies führt zu einer Reihenfolgeabweichung und beeinflusst somit gegebenenfalls die Termintreue. Typische Verfahren der Reihenfolgebildung sind die Reihenfolgebildung nach Termin, Extended Work in Next Queue (XWINQ) und geringster Restschlupf.

Steuerung der Produktionsversorgung

An die PPS schließt sich mit der Produktionsversorgung die Steuerung, Durchführung und Kontrolle der innerbetrieblichen Materialflüsse an, durch die „fließende“ Produktionsabläufe und somit ein leistungsfähiges Produktionssystem ermöglicht werden sollen [BLO14, S. 222]. Das Hauptziel der Produktionsversorgung und somit auch ein Teilziel der Produktionslogistik ist ein reibungsloser Materialfluss, wie er durch die PPS vorgesehen ist [BLO14, S. 222; LÖD19, S. 108]. Zur Koordination der Transporte und Materialflüsse werden Informationsflüsse benötigt, insbesondere Transportaufträge [LÖD19, S. 108]. Durch einen, nicht immer explizit formulierten, Transportauftrag wird ein Materialfluss veranlasst, wozu ein Transportauftrag mindestens den Start- und Zielort des durchzuführenden Transports sowie Angaben über das Transportgut beinhalten muss [LÖD19, S. 113]. Transportaufträge werden auf unterschiedliche Weisen erzeugt wie beispielsweise:

- mit der *Auftragsfreigabe*: In der Auftragsfertigung werden oftmals mit der Freigabe von Fertigungsaufträgen Transportaufträge erzeugt. Dazu werden aus Stücklisten die benötigten Materialien und erforderlichen Mengen abgeleitet, die es von einer Quelle zur vorgesehenen Senke zu transportieren gilt.
- mit *Fertigstellung von Arbeitsvorgängen/Fertigungsaufträgen*: Wird ein Arbeitsvorgang beziehungsweise ein Fertigungsauftrag als beendet rückgemeldet, kann diese Information genutzt

werden, um automatisch einen Transportauftrag zum nächsten Arbeitsvorgang beziehungsweise zum Versand oder Transport in ein Lager zu erzeugen. Voraussetzung dafür ist, dass die zu durchlaufenden Arbeitsvorgänge in Form eines Auftragsdurchlaufs zur Verfügung stehen, um daraus den Zielort des Transports ableiten zu können [LÖD19, S. 113].

- mit *Transportkanbans*: Die Erzeugung von Transportaufträgen zu Materialien, die einen festen Bereitstellungsplatz in der Produktion haben, kann durch sogenannte Transportkanbans erfolgen. Durch Entnahme von Materialien von einem Bereitstellungsplatz in Verbindung mit einem Einwurf von Kanban-Karten in einen Kanban-Briefkasten werden neue Transportaufträge autorisiert. Der Kanban-Briefkasten wird dabei regelmäßig entleert, sodass in Abhängigkeit der Frequenz der Materialentnahme sowie der Frequenz der Entnahme der Kanban-Karten aus dem Kanban-Briefkasten eine regelmäßige Erzeugung von Transportaufträgen erfolgt [LÖD19, 112F].

Auch die Produktionsversorgung bedarf einer Steuerung, die an den tatsächlichen Produktionsabläufen ausgerichtet ist. Durch Abweichungen innerhalb der Produktionsprozesse, wie zum Beispiel durch einen aufgetretenen Rückstand oder geänderte Bearbeitungsreihenfolgen, kommt es häufig zu einer Abweichung des tatsächlichen Produktionszeitpunkts vom geplanten Produktionszeitpunkt, wodurch sich auch der Materialbedarfszeitpunkt ändert [LÖD19, S. 109]. Nach Erzeugung der Transportaufträge können diese ähnlich wie Fertigungsaufträge im Rahmen der Steuerung der Produktion behandelt werden. So ist beispielsweise zu entscheiden, wann welcher Transportauftrag freigegeben werden sollte (*Auftragsfreigabe*), wie viel Material wohin zu transportieren ist, in welcher Reihenfolge die Abarbeitung der Transportaufträge durchzuführen ist (*Reihenfolgebildung*) und ob gegebenenfalls die verfügbaren Kapazitäten im Rahmen einer Steuerung der Produktionsversorgung anzupassen sind (*Kapazitätssteuerung*).

Eine weitere Möglichkeit zur Produktionsversorgung mit wenigen Steuerungseingriffen sind Milk-Run-Verkehre [BLO14, S. 224]. Im Rahmen von Milk-Run-Verkehren werden standardisiert zyklisch Materialtransporte in einheitlichen, häufig kleineren Mengen aus einem zentralen Lager an Verbraucherstellen geliefert und von Erzeugerstellen an einen definierten Ort abtransportiert [ARN14, S. 85]. Um mit dieser Art der Produktionsversorgung einen störungsfreien Nachschub zu gewährleisten, sind stabile Produktionsprozesse und eine Frequenz der Milk-Run-Verkehre, die auf die Ver- und Entsorgung der Materialien abgestimmt ist, erforderlich.

2.3.4 Steuerungsstrategien

Zur Steuerung eines Produktionssystems werden in der Literatur die beiden unterschiedlichen Steuerungsstrategien der *Push*- und *Pull*-Steuerung unterschieden. Im Rahmen einer *Push*-Steuerung wird im Wesentlichen von einer zentralen Instanz aus gesteuert, also durch eine hierarchische Steuerungsarchitektur. Materialien werden dabei häufig auf Basis von Fertigungsaufträgen von einem vorgelagerten Prozessschritt nach dessen Bearbeitung erhalten und zu einem nachgelagerten Prozessschritt weitertransportiert, unabhängig davon, ob dieser Folgeprozess das Material unmittelbar benötigt oder nicht [BER18, S. 60]. Material wird somit also durch den Produktionsprozess „geschoben“. Bei dieser Art der Steuerung kommt es zu einer Entkopplung der Prozesse mit der Folge, dass unter anderem hohe Bestände und damit einhergehende lange Durchlaufzeiten entstehen können [ARFU19, S. 280].

Das wesentliche Merkmal einer *Pull*-Steuerung ist die Begrenzung der Bestände in der Produktion auf ein bestimmtes Maß [HOSP04, S. 147]. Dies drückt sich dadurch aus, dass Produktionsaufträge nur dann generiert werden, wenn ein Produktionsbereich einen konkreten Bedarf (zum Beispiel ausgelöst durch einen Kundenauftrag oder eine Bestandsunterschreitung) angibt [KLE06, S. 14]. Die Auftragsgenerierung für

einen bestimmten Produktionsbereich wird somit in den nachgeordneten Bereich verlagert. Durch diese Art der Generierung von Aufträgen entsteht ein „Nachfragesog“, der sich kaskadenförmig im Produktionssystem über die jeweils vorgelagerten Produktionsstufen fortsetzt, wodurch die Materialien durch den Produktionsprozess „gezogen“ werden [DoMi15, 110F.]. Durch die Abstimmung der einzelnen Produktionsbereiche beziehungsweise Prozesse untereinander entsteht durch den Einsatz dieser Art der Steuerungsstrategie eine dezentrale Steuerungsarchitektur.

2.4 Einfluss heutiger Produktionssysteme auf die Steuerung der Produktionslogistik

2.4.1 Komplexitätszunahme der Steuerung der Produktionslogistik

Durch den externen Einfluss eines Käufermarktes, dem sich viele produzierende Unternehmen heute konfrontiert sehen, steigt der Druck auf eine Steigerung der Effektivität und Effizienz des Produktionssystems immer weiter. Die Kunden fordern kleinere Losgrößen aus größer werdenden Produktvarianten in immer kürzeren Lieferzeiten [KlSc14, S. 2]. Eine Folge dessen ist, dass die Bevorratungsstrategie der marktorientierten Massenfertigung nur noch bei wenigen Unternehmen anwendbar ist. Die Zunahme der Produktvarianten bei abnehmender Losgröße je Produktvariante hat zur Folge, dass sich bei vielen produzierenden Unternehmen der (Kunden-)Auftragseindringungspunkt im Produktionsprozess immer weiter nach vorne, entgegengesetzt des Materialflusses, verlagert. Dies geschieht teilweise bis hin zur auftragsbezogenen Einzelfertigung, was mit einer Zunahme der Komplexität innerhalb des Produktionssystems einhergeht [Nyh18, 6F.; YSL18, S. 854]. Die Zunahme der Komplexität ist maßgeblich durch externe Kundenanforderungen getrieben und somit häufig nicht direkt durch das Unternehmen selbst beeinflussbar. Dies stellt hohe Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik, um diese Komplexitätszunahme zu beherrschen.

Unter dem Begriff Komplexität werden in der Literatur unterschiedliche Einflussfaktoren auf das Produktionssystem zusammengefasst [SJF11, S. 28]. Westphal [Wes01] fokussiert in diesem Zusammenhang die Produktionslogistik und fasst unter dem Begriff Komplexität für die Produktionslogistik die Einflussfaktoren *Kompliziertheit*, *Dynamik* und *Unsicherheit* zusammen.

Komplexitätsfaktor: Kompliziertheit
Die *Kompliziertheit* als Einflussfaktor ist definiert als die Vielzahl und Vielfalt von Produktionsfaktoren, die innerhalb des Produktionssystems miteinander verbunden sind. Die Vielzahl bringt dabei die Anzahl an Produktionsfaktoren und deren Relationen zum Ausdruck, die Vielfalt hingegen deren Heterogenität [Wes01, 77F.]. Sie wird unter anderem beeinflusst durch die zu produzierenden Produkte, die Anzahl der Fertigungsstufen, den damit verbundenen Abläufen sowie den dazu notwendigen Ressourcen. Die *Kompliziertheit* wird teilweise in der Literatur auch als strukturelle Komplexität bezeichnet [DMO+16, S. 479; SJF11, S. 28].

Komplexitätsfaktor: Dynamik
Die *Dynamik* (auch als dynamische Komplexität bezeichnet [DMO+16, S. 479]) als Einflussfaktor auf die Komplexität beschreibt die Veränderlichkeit des Produktionssystems sowie die Geschwindigkeit, mit der sich diese Veränderungen vollziehen [Wes01, S. 78]. Im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik drückt sich die *Dynamik* unter anderem durch eine kontinuierliche Veränderung der entscheidungsrelevanten Steuerungsgrößen aus. Diese verändern sich beispielsweise laufend durch die externen Anforderungen der Kunden, deren individuell zu erfüllenden Bedarfe zu einer Vielzahl unterschiedlicher Produktvarianten führen, die sich gleichzeitig im Produktionssystem befinden und deren Zusammensetzung sich

im Rahmen von Nachfrageschwankungen kontinuierlich ändert [SPR+17, S. 78]. Zudem nimmt die *Dynamik* bei vielen produzierenden Unternehmen auch durch interne Entscheidungen zu, die unter anderem auch durch die Steuerung der Produktionslogistik selbst verursacht werden. Häufig beobachtete Einflussfaktoren, die die *Dynamik* innerhalb eines Produktionssystems erhöhen, sind eine Unterbrechung von Produktionsabläufen durch Eilaufträge, die Umsteuerungen zur Folge haben, sowie eine verfrühte Freigabe von Produktionsaufträgen, die zu einer Überlastung der Kapazitäten führen können. Folgen davon sind beispielsweise, dass Bestände im Produktionsprozess stark ansteigen, wodurch wiederum die Durchlaufzeiten ansteigen und die Reihenfolgen der Fertigungsaufträge an den einzelnen Produktionsschritten neu geplant werden müssen. Dieser Umstand kann wiederum zur Folge haben, dass die Durchlaufzeiten anfangen stark zu streuen [SPT+12, S. 3]. Dies erschwert es, die tatsächlichen zeitlichen Abläufe von Fertigungsaufträgen zu prognostizieren und somit den tatsächlichen Output innerhalb einer bestimmten Zeitspanne zu bestimmen [SPT+12, S. 3; SPR+17, S. 78]. Durch die *Dynamik* ändert sich zudem auch die Intensität der Materialflussbeziehungen zwischen einzelnen Produktionsbereichen [WES01, S. 78]. Die angemessene Berücksichtigung dessen stellt hohe Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik, um darauf aufbauend die richtigen Steuerungsentscheidungen rechtzeitig generieren zu können.

Komplexitätsfaktor: Unsicherheit

Die *Unsicherheit* als weiterer Einflussfaktor auf die Komplexität eines Produktionssystems wird von Westphal definiert als die Differenz der für die produktionslogistischen Steuerungsaufgaben notwendigen und der tatsächlich verfügbaren Informationen [WES01, S. 79]. Dabei kann eine weitere Unterteilung der *Unsicherheit* in Bezug auf Unsicherheiten über den gegenwärtigen Zustand des Produktionssystems sowie in Bezug auf Unsicherheiten über die Entwicklung des Systemzustands vorgenommen werden [SJF11, S. 28]. Die gegenwartsbezogene Unsicherheit kann zu großen Teilen auf einen Mangel an Transparenz zurückgeführt werden [KLSC14, 3F.]. Dies führt zur sogenannten epistemischen Unsicherheit. Unter epistemischer Unsicherheit wird diejenige Art an *Unsicherheit* bezeichnet, die durch einen Mangel an Wissen und/oder Informationen ausgelöst wird [KIDI09, S. 106]. Diese Art der *Unsicherheit* kann durch das Heranziehen zusätzlicher Informationen reduziert werden [HBP+19, S. 178]. Die unter vollständig verfügbaren Informationen verbleibende *Unsicherheit* wird als aleatorische Unsicherheit bezeichnet. Diese bezieht sich auf die *Unsicherheit* durch die inhärente Stochastik, wie sie unter anderem in natürlichen, physikalischen Prozessen und Systemen vorkommt [HBP+19, S. 178]. Aleatorische Unsicherheit ist größtenteils für die *Unsicherheit* bezüglich des zukünftigen Zustandes des Produktionssystems verantwortlich, da beispielsweise stochastisch auftretende Fehlfunktionen von Betriebsmitteln, wie Maschinenausfälle, trotz einer ausreichenden Informationsgrundlage nicht mit vollkommener Sicherheit vorhergesagt werden können. Diese Art der *Unsicherheit* lässt sich nur bis zu einem bestimmten Grad durch eine Erhöhung der Informationsgrundlage reduzieren, jedoch nicht vollständig beseitigen.

2.4.2 Gestaltung der Steuerung der Produktionslogistik zur Komplexitätsreduktion

Aus der Zunahme der Komplexität lassen sich Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik ableiten, die diese zur Zielerreichung erfüllen muss.

Die zunehmende *Kompliziertheit* des zu steuernden Produktionssystems ist vielfach kaum im vollen Umfang durch zentrale Steuerungssysteme zu beherrschen. So ist die Abbildung der Kompliziertheit innerhalb eines zentralen Steuerungssystems aufgrund des rasch anwachsenden Problemraums vielfach mit einer Abstraktion verbunden, wodurch die Struktur und Verhaltenstreue des zu steuernden Produktionssystems deutlich reduziert wird [LIGR09, S. 49]. Zur Beherrschung der Kompliziertheit mit einer ausreichend

genauen Struktur und Verhaltenstreue des zu steuernden Produktionssystems kann eine Segmentierung des Produktionssystems in einzelne Steuerungsbereiche erfolgen [OST12, S. 43].

Zur Beherrschung der *Dynamik* muss die Steuerung der Produktionslogistik in der Lage sein, sich ausreichend schnell auf die sich ändernden Anforderungen einzustellen, damit sich verändernde Gegebenheiten innerhalb des zu steuernden Bereiches rechtzeitig berücksichtigt werden. Somit resultiert aus der *Dynamik* auch die Anforderung an eine hohe Flexibilität der Steuerung der Produktionslogistik [KLSC14, S. 6; OST12, S. 45; SJF11, S. 28]). Flexibilität kann als die Reaktionsfähigkeit und -geschwindigkeit eines Systems definiert werden, um sich auf veränderte Rahmenbedingungen einzustellen, ohne dass dafür eine verbindlich messbare Größe angegeben werden kann [HOHE11, 100F.]. Während der Reaktion auf die sich geänderten Rahmenbedingungen wird im Rahmen der Flexibilitätsbetrachtung eines Systems dessen Struktur als konstant angesehen [VDI 5201-1, 5F.]. Die Flexibilität eines Produktionssystems kann in verschiedene Teil-Flexibilitäten unterteilt werden, die jeweils die Flexibilität eines spezifischen Aspekts des Produktionssystems beschreiben (siehe dazu unter anderem [SESE90; WWB+14]). Im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik resultieren sich ändernde Rahmenbedingungen unter anderem aus Störungen im Betriebsablauf, die beispielsweise eine Umsteuerung der eingeteilten Kapazitäten zur Folge haben könnten oder eine Änderung der Ressourcenbelegung, um den Ausfall einer Maschine zu kompensieren, mit einhergehenden Anpassungen von Materialtransporten.

Für eine Reduktion der *Unsicherheit* als Einflussgröße auf die Zunahme der Komplexität der Steuerung der Produktionslogistik ist die Differenz der für eine Steuerungsentscheidung benötigten Informationen und der verfügbaren Informationen zu minimieren. Dies erfolgt über eine Steigerung der Transparenz der die Steuerungsentscheidung beeinflussenden Faktoren. Um eine ausreichende Transparenz zu erhalten, ist es erforderlich, dass die relevanten Faktoren systematisch in der erforderlichen Auflösung und mit ausreichender Verlässlichkeit rechtzeitig erfasst und bereitgestellt werden, sodass diese im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt werden können. Wird diese Anforderung an eine ausreichende Transparenz nicht erfüllt, so mangelt es auch an der Möglichkeit, die *Dynamik* innerhalb des Produktionssystems zu beherrschen. Eine ausreichende Transparenz ist somit Voraussetzung zur Beherrschung der *Dynamik.* Daraus ergibt sich, dass die durch die Produktionslogistik zu steuernden Abläufe so transparent sein müssen, dass Abweichungen von geplanten Verläufen rechtzeitig erkannt werden, damit auf diese Ereignisse in ausreichender Geschwindigkeit reagiert werden kann [KLSC14, S. 5].

Um die aus dem Anstieg der Komplexität entstandenen Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik zu erfüllen, erfolgt zunehmend eine Dezentralisierung der Steuerungsarchitektur, bestehend aus Regelkreisen, die für einen bestimmten Bereich des Produktionssystems verantwortlich sind und sich untereinander koordinieren [KLSC14, S. 9; LIGR09, S. 49; PAW07, S. 90]. Die Dezentralisierung ermöglicht in Bezug auf die *Kompliziertheit* eine deutliche Verkleinerung des Betrachtungsrahmens, mit einer Verlagerung der Steuerungsaufgabe deutlich näher an den Ort, der durch diese beeinflusst wird [LIGR09, S. 49]. Mit dieser Begrenzung des Betrachtungsrahmens ergeben sich weitere Möglichkeiten, die Komplexitätszunahme im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik zu beherrschen:

- Durch die Verlagerung der Steuerungsaufgabe in Richtung der zu steuernden Prozesse wird oftmals die Qualität und Aktualität der zu erfassenden Zustände des Produktionssystems verbessert. Aktuelle Zustände werden dadurch häufig detaillierter betrachtet und Kommunikationswege deutlich verkürzt [LIGR09, S. 49].

- Die kleineren Regelkreise in Verbindung mit aktuelleren Zustandsabbildungen des betrachteten Ausschnitts des Produktionssystems ermöglichen eine Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf sich ändernde Gegebenheiten [KLSC14, S. 9].
- Auf Basis einer erhöhten Transparenz ist es möglich, anspruchsvollere Steuerungsverfahren einzusetzen, die aufgrund von Informationsmangel zuvor häufig nicht eingesetzt werden konnten [LIGR09, S. 49].
- Durch die Reduzierung des Betrachtungsrahmens auf einen Ausschnitt des Produktionssystems reduziert sich auch die Anzahl an Störungen und Turbulenzen, die laufend berücksichtigt werden müssen. Dies ermöglicht eine differenziertere und flexiblere Behandlung dieser Störungen und Turbulenzen [LIGR09, S. 49].

Der Ansatz der Dezentralisierung von Steuerungsentscheidungen mit kleineren Regelkreisen ist kein neuer Ansatz, sondern wird bereits seit den 1950er Jahren durch den Ansatz der sogenannten *Lean Production* („Schlanke Produktion“) verfolgt. Unter *Lean Production* werden eine Fülle an Methoden und häufig technologieunabhängigen Maßnahmen zusammengefasst, die es ermöglichen sollen, die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen zu steigern, indem ein Unternehmen konsequent auf die Bedürfnisse seiner Kunden ausgerichtet wird und nicht wertschöpfende Tätigkeiten, die als Verschwendungen bezeichnet werden, eliminiert werden [KOZÜ15, S. 1870; WAHÜ95, S. 38]. *Lean Production* verfolgt dabei einen ganzheitlichen Ansatz, in dem die Steuerung der Produktionslogistik nur einen Teilbereich abbildet. Basis einer schlanken Produktion sind organisatorisch und technologisch stabile Prozesse. Dies macht die Prozesse beherrschbar und ermöglicht eine Standardisierung. Die Standardisierung erleichtert wiederum das sichere Zusammenwirken von Prozessen, die sich gegebenenfalls durch einen fest definierten Takt aufeinander abstimmen lassen. Dies hingegen schafft die Möglichkeit, dass der Produktionsprozess nivelliert und geglättet werden kann [VDM18, 7F.]. Aufbauend auf diesen Grundlagen kann im Rahmen der *Lean Production* die Steuerung der Produktionslogistik möglichst einfach und standardisiert gestaltet werden [ERL10, S. 176]. Durch die Zusammenführung von Produktionsprozessen und Gestaltung einer kontinuierlichen Fließfertigung, deren Kapazität einheitlich nach dem Kundenbedarf dimensioniert ist, kann die Steuerung der Produktionslogistik überwiegend mittels Kanban-Regelungen nach dem Pull-Prinzip erfolgen, wobei strikt das FIFO-Prinzip (First-In-First-Out-Prinzip) zur Reihenfolgebildung eingehalten wird [ERL10, 143F.; SEW16, S. 814]. Eine dabei angestrebte Austaktung des Produktionsprozesses ermöglicht, dass nicht mehr jeder einzelne Produktionsschritt angesteuert werden muss, sondern dies durch einen fest definierten Prozessschritt, dem Schrittmacher-Prozess, erfolgt [ERL10, S. 222]. Die Initiierung von Materialbedarfen erfolgt überwiegend dezentral, indem ein Prozessschritt durch die Kanban-Steuerung von seinem Nachfolger ein Kanban-Signal erhält, durch das wiederum ein Produktionsbedarf ausgelöst wird [SEW16, S. 814]. Zur Steuerung der Produktionslogistik mittels Kanban enthalten die Kanban-Signale, meistens in Form von Karten, Informationen über die zu produzierende Menge, Teilenummer und Lagerort [DOMI15, S. 114]. Die Parameter, beispielsweise wann ein Materialbedarf ausgelöst und wie viel produziert werden soll, werden dabei auf Basis des Kundentaktes berechnet.

Die Anwendung der Prinzipien der *Lean Production* in Bezug auf die Steuerung der Produktionslogistik stoßen bei den heutigen Anforderungen an die Produktionslogistik jedoch an ihre Grenzen [HBR19, S. 199; KOZÜ15, S. 1870; MMM+17, S. 347; SKR+17, S. 342]. Ein Grund dafür ist unter anderem die Zunahme der Produkte unterschiedlicher Varianten, die sich gleichzeitig im Produktionsprozess befinden. Durch diese unterschiedlichen Produkte und Varianten ist eine enge Verkettung von standardisierten Produktionsprozessen durch ihre heterogenen Produktionsanforderungen kaum noch möglich [HBR19, S. 199]. Auch das klassische Nivellieren und Glätten der Produktion lässt sich kaum noch realisieren. Dies liegt vor allem an

den stark unterschiedlichen Eigenschaften der Produkte, die durch ihre differenzierten Arbeitsinhalte schwankende Belastungsanforderungen an die einzelnen Produktionsprozesse mitbringen [VDM18, 15F.].

Die Effizienz der Steuerung der Produktionslogistik hängt neben der Eignung des angewendeten Steuerungsverfahrens von einer adäquaten Dimensionierung der Parameter und deren Pflegezustand ab [DIC15, S. 197]. Die häufige Änderungsnotwendigkeit der Parameter durch sich ändernde Gegebenheiten in den Produktionsprozessen führt beispielsweise im Rahmen der klassischen Kanban-Steuerung zu aufwendigen Anpassungen, die nicht schnell genug an die Gegebenheiten angepasst werden können [KOZÜ15, S. 1871]. Dieser Umstand ist dadurch gegeben, dass die Prinzipien der *Lean Production* überwiegend auf analoger Basis entwickelt und implementiert und im Laufe der Zeit nicht an die sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst wurden, wie es nötig wäre, um stets nahezu ideale Steuerungsentscheidungen zu generieren [HBR19, S. 199]. Eine ausreichende Reaktivität der Steuerung der Produktionslogistik durch eine Anpassung der Parameter ist somit in vielen Fällen nicht gegeben.

Eine Steigerung der Transparenz in Verbindung mit einer situationsspezifischen rechtzeitigen Informationsbereitstellung kann dabei unterstützen, die Flexibilität und Reaktionsfähigkeit der Steuerungsverfahren zu erhöhen [MMM+17, S. 347].

2.5 Relevanz von Informationen und Informationsqualität zur Steuerung der Produktionslogistik

2.5.1 Informationen als Grundlage der Steuerung der Produktionslogistik

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgeführt, ist die Transparenz eine entscheidende Einflussmöglichkeit, um die Komplexitätsanforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik heutiger Produktionssysteme zu beherrschen. Transparenz beruht dabei auf Informationen, die aus den Produktions- und Logistikprozessen aufgenommen werden und Auskunft darüber geben, wie der aktuelle Zustand der Ressourcen, Produktionsaufträge und Transportaufträge ist. Informationen sind somit die notwendige Grundlage zur Steuerung der Produktionslogistik. Auf dieser Basis wird schließlich bei aufgetretenen Abweichungen von Planvorgaben ein Eingreifen ermöglicht. Informationen liefern dadurch einen essenziellen Beitrag für die Funktionen der dispositiven Produktionsfaktoren, die für die Planung, Steuerung und Überwachung von Produktionsabläufen verantwortlich sind [OST12, S. 41].

Informationen basieren auf Daten, wobei Daten syntaktische Einheiten sind, bestehend aus einem Zeichenvorrat ohne Bedeutung [AANY95, S. 197]. Durch eine Interpretation der Daten werden diese zu Informationen. Interpretation bedeutet in diesem Zusammenhang, dass den Daten mittels Semantik eine Bedeutung gegeben wird [AANY95, S. 197; MLM16, S. 756]. Setzt man Informationen in einen Kontext, wird aus diesen Informationen schließlich Wissen abgeleitet. Aus diesem Wissen wiederum werden schließlich Entscheidungen abgeleitet. Der Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen wird in Abbildung 2-7 dargestellt.

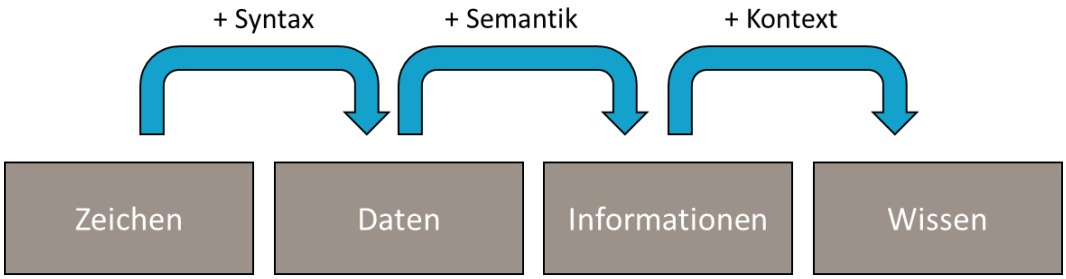

Abbildung 2-7: Zusammenhang zwischen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen

Die in der Steuerung der Produktionslogistik eingesetzten Informationen lassen sich in Stammdaten, Bewegungsdaten und Rückmeldedaten unterscheiden [SCH07, 73F.; SCFU15, S. 68]. Stammdaten beinhalten diejenigen Informationen, die in der Regel einmalig angelegt und über einen längeren Zeitraum benötigt werden. Sie weisen meist eine geringe Änderungshäufigkeit auf [LOO99, S. 228]. Stammdaten lassen sich beispielsweise durch die unterschiedlichen Klassen *Materialstammdaten*, *Ressourcenstammdaten*, *Stücklisten*, *Arbeitspläne* sowie *Kunden- und Lieferantenstammdaten* unterscheiden [SCH07, 72]. Innerhalb der Stammdaten werden Informationen über die Art und Weise beschrieben, wie Produkte hergestellt werden und von welchen Lieferanten diese bezogen beziehungsweise an welchen Kunden diese zu welchen Konditionen verkauft werden. Zudem werden durch Stammdaten die Charakteristika und Eigenschaften der Produkte beschrieben (oftmals als Potenzialfaktoren bezeichnet) sowie die Zugehörigkeit von Ressourcen, die zu deren Produktion erforderlich sind, festgelegt.

Im Gegensatz zu Stammdaten weisen Bewegungsdaten eine begrenzte Lebensdauer auf, deren Lebenszyklus sich häufig durch vorgegebene Statuszustände beschreiben lässt. Sie haben einen konkreten Zeitbezug, der für die Bedeutung und Interpretation der Information essenziell ist [LOO99, S. 228]. Die Änderungshäufigkeit von Bewegungsdaten ist im Vergleich zu Stammdaten dynamisch und sie werden nur zeitlich begrenzt benötigt. Bewegungsdaten lassen sich in die drei Klassen *Auftragsbezogene Daten/Produktionsdaten*, *Maschinenbezogene Daten/Betriebsdaten* und *Materialbezogene Daten/Bestandsdaten* unterteilen, die jeweils einen anderen Aspekt der zu erfassenden Informationen während des Auftragsdurchlaufs beschreiben. *Auftragsbezogene Daten* werden genutzt, um den Auftragsabwicklungsprozess zu koordinieren. *Maschinenbezogenen Daten* sind zeitliche, mengenmäßige, kapazitäts- und auftragsbezogene Ist-Werte, die innerhalb des Produktionsprozesses auftreten und mittels einer Betriebsdatenerfassung (BDE) an die Steuerung der Produktionslogistik zurückgemeldet werden [SCH07, S. 78]. *Materialbezogene Daten* unterstützen bei der Bestandsführung der Materialien. Die unterschiedlichen Bewegungsdaten beziehen sich oftmals auf Stammdaten. So werden zum Beispiel zur Erfüllung eines Produktionsauftrags Informationen aus den Materialstammdaten benötigt. Die unterschiedlichen Klassen der Bewegungsdaten und zugehörige Beispiele sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

Tabelle 2-1: Beispiel für Bewegungsdaten nach [HAHO10, S. 109; KIST01, S. 260; SCH07, S. 77]

	Auftragsbezogene Daten/ Produktionsauftragsdaten	**Maschinenbezogene Daten/ Betriebsdaten**	**Materialbezogene Daten/ Bestandsdaten**
Beispiele	▪ Zeiten ▪ Mengen ▪ Gewichte ▪ Produktqualitäten ▪ Arbeitsleistungen ▪ Zustände	▪ Laufzeiten ▪ Unterbrechungszeiten ▪ Produzierte Stückzahlen ▪ Zustände ▪ Verbrauchsdaten	▪ Zugänge von Materialien ▪ Abgänge von Materialien

Während Stammdaten und Bewegungsdaten sich prinzipiell ändern können, sind Rückmeldedaten in der Regel punktuell einmalig erfasste Informationen, die nach ihrer Erfassung nicht mehr geändert werden [SCFU15, S. 68]. Rückmeldedaten sind beispielsweise Zeitstempel, die einem Auftrag oder einer Ressource zugeordnet und zur Aktualisierung von Bewegungsdaten sowie zur Generierung von Steuerungsentscheidungen eingesetzt werden [REBR16, S. 51].

Zur Steuerung der Produktionslogistik sind insbesondere Bewegungsdaten und Rückmeldedaten von hoher Relevanz, da durch sie der aktuelle Zustand des Produktionssystems widergespiegelt wird. Der schnelle und sichere Fluss dieser Informationen bildet dabei eine Voraussetzung für eine reibungslose und im Idealfall optimale Steuerung der Produktionslogistik. Durch diese Relevanz haben Informationen und die damit verbundenen Informationsflüsse den Stellenwert eines Produktionsfaktors erlangt [JÜBE98, S. 11]. Zur zielgerichteten Steuerung der Produktionslogistik ist es jedoch nicht notwendig, so viele Informationen wie möglich zu sammeln. Vielmehr ist es erforderlich, die *richtigen* Informationen zu erfassen, um auf dieser Basis effiziente und effektive Steuerungsentscheidungen abzuleiten, auf deren Grundlage das Erreichen der logistischen Zielgrößen möglich ist [SMN19B, S. 225].

Die unzureichende Qualität der Informationen und der Informationsflüsse, insbesondere durch fehlende, fehlerhafte und/oder verzögerte Betriebsdaten, stellt heute einen wesentlichen Grund für das Nichterreichen von logistischen Zielgrößen dar [DSD+20, S. 9; OST12, S. 42].

2.5.2 Informationsqualität als Schlüsselfaktor zur effektiven und effizienten Steuerung der Produktionslogistik

Die Qualität von Informationen hat eine hohe Bedeutung für produzierende Unternehmen, ist aber häufig ein wenig beachtetes Thema. Schätzungen zufolge entstehen Unternehmen Kosten durch eine schlechte Informationsqualität in Größenordnungen von bis zu 20 % ihres jährlichen Umsatzes (verursacht durch alle Unternehmensbereiche und nicht nur durch die Produktionslogistik). Dieser hohe Wert ergibt sich vor allem durch Fehlerkosten, die als Opportunitätskosten für einen nicht realisierten Wertbeitrag interpretiert werden können, sowie durch Kosten, die durch eine Prüfung der Informationen und Fehlerverhütungskosten entstehen [AHL19, S. 302]. Opportunitätskosten im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik sind beispielsweise Effizienzverluste durch nicht-optimale Bearbeitungsreihenfolgen. Durch diese Reduktion der Effizienz erhöhen sich die Produktionskosten der Produkte, die einen Teil des Unternehmensgewinns schmälern [EPHE04, S. 313; HZV11, S. 177; MYR17, S. 240].

Zur Vermeidung von realen Kosten und/oder Opportunitätskosten durch eine unzureichende Informationsqualität müssen die Informationen einem Niveau entsprechen, durch das das Auftreten dieser Kosten verhindert wird. Dazu ist es zunächst notwendig, den Begriff Informationsqualität zu definieren. Die Information, die bereits definiert wurde, spiegelt im Rahmen der Informationsqualität das Objekt wider, dessen Qualität betrachtet wird. Nach DIN EN ISO 9000 wird Qualität als *„Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“* bezeichnet [DIN EN ISO 9000, S. 39]. Qualität wird somit also durch die Erfüllung von Anforderungen definiert [JAK19, S. 6]. Dies gilt auch in Bezug auf die Informationsqualität. In der Literatur zur Informationsqualität wird dies oft auch als *„fitness-for-use“*-Konzept beschrieben [BASC16, S. 5; NOH01, S. 60; RKM+18, S. 24; WAST96, S. 11]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die auf der Grundlage der Definition des Qualitätsbegriffs beruhenden Definition der Informationsqualität von Gustavsson und Wänström [GUWÄ09] verwendet: *„Informationsqualität wird als die Fähigkeit definiert, die geäußerten und impliziten Anforderungen der Informationsnutzenden zu erfüllen“* [GUWÄ09, S. 327]. Abweichungen der verfügbaren Informationsqualität von den Anforderungen der Nutzenden definieren Gustavsson und Wänström dabei als Informationsqualitätsdefizite. Diese Definition der Informationsqualität geht mit der Definition der Qualität der DIN EN ISO 9000 einher.

Die an die Informationsqualität gestellten Anforderungen sind in der Regel abhängig vom Kontext, in dem die Informationen verwendet werden [NOH01, S. 60]. Zur Operationalisierung der Informationsqualität wurden die sogenannten Informationsqualitätsdimensionen (IQ-Dimensionen) eingeführt, mit denen verschiedene denkbare Qualitätsaspekte von Informationen aus Anwendersicht beschrieben werden [RKM+18, S. 27]. In Abbildung 2-8 sind gängige IQ-Dimensionen dargestellt, die den vier Kategorien *systemunterstützt*, *inhärent*, *darstellungsbezogen* und *zweckabhängig* zugeordnet werden.

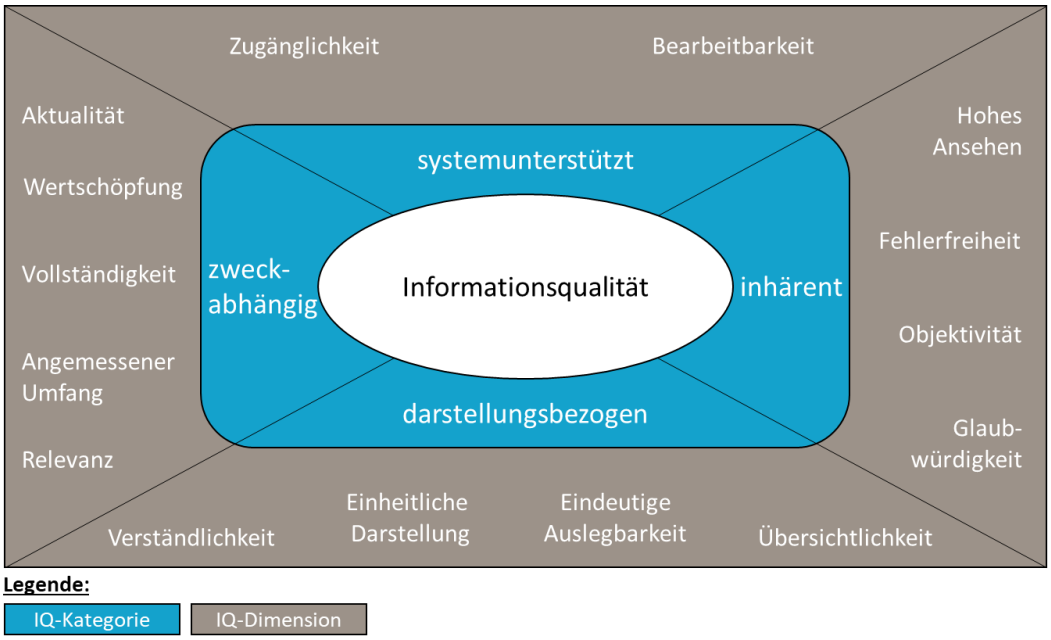

Abbildung 2-8: Informationsqualitätsdimensionen nach [RKM+18, S. 28; WAST96, S. 20]

Jede der aufgeführten Kategorien betrachtet dabei einen unterschiedlichen Untersuchungsgegenstand. Dabei bezieht sich die Kategorie *systemunterstützt* auf das System, in dem die Informationen gespeichert und verarbeitet werden, die Kategorie *inhärent* bezieht sich auf den Inhalt der Information selbst, die Kategorie *darstellungsbezogen* bezieht sich auf die Art der Darstellung der Informationen und die Kategorie

zweckabhängig auf die Nutzung der Information [RKM+18, S. 29]. Im Rahmen dieser Arbeit wird sich zunächst auf die IQ-Dimensionen der Kategorien *inhärent* und *zweckabhängig* beschränkt, da durch diese der geforderte Inhalt für eine anforderungsgerechte Nutzung der Informationen beschrieben wird. Dies stellt die Grundlage für eine anforderungsgerechte Erfüllung der IQ-Dimensionen der IQ-Kategorien *darstellungsbezogen* und *systemunterstützt*.

In der Literatur gibt es keine einheitliche Meinung, durch welche IQ-Dimensionen die Informationsqualität umfänglich beschrieben wird. Auch die exakte Bedeutung der einzelnen IQ-Dimensionen ist nicht einheitlich definiert und variiert zwischen den unterschiedlichen Quellen [BCF+09, S. 6]. Nichtsdestotrotz werden einige IQ-Dimensionen häufiger betrachtet als andere und in ihrer Bedeutung nur geringfügig variiert [GCW+19, S. 585]. Diese IQ-Dimensionen sind nachfolgend beschrieben:

- **Genauigkeit („Accuracy"):** Die IQ-Dimension Genauigkeit beurteilt, wie sehr die Information mit dem durch sie abgebildeten realen Objekt übereinstimmt [BASC16, S. 23; RKM+18, S. 26].
- **Vollständigkeit („Completeness"):** Die IQ-Dimension Vollständigkeit beurteilt, ob die Information alle notwendigen Aspekte beinhaltet, um jeden Aspekt des zu repräsentierenden Phänomens abzubilden [GCW+19, S. 585].
- **Konsistenz („Consistency"):** Die IQ-Dimension Konsistenz prüft, inwieweit die Information semantische Regeln befolgt und in welchem Ausmaß die Information kompatibel zu anderen Informationen ist [GCW+19, S. 585].
- **Aktualität („Timeliness"):** Die IQ-Dimension Aktualität beurteilt, ob die Ereignisse zur Änderung beziehungsweise die Aktualisierungsrate der Information mit dem damit verbundenen zeitlichen Alter der Information für die Nutzung der Information ausreichend ist [GCW+19, S. 585].
- **Relevanz („Relevancy"):** Die IQ-Dimension Relevanz beurteilt, ob die Information in ihrer Ausprägung für die angedachte Nutzung passend ist [GCW+19, S. 585; GUWÄ09, S. 331; RKM+18, S. 37].

Aus der Vielzahl an IQ-Dimensionen, die in der Literatur bestehen, kann die (Teil-)Forschungsfrage abgeleitet werden:

(Teil-)Forschungsfrage 1:

Welche Dimensionen der Informationsqualität sind für die Steuerung der Produktionslogistik relevant?

Im Rahmen dieser Arbeit werden die drei IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* eingeführt und insbesondere für Bewegungs- und Rückmeldedaten detailliert betrachtet. Dabei sind diese neu eingeführten IQ-Dimensionen nicht losgelöst von den zuvor aufgeführten, sondern umfassen diese teilweise beziehungsweise grenzen diese zur besseren Eignung in Bezug auf die Steuerung der Produktionslogistik ein. Die IQ-Dimensionen werden dabei jeweils für eine Information gebündelt betrachtet, sodass die IQ-Dimensionen nicht losgelöst voneinander betrachtet werden können, sondern sich teilweise gegenseitig bedingen.

IQ-Dimension *Granularität*

Die IQ-Dimension *Granularität* berücksichtigt den Grad der Auflösung, in dem die Information zur Verfügung steht und inwieweit diese Auflösung ausreichend ist, um das betrachtete Objekt oder den Sachverhalt hinreichend genau abzubilden, sodass die relevanten Eigenschaften im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt werden. Diese IQ-Dimension ist von essenzieller Relevanz für eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik, da durch sie beeinflusst wird, wie detailliert und somit wie nah am realen Objekt die Informationsgrundlage der Steuerungsverfahren ist. Dadurch wird wiederum definiert, wie detailliert Restriktionen im Rahmen der Steuerungsentscheidungen berücksichtigt werden.

Ziel der Ausgestaltung der IQ-Dimension *Granularität* sollte es daher sein, unter Berücksichtigung ökonomischer Effekte, die insbesondere die Informationserfassung betreffen, die Information in ihrer *Granularität* so genau wie nötig zu erfassen.

Von den zuvor aufgeführten IQ-Dimensionen umfasst die IQ-Dimension *Granularität* die Relevanz und teilweise die Vollständigkeit. Die Relevanz wird darüber berücksichtigt, dass die *Granularität* der Information die relevanten Eigenschaften des repräsentierten Objektes zur Steuerung der Produktionslogistik abbildet. Die Vollständigkeit ergibt sich aus dem Zusammenfügen von Informationen in ausreichender *Granularität*, sofern die interessierende Information nicht durch eine einzelne Information erfasst werden kann.

IQ-Dimension *Frequenz*

Die IQ-Dimension *Frequenz* berücksichtigt die Häufigkeit innerhalb einer Zeitspanne, mit der die Information, in der durch die IQ-Dimension *Granularität* angegebenen Auflösung, aktualisiert wird. Zudem wird berücksichtigt, ob die Information rechtzeitig beziehungsweise noch aktuell zur Verfügung steht, um angemessen im Rahmen von Steuerungsentscheidungen der Produktionslogistik berücksichtigt zu werden. Werden Informationen nicht in einem festen zeitlichen Intervall aktualisiert, sondern durch diskontinuierliche Zeitpunkte, so werden durch diese IQ-Dimension die Ereignisse berücksichtigt, durch die die Information aktualisiert wird. Diese IQ-Dimension ist von Relevanz für eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik, da verspätete Informationen verzögert Prozesse auslösen und somit zu Ineffizienzen führen können, die sich negativ auf die logistischen Zielgrößen auswirken könnten. Sind Informationen nicht mehr aktuell zum Zeitpunkt ihrer Nutzung, so repräsentieren sie ein falsches Abbild des realen Objektes/der realen Gegebenheit, wodurch fehlerhafte Steuerungsentscheidungen generiert werden könnten. Ziel der Ausgestaltung der IQ-Dimension *Frequenz* sollte es sein, dass die Aktualisierung der Information zeitlich ausreichend nah an der Änderung des durch sie abgebildeten realen Objekts/Gegebenheit ist, sodass es zu keinen Prozessbeeinträchtigungen aufgrund zeitlicher Abweichungen kommt.

Die IQ-Dimension *Frequenz* umfasst von den zuvor aufgeführten gängigen IQ-Dimensionen die Aktualität und geht mit deren Definition einher.

IQ-Dimension *Verlässlichkeit*

Die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* berücksichtigt die Übereinstimmung der Information mit dem durch sie abgebildeten realen Objekt beziehungsweise Sachverhalt. Bei der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* handelt es sich um eine Abbildungsgenauigkeit. Dabei bezieht sich diese IQ-Dimension auf die durch die IQ-Dimension *Granularität* bestimmte Auflösung zum Zeitpunkt der Aktualisierung der Information. Diese IQ-Dimension ist relevant im Rahmen einer Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik, da eine abweichende Repräsentation des realen Objekts/Sachverhaltes zu fehlerhaften Steuerungsentscheidungen führen kann, die die Effizienz des Produktionssystems nachteilig beeinflusst. Ziel der Ausgestaltung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* sollte es daher sein, die Information in der notwendigen Granularität zum Zeitpunkt der Aktualisierung hinreichend genau in Bezug auf das reale Objekt beziehungsweise den realen Sachverhalt abzubilden, sodass Fehlentscheidungen aufgrund dieser Fehlerursache auf ein tolerierbares Maß reduziert werden.

Von den zuvor aufgeführten gängigen IQ-Dimensionen beinhaltet die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* die Genauigkeit.

Durch die drei IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* werden die zuvor aufgeführten gängigen IQ-Dimensionen mit Ausnahme der Konsistenz explizit mitberücksichtigt. Die Konsistenz von Informationen in Bezug auf die Einhaltung semantischer Regeln wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die Konsistenz in Bezug auf die Kompatibilität zu anderen Informationen (beispielsweise erfasste Start- und Endzeitpunkte von Produktionsschritten, die nicht vertauscht sein dürfen), müssen im Rahmen der Informationserfassung mitberücksichtigt werden. Dies wird im Rahmen der zu entwickelnden Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt, wodurch der Aspekt der Konsistenz indirekt mit beachtet wird.

Die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* werden auch in anderen wissenschaftlichen Arbeiten berücksichtigt, die ebenfalls eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik fokussieren oder Informationsqualität in der Produktionslogistik und angrenzenden Bereichen untersuchen. Dabei werden die IQ-Dimensionen nicht immer explizit genannt.

Wolfsgruber [WOL16; WOLI16] untersucht anhand einer simulationsbasierten Evaluierungsstudie den Einfluss der „Informatisierung der Produktion“ auf Methoden und Verfahren der PPS. Als Informatisierung der Produktion beschreibt der Autor dabei die bessere Verfügbarkeit und Qualität von Daten, die durch gesteigerte Rechenleistung im Rahmen der PPS berücksichtigt werden. Unter dem Aspekt der Datenverfügbarkeit analysiert der Autor zum einen die Repräsentation der Produktion durch die aus den verfügbaren Daten generierten Informationen, zum anderen aber auch die zeitliche Verfügbarkeit von Informationen und deren Auswirkungen, wenn unterschiedliche Informationen, die für einen Sachverhalt benötigt werden, in ihrer Aktualisierung nicht aufeinander abgestimmt sind. Somit berücksichtigt Wolfsgruber unter dem Begriff Datenverfügbarkeit die IQ-Dimensionen *Granularität* und *Frequenz*. Unter der Bezeichnung Datenqualität untersucht der Autor Auswirkungen von Abweichungen zwischen Bestandsdaten und den zugehörigen realen Beständen. Dies entspricht der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*.

Reuter et al. [RBH16] berücksichtigen die IQ-Dimension *Granularität* und *Frequenz* unter den Begriffen „Detaillierungsgrad“ und „Frequenz“ im Rahmen einer Methode zur angemessenen Steigerung der Rückverfolgbarkeit von Produkt-Prozess-Kombinationen im Produktionsumfeld, um darauf aufbauend eine verbesserte Informationsgrundlage zur Planung und Steuerung von Prozessen zu schaffen. Der Detaillierungsgrad definiert im Rahmen der vorgestellten Methode die Anforderungen, in welcher Granularität die einzelnen Verfahren der PPS diese benötigen, um daraus abzuleiten, in welcher Granularitätsstufe die Information erfasst werden sollte. Die Frequenz definiert im Rahmen der vorgestellten Methode die Anforderung, wie häufig eine Information aktualisiert werden muss, um für Verfahren der Planung und Steuerung für gegebene Produkt-Prozess-Kombinationen geeignet zu sein.

Schäfers et al. [SMN19A] entwickeln ein auf Rückmeldedaten aus der Produktion basierendes System zur digitalen Unterstützung der Fertigungsauftragsbearbeitung. In diesem Zusammenhang berücksichtigen die Autoren die IQ-Dimensionen *Granularität* und *Frequenz*, behandeln diese jedoch eng aneinandergekoppelt. Die IQ-Dimension *Granularität* wird von den Autoren auch so benannt und beschreibt in ihrem Beispiel, wie detailliert eine Zustandsänderung des Fertigungsauftrages erfasst werden kann. Die Autoren diskutieren in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit einer Steigerung der *Granularität* mit dem damit verbundenen Aufwand der Informationserfassung. Die IQ-Dimension *Frequenz* wird durch die Anzahl der Erfassungspunkte des Produktionsauftrages im Auftragsdurchlauf berücksichtigt, an denen der Fortschritt gemessen wird. In diesem Beispiel geht die IQ-Dimension *Frequenz* stark mit der IQ-Dimension *Granularität* einher, da eine höhere Anzahl an Erfassungspunkten mit einer höheren *Granularität* der Zustandsinformationen des Produktionsauftrages einhergeht.

Gustavsson und Wänström [GUWÄ09] untersuchen die Relevanz von IQ-Dimensionen im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung mit Fokus auf Prognosedaten sowie Informationen über Kundenaufträge. Dabei werden von den Autoren die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* als relevant

identifiziert. Die IQ-Dimension *Granularität* wird durch die Autoren durch die IQ-Dimension Relevanz berücksichtigt, die in ihrer Definition ähnlich der in dieser Arbeit aufgeführten Definition zur Granularität ist. Die IQ-Dimension *Frequenz* beschreiben die Autoren unter dem Begriff Rechtzeitigkeit. Die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* behandeln die Autoren ebenfalls unter dem Begriff Verlässlichkeit.

Hicks [HIC07] überträgt Ansätze der Lean Production auf das Management von Informationen unter der Hypothese, dass die Prinzipien des Lean Managements auf jegliche Informationsverarbeitungsprozesse angewendet werden können und lediglich durch die Fähigkeit der Identifikation von Verschwendung und der Definition von Wertschöpfung beschränkt wird. Als Verschwendung im Sinne des Informationsmanagements werden dabei jegliche Aktivitäten oder Wartezeiten auf Informationen definiert, die dadurch entstehen, dass der Informationsnutzer nicht unverzüglich Zugang zu aktuellen („*up-to-date*“) und genauen („*accurate*“) Informationen hat, die in einem angebrachten Umfang („*adequate amount*“) verfügbar und von Wert („*value of an information*“) sind. Durch die Benennung dieser Ursachen für das Auftreten von Verschwendung berücksichtigt der Autor die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit*.

Forslund [FOR07] entwickelt Skalen zur Messung von relevanten IQ-Dimensionen zur Beurteilung der Informationsqualität im Auftragsabwicklungsprozess. In diesem Rahmen definiert die Autorin die IQ-Dimension Rechtzeitigkeit (im Beitrag „rechtzeitig“, *engl. „in time“*) als relevant, um beispielsweise der Forderung nach kurzen Lieferzeiten gerecht werden zu können. Die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* identifiziert die Autorin ebenfalls als relevante zu beachtende IQ-Dimension und berücksichtigt diese unter dem Begriff Genauigkeit der Information. In diesem Zusammenhang wird eine Information durch die Autorin als genau eingestuft, wenn sie frei von Fehlern ist.

Meudt et al. [MLM16; MMA17] diskutieren Verschwendungsarten in Informationslogistikprozessen, ähnlich wie sie im Rahmen der Lean Production bekannt sind, mit dem speziellen Fokus auf die Produktion. Im Rahmen ihres Vorgehens zur Erfassung informationslogistischer Verschwendungen definieren die Autoren die Informationsqualität als eine Verschwendungsart, ohne explizit auf IQ-Dimensionen einzugehen. Im Rahmen der Untersuchung der Verschwendungsart Informationsqualität geben die Autoren jedoch an, dass die Informationen in Bezug auf ihre Granularität und Erfassungsfrequenz hin analysiert werden sollen, wodurch die in dieser Arbeit verwendeten IQ-Dimensionen *Granularität* und *Frequenz* ebenfalls berücksichtigt werden.

Auffällig in der Analyse der Berücksichtigung der IQ-Dimensionen in anderen wissenschaftlichen Arbeiten ist, dass die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* weniger häufig beachtet wird als die IQ-Dimensionen *Granularität* und *Frequenz*. Die Vernachlässigung dieser IQ-Dimension ist jedoch kritisch zu betrachten, da zum Beispiel das Auftreten von Messfehlern, die die Verlässlichkeit einer Information beeinträchtigen, in realen Produktionssystemen nicht unüblich sind und beispielsweise durch menschliche Faktoren, Einschränkungen von Messinstrumenten oder Fehler in den Datenerfassungsprozessen erzeugt werden. Die dabei auftretenden Abweichungen können dabei zufällig oder systematisch entstehen [SOTE17, S. 3257].

Die Bezeichnungen im Falle einer Berücksichtigung der IQ-Dimensionen Granularität, Frequenz und Verlässlichkeit durch die zuvor genannten Autorinnen und Autoren sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2: IQ-Dimensionen in Veröffentlichungen mit Bezug zur Steuerung der Produktionslogistik[4]

Quelle	Fokus	IQ-Dimension		
		Granularität	**Frequenz**	**Verlässlichkeit**
[WOLI16]	Einfluss der Informatisierung auf die PPS	Datenverfügbarkeit *(„Data availability“)*		Datenqualität *(„Data quality“)*
[RBH16]	Rückverfolgbarkeit von Produkten	Detaillierungsgrad *(„Degree of Detail“)*	Frequenz *(„Frequency“)*	-
[SMN19A]	Unterstützung in der Auftragsabwicklung	Granularität *(„Granularity“)*	Erfassungspunkte *(„Feedback Points“)*	-
[GUWÄ09]	Analyse von IQ-Dimensionen für die PPS	Relevanz *(„relevant“)*	Rechtzeitigkeit *(„timely“)*	Verlässlichkeit *(„reliable“)*
[HIC07]	Schlanke Informationsflüsse	Angebrachter Umfang/wertvoll („*adequate amount*“/ „*value of an information*“)	aktuell *(„up-to-date“)*	genau *(„accurate“)*
[FOR07]	Messung von IQ in der Auftragsabwicklung	-	Rechtzeitigkeit *(„in time“)*	Genauigkeit *(„accurate“)*
[MLM16; MMA17]	Informationslogistische Verschwendung	Detailgrad/ Granularität	Erfassungsfrequenz	-

Im Rahmen der zu entwickelnden Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik wird die Informationsqualität, repräsentiert durch die drei zuvor eingeführten IQ-Dimensionen, aufgrund ihrer erheblichen Relevanz zur Generierung von Steuerungsentscheidungen fokussiert. Aus der Beschränkung auf diese drei IQ-Dimensionen lässt sich Hypothese H-TFF1 ableiten, mit der (Teil-)Forschungsfrage 1 beantwortet wird und die es im Rahmen der Evaluierung der Methode zu validieren gilt:

Hypothese H-TFF1:

Die *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* sind für die Steuerung der Produktionslogistik relevante Informationsqualitätsdimensionen.

Eine Evaluierung der Hypothese H-TFF1 erfolgt im Rahmen der Anwendung der zu entwickelnden Methode. Dies erfolgt anhand von drei Evaluierungskriterien, die als Bestätigung fordern, dass die ermittelten IQ-Dimensionen jeweils von Relevanz sind. Die Relevanz für die IQ-Dimension *Granularität* kann anhand von möglichen identifizierbaren Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der realen Prozesse ermittelt werden, sofern diese nicht passend ist. Die Relevanz der IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* kann nachgewiesen werden, indem in den jeweiligen Anwendungsbeispielen der Evaluation deren

[4] In Klammern sind jeweils die Begriffe, wie sie in der jeweiligen Veröffentlichung verwendet wurden, aufgeführt.

Ausprägungen verändert werden, sodass diese von den realen Gegebenheiten abweichen und sich ein bemerkbarer Effekt ergibt.

Die Fokussierung auf die drei IQ-Dimensionen im Rahmen der zu entwickelnden Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik soll durch eine sogenannte Harmonisierung erfolgen. Harmonisierung wird allgemein definiert als die Gestaltung von Geschäftsprozessen, Informationen und Informationssystemen mit dem Ziel, daraus Nutzenpotenziale zu erschließen [OBK12, S. 384]. Im Rahmen der zu entwickelnden Methode wird diese Definition aufgegriffen und der Begriff Harmonisierung definiert als die systematische Identifikation von benötigten Informationen und die Definition ihrer erforderlichen Informationsqualität, sodass diese zu den Anforderungen der produktionslogistischen Prozesse und Verfahren passen. Das angestrebte Ergebnis der Harmonisierung in Form der zu erschließenden Nutzenpotenziale sind dabei robustere und verbesserte Steuerungsentscheidungen, die einen positiven Beitrag zur produktionslogistischen Zielerreichung beitragen.

2.6 Funktionale Anforderungen an eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität

Aus den zuvor in diesem Kapitel beschriebenen Aufgaben, Zielen und Eigenschaften sowie durch die Einflüsse auf heutige Produktionssysteme und somit auch auf die Steuerung der Produktionslogistik lassen sich funktionale Anforderungen an eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ableiten. Funktionale Anforderungen beschreiben dabei allgemein, welche inhaltlichen Aspekte im Sinne von Funktionen ein Produkt, System oder, wie in diesem Fall, eine Methode erfüllen soll [GIL14, S. 57].

Die abgeleiteten funktionalen Anforderungen werden einem von drei Anforderungsclustern zugeordnet, die jeweils einen Betrachtungsbereich abbilden, den es im Rahmen der zu entwickelnden Methode zu beachten gilt. Diese Anforderungscluster sind:

- Produktionslogistischer Prozess & Steuerung (P),
- Informationen & Informationsflüsse (I) und
- Informationsqualität (Q).

Für jedes dieser Cluster wird im Folgenden beschrieben, welcher Betrachtungsbereich abgebildet wird und warum der Betrachtungsbereich im Rahmen der zu entwickelnden Methode beachtet werden sollte.

2.6.1 Anforderungscluster produktionslogistischer Prozess & Steuerung (P)

Die Steuerung der Produktionslogistik kann nur effektiv und effizient sein, wenn die eingesetzten Steuerungsverfahren sowohl zu den Prozessen als auch zu den produktionslogistischen Zielgrößen passen [MÜNY10, S. 285]. Ungeeignete Steuerungsverfahren können selbst bei idealer Informationsqualität zu keiner Steigerung der logistischen Zielerreichung beitragen. Die Anwendung von auf die Prozesse und Zielgrößen abgestimmten Steuerungsverfahren bildet eine notwendige Bedingung, die erfüllt sein muss, bevor eine Harmonisierung der Informationsqualität sinnvoll ist. Um dieses Zusammenspiel zwischen Prozess, Zielen und Steuerungsverfahren zu berücksichtigen, werden in diesem Cluster Anforderungen erhoben, durch deren Erfüllung im Rahmen der zu entwickelnden Methode die notwendige Bedingung passender Steuerungsverfahren erfüllt wird.

Anforderung P-1: Analyse/Abbildung des Systems beziehungsweise des Produktionsprozesses
Die Einführung neuer beziehungsweise die Anpassung bestehender Verfahren zur Steuerung produktionslogistischer Prozesse sollte auf Basis eines profunden Verständnisses des zugrundeliegenden Prozesses erfolgen [SMN19A, S. 29]. Dies sollte im Rahmen einer Prozessaufnahme generiert werden. Die Prozessaufnahme ist eine Voraussetzung, um mögliche Verbesserungspotenziale der Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren und geeignete Steuerungsverfahren auszuwählen oder zu entwickeln, die zu den Anforderungen und Gegebenheiten des zu steuernden Prozesses passen. Zudem lassen sich durch die Prozessaufnahme relevante Restriktionen, die im Rahmen der Generierung von Steuerungsentscheidungen berücksichtigt werden müssen, identifizieren. Um von dieser Prozessaufnahme im weiteren Verlauf der Anwendung der zu entwickelnden Methode profitieren zu können, reicht es nicht aus, das gesammelte Wissen implizit zu speichern. Vielmehr ist es notwendig, dieses profunde Verständnis des betrachteten Prozesses in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise zu dokumentieren [BDF+18, S. 37].

Zudem ist es notwendig zu identifizieren, wo im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik die generierten Steuerungsentscheidungen zum Einsatz kommen beziehungsweise welchen Effekt diese haben, um dies im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität zu berücksichtigen. Dies steht im direkten Zusammenhang mit dem *„fitness-for-use“*-Konzept der Informationsqualität, das darauf aufbaut, dass die Informationsqualität immer nur im Zusammenhang mit dessen Nutzung bewertet werden kann.

Anforderung P-1 ist somit sowohl für die Anpassung der Steuerungsverfahren als auch für die Harmonisierung der Informationsqualität erforderlich.

Anforderung P-1:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist der zu steuernde Prozess in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise zu erfassen.

Anforderung P-2: Analyse und Auswahl geeigneter Steuerungsverfahren
Die Effizienz der Produktions- und produktionslogistischen Prozesse wird maßgeblich durch die Effektivität und Effizienz der eingesetzten Steuerungsverfahren beeinflusst. Die eingesetzten Steuerungsverfahren haben zudem einen erheblichen Einfluss auf die Erreichung der zu erfüllenden produktionslogistischen Ziele. Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die eingesetzten Steuerungsverfahren in Bezug auf ihre Kompatibilität mit den zu steuernden Prozessen und den produktionslogistischen Zielgrößen abgestimmt werden. Kompatibilität in Bezug auf den zu steuernden Prozess bedeutet dabei, dass das Steuerungsverfahren die Anforderungen, Gegebenheiten und zu beachtenden Restriktionen des Prozesses im Rahmen der Generierung von Steuerungsentscheidungen ausreichend mitberücksichtigt. Kompatibilität in Bezug auf die produktionslogistischen Zielgrößen bedeutet, dass das Steuerungsverfahren das Erreichen der ausgewählten Zielgrößen (sofern diese untereinander kompatibel sind) unterstützt und nicht auf die Verbesserung anderer Zielgrößen ausgerichtet ist. Zudem ist bei mehreren eingesetzten Steuerungsverfahren ihre Kompatibilität zueinander zu prüfen. Limitiert ein Steuerungsverfahren zur Auftragsfreigabe zum Beispiel den Bestand innerhalb der Produktion, wohingegen ein weiteres eingesetztes Steuerungsverfahren zur Reihenfolgebildung eine Maximierung der Auslastung der Ressourcen anstrebt, fokussieren diese gegenläufige Zielgrößen und sind somit zueinander nicht kompatibel.

Um zu erreichen, dass das bereits eingesetzte beziehungsweise einzusetzende Steuerungsverfahren zu den zuvor aufgeführten Punkten kompatibel ist, ist das Verfahren in Bezug auf die Kompatibilität zu analysieren. Sollten im Rahmen der Analyse Inkompatibilitäten auftreten, so sind die Steuerungsverfahren

gegebenenfalls zu modifizieren, sodass eine Kompatibilität hergestellt werden kann. Andernfalls sind andere geeignetere Steuerungsverfahren auszuwählen. Dadurch kann die in der Beschreibung dieses Anforderungsclusters aufgestellte notwendige Bedingung, dass geeignete Steuerungsverfahren als Voraussetzung für eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik durch eine harmonisierte Informationsqualität bestehen müssen, erfüllt werden. Eine Analyse der Steuerungsverfahren bildet zudem die Grundlage, um abzuleiten, welche Informationen im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität berücksichtigt werden müssen.

Anforderung P-2:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist das beziehungsweise *sind die eingesetzten Steuerungsverfahren auf ihre Kompatibilität in Bezug auf den zu steuernden Prozess, zu den logistischen Zielgrößen und weiteren eingesetzten Steuerungsverfahren zu analysieren, gegebenenfalls zu modifizieren oder neue geeignete Steuerungsverfahren auszuwählen.*

2.6.2 Anforderungscluster Informationen & Informationsflüsse (I)

Zur Steuerung der Produktionslogistik ist eine solide Informationsgrundlage notwendig, die durch effektive und effiziente Informationsflüsse von der Informationserfassung über die Informationsverarbeitung durch die Steuerungsverfahren zum Informationsnutzer fließt [SPR+17, S. 82]. Zur Harmonisierung der Informationsqualität im Rahmen der zu entwickelnden Methode ist ein angemessenes Nachvollziehen der Informationsflüsse erforderlich, um mögliche Verbesserungspotenziale in Bezug auf eine Steigerung der Informationsqualität zu identifizieren. Durch die Dynamik innerhalb des Produktionssystems und die Anforderung an die Steuerung der Produktionslogistik, auf diese Dynamik anforderungsgerecht zu reagieren, sollte die Steuerung der Produktionslogistik als geschlossener Wirkungskreis modelliert werden und somit in der Struktur einer Regelung aufgebaut sein [PAW07, S. 75; SCWE19, S. 232]. Für die Modellierung der Informationsflüsse sind sowohl die Erfassung, die Verarbeitung, als auch die Rückführung in den Prozess im Sinne der Nutzung relevant. Die Anforderungen an die Modellierung der Informationen und Informationsflüsse werden durch dieses Anforderungscluster zusammengefasst.

Anforderung I-1: Identifikation/Definition notwendiger Informationen & anforderungsgerechter Erfassungspunkte

Ein Defizit in der Steuerung der Produktionslogistik liegt häufig in der nicht anforderungsgerechten Positionierung der Rückmeldepunkte von Informationen innerhalb der Prozesse [NMK14, S. 81; OST12, S. 42]. Zur anforderungsgerechten Positionierung der Rückmeldepunkte ist es erforderlich, dass zunächst die für die Steuerungsverfahren relevanten Informationen identifiziert oder definiert werden. Für diese Informationen sind die anforderungsgerechten Erfassungspunkte im Produktionsprozess zu identifizieren. Anforderungsgerecht in diesem Zusammenhang bedeutet, dass die Informationen im Produktionsprozess an den Stellen erfasst werden, die im unmittelbaren Zusammenhang mit dieser Information stehen. Dadurch wird ein Bezug zwischen realem Objekt beziehungsweise realer Gegebenheit und der repräsentierenden Information geschaffen. Zudem sind im Rahmen der Identifikation anforderungsgerechter Erfassungspunkte ökonomische, technologische und sicherheitsrelevante Aspekte zu berücksichtigen. Die Erfassungspunkte spiegeln im Informationsfluss die zugehörigen Informationsquellen wider.

Anforderung I-1:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die von den Steuerungsverfahren benötigten Informationen zu identifizieren und anforderungsgerechte Erfassungspunkte (Informationsquellen) im Produktionsprozess zu definieren, an denen diese Informationen generiert und erfasst werden.

Anforderung I-2: Identifikation/Definition von Technologien und Methoden zur Informationserfassung

Die Art der Erfassung von Informationen kann einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Informationen haben. So sind beispielsweise Messfehler oder subjektive Einschätzungen von Mitarbeitenden im Produktionsprozess häufige Ursachen für eine geminderte Informationsqualität [SOTE17, S. 3257]. Zur Berücksichtigung dieser Einflussmöglichkeit auf die Informationsqualität sollten die zur Informationserfassung an den anforderungsgerechten Informationserfassungspunkten eingesetzten Methoden (zum Beispiel manuelle Erfassung) oder Technologien (beispielsweise Maschinendatenerfassungssysteme (MDE-Systeme)) modelliert werden. Durch die Verbindung der Informationserfassungspunkte mit den zugehörigen Methoden beziehungsweise Technologien kann ermittelt und gegebenenfalls verhindert werden, dass die Qualität von Informationen systematisch beeinträchtigt wird. Zudem kann durch die Modellierung in Bezug auf eine mögliche Implementierung von Technologien zur Informationserfassung bereits im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität dokumentiert werden, welche Technologien eingesetzt werden.

Anforderung I-2:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die zur Erfassung der Informationen an den anforderungsgerechten Erfassungspunkten im Produktionsprozess eingesetzten Technologien und Methoden im Informationsfluss zu modellieren.

Anforderung I-3: Identifikation/Definition der Medien zur Informationsspeicherung

Mangelnde Informationsflüsse sind einer der wesentlichen Gründe, die eine effektive und effiziente Steuerung der Produktionslogistik einschränken [DSD+20, S. 10]. Diese treten zum Teil auch durch Medienbrüche (beispielsweise bei der Übertragung manuell erfasster Informationen auf Papier in eine Datenbank) oder durch unzureichende Schnittstellen zwischen unterschiedlichen IT-Systemen auf, in denen die zu verarbeitenden Informationen gespeichert werden. Zur Vermeidung von Medienbrüchen, die zu Verzögerungen in der Informationsbereitstellung führen oder mit Informationsverlusten an den Schnittstellen zwischen IT-Systemen verbunden sein können, sollten die Medien zur Speicherung der erfassten und verarbeiteten Informationen innerhalb der Modellierung des Informationsflusses dokumentiert werden. Dies ermöglicht es nicht nur einen Überblick zu erhalten, welche Informationen die Steuerungsverfahren benötigen, sondern auch, wo diese gespeichert sind. Dies bietet eine Grundlage zur konsistenten Gestaltung der Informationsspeicherung, um negative Einflüsse auf die Informationsqualität zu eliminieren.

Anforderung I-3:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die eingesetzten Medien zur Speicherung der Informationen zu modellieren.

Anforderung I-4: Beschreibung der Informationsverarbeitung

Die Qualität der Steuerungsentscheidungen ist beim Einsatz deterministischer Steuerungsverfahren von der Informationsqualität der Eingangsinformationen abhängig [LÖD16, S. 637]. Zur Sicherung einer

ausreichenden Informationsqualität der Steuerungsentscheidungen ist es daher erforderlich, die Generierung dieser Informationen nachvollziehen zu können, um somit mögliche Informationsqualitätsdefizite auf die Ursachen zurückführen zu können. Dies erfordert eine angemessene, nachvollziehbare und übersichtliche Modellierung der Verarbeitung der Informationen. Zudem schafft dies Transparenz in Bezug auf die Generierung der Steuerungsentscheidungen. Dies kann genutzt werden, um das Vertrauen der Informationsnutzenden in die Steuerungsentscheidung zu steigern und zu verhindern, dass die Steuerungsentscheidungen aufgrund mangelnder Nachvollziehbarkeit nicht umgesetzt wird [DSD+20, S. 10; SPR+17, S. 91].

Anforderung I-4:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die Verarbeitung der Informationen durch die Steuerungsverfahren in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise im Informationsfluss zu modellieren.

Anforderung I-5: Definition der Informationsempfangenden/-nutzenden

Unklare Rollen und Verantwortlichkeiten in der Steuerung der Produktionslogistik können ein Hindernis bei der Erreichung und Verbesserung logistischer Zielgrößen sein [DSD+20, S. 10]. Durch eine Definition der Empfänger der generierten Steuerungsentscheidungen kann eindeutig festgelegt werden, wer für die Umsetzung der durch die Steuerungsentscheidungen generierten Aktionen verantwortlich ist. Zur anforderungsgerechten Berücksichtigung der Steuerungsentscheidungen sind passende Informationsübermittlungspunkte, die Informationssenken im Informationsfluss, im Produktionsprozess zu definieren. Anforderungsgerecht in diesem Zusammenhang bedeutet, dass die Informationsübermittlungspunkte im Produktionsprozess derart gestaltet sind, dass die Informationen an diesen Punkten ohne Beeinträchtigung der Effizienz der Prozesse erhalten werden können. Die Übermittlung der Steuerungsentscheidungen an die Informationsnutzenden an den anforderungsgerechten Informationsübermittlungspunkten sind im Informationsfluss zu modellieren. Zudem ist dies notwendig, um daraus Anforderungen an die IQ-Dimensionen der Steuerungsentscheidungen abzuleiten, da dies den konkreten Einsatz der Information in Verbindung mit den durch die Prozesse gegebenen Anforderungen definiert.

Anforderung I-5:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die Empfangenden beziehungsweise Nutzenden der durch die Steuerungsverfahren generierten Entscheidungen sowie anforderungsgerechte Übermittlungspunkte (Informationssenken) im Produktionsprozess zu definieren und im Informationsfluss zu modellieren.

Anforderung I-6: Definition der Methoden und Technologien zur Informationsübermittlung

Die Methoden und Technologien zur Übermittlung der Steuerungsentscheidungen können einen erheblichen Einfluss auf die Berücksichtigung der Steuerungsentscheidungen in den Produktions- und produktionslogistischen Prozessen haben. Werden Methoden oder Technologien eingesetzt, durch die es den Informationsnutzenden nur mit Aufwand ermöglicht wird, diese zu erhalten, kann dies zur Folge haben, dass die Informationen nicht berücksichtigt werden oder nicht rechtzeitig den Empfangenden zur Verfügung stehen. Um die damit verbundenen möglichen Beeinträchtigungen der Prozesseffizienz identifizierbar abzubilden, sollten die eingesetzten Methoden und Technologien als mögliche Ursache für Prozessineffizienzen mit in den Informationsfluss modelliert werden. Zudem kann durch die Modellierung in Bezug auf eine mögliche Implementierung von Technologien zur Informationsübermittlung bereits im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität dokumentiert werden, welche Technologien eingesetzt werden.

Anforderung I-6:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die zur Übermittlung der Informationen an den anforderungsgerechten Punkten im Produktionsprozess eingesetzten Methoden und Technologien zu modellieren.

2.6.3 Anforderungscluster Informationsqualität (Q)

Der Produktionsfaktor „Information“ nimmt durch die Zunahme der Komplexität der Steuerung der Produktionslogistik einen immer höheren Stellenwert ein. Die zur Steuerung der Produktionslogistik relevanten Informationen müssen dabei jedoch von ausreichender Qualität sein, um die ihnen angedachten Funktionen in zufriedenstellender Weise ausführen zu können. So ist es erforderlich, dass die Informationen ein Abbild des Produktionssystems schaffen, das nah genug an der Realität ist, damit die Steuerung der Produktionslogistik geeignete Steuerungsentscheidungen generieren kann [SNR+15, S. 200]. Die Anforderungen, wie genau dieses Abbild des Produktionssystems zur Generierung geeigneter Steuerungsentscheidungen sein sollte, wird, wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben, durch IQ-Dimensionen beschrieben. Für die Steuerung der Produktionslogistik sind insbesondere die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* von besonderer Relevanz (siehe Hypothese H-TFF1). Die Berücksichtigung dieser IQ-Dimensionen stellen Anforderungen an eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität. Wie diese Anforderungen berücksichtigt werden sollten, wird in diesem Anforderungscluster beschrieben.

Anforderung Q-1: Definition der IQ-Dimension *Granularität*

Die *Granularität* einer Information bestimmt, in welcher Auflösung die Information erfasst, verarbeitet und/oder genutzt wird. Im Rahmen der Informationserfassung und -verarbeitung wird durch die Granularität bestimmt, in welcher Auflösung die durch die Information bestimmten Aspekte und Gegebenheiten des Produktionssystems berücksichtigt werden. Dies muss anforderungsgerecht erfolgen, indem bestimmt wird, welche die relevanten abzubildenden Aspekte des Produktionssystems und die dortigen aktuellen Gegebenheiten sind und durch welche Granularitätsstufe diese ausreichend genau zur Berücksichtigung im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik abgebildet werden. Für die Nutzung der Informationen gilt, dass auch diese in einer anforderungsgerechten *Granularität* an die Informationsnutzenden übermittelt werden müssen, sodass diese dadurch die Steuerungsentscheidungen verständlich und zu den Prozessen passend umsetzen können.

Anforderung Q-1:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die anforderungsgerechte Granularität der zu erfassenden, zu verarbeitenden und an die Informationsnutzenden zu übertragenden Informationen zu bestimmen.

Anforderung Q-2: Definition der IQ-Dimension *Frequenz*

Die im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik überwiegend zum Einsatz kommenden Bewegungsdaten zur Generierung von Steuerungsentscheidungen durch die Produktionslogistik haben einen Zeitbezug und sind somit nur so lange gültig, wie die Information dem durch sie repräsentierten reale Objekt beziehungsweise der realen Gegebenheit entspricht [LOO99, S. 228]. Zudem lösen Änderungen bestimmter Informationen Aktionen im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik aus, wie Transportvorgänge nach Beendigung eines Produktionsschrittes oder der Unterschreitung von kritischen Beständen. Damit die Informationen im Rahmen der Generierung von Steuerungsentscheidungen noch Gültigkeit besitzen

und Aktionen anforderungsgerecht ausgelöst werden, ist die notwendige *Frequenz* der Überprüfung und Aktualisierung der Information im Rahmen der Erfassung und Nutzung sowie damit verbundene tolerierbare zeitliche Abweichungen zu bestimmen.

Anforderung Q-2:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die anforderungsgerechte Frequenz der Aktualisierung der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen sowie damit verbundene tolerierbare Abweichungen zu bestimmen.

Anforderung Q-3: Definition der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*

Damit die Steuerung der Produktionslogistik Steuerungsentscheidungen generieren kann, die auch zu einer Steigerung der Effizienz der Produktions- und produktionslogistischen Prozesse führen, benötigt diese nicht nur rechtzeitige und gültige Informationen in einer ausreichenden Granularitätsstufe, durch die die zu berücksichtigenden Aspekte in ausreichender Auflösung abgebildet werden, sondern ist auch auf die *Verlässlichkeit* dieser Informationen angewiesen. Nur wenn die Informationen in der durch die Granularität vorgegebenen Auflösung zum Zeitpunkt der Aktualisierung hinreichend genau mit dem durch sie repräsentierten realen Objekt übereinstimmt, kann die Information als verlässlich angesehen werden und somit einen positiven Beitrag zur Steuerung der Produktionslogistik leisten. Einige Gegebenheiten der Produktions- und produktionslogistischen Prozesse, Ressourcen, zu bearbeitenden Materialien oder die Steuerungsverfahren in Verbindung mit dem abzuarbeitenden Produktionsplan tolerieren im gewissen Maße Abweichungen der Information von dem durch sie repräsentierten realen Objekt beziehungsweise der realen Gegebenheit. Die Sensitivität, wie sehr Steuerungsentscheidungen auf Abweichungen der Informationen von den zugehörigen realen Objekten beziehungsweise realen Gegebenheiten reagieren, ist zu bestimmen, um daraus Anforderungen ableiten zu können, wie hoch die Verlässlichkeit der Informationen zum Zeitpunkt ihrer Aktualisierung in der angegebenen Granularitätsstufe sein muss.

Anforderung Q-3:

Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist eine anforderungsgerechte Verlässlichkeit der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen zu bestimmen.

2.7 Zwischenfazit: Abgrenzung des Untersuchungsgebietes und Zusammenfassung von Anforderungen

In diesem Kapitel wurden die Ziele und Aufgaben der Produktionslogistik sowie die Einordnung der Produktionslogistik in die Struktur eines Produktionssystems beschrieben. Anhand einer Unterscheidung der Aufgaben der Planung, Steuerung und Kontrolle der Produktionslogistik erfolgte eine weitere Eingrenzung, sodass durch die Fokussierung auf die Steuerung der Produktionslogistik mit den damit verbundenen Aufgaben, Zielen und Wechselwirkungen mit dem Produktionssystem der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit definiert wurde. Aufbauend auf den dargelegten theoretischen Grundlagen und aktuellen Herausforderungen der Steuerung der Produktionslogistik, die sich durch unterschiedliche Einflussfaktoren des Produktionssystems ausdrücken, wurde die Relevanz von Informationen und der Informationsqualität im Untersuchungsgebiet herausgestellt. Die Beschreibung und Eingrenzung des Untersuchungsgebietes, die aktuellen Herausforderungen der Steuerung der Produktionslogistik sowie die Relevanz der Informationen und der Informationsqualität zur Steuerung der Produktionslogistik bildeten die Basis, um Anforderungscluster zu generieren. Innerhalb dieser Anforderungscluster wurden funktionale Anforderungen

abgeleitet, die im Rahmen einer zu entwickelnden Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität erfüllt werden müssen. Die abgeleiteten Anforderungen in den entsprechenden Anforderungsclustern sind in Tabelle 2-3 zusammengefasst.

Tabelle 2-3: Zusammenfassung der Anforderungen

Cluster	Anf.	Beschreibung
Produktionslogistischer Prozess & Steuerung (P)	P-1	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist der zu steuernde **Prozess** in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise zu erfassen.
	P-2	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist das beziehungsweise sind die eingesetzten **Steuerungsverfahren** auf ihre Kompatibilität in Bezug auf den zu steuernden Prozess, zu den logistischen Zielgrößen und weiteren eingesetzten Steuerungsverfahren zu analysieren, gegebenenfalls zu modifizieren oder neue geeignete Steuerungsverfahren auszuwählen.
Informationen & Informationsflüsse (I)	I-1	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die von den Steuerungsverfahren benötigten Informationen zu identifizieren und anforderungsgerechte **Erfassungspunkte (Informationsquellen)** im Produktionsprozess zu definieren, an denen diese Informationen generiert und erfasst werden.
	I-2	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die **zur Erfassung** der Informationen an den anforderungsgerechten Erfassungspunkten im Produktionsprozess **eingesetzten Technologien** und Methoden im Informationsfluss zu modellieren.
	I-3	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die eingesetzten **Medien zur Speicherung** der Informationen zu modellieren.
	I-4	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die **Verarbeitung der Informationen** durch die Steuerungsverfahren in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise im Informationsfluss zu modellieren.
	I-5	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die Empfangenden beziehungsweise Nutzenden der durch die Steuerungsverfahren generierten Entscheidungen sowie anforderungsgerechte **Übermittlungspunkte (Informationssenken)** im Produktionsprozess zu definieren und im Informationsfluss zu modellieren.
	I-6	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die **zur Übermittlung** der Informationen an den anforderungsgerechten Punkten im Produktionsprozess eingesetzten **Methoden und Technologien** zu modellieren.
Informationsqualität (Q)	Q-1	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die **anforderungsgerechte Granularität** der zu erfassenden, zu verarbeitenden und an die Informationsnutzenden zu übertragenden Informationen zu bestimmen.
	Q-2	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die **anforderungsgerechte Frequenz** der Aktualisierung der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen sowie damit verbundene tolerierbare Abweichungen zu bestimmen.
	Q-3	Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist eine **anforderungsgerechte Verlässlichkeit** der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen zu bestimmen.

3 Stand der Erkenntnisse zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik

Die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ist ein Aufgabengebiet, dass in vielen Unternehmen bereits kontinuierlich angewendet wird, um wettbewerbsfähig zu bleiben beziehungsweise zu werden. Die dazu eingesetzten Methoden werden in diesem Kapitel untersucht. Dazu werden zunächst das Untersuchungsgebiet strukturiert und Forschungsbereiche abgeleitet, in denen Aspekte der zu behandelnden Problemstellung bearbeitet werden. Zu jedem dieser Forschungsbereiche werden relevante Methoden beschrieben und ihr Bezug zur Bearbeitung der Problemstellung durch eine Prüfung ihrer Erfüllung auf die in Kapitel 2.6 gestellten Anforderungen bewertet. Abschließend wird ein Zwischenfazit gezogen, welches den aktuellen Stand der Erkenntnisse in Bezug auf die Erfüllung der gestellten Anforderungen zusammenfasst und die zu schließende Forschungslücke verdeutlicht. Im Rahmen des DSR umfasst dieses Kapitel einen Teil der Aspekte des Schrittes *Bewusstsein für/Verständnis über das Problem* sowie die *Systematische Literaturrecherche* und die *Identifikation von Artefakten und der Konfiguration der Klassen des Problems*. Mit der Analyse des Stands der Erkenntnisse gehen zudem auch Aspekte des Schrittes *Vorschlag von Artefakten, um das spezifische Problem zu lösen* einher, deren Ergebnisse überwiegend in Kapitel 4 eingeflossen sind.

3.1 Strukturierung des Untersuchungsgebietes

Zur systematischen Analyse des Stands der Erkenntnisse ist es erforderlich, das Untersuchungsgebiet entsprechend der zu bearbeitenden Problemstellung zu strukturieren. Diese Strukturierung soll es ermöglichen, alle Teilbereiche der zu bearbeitenden Problemstellung in die Analyse einzubeziehen. Dadurch werden bereits bestehende Artefakte ermittelt, die zur Lösung des Problems, in diesem Fall die Entwicklung einer anforderungserfüllenden Methode, beitragen können. Da die in Kapitel 2.6 abgeleiteten Anforderungscluster und zugehörigen funktionalen Anforderungen aus der Problemstellung und Zielsetzung abgeleitet wurden, sind diese geeignet, um die Analyse des Stands der Erkenntnisse in verschiedene Gebiete zu unterteilen, die jedoch nicht disjunkt sein müssen.

Das Anforderungscluster *Produktionslogistischer Prozess & Steuerung* (P) umfasst Anforderungen an die zu entwickelnde Methode, durch die sichergestellt werden sollen, dass die eingesetzten Steuerungsverfahren zu den produktionslogistischen Zielen und zu steuernden Prozessen des Produktionssystems passen. Dies erfordert eine Analyse des Stands der Erkenntnisse nach Methoden, durch die die Steuerung der Produktionslogistik modelliert werden kann, sodass eine Eignung der Verfahren überprüfbar und eine Auswahl passender Verfahren möglich ist. Um diese Aspekte im Stand der Erkenntnisse zu untersuchen, werden gezielt „Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik“ recherchiert und analysiert. Die Modellierung der Steuerungsverfahren stellt dabei die Grundlage zur Analyse dar. Die Konfiguration der Steuerungsverfahren umfasst deren methodische Beurteilung und gegebenenfalls notwendige Anpassung.

Das Anforderungscluster *Informationen & Informationsflüsse* (I) umfasst Anforderungen an die zu entwickelnde Methode, durch deren Erfüllung sowohl die richtigen Informationen im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt werden als auch eine ausreichend genaue Modellierung der zugehörigen Informationsflüsse sichergestellt werden sollen. Während die Berücksichtigung der richtigen Informationen teilweise bereits Gegenstand von Artefakten sein kann, die im Rahmen der Analyse von

„Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik“ identifiziert und beurteilt wurden, wird zur Modellierung von Informationsflüssen gezielt nach „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“ recherchiert und analysiert, inwieweit diese die gestellten Anforderungen erfüllen. Eine Fokussierung auf die digitale Transformation sei dadurch begründet, dass in dieser die Abbildung von Informationsflüssen von entscheidender Bedeutung ist und Aspekte der digitalen Transformation Beiträge zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik liefern können.

Das Anforderungscluster *Informationsqualität* (Q) umfasst Anforderungen an die zu entwickelnde Methode, die eine ausreichende Berücksichtigung der IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* durch eine Analyse und Harmonisierung sicherstellen soll. Dies erfolgt durch die Analyse und Beurteilung von identifizierten Artefakten, die im Rahmen einer Recherche nach „Methoden zur Analyse und Harmonisierung von Informationsqualitäten zur Steuerung der Produktionslogistik“ ermittelt werden.

Die ermittelten Gebiete „Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik“, „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“ und „Methoden zur Analyse und Harmonisierung von Informationsqualitäten zur Steuerung der Produktionslogistik“ werden nachfolgend als Forschungscluster bezeichnet. In Tabelle 3-1 ist eine zu erwartende Abdeckung der Anforderungen durch Artefakte in den Forschungsclustern dargestellt.

Tabelle 3-1: Erwartete Berücksichtigung von Anforderungen in den Forschungsclustern

Anforderung	Anforderung P-1	Anforderung P-2	Anforderung I-1	Anforderung I-2	Anforderung I-3	Anforderung I-4	Anforderung I-5	Anforderung I-6	Anforderung Q-1	Anforderung Q-2	Anforderung Q-3
Forschungs-cluster	1 / 2	1	2 / 1[5]	2	2	1 / 2	2	2	3	3	3

1 - „Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik“
2 - „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“
3 - „Methoden zur Analyse und Harmonisierung von Informationsqualitäten zur Steuerung der Produktionslogistik“

3.2 Analyse des Stands der Erkenntnisse in den Untersuchungsgebieten

Eine Beurteilung der in den Forschungsclustern identifizierten Methoden in Bezug auf die Anforderungserfüllung erfolgt jeweils durch eine von vier Ausprägungen:

(1) Anforderung erfüllt (dargestellt als vollständig ausgefüllter Kreis),
(2) Anforderung teilweise erfüllt (dargestellt als zur Hälfte ausgefüllter Kreis),
(3) Anforderung nicht erfüllt (dargestellt als nicht ausgefüllter Kreis) und

[5] Das Cluster 2 „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“ wird an dieser Stelle vor Cluster 1 „Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik“ aufgeführt, da vermutet wird, dass in Cluster 2 mehr Methoden identifiziert werden, die die Anforderung des Anforderungsclusters I erfüllen, als in Forschungscluster 1.

(4) Anforderung gefordert/vorausgesetzt (dargestellt als grau hinterlegtes Feld).

Eine Anforderung gilt als erfüllt, sofern im Rahmen der Methode konkret beschrieben wird, wie der durch die Anforderung spezifizierte Aspekt berücksichtigt werden kann. Anforderungen gelten als teilweise erfüllt, wenn im Rahmen der untersuchten Methoden der durch die Anforderung spezifizierte Aspekt zwar aufgegriffen und behandelt wird, jedoch der Umgang mit diesem Aspekt nicht konkret dargestellt wird. Zu dieser Ausprägung zählen unter anderem pauschale Verweise auf bestehende Artefakte, die sich eignen könnten, ohne die Verweise jedoch fundiert zu begründen. Zudem gelten Anforderungen als teilweise erfüllt, wenn sie nur bedingt die durch die Anforderung spezifizierten Aspekte abdecken. Wird eine Anforderung durch eine identifizierte Methode nicht berücksichtigt, so gilt diese Anforderung als nicht erfüllt. Die zusätzliche Ausprägung „Anforderung gefordert/vorausgesetzt" dient der Überprüfung der Relevanz der Anforderungen. Diese Ausprägung wird einer identifizierten Methode dann zugeordnet, wenn der Aspekt der Anforderung ausdrücklich als relevant erwähnt wird, indem es beispielsweise eine Voraussetzung zur Anwendung der Methode darstellt. Sobald eine identifizierte Methode eine Anforderung mindestens teilweise erfüllt, so gilt die Anforderung auch als gefordert/vorausgesetzt, sodass diese Ausprägung nicht nochmals gesondert ausgewiesen wird.

Die nachfolgend beschriebenen Methoden wurden mittels einer systematischen Literaturrecherche ermittelt. Als relevant wurden die identifizierten Methoden beurteilt, sodass sie in der nachfolgenden Analyse mit aufgenommen wurden, sofern sie einen Beitrag in Bezug auf die Anforderungserfüllung leisten. Eine Diskussion der Herkunft der im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden erfolgt in Kapitel 3.3.1.

Identifizierte Methoden, die sich mehr als nur einem Forschungscluster zuordnen lassen, werden in den jeweils später aufgeführten Forschungsclustern analysiert und beurteilt.

3.2.1 Methoden zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik

Ansatz zur PPS-Auswahl nach Wolfsgruber

Beschreibung der Methode

Wolfsgruber [WOL16] entwickelt das durch Schwarz [SCH98] eingeführte Konzept zur Konfiguration von PPS-Systemen weiter, um in Abhängigkeit der Fähigkeiten und Anforderungen des Produktionssystems eine optimale Konfiguration der PPS, bestehend aus PPS-Verfahren, Informationsverfügbarkeit und -qualität, zu bestimmen. Die Fähigkeiten und Anforderungen des Produktionssystems werden vor allem durch dessen Angebotsvariabilität und erforderliche Flexibilität charakterisiert. Die Angebotsvariabilität beinhaltet Auswirkungen durch beispielsweise Rüstzeiten, Maschinenstillstände und Qualitätsmängel der Produkte. Die erforderliche Flexibilität wird durch die von den Kunden geforderten Lieferzeiterwartungen bei unterschiedlichen Produktvariationen beschrieben. Durch ein PPS-System werden verschiedene Verfahren der PPS zusammengefasst, durch die die Planung und Steuerung des Produktionssystems erfolgt. In einem Informationssystem werden alle historischen, aktuellen und zukunftsorientierten Statusinformationen gespeichert, die die Verfahren der PPS zur Entscheidungsfindung benötigen. Zudem werden in diesem Ansatz noch sogenannte indirekte Faktoren berücksichtigt, die unterschiedliche für die Umsetzung der PPS-Verfahren erforderliche Fähigkeiten und Wissen der Mitarbeitenden berücksichtigen. Durch eine simulationsbasierte Evaluation verschiedener Variationen der PPS-Verfahren, der Informationsverfügbarkeit (umfasst die IQ-Dimensionen *Granularität* teilweise und die IQ-Dimension *Frequenz* vollständig) und Informationsqualität (entspricht der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*) sowie den internen Faktoren, wird schließlich die Leistungsfähigkeit des Systems beurteilt. Als optimale Konfiguration der Ausprägungen wird diejenige

angesehen, bei der ein Kostenminimum entsteht. In Abbildung 3-1 ist der von Wolfsgruber vorgeschlagene Ansatz zur Konfiguration der PPS dargestellt.

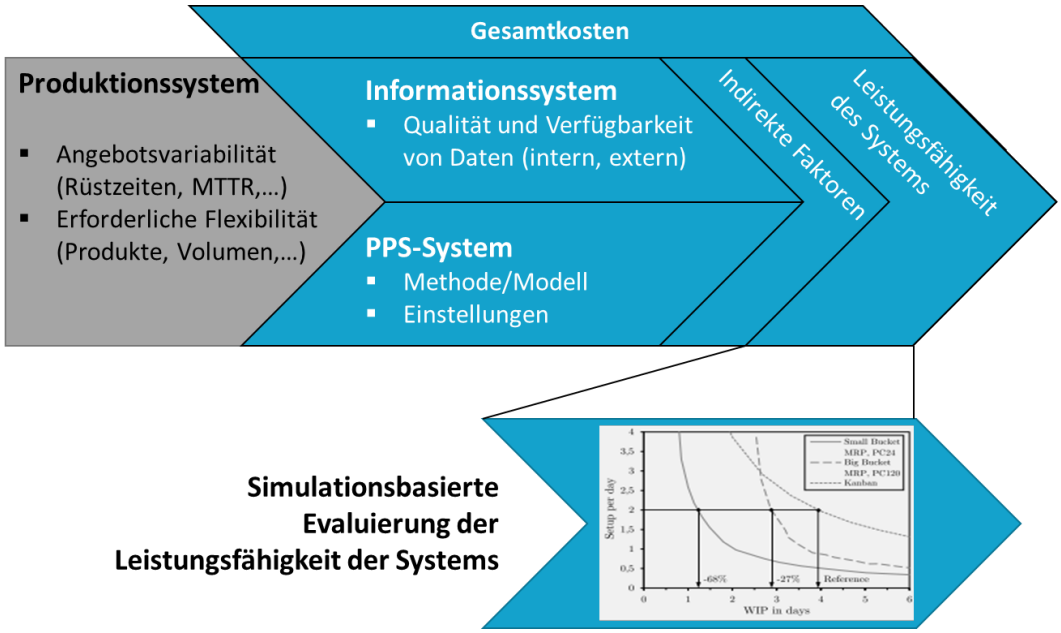

Abbildung 3-1: Methode zur Auswahl von PPS-Verfahren nach [WOL16, S. 146]

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Bei einer rein numerischen Abbildung der Fähigkeiten und Anforderungen des Produktionssystems durch eine begrenzte Anzahl an Kennzahlen werden viele Aspekte, wie direkte Abhängigkeiten zwischen Produktionsschritten, die insbesondere für die Steuerung der Produktionslogistik relevant sind, nicht abgebildet. Somit ist der zu steuernde Prozess nicht angemessen modelliert, weshalb Anforderung P-1 nur als teilweise erfüllt beurteilt wird. Durch die simulationsbasierte Evaluierung, welches Verfahren der PPS optimal zur Planung und Steuerung der Produktionssystems geeignet ist, wird Anforderung P-2 vollständig erfüllt. In der Methode nach Wolfsgruber werden Informationsflüsse nicht abgebildet, daher werden die Anforderungen I-1 bis I-6 nicht erfüllt. Durch die Variation der Informationsverfügbarkeit und -qualität werden die IQ-Dimensionen Granularität, Frequenz und Verlässlichkeit berücksichtigt und mit den Anforderungen des Produktionssystems und der PPS-Verfahren harmonisiert. Dies erfüllt zwar die Zielstellung der Anforderungen Q-1 bis Q-3. In diesem Zusammenhang wird jedoch nicht beschrieben, wie eine passende Ausprägung der IQ-Dimensionen strukturiert durch die Simulationsexperimente ermittelt werden kann. Aus diesem Grund werden die Anforderungen Q-1 bis Q-3 nur teilweise erfüllt.

Tabelle 3-2: Anforderungserfüllung der Methode zur Auswahl von PPS-Verfahren

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[WOL16]	◑	●	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑

Methode zur Konfiguration der Fertigungssteuerung nach Münzberg et al.

Beschreibung der Methode

Die wissenschaftlichen Arbeiten von Münzberg et al., die größtenteils in [MUNY09; MÜNY10; NMK09; WRN14] beschrieben sind, behandeln eine Methode zur Auswahl und Konfiguration von Fertigungssteuerungsverfahren. Die vorgestellte Methode besteht dabei aus den in Abbildung 3-2 durchzuführenden Schritten. Als theoretische Grundlage zur Auswahl eines passenden Fertigungssteuerungsverfahrens nach definierten Zielstellungen dient das Modell der Fertigungssteuerung nach Lödding[6] [LÖD12]. Dadurch berücksichtigt die Methode die im Modell der Fertigungssteuerung abgebildeten Aufgaben (siehe Abbildung 2-6) Auftragsgenerierung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung.

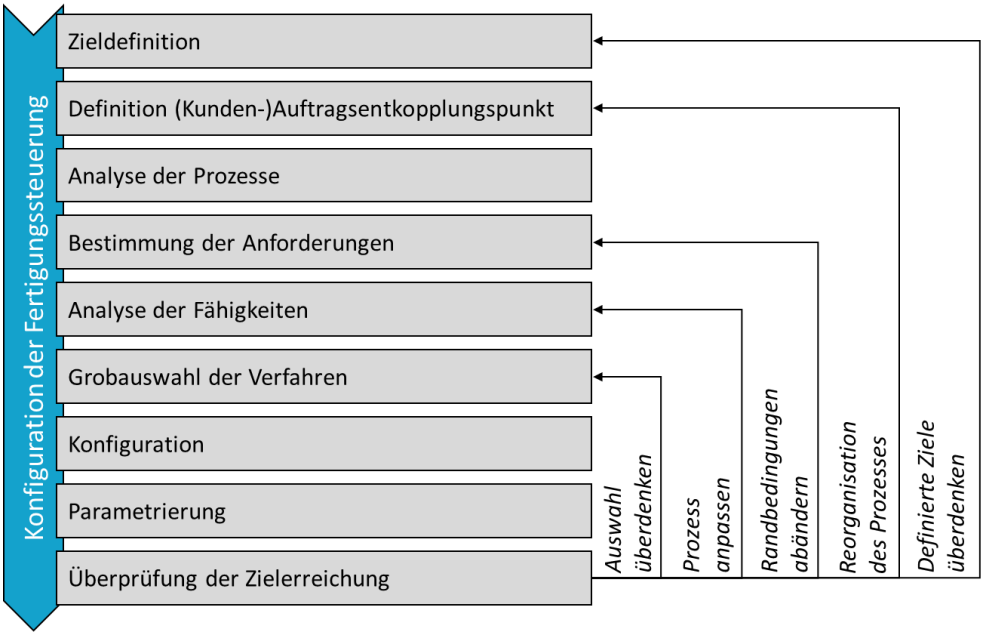

Abbildung 3-2: Vorgehen zur Konfiguration der Fertigungssteuerung nach [MUNY09]

Der Ausgangspunkt, um in einem Anwendungsfall die Verfahren zur Steuerung der Fertigung zu konfigurieren, ist die Festlegung von zu erreichenden Zielen (Zieldefinition) sowie die Charakterisierung des Produktionssystems (Definition des (Kunden-)Auftragsentkopplungspunkts und Analyse der Prozesse) und der Kundenanforderungen (Bestimmung der Anforderung). Die Charakterisierung erfolgt durch eine Auswahl von möglichen Attributen verschiedener Kriterien in separaten, durch die Autoren erstellten, morphologischen Kästen. Zur systematischen Auswahl passender Verfahren der jeweiligen Aufgaben der Fertigungssteuerung (Auftragserzeugung, Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung, Kapazitätssteuerung) ist eine Eignungsanalyse (Analyse der Fähigkeiten) vorgesehen, durch die bewertet wird, wie gut ein Verfahren zu den Anforderungen und Charakteristika des Produktionssystems passt. Dazu haben die Autoren einen, jedoch nicht frei zugänglichen, Katalog entwickelt, der bekannte Steuerungsverfahren beinhaltet und beschreibt. Für jedes dieser Steuerungsverfahren wurden die Kriterien „notwendige Voraussetzungen“, „unterstützte produktionslogistische Ziele“ sowie deren „Stärken“ und „Schwächen“ definiert. Diese Kriterien werden schließlich mit den zuvor aufgenommenen Anforderungen und Fähigkeiten verglichen. Das Ergebnis dieses Vergleichs ist die Identifikation von passenden Steuerungsverfahren. Nach der Grobauswahl der Steuerungsverfahren ist im Rahmen der vorgestellten Methode zu überprüfen, ob diese zueinander

[6] Siehe Kapitel 2.3.3

kompatibel und konsistent zu den definierten Zielen sind (Konfiguration). Ist dies der Fall, so sind die Verfahren zu parametrisieren und zu implementieren. Ist dies erfolgt, so ist zu überprüfen, ob die zuvor definierten Ziele erreicht werden konnten oder ob gegebenenfalls Anpassungen vorgenommen werden müssen.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Die von Münzberg et al. vorgestellte Methode zur Auswahl und Konfiguration von Fertigungssteuerungsverfahren bietet eine strukturierte Vorgehensweise zur Identifikation passender Verfahren der Steuerung der Produktionslogistik im Bereich der Fertigung. Die Modellierung der zu steuernden Prozesse ist zwar auf einem sehr abstrakten Niveau, sodass gegebenenfalls zu beabsichtigende Restriktionen zwischen einzelnen Prozessschritten nicht berücksichtigt werden, jedoch wird durch die Charakterisierung des Produktionssystems und der Anforderungen der Kunden Anforderung P-1 erfüllt. Auch die Anforderung P-2, die die Zielstellung der vorgestellten Methode nach Münzberg et al. widerspiegelt, wird vollständig erfüllt. Da keine Informationsflüsse modelliert werden, werden die Anforderungen I-1 bis I-6 nicht erfüllt. Damit die eingesetzten Steuerungsverfahren auch tatsächlich einen positiven Beitrag zur logistischen Zielerreichung beitragen, setzen die Autoren die dafür notwendigen Daten in „ausreichender Granularität und Qualität" voraus [MUNY09, S. 1377]. Somit fordern sie eine Erfüllung der Anforderungen Q-1 bis Q-3. Eine Zusammenfassung der Bewertung der Anforderungserfüllung ist in Tabelle 3-3 gegeben.

Tabelle 3-3: Anforderungserfüllung der Methode zur Konfiguration der Fertigungssteuerung

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[MUNY09]	●	●	○	○	○	○	○	○			

Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung nach Schuh et al.

Beschreibung der Methode

Die Komplexität der Auswahl und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren werden auch von Schuh et al. thematisiert und in den wissenschaftlichen Arbeiten [SKP+10; SSB+11; SPF+12; SPT+12; SPH+13] behandelt. Damit die Steuerung der Produktionslogistik stets an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden kann, haben Schuh et al. das Entscheidungshilfsmittel *wertstromorientierte Produktionssteuerung* (WoPS) entwickelt, mit dessen Hilfe die aktuelle Komplexität verschiedener Konfigurationen der Produktionssteuerung dargestellt und analysiert werden kann. Durch die wertstromorientierte Produktionssteuerung kann der Einfluss einer gewählten Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren auf die logistischen Kennzahlen Bestand, Termintreue, Durchlaufzeit und Auslastung mittels Simulation analysiert werden. Dazu haben die Autoren das in Abbildung 3-3 dargestellte dreischichtige Modell entwickelt, das im Rahmen einer vierstufigen Methode gefüllt, simuliert und ausgewertet wird:

1. Zunächst ist der zu untersuchende Produktionsprozess in einzelne zu steuernde Abschnitte zu unterteilen, die durch Pufferläger voneinander getrennt werden. Bei der Dimensionierung der Pufferläger sei jedoch ein Minimum anzustreben, aufgrund ihres Einflusses auf die Durchlaufzeit und Bestandskosten. Anschließend ist der (Kunden-)Auftragseindringungspunkt festzulegen und zu definieren, ob in den einzelnen Steuerungsabschnitten Push- oder Pull-Verfahren eingesetzt werden sollen. Die Modellierung des zugehörigen Prozesses eines Steuerungsabschnittes erfolgt in der untersten Schicht *Wertstrom* des dreischichtigen Modells.

2. Zur Überprüfung der Eignung zu konfigurierender Steuerungsverfahren ist anschließend ein passender Detailgrad zu ermitteln, auf dem die logistische Leistungsfähigkeit des betrachteten Steuerungsabschnittes abgebildet wird.
3. Im dritten Schritt sind die zu analysierenden Steuerungsverfahren zu modellieren, inklusive ihrer Verbindung zu den jeweiligen Prozessschritten. Dadurch wird repräsentiert, von wo die Verfahren Informationen benötigen und an welchen Stellen im Prozess die Steuerungsentscheidungen wirken. Diese Modellierung der Steuerungsverfahren erfolgt in der mittleren Schicht *Steuerung der Produktionslogistik* des dreischichtigen Modells. Zudem werden in der obersten Schicht *Stammdaten und Bewegungsdaten* notwendige Stamm- und Bewegungsdaten aufgeführt und mit den Steuerungsverfahren verbunden, die diese zur Entscheidungsgenerierung benötigen.
4. Abschließend erfolgt eine Simulation der Steuerungsverfahren sowie eine Bewertung der Eignung der konfigurierten Steuerungsverfahren. Dabei wird ein Simulationsmodell automatisch nach Einlesen der erforderlichen Daten auf Basis der Modellierung generiert.

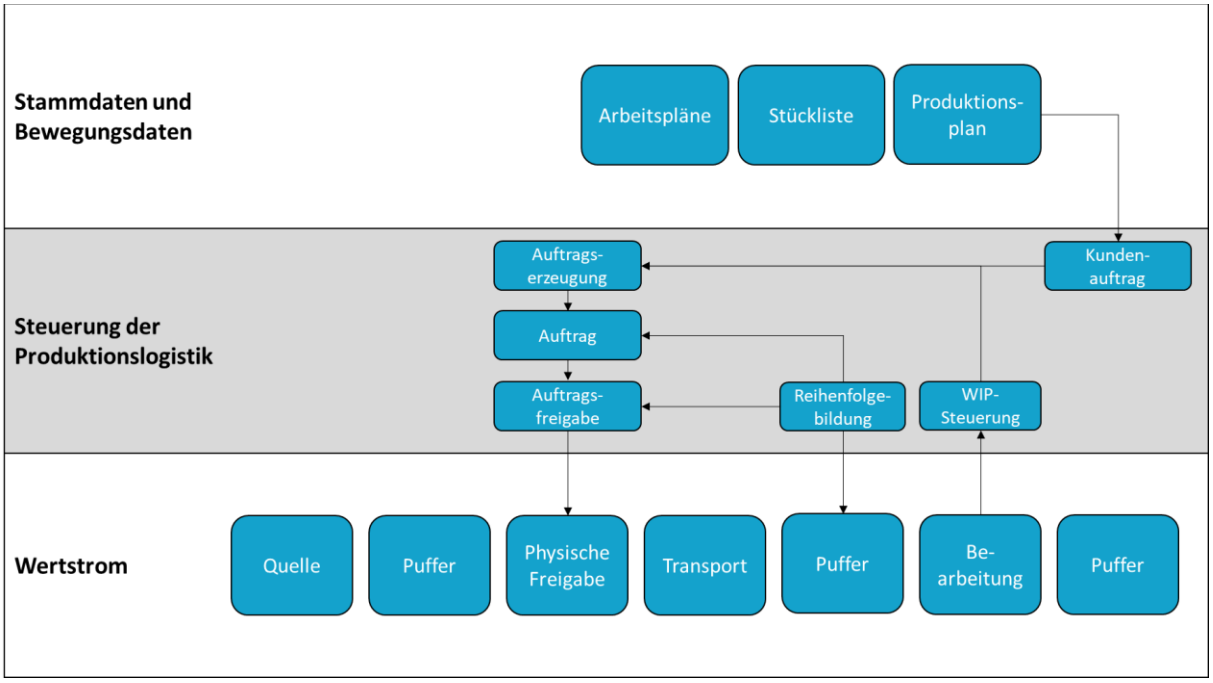

Abbildung 3-3: Modellierung der *wertstromorientierten Konfiguration der Produktionssteuerung*

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

In der von Schuh et al. vorgestellten Methode mit zugehörigem Simulationsmodell bildet die Modellierung des zu steuernden Produktionsprozesses die Grundlage für eine passende Konfiguration der Steuerungsverfahren. Durch diese Modellierung wird Anforderung P-1 erfüllt. Durch die Möglichkeit einer Simulation verschiedener Steuerungsverfahren und einer Analyse ihrer Eignung wird auch Anforderung P-2 erfüllt. Da im Rahmen der Modellierung der Steuerungsverfahren auch die notwendigen Informationsflüsse modelliert werden sowie definiert wird, welche Informationen zur Bearbeitung der Steuerungsverfahren berücksichtigt werden sollen, werden die Anforderungen I-1 und I-5 erfüllt. Dadurch, dass die Verfahren lediglich als Platzhalter eingefügt werden, ist die Verarbeitung der Informationen und die Generierung der Steuerungsentscheidungen nicht nachvollziehbar. Somit wird Anforderung I-4 nur teilweise erfüllt. Da die Modellierung technologieunabhängig ist, werden die Anforderungen I-2, I-3 und I-6 nicht erfüllt. Die Anforderungen Q-1 bis Q-3 werden im Rahmen der Methode nicht berücksichtigt und somit auch nicht erfüllt.

Zudem werden diese Anforderungen auch nicht explizit vorausgesetzt. In Tabelle 3-4 ist die Bewertung der von Schuh et al. vorgestellte Methode in Bezug auf die Anforderungserfüllung zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Anforderungserfüllung der *Wertstromorientierten Konfiguration der Produktionssteuerung*

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[SSB+11]	●	●	●	○	○	◑	●	○	○	○	○

3.2.2 Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse

Wertstromanalyse 4.0 und Wertstromdesign 4.0

Beschreibung der Methode

Die Autoren Meudt et al. haben die aus dem Lean-Management stammende Wertstrommethode zur Wertstrommethode 4.0 weiterentwickelt [HMS+18; MRB+16; MMA17; VDM18]. Durch Anwendung dieser Methode sollen Produktions- und interne Logistikprozesse zunächst durch Prinzipien des Lean-Managements und anschließend durch Maßnahmen der Digitalisierung effizienter gestaltet werden. Die von den Autoren entwickelte Methode besteht dabei aus den drei Schritten (A) Definition der wertschöpfenden Elemente des Produktes (bestehend aus Hardware, Software, Service und Daten), (B) Analyse des aktuellen Stands des betrachteten Systems mittels der Wertstromanalyse 4.0 und (C) Definition eines verbesserten künftigen Zustands des abzubildenden Systems durch Anwendung des Wertstromdesigns 4.0. Das Kernelement der entwickelten Methode ist ein erweitertes Wertstromdiagramm (siehe Abbildung 3-4 links), in dem neben dem Materialfluss ein besonderer Fokus auf die Abbildung von Informationsflüssen gelegt wird. Für die in dieser Arbeit zu bearbeitende Problemstellung sind insbesondere die Schritte (B) Analyse des aktuellen Stands und (C) Definition eines verbesserten künftigen Stands von besonderer Relevanz. Die Analyse des aktuellen Stands erfolgt anhand von sechs Schritten: (B.1) Zunächst ist eine klassische Wertstromanalyse durchzuführen. Dies dient zum einen der Generierung eines generellen Verständnisses des Wertstroms und ermöglicht die Identifikation von Verbesserungspotenzialen des Materialflusses. Zum anderen werden in diesem Rahmen alle relevanten Daten erfasst, die durch einen Prozessschritt erzeugt beziehungsweise von diesen benötigt werden. Zur Modellierung der Informationen wurde die Notation im Wertstromdiagramm erweitert (siehe Abbildung 3-4 rechts), sodass für jede Information die Häufigkeit der Erfassung, die Art der Erfassung (manuell, teilautomatisiert, automatisiert) sowie ihr aktueller Ist-Wert aufgenommen werden kann. Im nächsten Schritt (B.2) wird das Wertstromdiagramm erweitert, um die Speicherung der zuvor erfassten Informationen abzubilden. Dazu sind zunächst alle Speichermedien, die zur Erfassung von Informationen eingesetzt werden, aufzunehmen und in Form von Swimlanes unterhalb des Materialflusses zu ergänzen. Im dritten Schritt (B.3) werden die unterhalb der Prozesskästen aufgeführten Informationen durch Verbindungen mit den Swimlanes der Speichermedien verbunden. Anschließend (B.4) wird der Zweck der Erfassung jeder Information durch ihre Nutzung repräsentiert. Dazu werden unterhalb der Speichermedien weitere Swimlanes im Wertstromdiagramm integriert, die die jeweilige Nutzung repräsentieren. Eine Modellierung der Nutzung einer Information erfolgt durch eine gestrichelte Verlängerung der modellierten Datenspeicherung zur entsprechenden Swimlane der Nutzung. Nach vollständiger Modellierung der Informationen und ihrer zugehörigen Flüsse erfolgt eine Analyse auf informationslogistische Verschwendungsarten (B.5). Diese Verschwendungsarten umfassen die Datenauswahl, die Datenqualität (beispielsweise nach Inhalt, Bedeutung, Herkunft, Granularität,

Erfassungsfrequenz und Konsistenz), den Prozess der Datenerfassung, die Datenübertragung, die Dauer bis zur Verarbeitung und rechtzeitige Verfügbarkeit, die Auffindbarkeit von Daten, die Analyse der Daten und ob die Daten in eine Entscheidungsfindung mit einbezogen werden [MLM16, S. 757]. Darauf aufbauend lassen sich schließlich Verbesserungspotenziale identifizieren (B.6), die nach ihrer Relevanz zu bewerten sind, um diese nach und nach umzusetzen.

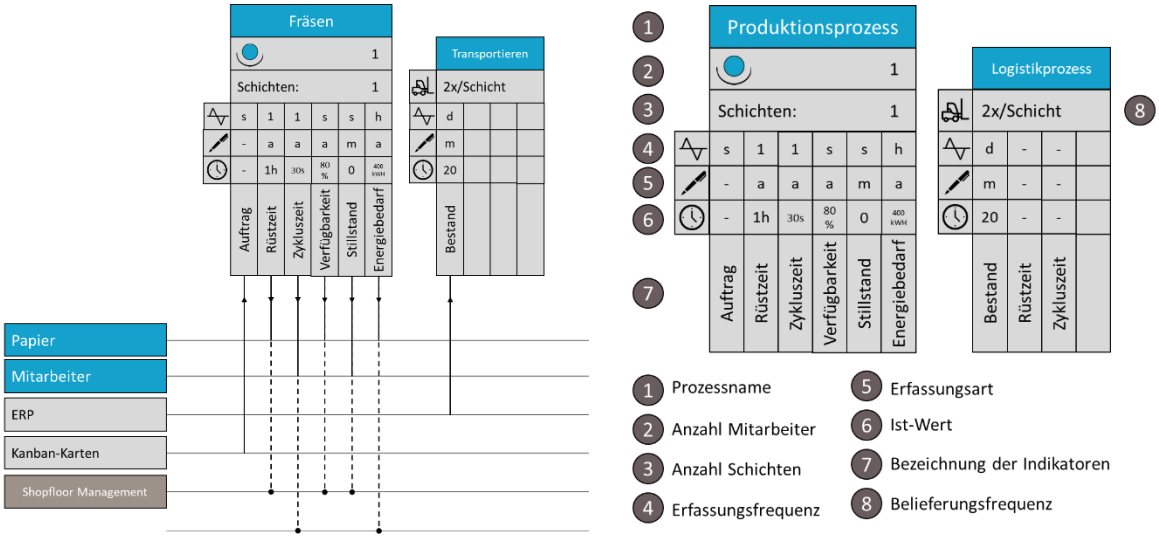

Abbildung 3-4: Erweitertes Wertstromdiagramm & zugehörige Symbole nach [MMA17, S. 415]

Aufbauend auf den in der Wertstromanalyse 4.0 identifizierten Verbesserungspotenzialen soll das Wertstromdesign 4.0 dabei unterstützen, diese in konkrete und implementierbare Lösungen umzusetzen. Dazu ist im ersten von drei Schritten zunächst durch klassische Verbesserungsansätze des Materialflusses der Wertstrom in Fluss zu bringen (C.1). Darauf aufbauend erfolgt eine digitale Verbesserung des Materialflusses (C.2), indem Ursachen analysiert werden, die einen kontinuierlichen Warenfluss verhindern, digitale Lösungen identifiziert werden, durch die dies behoben werden kann sowie der Etablierung von digital unterstützenden Pull-Systemen, wo keine kontinuierliche Produktion möglich ist. Abschließend (C.3) sind Produkt- und Informationsfluss zu integrieren. Dafür sind für jeden Prozessschritt die Informationsanforderungen zu bestimmen, durch Unterstützungsprozesse geforderte Anforderungen an Informationen aus den Prozessschritten zu ermitteln, die Daten, die durch den Prozessschritt bereitgestellt werden müssen, inklusive geeigneter Speichermedien, zu definieren, und dies durch eine Verlinkung der Informationsflüsse zwischen Prozessschritten, Speichermedien und der Datennutzung im Wertstromdiagramm darzustellen.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung:

Durch die Modellierung des Produktions- und Logistikprozesses erfüllt die von Meudt et al. vorgestellte Methode die Anforderung P-1 vollkommen. Eine systematische Analyse der eingesetzten Steuerungsverfahren (Anforderung P-2) erfolgt jedoch nicht. Eine Identifikation der im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik benötigten und an anforderungsgerechten Punkten im Produktionsprozess zu erfassenden Informationen sieht die vorgestellte Methode zwar vor, spezifiziert ein mögliches Vorgehen jedoch nicht, wodurch Anforderung I-1 nur teilweise erfüllt wird. Eine Modellierung der Technologien zur Erfassung der Informationen ist im erweiterten Wertstromdiagramm nicht vorgesehen, dabei wird lediglich die Erfassungsart (manuell, teilautomatisiert, automatisiert) unterschieden. Dadurch wird Anforderung I-2 teilweise erfüllt. Anforderung I-3 wird vollkommen erfüllt, da die Speichermedien der Informationen explizit erfasst und modelliert werden. Eine Modellierung der Verarbeitung der Informationen (I-4) ist nicht

vorgesehen, jedoch ihre Nutzung, wodurch Anforderung I-5 erfüllt wird. Technologien zur Übertragung der Informationen an den Nutzer werden, ähnlich wie bei der Erfassung, nicht modelliert (Anforderung I-6), zudem wird bei einer Übertragung auch der Automatisierungsgrad der Information nicht berücksichtigt. Eine Berücksichtigung der Anforderungen an die IQ-Dimensionen (Anforderungen Q-1 bis Q-3) erfolgt im Rahmen der Analyse informationslogistischer Verschwendungsarten, jedoch erfolgt keine Handlungsempfehlung, wie diese zu analysieren und zu harmonisieren sind. In Tabelle 3-5 ist eine Zusammenfassung der Bewertung der Anforderungserfüllt dargestellt.

Tabelle 3-5: Anforderungserfüllung der Wertstromanalyse 4.0 und Wertstromdesign 4.0

Anforderung	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[HMS+18; MMA17]	●	○	◑	◑	●	○	●	○	◑	◑	◑

Prozessmodellierung und Analyse unter Berücksichtigung von Anforderungen durch Industrie 4.0 nach Lewin et al.

Beschreibung der Methode

Lewin et al. [LVF17] entwickelten eine Methode zur Modellierung und Analyse von (Materialfluss-)Prozessen, durch die relevante Aspekte zur digitalen Transformation von Prozessen abgebildet werden können. Diese Methode besteht aus den fünf Schritten (1) *Durchführung der klassischen Wertstromanalyse und Identifikation von Verbesserungspotenzialen*, (2) *Erweiterung des Wertstromdiagramms um Swimlanes zur Modellierung verschiedener Speichermedien und der Datennutzung*, (3) *Analyse von Prozessinformationen, Informationsflüssen und der Datennutzung*, (4) *Entwicklung von Verbesserungsmöglichkeiten für die generelle Produktion und die Informationsflüsse* sowie (5) *Detailplanung*. Zentrales Element dieser Methode ist eine Erweiterung des im Rahmen der Methodenentwicklung von Meudt et al. [MMA17] und Hartmann et al. [HMS+18] verwendeten Wertstromdiagramms. Dabei wurden alle Elemente des Wertstromdiagramms beibehalten und insbesondere um technische Aspekte der Informationsflüsse erweitert, durch die mögliche Verbesserungspotenziale leichter identifiziert werden können. So wurden unter anderem Symbole eingefügt, durch die Technologien zur Datenerfassung und Datenübertragung modelliert werden können. Auf die Analyse von Schnittstellen zwischen unterschiedlichen IT-Systemen wird detailliert hingewiesen und Aspekte der IT-Sicherheit werden berücksichtigt. Zudem wird eine Information detaillierter beschrieben, indem ihr ein Wert zwischen eins und sechs zugeordnet wird, der ihr eine entsprechende Hierarchieebene des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0) zuordnet. Zudem wurde die Möglichkeit eingeführt, intelligente Objekte zu modellieren, die mit dem Wertstrom interagieren.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung:

Da die von Lewin et al. vorgestellte Methode das bereits von Meudt et al. [MMA17] und Hartmann et al. [HMS+18] erweiterte Wertstromdiagramm als zentrales Element verwendet, unterscheidet sich die Methode nur geringfügig in der Anforderungserfüllung. Auch wenn einige Aspekte nicht so detailliert wie bei Meudt et al. und Hartmann et al. angesprochen werden, so bietet das Diagramm dennoch die Möglichkeit diese Anforderungen zu erfüllen. Durch die Möglichkeit einer Modellierung der Technologien zur Datenerfassung und Datenübertragung erfüllt die von Lewin et al. eingeführte Methode im Vergleich zu der Methode von Meudt et al. zusätzlich die Anforderungen I-2 und I-6.

Tabelle 3-6: Anforderungserfüllung durch die Prozessmodellierung und Analyse unter Berücksichtigung von Anforderung durch Industrie 4.0

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[LVF17]	●	○	◑	●	●	○	●	●	◑	◑	◑

Informationsstromanalyse (Information stream Mapping) nach Roh

Beschreibung der Methode

Roh [RKW19; ROH19] stellt im Rahmen seiner Dissertation über „Methoden zur datengetriebenen Lokalisierung des Verbesserungspotentials in Produktionsabläufen“ die sogenannte Informationsstromanalyse vor. Diese hat das Ziel, effizientere Informationsströme in Produktionsabläufen zu schaffen, indem ein strukturiertes, nicht-heuristisches Vorgehen angewendet wird, welches eine visuelle Darstellung und Analyse des Ist-Zustandes ermöglicht, um darauf aufbauend Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten [ROH19, S. 133]. Das entwickelte Vorgehen zur Analyse der Informationsströme besteht aus vier Schritten:

(1) *Visualisierung der zugrundeliegenden Prozesse:* Zunächst werden in Anlehnung an die Vorgehensweise der Wertstrommethode die unterschiedlichen Teilschritte (sowohl Produktions- als auch Unterstützungsprozesse) eines Produktionsablaufs entgegengesetzt zum Materialfluss erfasst. Dabei werden rein die Prozessschritte erfasst, ohne Daten über deren Leistung aufzunehmen.

(2) *Erfassung des Informationsstroms:* Aufbauend auf den erfassten Schritten des Produktionsablaufs werden durch Leitfragen unterstützte Interviews mit Mitarbeitenden geführt, die bei der Aufnahme und Bewertung der Informationsflüsse unterstützen sollen. Die Leitfragen decken dabei Aspekte zum Informationsinhalt, Ziel und Herkunft der Information, Medium zum Transport der Information, Notwendigkeit der Rückfrage nach einer Informationsübertragung, Verzögerung in der Informationsbereitstellung sowie den Automatisierungsgrad der Informationsübertragung ab.

(3) *Darstellung der Informationsströme*: Die Ergebnisse der Interviews werden in *„vereinfachter Weise“* [ROH19, S. 136] in Sequenzdiagrammen, die parallel zum aufgenommenen Produktionsablauf verlaufen, modelliert. Diese wird als Informationsstromkarte bezeichnet. Dazu werden alle Teilnehmer (sowohl Systeme als auch Menschen) als Kommunikationspartner in der Informationsstromkarte eingezeichnet. Durch horizontale Verbindungspfeile mit entsprechender Bezeichnung einer Information wird der Informationsaustausch dargestellt. Eine vertikale Linie entlang eines Kommunikationspartners verdeutlicht die Verarbeitung einer Information. Die vollständige Verarbeitung einer Information wird als Meilenstein gekennzeichnet.

(4) *Bewertung der Informationsflüsse mit Indikatoren*: Abschließend erfolgt eine Bewertung der Informationsflüsse mittels eingeführter Leistungsindikatoren, die auf Verbesserungspotenziale hinweisen sollen. Diese werden durch extra eingefügte Symbole verdeutlicht.

In Abbildung 3-5 ist eine Informationsstromkarte beispielhaft dargestellt.

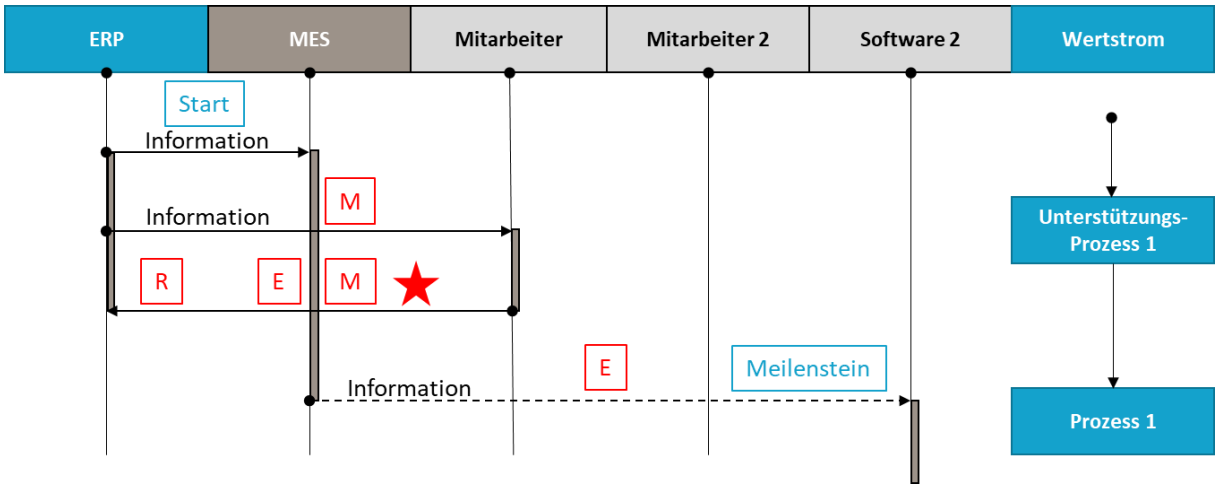

Abbildung 3-5: Informationsstromkarte nach [RKW19, S. 9]

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung:

Durch die Aufnahme des Produktionsablaufes wird Anforderung P-1 erfüllt. Eine systematische Analyse der Eignung der eingesetzten Verfahren (Anforderung P-2) erfolgt nicht. Die von Roh entwickelte Vorgehensweise in Verbindung mit der zugehörigen Informationsstromkarte berücksichtigt im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Methoden die Reihenfolge der Informationsverarbeitung. Durch die Interaktion der auszutauschenden Informationen zwischen verschiedenen Systemen (und Speichermedien) sowie die Kennzeichnung einer Verarbeitung werden die Anforderungen I-3 und I-4 vollständig erfüllt. Zudem werden die Informationsflüsse zwar parallel zum Produktionsablauf modelliert, eine direkte Verbindung zum Prozess besteht jedoch nicht. Zudem werden viele Informationen nur implizit im Rahmen der Interviews erfasst und nicht modelliert. Aus diesem Grund werden die Anforderungen I-1, I-2, I-5 und I-6 nur teilweise erfüllt. Eine Berücksichtigung der Informationsqualität entsprechend der IQ-Dimensionen erfolgt nur durch die Analyse von Verzögerungen im Interview. Somit wird aus diesem Anforderungscluster nur Anforderung Q-2 teilweise erfüllt. In Tabelle 3-8 ist die Erfüllung der Anforderungen durch Roh zusammengefasst.

Tabelle 3-7: Anforderungserfüllung durch die Informationsstromanalyse

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[ROH19]	●	○	◑	◑	●	●	◑	◑	○	◑	○

Konzept für ein Unterstützungssystem zur digitalen Produktionsauftragsabwicklung nach Schäfers et al.

Beschreibung des Konzepts

Schäfers et al. [SMN19A; SMN19B] beschreiben ein Konzept zur digitalen Unterstützung der Produktionsauftragsabwicklung in der Produktionsumgebung auf Basis von Rückmeldedaten, um aufbauend auf diesen Steuerungsentscheidungen für die Produktionslogistik generieren zu können. Das beschriebene Konzept besteht aus den drei Modulen *Datenerfassung*, *Datenverarbeitung* und *produktionsnahe Informationsbereitstellung*. Zur Spezifizierung der Module wurden verschiedene Leitfragen gestellt, die sich als eine grobe Handlungsempfehlung interpretieren lassen können, um ein solches Konzept umzusetzen.

Als Ausgangslage der *Datenerfassung* wird ein profundes Verständnis der aktuellen Situation des Untersuchungsbereichs vorausgesetzt. Dies dient dazu, um die beiden Fragen „Welche Daten sollen an welchen Punkten im Prozess beziehungsweise System erfasst werden?“ und „Durch welche Technologie sollen die Daten erfasst werden?“ zu beantworten. Als generelle Regel erklären die Autoren, dass je mehr Rückmeldedaten erfasst werden, desto transparenter wird der betrachtete Untersuchungsbereich. Hierbei sei jedoch zu beachten, dass jede Datenerfassung mit monetären Ausgaben verbunden ist, die durch eine Datennutzung gerechtfertigt sein muss [SMN19A, S. 29]. Dabei sei insbesondere der Aufwand zur Datenerfassung der operativen Mitarbeitenden zu beachten. Sollte die Erfassung zu aufwändig sein, könnten die Mitarbeitenden eine negative Haltung dieser gegenüber entwickeln, was zu einer unsachgemäßen Datenerfassung führen könnte, dessen Folge ein Mangel der Informationsqualität wäre. Im Rahmen der *Datenverarbeitung* werden die beiden Leitfragen „Wo sollen die erfassten Daten gespeichert werden?“ und „Wie sollen die Daten weiter verarbeitete werden?“ beantwortet. Bei der Beantwortung dieser Fragen weisen die Autoren explizit auf die Analyse von einzusetzenden Steuerungsverfahren hin. So sollte insbesondere bei der Speicherung der Daten darauf geachtet werden, welche Verfahren diese Informationen benötigen und wie man eine leichte Zugänglichkeit ermöglicht. Die Frage der Verarbeitung der Informationen bezieht sich dabei auf die Festlegung der einzusetzenden Steuerungsverfahren. Damit die verarbeiteten Daten nutzenbringend eingesetzt werden können, sind im Rahmen der *produktionsnahen Informationsbereitstellung* die Fragen zu beantworten „Wer ist der Empfänger der Information?“, „Welche Informationen sollen zur Verfügung gestellt werden?“ sowie „Welche Technologien sollen zur Informationsbereitstellung zum Einsatz kommen?“. Durch die Beantwortung dieser Fragen soll sichergestellt werden, dass die notwendigen Informationen im richtigen Umfang zur Umsetzung der Steuerungsentscheidungen im Produktionsablauf bereitstehen.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Das durch die Autoren vorgestellte Konzept zur Unterstützung der digitalen Produktionsauftragsverfolgung stellt zwar keine Methode im eigentlichen Sinne dar, die aufgestellten Fragen innerhalb der Module können jedoch als Aspekte aufgefasst werden, die im Rahmen einer Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik beachtet werden sollten. Da es sich um keine Methode handelt, werden keine Anforderungen erfüllt. Einige Anforderungen werden jedoch explizit vorausgesetzt oder durch ihre Berücksichtigung durch die Fragen implizit gefordert. Da die Grundlage ein profundes Prozessverständnis ist, wird die Erfüllung von Anforderung P-1 gefordert. Zudem werden alle Anforderungen des Anforderungsclusters Information & Informationsflüsse durch die Fragen der einzelnen Module berücksichtigt. Im Rahmen des Konzeptes sprechen die Autoren von einer möglichen Steigerung der Granularität und Qualität der Informationen. Als Granularität bezeichnen sie die Wahl der Anzahl an Datenerfassungspunkten, durch die der Produktionsdurchlauf auf unterschiedlichen Granularitätsstufen dargestellt werden kann. Die Qualität der Informationen bezieht sich auf die Möglichkeit der Minimierung des zeitlichen Versatzes zwischen Informationserfassung, -verarbeitung und -bereitstellung und umfasst somit Aspekte der IQ-Dimension *Frequenz*. Tabelle 3-8 fasst die durch die Autoren geforderten beziehungsweise vorausgesetzten Anforderungen zusammen.

Tabelle 3-8: Anforderungserfüllung des Konzepts für ein Unterstützungssystem zur digitalen Produktionsauftragsabwicklung

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[SMN19A]		○									○

Methode zur Visualisierung, Analyse und Bewertung von Informationsprozessen in produzierenden Unternehmen nach Molenda et al.

Beschreibung der Methode

Die Autoren Molenda et al. [MJH+19] erweitern ebenfalls das von Meudt et al. [MMA17] und Hartmann et al. [HMS+18] eingeführte Wertstromdiagramm, um Informationsflüsse detaillierter abbilden zu können. Dazu strukturieren sie das Wertstromdiagramm derart, dass 13 Aspekte abgebildet werden können. In Abbildung 3-6 ist das erweiterte Wertstromdiagramm dargestellt.

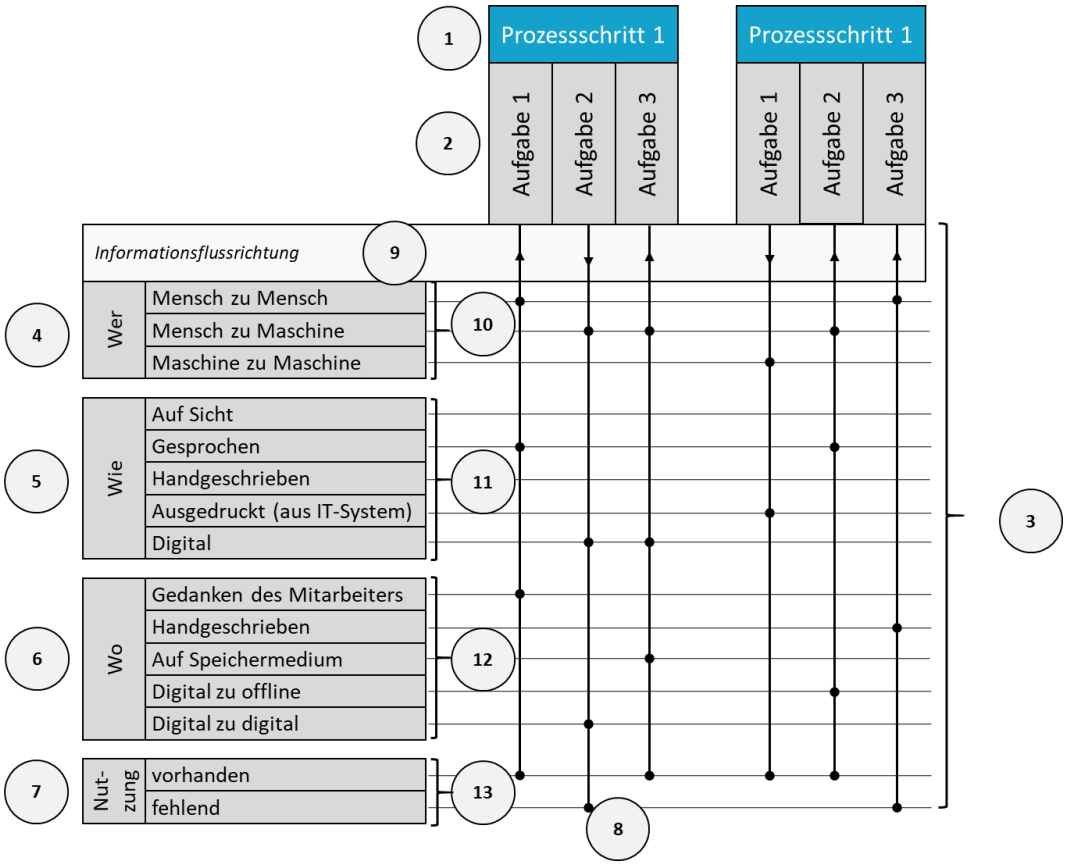

Abbildung 3-6: Erweiterter Wertstrom nach [MJH+19]

In diesem Wertstromdiagramm wird ein Produktionsschritt (Bezeichnung 1) nicht nur als Zusammenfassung einzelner Tätigkeiten aufgeführt, sondern diese Tätigkeiten (Bezeichnung 2) werden explizit aufgeführt. Die Eigenschaften der Informationsflüsse werden, wie bei den zuvor aufgeführten Quellen, über Swimlanes dargestellt (Bezeichnung 3). Dabei wird durch die Swimlanes repräsentiert, wer am Informationsaustausch beteiligt ist (Bezeichnung 4 und 10), über welches Transfermedium die Information übertragen wird (Bezeichnung 5 und 11), wo die Information gespeichert wird (Bezeichnung 6 und 12) und ob die

Information eine bestimmte Verwendung hat (Bezeichnung 7 und 13). Als bestimmte Verwendung werden in diesem Zusammenhang die Anpassung, Analyse und kontinuierliche Verbesserung des Produktionsprozesses verstanden. Über Pfeile werden die Richtungen der Informationsflüsse (Bezeichnung 9) angezeigt, also ob eine Information durch eine Tätigkeit eines Produktionsschrittes benötigt oder erzeugt wird. Über Verbindungspunkte (Bezeichnung 8) wird jeweils die betrachtete Information eines Produktionsschrittes zu einer Swimlane zugeordnet. Zur Bewertung der Informationsflüsse werden schließlich Indikatoren vorgestellt, über die quantitative Aussagen über die (digitale) Güte der Informationsflüsse getroffen werden können.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Die von Molenda et al. vorgestellte Erweiterung des Wertstromdiagramms bildet den zu verbessernden Produktionsprozess hinreichend genau ab, sodass Anforderung P-1 erfüllt wird. Im Gegensatz zu den zuvor vorgestellten Wertstromdiagrammen entfallen jedoch jegliche Betrachtungen der Informationen selbst, und es wird nur der abstrakte Fluss von im Wertstrom unbekannten Informationen betrachtet. Dadurch ist es nicht möglich zu analysieren, ob das eingesetzte Verfahren zur Steuerung der Prozesse geeignet sind (Anforderung P-2) und ob die richtigen Informationen an der richtigen Stelle im Produktionsprozess erfasst (Anforderung I-1) beziehungsweise an den Produktionsprozess übertragen (Anforderung I-5) werden. Auch die Verarbeitung der Informationen wird nicht detailliert modelliert (Anforderung I-4), sondern nur unterschieden, ob die Information genutzt wird oder nicht. Im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse werden die eingesetzten Technologien zur Erfassung (Anforderung I-2) und Übertragung (I-6) der Informationen sowie die Speichermedien (Anforderung I-3) modelliert. Durch die Beschränkung auf die Informationsflüsse, ohne die Informationen selbst zu betrachten, werden die Anforderungen Q-1 bis Q-3 nicht erfüllt.

Tabelle 3-9: Bewertung in Bezug auf die Anforderungserfüllung durch die Methode zur Visualisierung, Analyse und Bewertung von Informationsprozessen

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[MJH+19]	●	○	○	●	●	○	○	●	○	○	○

3.2.3 Methoden zur Analyse und Harmonisierung von Informationsqualitäten zur Steuerung der Produktionslogistik

Während sich die Analyse der Informationsqualität immer auf den aktuellen Stand der verfügbaren Informationen beschränkt, bezieht sich die Harmonisierung der Informationsqualität auf die Gestaltung eines Systems, sodass eine ausreichende Informationsqualität erreicht wird. Im Zusammenhang mit der Harmonisierung der Informationsqualität gibt es sowohl Prozess-getriebene als auch Daten-getriebene Ansätze [BASC16, S. 358; GCW+19, S. 585]. Prozess-getriebene Ansätze fokussieren auf den Prozess, durch den die Informationen erzeugt, verarbeitet und genutzt werden. In diesem Zusammenhang wird versucht, den Prozess derart zu gestalten, dass er eine ausreichende Informationsqualität liefert. Diese Ansätze zur Harmonisierung der Informationsqualität werden im Rahmen dieser Arbeit betrachtet. Daten-getriebene Ansätze hingegen, die sich mit einer nachträglichen Bereinigung beziehungsweise Steigerung der Informationsqualität der Informationen beschäftigen, werden nicht im Stand der Erkenntnisse berücksichtigt. Diese Ansätze sind häufig nur in Verbindung mit einer großen Menge an Informationen anwendbar, mit deren Hilfe unter Anwendung von verschiedenen Algorithmen Anpassungen vorgenommen werden können,

siehe zum Beispiel [REBR16; RBW+16; SRP+17]. Die für diese Ansätze notwendigen Information stehen im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik in der Regel zum Zeitpunkt der Generierung der Steuerungsentscheidung nicht zur Verfügung.

Data Quality based Process Enabling nach Burggräf et al.

Beschreibung der Methode

Burggräf et al. [BDF+18] stellen ein Methodenframework vor, bezeichnet als *Data Quality based Process Enabling* (DQPE), dessen Anwendung die Verfolgung der beiden Teilziele „Auswahl von effizienten produktionslogistischen Versorgungsprozessen in Abhängigkeit der verfügbaren Datenqualität“ und gleichzeitig eine „langfristige Verbesserung der Datenqualität“ ermöglicht. Grundlage des Frameworks ist eine Kombination und Aggregation verschiedener Elemente zur Verbesserung der Datenqualität, die auf Basis einer Literaturrecherche (14 untersuchte Ansätze) ermittelt wurden. Um beide Teilziele zu verfolgen, besteht das Framework aus den beiden Teilmethoden *Continuous Data Quality Improvement Management* (CDQIM) und *Data Quality-dependent Process Design* (DQPD). Die Teilmethode CDQIM beschreibt eine auf sechs Schritten basierende universelle und sehr generische Methode zur Verbesserung der Datenqualität. DQPD beschreibt die Auswahl verschiedener Prozess-Design-Alternativen in Abhängigkeit der verfügbaren Datenqualität. Die beiden Methoden sind im Rahmen des DQPE-Methodenframeworks über zwei Schnittstellen miteinander verbunden, an denen die Anforderungen an die verfügbare Datenqualität durch den produktionslogistischen Versorgungsprozess abgeleitet werden und die verfügbare Datenqualität zur Auswahl der Prozess-Design-Alternativen zurückgegeben werden. Der Ablauf der Methoden CDQIM und DQPD innerhalb des DQPE sind ist in Abbildung 3-7 dargestellt.

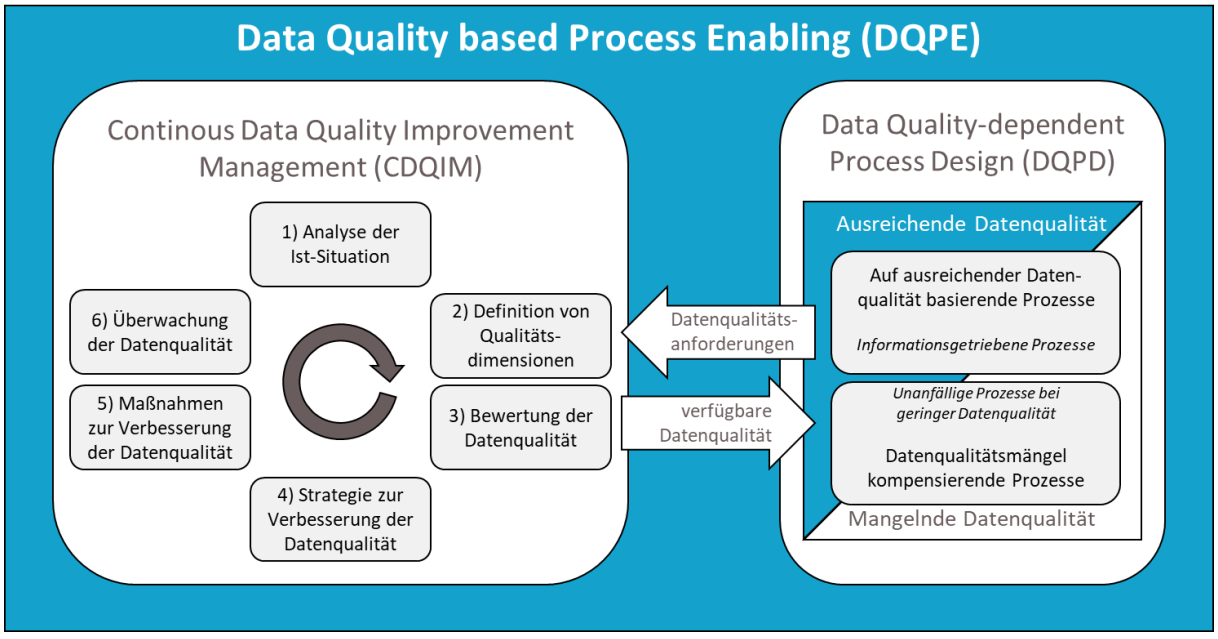

Abbildung 3-7: “Data Quality Process Enabling”-Framework nach [BDF+18]

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Das DQPE-Methodenframework gibt durch die ihm zugrundeliegende Vorgehensweise grobe Handlungsempfehlungen zur Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen vorhandener Datenqualität und der Auswahl von möglichen produktionslogistischen Versorgungsprozessen (zwischen informationsgetriebenen Prozessen oder Prozessen, die gegenüber einer schlechten Datenqualität weniger anfällig sind) sowie

zur langfristigen Verbesserung der Datenqualität. Durch diese Vorgehensweise wird der Ansatz verfolgt, dass durch eine gesteigerte Datenqualität weitere Prozesseffizienzen erzielt werden können, da Effizienzverluste durch mangelnde Datenqualität reduziert werden können und/oder effizientere produktionslogistische Versorgungsprozesse eingesetzt werden können, die eine hohe Datenqualität voraussetzen. Das DQPE-Methodenframework beschreibt eine Vorgehensweise auf einer sehr abstrakten Ebene, sodass ein Anwender dieses Frameworks sich in eine Vielzahl möglicher zugrundeliegender Methoden einarbeiten muss, um eine geeignete Auswahl treffen zu können, welche konkreten Schritte vorzunehmen wären. Zur Analyse der Ist-Situation verweisen die Autoren auf Methoden wie beispielsweise die Wertstrommethode. Durch den konkreten Verweis auf andere Methoden wird Anforderung P-1 teilweise erfüllt. Eine Analyse der eingesetzten Verfahren auf ihre Eignung zum Prozess erfolgt nicht, ebenso wie eine Analyse der Informationsflüsse. Die im Rahmen des Frameworks beschriebenen Schritte Definition relevanter IQ-Dimensionen, Analyse der verfügbaren Datenqualität und Abgleich mit Verfahren, die auf die vorhandene Datenqualität abgestimmt sind, können als Teil einer Harmonisierung zwischen Informationsqualität und Verfahren, wie es in dieser Arbeit definiert wurde, bezeichnet werden. Da jedoch keine explizite Vorgehensweise zur Harmonisierung beschrieben wird, werden die Anforderung Q-1 bis Q-3 nur teilweise erfüllt.

Tabelle 3-10: Bewertung der Anforderungserfüllung durch das Data Quality based Process Enabling-Framework

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[BDF+18]	◑	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑

Lean Information Management nach Hicks

Beschreibung der Methode

Hicks [HIC07] überträgt die in der Lean Production etablierten Verschwendungsarten auf nicht-wertschöpfende Tätigkeiten in Informationsprozessen. Aufbauend auf dieser Übertragung wird ein generisches Framework (das keine explizite Strategie oder Vorgehensweise vorgibt) bereitgestellt, das bei der Verbesserung von Informationsprozessen durch die Anwendung von Prinzipien der Lean Production unterstützen soll. Im Rahmen einer Studie identifiziert der Autor vier Verschwendungsarten in Informationsprozessen:

1. *Failure Demand*: Diese Verschwendungsart umfasst alle Ressourcen und Aktivitäten, die erforderlich sind, um einen Informationsmangel zu überwinden, wie zum Beispiel das Generieren neuer Informationen und/oder das Erfassen zusätzlicher Informationen.
2. *Flow Demand*: Diese Verschwendungsart umfasst die Zeit und die Ressourcen, die benötigt werden, um Informationselemente zu identifizieren, die durch den Nutzer gefordert werden.
3. *Flow Excess*: Diese Verschwendungsart umfasst die Zeit und Ressourcen, die erforderlich sind, um eine „Informationsüberflutung“ zu überwinden.
4. *Flawed Flow*: Diese Verschwendungsart umfasst die Zeit und Ressourcen, die zum Überprüfen und Korrigieren von Informationen erforderlich sind sowie die daraus resultierenden angemessenen oder gegebenenfalls unnötigen Aktivitäten, die sich im Rahmen einer Verwendung ergeben würden.

Um diese Verschwendungsarten zu minimieren, schlägt der Autor vor, dass Informationsprozesse, ähnlich zu Produktionsprozessen, mit Hilfe von Methoden, die sich aus den Lean Prinzipien „Value“, „Value Stream“, „Flow“, „Pull“ und „Continuous Improvement“ ergeben, analysiert und verbessert werden sollen.

Dadurch sollen Informationsflüsse gestaltet werden, die wertschöpfende Informationen verlässlich im angemessenen Umfang rechtzeitig/aktuell zur Verfügung stellen, sobald ein Nutzer diese benötigt.

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Das von Hicks entwickelte generische Framework gibt keine expliziten Handlungsanweisungen an, wie die Qualität von Informationen und Informationsflüssen konkret analysiert und harmonisiert werden können, sondern verweist lediglich auf bestehende Prinzipien der Lean Production, unter deren Gesichtspunkte die von ihm identifizierten Verschwendungsarten betrachtet werden könnten. Dies schließt somit eine vollständige Erfüllung einer Anforderung aus. Durch die explizit erwähnten Aspekte, die aus verschiedenen Methoden der Prinzipien der Lean Production entwickelt wurden, werden jedoch Anforderungen teilweise erfüllt. Diese können eine Grundlage bilden, um im Rahmen der zu entwickelnden Methode (Teil-)Schritte zu definieren, die an den genannten Aspekten orientiert sind. So wird darauf verwiesen, dass explizit definiert werden muss, warum eine Information erfasst wird und für wen diese Information eine Wertschöpfung darstellt. Dazu ist ein profundes Prozessverständnis erforderlich. Dies umfasst die Anforderungen P-1, I-1 und I-5. Zudem soll der Informationsverarbeitungsprozess modelliert werden, um diesen auf mögliche Verschwendungsursachen zu analysieren, was Anforderung I-4 umfasst. Da das ausgegebene Ziel Informationsflüsse sind, die wertschöpfende Informationen verlässlich im angemessenen Umfang rechtzeitig/aktuell zur Verfügung stehen, sobald ein Nutzer diese benötigt, würden durch ein Erreichen dieser Zielstellung die Anforderungen Q-1 bis Q-3 erfüllt werden. In Tabelle 3-11 ist die Bewertung der Anforderungserfüllung durch das von Hicks vorgeschlagene generische Framework zusammengefasst.

Tabelle 3-11: Anforderungserfüllung durch das Lean Information Management

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[HIC07]	◑	○	◑	○	○	◑	◑	○	◑	◑	◑

Datenqualitätsbewertung zur verbesserten Entscheidungsfindung („*Data quality assessment for improved decision making*") nach Günther et al.

Beschreibung der Methode

Günther et al. [GCW+19] beschreiben eine Methode zur Bewertung der Qualität von Daten, um diese im Rahmen von Entscheidungen der Produktionsplanung und -steuerung zu berücksichtigen. Diese vorgestellte Methode besteht aus den drei Schritten, (1) *Sammlung von Inputdaten* (collection of input), (2) *Definition von Mängeln der Daten(-qualität)* (definition of data deficiencies) sowie (3) *Bewertung der Datenqualität* (data quality assessment). Im Rahmen der *Sammlung* der zu untersuchenden Daten ist der Nutzungskontext beziehungsweise die Aufgabe, in der die Daten zum Einsatz kommen, zu definieren. Darauf aufbauend sind die zum Einsatz kommenden Datenquellen zu identifizieren und ein Datenmodell zu entwickeln, in dem die zu untersuchenden Daten gespeichert und untersucht werden. Im Rahmen *der Definition von Mängeln der Daten* werden zunächst Datenattribute und Testkriterien ausgewählt. Diese bilden die Basis zur Entwicklung beziehungsweise Anpassung von Metriken, mit denen einzelne Dimensionen der Datenqualität gemessen werden sollen. Im Rahmen der *Bewertung der Datenqualität* werden anhand der Metriken die Ausprägungen der Qualitätsdimensionen der Daten berechnet und schließlich interpretiert. Die Autoren schlagen vor, dass anschließend an die drei Schritte eine Phase zur Verbesserung der Datenqualität anknüpfen sollte, geben dazu jedoch keine konkreten Handlungsempfehlungen an. Der Ablauf der vorgeschlagenen Methode ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

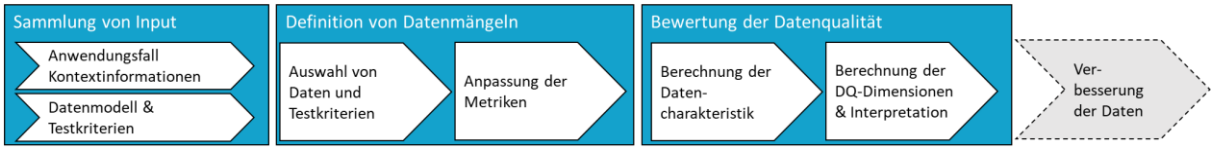

Abbildung 3-8: Methode zur Bewertung der Datenqualität nach [GCW+19]

Bewertung in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung

Die von Günther et al. [GCW+19] vorgestellte Methode fokussiert ausschließlich auf eine Bewertung der Qualität von Daten ohne die damit verbundenen Flüsse zu berücksichtigen. Somit werden die Anforderungen I-1 bis I-6 nicht erfüllt. Auch eine Analyse der eingesetzten Verfahren zur Verarbeitung der Daten ist nicht im Umfang der vorgestellten Methode, wodurch auch Anforderung P-2 nicht berücksichtigt und nicht erfüllt wird. Im Rahmen des Schrittes „Sammlung von Input" ist kontextspezifisches Wissen über die Erfassung der Daten zu sammeln. Um dieses kontextspezifische Wissen zu sammeln, ist es erforderlich den zugrundeliegenden Prozess zu kennen. Da die Autoren jedoch nicht explizit angeben, wie dieses Wissen zu sammeln ist, wird Anforderung P-1 nur teilweise erfüllt. Im Rahmen der Bewertung der Datenqualität werden eine Vielzahl an Datenqualitätsdimensionen berücksichtigt, darunter unter anderem die Relevanz, die Aktualität und die Genauigkeit der Daten. Durch diese Dimensionen werden die Anforderungen Q-1 bis Q-3 berücksichtigt. Das Vorgehen zur Bewertung der Datenqualitätsdimensionen wird jedoch nur sehr abstrakt beschrieben. Zudem werden keine Aussagen darüber getätigt, ob die Qualität zur Nutzung der Daten ausreichend ist. Somit werden die Anforderungen Q-1 bis Q-3 nur teilweise erfüllt. In Tabelle 3-12 ist die Bewertung der Anforderungserfüllung durch die von Günther et al. vorgestellte Methode zusammengefasst.

Tabelle 3-12: Bewertung der Anforderungserfüllung durch die Methode zur Datenqualitätsbewertung zur verbesserten Entscheidungsfindung

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[GCW+19]	◑	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑

Evaluierung der Supply Chain Logistic Informationsqualität aus Just-in-Time Perspektive nach Zhiwen et al.

Beschreibung der Methode

Die Autoren Zhiwen et al. [ZXY+20] beschreiben eine Methode zur Evaluierung der Qualität von Informationen, die in Supply Chains ausgetauscht werden. Dabei fokussieren die Autoren das Thema Just-in-Time (JIT) Belieferung von Materialien. Durch die vorgestellte Methode kann mit Hilfe Statistischer Prozesssteuerung (*statistical process control* (SPC)) und der Berechnung von Entropie die Qualität von Informationen evaluiert werden. Dabei evaluieren die Autoren die Informationsqualität der für die JIT-Belieferung besonders relevanten Parameter „Menge" und „Zeitpunkt". Auch wenn sich die Autoren durch die Betrachtung einer Supply Chain außerhalb des Untersuchungsgebietes dieser Arbeit befinden (Steuerung der Produktionslogistik), sind die betrachteten Aspekte der Informationsqualität der JIT-Belieferung auch für Aspekte der Steuerung der Produktionslogistik relevant. Grundlage der Methode ist eine Berechnung der benötigten Menge und Zeitpunkte, wann von unterschiedlichen Lieferanten Materialien angeliefert werden sollen, sodass eine Produktion kontinuierlich mit der richtigen Menge (nicht zu wenig, aber auch nicht durch

übermäßige Bestände) beliefert werden kann. Darauf aufbauend wird über einen Zeitraum verglichen, wie viele Materialien tatsächlich benötigt und wie viele geliefert wurden. Aus dem Vergleich werden schließlich Kennzahlen der SPC ermittelt und die Qualität der Information „Menge“ evaluiert. Diese drei Schritte werden analog auch zur Evaluierung der Bedarfszeitpunkte durchgeführt. Dazu ist zunächst die Differenz zwischen tatsächlichen Bedarfszeitpunkten und den zugehörigen geplanten Zeitpunkten zu bilden und binär zu beurteilen, ob Material rechtzeitig oder verspätet eintrifft. Auch für diese Werte werden die erforderlichen SPC-Kennzahlen ermittelt und die Informationsqualität evaluiert. Nachdem beide Informationen separat evaluiert wurden, werden beide zusammenfassend evaluiert, um darauf aufbauend zu identifizieren, welche Information im Rahmen einer Verbesserung fokussiert werden sollte. Dazu wird mittels eines Entropiemaßes die Verlässlichkeit der gebündelten Information (Menge und Zeitpunkt) berechnet und mittels SPC evaluiert.

Bewertung in Bezug auf die Anforderungen

Die von Zhiwen et al. [ZXY+20] vorgestellte Methode zur Evaluierung der Informationsqualität in Supply Chains aus Perspektive der JIT-Belieferung berücksichtigt mit den beiden Informationen Zeitpunkt und Menge die IQ-Dimensionen Frequenz und Verlässlichkeit. Durch die Evaluierung mittels SPC lassen sich kritische Faktoren identifizieren, die im Rahmen einer Verbesserung der Informationsqualität priorisiert werden sollten. Möglichkeiten, wie eine Verbesserung der Informationsqualität gestaltet werden könnte, werden nicht betrachtet. Somit werden die berücksichtigten IQ-Dimensionen auch nicht harmonisiert, wodurch die Anforderungen Q-2 und Q-3 nur als teilweise erfüllt angesehen werden. Die übrigen Anforderungen werden nicht berücksichtigt oder gefordert.

Tabelle 3-13: Zusammenfassung der Anforderungserfüllung durch die Evaluierung der Supply Chain Logistic Informationsqualität aus Just-in-Time Perspektive

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[ZXY+20]	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑

Methode zur Nutzen-orientierten Implementierung von Produktionsdatenerfassungssystemen nach Reuter et al.

Beschreibung der Methode

Reuter et al. [RBH+17] beschreiben eine aus vier Schritten bestehende Methode, um systematisch Nutzen-orientiert Technologien zu identifizieren, mit denen die zur Steuerung eines Abschnittes eines Produktionssystems benötigten Daten erfasst werden können. Die vier Schritte der vorgestellten Methode bestehen aus:

(1) Vorbereitung,
(2) Aufnahme der aktuellen Situation,
(3) Definition eines Zielzustands und
(4) Bewertung von Technologien.

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 3-9 links dargestellt. Im Rahmen der Vorbereitung ist das Vorhaben in Form eines Projektes zu strukturieren und das zu untersuchende Produktionssystem zu modularisieren. Durch die Modularisierung wird das Produktionssystem in unterschiedliche Abschnitte (Module) eingeteilt, für die im Laufe der Methode jeweils spezifische Anforderungen an die Daten abgeleitet werden. Die

Schritte *Aufnahme der aktuellen Situation* und *Definition eines Zielzustandes* sind für jedes Modul separat durchzuführen. Dies erfolgt durch den in Abbildung 3-9 rechts dargestellten Ablauf mit den zugrundeliegenden Modellen. Im sogenannten *Total Data Model* (TDM) werden eine Vielzahl an Daten zusammengefasst, die für die PPS relevant sind. Dies dient als Checkliste, um den aktuellen Stand der Datenverfügbarkeit (in einer Datenbank) zu erfassen und somit auch die zugehörige Datenerfassung. Dabei ist nicht nur gefordert zu prüfen, ob entsprechend aufgeführte Informationen vorhanden sind, sondern auch die Qualität der Informationen. Dabei beziehen sich die Autoren auf die in Kapitel 2.5.2 eingeführten Kategorien der Informationsqualität und nicht explizit auf IQ-Dimensionen. Das *Adaptive Data Model* (ADM) beinhaltet eine Zuordnung von Daten zu Steuerungsverfahren, die diese benötigen, um Steuerungsentscheidungen zu generieren. Mit Hilfe dieser Zuordnung werden im ADM die im TDM abgebildeten Daten nach den einzusetzenden Steuerungsverfahren gefiltert. Als Ergebnis erhält ein Anwender alle erforderlichen Daten sowie eine Bewertung der Daten in Bezug auf die Relevanz für das Steuerungsverfahren. Diese Daten werden schließlich durch das *Information Resolution Model* verwendet, um passende Punkte innerhalb der Prozesse der Module zur Datenerfassung zu lokalisieren. Dazu werden die Module durch einen morphologischen Kasten anhand von 25 Faktoren charakterisiert, die den Anwender bei der Identifikation von Erfassungspunkten unterstützen. Schließlich werden durch das *ICT Model* verschiedene Technologien bewertet, ob diese die erforderlichen Daten in ausreichender Qualität erfassen können und ob diese durch ein angemessenes Kosten-Nutzen-Verhältnis lohnend sind.

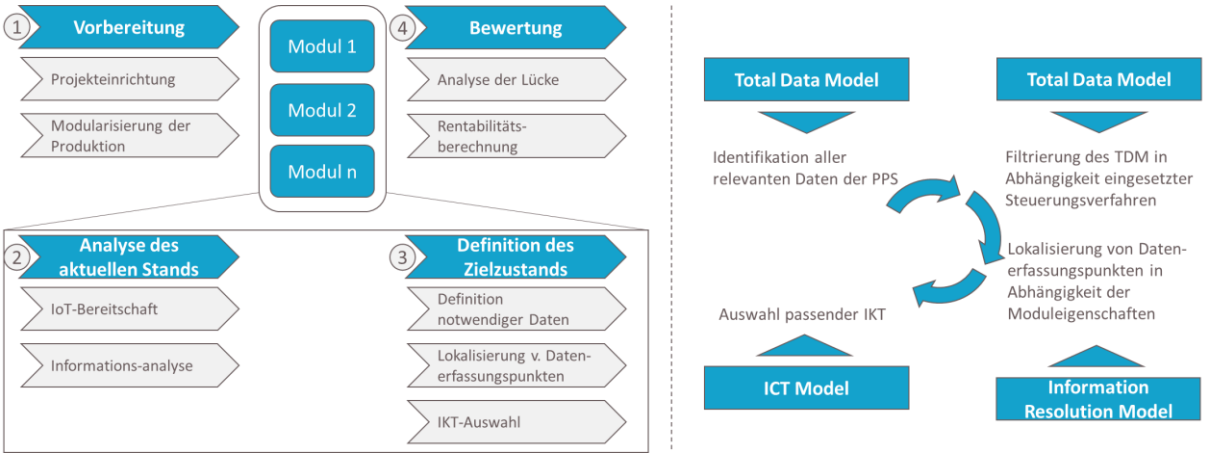

Abbildung 3-9: Vorgehen zur Nutzenorientierten Implementierung eines Produktionsdatenerfassungssystems nach [RBH+17, S. 489]

Bewertung in Bezug auf die Anforderungen

Das von Reuter et al. vorgestellte Verfahren zur Nutzen-orientierten Implementierung von Produktionsdatenerfassungssystemen liefert eine systematische Vorgehensweise, durch die es ermöglicht werden soll, die richtigen Informationen, in ausreichender Qualität durch Kosten-Nutzen-optimale Technologien zur Steuerung der Produktionslogistik zu erfassen. Ein entscheidender Nachteil an dieser Methode ist, dass viel Wissen in den der Methode zugrundeliegenden Modellen gespeichert ist, die nicht öffentlich zugänglich sind. Dies erschwert/verhindert eine Anwendung der Methode durch Anwender außerhalb des Autorenkreises des Beitrages. In Bezug auf die methodische Vorgehensweise werden jedoch Anforderungen erfüllt, die eine Methode beinhalten muss, um die in dieser Arbeit zugrundeliegende Problemstellung zu bearbeiten. So erfolgt eine Modularisierung des Produktionssystems in verschiedene Module, durch die die zu steuernden Prozesse abgebildet werden. Da nicht explizit erläutert wird, wie die Modularisierung vorgenommen werden kann, wird Anforderung P-1 nur teilweise erfüllt. Eine Überprüfung der

Kompatibilität der eingesetzten Steuerungsverfahren (Anforderung P-2) erfolgt nicht, jedoch werden durch die für die Verfahren erforderlichen Daten systematisch ermittelt (Anforderung I-1) sowie zugehörige Technologien zu deren Erfassung (Anforderung I-2). Da sich die Arbeit auf die Erfassung von Daten beschränkt, werden die Anforderungen I-3 bis I-6 nicht berücksichtigt. Eine Harmonisierung der IQ-Dimensionen Granularität, Frequenz und Verlässlichkeit (Anforderungen Q-1 bis Q-3) erfolgt zwar nicht explizit, jedoch werden diese IQ-Dimensionen durch die Berücksichtigung verschiedener Kategorien der Informationsqualität eingeschlossen. Auch hier fehlt es an expliziten Beschreibungen einer Vorgehensweise, weshalb die Anforderungen nur als teilweise erfüllt gelten. In Tabelle 3-14 ist die Bewertung der vorgestellten Methode in Bezug auf die Anforderungserfüllung zusammengefasst.

Tabelle 3-14: Bewertung in Bezug auf die Anforderungserfüllung durch die Methode zur Nutzen-orientierten Implementierung von Produktionsdatenerfassungssystemen

Quelle	P-1	P-2	I-1	I-2	I-3	I-4	I-5	I-6	Q-1	Q-2	Q-3
[RBH+17]	◑	○	●	●	○	○	○	○	◑	◑	◑

3.3 Kritische Würdigung des Erkenntnisstands und Ableitung des Forschungsbedarfs

Ziel dieses Kapitels war die strukturierte Untersuchung der wissenschaftlichen Ansätze und Erkenntnisse von Methoden im Betrachtungsbereich der vorliegenden Dissertation. Im Folgenden wird dieser Stand der Erkenntnisse diskutiert, um darauf aufbauend die Forschungslücke und den Handlungsbedarf abzuleiten.

3.3.1 Diskussion der Herkunft des Stands der Erkenntnisse

Insbesondere die Quellen zur Modellierung und Konfiguration der Steuerung der Produktionslogistik sowie zur Verbesserung und digitalen Transformation kommen aus dem deutschsprachigen Raum. Ein Ansatz für eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die Fokussierung auf eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik insbesondere in Hochlohnländern wie Deutschland von besonderer Relevanz ist, um sich gegenüber Standorten mit geringeren Lohnkosten behaupten zu können. Dies ist unter anderem dadurch getrieben, dass in Hochlohnländern überwiegend eine individuelle auftragsbezogene Einzelfertigung („Make-to-Order“) durchgeführt wird, die einen erhöhten Koordinationsbedarf voraussetzt. Durch den gestiegenen Druck in Hochlohnländern, die Steuerung der Produktionslogistik zu verbessern, hat sich auch in diesen Ländern der Forschungsbedarf herausgestellt. Dieser mögliche Erklärungsansatz wird durch mehrere Quellen gestützt, die dies als Motivation für eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik aufführen (zum Beispiel [KAAU17, S. 151; RBH+17, S. 487]).[7]

3.3.2 Diskussion der Anforderungserfüllung

Anhand der Bewertung der Anforderungserfüllung der im Rahmen des Stands der Erkenntnisse untersuchten Methoden kann zum einen eine Bewertung der Relevanz der Anforderungen erfolgen und zum anderen eine Bewertung in Bezug auf die Erfüllung der Anforderungen durch die untersuchten Methoden.

[7] Die aufgeführten Quellen beinhalten teilweise keine Methoden oder liefern keinen Beitrag zur Bearbeitung der Problemstellung, weshalb sie im Stand der Erkenntnisse nicht diskutiert wurden.

In Tabelle 3-15 ist die Anforderungserfüllung der im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden zusammengefasst. Jede vorgestellte Methode[8] erfüllt zumindest teilweise oder fordert mindestens zwei Anforderungen. Dadurch lässt sich ableiten, dass die aufgestellten Anforderungen von Relevanz sind, um die Problemstellung zu bearbeiten (keine Anforderung bleibt ohne Forderung oder teilweise Erfüllung). Eine Vollständigkeit der Anforderungen in Bezug auf die zu bearbeitende Problemstellung kann aus dieser Erkenntnis jedoch noch nicht geschlussfolgert werden, da die Möglichkeit besteht, dass weitere Anforderungen bestehen, die zur Lösung der Problemstellung erforderlich sind, jedoch bisher nicht identifiziert wurden. Eine Überprüfung der Vollständigkeit der Anforderungen erfolgt im Rahmen der Evaluierung der zu entwickelnden Methode. Die in Tabelle 3-15 zusammengefasste Anforderungserfüllung geht mit der in Tabelle 3-1 vermuteten Struktur der Anforderungserfüllung einher. Dies stellt jedoch nicht sicher, dass alle relevanten Forschungscluster identifiziert und untersucht wurden. Auffällig ist, dass entgegen der in Tabelle 3-1 aufgestellten vermuteten Anforderungserfüllung einige Methoden aus dem Forschungscluster „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“ die Anforderungen der Harmonisierung der IQ-Dimensionen teilweise erfüllen. Auch wenn diese Methoden die IQ-Dimensionen nicht explizit berücksichtigen, so liefern sie durch die Modellierung der Informationsflüsse die Grundlage, um die Informationsqualität zu harmonisieren.

Als weitere Erkenntnis aus der Zusammenfassung der Anforderungserfüllung lässt sich ableiten, dass im untersuchten Stand der Erkenntnisse keine Methode existiert, die alle Anforderungen erfüllt (keine durchgängig erfüllten Anforderungen durch eine Methode). Daraus lässt sich ableiten, dass eine Forschungslücke besteht. Besonders die Anforderungen Q-1 bis Q-3 sind gesondert zu diskutieren, da diese Anforderungen, im Gegensatz zu allen anderen Anforderungen, von keiner untersuchten Methode vollständig erfüllt werden. Diese Anforderungen fordern eine Harmonisierung der betrachteten IQ-Dimensionen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses. Diese Diskrepanz in der Anforderungserfüllung ist unter anderem dadurch begründet, dass die Autoren der Methoden lediglich

- die Voraussetzung für eine Harmonisierung der Informationsqualität durch ihre Modellierung liefern [LVF17; MMA17; RKM+18],
- nur eine Analyse der Informationsqualität vornehmen, ohne diese mit den Anforderungen zu harmonisieren [GCW+19; ZXY+20] oder
- das Vorgehen zur Harmonisierung auf einer sehr abstrakten Ebene in die vorgestellte Methode integrieren, sodass eine Harmonisierung nicht eigenständig durchgeführt werden kann [BDF+18; HIC07; RBH+17; WOLI16].

Der Anspruch der vorliegenden Dissertation ist die Entwicklung einer Methode, die im Rahmen der Beantwortung der Forschungsfrage die aufgestellten Anforderungen vollständig erfüllt.

[8] Damit inbegriffen ist auch das untersuchte Konzept nach Schäfers et al. [SMN19A].

Tabelle 3-15: Zusammenfassung des Anforderungsabgleichs des Stands der Erkenntnisse

Forschungs-cluster	Quelle	Anforderung P-1	Anforderung P-2	Anforderung I-1	Anforderung I-2	Anforderung I-3	Anforderung I-4	Anforderung I-5	Anforderung I-6	Anforderung Q-1	Anforderung Q-2	Anforderung Q-3
1	[MUNY09]	●	●	○	○	○	○	○	○			
	[WOL16]	◑	●	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑
	[SSB+11]	●	●	●	○	○	◑	●	○	○	○	○
2	Hic07	●	○	◑	◑	●	○	●	○	◑	◑	◑
	[LVF17]	●	○	◑	●	●	○	●	●	◑	◑	◑
	[RKW19]	●	○	◑	◑	●	●	◑	◑	○	◑	○
	[SMN19A]		○									○
	[MJH+19]	●	○	○	●	●	○	○	●	○	○	○
3	[BDF+18]	◑	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑
	[HIC07]	◑	○	◑	○	○	◑	◑	○	◑	◑	◑
	[GCW+19]	◑	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑	◑
	[ZXY+20]	○	○	○	○	○	○	○	○	○	◑	◑
	[RBH+17]	◑	○	●	●	○	○	○	○	◑	◑	◑
Anspruch vorliegender Untersuchung		●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Legende:

● Anforderung erfüllt

◑ Anforderung teilweise erfüllt

○ Anforderung nicht erfüllt

Anforderung gefordert/vorausgesetzt

4 Grobkonzeption der Methode

Wie aus der Diskussion der Anforderungserfüllung des Stands der Erkenntnisse ermittelt wurde, existiert keine Methode, die alle aufgestellten Anforderungen erfüllt. Aus dieser identifizierten Forschungslücke resultiert Forschungsbedarf um die (Haupt-)Forschungsfrage *„Aus welchen Schritten muss eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität bestehen und wie sind diese Schritte auszugestalten?“* zu beantworten. Durch die Zweiteilung der Forschungsfrage in die erforderlichen Schritte („Die richtigen Schritte durchführen.“, Effektivität [NUL01, S. 358]) und die Ausgestaltung der Schritte („Die Schritte richtig durchführen.“, Effizienz [NUL01, S. 358]), wird in diesem Kapitel zunächst die Struktur in Form der erforderlichen Schritte der Methode konzipiert. Dieser Schritt entspricht im DSR dem *Design des Artefakts* und erfolgt unter Zuhilfenahme der identifizierten Artefakte, die im Stand der Erkenntnisse identifiziert wurden. Zur Grobkonzeption der zu entwickelnden Methode werden zuvor noch nicht-funktionale Anforderungen ermittelt, die bei der Entwicklung der Methode zu berücksichtigen sind. Abschließend werden (Teil-)Forschungsfragen (TFF) abgeleitet, durch deren Beantwortung die Ausgestaltung der Methode erfolgt, unter Berücksichtigung der zu erfüllenden Anforderungen.

4.1 Definition nicht-funktionaler Anforderungen

Vor der Konzeptionierung der Struktur der zu entwickelnden Methode werden noch sogenannte nicht-funktionale Anforderungen definiert, die den in Kapitel 2.6 eingeführten Anforderungskatalog erweitern. Nicht-funktionale Anforderungen stellen Ansprüche an Qualitätsmerkmale, die die zu entwickelnde Methode zu erfüllen hat [GIL14, S. 57]. Diese nicht-funktionalen Anforderungen betreffen die Anwendung und die Ergebnisse der zu entwickelnden Methode und umfassen die *Validität*, *Reliabilität*, *Utilität* sowie *Stringenz*. Eine Analyse, ob die im Stand der Erkenntnisse aufgeführten Methoden diese nicht-funktionalen Anforderungen erfüllen, erfolgte nicht, da dies eine eigenständige Anwendung der Methoden an geeigneten Anwendungsbeispielen voraussetzen würde. Diese Voraussetzung war nicht gegeben.

Anforderung M-1: Validität
Die Anforderung nach *Validität* beschreibt den Anspruch der Nachvollziehbarkeit und der allgemeinen Anwendbarkeit der zu entwickelnden Methode [SCFU15, S. 28]. Dies bedeutet zum einen, dass die Methode einen strukturierten und methodischen Ablauf besitzt, durch den der Anwendende systematisch eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität erreichen kann. Die zu durchlaufenen Schritte sollen dabei die Nachvollziehbarkeit gewährleisten, wobei insbesondere durch subjektive Einflüsse generierte Entscheidungen zu minimieren sind, die die Nachvollziehbarkeit beeinträchtigen könnten. Zum anderen fordert die Anforderung nach Validität, dass die Methode allgemein anwendbar ist und somit nicht nur auf einen Einzelfall (beispielsweise auf einen speziellen produktionslogistischen Prozess) beschränkt ist.

Anforderung M-1:

„Die Methode ist nachvollziehbar und bezogen auf die Problemstellung allgemein anwendbar.“

Anforderung M-2: Reliabilität
Die Anforderung nach *Reliabilität* betrifft die Zuverlässigkeit der Ergebnisse bei ähnlichen Rahmenbedingung [SCFU15, S. 28]. So soll durch die zu entwickelnde Methode gegeben sein, dass bei ähnlichen Rahmenbedingungen zuverlässige Ergebnisse entwickelt/ermittelt werden, die sich nicht wesentlich

voneinander unterscheiden. Der subjektive Einfluss des Anwendenden der Methode sei somit auch durch diese Anforderung auf ein Mindestmaß zu begrenzen, um den Einfluss auf die Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der zu entwickelnden Methode zu minimieren.

Anforderung M-2:

„Die Ergebnisse der Methode sind bei ähnlichen Randbedingungen zuverlässig und weichen nicht wesentlich voneinander ab."

Anforderung M-3: Utilität

Die Anforderung der *Utilität* betrifft die Nützlichkeit der durch die Methode entwickelten Ergebnisse [ScFu15, S. 28]. Somit sollen die entwickelten Ergebnisse einen nützlichen Beitrag zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität liefern. Dazu sind die durch die zu entwickelnde Methode generierten Ergebnisse in einer Form darzulegen, dass sie eindeutig interpretierbar sind und ohne erheblichen Mehraufwand ein Nutzen aus diesen generiert werden kann.

Anforderung M-3:

„Die Nützlichkeit der Ergebnisse muss gewährleistet sein."

Anforderung M-4: Stringenz

Die Anforderung der *Stringenz* betrifft das effektive und effiziente Vorgehen zur Generierung der Ergebnisse durch die zu entwickelnde Methode. Dies ist verbunden mit der Forderung, dass die Methode nur diejenigen Schritte beinhaltet, die zur zielgerichteten Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik beitragen und auch dass der Umfang, der in der zu entwickelnden Methode durchzuführenden Schritte auf die zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik erforderlichen Aspekte begrenzt ist.

Anforderung M-4:

„Die Methode verfolgt ein stringentes Vorgehen zur Erfüllung der Zielstellung."

Der um die nicht-funktionalen Anforderungen erweiterte Anforderungskatalog wird im Rahmen der Konzeptionierung der Struktur der zu entwickelnden Methode sowie im Rahmen der inhaltlichen Ausgestaltung der Methode berücksichtigt. Eine Evaluierung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen erfolgt im Rahmen der Evaluierung der Gesamtmethode.

4.2 Konzeptionierung der Struktur der zu entwickelnden Methode

Im Rahmen der Konzeptionierung der Struktur der zu entwickelnden Methode werden deren Schritte derart beschrieben, dass der Ablauf der Methode effektiv zu einem Ergebnis führt, dem ein stringentes Vorgehen zugrunde liegt (entsprechend Anforderung M-4). Zur Konzeptionierung der zu entwickelnden Methode wird unter anderem auf die Methoden und Ansätze, die im Stand der Erkenntnisse untersucht wurden, zurückgegriffen. Zudem haben Serrano et al. [SOC08] auf Basis einer Literaturrecherche und Untersuchungen, die auf Daten von fast 1000 Unternehmen beruhen, sieben Anforderungen identifiziert, die eine Methode zur allgemeinen Verbesserung von Produktionsprozessen beinhalten soll. Diese sind:

- Eine einfache, gemeinsam nutzbare „Sprache", durch die Entscheidungen von den am Verbesserungsprozess beteiligten Personen diskutiert werden können.
- Effizienz in der Anwendung.
- Eine grafische und standardisierte/einheitliche „Sprache" unterstützt den Anwendungsprozess.

- Ansätze zur quantitativen Analyse und Bewertung, sodass Entscheidungen auf wissenschaftlich fundierten und objektiven Kriterien beruhen.
- Eine Möglichkeit, die Problemsituationen zu verdeutlichen, sowie die Bereitstellung klarer Richtlinien und innovativer Konzepte zur Verbesserung des Systems.
- Reflexion der Anpassung eines Ausschnittes in Bezug auf die Auswirkungen auf das Gesamtsystem.
- Eine durchgeführte Neugestaltung/Anpassung/Verbesserung sollte Ausgangspunkt für eine strategische kontinuierliche Verbesserungsplanung des Gesamtsystems darstellen. [SOC08, S. 4410]

Auch diese aufgeführten Anforderungen werden bei der Konzeptionierung der Struktur der Methode berücksichtigt.

Schritt 1: Analyse der Ist-Situation

Zur Identifizierung von Verbesserungspotenzialen der Steuerung der Produktionslogistik ist ein profundes Verständnis des zu steuernden Prozesses notwendig. Somit ist es erforderlich, diesen Prozess zunächst zu modellieren. Wie im Stand der Erkenntnisse identifiziert wurde, sollte dabei nicht das gesamte Produktionssystem beziehungsweise der gesamte Produktionsablauf auf einmal betrachtet werden, sondern der Untersuchungsbereich in Abschnitte des Produktionssystems beziehungsweise des Prozessablaufes unterteilt werden, die ähnliche Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik besitzen (unter anderem gefordert durch [LVF17; MUNY09; RBH+17; SMN19A; SSB+11]). Anschließend ist der Prozess zu modellieren und relevante Kennzahlen sind aufzunehmen, die die Eigenschaften und die Leistungsfähigkeit des Prozesses beschreiben. Diese dienen als objektive Grundlage, um Verbesserungspotenziale im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren, was ebenfalls im Rahmen der Analyse der Ist-Situation durchzuführen ist. Als ein wesentliches Merkmal hat sich dabei durch die Untersuchung des Stands der Erkenntnisse erwiesen, dass sich bei der Identifikation von Verbesserungspotenzialen nicht nur auf die Steuerung der Produktionslogistik fokussiert werden sollte, sondern auch auf allgemeine Verschwendungsarten in den Prozessschritten, die zu Ineffizienzen führen. Dadurch wird verhindert, dass die Steuerung ineffizienter Prozesse verbessert wird, was gegebenenfalls durch sehr viele zu berücksichtigende Anforderungen die Komplexität der Steuerung erhöht [BSS+18, S. 179; BSC18, S. 2931; LVF17, S. 3960; RFH+19, S. 2; VDM18, S. 23]. Die Berücksichtigung von Verschwendungsarten, die sich nicht direkt auf die Steuerung der Produktionslogistik beziehen, kann somit einen essenziellen Beitrag zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik leisten. Diese Berücksichtigung stellt im Rahmen der zu entwickelnden Methode jedoch nur eine hinreichende Bedingung und keine Notwendigkeit dar. Somit wird dies, um die Stringenz der Methode zu berücksichtigen, lediglich als optional mit aufgeführt.

Durch die Modellierung des zu steuernden Produktionsprozesses im Rahmen der Analyse der Ist-Situation soll Anforderung P-1 erfüllt werden.

Schritt 2: Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik

Aufbauend auf den identifizierten Verbesserungspotenzialen der Analyse der Ist-Situation ist eine verbesserte Steuerung der Produktionslogistik zu entwerfen. Sollten im vorhergehenden Schritt Verbesserungspotenziale identifiziert worden sein, die sich nicht direkt auf die Steuerung der Produktionslogistik beziehen, so wären diese umzusetzen, bevor auf den Einsatz von Verfahren zur Steuerung der Produktionslogistik fokussiert wird. Dies ist im Rahmen der zu entwickelnden Methode optional, um die Anforderung der Stringenz zu berücksichtigen.

Im Rahmen des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik sind zunächst produktionslogistische Ziele zu definieren, die durch die Verbesserung erreicht werden sollen. Darauf aufbauend sind Steuerungsverfahren zu identifizieren, die kompatibel zu den Anforderungen des zu steuernden Prozesses

und zu den definierten Zielen sind. Nach Prüfung der Kompatibilität der Steuerungsverfahren ist gegebenenfalls eine Modifikation der Verfahren auf die spezifischen Anforderungen des Prozesses erforderlich. Die Identifikation und Auswahl passender Steuerungsverfahren stellt eine notwendige Voraussetzung dar, bevor eine Harmonisierung der Informationsqualität sinnvoll ist. In diesem Zusammenhang wird die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik maßgeblich durch die Anpassung der Steuerungsverfahren erreicht. Die Harmonisierung der Informationsqualität dient schließlich dazu, dass die Verbesserung auch erzielt werden kann, indem die Informationsqualität in Bezug auf die Anforderungen des Prozesses und der Steuerungsverfahren ausreichend ist.

Durch die Auswahl und gegebenenfalls erforderliche Modifikation von Steuerungsverfahren, die zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik führen, soll Anforderung P-2 erfüllt und die Grundlage geschaffen werden, um die erforderlichen Informationen zu identifizieren, die zur Anwendung des Steuerungsverfahrens erforderlich sind (Anforderung I-1). Zudem soll anhand dieses Schrittes auch identifiziert werden, wo die Steuerungsentscheidung des einzusetzenden Steuerungsverfahrens umgesetzt werden soll. Dies bildet die Grundlage zur Erfüllung von Anforderung I-5.

Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen

Zur weiteren Detailierung der in Schritt 2 identifizierten und gegebenenfalls modifizierten Steuerungsverfahren sind die zur Umsetzung der Steuerungsverfahren erforderlichen Informationsflüsse zu modellieren. Dazu ist es erforderlich, die für die Umsetzung der Steuerungsverfahren notwendigen Informationen abzuleiten und zu identifizieren, an welchen Punkten im Produktionsablauf diese Informationen generiert (Informationsquellen) werden, mit welchen Informationen diese gemeinsam verarbeitet werden und wo die Entscheidung der Steuerungsverfahren im Produktionsprozess umgesetzt wird (Informationssenke). Die Modellierung der Informationsflüsse (inklusive zugehöriger Verarbeitung) bildet die Grundlage, um die IQ-Dimensionen der durch die Informationsflüsse übertragenen Informationen zu harmonisieren. Eine Fokussierung auf Technologien, durch die die Informationen erfasst, gespeichert, verarbeitet und übertragen werden könnten, sollte in diesem Schritt noch nicht erfolgen, da sich die Anforderungen an die Technologien aus der Harmonisierung der IQ-Dimensionen ergeben könnten. Eine zu frühe Auswahl von Technologien, die gegebenenfalls nicht den Anforderungen entsprechen, würde einerseits die Stringenz der Methode beeinträchtigen, da die Technologieauswahl möglicherweise revidiert werden müsste. Andererseits birgt dies die Gefahr, dass unpassende Technologien ausgewählt werden, die im Zweifel die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik sogar negativ beeinträchtigen können [RFH+19, S. 2]. Die Modellierung der Informationsflüsse sollte dabei aufbauend auf der Modellierung der Prozessschritte im Rahmen der Analyse der Ist-Situation erfolgen. Dadurch können die Zusammenhänge zwischen den Prozessschritten und den Informationsflüssen in einem Diagramm veranschaulicht werden, welches als durchgängige Diskussionsgrundlage aller am Verbesserungsprozess beteiligter Personen dienen kann.

Die Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik sollte eine gewisse Flexibilität aufweisen, sodass die Ergebnisse vorhergehender Schritte, die sich in nachfolgenden Schritten als nicht umsetzbar erweisen oder mit unverhältnismäßigen Aufwänden verbunden wären, anpassbar sind. So könnte beispielsweise der Fall eintreten, dass die in Schritt 2 identifizierten Steuerungsverfahren Informationen erfordern, bei denen abzusehen ist, dass sich diese nicht oder nur durch einen unverhältnismäßig hohen Aufwand erfassen lassen. In diesem Fall ist eine Anpassung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik (Schritt 2) sinnvoll. Die Modellierung der Informationsflüsse in Schritt 3 soll derart gestaltet sein, dass Anforderung I-1, I-4 und I-5 erfüllt werden.

Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität
Insbesondere durch die Identifikation und gegebenenfalls erforderliche Modifikation der Steuerungsverfahren in Schritt 2, aber auch deren Detailierung und Modellierung der Informationsflüsse in Schritt 3 soll die Effektivität der Verfahren sichergestellt werden. Durch eine Harmonisierung der Informationsqualität sollen Anforderungen an die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* abgeleitet werden, die es ermöglichen, dass die Verfahren effizient sind und somit auch tatsächlich einen Beitrag zu Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik beitragen. Zur Harmonisierung der IQ-Dimensionen ist der gesamte Kontext, in dem die Informationen jeweils genutzt werden, zu berücksichtigen [GCW+19, S. 588]. Dieser Kontext soll durch die Schritte 1 bis 3 abgebildet werden (zu steuernder Prozess, einzusetzendes Verfahren und Informationsflüsse). Die Harmonisierung der Informationsflüsse sollte dabei so weit wie möglich auf quantitativen Analysen beruhen, um auf Basis objektiver Kriterien weitere Entscheidungen treffen zu können.

Durch das Ergebnis der Harmonisierung könnte sich ergeben, dass der zuvor modellierte Informationsfluss umgestaltet werden muss und/oder die identifizierten Steuerungsverfahren weiter modifiziert werden müssen, sofern erkannt wird, dass die erforderliche Informationsqualität nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grund sieht die Methode auch von Schritt 4 einen Rückschritt zu Schritt 3 beziehungsweise Schritt 2 zur Modifikation der dort jeweils generierten Ergebnisse vor. Ein ähnliches Vorgehen schlagen ebenfalls Burggräf et al. [BDF+18, S. 38] vor.

Die Harmonisierung der Informationsqualität durch Schritt 4 soll derart gestaltet sein, dass die Anforderungen Q-1 bis Q-3 erfüllt werden.

Schritt 5: Detailplanung und Implementierung
Nachdem die Anforderungen an die Informationsqualität im Rahmen von Schritt 4 ermittelt wurden, ist in Schritt 5 zu identifizieren, wie diese Anforderungen eingehalten werden können, und die damit verbundene technische Gestaltung ist zu definieren. Dazu sind passende Technologien zu identifizieren, durch die die Informationen in ausreichender Qualität erfasst werden und durch welche Speichermedien und Möglichkeiten der Informationsübertragung diese Qualität nicht negativ beeinflusst werden würde. Die sich dabei ergebenden Konzepte zur Implementierung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik sind wirtschaftlich zu bewerten. Dabei dürfen die dazu notwendigen Aufwände nicht den Nutzen der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik übersteigen. Sollte sich kein Konzept ermitteln lassen, das wirtschaftlich lohnend erscheint, so ist zu untersuchen, inwieweit ein Tolerieren möglicher Fehlentscheidungen durch mangelnde Informationsqualität möglich ist. Sind die auftretenden Fehlentscheidungen beispielsweise durch ihre zu erwartende Häufigkeit oder die damit verbundenen Konsequenzen nicht tolerierbar, so sind sowohl die Informationsflüsse (Schritt 3) als auch die einzusetzenden Steuerungsverfahren (Schritt 2) zu modifizieren. Sollte ein lohnendes Konzept identifiziert worden sein, so ist für dieses ein Umsetzungsplan/Projektplan zu gestalten und zu implementieren.

Durch Schritt 5 sollen die Anforderungen I-2, I-3 sowie I-6 erfüllt werden.

Schritt 6: Evaluierung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik
Abschließend sollte eine Evaluierung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik erfolgen, durch die bewertet wird, ob auch tatsächlich die Verbesserungspotenziale umgesetzt und die damit verbundenen Nutzeneffekte ermöglicht wurden. Können die Nutzeneffekte nicht erfüllt werden, so ist deren Ursache zu identifizieren und idealerweise zu beheben.

Nach einer Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik sollte mit einer erneuten Analyse der dann aktualisierten Ist-Situation (Schritt 1) begonnen werden, aus der sich weitere zuvor nicht identifizierte Verbesserungspotenziale ergeben könnten. Darauf aufbauend sollte ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess gestartet werden, indem die Methode iterativ durchlaufen wird. Der Ablauf der Methode, wie er sich durch die Grobkonzeption ergeben hat, ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

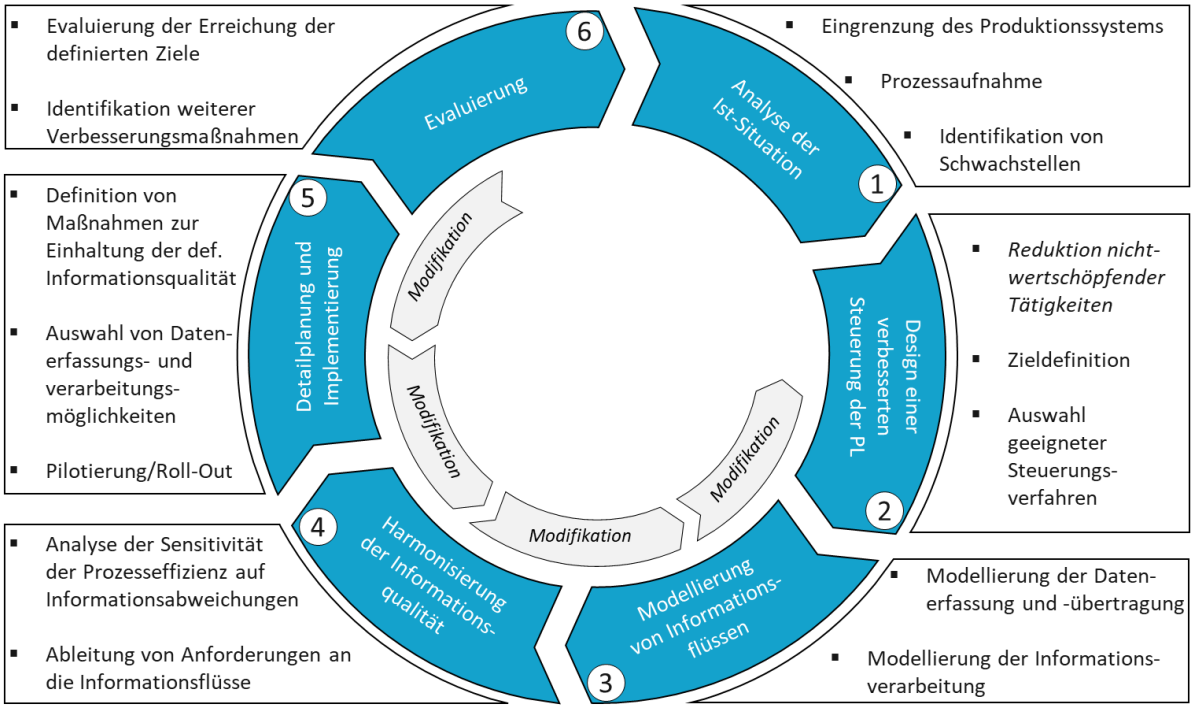

Abbildung 4-1: Grobkonzeption der Methode

4.3 Ableitung von (Teil-)Forschungsfragen

Die im vorangegangenen Kapitel konzeptionierte Struktur der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik soll gewährleisten, dass ein effektiver Ablauf gegeben ist. Bei der Ausgestaltung der Schritte steht die Effizienz jeweils im Vordergrund. Als Grundlage für ein strukturiertes Vorgehen im Rahmen der Ausgestaltung der einzelnen Schritte werden (Teil-)Forschungsfragen aufgestellt, durch deren Beantwortung die Frage der Ausgestaltung der übergeordneten (Haupt-)Forschungsfrage beantwortet werden kann. Die (Teil-)Forschungsfragen sind dabei mit den Anforderungen verknüpft, wobei die (Teil-)Forschungsfragen die Frage nach dem *„Wie“* einer Anforderungserfüllung stellen, wohingegen sich die Anforderungen jeweils nur auf das *„Vorhandensein“* beziehen.

(Teil-)Forschungsfrage 2[9]

Durch die Analyse der Ist-Situation sollen Verbesserungspotenziale der Steuerung der Produktionslogistik identifiziert werden, wozu eine Modellierung des zu steuernden Prozesses sowie dessen Charakteristika erforderlich ist. Dies bietet die Grundlage, um darauf aufbauend die Nutzung von Informationen im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität zu berücksichtigen. Aus dieser Zielstellung lässt sich die (Teil-)Forschungsfrage ableiten, wie der zu steuernde Produktionsprozess effizient in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden kann. Durch Beantwortung dieser (Teil-)

[9] Hinweis: (Teil-)Forschungsfrage 1 wurde bereits in Kapitel 2.5.2 aufgestellt.

Forschungsfrage soll eine geeignete Methode zur effizienten Modellierung des zu steuernden Prozesses identifiziert, gegebenenfalls modifiziert oder neu entwickelt werden, wodurch Anforderung P-1 erfüllt wird.

(Teil-)Forschungsfrage 2:

Wie kann ein Produktionsprozess mit zugehöriger Produktionslogistik hinreichend genau in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden, um effizient Verbesserungspotenziale zur Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren?

(Teil-)Forschungsfrage 3

Nachdem aufbauend auf der Analyse der Ist-Situation Verbesserungspotenziale identifiziert wurden, sind im Rahmen des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik geeignete Verfahren zur Steuerung des betrachteten Prozesses zu identifizieren. Diese müssen kompatibel zu den gesetzten Zielstellungen und dem zu steuernden Prozess sein. Aus dieser Zielstellung lässt sich die (Teil-)Forschungsfrage ableiten, wie im Rahmen des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik auf Basis zuvor identifizierter Verbesserungspotenziale geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren ermittelt und gegebenenfalls an die Anforderungen des zu steuernden Prozesses angepasst werden, durch die die Verbesserungspotenziale umgesetzt werden können. Durch Beantwortung dieser (Teil-)Forschungsfrage soll eine Methode identifiziert, gegebenenfalls modifiziert oder neu entwickelt werden, durch die Anforderung P-2 erfüllt wird.

(Teil-)Forschungsfrage 3:

Wie lassen sich geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ermitteln und gegebenenfalls modifizieren, um identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können?

(Teil-)Forschungsfrage 4

Die Detaillierung der einzusetzenden Steuerungsverfahren in Verbindung mit der Modellierung der Informationsflüsse im Rahmen des dritten Schrittes der zu entwickelnden Methode bildet die Grundlage für die Harmonisierung der Informationsqualität. Aus diesem Grund muss die Modellierung der Informationsflüsse derart gestaltet sein, dass sie die Voraussetzungen für eine Harmonisierung der IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* bietet. Zudem sollte die Möglichkeit bestehen, die einmal modellierten Informationsflüsse um Technologien ergänzen zu können, um aufbauend auf der Ergänzung ein Konzept zur Implementierung der Steuerungsverfahren inklusive zugehöriger Erfassung, Verarbeitung und Übertragung der Informationen abzuleiten. Dies ermöglicht ein effizientes Vorgehen, da auf der bereits durchgeführten Modellierung weiter aufgebaut werden kann. Aus diesen Zielstellungen kann die (Teil-) Forschungsfrage abgeleitet werden, wie sich Informationsflüsse angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren lassen und dabei die Voraussetzungen zur Harmonisierung der Informationsqualität sowie die Möglichkeit zur Modellierung von Technologien zur Informationserfassung, -speicherung, -verarbeitung und -übertragung geschaffen werden. Die Möglichkeit zur Modellierung von Technologien zur Informationserfassung, -speicherung, -verarbeitung und -übertragung wird als Konzept zur Implementierung zusammengefasst. Durch Beantwortung dieser Forschungsfrage sollen die Anforderungen I-1 bis I-6 erfüllt werden.

(Teil-)Forschungsfrage 4:

Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?

(Teil-)Forschungsfrage 5

Aus der Definition der Informationsqualität ergibt sich, dass die Qualität einer Information immer in Verbindung mit dem Nutzen der Information beurteilt werden muss. Aus diesem Grund müssen auch die Anforderungen an die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* in Verbindung mit dem zu steuernden Prozess erfolgen. Die Definition von Anforderungen an die jeweilige IQ-Dimension erfolgt im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität (Schritt 5). Wie die Harmonisierung durchzuführen ist, sodass die jeweils erforderliche Informationsqualität ermittelt wird, bei deren Einhaltung die Steuerungsentscheidungen die Anforderungen des zu steuernden Prozesses erfüllen, fordert die letzte (Teil-) Forschungsfrage. Diese ist zwar generell auf die Informationsqualität ausgerichtet, wird jedoch im Rahmen der Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage für jede IQ-Dimension separat betrachtet. Durch Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage sollen die Anforderungen Q-1 bis Q-3 erfüllt werden.

(Teil-)Forschungsfrage 5:

Wie lässt sich die für die Steuerungsverfahren erforderliche Informationsqualität ermitteln, sodass bei Einhaltung der erforderlichen Qualität die Steuerungsentscheidungen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses harmonisiert sind?

Eine Gegenüberstellung, welche Anforderung durch die Beantwortung welcher (Teil-)Forschungsfrage erfüllt werden könnte, ist in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Beziehung zwischen (Teil-)Forschungsfragen und funktionalen Anforderungen

	Anforderungen										
TFF	**P-1**	**P-2**	**I-1**	**I-2**	**I-3**	**I-4**	**I-5**	**I-6**	**Q-1**	**Q-2**	**Q-3**
TFF 1									●	●	●
TFF 2	●										
TFF 3		●									
TFF 4			●	●	●	●	●	●			
TFF 5									●	●	●

Eine Beantwortung der (Teil-)Forschungsfragen erfolgt in den jeweiligen Kapiteln, in denen die Ausgestaltung der Methodenschritte beschrieben werden, in Form von Hypothesen. Diese Hypothesen werden schließlich im Rahmen von Anwendungsbeispielen der Methode evaluiert. Zur Beantwortung der (Teil-) Forschungsfragen wird jeweils auf den Stand der Erkenntnisse zurückgegriffen, um bereits entwickelte Artefakte auf ihre Integrationsfähigkeit in die zu entwickelnde Methode zu prüfen.

5 Schritt 1: Analyse der Ist-Situation

5.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Die Analyse der Ist-Situation bildet die Grundlage der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität. Durch sie soll zum einen ein grundlegendes Verständnis über den zu steuernden Prozess geschaffen werden, zum anderen bildet sie die Basis, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren, die im Rahmen der nachfolgenden Methodenschritte umgesetzt werden. Im Rahmen der Ausgestaltung der Analyse der Ist-Situation wird die (Teil-)Forschungsfrage 2 *„Wie kann ein Produktionsprozess mit zugehöriger Produktionslogistik hinreichend genau in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden, um effizient Verbesserungspotenziale zur Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren?“* beantwortet.

5.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Wie bereits in der Grobkonzeption der Methode beschrieben, wird zunächst der zu analysierende Bereich eingegrenzt. Anschließend werden der in dem Bereich stattfindende Prozess modelliert und zugehörige Kennzahlen aufgenommen, um abschließend Verbesserungspotenziale zu identifizieren.

5.2.1 Eingrenzung des Untersuchungsgebietes

Zunächst ist im Rahmen der Analyse der Ist-Situation der Untersuchungsbereich einzugrenzen. Bei einer Betrachtung des Produktionssystems als Ganzes würde die Gefahr bestehen, dass durch einen zu großen Betrachtungsrahmen die zu handhabende Komplexität im Rahmen der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik stark ansteigt, sodass diese nicht mehr effizient handhabbar wäre. Ein Vorgehen zur Eingrenzung des Untersuchungsgebietes ist die Beschränkung auf die Produktionsabläufe von Produkten oder Produktfamilien. Unter einer Produktfamilie werden in diesem Zusammenhang Produkte zusammengefasst, die mit ähnlichen Produktionsprozessen auf überwiegend gleichen Ressourcen produziert werden [ERL10, S. 38]. Die Eingrenzung auf Produkte beziehungsweise Produktfamilien schlagen die im Stand der Erkenntnisse untersuchten Autoren vor, deren Methoden als Grundlage die Wertstromanalyse beinhaltet (unter anderem [HMS+18, S. 250; LVF17, S. 3960]). Durch die Eingrenzung auf Produkte beziehungsweise Produktfamilien wird verhindert, dass ein komplexes Netz überlagerter Verbindungen zwischen unterschiedlich relevanten Produktionsprozessen entsteht, das die Nachvollziehbarkeit stark erschwert [ERL10, S. 38]. Ein weiteres Vorgehen zur Segmentierung und somit zur Eingrenzung des Untersuchungsgebietes schlagen Schuh et al. [SSB+11, S. 440] und Münzberg et al. [MUNY09, S. 1376] vor. In dem jeweiligen Vorgehen der Autoren ist ein ausgewählter Produktionsablauf an den Stellen in Segmente zu unterteilen, an denen sich die Bevorratungsstrategien ändern oder sich grundlegend andere Anforderungen an die Steuerung der Produktionslogistik ergeben.

Zur systematischen Eingrenzung des Untersuchungsgebietes im Rahmen der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik werden beide zuvor beschriebenen Ansätze aufgegriffen. So sind zunächst die im betrachteten Produktionssystem zu produzierenden Produkte in geeigneten Produktfamilien zusammenzufassen und anschließend der Produktionsprozess in unterschiedliche Segmente zu unterteilen, an denen sich die Bevorratungsstrategien ändern. Zur Bildung von Produktfamilien eignet sich die Bildung und Analyse einer Produktfamilien-Matrix. Im Rahmen der Bildung und Analyse einer Produktfamilien-Matrix werden zunächst (1.) alle zu produzierenden Produkte innerhalb des betrachteten

Produktionssystems in Zeilen untereinander aufgeführt, (2.) in Spalten die Produktionsschritte, die zur gesamten Bearbeitung des Produktspektrums benötigt werden, eingetragen und (3.) jeder Produktionsschritt, der zur Herstellung eines Produktes erforderlich ist, in der entsprechenden Zeile und Spalte markiert. Abschließend (4.) erfolgt im Rahmen der Analyse der aufgestellten Matrix die Bildung von Produktfamilien, indem nach dem Prinzip der Ähnlichkeit unterschiedliche Produkte mit ähnlicher Prozessabfolge zusammengefasst werden [ERL10, 39F.].

5.2.2 Modellierung des Prozesses

Aufbauend auf der Eingrenzung des Untersuchungsgebietes ist der zu verbessernde Prozess zu modellieren. Diese Modellierung bildet die Grundlage, um vom Prozess ausgehende Anforderungen an eine verbesserte Steuerung der Produktionslogistik zu erfassen und um diese zu verwenden, um geeignete Steuerungsverfahren zu identifizieren, deren Informationsflüsse in späteren Schritten zu modellieren und deren Informationsqualität zu harmonisieren sind. Zur Modellierung eines Prozesses haben Rosemann et al. [RSD12, 49F.] sechs Grundsätze einer „ordnungsgemäßen“ Modellierung eines Prozesses definiert. Diese betreffen die

- *Richtigkeit*: Der Sachverhalt ist semantisch richtig darzustellen, beispielsweise die Hierarchien und Prozesse.
- *Relevanz*: Die Abbildung der für den Einsatzzweck relevanten Aspekte und Vernachlässigung von Irrelevantem.
- *Wirtschaftlichkeit*: Die Modellierungsaktivität muss in einem angemessenen Kosten-Nutzen-Verhältnis stehen.
- *Klarheit*: Die zum Verstehen der Modellierung erforderlichen methodischen Kenntnisse sind gering zu halten.
- *Vergleichbarkeit*: Modelle der gleichen Modellierungsebene sollten auf einem einheitlichen Abstraktionsniveau sein.
- den *Grundsatz des systematischen Aufbaus*: Beschränkung auf einen Teilaspekt, mit definierten Schnittstellen zu korrespondierenden Modellen, die nicht abgebildete Aspekte berücksichtigen [RSD12, 49F.].

Diese Grundsätze werden im Rahmen der Ausgestaltung der Modellierung des zu analysierenden Prozesses als Anforderungen aufgenommen und berücksichtigt.

Im Rahmen der Untersuchung des Stands der Erkenntnisse wurden verschiedene Methoden zur Charakterisierung und Modellierung von Produktionsprozessen identifiziert. Diese umfassen Methoden zur qualitativen Charakterisierung von Prozessen mittels morphologischen Kästen [MUNY09], eine rein quantitative Charakterisierung durch Leistungsdaten von Ressourcen und Produktionsaufträgen [WOL16] sowie die Modellierung des Prozesses mittels Wertstromdiagrammen [LVF17; MMA17; MJH+19; SSB+11]. Eine rein qualitative Charakterisierung des Produktionsprozesses durch morphologische Kästen sowie die rein quantitative Charakterisierung anhand von Leistungsdaten von Ressourcen und Produktionsaufträgen ist für die Zielstellung der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität nicht ausreichend. Da die Informationsflüsse in Verbindung mit den Produktionsprozessen modelliert werden sollen, um unter anderem geeignete Datenerfassungspunkte und Informationsübertragungspunkte zu identifizieren, ist es erforderlich, dass diese Produktionsprozesse ebenfalls modelliert werden. Die qualitativen Aspekte aus den morphologischen Kästen von Münzberg et al. [MUNY09, S. 1377] sowie eine quantitative Charakterisierung der Leistungsfähigkeit der Prozesse sind

jedoch für die Steuerung der Produktionslogistik teilweise auch relevant. Aus diesem Grund sollten diese Aspekte mit in der Modellierung der Prozesse berücksichtigt werden, jedoch nicht die ausschließliche Modellierungsgrundlage bilden.

Durch die Modellierung der Produktionsprozesse in einem Wertstromdiagramm, wie es die Mehrheit der Methoden vorsieht, die in Kapitel 3 diskutiert wurden, wird das Ziel verfolgt, den Materialfluss transparent darzustellen. Dies erfolgt, um den Mitarbeitenden im Rahmen von Verbesserungsprojekten ein einfaches Kommunikationsmedium für die Diskussion der Prozesse zu ermöglichen, sodass daran schließlich Schwachstellen identifiziert werden können [BEC18, S. 155; LUWI17, S. 261; ROSH18, S. 4]. Im Wertstromdiagramm repräsentieren Symbole mit definiertem Inhalt jeden Prozessschritt in der Bearbeitungsreihenfolge. Die dabei zum Einsatz kommenden unterschiedlichen Symbolformen beschreiben jeweils Materialtransporte, Bearbeitungsschritte, Lagerungen sowie Informationsflüsse [BEC18, S. 157]. Durch diese vordefinierten Symbole beinhaltet das Wertstromdiagramm bereits eine Vielzahl an Modellierungsaspekten, die für die Steuerung der Produktionslogistik relevant sind.

Das Wertstromdiagramm ist Bestandteil der Wertstrommethode, die aus den beiden Schritten Wertstromanalyse und Wertstromdesign besteht, mit entsprechenden Unterpunkten [SOC08, S. 4411; SWW+17, S. 3907]. Für die Modellierung des Materialflusses und der Analyse der Ist-Situation ist insbesondere das Vorgehen, wie es im Rahmen der Wertstromanalyse vorgeschlagen wird, relevant. Dazu werden ausgehend vom letzten Prozessschritt, der sich noch im zuvor definierten Untersuchungsgebiet befindet, die Kundenanforderungen erfasst. Diese umfassen beispielsweise die Nachfragemengen, die Frequenz der Nachfrage und typische Schwankungen in der Nachfrage [BEC18, S. 159]. Anschließend wird die gesamte Prozesskette, die zur Produktion des betrachtenden Produktes beziehungsweise der Produktfamilie erforderlich ist, entgegengesetzt zum Materialfluss aufgenommen. Dies bietet den Vorteil, dass man das fertige Produkt als Ausgangsprodukt der Analyse zur Verfügung hat und nicht im Eingangslager priorisieren muss, mit welchem Material oder welchen Komponenten man die Prozessaufnahme beginnt [ERL10, S. 35]. Zudem bietet diese Vorgehensweise die Möglichkeit, dass der Anwendende mit der Kenntnis des Endproduktes bei jedem vorangegangenem Arbeitsschritt prüfen kann, ob sich eine logische Folge der Prozessschritte ergibt [BEC18, S. 159].

Für jeden zu durchlaufenden Prozessschritt oder eine zwischenzeitliche Lagerung des Produktes dokumentiert der Anwendende die Prozesse mit Hilfe vordefinierter Symbole. Art und Bezeichnung des aufgenommenen Schrittes werden dabei in der Regel direkt im entsprechenden Symbol erfasst. Zudem werden relevante Bearbeitungsparameter und Leistungsindikatoren erfasst und in Datentabellen unterhalb der Prozessschritte und Lagerungen eingetragen [BEC18, S. 160]. Wichtige Leistungsindikatoren, die insbesondere auch für eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik relevant sind, sind unter anderem Zykluszeiten, Rüstzeiten, Verfügbarkeiten, Bestände und Reichweiten der jeweiligen Prozessschritte [HON05, S. 139]. Mit unterschiedlichen Pfeilen wird die Art des Materialflusses zwischen den Produktionsschritten sowie zwischen den Lagerbereichen und Produktionsschritten dokumentiert. Das Ergebnis der Aufnahme des Materialflusses ist eine grafische Beschreibung des Ist-Zustandes des betrachteten Produktionsablaufs von Anfang bis Ende [BEC18, S. 160]. Anschließend werden die relevanten Informationsflüsse im Wertstromdiagramm ergänzt. Für jeden Schritt ist dabei zu modellieren, wie er gestartet wird, also was die Auslöser-Information ist. Zudem werden zentral vorgegebene Informationen und Rückmeldungen sowie Informationen und Rückmeldungen von und zum Kunden modelliert. Dazu wird mittig über dem modellierten Materialfluss ein Segment für die PPS platziert, von dem aus Informationsflüsse eingezeichnet und mit der zu übertragenden Information beschriftet werden. Dabei wird zwischen manuellen und

elektronischen Informationsflüssen unterschieden. Abschließend erfolgt auf Basis der aufgenommenen Werte eine Berechnung der Durchlauf- und Wertschöpfungszeit. Die Durchlaufzeit beschreibt dabei die gesamte Zeit, die ein Produkt von Produktionsstart bis zur Fertigstellung im Produktionsprozess verweilt. Die Wertschöpfungszeit beschreibt diejenigen Zeitanteile, an denen Veränderungen am Produkt vorgenommen werden und den Wert des Produktes steigern.

Eine Zusammenfassung der wichtigsten Symbole zur Modellierung des Wertstroms ist in Abbildung 5-1 dargestellt.

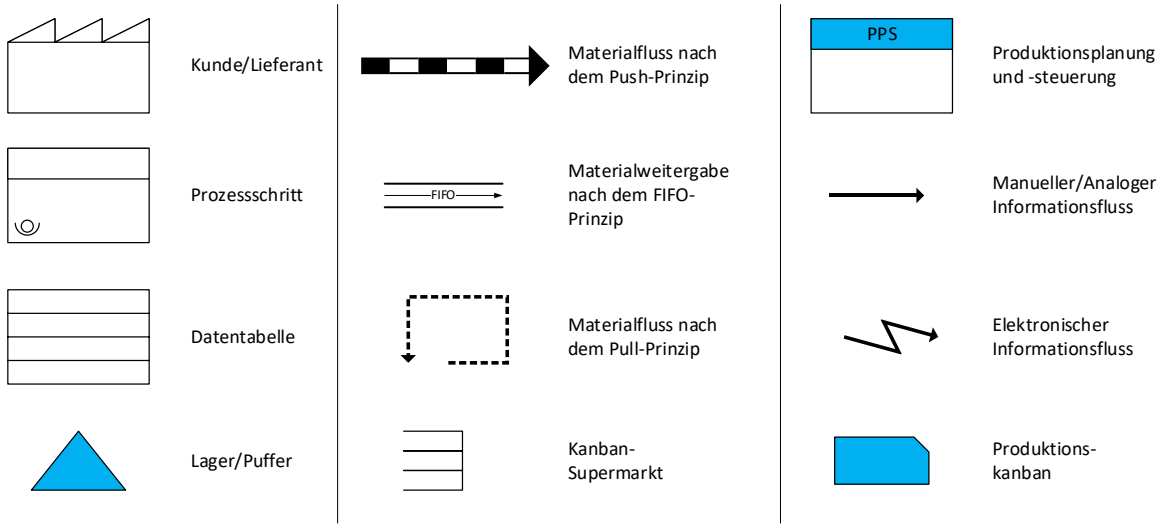

Abbildung 5-1: Ausgewählte Symbole und Bezeichnungen des Wertstromdiagramms (in Anlehnung an [BEC18, S. 159])

Ein Ausschnitt eines Wertstroms, wie er im Rahmen der Wertstromanalyse aufgenommen werden könnte, ist in Abbildung 5-2 dargestellt.

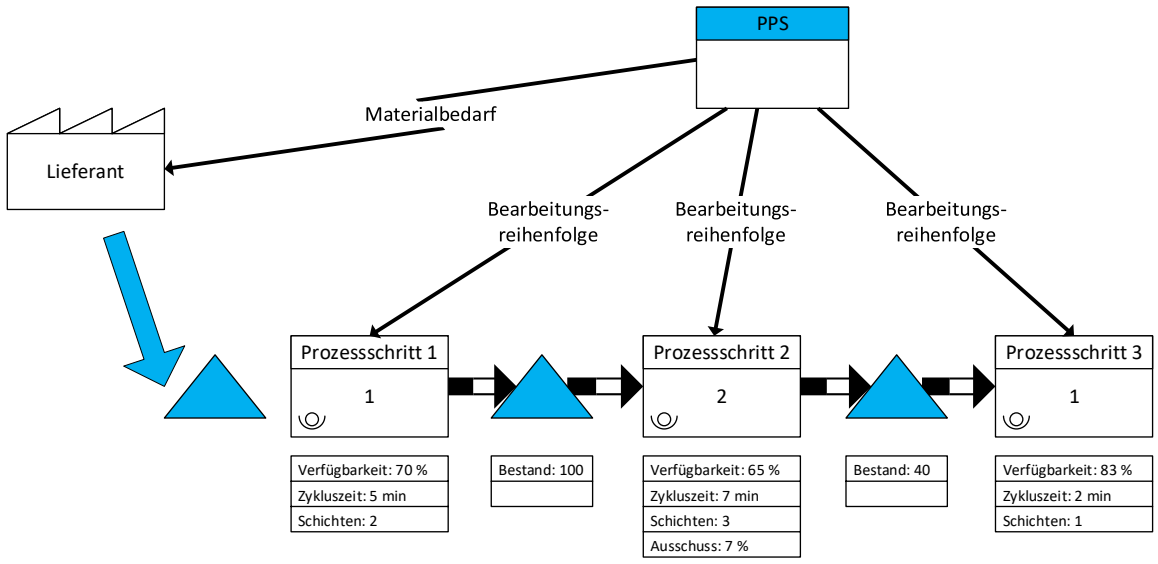

Abbildung 5-2: Ausschnitt eines Wertstromdiagramms (in Anlehnung an [ROSH18, 28F.])

Im Rahmen des Wertstromdesigns wird schließlich eine Verbesserung des Produktionsbereichs durch organisatorische Maßnahmen angestrebt [KOC18, S. 27].

Die Modellierung des Materialflusses mit Hilfe des Wertstromdiagramms erfüllt die sechs zuvor aufgeführten Grundsätze ordnungsgemäßer Modellierung: Die Modellierung des Materialflusses mit verschiedenen Symbolen ermöglicht eine semantische Abbildung (*Richtigkeit*) aller relevanten Aspekte (*Relevanz*), die zur Modellierung der Ist-Situation erforderlich sind. Dies wird durch das strukturierte Vorgehen unterstützt. Die durchgängige Symbolik zur Visualisierung des Wertstromdiagramms sorgt für ein leichtes Verständnis und eine einheitliche Sprache [LUWI17, S. 261]. Dies erfüllt die Anforderung nach *Klarheit*. Das Wertstromdiagramm kann für unterschiedliche Betrachtungsebenen und in unterschiedlichen Verdichtungen generiert werden, wie zum Beispiel für Produktionsabläufe eines einzelnen Arbeitsplatzes, einer Abfolge von Produktionsschritten in einem Ausschnitt des Fertigungsbereichs (wie in Abbildung 5-2 dargestellt) oder auf der Ebene der gesamten Lieferkette [BEC18, S. 160]. Durch diese Möglichkeit ist eine *Vergleichbarkeit* von Modellen der gleichen Modellierungsebene möglich. Auch die *Wirtschaftlichkeit* der Modellierung wird von verschiedenen Autoren als günstig bewertet (unter anderem [SWW+17, S. 3906]). Durch die im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden und Erweiterungen des Wertstromdiagramms zur Modellierung von Informationsflüssen kann abgeleitet werden, dass das Wertstromdiagramm derart modifizierbar sein könnte, dass auch die Aspekte zur Harmonisierung der Informationsqualität abbildbar sind. Unter der Annahme, dass dies möglich ist, wäre der *Grundsatz des systematischen Aufbaus* erfüllt. Durch die Aufnahme von Kennzahlen zu jedem Prozessschritt bietet sich zudem die Möglichkeit, dass die Leistungsfähigkeit der Prozessschritte quantitativ beschrieben wird. Eine qualitative Erfassung von relevanten Charakteristika, wie es durch einen morphologischen Kasten möglich wäre (wie es in [MUNY09, S. 1377] zur Beschreibung der Prozessschritte angewendet wird), wird bedingt durch die zu verwendenden Symbole ermöglicht. Nicht durch die Symbole repräsentierte Eigenschaften sind gegebenenfalls als Anmerkungen textuell an den entsprechenden Stellen im Wertstromdiagramm hinzuzufügen, wenn sie für die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik relevant sind.

Die Vorteilhaftigkeit des Wertstromdiagramms zur Modellierung von Materialflüssen gegenüber anderen Methoden zur Modellierung von Prozessen und Abläufen, wie dem Flussdiagramm, dem Prozessablaufdiagramm oder dem SCOR-Modell (Supply-Chain Operations Reference-model), bestätigt Becker [BEC18, S. 177] auf Basis eines Vergleichs der verschiedenen Methoden. Zudem kann eine prinzipielle Eignung des Wertstromdiagramms zur Analyse der aktuellen Situation aus ihrer weiten Verbreitung in der industriellen Praxis vermutet werden. So ergaben Umfragen, dass das Wertstromdiagramm etwa 60 % der produzierenden Unternehmen in Deutschland verwenden, in großen Unternehmen und Firmen der Automobilbranche sogar noch deutlich mehr, um ihre Prozesse abzubilden und zu verbessern [LUWI19, S. 2]. Gestützt wird die Eignungsfähigkeit des Wertstromdiagramms zur Modellierung der aktuellen Situation durch eine breite Verwendung auch außerhalb von produzierenden Unternehmen. So wurde die Wertstrommethode unter anderem angepasst, um sie auch im Gesundheitswesen, im Bauwesen, der Produktentwicklung sowie im Dienstleistungssektor anzuwenden [SWW+17, S. 3906].

Als wesentliche Nachteile der klassischen Wertstrommethode werden dessen statischer Charakter genannt, sodass die Methode nur auf Basis einer Momentaufnahme beruht [LUWI19, S. 6], sowie die unzureichende Modellierung der Informationsflüsse (lediglich eine Unterscheidung zwischen analoger und elektronischer Informationsübertragung, was aufgrund der vielfältigen technologischen Möglichkeiten als nicht mehr zeitgemäß angesehen wird) [LVF17, S. 3957]. Der Nachteil der Beschränkung auf eine Momentaufnahme wird im nachfolgenden Abschnitt diskutiert. Die Kritik an der unzureichenden Repräsentation der Informationsflüsse wird im Rahmen des dritten Schrittes sowie den darauffolgenden Schritten der Methode berücksichtigt.

Das Wertstromdiagramm in Verbindung mit den prinzipiellen Schritten der Wertstromanalyse stellt das Grundgerüst zur Analyse der Ist-Situation im Rahmen der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik dar.

5.2.3 Verfeinerung der Modellierung aufgenommener Kennzahlen

Wie zuvor bereits aufgeführt, basiert die Wertstromanalyse in der Regel auf einer Momentaufnahme, wobei insbesondere bei den Leistungsindikatoren nur ein Wert je Indikator aufgenommen wird, der den aktuellen Prozessschritt charakterisiert (beispielsweise erfasste Zykluszeit eines Prozessschrittes während der Aufnahme). Durch diese Einschränkung wird der zu untersuchende Sachverhalt oftmals stark vereinfacht. Durch die Verwendung eines einzelnen Wertes wird die möglicherweise vorherrschende Variabilität innerhalb der Produktions- und Logistikabläufe nicht abgebildet [BFZ09, S. 438]. Variabilität innerhalb der Produktions- und Logistikabläufe kann verschiedene Ursachen haben. Diese kann beispielsweise durch die zu bearbeitenden Produkte entstehen, die innerhalb einer Produktfamilie betrachtet werden. So können die unterschiedlich zu bearbeitenden Produkte verschiedene Bearbeitungszeiten an den einzelnen Bearbeitungsschritten benötigen (unter anderem durch veränderte Produktionsprogramme an den Maschinen oder durch unterschiedliche Eigenschaften der Ausgangsprodukte). Eine weitere Ursache für Variabilität innerhalb der Produktions- und Logistikprozesse ist die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit von Ressourcen. Ungeplante Stillstände und produzierter Ausschuss führen zu Verzögerungen und Nacharbeit [SOTE17, S. 3258]. Diese Umstände gilt es im Rahmen der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik zu berücksichtigen. Würden diese nicht berücksichtigt werden, so bestände die Gefahr, dass Maßnahmen vorgenommen werden, die nur für die zufällig während der Aufnahmen der Ist-Situation vorherrschende Konstellation an Produkten, die sich gleichzeitig im Produktionsprozess befinden, geeignet ist [RMA14, S. 95]. Um Variabilität innerhalb von Produktions- und Logistikabläufen zu modellieren, bestehen unterschiedliche Möglichkeiten, wie die Modellierung mittels Intervallarithmetik, die Modellierung durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen sowie die Verwendung von Fuzzy-Zahlen als Modellierungsansatz.

Modellierung mit Intervallen

Intervallarithmetik ist eine Arithmetik, die auf einer Definition von Intervallen anstelle von reellen Zahlen beruht [DAW14, S. 4]. Als ein Intervall wird dabei die Menge an reellen Zahlen definiert, die sich innerhalb zweier angegebener Endpunkte befindet [CDL14, S. 180]. Die formale Notation eines Intervalls ist in Formel 5-1 angegeben:

$$X = \left[\underline{X}, \overline{X}\right] \qquad \textbf{5-1}$$

Der Wert $\underline{X}$ repräsentiert dabei die untere Grenze des Intervalls, der Wert $\overline{X}$ die obere Grenze. Durch die Verwendung des Intervalls werden alle möglichen Werte repräsentiert, die eine betrachtete Größe beinhalten kann. Diese Größen können verwendet werden, um die Variabilität innerhalb von Produktions- und Logistikprozessen aufzunehmen, indem zum Beispiel durch eine wiederholte Messung der Leistungsindikatoren die Endpunkte des Intervalls ermittelt werden. Die Werte innerhalb des Intervalls haben dabei alle die gleiche Gewichtung, sodass nicht unterschieden wird, welche Werte häufiger beziehungsweise weniger häufig vorkommen. Im Rahmen der Aufnahme von Leistungsindikatoren kann $\underline{X}$ beispielsweise den minimalen Wert angeben, den ein Prozessschritt erreicht, $\overline{X}$ hingegen den maximalen Wert.

Statistische Modellierung

Ein weiterer Ansatz zur Modellierung von Variabilität ist die Verwendung von statistischen Modellen. Diese haben das Ziel, Variabilität durch mathematische Modelle des Zufalls zu beschreiben [MESC19, S. 5]. In

diesem Zusammenhang sind die zu erfassenden Leistungsindikatoren als Zufallsvariablen aufzufassen [ZBF11, S. 6474]. Die Modellierung der Zufallszahlen erfolgt durch sogenannte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Diese geben die relative Häufigkeit an, wie oft eine Zufallszahl in einem bestimmten Bereich auftritt [PUH20, S. 121]. Durch die Integration der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion über einen Bereich auf der Abszisse können schließlich Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Werte getroffen werden. Zur Charakterisierung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion wird häufig die Art der Verteilung sowie deren Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ (beziehungsweise Varianz σ^2) angegeben. Dabei ist der Erwartungswert eine Kenngröße zur Beschreibung der Lage und die Standardabweichung eine Kenngröße zur Beschreibung der Variabilität von Beobachtungen, die durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion modelliert wird [MESC19, S. 10]. In Abbildung 5-3 ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Normalverteilung mit Erwartungswert und Standardabweichung angegeben.

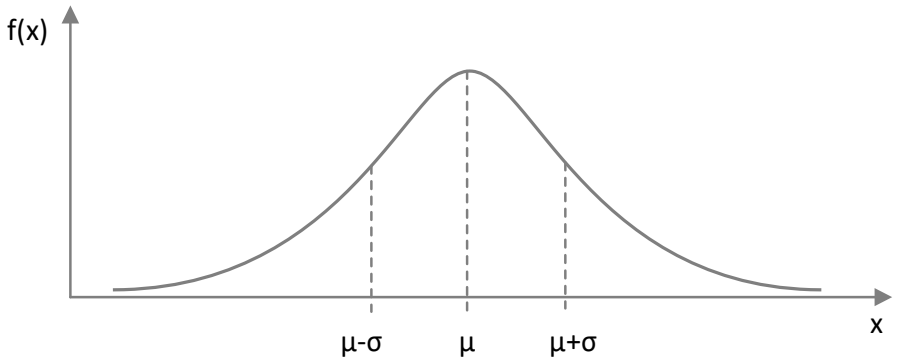

Abbildung 5-3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion einer Normalverteilung

Im Rahmen der Modellierung von Variabilität von Produktions- und Logistikabläufen wird häufig angenommen, dass die Zufallsvariablen einer Normalverteilung, der Dreiecksverteilung oder der Beta-Verteilung entsprechen [BFZ09, S. 439; ZBF11, S. 6475]. Als Vorgehen zur Modellierung der Verteilungen wird dabei wie folgt vorgegangen: (1) Definition der Verteilung, (2) Aufnahme von Werten (der sogenannten Stichprobe), (3) Bestimmung von Mittelwert und Standardabweichung [ZBF11, S. 6475]. Bei der Modellierung der Variabilität von Leistungsindikatoren gibt der Mittelwert den durchschnittlich zu erwartenden Wert eines Prozessschrittes an und die Standardabweichung liefert eine Aussage über die Streuung des Wertes.

Modellierung durch Fuzzy-Zahlen

Fuzzy-Zahlen sind eine verbreitete, etablierte Möglichkeit, um Variabilität und Unsicherheit zu modellieren [BED13, S. 51; BFZ09, S. 441; RMA14, S. 97; ROAB15, S. 147; STM+13, S. 58]. Fuzzy-Zahlen basieren auf der Theorie der unscharfen Mengen (Fuzzy-Logik), in der, entgegen der binären Zuordnung von Werten der klassischen Mengenlehre, Werte nicht nur „nicht“ oder „vollständig“ einer Menge zugeordnet werden können, sondern auch „fließende“ Übergänge der Elementzugehörigkeit zu einer Menge möglich sind [BOT95, S. 6]. Die Definition einer unscharfen Menge M erfolgt durch eine charakteristische Funktion $\mu_M(x)$, die als Zugehörigkeitsfunktion bezeichnet wird. Die Werte der Zugehörigkeitsfunktion liegen im normalisierten Fall zwischen 0 und 1. Der Wert 0 bezeichnet dabei keine Zugehörigkeit eines Wertes x zur Menge M, der Wert 1 eine vollständige Zugehörigkeit. Zwischen den Werten 0 und 1 kann, in Abhängigkeit der Form der Zugehörigkeitsfunktion, jeder beliebige reelle Wert angenommen werden. Dieser Ansatz lässt sich auch auf Zahlen erweitern, sodass Fuzzy-Zahlen entstehen. Zur Modellierung von Fuzzy-Zahlen hat sich insbesondere die LR-Notation bewährt [ROAB15, S. 148]. Die grundlegende Idee der LR-Notation ist das Aufteilen der Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl in zwei Funktionen, die sich links und rechts

des Wertes mit dem Zugehörigkeitsgrad eins befinden. Diese werden als linker und rechter Teilast bezeichnet [BOT95, S. 70]. Dadurch ist es möglich, Fuzzy-Zahlen mit Hilfe von parametrierbaren Referenzfunktionen zu modellieren, die jeweils den linken beziehungsweise rechten Teilast repräsentieren [HAN05, S. 53]. Zur Modellierung der Zugehörigkeitsfunktion einer Fuzzy-Zahl $\widetilde{M}$ nach der LR-Notation wird der „Kern" beziehungsweise „Gipfelpunkt" m von $\widetilde{M}$ angegeben, der den Zugehörigkeitsgrad 1 besitzt, sowie die linke und rechte Spannweite α und β von $\widetilde{M}$, an denen der Zugehörigkeitsgrad jeweils 0 beträgt [BOT95, S. 71]. Dadurch kann folgende Notation (Formel 5-2) verwendet werden:

$$\widetilde{M} = (m, \alpha, \beta)_{LR} \qquad \textbf{5-2}$$

Die Subskripte L und R spezifizieren die Form der Referenzfunktionen des linken und rechten Teilastes [HAN05, S. 54]. Die Form der Zugehörigkeitsfunktion (beziehungsweise die Referenzfunktionen der Teiläste) kann beliebig definiert werden, sodass sie ideal die Variabilität abbilden kann [BED13, S. 51]. In der Forschung und Praxis werden häufig Zugehörigkeitsfunktionen in Form eines Dreiecks oder Trapezes verwendet (dann als Fuzzy-Intervall bezeichnet [BOT95, S. 60]) [ROE16, S. 125; STM+13, S. 59; ZAM15, S. 456]. In diesem Fall werden die Teiläste durch lineare Funktionen abgebildet. In Abbildung 5-4 ist schematisch die Zugehörigkeitsfunktion einer dreieckigen „Triangulären Fuzzy-Zahl" (TFZ) dargestellt.

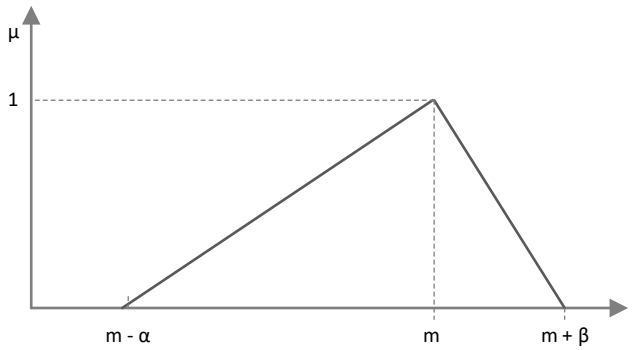

Abbildung 5-4: Trianguläre Fuzzy-Zahl

Im Rahmen der Modellierung einer Fuzzy-Zahl zur Abbildung der Variabilität von Leistungsindikatoren kann die Fuzzy-Zahl als die Menge aller möglichen Werte interpretiert werden, die der betrachtete Leistungsindikator annehmen kann. Der Wert m mit dem Zugehörigkeitsgrad 1 besitzt dabei den höchsten Grad an „Möglichkeit". Dieser Zugehörigkeitsgrad darf jedoch nicht mit einer Wahrscheinlichkeit verwechselt werden [BOT95, S. 98].

Diskussion der Modellierungsmöglichkeiten

Jede zuvor dargestellte Modellierungsmöglichkeit zur Abbildung der Variabilität innerhalb von Produktions- und Logistikabläufen bietet Vor- und Nachteile. Die Modellierung der Variabilität mit Intervallen zeichnet sich insbesondere durch ihre einfache Anwendbarkeit aus, da nur der Minimal- und der Maximalwert zu ermitteln sind und keine Annahmen über mögliche Formen von Verteilungsfunktionen oder Zugehörigkeitsfunktionen getroffen werden müssen. Dieser Vorteil ist jedoch mit dem Nachteil eines Informationsverlustes verbunden. So sind lediglich die Minimal- und Maximalwerte bekannt, es liegen jedoch keine Informationen über zu erwartende Werte vor. Dies kann zur Folge haben, dass man ein System ausschließlich auf Basis der Minimal- und Maximalwerte ausrichtet und dieses dadurch überdimensioniert, wodurch die identifizierte Verbesserung unwirtschaftlich werden könnte. Die Modellierung der Variabilität durch Intervalle ist daher nur dann sinnvoll, wenn alle Werte innerhalb des Intervalls mit gleicher

Wahrscheinlichkeit auftreten. Dieser Anwendungsfall ist jedoch auch durch die Gleichverteilung im Rahmen der statistischen Modellierung möglich, beziehungsweise durch die Modellierung mit Fuzzy-Zahlen in Form einer „Trapezoiden Fuzzy-Menge“ [FRI97, S. 170] ohne rechten und linken Teilast.

Die Modellierung der Variabilität mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen oder durch Fuzzy-Zahlen besitzen durch die Angabe von Art der Verteilung, Erwartungswert und Varianz beziehungsweise durch Angabe des Kerns, der Referenzfunktionen und der Grenzen des linken und rechten Teilastes einen höheren Informationsgehalt, weshalb diese Modellierungsmöglichkeiten im Rahmen dieser Arbeit gegenüber der Intervallarithmetik als überlegen beurteilt werden. Fuzzy-Zahlen ermöglichen im Vergleich zu Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen eine einfachere Modellierung eines realitätsnäheren Abbilds der zu erfassenden Situation, da die Form der Zugehörigkeitsfunktion einfacher modifizierbar ist als das Aufstellen einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, wenn man sich nicht den gängigen Funktionen bedienen kann [APG+11, S. 259]. Die Fuzzy-Zahlen benötigen dabei weniger Regeln und Variablen, wodurch die Möglichkeit besteht, auf umfassende mathematische Modelle zu verzichten, die nötig wären, um die gleiche Situation mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen abzubilden [APG+11, S. 259]. Zudem basieren die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen auf der Sammlung einer ausreichend großen Stichprobe, durch die sich der Erwartungswert und die Standardabweichung hinreichend genau schätzen lassen. Aufgrund von Zeit- und Kostenrestriktionen ist es jedoch oftmals im Rahmen der Wertstromanalyse nicht möglich oder sinnvoll, eine ausreichende Anzahl an Daten zu sammeln, um die Parameter statistisch valide zu schätzen [BFZ09, S. 438]. Die Sammlung einer ausreichend großen Stichprobe ist im Rahmen der Modellierung von Fuzzy-Zahlen nicht zwingend erforderlich, da dabei auch mit wenigen Schätzwerten gearbeitet werden kann [BFZ09, S. 443].

Durch den höheren Informationsgehalt gegenüber der Modellierung von Variabilität durch Intervalle und die höhere Modellierungsfreiheit und Einfachheit gegenüber der Modellierung von Variabilität mit Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen wird im Rahmen dieser Arbeit die Modellierung der Variabilität innerhalb von Produktions- und Logistikabläufen durch Fuzzy-Zahlen verfolgt. Die Abbildung der Variabilität von Kennzahlen durch Fuzzy-Zahlen innerhalb der Wertstromanalyse ist keine neu eingeführte Anwendung, sondern wurde bereits durch andere Autoren verfolgt (unter anderem [BFZ09; RÖß16; STM+13]).

Möglichkeiten zur Modellierung von Fuzzy-Zahlen

Zur Modellierung von Fuzzy-Zahlen bestehen verschiedene Möglichkeiten. Die beiden gängigsten Möglichkeiten sind die Modellierung auf Basis vorhandener Daten mit einem Histogramm sowie die Modellierung auf Basis von Schätzwerten.

Bei der Modellierung von Fuzzy-Zahlen mit Hilfe eines Histogramms auf Basis vorhandener Daten (nachfolgend Stichprobe genannt) wird die Zugehörigkeitsfunktion auf der Grundlage der Form des Histogramms ermittelt [MÖBE04, S. 91]. Dazu wird die Stichprobe entsprechend in einem Histogramm aufgeführt und dient als erster Entwurf der Generierung der Fuzzy-Zahl. Die Breite der Teilmengen des Histogramms ist dabei derart zu wählen, dass eine angemessene Histogrammkonstruktion erhalten wird. Dabei gilt es zu beachten, dass eine Variation der Breite der Teilmengen zu unterschiedlichen Zugehörigkeitsfunktionen führen kann [MÖBE04, S. 92]. Auf dieser Basis können mögliche notwendige Korrekturen vorgenommen werden, um zum Beispiel subjektive Einflüsse abzubilden. Ausgehend von dem häufigsten Wert (beziehungsweise den häufigsten Werten) ist der rechte und linke Teilast der Fuzzy-Zahl zu generieren. Dazu können Funktionen verwendet und beispielsweise mit der Methode der kleinsten Quadrate angepasst werden, sodass sie den Verlauf des Histogramms hinreichend genau abbilden. Die Schnittpunkte mit der Abszisse der jeweiligen Funktionen rechts und links (rechter und linker Teilast) neben den

geringsten Werten im Histogramm bilden die Grenze der Fuzzy-Zahl und ermöglichen somit die Berechnung von α und β. Der Punkt, an dem sich die beiden ermittelten Funktionen schneiden, bildet den Kern m. Schließlich ist die erhaltene Zugehörigkeitsfunktion zu normalisieren, sodass der Funktionswert an der Stelle m den Wert eins beträgt. Anschließend ist die Zugehörigkeitsfunktion so lange zu modifizieren, bis sie die Definition einer Fuzzy-Zahl oder eines Fuzzy-Intervalls[10] genügt [MÖBE04, S. 92]. In Abbildung 5-5 ist eine resultierende Fuzzy-Zahl auf Basis einer Stichprobe in Form eines Histogramms dargestellt. In diesem Beispiel wurden die Teiläste als lineare Funktionen abgebildet, sodass die modellierte Zahl einer TFZ entspricht und entsprechend durch Formel 5-2 angegebene Notation abgebildet werden kann.

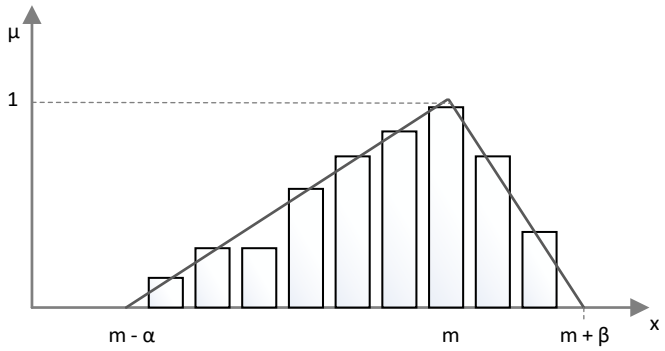

Abbildung 5-5: Ansatz der Modellierung auf Basis eines Histogramms

Die zweite gängige Variante zur Modellierung von Fuzzy-Zahlen eignet sich insbesondere dann, wenn keine Datenbasis zur Verfügung steht und Expertenwissen modelliert werden muss [BFZ09, S. 442; MÖBE04, S. 103]. Dazu werden Prozessexperten interviewt, indem diese nach einem Wert gefragt werden, der typisch für die zu erfassende Kennzahl ist sowie nach einem optimistischen und einem pessimistischen Wert, der jeweils die bestmögliche beziehungsweise die schlechteste, aber noch mögliche, Ausprägung der betrachteten Kennzahl repräsentiert [BFZ09, S. 442; HJS94, S. 104]. Der durch die Experten als typisch angegebene Wert entspricht dem Kern m der zu modellierenden Fuzzy-Zahl mit dem Zugehörigkeitsgrad eins. Den als optimistischen und pessimistischen angegebenen Wert als Ausprägung der Kennzahl wird jeweils ein Zugehörigkeitsgrad von 0,1 zugeordnet. Durch die Berechnung der Schnittpunkte mit der x-Achse der jeweils verbindenden Funktion des optimistischen beziehungsweise pessimistischen Wertes mit dem Kern können schließlich die Werte α und β ermittelt werden [BFZ09, S. 442]. Anschließend kann dies als Diskussionsgrundlage dienen, um die Form der Zugehörigkeitsfunktion entsprechend dem

[10] Definition einer *Fuzzy-Zahl* nach [BOT95, S. 58]:

Eine konvexe, normalisierte, unscharfe Menge M auf der Menge der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ heißt Fuzzy-Zahl, wenn

1. genau eine reelle Zahl m mit $\mu_A(m) = 1$ exisitiert und
2. $\mu_M(x)$ wenigstens stückweise stetig ist.

Definition eines *Fuzzy-Intervalls* nach [BOT95, S. 60]:

Eine konvexe, normalisierte, unscharfe Menge M auf der Menge der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ heißt Fuzzy-Intervall, wenn

1. zwei reelle Zahlen m_l und m_u existieren, sodass $\forall x \in [m_l, m_u]$ mit $\mu_M(x) = 1$ und
2. $\mu_M(x)$ wenigstens stückweise stetig ist.

Expertenwissen anzupassen. Eine schematische Darstellung zur Modellierung einer Fuzzy-Zahl auf Basis von drei angegebenen Schätzwerten ist in Abbildung 5-6 dargestellt.

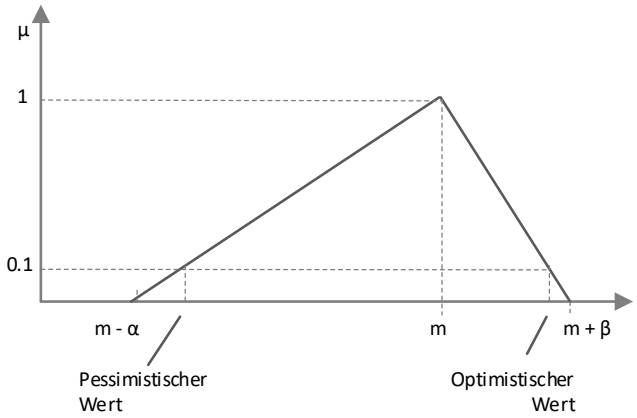

Abbildung 5-6: Ansatz der Modellierung auf Basis von Schätzwerten

Die modellierten Fuzzy-Zahlen der relevanten Kennzahlen sind schließlich unterhalb der zugehörigen Symbole (Prozessschritte oder Lager-/Pufferbereiche) im Wertstromdiagramm innerhalb der Datentabellen einzutragen (zum Beispiel die als Fuzzy-Zahl ausgedrückte Zykluszeit eines Prozessschrittes).

Zur Berücksichtigung von Eigenschaften von Datensätzen oder von Aspekten, die sich durch die Befragung der Prozessexperten ergeben haben, und sich nicht durch gängige Formen, wie einer TFZ, abbilden lassen, bietet es sich an, die Fuzzy-Zahlen mithilfe der Zugehörigkeitsgrade spezifischer Werte zu detaillieren. Dies kann beispielsweise mithilfe der frei zugänglichen Bibliothek „FuzzyNumbers“ in RStudio durchgeführt. Die Bibliothek „FuzzyNumbers“ bietet verschiedene Funktionen zur einfachen Modellierung von Fuzzy-Zahlen [PAR19]. Eine Möglichkeit besteht darin, dass eine Fuzzy-Zahl durch die in Formel 5-2 angegebenen Parameter m, α und β zunächst grob spezifiziert wird. Eine Modellierung der Referenzfunktionen erfolgt schließlich, indem spezifische Werte innerhalb der Fuzzy-Zahl mit den jeweiligen Zugehörigkeitsgraden angegeben werden. Die Referenzfunktion zwischen den angegebenen Werten kann schließlich abschnittsweise (zum Beispiel mittels linearer Interpolation) detaillierter ausgegeben werden. In Abbildung 5-7 ist beispielhaft eine mittels der Funktion „PiecewiseLinearFuzzyNumber“ der Bibliothek „FuzzyNumbers“ modellierte Fuzzy-Zahl in RStudio dargestellt. Die Dreiecke repräsentieren jeweils definierte Parameter und Wertepaare zur Spezifikation der Fuzzy-Zahl.

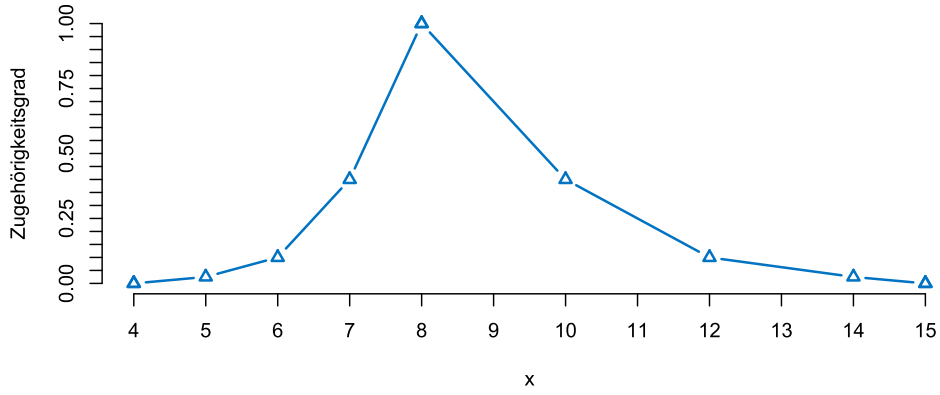

Abbildung 5-7: Modellierte Fuzzy-Zahl mithilfe der Funktion „PiecewiseLinearFuzzyNumber“ der Bibliothek „FuzzyNumbers“ in RStudio

Anzumerken bei dieser Art der Modellierung sei, dass die Fuzzy-Zahl dann nicht mehr alleinig durch Formel 5-2 beschrieben werden kann. Damit allen Beteiligten bei der Anwendung der Methode eine Interpretation der Angaben ermöglicht wird, sollte bei dieser Art der Modellierung von Fuzzy-Zahlen jeweils die grafische Darstellung angegeben werden.

5.2.4 Identifikation von Verbesserungspotenzialen

Die Modellierung der Prozessschritte sowie die Modifikation der aufgenommenen Kennzahlen, sodass sie in Form von Fuzzy-Zahlen angegeben werden, bilden die Grundlage, um Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Bevor jedoch auf mögliche Verbesserungspotenziale der Steuerung der Produktionslogistik fokussiert wird, sollten auch klassische Verschwendungsarten, die insbesondere durch Methoden der Lean Production identifiziert werden können, berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise wird durch verschiedene Studien zur Implementierung von Aspekten, Methoden und Konzepten, die unter dem Begriff Industrie 4.0 zusammengefasst werden, empfohlen [BSC18, S. 2927; RFH+19, S. 2; RCS+19, S. 45; RCT+19, S. 3963]. Durch die Aspekte, Methoden und Konzepte von Industrie 4.0 wird dabei ein Ansatz gesehen, um Produktions- und Logistikprozesse in nahezu Echtzeit zu steuern und zu synchronisieren, sodass auf effektive und effiziente Weise kundenindividuelle Produkte gefertigt werden können [MPL+18, S. 1118]. Die Vorgehensweise, zunächst die klassischen Verschwendungsarten zu priorisieren, wird dadurch begründet, dass bei vorhandenen ineffizienten Prozessen eine verbesserte (beispielsweise durch Digitalisierung) Steuerung der Produktionslogistik allein nicht zu effizienten Prozessen führt [RFH+19, S. 2]. Zudem ermöglichen standardisierte und robuste Prozesse die Identifikation, Auswahl und gegebenenfalls Modifikation von einfacher umzusetzenden Steuerungsverfahren dadurch, dass diese in ihrer Komplexität der Generierung von Steuerungsentscheidungen reduziert werden können. Weitere Studien zeigen zudem, dass die Kombination von Industrie 4.0-Ansätzen mit Ansätzen der Lean Production einen synergetischen Effekt auf die Leistungsfähigkeit der Prozesse haben, der gemeinsam größer ist, als wenn die Ansätze jeweils individuell eingeführt werden [BSS+20, S. 1].

In der klassischen Lean Production wird das Ideal angestrebt, dass kaum Variabilität und Verschwendung auftritt. Variabilität wird dabei als jede Abweichung vom optimalen Prozess bezeichnet. Ein Prozess gilt als optimal, wenn durch ihn ein qualitativ einwandfreies Produkt zum richtigen Zeitpunkt in der richtigen Menge produziert wird [THAL11, S. 334]. Als Verschwendung werden alle Aktivitäten bezeichnet, bei denen Produktionsfaktoren unnötig oder unzweckmäßig eingesetzt werden und verfügbare Kapazitäten über- oder unterfordert werden, was eine optimale Ressourcenkombination verhindert [KOC15, S. 128]. Diese Aktivitäten verursachen Kosten, bringen jedoch keinen Mehrwert. Verschwendungen nach dem Prinzipien der Lean Production werden in sieben Verschwendungsarten unterschieden [KOC15, S. 129; THAL11, S. 334]:

- *Nacharbeit:* Produkte müssen durch entstandene Fehler erneut bearbeitet werden.
- *Wartezeiten:* Zeitanteile, die Mitarbeitende von wertschöpfenden Tätigkeiten abhalten, beispielsweise durch Maschinenausfälle.
- *Überbearbeitung:* Produkteigenschaften, die über das hinaus gehen, wofür der Kunde bereit ist zu bezahlen.
- *Bewegungen:* Nicht notwendigerweise erforderliche Bewegungen, die gegebenenfalls unergonomisch sind und Zeit kosten, um zum Beispiel an Teile zu kommen.
- *Überproduktion:* Losgrößen von Produkten, die zu früh oder in zu großer Stückzahl produziert werden, sodass es für sie keinen unmittelbaren Abnehmer gibt.

- *Transporte:* Bewegungen von Materialien an andere Orte, ohne dass dies den Wert des Produktes steigert.
- *Lagerbestände:* Produkte, die Platz einnehmen, Kapital binden und deren Bestand verwaltet werden muss.

Zur Identifikation der Verbesserungspotenziale eignen sich insbesondere die in Form von Fuzzy-Zahlen aufgenommenen Kennzahlen. Durch die Spannweite der Fuzzy-Zahlen und eine Interpretation der Form der Zugehörigkeitsfunktion können unter anderem Anzeichen von Variabilität identifiziert werden. Die Lage der Kennzahlen (zum Beispiel eine hohe oder eine niedrige Auslastung) können Anzeichen für Verschwendungen innerhalb der Prozessschritte geben. Die identifizierten Verbesserungspotenziale sind innerhalb des Wertstromdiagramms an den zugehörigen Prozessschritten farblich zu markieren und ausreichend zu beschreiben, sodass diese auch noch in späteren Schritten der Methode verständlich sind.

Nachdem die Verbesserungspotenziale, die die Effizienz und Stabilität der Prozessschritte selbst betreffen, identifiziert wurden, sind Verbesserungspotenziale zu identifizieren, die die Steuerung der Produktionslogistik betreffen. Dazu ist zunächst zu prüfen, ob überhaupt systematisch Steuerungsverfahren eingesetzt werden oder ob die Steuerung der Produktionslogistik ad-hoc passiert und überwiegend auf subjektiven Entscheidungen durch die Mitarbeitenden beruht. Werden keine Steuerungsverfahren systematisch eingesetzt, so kann an dieser Stelle bereits zum nächsten Schritt der Methode übergegangen werden. Werden systematisch Steuerungsverfahren eingesetzt, so sind diese tiefergehend zu analysieren. Zunächst ist zu analysieren, ob diese zu den zu steuernden Prozessen kompatibel sind. Dazu eignet sich der aufgestellte Katalog bekannter Steuerungsverfahren, den Münzberg et al. [MUNY09; MÜNY10; NMK09] im Rahmen der im Stand der Erkenntnisse bereits vorgestellten Methode entwickelt haben. Dieser beschreibt für jedes der darin aufgeführten Steuerungsverfahren anhand verschiedener Kriterien die jeweils notwendigen Voraussetzungen zum Einsatz des Verfahrens, die unterstützten produktionslogistischen Ziele sowie deren Stärken und Schwächen. In Abbildung 5-8 ist ein Ausschnitt des aufgeführten Katalogs dargestellt.

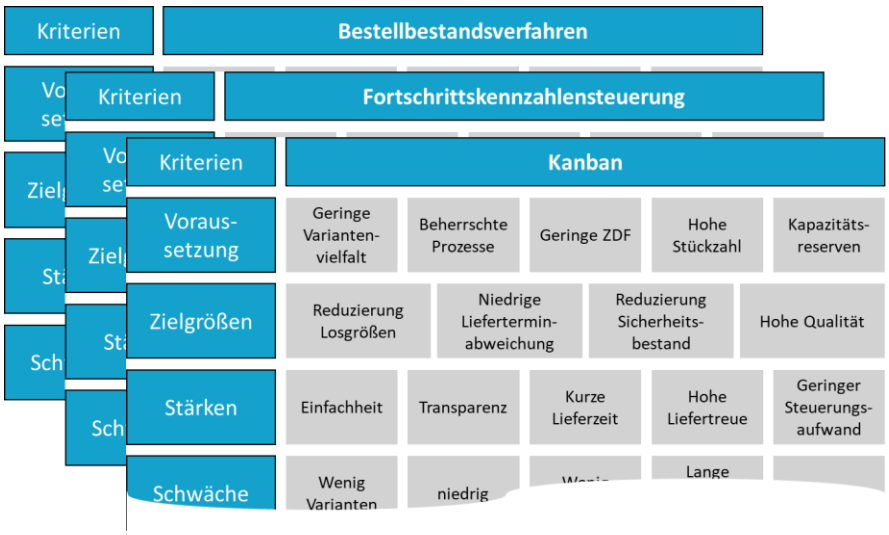

Abbildung 5-8: Katalog mit Verfahren zur Steuerung der Produktionslogistik (in Anlehnung an [MÜNY10, S. 289])

Sind die eingesetzten Verfahren nicht zu den Prozessen oder zueinander kompatibel, so ist dies als Verbesserungspotenzial zu erfassen und im Wertstromdiagramm einzutragen. Sind die eingesetzten Verfahren hingegen kompatibel, können die aufgenommenen und als Fuzzy-Zahlen modellierten Kennzahlen

geeignet sein, um Probleme bei der Anwendung der Verfahren zu identifizieren. So können beispielsweise geringe Auslastungen auf nicht abgestimmte Prozesse hindeuten, die zu Materialflussabrissen führen und somit Stillstände erzeugen. Des Weiteren ist es möglich, dass in einem solchen Fall die Informationsqualität nicht ausreichend ist, die durch die Eigenschaften des Prozesses und die eingesetzten Steuerungsverfahren gefordert werden.

5.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfragen

Aus dem Ziel, dem Aufbau und der Ausgestaltung des Methodenschrittes, die jeweils zuvor beschrieben wurden, soll (Teil-)Forschungsfrage 2 beantwortet werden:

Wie kann ein Produktionsprozess mit zugehöriger Produktionslogistik hinreichend genau in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden, um effizient Verbesserungspotenziale zur Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren?

Die Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage erfolgt in Form der Hypothese H-TFF2:

Hypothese H-TFF2:

Zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen der Steuerung der Produktionslogistik eignet sich die Wertstrommethode, da durch diese die Materialflussprozesse hinreichend genau, in angemessener, nachvollziehbarer Weise abgebildet werden, erweitert um die Aufnahme von Variabilität innerhalb der Prozessschritte mithilfe von Fuzzy-Zahlen.

Die Hypothese wird im Rahmen der Evaluierung der Methode verifiziert, indem das Kriterium „Abbildbarkeit der Prozesse“ untersucht wird, sodass ein Prozessverständnis geschaffen werden kann. Zudem wird das Kriterium „Identifizierung von relevanten Verbesserungspotenzialen“ untersucht, sodass sich auf Basis der Modellierung Verbesserungspotenziale ermitteln lassen.

6 Schritt 2: Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik

6.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Im zweiten Schritt der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität wird das Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik ausgestaltet, durch das die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation identifizierten Verbesserungspotenziale umgesetzt werden können. Das Design umfasst die Auswahl von Steuerungsverfahren, die zu definierenden Zielgrößen kompatibel und auf die zu steuernden Prozesse abgestimmt sind, und gegebenenfalls deren dazu notwendige Modifikation. In Abhängigkeit der zuvor identifizierten Verbesserungspotenziale kann dieser Schritt jedoch auch nur Teilaspekte des Designs umfassen, beispielsweise wenn bereits kompatible Steuerungsverfahren eingesetzt werden. Im Rahmen des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik wird die (Teil-)Forschungsfrage 3 *„Wie lassen sich geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ermitteln und gegebenenfalls modifizieren, um identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können?“* beantwortet. Dazu werden im Rahmen des Methodenschrittes zunächst logistische Zielgrößen definiert, auf die die Steuerungsverfahren ausgerichtet sein sollen. Anschließend erfolgt die Identifikation geeigneter Steuerungsverfahren sowie die Auswahl einzusetzender Steuerungsverfahren, die abschließend gegebenenfalls modifiziert werden.

6.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Bevor mit dem eigentlichen Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik begonnen wird, sollten zunächst die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation identifizierten nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten reduziert werden. Zur Reduktion von nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten kann auf eine Vielzahl von Methoden und Prinzipien der Lean Production zurückgegriffen werden, die auf der Aufnahme der Prozesse durch die Wertstrommethode beruhen. Dies sind Methoden wie 5S/6S (systematische Organisation von Arbeitsplätzen zur Steuerung der Effizienz), Poka-Yoke (Implementierung von Strategien zur Fehlervermeidung) oder Six-Sigma (Steigerung der Robustheit von Prozessen). Nachdem die nicht-wertschöpfenden Tätigkeiten minimiert wurden, ist es erforderlich, dass die erfassten Kennzahlen aktualisiert werden. Dies ist notwendig, da sich diese durch Anpassungen innerhalb der Prozesse derart verändert haben könnten, sodass dies Auswirkungen auf die Identifikation und Auswahl passender Steuerungsverfahren der Produktionslogistik haben kann.

Das eigentliche Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik sollte anhand zu erreichender produktionslogistischer Ziele ausgerichtet werden. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, ist es durch die zwischen den Zielgrößen bestehenden Abhängigkeiten und Zielkonflikte nicht möglich, bei allen Zielgrößen gleichzeitig ein Optimum zu erreichen. Somit ist systematisch zwischen den verschiedenen Zielgrößen abzuwägen, indem ihre Bedeutung in Verbindung mit den Kundenanforderungen sowie den Auswirkungen bei einer Fokussierung auf eine Zielgröße auf die nachfolgenden Prozesse analysiert wird [WRN15, S. 232]. Sollte die primär verfolgte logistische Zielgröße im Rahmen der *Analyse der Ist-Situation* noch nicht erfasst worden sein, so ist diese an dieser Stelle aufzunehmen, um im letzten Schritt der Durchführung der Methode den Grad der Verbesserung zu evaluieren.

Nachdem die zu priorisierenden logistischen Zielgrößen definiert wurden, sind passende Steuerungsverfahren zu identifizieren und auszuwählen, die zu den Anforderungen der zu produzierenden Produkte und

zu den Prozessen kompatibel sind. Sollte die Analyse der Ist-Situation ergeben, dass bereits kompatible Steuerungsverfahren eingesetzt werden, so kann die Identifikation und Auswahl übergangen werden.

Aus den im Stand der Erkenntnisse analysierten Methoden schlagen Münzberg et al. [MUNY09], Wolfsgruber [WOL16] sowie Schuh et al. [SSB+11] jeweils einen Ansatz vor, um geeignete Steuerungsverfahren auszuwählen. Der von Schuh et al. vorgestellte simulationsbasierte Ansatz bietet zwar die Möglichkeit, die Eignungsfähigkeit der eingesetzten Steuerungsverfahren anhand der logistischen Kennzahlen Bestand, Termintreue, Durchlaufzeit und Auslastung zu bewerten, jedoch beschränkt sich die systematische Auswahl auf das Testen verschiedener Steuerungsverfahren, ohne eine systematische Vorauswahl der zu testenden Verfahren. Ein weiterer Nachteil ist, dass die zu testenden Verfahren auf die in der Bibliothek des Simulationsprogramms implementierten Verfahren begrenzt sind. Somit sind diese Verfahren auch nicht individuell anpassbar. Der von Wolfsgruber vorgeschlagene Ansatz verfolgt ebenfalls die Auswahl passender Steuerungsverfahren durch Simulation. Auch bei diesem Ansatz werden keine konkreten Hilfestellungen gegeben, um systematisch zu testende Verfahren auszuwählen. Dieser Nachteil wird in dem von Münzberg et al. vorgeschlagenen Ansatz berücksichtigt. Dazu schlagen die Autoren (u.a. in [MUNY09, S. 1377] und [WRN15, S. 233]) einen Kriterienkatalog vor, der bei der Charakterisierung der zu produzierenden Produkte sowie der Produktionsprozesse unterstützen kann. Die Ausprägungen der Eigenschaften können bei der Auswahl von passenden Steuerungsverfahren unterstützen. In Abbildung 6-1 sind die von Münzberg et al. vorgeschlagenen Charakteristika steuerungsrelevanter Eigenschaften aufgeführt. Dieser Ansatz wird im Rahmen der Entwicklung der Methode aufgegriffen.

	Kriterien	Merkmale				
Produkt	Produktkomplexität	geringer Anzahl an Teile		mittlere Anzahl Teilen, einfache Struktur		mehrteiliges komplexes Produkt
	Produktwert	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Umsatz pro Jahr	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Variantenanzahl	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Nachfrageschwankung	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Lagerungsfähigkeit	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Lastflexibilität	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Arbeitsplanqualität	sehr gering (nicht verfügbar)		mittel	hoch	sehr hoch
Produktion	Fertigungsprinzip	Werkbank-Prinzip	Baustellen-Prinzip	Werkstattfertigung	Insel-/Gruppen-Prinzip	Fließprinzip
	Fertigungsart	Einzelfertigung		Einzel-/Kleinserienfertigung	Serienfertigung	Massenfertigung
	Teilefluss	Chargenfertigung		Los-weiser Transport	überlappende Fertigung	One-Piece-Flow Fertigung
	Materialflusskomplexität	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Produktionsengpässe	viele (wechselnd)	mehrere (konstant)	einige	einer	keine
	Schwankung der Kapazitätsnachfrage	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Kapazitätsflexibilität	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Liefersicherheit durch Vorgänger	sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch
	Datenverfügbarkeit	sehr gering (nur pro Auftrag)		mittel	hoch	sehr hoch (pro Arbeitsplatz)

Abbildung 6-1: Charakteristika steuerungsrelevanter Eigenschaften [WRN15, S. 233]

Die Charakterisierung der Produkte und der Prozesse anhand der steuerungsrelevanten Eigenschaften ist in Verbindung mit dem Wertstromdiagramm die Grundlage des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik. Einige der aufgeführten Eigenschaften lassen sich direkt aus dem Wertstromdiagramm mit den modellierten Fuzzy-Zahlen der Ist-Situation beurteilen. Ein Beispiel ist die Materialflusskomplexität, die aus den Verzweigungen innerhalb der modellierten Materialflüsse des Wertstroms

abgeleitet werden kann. Die Variantenanzahl beziehungsweise die Dynamik der Verschiebung von Engpässen kann durch eine Interpretation der Spannweite und Form geeigneter aussagekräftiger Fuzzy-Zahlen erfolgen.

Aufbauend auf der Charakterisierung der steuerungsrelevanten Eigenschaften können passende Verfahren identifiziert werden. Dazu kann auf Kataloge zurückgegriffen werden, wie im Rahmen der Analyse der Ist-Situation bereits beschrieben, in denen Steuerungsverfahren beurteilt werden sowie auf Standardwerke, in denen eine Vielzahl von Verfahren mit ihren Vor- und Nachteilen sowie den Voraussetzungen beschrieben werden (unter anderem [SCH20] und [LÖD16]). Aus den identifizierten Steuerungsverfahren sind jeweils passende auszuwählen, die es im Weiteren zu berücksichtigen gilt. Lödding [LÖD16, S. 605] fasst dieses Vorgehen unter den Schritten Verfahrensauswahl, Verfahrensparametrierung und Verfahrensdurchsetzung zusammen. Dieses von Lödding aufgeführte Vorgehen erfolgt im Rahmen der weiteren Schritte der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik. Für jedes Steuerungsverfahren ist zu definieren, für welche Prozessschritte dieses Steuerungsentscheidungen treffen soll (der Einflussbereich). So kann es im Rahmen der Kapazitätssteuerung sinnvoll sein, dass die Zuteilung von Kapazitäten für jede Ressource eines Prozessschrittes einzeln erfolgt, eine gebündelte Kapazitätszuteilung zu allen Ressourcen eines Prozessschrittes vorgenommen wird oder die Kapazitäten über mehrere Prozessschritte gebündelt zugeteilt werden.

Für die ausgewählten oder bereits vorhandenen und kompatiblen Steuerungsverfahren ist zu analysieren, wie diese derart modifiziert, erweitert und gegebenenfalls kombiniert werden können, sodass vorhandene Schwächen reduziert werden können. Dies kann unter anderem dadurch erfolgen, dass analysiert wird, durch welche Ereignisse die Steuerungsentscheidungen ausgelöst werden, welche Parameter dabei berücksichtigt werden, wie und wann diese Parameter aktualisiert werden und welche Auswirkungen eine Veränderung auf den Prozess hat. Dabei sollten insbesondere Aspekte der Digitalisierung berücksichtigt werden, die bei einer verbesserten Generierung von Steuerungsentscheidungen helfen können. Zudem sollte in Betracht gezogen werden, wie Industrie 4.0-Ansätze dabei unterstützen können. Es sollte sich an dieser Stelle jedoch noch nicht auf bekannte Technologien zur Anpassung der Verfahren fixiert beziehungsweise Möglichkeiten aufgrund bisher nicht verfügbarer Informationserfassungen verworfen werden, sondern das Design der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik technologieunabhängig erfolgen. Die zur Umsetzung erforderlichen Technologien sind in Abhängigkeit der Anforderungen an die Informationsqualität zu bestimmen. Dies wird im Rahmen der Detailplanung und Implementierung (Schritt 5) dieser Methode berücksichtigt.

Als ein Beispiel, wie durch Digitalisierung bereits bestehende Steuerungsverfahren verbessert werden können, klassifizieren Buer et al. [BFS18, S. 1038] ein Kanban-Systems in vier Stufen, in denen jeweils die höhere Stufe zu einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik beitragen kann. Ein Kanban (dt. „Karte“) wird im Rahmen eines Kanban-System als Signal an eine vorhergehende Arbeitsstation verwendet, das dieser signalisiert, dass die nachfolgende Arbeitsstation Material benötigt. Dadurch wird konsequent eine Produktion nach dem Pull-Prinzip angestrebt. *Stufe 1* beschreibt das traditionelle auf physischen Karten-basierende Kanban. Dieses ist zwar einfach und intuitiv zu handhaben, hat jedoch die Einschränkung, dass es insbesondere bei einer hohen Variantenanzahl wenig flexibel ist, da sich die einzustellenden Parameter (zum Beispiel die nachzuliefernde Menge) nicht effizient anpassen lassen. Zudem kommt es dabei zu Zeitverzögerungen, bis die Kanban-Karte an die vorhergehende Arbeitsstation übergeben wurde, und es besteht die Gefahr, dass Kanban-Karten verloren gehen. Dies wiederum würde zu einem Materialflussabriss in der Produktion führen, der Stillstände, verlängerte Durchlaufzeiten sowie

Auswirkungen auf die Liefertermintreue zufolge haben kann. *Stufe 2* beschreibt eine Erweiterung des Kanban-Systems zum sogenannten e-Kanban. In diesem wird das Kanban-Signal elektronisch übermittelt, indem die Mitarbeitenden bei Identifikation eines Materialbedarfs beispielsweise einen Barcode scannen oder die Materialanforderung manuell in eine digitale Oberfläche eingeben. Durch diese Art des Kanban-Systems können einige der zuvor aufgeführten Schwachstellen beseitigt werden. So besteht nicht mehr die Gefahr, dass die Karte verloren geht, und die Zeitdifferenz der Übertragung der Materialnachforderung wird minimiert. Dennoch findet die Auslösung des Signals noch immer manuell statt, was zu Zeitverzögerungen führen kann. In diesem Zusammenhang erfolgen Analyse und Anpassung der dem System zugrundeliegenden Parameter zudem noch immer manuell. Eine Folge dessen ist, dass ineffiziente Parametereinstellungen erst im Rahmen von größeren Anpassungszyklen ausgebessert werden würden. *Stufe 3* beschreibt ein autonomes Kanban. Im Rahmen eines autonomen Kanbans werden Entscheidungen der Materialnachforderungen automatisiert durch das Kanban-System ausgelöst und übermittelt. Obwohl das Kanban-System nun eigenständig für einen Materialnachschub sorgt, ist nicht gewährleistet, dass die Menge der zu beliefernden Materialien stets dem aktuellen Bedarf entspricht. Eine kontinuierliche Analyse und Optimierung der Parameter des Kanban-Systems, sodass die Materialnachforderungen stets rechtzeitig dem tatsächlichen Bedarf entsprechen, wird in *Stufe 4*, dem selbst-optimierenden Kanban, beschrieben. Dieses löst automatisiert und rechtzeitig Materialnachforderungen in der stets bedarfsgerechten Menge aus, indem es auf Basis ausreichender Informationen nach vordefinierten Zielstellungen eine Parameteroptimierung vornimmt.

Zur systematischen Anpassung und Modifikation der Steuerungsverfahren kann der von Buer et al. [BFS18, S. 1037] vorgeschlagene „Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus“ (original: *data-driven process improvement cycle*) auf Steuerungsverfahren angepasst werden. Dieser Prozessverbesserungszyklus besteht aus den Schritten (1) *Datensammlung*, (2) *Datenaustausch*, (3) *Analyse*, (4) *Optimierung* und (5) *Feedback*. Im Rahmen der Anpassung des „Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus“ auf Steuerungsverfahren wird die Struktur und die Bezeichnung der einzelnen Schritte übernommen.

Im Rahmen der *Datensammlung* des Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus ist vorgesehen, dass die aktuelle Ist-Situation mit Hilfe verschiedener Daten erfasst wird. Zur systematischen Anpassung und Modifikation der Steuerungsverfahren wird dieser Schritt dahingehend angepasst, dass ausgehend von der Funktionalität des einzusetzenden Verfahrens und dessen zu generierenden Ergebnissen relevante Informationen gesammelt werden, die einen Effekt auf die Steuerungsentscheidung haben.

Der *Datenaustausch* sieht in der ursprünglichen Form ein Zusammenführen der in der Datensammlung erfassten Informationen vor, sodass alle relevanten Akteure auf diese zugreifen können. Zur systematischen Anpassung und Modifikation der Steuerungsverfahren kann dies dahingehend angepasst werden, dass anhand des in der Ist-Analyse aufgenommenen Wertstroms die relevanten Prozessschritte identifiziert werden, von denen aus die Informationen zu erfassen sind (Identifikation der Informationsquellen).

Die *Analyse* sieht im Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus eine Inspektion, Bereinigung, Transformation und Modellierung der Daten vor, um daraus nützliche Informationen zu erhalten. Zudem ist in diesem Schritt vorgesehen, dass ein mathematisches Modell aufgestellt wird, anhand dessen eine Optimierung durchgeführt werden kann. Die Anwendung dieses mathematischen Modells ist Teil des Schrittes *Optimierung* mit dem Ziel, eine optimale beziehungsweise eine dem Optimum nahe Parameterkonfiguration zu finden. Die Schritte *Analyse* und *Optimierung* werden im Rahmen der systematischen Anpassung und Modifikation der Steuerungsverfahren zusammengefasst. Dabei ist zu konstruieren, wie die im Rahmen der Generierung der Steuerungsentscheidung zu berücksichtigenden Informationen zu verknüpfen

sind, sodass sich die Steuerungsentscheidungen adaptiv an sich ändernde Prozesseigenschaften anpassen. Dies entspricht im erweiterten Sinne dem mathematischen Modell, wobei dieses nicht zwangsläufig in Form eines Optimierungsproblems aufzustellen ist. Eine Parameteroptimierung, wie im Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus, findet hier nicht statt, da dem anzupassenden Verfahren noch keine Daten zugrunde liegen. Als Optimierung ist in diesem Fall die Verbesserung der Funktionalität des Steuerungsverfahren zu verstehen.

Das *Feedback* des Daten-getriebenen Prozessverbesserungszyklus sieht eine Rückführung der optimierten Parameterkonstellation in den zu verbessernden Prozess vor. Für die Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren bedeutet dies, dass die Steuerungsentscheidungen in den Prozess zurückgeführt werden müssen. Somit ist in diesem Schritt die Informationssenke, also der Empfänger der Steuerungsentscheidung, zu identifizieren, der diese dann umsetzen wird.

In Abbildung 6-2 ist der angepasste Daten-getriebene Prozessverbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren dargestellt. Dieser ist in Form eines Zyklus dargestellt, da er zum einen für jedes einzusetzende Steuerungsverfahren durchzuführen ist. Zum anderen kann dieser auch mehrfach durchlaufen werden, indem das Steuerungsverfahren inkrementell verbessert wird. Eine inkrementelle Verbesserung kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass bei jedem Durchlauf eine weitere zu berücksichtigende Einflussgröße hinzugenommen wird.

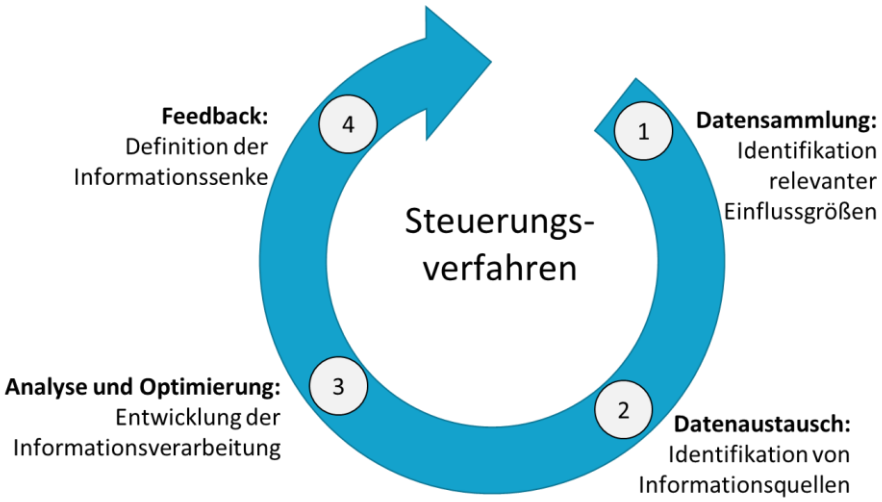

Abbildung 6-2: Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren

Werden keine Verbesserungen bereits vorhandener Steuerungsverfahren identifiziert, so sind diese trotzdem im Nachfolgenden identisch wie neu einzusetzende beziehungsweise anzupassende Verfahren zu behandeln, da auch bei diesen eine Harmonisierung der Informationsqualität erforderlich sein könnte.

6.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage

Aus dem Ziel, dem Aufbau und der Ausgestaltung des Methodenschrittes, die jeweils zuvor beschrieben wurden, soll (Teil-)Forschungsfrage 3 beantwortet werden:

Wie lassen sich geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ermitteln und gegebenenfalls modifizieren, um identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können?

Die Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage erfolgt in Form der Hypothese H-TFF3:

Hypothese H-TFF3:

Geeignete Steuerungsmethoden zur Umsetzung der identifizierten Verbesserungspotenziale lassen sich durch einen Abgleich der Funktionalität der Methoden mit Anforderungen der zu produzierenden Produkte, Prozessanforderungen und den zu erreichenden produktionslogistischen Zielen ermitteln. Durch eine systematische Anpassung der Verfahren mit Hilfe des ‚Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren' können, sofern notwendig, die Verfahren angepasst werden, sodass sich diese adaptiv an Prozessänderungen anpassen.

Diese Hypothese wird im Rahmen der Evaluierung der Methode verifiziert. Dies erfolgt, indem die Kriterien überprüft werden, ob mindestens ein geeignetes Steuerungsverfahren identifiziert wurde, um zuvor identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können, und ob sich die Steuerungsverfahren strukturiert mit Hilfe des „Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren" anpassen lassen, sofern dies erforderlich ist.

7 Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen

7.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Der dritte Schritt der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik beinhaltet die Modellierung von Informationsflüssen der Steuerungsverfahren, die im Rahmen des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik ausgewählt und modifiziert wurden. Im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse werden Aspekte der (Teil-)Forschungsfrage 4 *„Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?“* beantwortet. Die Modellierung der Informationsflüsse bildet die Grundlage zur Harmonisierung der Informationsflüsse (Schritt 4) sowie zur Ableitung eines Konzeptes, das die Grundlage einer Implementierung ist (Schritt 5).

7.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Die Modellierung von Informationsflüssen zur Abbildung der Steuerungsverfahren ist entsprechend der in der (Teil-)Forschungsfrage TFF4 formulierten Anforderungen angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich durchzuführen. Dies bezieht sich auf die Erfassungspunkte (Anforderung I-1), die Informationsverarbeitung (Anforderung I-4) und auf die Informationsübermittlung/Übermittlungspunkte (Anforderung I-5). Zudem sind bei der Modellierung der Informationsflüsse ebenfalls die bereits in Schritt 1 aufgeführten *Grundsätze einer ordnungsgemäßen Modellierung* nach Rosemann et al. [RSD12, 49FF.] zu berücksichtigen.

Eine Modellierung der Informationsflüsse, die die Anforderungen I-1, I-4 und I-5 mindestens teilweise erfüllen, erfolgt durch die im Stand der Erkenntnisse untersuchten Ansätze von Schuh et al. [SSB+11], Roh [ROH19] und Hicks [HIC07]. Mindestens zwei der drei Anforderungen zur Modellierung der Informationsflüsse, ohne Berücksichtigung von einzusetzenden Technologien, erfüllen verschiedene Erweiterungen der Wertstrommethode ([LVF17; MMA17; MJH+19; RKW19]) im Cluster „Methoden zur Verbesserung und digitalen Transformation produktionslogistischer Prozesse“ sowie die Methode nach Reuter et al. [RBH+17]. Entsprechend des *Grundsatzes des systematischen Aufbaus* [RSD12, S. 51] sollten die Informationsflüsse durch wohldefinierte Schnittstellen zum zu steuernden Prozess modelliert werden. Dies erfolgt in den Ansätzen von Schuh et al. [SSB+11], Roh [ROH19] sowie den Erweiterungen der Wertstrommethode ([LVF17; MMA17; MJH+19]), indem die Informationsflüsse auf weiteren Ebenen mit dem Produktionsprozess verbunden werden. Während die Erweiterungen der Wertstrommethode sich sehr stark auf die Erfassungsarten und Speichermedien fokussieren, liefern die Ansätze von Schuh et al. [SSB+11] und Roh [ROH19] einen starken Fokus auf die Informationserfassung, -verarbeitung und -übertragung.

Zur strukturierten Modellierung der Informationsflüsse, inklusive deren Verarbeitung, wird in Anlehnung an den Ansatz von Schuh et al. [SSB+11] das Wertstromdiagramm, wie es in Schritt 1 (Analyse der Ist-Situation) aufgenommen wurde, erweitert. Dies bietet zum einen den Vorteil, dass der bereits aufgenommene und modellierte Prozess weiterverwendet werden kann, ohne diesen in eine andersartige Struktur überführen zu müssen. Zum anderen bietet die Strukturierung des Wertstromdiagramms in Anlehnung an Schuh et al. [SSB+11] gegenüber der Modellierung von Roh [ROH19] den Vorteil, dass in diesem technologieneutral modelliert werden kann, wohingegen im Ansatz von Roh [ROH19] die Systeme als Akteure einzutragen sind, in denen die Informationen gespeichert und verarbeitet werden sollen.

Die Strukturierung erfolgt, indem das Wertstromdiagramm durch drei übereinander liegende, horizontale Swimlanes gegliedert wird. Swimlanes bezeichnen Elemente zur visuellen Darstellung von zusammengehörenden Teilelementen oder -prozessen. Die unterste Swimlane wird als *Prozess-Swimlane* bezeichnet und entspricht der Swimlane *Wertstrom* im Ansatz von Schuh et al. [SSB+11]. In dieser wird der aufgenommene Prozess aus der Analyse der Ist-Situation eingefügt. Die darüberliegende Swimlane wird als *Information-Swimlane* bezeichnet. In dieser werden die aus den Prozessen zu erfassenden oder an die Prozesse zu übergebenden Informationen aufgeführt. Diese Swimlane entspricht der Swimlane *Stamm- und Auftragsdaten* im Ansatz von Schuh et al. [SSB+11]. Im Unterschied zum Ansatz von Schuh et al. ist diese Swimlane mittig positioniert und bildet nicht die oberste Swimlane ab. Diese mittige Positionierung ermöglicht es, die Interaktion der Informationen mit dem Prozess (vom Prozess zu erfassen, an den Prozess zu übermitteln) zu modellieren und erweitert somit den Ansatz von Schuh et al. [SSB+11], indem lediglich die Stamm- und Auftragsdaten als ein Symbol repräsentiert werden, ohne innerhalb des Diagramms zu spezifizieren, zu welchen Prozessschritten diese gehören. Die oberste Swimlane wird als *Informationsverarbeitung-Swimlane* bezeichnet und entspricht der Swimlane *Produktionssteuerung* im Ansatz von Schuh et al. [SSB+11]. In dieser Swimlane wird die Verarbeitung der erfassten Informationen modelliert.

Zur Modellierung der Informationsflüsse innerhalb der Swimlanes wird die bestehende Symbolik der Wertstrommethode ergänzt. Diese Erweiterung der Symbole ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Abbildung 7-2 zeigt beispielhaft eine Modellierung der Informationsflüsse nach Durchführung dieses Methodenschrittes. In den im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden gibt es keine Ansätze zur expliziten Modellierung der Informationsqualität innerhalb der Informationsflüsse. Diese sollten an dieser Stelle jedoch bereits als Platzhalter mitmodelliert werden, um im Rahmen des nächsten Schrittes der Methode (Harmonisierung der Informationsqualität) ausgefüllt werden zu können.

Die Ansätze der erweiterten Wertstrommethode [LVF17; MMA17; MJH+19] bieten durch die eingeführten Symbole eine Übertragbarkeit, um Informationsflüsse zu modellieren, in denen die Informationsqualität abgebildet werden kann.

Durch die von Lewin et al. [LVF17] erweiterte und auf Meudt et al. [MMA17] basierende eingeführte Symbolik wird jede zu erfassende beziehungsweise zu übertragende Information neben der Bezeichnung durch die Eigenschaften „Häufigkeit der Erfassung“ (beispielsweise ereignisdiskret, minütlich, stündlich, etc.), „Art der Erfassung“ (manuell, teilautomatisiert, automatisiert) und der Ebene, auf die sich die Information bezieht, entsprechend des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0 nach [VDZV15]), beschrieben. Die zu erfassenden Eigenschaften der Modellierung von Lewin et al. [LVF17] erfassen im Rahmen der Analyse zwar nur die Ist-Situation der Eigenschaften und keine Anforderungen an IQ-Dimensionen, jedoch können die Platzhalter für ein Eintragen der Anforderungen an die IQ-Dimensionen verwendet werden. Somit kann der grundlegende Aufbau zur Modellierung einer zu erfassenden beziehungsweise zu verarbeitenden Information von Lewin et al. [LVF17] übernommen und auf die Anforderungen dieser Methode angepasst werden. Die Ebene, auf die sich die Information entsprechend des RAMI 4.0 bezieht, kann als Platzhalter für die IQ-Dimension *Granularität* verwendet werden. Die Häufigkeit der Erfassung kann als Platzhalter für die Anforderungen der IQ-Dimension *Frequenz* verwendet werden. Für die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ist im Rahmen der Modellierung von Lewin et al. [LVF17] und auch in den anderen Modellierungsansätzen, die im Stand der Erkenntnisse untersucht wurden, kein vergleichbares übertragbares Symbol vorgesehen. Somit wird hierfür ein neues Symbol eingefügt.

Jede zu erfassende beziehungsweise zu übermittelnde Information wird innerhalb der *Information-Swimlane* über dem zugehörigen Prozessschritt durch einen sogenannten *Informationsbeschreibungsblock*

beschrieben. Dieser ist als Symbol in Abbildung 7-1 als *Erfasste/Übermittelte Information* dargestellt. Eine Information ist dabei einem Prozessschritt zugeordnet,

- wenn diese Information durch diesen erzeugt wird oder einen realen Sachverhalt des Prozessschrittes beschreibt (Prozessschritt als Informationsquelle),
- wenn die Information durch den Prozessschritt genutzt wird, beispielsweise zur Umsetzung einer Steuerungsentscheidung (Prozessschritt als Informationssenke) oder
- wenn im Rahmen der Steuerungsentscheidung eine Information benötigt wird, die von anderer Stelle aus erzeugt wird (beispielsweise der Produktionsplanung), den Prozessschritt jedoch unmittelbar betrifft.

Ein Beispiel für eine durch einen Prozessschritt erzeugte Information ist der aktuelle Bestand und ein Beispiel für eine genutzte Information ist die Transportmenge, die durch ein Steuerungsverfahren bestimmt wurde und durch einen Transportvorgang umgesetzt wird. Eine Information, die nicht durch einen Prozessschritt erzeugt wird, aber diesem zugeordnet werden kann, ist beispielsweise der zu bearbeitende Arbeitsvorrat. Der Arbeitsvorrat würde in diesem Fall von der Produktionsplanung vorgegeben werden. Für jede Information ist in diesem Schritt der Methode zunächst die Bezeichnung der Information in den *Informationsbeschreibungsblock* einzutragen. Die zugeordneten Platzhalter werden erst im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität (Schritt 4) ausgefüllt.

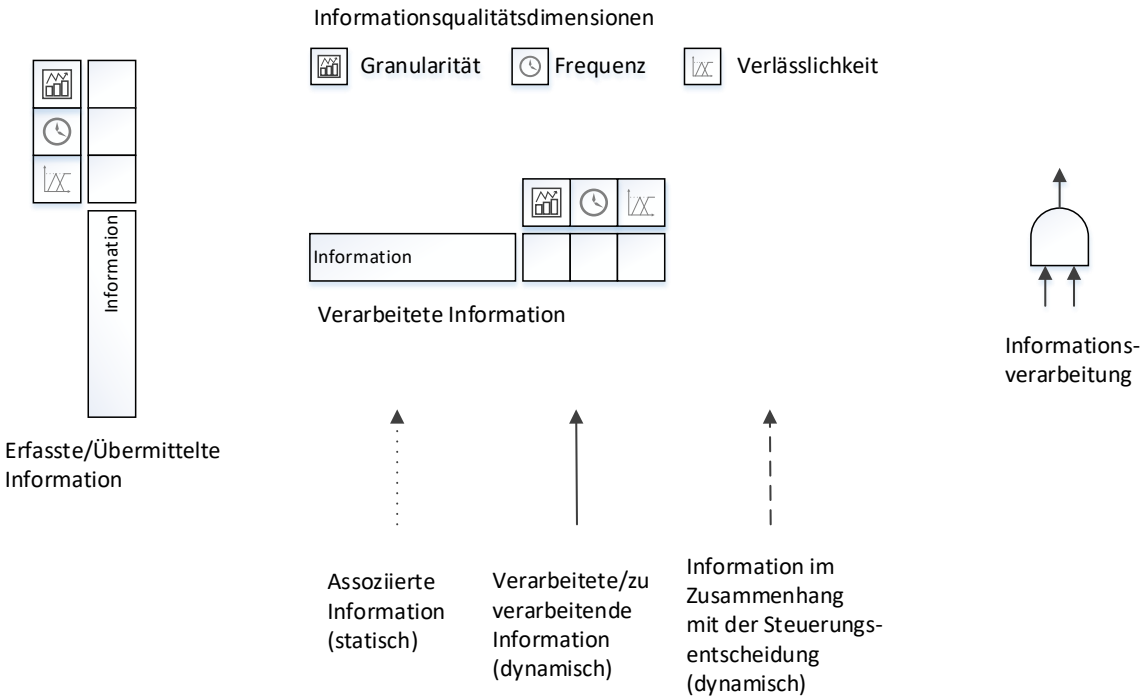

Abbildung 7-1: Symbole zur Modellierung von Informationsflüssen

Welche Informationen benötigt werden, ist aus den im Rahmen des vorhergehenden Schrittes der Methode *Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik* ausgewählten und modifizierten Steuerungsverfahren abzuleiten.

Durch eine Verbindung der *Informationsbeschreibungsblöcke* durch Pfeile kann verdeutlicht werden, ob es sich bei einer Information um eine zu erfassende/zugehörige oder zu übertragende Information handelt. Ein vom Prozessschritt wegführender Pfeil symbolisiert, dass es sich um eine zu

erfassende/zugehörige Information handelt, wohingegen ein zum Prozessschritt hinführende Pfeilrichtung verdeutlicht, dass es sich um eine zu übertragende Information handelt. Bei der Symbolisierung der Zugehörigkeit einer Information zu einem Prozessschritt wird zwischen drei verschiedenen Arten unterschieden, da diese innerhalb der weiteren Schritte der Methode unterschiedlich zu berücksichtigen sind:

- *Verarbeitete/zu verarbeitende Informationen:* Diese Art der Informationen sind durch eine durchgezogene Linie dargestellt und beschreiben Informationen, die direkt die Steuerungsentscheidungen beeinflussen oder ein Resultat der Steuerungsentscheidung sind. Diese ändern sich dynamisch im Zeitverlauf, haben somit nur eine begrenzte Gültigkeit und entsprechen häufig Bewegungs- und Rückmeldedaten. Beispiele für diese Art der Information sind aktuelle Zykluszeiten einer Ressource oder der momentane Zustand der Ressource.
- *Informationen im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung:* Diese Art der Informationen sind durch eine gestrichelte Linie dargestellt und beschreiben Informationen, die nicht die Steuerungsentscheidung direkt beeinflussen, aber für deren Umsetzung benötigt werden. Auch diese Informationen ändern sich dynamisch im Zeitverlauf. So können diese Informationen beispielsweise den aktuellen Lagerplatz eines zu transportierenden Materials beschreiben, das in einer gewissen Anzahl (durch die Steuerungsentscheidung bestimmt und als verarbeitete Information modelliert) zu transportieren ist.
- *Assoziierte Informationen:* Diese Art der Informationen sind durch eine gepunktete Linie dargestellt und beschreiben statische Informationen, die zum Prozessschritt gehören. Häufig sind diese in Form von Stammdaten gegeben. Ein Beispiel für eine *assoziierte Information* ist die fixe Zuordnung eines Pufferplatzes zu einer Ressource, zu dem Material hin transportiert werden soll, oder dessen maximal vorhandene Kapazität. Diese Informationen werden als statisch aufgefasst, da sie sich in der Regel nur durch strukturelle physische oder organisatorische Anpassungen im Produktionssystem verändern, welche unregelmäßig in größeren Abständen erfolgen.

Die jeweiligen Pfeilarten sind in Abbildung 7-1 unten dargestellt.

Im Anschluss an die Modellierung der Informationen ist deren Verarbeitung entsprechend der zuvor (Schritt 2) ausgewählten und modifizierten Steuerungsverfahren zu modellieren. Die Verarbeitung von Informationen wird durch die im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden nur durch die Ansätze von Schuh et al. [SSB+11] sowie von Roh [ROH19] berücksichtigt. Die Erweiterungen der Wertstrommethode berücksichtigen lediglich die Informationsnutzung. Die Modellierung der Informationsverarbeitung nach Roh [ROH19] besitzt, ähnlich wie die Strukturierung der Informationsflüsse, noch immer den Nachteil, dass dazu die bereits bestehenden und einzusetzenden Systeme als Akteure benötigt werden. Somit würde sich der Ansatz in dieser Hinsicht nur für eine Integration des Steuerungsverfahrens in bestehende Systeme eignen. Zudem ist es möglich, dass bei der Modellierung der Informationsverarbeitung in Form eines Sequenzdiagramms, wie es Roh [ROH19] vorsieht, bei der Verwendung nur eines Systems alle Informationen in dieses eingehen und das Ergebnis in Form einer Ausgangsinformation aus dem System wieder hinaus modelliert wird. Somit werden keine Zwischenschritte modelliert, die durch die zuvor durchgeführte Modifikation des Steuerungsverfahren berücksichtigt werden müssten. Diese sind jedoch von Relevanz bei der Implementierung des Steuerungsverfahrens und sollten innerhalb der *Informationsverarbeitung-Swimlane* modelliert werden. Die Modellierung der Informationsverarbeitung im Ansatz von Schuh et al. [SSB+11] erfolgt auf einem sehr hohen Abstraktionsniveau, sodass die gesamte Informationsverarbeitung innerhalb eines einzelnen Blocks dargestellt ist. Somit besteht auch bei diesem Ansatz das Problem, dass sich Modifikationen, die das Steuerungsverfahren abwandeln, nicht darstellen lassen. Zur Modellierung

der Informationsverarbeitung innerhalb der *Informationsverarbeitung-Swimlane* wird daher die Symbolik erweitert, sodass sich grundlegend die Bestimmung von erforderlichen Zwischengrößen modellieren lässt, wodurch die Modifikationen der Steuerungsverfahren abgebildet werden können.

Eine Informationsverarbeitung erfolgt durch sogenannte *Informationsverarbeitungsblöcke*, wie beispielhaft in Abbildung 7-1 rechts dargestellt. Durch in diese Blöcke hineinzeigende Pfeile sind die Informationen aus der *Information-Swimlane* mit dem *Informationsverarbeitungsblock* zu verbinden, um darzustellen, dass es sich um Input-Informationen handelt, die im Rahmen eines Verarbeitungsschrittes berücksichtigt werden müssen. Mittels eines *horizontalen Informationsbeschreibungsblocks* (dargestellt in Abbildung 7-1 mittig), der durch einen ausgehenden Pfeil aus dem *Informationsverarbeitungsblock* mit diesem verbunden ist, wird das Ergebnis der verarbeiteten Information dargestellt, sofern es sich um eine Zwischengröße handelt, die gesondert auszugeben ist. Wird durch einen *Informationsverarbeitungsblock* das Steuerungsergebnis in der Form erzeugt, wie es an den Prozess zu übergeben ist, so ist dieses, ohne horizontalen *Informationsbeschreibungsblock*, direkt als Information in der *Information-Swimlane* über den betreffenden Prozess zu modellieren. Der *Informationsverarbeitungsblock* beschreibt, unabhängig von der Generierung eines Zwischenergebnisses oder der endgültigen Steuerungsentscheidung, dass eine Transformation von Informationen stattfindet, ohne detailliert zu beschreiben, wie diese stattfindet. Zur detaillierten Beschreibung, wie die Transformation der Input-Informationen in die Output-Information (Zwischenergebnis oder Steuerungsentscheidung) erfolgt, können innerhalb der *Informationsverarbeitungsblöcke* Verweise auf weitere Diagramme und Dokumentationen angegeben werden, die dies in einem angemessen Detailgrad darstellen. Dies eignet sich insbesondere bei komplexeren Operationen. Die zur detaillierten Modellierung der Informationsverarbeitung anzuwendenden Diagramme und Dokumentationen sind je nach Anwendungsfall durch den Anwender der Methode festzulegen. Ein Beispiel der zuvor beschriebenen Struktur des Wertstromdiagramms mit verwendeter Symbolik zur Modellierung der Informationsflüsse und Verarbeitung ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

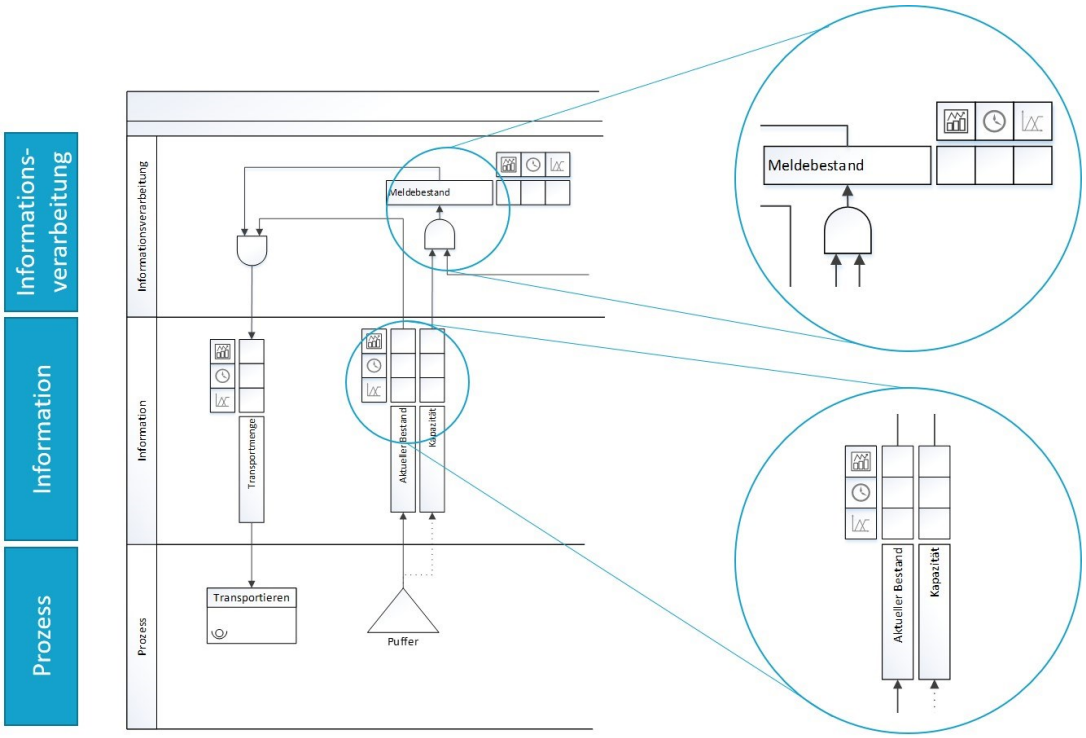

Abbildung 7-2: Struktur des Wertstromdiagramms

Das in diesem Schritt erweiterte Wertstromdiagramm stellt die Informationsgrundlage dar, um in den darauffolgenden Schritten der Methode die Anforderungen an die IQ-Dimensionen zu bestimmen. Zudem ist dies die Informationsgrundlage, um die zur Einhaltung der Anforderungen an die IQ-Dimensionen notwendigen Technologien zur Informationserfassung, -übertragung und -speicherung zu bestimmen.

Im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse besteht die Möglichkeit, dass Aspekte identifiziert werden, die es zu berücksichtigen gilt, die aber im Design der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik nicht berücksichtigt wurden. Ist dies der Fall, so ist das Design anzupassen, weshalb dieser Methodenschritt einen optionalen Rückschritt zum vorhergehenden Schritt vorsieht, durch den dieser modifiziert werden kann. Dies ermöglicht ein iteratives, agiles Angleichen der Informationsflüsse und des Designs.

7.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage

Aus dem Ziel, dem Aufbau und der Ausgestaltung des Methodenschrittes, die jeweils zuvor beschrieben wurden, sollen die Aspekte der angemessenen, nachvollziehbaren und übersichtlichen Modellierung aus (Teil-)Forschungsfrage 4 beantwortet werden:

„Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?“

Die Beantwortung der aufgeführten Aspekte der (Teil-)Forschungsfrage erfolgt in Form der Hypothese H-TFF4.1:

Hypothese H-TFF4.1:

Die Unterteilung des Wertstromdiagramms mittels Swimlanes in die Bereiche Prozess, Information und Informationsverarbeitung ermöglicht eine strukturierte Modellierung der Informationsflüsse, die durch die eingeführte Symbolik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modelliert werden können, sodass alle bis zur Durchführung von Methodenschritt 3 bekannten und relevanten Aspekte zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik durch eine harmonisierte Informationsqualität abgebildet werden können.

Diese Hypothese wird im Rahmen der Evaluierung der Methode verifiziert. Dies erfolgt anhand des Kriteriums der Abbildbarkeit der Informationen und Informationsflüsse des Steuerungsverfahrens, das zur Umsetzung der Verbesserungspotenziale ausgewählt wurde.

Die weiteren Aspekte der (Teil-)Forschungsfrage 4 werden in späteren Schritten der Methode berücksichtigt und deren Beantwortung in Form von weiteren zu evaluierenden Hypothesen ausgedrückt.

8 Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität

8.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Durch die Harmonisierung der Informationsqualität wird das Ziel verfolgt, Anforderungen an die Informationsqualität in Form der Ausprägungen der IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* zu bestimmen, die mindestens notwendig sind, damit die ausgewählten und modifizierten Steuerungsverfahren Steuerungsentscheidungen generieren, die zu Effizienzsteigerungen der produktionslogistischen Abläufe führen. Im Rahmen der Ausgestaltung des Methodenschrittes wird die (Teil-)Forschungsfrage 5 *„Wie lässt sich die für die Steuerungsverfahren erforderliche Informationsqualität ermitteln, sodass bei Einhaltung der erforderlichen Qualität die Steuerungsentscheidungen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses harmonisiert sind?“* beantwortet. Die Harmonisierung baut dabei auf den zuvor modellierten Prozessschritten und Informationsflüssen auf und dient als Vorgabe zur Identifikation und Auswahl passender Technologien im Schritt 5 *Detailplanung und Implementierung.*

8.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Keine der im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden und Ansätze erfüllt vollständig die Anforderungen (Q-1 bis Q-3) zur Harmonisierung der Informationsqualität. Dies liegt unter anderem daran, dass teilweise zur Bestimmung der Informationsqualität diese als ein zu variierender Parameter aufgefasst wird, der innerhalb einer Simulationsstudie so lange angepasst wird, bis zufriedenstellende Ergebnisse ermittelt wurden ([WOL16]), dass die IQ-Dimensionen nicht explizit berücksichtigt werden und implizit angenommen wird, dass die als Information erfassten Werte immer mit dem zu repräsentierenden realen Sachverhalt exakt übereinstimmt ([LVF17; MMA17; RKW19]) oder sich die Methoden auf die Analyse der vorhandenen Informationsqualität beschränken ([BDF+18; GCW+19; HIC07; RBH+17; ZXY+20]). Somit kann keiner der vorhandenen Ansätze übernommen werden. Im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität können jedoch einige Aspekte der verschiedenen Ansätze aufgegriffen werden. Diese werden in den entsprechenden Stellen der Ausgestaltung der Harmonisierung der IQ-Dimensionen beschrieben.

Zur Harmonisierung der IQ-Dimensionen ist zunächst zu analysieren, in welcher Form die mit der Steuerungsentscheidung verbundenen Informationen durch den umsetzenden beziehungsweise berücksichtigenden Prozessschritt benötigt werden. Dies stellt die Grundlage für die IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* dar, da deren Anforderungen an der identifizierten *Granularität* ausgerichtet werden müssen. Nachdem die Anforderung an die IQ-Dimension *Granularität* ermittelt wurde, ist die Frequenz zu ermitteln, in der sich der durch die Information in der zugehörigen *Granularität* reale Sachverhalt ändert und welche zeitlichen Abweichungen bei der Aktualisierung der Information in Form von Toleranzen zulässig sind. Abschließend sind die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zu ermitteln. Dabei sind die Abhängigkeiten zu den zuvor bestimmten Anforderungen an die IQ-Dimensionen *Granularität* und *Frequenz* zu berücksichtigen.

8.2.1 Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität*

Die IQ-Dimension *Granularität* berücksichtigt den Grad der Auflösung, in dem die Information zur Verfügung steht, und inwieweit diese Granularität ausreichend ist, um das betrachtete Objekt oder den Sachverhalt hinreichend genau abzubilden, sodass dessen relevanten Eigenschaften im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigt werden können. Diese Ausprägung der IQ-Dimension ist für jede

Information und jeden Informationsbeschreibungsblock zu bestimmen, der im Rahmen der *Modellierung der Informationsflüsse* (Schritt 3) modelliert wurde. In einigen Fällen ist es möglich, die erforderliche *Granularität* direkt aus der Bezeichnung der Information im Informationsbeschreibungsblock abzuleiten. Dies ist jedoch nicht immer gegeben, da sich manche Informationen durch verschiedene Granularitätsstufen ausdrücken lassen, die, in Abhängigkeit des realen Sachverhalts, zu verschiedenen Steuerungsentscheidungen führen können. Ein Beispiel für verschiedene Granularitätsstufen im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik ist die Reichweite eines Arbeitsvorrats vor einem Prozessschritt. Dieser kann beispielsweise als die Anzahl noch zu bearbeitender Aufträge (Abbildung 8-1 links) angegeben werden, durch die Summe der Auftragsinhalte in Form einer noch zu bearbeitenden Menge (Abbildung 8-1 mittig) oder durch die Summe der Bearbeitungszeiten der noch zu bearbeitenden Auftragsinhalte (Abbildung 8-1 rechts).

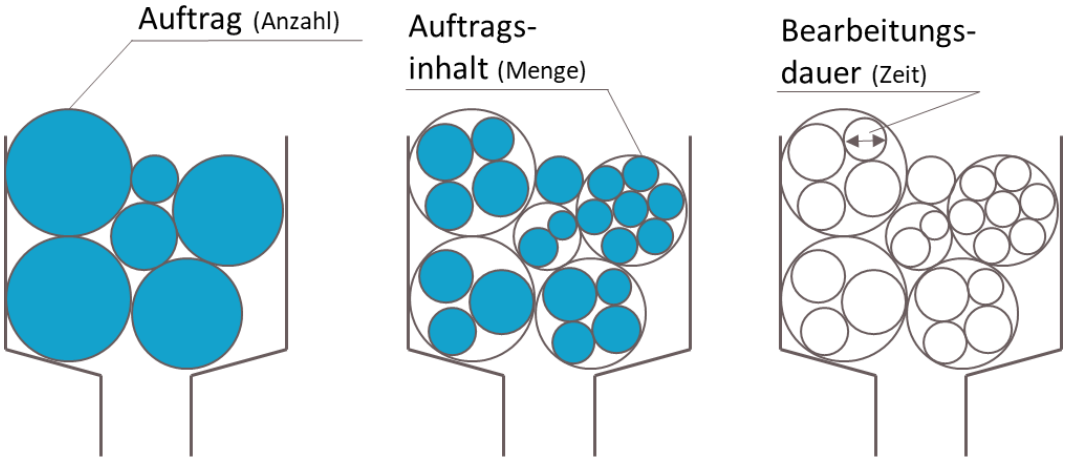

Abbildung 8-1: Verschiedene Granularitätsstufen zur Berücksichtigung von Reichweiten eines Arbeitsvorrats (in Anlehnung an [NyWi12, S. 32])

In Abhängigkeit der Stärke der Variation der Inhalte zwischen verschiedenen Aufträgen, sowohl in Bezug auf die Menge als auch in Bezug auf die Bearbeitungsdauer je Mengeneinheit, würde beispielsweise durch die alleinige Betrachtung der Anzahl an Aufträgen als Maß für die Reichweite bei sehr heterogenen Bearbeitungsdauern zwischen den Auftragsinhalten eine Normierung erfolgen, durch die unter Umständen der reale Sachverhalt nicht mehr angemessen abgebildet wird. Wären die Aufträge jedoch sowohl in Bezug auf ihre Inhalte und deren Bearbeitungsdauern annähernd homogen, ließe sich die Reichweite auch angemessen durch die Anzahl an Aufträgen abbilden, ohne vom realen Sachverhalt zu sehr abzuweichen.

Um die erforderliche *Granularität* zu ermitteln, ist zunächst die Informationssenke zu betrachten und zu analysieren, wie die dort betrachtete Information zur Verfügung gestellt werden sollte. Hicks [Hic07, S. 236] beschreibt in diesem Zusammenhang, dass die erforderliche Granularität, in Anlehnung an die Ansätze der Lean Production, durch ihren spezifischen Wert bestimmt werden sollte. Dazu ist nach Hicks aus Sicht des Nutzers präzise zu definieren, wie ein spezifisches Produkt (in diesem Fall die Information) mit spezifischen Fähigkeiten aussehen würde, das den Nutzen des Nutzenden maximiert [Hic07, S. 236]. Zur Ermittlung der wertmaximierenden *Granularität* der Information für den Nutzenden ist zunächst zu analysieren, wie diese im Nutzungskontext verwendet wird und welche Auswirkungen unterschiedliche Granularitätsstufen auf die Umsetzung der Steuerungsentscheidung haben. Dabei ist nicht nur zu berücksichtigen, welche Konsequenzen bei einer zu geringen *Granularität* auftreten, sondern auch die Folgen einer zu hohen *Granularität*. Ist die *Granularität* einer Steuerungsentscheidung zu gering, so besteht die Möglichkeit, dass zusätzlicher Aufwand aufgewendet werden muss, um alle relevanten

Informationen zusammenzutragen. Ein Beispiel für eine zu geringe *Granularität* ist die Angabe eines Lagerortes für einen Transportprozess, der viele Lagerplätze mit unterschiedlichen Materialien beinhaltet und aus dem ein spezielles Material zu entnehmen ist. Für den Transport wäre somit zwar der grobe Bereich des zu holenden Materials bekannt, es müsste jedoch entweder Aufwand betrieben werden um, sofern vorhanden, die Information um den benötigten Lagerplatz anzureichern (beispielsweise durch Recherche in einem entsprechenden System), oder es entsteht ein Suchaufwand innerhalb des Lagerbereichs nach dem Lagerplatz des geforderten Materials. Beide Arten würden zu einer nicht-wertschöpfenden Tätigkeit führen, die zudem die Bearbeitungszeit der durchzuführenden Aufgabe vermeidbar verlängern würde. Ist die *Granularität* einer Steuerungsentscheidung hingegen zu hoch, besteht die Möglichkeit, dass dies die Flexibilität innerhalb des realen Prozesses beeinträchtigt, sodass dies zu Ineffizienzen führen kann. Ein Beispiel für eine zu hohe *Granularität*, die die Flexibilität und somit die Effizienz eines Prozesses beeinträchtigt, ist die exakte Vorgabe eines individuell bekannten Materials, das transportiert werden muss. Sollte der reale Prozess nicht zwingend vorsehen, dass genau zu einem definierten Zeitpunkt das individuell bekannte Material benötigt wird, sondern lediglich der Materialtyp, kann dies zu vermeidbaren Such- und Umlagerungsaufwänden nach dem entsprechenden Material führen, sofern das angeforderte Material nicht in der idealen Position gelagert ist, sodass es zwischen Materialien gleichen Typs sofort entnehmbar wäre.

Im Anschluss an die Identifikation der nutzenmaximierenden *Granularität* der Information(en) in der Informationssenke sind die erforderlichen Granularitätsstufen der zur Generierung der Steuerungsentscheidung benötigten Informationen zu bestimmen. Dazu ist ausgehend von der Informationssenke der modellierte Informationsfluss flussaufwärts zu analysieren. Für jede Information ist dabei zu überprüfen, in welcher Granularitätsstufe sie zur Generierung der in Informationsflussrichtung liegenden Information angemessen beitragen kann und den durch sie zu repräsentierenden realen Sachverhalt hinreichend genau abbildet. In diesem Zusammenhang ist bereits zu berücksichtigen, dass eine sehr detaillierte Abbildung eines realen Sachverhalts mit einem erhöhten Aufwand der Informationserfassung verbunden sein kann (zum Beispiel durch höhere Investitionskosten in Technologien oder durch entstehende Prozesskosten, die sich aus manuellen Tätigkeiten zur Informationserfassung ergeben) [SMN19A, S. 29]. Somit sollte nicht grundsätzlich die höchste Granularitätsstufe ausgewählt werden, sondern der Grundsatz verfolgt werden, dass die *Granularität* den Sachverhalt so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich abbilden soll. Bei der Bestimmung der notwendigen Granularität können die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation als Fuzzy-Zahlen aufgenommenen Kennzahlen verwendet werden, beziehungsweise der zu beurteilende Sachverhalt ist nochmals als Fuzzy-Zahl zu erfassen, falls dies nicht im Rahmen der Analyse der Ist-Situation erfolgte. Zur Abschätzung, ob gegebenenfalls einfacher zu erfassende Granularitätsstufen einer Information verwendet werden können, können die Form und die Spannweite der zugehörigen Fuzzy-Zahl betrachtet werden. Je geringer diese Spannweite ist, desto homogener sind die zu berücksichtigenden realen Sachverhalte und desto weniger Informationsverluste würden mit einer verdichtenden Granularitätsstufe einhergehen (wie beispielsweise die Angabe der Anzahl der zu bearbeitenden Aufträge, anstelle der Summe der Bearbeitungszeiten im zuvor aufgeführten Beispiel). Dies ist an dieser Stelle jedoch nur ein Indiz, dass mit einer geringeren Granularitätsstufe ausreichend gute Steuerungsentscheidungen generiert werden können, und sollte nochmals im Rahmen der Bestimmung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* überprüft werden. Weist die Spannweite hingehen eine große Breite auf, scheint der zu berücksichtigende reale Sachverhalt heterogener zu sein und eine verdichtende Granularitätsstufe würde mit Informationsverlusten einhergehen. Dies lässt sich am in Abbildung 8-1 dargestellten Beispiel nachvollziehen. Die identifizierte *Granularität* einer Information ist in den dazu vorgesehenen Platzhalter eines

Informationsbeschreibungsblocks einzutragen, wie in Abbildung 8-2 dargestellt. In diesem Fall wurde für die Information „Bestand“ die Granularität Stück (Stk) als geeignet identifiziert. Eine mögliche alternative Ausprägung für diese Information wäre, in Abhängigkeit des Sachverhalts, zum Beispiel die Anzahl an Gebinden oder Behältern, durch die der Bestand abgebildet werden könnte.

Abbildung 8-2: Informationsbeschreibungsblock mit IQ-Dimension *Granularität*

Teilweise kann der Fall auftreten, dass einige Informationsbeschreibungsblöcke nur zur Bündelung von Informationen, zum Beispiel in Form eines Auftrages, modelliert wurden. Da in diesen Informationsbeschreibungsblöcken verschiedene Informationen zusammenfließen, ist es oftmals nicht möglich, eine Granularitätsstufe zu bestimmen, die alle in diesem Informationsbeschreibungsblock einfließende Informationen hinreichend genau beschreibt. In einem solchen Fall ist das Feld für die IQ-Dimension *Granularität* auszugrauen und keine Anforderung an diese IQ-Dimension zu identifizieren. Für die in diesen Informationsbeschreibungsblock hineingehenden Informationen ist identisch zu verfahren, wie es zuvor beschrieben wurde, sodass für die Informationen eine anforderungsgerechte Granularität ermittelt wird.

8.2.2 Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz*

Die IQ-Dimension *Frequenz* beschreibt die Ereignisse oder Häufigkeit innerhalb einer Zeitspanne, mit der die Information, in der durch die IQ-Dimension *Granularität* angegebenen Auflösung, aktualisiert wird. Zudem wird im Rahmen der Harmonisierung dieser IQ-Dimension ermittelt, bis zu welchen zeitlichen Abweichungen die Information noch rechtzeitig beziehungsweise aktuell zur Verfügung steht, um angemessen im Rahmen von Steuerungsentscheidungen der Produktionslogistik berücksichtigt zu werden. Die Aktualität einer Information zum Zeitpunkt der Umsetzung der Steuerungsentscheidung wird maßgeblich durch die eingesetzten Methoden und Verfahren zur Erfassung und Verarbeitung der Informationen beeinflusst. In diesem Zusammenhang unterscheiden Caprihan et al. [CKW97, 1334F.] drei verschiedene Modi, die jeweils Ursachen beschreiben, die zu einer Verzögerung führen können, sodass zum Zeitpunkt der Umsetzung der Steuerungsentscheidung die Aktualität der berücksichtigten Informationen beeinträchtigt wäre:

- *Modus 1 – Verzögerung in der Informationsübertragung:* Informationen werden kontinuierlich erfasst, jedoch tritt eine Zeitverzögerung durch die Übertragung der Informationen zur Stelle der Umsetzung der Steuerungsentscheidung auf. Ein Beispiel, wie diese Art der Verzögerung auftreten kann, ist, dass Informationen manuell auf Papier erfasst werden und das Dokument durch eine zu überquerende physische Distanz zur Stelle der Umsetzung der Steuerungsentscheidung gebracht werden muss.
- *Modus 2 – Verzögerung in der Umsetzung der Steuerungsentscheidung:* Informationen werden ohne zeitliche Verzögerungen zum zu repräsentierenden realen Sachverhalt erfasst und übertragen, jedoch ist die Verarbeitung der Information mit einer zu berücksichtigenden Dauer verbunden, sodass zum Zeitpunkt der Umsetzung der Steuerungsentscheidung die auf ihr beruhenden Informationen nicht mehr den aktuellen realen Sachverhalt repräsentieren und somit auch die

Steuerungsentscheidung nicht mehr angemessen sein könnte. Ein Beispiel, wie diese Art der Verzögerung auftreten kann, ist die Reihenfolgebestimmung durch Anwendung von Optimierungsalgorithmen, deren Berechnungszeit erheblich andauern kann.

- *Modus 3 – Verzögerung bei Statusüberwachung:* Informationen werden nicht zum Zeitpunkt einer Änderung des realen Sachverhalts aktualisiert, sondern zyklisch in fixen und diskreten Zeitintervallen. Eine zeitliche Verzögerung kann dabei durch die Differenz des Zeitpunkts der Änderung des realen Sachverhalts zum Zeitpunkt der Aktualisierung der Information entstehen.

Diesen drei Modi als Ursachen für eine zeitliche Verzögerung kann durch eine geeignete Technologieauswahl und organisatorischen Maßnahmen zur Erfassung der Informationen entgegengewirkt werden. Damit die Technologien und organisatorische Maßnahmen zielgerichtet zu den zeitlichen Anforderungen ausgewählt werden können, wird im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension Frequenz zunächst ermittelt, wie hoch eine zeitliche Verzögerung in der Umsetzung der Steuerungsentscheidung sein darf, bevor die Möglichkeit besteht, dass diese zu Prozessineffizienzen führt.

Zunächst ist, ausgehend von den Informationsquellen, für jede Information zu ermitteln, durch welche Ereignisse sich der durch die Information repräsentierte Sachverhalt in der durch die Information geforderten Granularität ändert. Dieser reale Sachverhalt ist jeweils in den Informationsbeschreibungsblock der Information in den Platzhalter für die IQ-Dimension *Frequenz* einzutragen. Dazu sind Abkürzungen zu verwenden, die innerhalb einer einzufügenden Legende im Wertstromdiagramm zu erläutern sind. Die Erfassung der Ereignisse ist in diesem Schritt nur für die als *zu verarbeitenden Informationen*, wie in Kapitel 7.2 als Art beschrieben, durchzuführen. Die Einschränkung auf diese Art der Informationen ist dadurch begründet, dass assoziierte Informationen als statisch angesehen werden und somit keinen zeitlichen Einfluss auf die zu generierende Steuerungsentscheidung haben. Die Informationsart *Information im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung* ändern sich zwar ebenfalls dynamisch, jedoch liefern diese nur einen Beitrag zur Durchführung der Steuerungsentscheidungen. Die an sie gestellten Anforderungen an die IQ-Dimension *Frequenz* werden daher nicht eigenständig ermittelt, sondern aus der Anforderung an die Information, die die Steuerungsentscheidung repräsentiert, abgeleitet und übertragen. Nachdem die realen Ereignisse der Informationsquellen ermittelt und eingetragen wurden, ist in Richtung des Informationsflusses in die jeweiligen Informationsbeschreibungsblöcke einzutragen, durch welche Ereignisse diese aktualisiert werden, bis alle Informationsbeschreibungsblöcke bis zur Informationssenke ausgefüllt wurden. Sollte eine Information durch verschiedene Ereignisse aktualisiert werden, so sind die verschiedenen Ereignisse zunächst ebenfalls zu erfassen. Mögliche zeitliche Verzögerungen durch eine Informationsübertragung oder -verarbeitung sind dabei zu vernachlässigen, da diese maßgeblich durch die Methoden und Technologien beeinflusst werden, die erst im nächsten Schritt *Detailplanung und Implementierung* berücksichtigt werden.

Nachdem die die Steuerungsentscheidung auslösenden Ereignisse ermittelt und eingetragen wurden, sind die zeitlichen Abweichungen zu ermitteln, die tolerierbar sind, sodass die Qualität der IQ-Dimension *Frequenz* noch als ausreichend angesehen werden kann. Die zeitlichen Abweichungen sind in Abhängigkeit der Prozesseigenschaften zu ermitteln. Dazu ist zu analysieren, ab wann eine zeitliche Abweichung der Umsetzung der Steuerungsentscheidung zu Prozessineffizienzen führen würde. Dies kann Anhand der Bildung von Szenarien erfolgen. Anzumerken hierbei ist, dass die gebildeten Szenarien auf ihre praktische Relevanz hin bewertet werden müssen, sodass die Technologieauswahl im nächsten Methodenschritt nicht durch unrealistisch auftretende Szenarien beeinträchtigt wird.

Die Berechnung der tolerierbaren zeitlichen Abweichungen kann mit Hilfe der Fuzzy-Zahlen erfolgen, indem mit diesen die zeitliche Differenz zwischen der Generierung der Steuerungsentscheidung (durch Aktualisierung der dazu notwendigen Information) und dessen vollständiger Berücksichtigung beziehungsweise Umsetzung durch den produktionslogistischen Prozess berechnet wird. Zur Berechnung dieser zeitlichen Differenz können die in den Formeln 8-1 bis 8-4 angegebenen Berechnungsvorschriften für die Grundrechenarten mit Fuzzy-Zahlen angewendet werden [RoAb15, S. 148]. $\widetilde{M}$ und $\widetilde{N}$ stellen in diesem Zusammenhang jeweils eine Fuzzy-Zahl dar.

Addition:

$$\widetilde{M} \oplus \widetilde{N} = (m;\alpha;\beta)_{LR} \oplus (n;\gamma;\delta)_{LR} = (m+n;\alpha+\gamma;\beta+\delta)_{LR} \quad 8\text{-}1$$

Subtraktion:

$$\widetilde{M} \ominus \widetilde{N} = (m;\alpha;\beta)_{LR} \ominus (n;\gamma;\delta)_{LR} = (m-n;\alpha+\gamma;\beta+\delta)_{LR} \quad 8\text{-}2$$

Multiplikation:

$$\widetilde{M} \otimes \widetilde{N} = (m;\alpha;\beta)_{LR} \otimes (n;\gamma;\delta)_{LR} \approx (mn;m\gamma+n\alpha-\alpha\gamma;m\delta+n\beta+\beta\delta)_{LR} \quad 8\text{-}3$$

Division:

$$\widetilde{M} \oslash \widetilde{N} = (m;\alpha;\beta)_{LR} \oslash (n;\gamma;\delta)_{LR} \approx \left(\frac{m}{n}, \frac{m\,\delta+n\alpha}{n(n+\delta)}, \frac{m\gamma+n\beta}{n(n-\gamma)}\right)_{LR} \quad 8\text{-}4$$

Das Ergebnis der Berechnung ist eine weitere Fuzzy-Zahl, die sich zur Interpretation eines möglichen Toleranzbereichs eignet. Der Toleranzbereich ergibt sich dabei mindestens durch die Differenz des Schnittpunkts des linken Teilastes mit der Abszisse und der Ordinate im Ursprung des Diagramms. Durch zeitliche Verzögerungen der Informationsbereitstellung beziehungsweise Umsetzung der Steuerungsentscheidung innerhalb des durch diese Differenz berechneten Bereichs besteht keine Möglichkeit, dass dies zu Prozessineffizienzen führt. Die Ordinate im Ursprung stellt in diesem Zusammenhang einen sogenannten Tipping-Point dar, bei dessen Überschreitung Prozessineffizienzen möglich sind. Durch eine weitere Verzögerung der Informationsbereitstellung beziehungsweise Umsetzung der Steuerungsentscheidung, die über den berechneten Bereich hinausgeht, wird die berechnete Fuzzy-Zahl immer weiter in negative Richtung der Abszisse verschoben. Der Zugehörigkeitsgrad der Fuzzy-Zahl im Schnittpunkt mit der Ordinate im Ursprung gibt dabei einen Möglichkeitsgrad an, dass durch eine Verzögerung der Informationsbereitstellung beziehungsweise Umsetzung der Steuerungsentscheidung Prozessineffizienzen auftreten können. Dieser Möglichkeitsgrad darf nicht mit einer Wahrscheinlichkeit verwechselt werden [Zad99, S. 10]. Die Interpretation der resultierenden und verschiebbaren Fuzzy-Zahl zur Berechnung möglicher zeitlicher Verzögerungen ist in Abbildung 8-3 dargestellt.

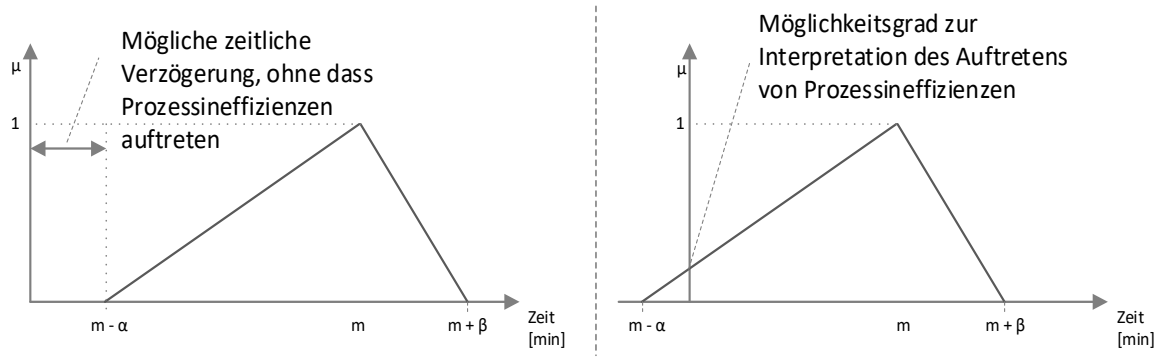

Abbildung 8-3: Modellierung von möglichen Verzögerungen in der Informationsaktualisierung

Anzumerken ist, dass bei einer Verschiebung der Fuzzy-Zahl, sodass der rechte Teilast den Schnittpunkt mit der Ordinate im Ursprung bildet, der maximale Zugehörigkeitsgrad von eins angenommen werden muss und nicht der geringer werdende Zugehörigkeitsgrad im dann entstehenden Schnittpunkt. Würde in diesem Fall der geringere Zugehörigkeitsgrad des rechten Teilastes angegeben werden, so würde dies bedeuten, dass die Möglichkeit des Auftretens von Prozessineffizienzen bei großen Verzögerungen, die über den Kern der Fuzzy-Zahl hinaus gehen, sinkt. Dies würde nicht der Realität entsprechen.

Die Konsequenz von möglichen zeitlichen Abweichungen ist nicht nur für Verzögerungen zu berechnen, sondern auch für ein verfrühtes Aktualisieren einer Information, dessen zu repräsentierender realer Sachverhalt noch nicht stattgefunden hat.

Zur Veranschaulichung eines Beispiels für die Berechnung eines Toleranzbereichs einer verspäteten und einer verfrühten Aktualisierung einer Information sei das Beispiel der Bestimmung der *Granularität* fortgesetzt. So kann die Entnahme eines Materials von einem Pufferplatz (abgekürzt als *„Ent“* in Abbildung 8-4), welches in eine Maschine eingesetzt wird, das Nachfordern von weiterem Material auslösen. Ist die *Bearbeitungsdauer* des nun entnommenen und in die Maschine eingesetzten Materials bekannt sowie die *Transportdauer* zur Nachlieferung des Materials, ließe sich aus der Differenz *Bearbeitungsdauer* – *Transportdauer* berechnen, wie viel Zeit nach der realen Entnahme verbleiben würde, bis der Transport durchgeführt werden muss, ohne, dass es zu fehlendem Material an einer Maschine kommt. Gleichzeitig könnte über die minimale Dauer der *Transportdauer* bestimmt werden, wie viel früher die Entnahme durch die Information aktualisiert werden darf, bevor die reale Entnahme auch tatsächlich stattfindet, ohne dass es zu Prozessineffizienzen kommt, da beispielsweise der Abstellplatz noch belegt ist und somit der Abschluss des Transports sich verzögert.

Die ermittelten Toleranzbereiche für eine verspätete beziehungsweise verfrühte Bereitstellung der Information zur Umsetzung der Steuerungsentscheidung sind durch ein hochgestelltes Plus und ein tiefgestelltes Minus mit der jeweiligen ermittelten tolerierbaren Zeit in den Platzhalter für die IQ-Dimension *Frequenz* im Informationsbeschreibungsblock einzutragen, wie in Abbildung 8-4 dargestellt. Das Plus repräsentiert dabei eine Verzögerung der Informationsaktualisierung (Zeitpunkt der Aktualisierung der Information findet auf der Zeitachse nach dem realen Sachverhalt statt), das Minus eine frühzeitige Informationsbereitstellung für den realen zu repräsentierenden Sachverhalt (Zeitpunkt der Aktualisierung der Information findet auf der Zeitachse vor dem realen Sachverhalt statt).

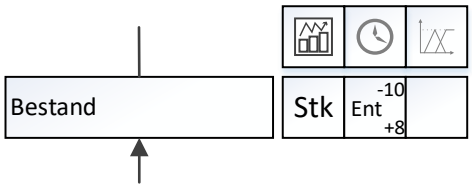

Abbildung 8-4: Informationsbeschreibungsblock mit IQ-Dimension *Frequenz*

Die eingetragenen Toleranzbereiche sind anschließend ausgehend von der Informationssenke entgegen des Informationsflusses in die Informationsbeschreibungsblöcke bis einschließlich der Informationsquellen einzutragen.

8.2.3 Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*

Die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* berücksichtigt die Übereinstimmung der Information mit dem durch sie abgebildeten realen Objekt beziehungsweise Sachverhalt. Es handelt sich dabei also um eine Abbildungsgenauigkeit. Dabei bezieht sich diese IQ-Dimension auf die durch die IQ-Dimension *Granularität* bestimmte Auflösung zum Zeitpunkt der Aktualisierung der Information (IQ-Dimension *Frequenz*). Im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* wird zunächst analysiert, wie sensitiv das Ergebnis einer Steuerungsentscheidung auf Abweichungen der Information von ihrem realen zu repräsentierenden Sachverhalt reagiert und anschließend, welche Auswirkungen dies auf die Prozesseffizienz beziehungsweise die logistischen Zielgrößen hat. Stimmt zum Beispiel die Information über den Bestand eines Materials in einem Lager nicht mit dem realen Bestand überein, sondern ist in Realität niedriger, da Material beispielsweise nach der Entnahme nicht als verbraucht dokumentiert wurde, so kann dies zur Folge haben, dass eine Verzögerung der Materialnachforderung auftritt. Dies erhöht wiederum die Gefahr, dass ein Materialmangel auftritt, der hohe Folgekosten nach sich ziehen kann. Ist der oftmals gebildete Sicherheitsbestand, der zur Vermeidung solcher Ereignisse vorhanden ist, ausreichend hoch, so würde der Prozess wenig sensitiv auf eine Beeinträchtigung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* reagieren. Handelt es sich jedoch um kostenintensive Produkte, so ist ein hoher Sicherheitsbestand oftmals nicht wirtschaftlich vertretbar. Bei einem entsprechend niedrigen Sicherheitsbestand würde die Prozesseffizienz mit einer höheren Sensitivität auf Einflüsse durch die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* reagieren.

Zur Analyse der Sensitivität des Einflusses der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* auf die Prozesseffizienz sind zunächst die zuvor modellierten Steuerungsverfahren mit Hilfe der als Fuzzy-Zahlen in der Analyse der Ist-Situation aufgenommenen Kennzahlen für kritische Entscheidungssituationen zu berechnen. Wurden diese Kennzahlen nicht im Rahmen der Analyse der Ist-Situation aufgenommen, weil es sich beispielsweise um ein neues einzuführendes Steuerungsverfahren handelt, so sind diese an dieser Stelle zu erfassen. Kritische Entscheidungssituationen lassen sich beispielsweise durch das Bilden von Szenarien ermitteln und zeichnen sich dadurch aus, dass bei ihnen eine Situation vorliegt, in der eine Änderung der Steuerungsentscheidung eine direkte Auswirkung auf die Effizienz des Prozesses haben kann. So kann bei einigen Steuerungsverfahren der Fall auftreten, dass sich die Steuerungsentscheidung nur bei Über- beziehungsweise Unterschreitung fixer Werte einer Zwischengröße verändert. Diese fixen Werte werden in diesem Zusammenhang als Tipping-Points bezeichnet. Die Ausprägungen der in das Steuerungsverfahren eingehenden Informationen können dabei variieren, wohingegen der Tipping-Point stets vom gleichen fixen Wert ist. Die Änderung einer Steuerungsentscheidung an fixen Tipping-Points kann beispielsweise im Rahmen einer Transportsteuerung unter Berücksichtigung der verfügbaren Transportkapazitäten auftreten (siehe

Anwendungsbeispiel 1, Kapitel 11.2). Bei anderen Steuerungsverfahren hingegen werden verschiedene Informationen, die in ihrer Ausprägung variieren, miteinander verglichen und auf Basis des Vergleichs eine Steuerungsentscheidung generiert. Ein Beispiel für ein Steuerungsverfahren, indem ein solcher Vergleich durchgeführt wird, ist die Reihenfolgebildung nach der Schlupfzeitregel. Die Schlupfzeitregel erteilt dem Auftrag in einer Warteschlange vor einer Maschine die höchste Priorität, der den geringsten Schlupf aufweist, wobei der Schlupf als die Zeitdauer bezeichnet wird, die bis zum Plan-Fertigstellungstermin des Auftrages verfügbar ist und nicht für die eigentliche Bearbeitung oder eventuelle Mindestübergangszeiten benötigt wird [LÖD16, S. 511]. In einem solchen Fall ist es häufig nicht möglich, fixe Tipping-Points zu identifizieren, sondern es muss über Hilfsgrößen die Sensitivität des Prozesses auf mögliche, durch Fehlentscheidungen auftretende, Abweichungen analysiert werden.

In einigen Fällen ist es möglich, dass sich vor der Umsetzung eines Steuerungsverfahrens keine Kennzahlen erheben lassen, um die Sensitivität des Prozesses oder der Steuerungsentscheidung zu analysieren. Dies tritt insbesondere dann auf, wenn das einzusetzende Steuerungsverfahren die Struktur oder den Ablauf in der Bearbeitung eines Prozesses derart ändert, dass dies nicht ohne Weiteres nachgebildet werden kann, um eine erforderliche Stichprobe an Daten zu erheben, durch die die Kennzahl modelliert werden kann. In einem solchen Fall besteht die Möglichkeit, dass die erforderlichen Kennzahlen mittels einer Simulation anhand eines zu erstellenden Simulationsmodells generiert werden können. Ein Simulationsmodell ist dabei eine *„vereinfachte Nachbildung eines geplanten […] Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“* [VDI 3633-1, S. 3]. Simulation bezeichnet in diesem Zusammenhang das *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“* [VDI 3633-1, S. 3]. Die aus der Simulation generierten Daten können schließlich ebenfalls verwendet werden, um Fuzzy-Zahlen zu generieren, mit denen die weiteren Schritte der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* durchgeführt werden.

Zur Berechnung, wie sensitiv eine Steuerungsentscheidung und somit auch die Effizienz eines Prozesses auf Beeinträchtigungen durch die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* reagiert, wurde die Grundidee entwickelt, dass Auswirkungen von Abweichungen der Informationen von ihrem realen zu repräsentierenden Sachverhalt umso eher eintreten, desto näher sich die Ausprägung der Information zum Zeitpunkt der Entscheidungsgenerierung an einem Tipping-Point befindet. So scheint die Wahrscheinlichkeit höher, dass eine Beeinträchtigung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* in der Nähe eines Tipping-Points entweder zu dessen Überschreiten beziehungsweise Unterschreiten oder zu einem Ausbleiben der Über- beziehungsweise Unterschreitung führt, obwohl die Steuerungsentscheidung bei einer idealen Ausprägung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* (keine Abweichungen) den jeweils anderen Wert angenommen hätte.

Da mindestens eine Eingangsinformation in ihrer Ausprägung variieren kann, bietet es sich an, die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation aufgenommenen Fuzzy-Zahlen zur Abbildung der Variabilität der Informationen zu verwenden. Durch die Fuzzy-Zahlen lassen sich die möglichen Ausprägungen der Steuerungsentscheidungen beziehungsweise deren Zwischengrößen, die in die entsprechende Steuerungsentscheidung überführt werden, ermitteln. Da durch den Zugehörigkeitsgrad einer Fuzzy-Zahl die Möglichkeit eines Auftretens eines bestimmten Wertes abgebildet werden kann [HAN05, S. 131], kann durch die Interpretation des Zugehörigkeitsgrades eines Tipping-Points zu einer berechneten Steuerungsentscheidung/Zwischengröße ermittelt werden, wie hoch die Möglichkeit ist, dass ein Wert in unmittelbarer Umgebung auftritt. Nimmt der Zugehörigkeitsgrad einen Wert nahe eins an, so ist die Möglichkeit hoch, dass bereits kleine Beeinträchtigungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* Auswirkungen auf die

Steuerungsentscheidung haben und die Anforderung an die IQ-Dimension dementsprechend hoch ist. Bei einem niedrigen Zugehörigkeitsgrad besteht zwar die Möglichkeit, dass bereits geringe Beeinträchtigungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* Auswirkungen auf die Steuerungsentscheidungen haben, jedoch ist die durch den Zugehörigkeitsgrad ausgedrückte Möglichkeit, dass sich die Ausprägung in einem Bereich befindet, sodass diese auch zu Auswirkungen führt, geringer. Daraus kann gefolgert werden, dass auch die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* in einem solchen Fall geringer sind. Die grafische Abbildung eines hohen und eines niedrigen Zugehörigkeitsgrades eines Tipping-Points zu einer Steuerungsentscheidung beziehungsweise einer Zwischengröße ist in Abbildung 8-5 dargestellt.

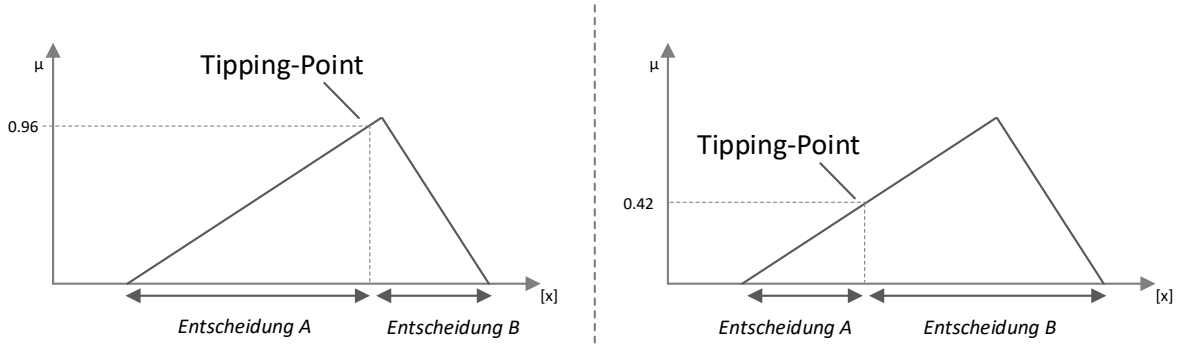

Abbildung 8-5: Tipping-Point mit hohem (links) und niedrigem (rechts) Zugehörigkeitsgrad zu einer Steuerungsentscheidung beziehungsweise Zwischengröße

Zur Ermittlung der Zugehörigkeitsgrade der Steuerungsentscheidungen beziehungsweise der Zwischengrößen zu einem Tipping-Point ist zunächst das Verfahren mit den eingehenden Informationen in Form von Fuzzy-Zahlen nachzurechnen, entweder bis zum Ergebnis, das die Steuerungsentscheidung widerspiegelt, oder bis zu einem Zwischenergebnis, aus dem die Steuerungsentscheidung abgeleitet wird. Dazu kann die in den zuvor aufgeführten Formeln 8-1 bis 8-4 angegebene Arithmetik verwendet werden. Das Ergebnis dieser Berechnung ist ebenfalls wieder eine Fuzzy-Zahl, deren Form maßgeblich von den zu verwendenden Rechenoperatoren abhängig ist. Die sich ergebende Fuzzy-Zahl spannt einen Bereich auf, indem sich die Steuerungsentscheidung beziehungsweise die Zwischengröße unter Verwendung der Fuzzy-Zahlen befinden kann. Dabei sollte die Berechnung, falls erforderlich, für verschiedene Szenarien, die sich im Produktionsablauf ergeben können, durchgeführt werden, sodass die ermittelte Fuzzy-Zahl als repräsentativ angesehen werden kann. Sollten verschiedene Szenarien ermittelt werden, so ist es möglich, dass die nachfolgenden Schritte im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* für jedes Szenario separat durchgeführt werden müssen. In diesem Fall ist die höchste sich ergebende Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* auszuwählen.

Im Anschluss an die Berechnung der Zwischengrößen sind die Tipping-Points zu bestimmen. Bei fixen Tipping-Points können sich diese direkt aus den Informationsflüssen ergeben, da sie als *assoziierte Information* mit in das Steuerungsverfahren einfließen. Im zuvor aufgegriffenen Beispiel der Transportsteuerung können dies die Kapazitätsbeschränkungen der den Transport durchführenden Ressource sein.

Bei *assoziierten Informationen*, die die fixen Tipping-Points darstellen, sind diese als Fuzzy-Zahlen ohne aufspannenden linken und rechten Teilast zu modellieren ($\alpha = 0$; $\beta = 0$). Handelt es sich nur um einen fixen Wert, entspricht der Tipping-Point der Singleton-Fuzzy-Zahl [BED13, S. 53]. Der Zugehörigkeitsgrad der als Fuzzy-Zahl modellierten Zwischengröße zum Tipping-Point kann schließlich durch die Bestimmung des Maximums der Schnittmenge beider Fuzzy-Zahlen ermittelt werden. Zur Bildung der Schnittmenge bieten sich verschiedene Operatoren an, wie der MIN-Operator (Formel 8-5)

$$i_{MIN}(\mu_A, \mu_B) = \min(\mu_A, \mu_B) \quad 8\text{-}5$$

oder das algebraische Produkt (Formel 8-6) der Zugehörigkeitsgrade [HAN05, S. 30].

$$i_{ALG}(\mu_A, \mu_B) = \mu_A \cdot \mu_B \quad 8\text{-}6$$

i ist in diesem Zusammenhang eine kontinuierliche Funktion, die die Schnittmenge der Fuzzy-Zahlen $\tilde{A}$ und $\tilde{B}$ angibt [HAN05, S. 30]. Bei der Verwendung einer Singleton-Fuzzy-Zahl als Tipping-Point bildet die Schnittmenge, unabhängig des eingesetzten Operators, ebenfalls wieder eine Singleton-Fuzzy-Zahl, deren maximaler Zugehörigkeitsgrad nun jedoch nicht mehr maximal den Wert eins annehmen muss. Sind im Rahmen einer Steuerungsentscheidung mehrere Tipping-Points vorhanden, so sind für diese jeweils separat die Schnittmengen mit der berechneten Steuerungsentscheidung beziehungsweise Zwischengröße zu berechnen. In Abbildung 8-6 ist ein Beispiel mit zwei Tipping-Points dargestellt. Von diesen ist nun derjenige Wert mit dem maximalen Zugehörigkeitsgrad zu wählen. Dieser ermittelte Wert stellt das Maß für die Sensitivität der Steuerungsentscheidung in Bezug auf Beeinträchtigungen durch die IQ-Dimension Verlässlichkeit dar.

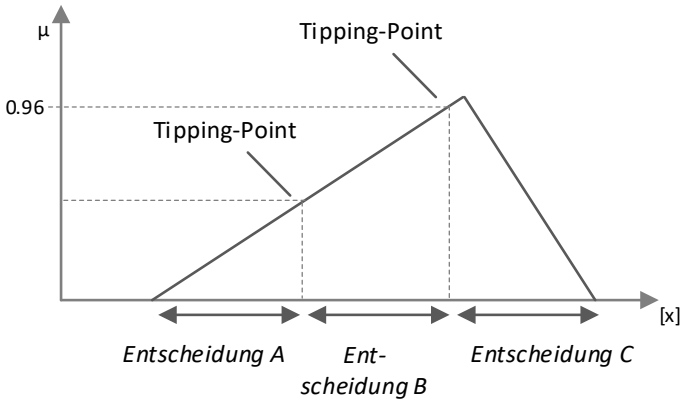

Abbildung 8-6: Darstellung mehrerer Tipping-Points

Zur besseren Interpretierbarkeit der ermittelten Zugehörigkeitsgrade, um daraus die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* abzuleiten, eignet sich die Überführung dieser Werte in Skalen [SRL+19, S. 279]. Eine mögliche Skala, anhand derer die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* besser abgeleitet werden kann, ist die sogenannte Likert-Skala. Die Likert-Skala ist eine Skala, um ein qualitatives Maß an Zustimmung zu einer Äußerung zu repräsentieren [LI13, S. 1609]. Zur Überführung der Anforderungen in eine Likert-Skala kann der Wertebereich der Zugehörigkeitsgrade in die fünf gleichgroßen Bereiche *sehr hoch (SH: 0,8 – 1,0), hoch (H: 0,6 – 0,8), teils-teils (TT: 0,4 – 0,6), gering (G: 0,2 – 0,4), sehr gering (SG: 0,0 – 0,2)* unterteilt werden. In Abhängigkeit des berechneten Zugehörigkeitsgrades würde sich durch eine Zuordnung eine direkte qualitative Aussage zu den Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ergeben. Abbildung 8-7 stellt eine mögliche Zuordnung eines berechneten Zugehörigkeitsgrades zu einem Tipping-Point dar.

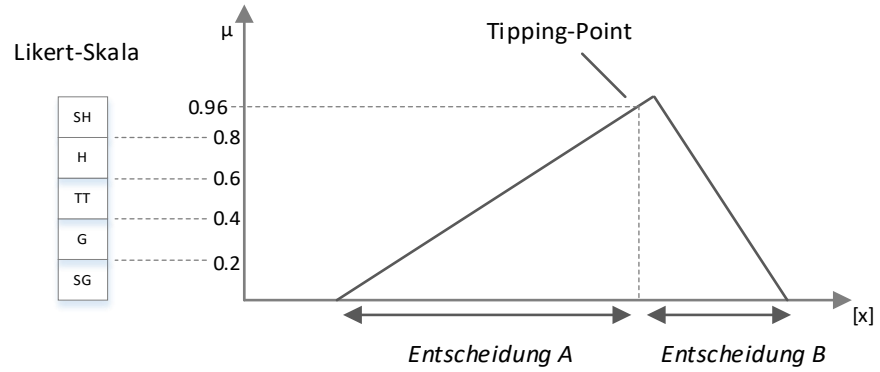

Abbildung 8-7: Überführung der Zugehörigkeitsgrade in eine Likert-Skala zur Anforderungsableitung

Die bisher ermittelten Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* anhand der Interpretation des Zugehörigkeitsgrads zu ermittelten Tipping-Points basieren auf der Ermittlung, wie hoch die Möglichkeit ist, dass eine Fehlentscheidung generiert wird. Dies gibt jedoch noch keine explizite Auskunft darüber, wie sehr eine mögliche Auswirkung einer Fehlentscheidung Einfluss auf die Effizienz des Prozesses nehmen kann. So besteht die Möglichkeit, dass eine fehlerhafte Steuerungsentscheidung zum Zeitpunkt der Umsetzung bemerkt und ohne größeren Aufwand korrigiert werden kann, sodass die Konsequenzen relativ gering sind. Somit hätte diese Fehlentscheidung trotz einer hohen Möglichkeit des Auftretens nur eine geringe Auswirkung auf die Effizienz des Prozesses. Eine Konsequenz davon könnte jedoch sein, dass das Vertrauen der die Steuerungsentscheidung umsetzenden Personen in das Steuerungsverfahren sinkt. Ein weiteres Beispiel ist, dass eine mögliche Fehlentscheidung hohe wirtschaftliche Schäden zur Folge haben kann, die sich durch real anfallende Kosten oder in Form von Opportunitätskosten ausdrücken können. Dies gilt es im Rahmen der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* mit zu berücksichtigen, sodass sich die Anforderung schließlich aus der Kombination der Möglichkeit des Eintretens einer Fehlentscheidung sowie deren Auswirkung zusammensetzt. Diese Betrachtungsweise geht mit der Definition des Risikos nach DIN EN ISO 12100 [DIN EN ISO 12100, S. 24] einher.

Als Grundlage für eine Einschätzung des Ausmaßes einer Fehlentscheidung können die zuvor definierten Szenarien, aus denen bereits die Tipping-Points abgeleitet wurde, verwendet werden. Für jedes dieser Szenarien ist zu beurteilen, welche Konsequenz eine Fehlentscheidung auf betrachtete Zielgrößen sowie auf weitere Aspekte haben könnte, die nicht primär die produktionslogistischten Ziele betreffen (wie beispielsweise „weiche Faktoren“, wie das Vertrauen in die generierten Steuerungsentscheidungen). Als Anhaltspunkte zur Beurteilung möglicher Konsequenzen kann beispielsweise analysiert werden,

- wie sehr sich eine suboptimale Steuerungsentscheidung ausbreitet, beispielsweise in Form von einer Wiederholung des mit der suboptimalen Steuerungsentscheidung verbundenen Prozesses, Stillständen von Maschinen oder entstehendem Ausschuss,
- wann beziehungsweise ob eine Fehlentscheidung bemerkt wird und wie hoch der Aufwand ist, diese zu korrigieren oder
- welche Rahmenbedingungen notwendig sind, damit eine Fehlentscheidung eine Auswirkung hat, falls dies von den aktuellen Gegebenheiten im Produktionssystem abhängig ist.

Weitere Anhaltspunkte zur Beurteilung möglicher Konsequenzen können aus einigen der Kennzahlen, die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation aufgenommen wurden, ermittelt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Ausprägungen dieser Kennzahlen auch unter dem im Design einer verbesserten Steuerung der

Produktionslogistik identifizierten, konfigurierten und gegebenenfalls modifizierten Steuerungsverfahren Gültigkeit besitzen müssen und durch diese nicht verändert werden dürfen.

Nachdem mögliche Konsequenzen von Fehlentscheidungen, die auf eine Beeinträchtigung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zurückzuführen sind, identifiziert und analysiert wurden, sind die zuvor auf Basis der Möglichkeit des Eintretens ermittelten Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* nochmals mit diesen in Verbindung zu beurteilen und gegebenenfalls zu korrigieren. Auch hierbei ist zu beachten, dass die Information in der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* so genau wie nötig (und nicht so genau wie möglich) erfasst werden sollte, da eine Steigerung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* häufig mit höheren Investitionen und Aufwänden im Rahmen der Detailplanung und Implementierung verbunden ist. Eine Korrektur beziehungsweise Anpassung der durch die Interpretation der Zugehörigkeitsgrade ermittelten Anforderungen kann insbesondere dann relevant sein, wenn nur über Hilfsgrößen die Häufigkeit des Auftretens einer Fehlentscheidung ermittelt wird und sich diese nicht direkt aus der Steuerungsentscheidung ableiten lässt, da in diesen Fällen oftmals eine Über- beziehungsweise Unterschätzung der Anforderung entstehen kann.

Die ermittelten Anforderungen sind schließlich in die Platzhalter für die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der jeweiligen Informationsbeschreibungsblöcke einzutragen, wie in Abbildung 8-8 dargestellt.

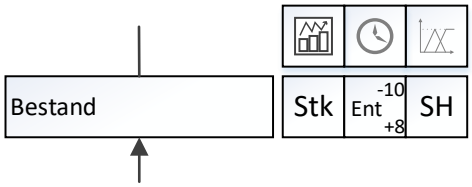

Abbildung 8-8: Informationsbeschreibungsblock mit ausgefüllter IQ-Dimension *Verlässlichkeit*

Die eingetragenen Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* sind anschließend ausgehend von dem zunächst befüllten Informationsbeschreibungsblock in die mit ihm verbundenen Informationsbeschreibungsblöcke zu überführen. Ergibt sich, dass eine Information mehrfach verwendet wird und unterschiedliche Anforderungen an sie gestellt werden, so ist in diesem Fall stets die höchste Ausprägung der Anforderung auszuwählen. Für die Informationssenke, also das Ergebnis der Steuerungsentscheidung, ist keine Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zu ermitteln beziehungsweise in den dafür vorgesehen Platzhalter einzutragen. Dieser Platzhalter ist auszugrauen. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass in der Informationssenke prinzipiell eine richtige Steuerungsentscheidung gefordert wird.

Auch bei der Bestimmung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* besteht die Möglichkeit, dass einige Informationsbeschreibungsblöcke eine Bündelung verschiedener eingehender Informationen darstellen (beispielsweise ein Auftrag, in dem verschiedene Informationen gebündelt werden). Ähnlich wie im Rahmen der Definition der IQ-Dimension *Granularität* besteht die Möglichkeit, dass durch die Bündelung der Informationen keine Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* bestimmt werden kann, durch die alle in den Informationsbeschreibungsblock einfließenden Informationen hinreichend genau berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist auch in einem solchen Informationsbeschreibungsblock der Platzhalter für die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* auszugrauen, sodass für diese IQ-Dimension in dem entsprechenden Informationsbeschreibungsblock keine Anforderung ermittelt wird.

Im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* kann der Fall auftreten, dass eine zuvor als relevant erachtete Information, die im Rahmen der Steuerungsentscheidung berücksichtigt werden sollte, stets durch eine andere Information dominiert wird. In diesem Fall besitzt diese Information in der geforderten Granularität keine Auswirkung auf die Steuerungsentscheidung. Somit kann die Information vernachlässigt werden und muss im weiteren Verlauf der Methode nicht berücksichtigt werden. Um die Komplexität des Wertstromdiagramms in einem solchen Fall zu reduzieren, ist vorgesehen, dass die Information mit den zugehörigen Flüssen und der zugehörigen Informationsverarbeitung aus dem Diagramm zu entfernen ist.

8.3 Abgeleitete Hypothesen zur Beantwortung der Forschungsfrage

Der Methodenschritt 4 *Harmonisierung der Informationsqualität* wurde derart gestaltet, dass durch diesen Schritt die (Teil-)Forschungsfrage 5 *„Wie lässt sich die für die Steuerungsverfahren erforderliche Informationsqualität ermitteln, sodass bei Einhaltung der erforderlichen Qualität die Steuerungsentscheidungen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses harmonisiert sind?“* beantwortet wird. Durch die Aufteilung der Informationsqualität in die drei IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit*, die jeweils durch eine unterschiedliche Vorgehensweise harmonisiert werden, erfolgt die Beantwortung der Forschungsfrage durch drei Hypothesen, die jeweils eine IQ-Dimension betreffen.

Die Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage in Bezug auf die IQ-Dimension *Granularität* als ein Aspekt der Informationsqualität erfolgt in Form der Hypothese H-TFF5.1:

Hypothese H-TFF5.1:

Die Anforderungen an die IQ-Dimension Granularität für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch eine Identifikation der wertmaximierenden Granularität der Informationen im direkten Nutzungskontext bestimmen, von der ausgehend, Informationsfluss-aufwärts bis zur Informationsquelle, die Granularitäten der eingehenden Informationen abgeleitet werden können, sodass diese jeweils die zu berücksichtigenden Sachverhalte zur Generierung der Ausgangsinformation ausreichend widerspiegeln.

Diese Hypothese wird im Rahmen der Anwendung der entwickelten Methode evaluiert. Dies erfolgt einerseits anhand des Kriteriums, dass die wertmaximierende Granularität in der Informationssenke identifiziert wurde, und andererseits anhand des Kriteriums, dass ausgehend von der Informationssenke die notwendige Granularität der zu erfassenden beziehungsweise zu berücksichtigenden Informationen in den Informationsquellen ermittelt werden konnte.

Die Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage in Bezug auf die IQ-Dimension *Frequenz* als ein Aspekt der Informationsqualität erfolgt in Form der Hypothese H-TFF5.2:

Hypothese H-TFF5.2:

Die Anforderungen an die IQ-Dimension Frequenz für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch die Ermittlung der Zeitpunkte der Änderungen des jeweiligen realen Sachverhalts in der geforderten Granularitätsstufe bestimmen, von denen ausgehend, durch Berücksichtigung der Prozesscharakteristika, durch Interpretation von berechneten Fuzzy-Zahlen mögliche zeitliche Toleranzen bis zur Reaktion auf die Änderung des realen Sachverhalts ermittelt werden können.

Diese Hypothese wird ebenfalls im Rahmen der Anwendung der entwickelten Methode evaluiert. Dazu wird das Kriterium geprüft, ob die ermittelten Toleranzen bestätigt werden können, sodass bei deren

Einhaltung ausreichend schnell auf eine Änderung des realen Sachverhalts reagiert wurde und keine Prozessbeeinträchtigungen entstehen.

Die Beantwortung der (Teil-)Forschungsfrage in Bezug auf die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* als ein Aspekt der Informationsqualität erfolgt in Form der Hypothese H-TFF5.3:

Hypothese H-TFF5.3:

Die Anforderungen an die IQ-Dimension Verlässlichkeit für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch eine Berechnung kritischer Steuerungsentscheidungen und eine Interpretation der Ergebnisse im Zusammenhang mit ihrem Zugehörigkeitsgrad zu sogenannten Tipping-Points ermitteln, in Verbindung mit einer Interpretation möglicher Auswirkungen.

Diese Hypothese wird im Rahmen der Anwendung der entwickelten Methode verifiziert, indem als Kriterium geprüft wird, ob sich mit dem vorgesehenen Vorgehen die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen bestätigen lassen.

9 Schritt 5: Detailplanung und Implementierung

9.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Nachdem die Anforderungen an die IQ-Dimensionen im Rahmen des vorherigen Methodenschrittes ermittelt wurden, ist das Ziel des Schrittes *Detailplanung und Implementierung*, die zur Umsetzung des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik benötigten Maßnahmen und Technologien zu ermitteln, durch die die Anforderungen jeweils erfüllt werden können. Darauf aufbauend wird das Ziel verfolgt, dass eine Umsetzung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik geplant und durchgeführt wird. Im Rahmen dieses Methodenschrittes werden die noch nicht beantworteten Aspekte der (Teil-)Forschungsfrage 4 *„Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?“* beantwortet.

9.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Zur Umsetzung des Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik sind die erforderlichen Technologien, Medien und Maßnahmen zu identifizieren, durch die die notwendigen Informationen erfasst, übertragen, verarbeitet und gespeichert und die Anforderungen an die IQ-Dimensionen erfüllt werden können. Dies ist zunächst für *zu verarbeitende Informationen* und *Informationen im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung* durchzuführen. Für *assoziierte Informationen*, die sich im Zeitverlauf nur sehr selten ändern, sind keine Technologien und Maßnahmen zur Informationserfassung zu identifizieren und auszuwählen. Hier sollte der Grundsatz verfolgt werden, dass die Informationen unter vertretbaren Kostenaspekten so genau wie möglich erfasst werden sollten, da eine genaue Informationserfassung keine hohen laufenden Prozesskosten zur Folge haben, wohingegen aus einer verminderten Qualität dieser Informationen Folgekosten entstehen können.

Zur Auswahl von Technologien und Maßnahmen, um die erforderlichen Informationen zu ermitteln, bietet es sich an, zunächst die IQ-Dimension *Granularität* der zu erfassenden Informationen zu betrachten. Durch die in der IQ-Dimension *Granularität* geforderten Einheit der Information kann eine erste Eingrenzung möglicher Maßnahmen und Technologien zu deren Erfassung ermittelt werden. Maßnahmen beschreiben in diesem Zusammenhang insbesondere manuelle Tätigkeiten der Informationserfassung und gegebenenfalls deren Weiterleitung. Die Technologien beschreiben in diesem Zusammenhang Möglichkeiten, die bei der Informationserfassung unterstützen oder die Information (teil-)automatisiert erfassen und übertragen. Eine Identifikation von möglichen Technologien kann durch gängige Methoden des Technologiemanagements, wie das Technologiescouting, erfolgen. Das Technologiescouting beschreibt die Detailsuche zu bestimmten Technologiethemen und erfolgt in der Regel auftragsbezogen (beispielsweise im Rahmen von Entwicklungs- und Verbesserungsprojekten) [ScKl11, S. 98]. Neben der reinen Betrachtung von Technologien ist zudem die Option einer manuellen Informationserfassung zu analysieren. Die identifizierten Möglichkeiten zur Erfassung der Informationen stellen einen Lösungsraum dar, aus dem geeignete Maßnahmen und Technologien sowie eine Kombination aus Maßnahmen und Technologien auszuwählen sind, sodass die durch die IQ-Dimension *Frequenz* und *Verlässlichkeit* ausgedrückten Anforderungen (Problemraum) erfüllt werden. Um zu analysieren, welche Maßnahmen und Technologien die Anforderungen erfüllen, bietet es sich an, für die Informationen sogenannte Ishikawa-Diagramme (auch als Ursache-

Wirkungsdiagramme bezeichnet) zu erstellen, mit denen systematisch Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge für eine Beeinträchtigung der Informationsqualität grafisch ermittelt werden können. Die Ursachen werden häufig ausgehend von den Einflussmöglichkeiten Mensch, Maschine, Material, Methode, Mitwelt und Messung ermittelt [KLE09, S. 21]. Der Mensch kann in diesem Zusammenhang beispielsweise für eine verzögerte Erfassung einer Information verantwortlich sein, da gegebenenfalls bei einer manuellen Erfassung die Information nicht parallel zur durchzuführenden wertschöpfenden Tätigkeit, sondern erst zeitversetzt aktualisieren werden kann. Für jede Ursache einer Beeinträchtigung der Informationsqualität kann anschließend geprüft werden, wie diese durch den Einsatz von Technologien und Maßnahmen behoben oder zumindest auf ein akzeptables Maß reduziert werden kann. Im Rahmen der Überprüfung der Reduktion durch Maßnahmen kann unter anderem auf Aspekte der Lean Production, wie beispielsweise dem Poka-Yoke (*dt. unglückliche Fehler vermeiden*) zurückgegriffen werden. Poka-Yoke basiert auf dem Grundgedanken, dass die beste Strategie gegen Fehler ist, diese erst gar nicht zu machen und daher durch gezielte Hilfestellung deren Vermeidung zu unterstützen [THAL11, S. 339]. Abschließend sind die als geeignet identifizierten Technologien und Maßnahmen miteinander hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu vergleichen. Dazu bietet sich die Betrachtung durch die Analyse der Total-Cost-of-Ownership (TCO) an. Eine TCO-Analyse beinhaltet neben den Kosten für eine Investition auch deren Folgekosten, wie beispielsweise für Betrieb, Wartung, Schulung oder Reparatur [WER13, S. 38]. In diese Analyse sind Prozesskosten zu ergänzen, die durch die Informationserfassung entstehen. Diese treten überwiegend als Opportunitätskosten in solchen Fällen, wenn die Mitarbeitenden durch eine manuelle Informationserfassung von der Bedienung einer Maschine abgehalten werden und diese infolgedessen weniger produzieren kann. Da insbesondere die durch die zu erfassenden Informationen entstehenden Prozesskosten bei Informationen, die sehr häufig erfasst beziehungsweise aktualisiert werden müssen, schnell ansteigen können, korreliert die Wirtschaftlichkeit einer automatisierten Erfassung oftmals positiv mit der Erfassungsfrequenz [FLMA05, S. 13].

Nachdem die Technologien und Maßnahmen zur Informationserfassung ausgewählt wurden, sind diese im Wertstromdiagramm zu modellieren. Aus den im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden erfüllen die Ansätze von Lewin et al. [LVF17] und Molenda et al. [MJH+19] die Anforderungen an die Modellierung der Technologien der Informationserfassung (I-2) vollständig. Beim Ansatz von Lewin et al. [LVF17] werden die eingesetzten Technologien mittels kleiner Symbole an den dort zum Einsatz kommenden Informationsbeschreibungsblöcken veranschaulicht. Beim Ansatz von Molenda et al. [MJH+19] erfolgt die Darstellung der eingesetzten Technologien durch das Einfügen horizontaler Swimlanes unterhalb des Materialflusses. Ein Punkt auf der Verbindungslinie der Information zu dessen Nutzung mit der horizontalen Swimlane repräsentiert dabei die Nutzung der Technologie. Beide Ansätze besitzen den gleichen Informationsgehalt. Zur Modellierung der Erfassungstechnologien und Maßnahmen im Rahmen dieser Methode wird der Ansatz von Molenda et al. [MJH+19] aufgegriffen, da durch die Vermeidung weiterer einzuführender Symbole nicht vorausgesetzt sein muss, dass ein Anwender der Methode für jede mögliche Technologie ein entsprechendes Symbol kennt, sondern direkt deren Bezeichnung verwenden kann. Zur Modellierung der Erfassungstechnologien wird für jede eingesetzte Technologie eine gestrichelte Linie oberhalb der Prozessschritte in der *Prozess-Swimlane* eingezogen. Durch einen Punkt auf der Verbindungslinie des Pfeils, der den Prozessschritt mit der zugehörigen Information verbindet, wird symbolisiert, dass diese Information durch die entsprechende Technologie oder Maßnahme erfasst wird.

Anschließend sind die Speichermedien zu definieren, in denen die Informationen verfügbar sind, sodass das Steuerungsverfahren (Informationsverarbeitung) auf diese zugreifen kann. Die Speichermedien werden ebenfalls durch gestrichelte Linien für jedes Speichermedium repräsentiert. Diese werden innerhalb

der Swimlane *Information* modelliert und unterhalb der *Informationsbeschreibungsblöcke* platziert. Ein Punkt auf dem Schnittpunkt der Verbindungslinie des Prozessschrittes zur Information markiert auch in diesem Fall, dass eine Information in dem durch die horizontale Linie repräsentierten Speichermedium gespeichert wird. Die Modellierung der Speichermedien geht dabei einher mit den Ansätzen von Meudt et al. [MMA17], Lewin et al. [LVF17] und Molenda et al. [MJH+19]. Bei der Auswahl der einzusetzenden Speichermedien sollte, sofern möglich, vermieden werden, dass die Informationen in verschiedenen Formaten und an verteilten Orten liegen, da somit Verzögerungen in der Informationszusammenführung entstehen können, die Gefahr von Schnittstellenverlusten bei der Übertragung besteht und gegebenenfalls zusätzlicher Aufwand durch die Ausgestaltung von Schnittstellen zwischen verschiedenen IT-Systemen bei der Implementierung des Konzeptes entsteht.

Abschließend sind die Technologien der Informationsübertragung zu definieren, durch die die Steuerungsentscheidung zurück an den Prozessschritt übergeben wird, wo diese berücksichtigt beziehungsweise umgesetzt wird. Zur Auswahl der Technologien und Maßnahmen zur Übertragung der Informationen an den Prozess kann die gleiche Vorgehensweise wie bei der Ermittlung der Technologien und Maßnahmen bei der Informationserfassung angewendet werden. Die Modellierung der Maßnahmen und Technologien zur Informationsübertragung erfolgt somit analog zur Informationserfassung. In Abbildung 9-1 ist ein um die Informationserfassungs-, -speicherungs- und -übertragungstechnologien erweitertes Wertstromdiagramm beispielhaft dargestellt. In diesem Beispiel werden einige Informationen mittels einer Maschinendatenerfassung (MDE) erfasst und in einem Enterprise-Resource-Planning-System (ERP) sowie einem Staplerleitsystem (SLS) gespeichert. Zudem findet eine Übermittlung einer Information aus dem SLS auf ein Tablet statt, wodurch die Information dem Prozessschritt zur Verfügung steht.

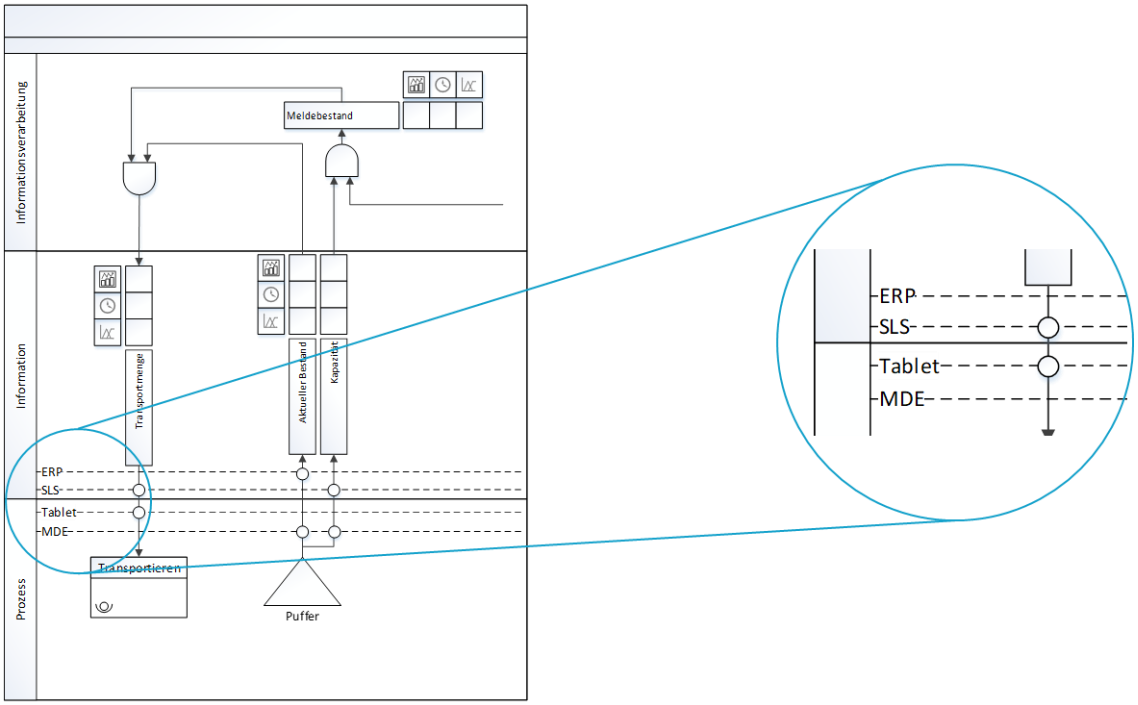

Abbildung 9-1: Wertstromdiagramm erweitert um Erfassungs- und Übertragungstechnologien sowie Speichermedien

Sollte der Fall auftreten, dass sich notwendige Informationen nicht wirtschaftlich vertretbar in der ausreichenden Qualität erfassen, verarbeiten und übertragen lassen, sollte das Steuerungsverfahren nicht auf

Basis einer unzureichenden Informationsqualität implementiert werden. Durch die Möglichkeit, dass dadurch regelmäßig falsche Steuerungsentscheidungen generiert werden, besteht die Gefahr, dass hohe Effizienzeinbußen entstehen können, die wiederum mit hohen Folgekosten verbunden sein könnten. Stattdessen sollte analysiert werden, ob sich das beziehungsweise die einzusetzenden Steuerungsverfahren modifizieren lassen, um auf die notwendigen Informationen verzichten zu können. Alternativ ist der Einsatz anderer Steuerungsverfahren zu prüfen. Für das mögliche Auftreten dieses Falls ist ein Rückschritt innerhalb der Methode über die *Harmonisierung der Informationsflüsse* und die *Modellierung der Informationsflüsse* zum *Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik* vorgesehen. Werden die Steuerungsverfahren modifiziert beziehungsweise neue eingesetzt, so sind die sich daran anschließenden Schritte der Methode erneut mit den neuen Verfahren zu durchlaufen.

Das nach der Modellierung der einzusetzenden Technologien, Maßnahmen und Medien zur Erfassung, Speicherung und Übertragung der Informationen vervollständigte Wertstromdiagramm kann nun als Vorlage für eine Implementierung verwendet werden, indem aus diesem Diagramm weitere Schritte abgeleitet werden. So kann das Wertstromdiagramm beispielsweise verwendet werden, um daraus einen Projektplan zu erstellen. Dazu kann zum Beispiel definiert werden, wann welche Technologien zu beschaffen und wo zu implementieren sind, welche Schnittstellen zwischen IT-Systemen herzustellen sind und welche Mitarbeitenden in Abhängigkeit der Prozessschritte gegebenenfalls für die Anwendung der neuen Technologien geschult werden müssen.

Die Implementierung und Anwendung des verbesserten Designs der Steuerung der Produktionslogistik sollte zunächst in einem kleineren Abschnitt des Untersuchungsbereiches pilotiert werden, bevor eine vollständige Anwendung eingeführt wird. Durch die Pilotierung kann in einem kleineren Rahmen die Funktionalität des implementierten Verfahrens getestet und sichergestellt werden. Noch bestehende Fehler in der Implementierung haben somit nur eine Auswirkung auf einen kleinen Bereich und betreffen nicht unmittelbar einen gesamten Produktionsbereich. Damit die durch die verbesserte Steuerung der Produktionslogistik entstandenen Änderungen für die Mitarbeitenden auch von diesen akzeptiert werden, sind verschiedene Ansätze des *Change-Managements* durchzuführen. Das Wertstromdiagramm kann in diesem Zusammenhang verwendet werden, um den Mitarbeitenden die Relevanz der Informationserfassung zu verdeutlichen sowie die Zusammenhänge, was bei einem Ausbleiben der Informationserfassung beziehungsweise einer schlechten Informationsqualität für Folgen entstehen können. Das Wertstromdiagramm kann somit im Rahmen des *Change-Managements* als ein Kommunikationsmittel dienen und einen entscheidenden Erfolgsbeitrag zur Umsetzung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik leisten [LAU10, S. 105].

9.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage

Aus dem Ziel, dem Aufbau und der Ausgestaltung des Methodenschrittes *Detailplanung und Implementierung* soll aus (Teil-)Forschungsfrage 4 der Aspekt der Ableitung eines Konzepts zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik beantwortet werden:

„Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?“

Die Beantwortung der aufgeführten Aspekte der (Teil-)Forschungsfrage erfolgt in Form der Hypothese H-TFF4.2:

Hypothese H-TFF4.2:

Durch die in den Informationsbeschreibungsblöcken angegebenen Anforderungen an die IQ-Dimensionen ist eine ausreichend genaue Grundlage geben, um darauf aufbauend die richtigen Informationserfassungs-, -speicherung-, und -übertragungstechnologien und Medien durch ein systematisches Technologiescouting identifizieren und bewerten zu können. Die Modellierung der Informationserfassungs- und -übertragungstechnologien sowie der Speichermedien durch horizontale Linien und der Kennzeichnung ihrer Zugehörigkeit zu Informationsflüssen eignen sich, um ein Konzept zur Implementierung abzuleiten.

Diese Hypothese wird im Rahmen der Anwendung der Methode evaluiert. Dies erfolgt zum einen anhand des Kriteriums, ob sich aufbauend auf den zuvor modellierten Anforderungen an die IQ-Dimensionen der Informationen die notwendigen Technologien zur Erfassung und Übertragung ermitteln lassen, sowie zum anderen anhand des Kriteriums, ob sich die identifizierten Technologien und Maßnahmen zur Erfassung, Übertragung und Speicherung der Informationen im Wertstromdiagramm abbilden lassen.

10 Schritt 6: Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung

10.1 Ziel und Aufbau des Methodenschrittes

Nachdem die verbesserte Steuerung der Produktionslogistik implementiert wurde, ist zuletzt zu prüfen, ob die eingeführten Verfahren tatsächlich zu einer Verbesserung geführt haben. Die Überprüfung des Erreichens eines verbesserten Zustandes im Vergleich zur Ausgangssituation erfolgt im Schritt *Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung*. Dieser Methodenschritt stellt somit eine Überprüfung dar, deren Beitrag bei einer vorhandenen Verbesserung des Zielzustandes dessen Bestätigung ist. Sollte sich keine Verbesserung des Zielzustandes ergeben haben, ist das Ziel dieses Schrittes, dass Ursachen gefunden werden, die der Verbesserung entgegenwirken und im Rahmen einer Modifikation behoben werden.

10.2 Ausgestaltung des Methodenschrittes

Da die Evaluierung des entwickelten und implementierten Designs der Steuerung der Produktionslogistik keine zwingende Voraussetzung zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ist, sondern nur eine Überprüfung der Erfüllung einer Verbesserung, wurde dies nicht als Anforderung für die im Stand der Erkenntnisse untersuchten Methoden aufgenommen. Somit kann an dieser Stelle nicht auf den Stand der Erkenntnisse zurückgegriffen werden.

Als Ausgangspunkt der Evaluierung des entwickelten und implementierten Designs der Steuerung der Produktionslogistik können die im Rahmen der *Analyse der Ist-Situation* aufgenommenen Kennzahlen verwendet werden. Da diese den Zustand vor der Implementierung abbilden, stellen sie die Referenzwerte dar. Zunächst bietet es sich an, die im Rahmen des *Designs einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik* ausgewählte als primär zu verfolgende produktionslogistische Zielgröße zu evaluieren. Entscheidend dabei ist, dass die Evaluierung nur dann aussagekräftig ist, wenn sich eine Veränderung der Kennzahl nur auf eine Anpassung der eingesetzten Steuerungsverfahren zurückführen lässt und beispielsweise der Einfluss externer Faktoren ausgeschlossen werden kann. Ergibt sich an dieser Stelle eine Verbesserung der produktionslogistischen Zielgröße, so sollten noch weitere mit der evaluierten Kennzahl in Verbindung stehenden Kennzahlen evaluiert werden, um zu verhindern, dass eine Kennzahl zu Lasten vieler weiterer Kennzahlen überproportional verbessert wurde. Dazu bietet es sich an, auf bestehende Kennzahlensysteme zurückzugreifen, in denen Abhängigkeiten dargestellt werden. Beispiele für solche Kennzahlensysteme sind in der VDI-Richtlinie 4400-2 „Logistikkennzahlen für die Produktion“ [VDI 4400-2] oder im Ansatz von Joppen et al. [JEG+19] gegeben. Sind die mit der primären Kennzahl in Abhängigkeit stehenden Indikatoren nicht oder in einem tolerierbar erwartbaren Rahmen schlechter als vor der Implementierung der Steuerung der Produktionslogistik, so kann der erste Zyklus der Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität als abgeschlossen angesehen werden und mit einer erneuten *Analyse der Ist-Situation* begonnen werden, um weitere, sich gegebenenfalls erst durch die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ergebende Verbesserungspotenziale zu identifizieren und einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess zu starten. Dies kann auch in einem der angrenzenden Produktionsbereiche erfolgen, da sich die Auswirkungen der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik des untersuchten Produktionsbereiches durch geänderte Anforderungen an die angrenzenden Produktionsbereiche ausdrücken können. Dies kann beispielsweise durch eine höhere Ausbringungsrate ausgedrückt sein, die der nachfolgende Produktionsbereich rechtzeitig verarbeiten

können muss. Für den vorausgehenden Produktionsbereich kann dies wiederum bedeuten, dass dieser mit einem höheren Bedarf an Produkten innerhalb eines Zeitraums konfrontiert wird, der bereitgestellt werden muss.

Ergibt sich durch die Evaluierung hingegen, dass die primäre produktionslogistische Kennzahl nicht verbessert werden konnte oder eine Verbesserung der Kennzahl nur durch eine Kompensation eines anderen mit der Kennzahl in Abhängigkeit stehenden Indikators erreicht werden konnte, so ist die Ursache dafür zu identifizieren. Dazu ist gegebenenfalls eine vertiefende Prozessanalyse erforderlich, durch die die veränderten Zusammenhänge dargestellt werden können. Sind die Ursachen identifiziert, so ist das Design der Steuerung der Produktionslogistik derart anzupassen, dass zuvor nicht berücksichtigte Zusammenhänge nun mit in das Konzept integriert werden. Das dann angepasste Konzept ist schließlich ausgehend vom *Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik* über die Schritte *Modellierung von Informationsflüssen, Harmonisierung der Informationsqualität* sowie *Detailplanung und Implementierung* erneut zu spezifizieren, zu implementieren und schließlich wieder zu evaluieren. Dieser dadurch entstehende Zyklus ist abgeschlossen, sobald die zu erreichenden Zielgrößen verbessert wurden beziehungsweise sich in einem tolerierbaren Rahmen befinden.

10.3 Abgeleitete Hypothese zur Beantwortung der Forschungsfrage

Da die *Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik* keine zwingende Voraussetzung zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ist, wurde für diesen Methodenschritt keine Forschungsfrage aufgestellt und somit auch keine Hypothese abgeleitet.

11 Evaluierung der entwickelten Methode

Das in den vorherigen Kapiteln 4 bis 10 entwickelte Artefakt im Sinne des DSR kann als vollständig und effektiv angesehen werden, wenn es die Anforderungen des zu lösenden Problemkontextes erfüllt [HMP+04, S. 85]. Für diese Überprüfung ist im Rahmen des DSR eine *Evaluierung* erforderlich. Diese *Evaluierung* erfolgt in diesem Kapitel. Dazu wird die Methode anhand von zwei aufeinander aufbauenden Anwendungsbeispielen angewendet und für jeden Methodenschritt geprüft, ob die aufgestellten Evaluierungskriterien der zugehörigen Hypothesen erfüllt werden. Abschließend erfolgt eine Überprüfung, ob durch die entwickelte Methode die den (Teil-)Forschungsfragen zugrunde liegenden Anforderungen erfüllt wurden. Zudem erfolgt eine kritische Reflexion der Anforderungserfüllung und eine Diskussion der (Haupt-)Forschungsfrage.

11.1 Vorgehen zur Evaluierung der entwickelten Methode

Im Rahmen von DSR kann ein zu entwickelndes Artefakt als vollständig und effektiv angesehen werden, wenn es die Anforderungen und Einschränkungen des zu lösenden Problemkontextes erfüllt [HMP+04, S. 85]. Dieser Nachweis erfolgt im Rahmen der Evaluierung. Dresch et al. [DLA15] definieren dabei, dass im Rahmen von DSR zum einen das Artefakt mit Hilfe angebrachter Techniken, Methoden und/oder Werkzeugen evaluiert werden muss und zum anderen die Nützlichkeit des entwickelten Artefakts im Rahmen der Evaluierung strukturiert nachgewiesen werden muss [DLA15, S. 126]. Für die Evaluierung eines Artefakts können gemäß Hevner et al. [HMP+04, S. 86], in Abhängigkeit der Art des entwickelten Artefakts, verschiedene Methoden angewendet werden:

- beobachtende Methoden (beispielsweise Fall- und Feldstudien),
- analytische Methoden (beispielsweise statische/dynamische Analyse, Optimierung),
- experimentelle Methoden (beispielsweise Simulation, kontrolliertes Experiment),
- testende Verfahren (beispielsweise funktionales oder strukturelles Testen) oder
- deskriptive Methoden (beispielsweise Szenarien).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die entwickelte Methode durch die Anwendung an zwei aufeinander aufbauenden Anwendungsbeispielen (Fallstudien) evaluiert. In diesen wurde jeweils eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität mit Hilfe der Methode entwickelt und bis zur Umsetzung begleitet. Beide Anwendungsbeispiele wurden im gleichen Produktionssystem durchgeführt, beinhalteten jedoch unterschiedliche Aufgaben der Steuerung der Produktionslogistik (Anwendungsbeispiel 1: Auftragserzeugung; Anwendungsbeispiel 2: Reihenfolgebildung). Für die Anwendungsbeispiele werden zunächst die Ausgangssituation und Zielstellung beschrieben. Anschließend erfolgt die Anwendung jedes Methodenschrittes der entwickelten Methode. Nach Anwendung eines jeden Methodenschrittes im Rahmen des Anwendungsbeispiels erfolgt eine Evaluierung der Zielerfüllung des Methodenschrittes. Die zu erreichenden Ziele durch den jeweiligen Methodenschritt werden anhand der zu den Hypothesen aufgestellten Evaluierungskriterien überprüft. Abschließend erfolgt eine Überprüfung, ob durch die entwickelte Methode die den (Teil-)Forschungsfragen zugrunde liegenden Anforderungen erfüllt wurden. Zudem erfolgt eine kritische Reflexion der Anforderungserfüllung und eine Diskussion der (Haupt-)Forschungsfrage.

11.2 Anwendungsbeispiel 1: Reduktion von Transporten

11.2.1 Beschreibung der Ausgangssituation und Zielstellung

Die entwickelte Methode wurde in einem Abschnitt des Produktionssystems eines Automobilzulieferers durchgeführt. Das global agierende Unternehmen produziert Verbindungselemente aus unterschiedlichen Rohmaterialien für verschiedene Fahrzeughersteller nach kundenindividuellen Wünschen. Durch die Vielzahl an zu beliefernden Fahrzeugherstellern, die jeweils wiederum ein großes Spektrum an Fahrzeugtypen anbieten, ist das Unternehmen mit der Herausforderung konfrontiert, eine hohe Anzahl an Varianten von Verbindungselementen zu produzieren, bei geringer werdenden Losgrößen. Ausgangsprodukt der zu produzierenden Verbindungselemente sind verschiedene Legierungen, die in Form von sogenannten Drahtringen gelagert werden. Diese Drahtringe werden gewickelt gelagert und unterscheiden sich in Bezug auf die Materialzusammensetzung, den Durchmesser des aufgewickelten Drahts, das Gesamtgewicht eines Drahtrings sowie in Bezug auf die Abmessungen des als Draht aufgewickelten Rings (insbesondere in der Länge des aufgewickelten Drahtrings). Durch spezielle Hebevorrichtungen lassen sich diese Drahtringe mit Hilfe von Transportressourcen ohne gesonderte Ladehilfsmittel transportieren. Da eine Chargenrückverfolgbarkeit der eingesetzten Materialen für jeden Kundenauftrag gewährleistet sein muss, ist jeder Drahtring individuell bekannt und mit einem Etikett versehen, auf dem die zur Identifikation und Zuordnung des Drahtrings relevanten Informationen verfügbar sind.

Durch die in der Automobilindustrie übliche Just-in-Time-Belieferung mit hohen Konventionalstrafen bei Lieferverzug hat die Liefertermintreue eine sehr hohe Bedeutung für das Unternehmen und stellt die zentrale Zielgröße für das Unternehmen dar. Im Rahmen eines Projektes, in dem die entwickelte Methode angewendet wurde, wurde daher die Zielstellung ausgegeben, Verbesserungspotenziale der Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren, durch die die Liefertermintreue erhöht werden kann, sowie Lösungen zu erarbeiten und auszugestalten, um die Verbesserungspotenziale umsetzen zu können.

11.2.2 Anwendung der entwickelten Methode

Schritt 1: Analyse der Ist-Situation

Anwendung des Schrittes

Im Rahmen des Projektes zur Identifikation und Umsetzung von Verbesserungspotenzialen, durch die die Liefertermintreue verbessert werden kann, wurde zunächst die Ist-Situation analysiert. Dazu wurde der Untersuchungsbereich auf den ersten Produktionsabschnitt eingegrenzt, in dem die zuvor beschriebenen Drahtringe mittels einer Kaltumformung in kleinere Einheiten umgewandelt werden, die anschließend in Ladehilfsmitteln gelagert und zur Weiterverarbeitung in den nächsten Produktionsabschnitt transportiert werden. Die dabei berücksichtigten Materialien umfassen ein sehr großes Spektrum, da der betrachtete Produktionsabschnitt der Ausgangspunkt für fast alle angebotenen Produkte des Unternehmens ist. Der Produktionsablauf in diesem Produktionsabschnitt wurde mit der Wertstromanalyse zwar Materialfluss-aufwärts (von der Senke zur Quelle) aufgenommen, wird zum besseren Verständnis an dieser Stelle jedoch Materialfluss-abwärts (von der Quelle zur Senke) beschrieben.

Nachdem ein Produktionsauftrag eingeplant wurde, wird die zur Produktion erforderliche Menge an Ausgangsmaterial anhand des Gesamtgewichts des Auftragsvolumens ermittelt. Aus diesem Gesamtgewicht ergibt sich die Anzahl und der Umfang an benötigten Drahtringen, indem diese im Rahmen einer Kommissionierung von einem Materialvorrat abgetrennt und der abgetrennte Drahtring gewogen wird. Durch das Abtrennen der Drahtringe von einem Materialvorrat unterscheiden sich diese insbesondere in den

Dimensionen Länge und Gewicht. In diesem Zusammenhang entstehen häufig auch sogenannte Restringe, die deutlich weniger wiegen und in ihrer Länge deutlich kürzer sind als die üblichen Drahtringe. Diese entstehen meistens dann, wenn nur noch ein geringes Gewicht offen ist, um das erforderliche Gewicht für das Produktionsvolumen des Produktionsauftrages zu vervollständigen. Zur Verarbeitung werden die Drahtringe in einem Kragarmlager gelagert, von dem aus sie zu den zu den Produktionsaufträgen gehörenden Umformmaschinen durch eine Transportressource mit entsprechender Transportvorrichtung transportiert werden. Das Kragarmlager stellt den Ausgangspunkt der Analyse der Ist-Situation dar, von dem aus die nachfolgenden Prozessschritte analysiert wurden.

Etwa 45 % der Produktionsaufträge und Materialien werden aus dem Kragarmlager direkt zu Pufferplätzen an den verarbeitenden Umformmaschinen transportiert, von denen 43 im untersuchten Produktionsbereich vorhanden sind. Jeder Umformmaschine ist dabei ein eigener Pufferplatz zugeordnet, auf dem die Materialien des aktuell zu bearbeitenden Produktionsauftrages zwischengelagert werden können. Der direkte Transport von Materialien aus dem Kragarmlager zu den Umformmaschinen wird als Transporttyp 10 bezeichnet, um diesen von den weiteren vorherrschenden Arten des Transports zu unterscheiden. Die verbleibenden Produktionsaufträge und Materialien (ca. 55 %) werden vor der Umformung noch durch eine von vier vorhandenen separaten Maschinen vorverarbeitet. Dazu werden die Drahtringe durch dieselbe Transportressource, die auch die Transporte direkt an die Umformmaschinen übernimmt, vom Kragarmlager aus auf Pufferplätze der vorverarbeiteten Maschinen transportiert. Diese Art des Transports wird als Transporttyp 20 bezeichnet. Nach der Vorverarbeitung werden die Materialien wieder in Form eines Drahtrings gewickelt, mit gleichen Materialeigenschaften und Gewicht wie das Ausgangsprodukt, jedoch verändert in der Form des Drahtrings (insbesondere in der Länge des Drahtrings). Im Anschluss an die Vorverarbeitung erfolgt eine Pufferung der Materialien auf Abstellflächen innerhalb des Produktionsbereichs, wobei die dazu notwendige Transportart als Transporttyp 30 bezeichnet wird. Von diesen Abstellflächen werden die vorverarbeiteten Materialien schließlich an die Umformmaschinen transportiert, sobald der ihnen zugehörige Produktionsauftrag bearbeitet wird, was als Transporttyp 40 bezeichnet wird. Auch die Transporttypen 30 und 40 werden durch die eine Transportressource durchgeführt, die die Transporttypen 10 und 20 durchführt.

Der Produktionsablauf in dem untersuchten Produktionsabschnitt mit zugehörigen Kennzahlen, modelliert als Fuzzy-Zahlen, ist in Abbildung 11-1 dargestellt[11]. Die aufgenommenen Kennzahlen über die Leistungsfähigkeit des Produktionssystems basieren auf einer Simulationsstudie, deren zugrundeliegendes Modell mit den Kennzahlen und dem Verhalten des realen Produktionssystems abgeglichen wurde, sodass dieses Modell die Realität hinreichend genau abbildet. Dieses Vorgehen wurde gewählt, damit in Schritt 6 der Methode „Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung“ eine Vergleichbarkeit der Daten gegeben ist, da die Verbesserung ebenfalls auf Basis einer Simulationsstudie analysiert wird. Die Vergleichbarkeit ist gegeben, da somit der Ausgangssituation und der Situation nach Umsetzung möglicher Verbesserungen die gleichen Vereinfachungen und Abstraktionen im Simulationsmodell zugrunde liegen. Andernfalls könnte die Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik bei einem Vergleich mit den zuvor erhobenen realen Daten auf mögliche Effekte zurückzuführen sein, die nicht im Simulationsmodell abgebildet wurden und somit eine Vergleichbarkeit verfälschen würden. Der untersuchte Zeitraum beläuft sich dabei auf etwa vier Monate. Die im weiteren Verlauf der Anwendungsbeispiele modellierten Fuzzy-Zahlen, insbesondere im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität, basieren hingegen auf real

[11] Zur Modellierung der Prozessschritte und der anschließenden Informationsflüsse im Wertstromdiagramm wurde das Programm Visio von Microsoft verwendet.

aufgenommenen Werten, die teilweise verwendet wurden, um die Grundlage der Datenbasis des Simulationsmodells zu erstellen. Die Kennzahlen sind zur besseren Lesbarkeit im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* in *Tabelle A-1* aufgeführt.

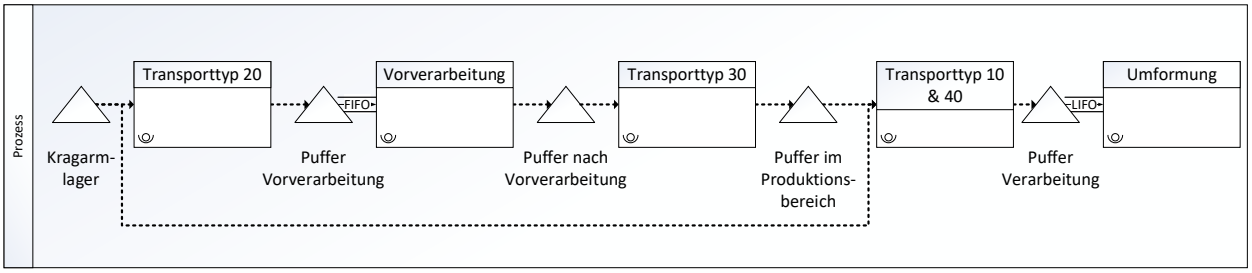

Abbildung 11-1: Anwendungsbeispiel 1 - Analyse der Ist-Situation

Durch die Analyse der Ist-Situation wurde identifiziert, dass es häufig zu Maschinenstillständen der Umformmaschinen durch fehlendes Material kommt (sogenannte Materialflussabrisse). So entstehen durch die Materialflussabrisse ungeplante Stillstände der verarbeitenden Maschinen von im Mittel 4,63 % der Zeit, die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation ausgewertet wurde, bei einigen Maschinen sogar bis zu etwa 8 %. Die Materialflussabrisse waren jedoch nicht auf einen Planungsfehler zurückzuführen, wie ein Einplanen und Freigeben von Produktionsaufträgen, obwohl das dafür notwendige Material noch nicht im Kragarmlager verfügbar war, sondern auf die Steuerung der Materialversorgung durch die Transportprozesse und die Bearbeitungsreihenfolge der vorverarbeitenden Maschinen.

Eine Analyse der Transportsteuerung ergab, dass diese manuell durchgeführt wird und die Steuerungsentscheidungen überwiegend auf Basis subjektiver Eindrücke getroffen wurden. So konnten die Maschinenbedienenden an den vorverarbeitenden Maschinen und an den Umformmaschinen eigenständig entscheiden, wann sie Material nachfordern möchten, indem sie in ein zentrales Ablagefach ein vordefiniertes Blatt einlegen, auf dem sie markieren, wie viele Materialien von welchem Produktionsauftrag sie an welcher Maschine anfordern. Diese Materialanforderungen wurden von den Mitarbeitenden, die die Transportressource steuern, zyklisch entnommen, eigenständig, auf Basis subjektiver Einflüsse priorisiert und durch die Bereitstellung der Materialien abgearbeitet. Durch die Befürchtung, dass es zu Materialflussabrissen kommen kann, wurde dabei häufig neues Material angefordert, sobald ein Drahtring in die Maschine eingelegt wurde, um schnellstmöglich den Puffer wieder aufzufüllen. Eine Konsequenz davon war, dass im Regelfall eine Transportmenge von eins transportiert wurde, obwohl, in Abhängigkeit der zu transportierenden Materialien, die Kapazitäten der Transportressource für eine höhere Transportmenge ausgereicht hätten. Diese Möglichkeit wurde unter anderem dadurch ermittelt, dass im Rahmen von Transporten des Transporttyp 30 oftmals eine höhere Transportmenge als eins transportiert wurde und dies auch vereinzelt bei Transporten der Transporttypen 10 und 40 vorgekommen ist. Die Transportmenge von eins führte wiederum zu einer Vielzahl an Transportvorgängen, die zu einer sehr hohen Auslastung der Transportressource führte und die Wartezeiten auf Materialien an den Umformmaschinen verlängerte. Das teilweise recht lange Warten auf Materialien bestärkte wiederum die Maschinenbedienenden darin, so früh wie möglich neues Material nachzufordern, obwohl der Bestand an den Umformmaschinen ausgereicht hätte, um eine Nachforderung so lange aufzuschieben, bis die Transportkapazitäten der Transportressource komplett ausgenutzt werden könnte. Wurde Material durch die Transportprozesse nach einer längeren Verzögerung nach dem Auftreten eines Materialflussabrisses noch nicht bereitgestellt, so trat teilweise auch der Fall ein, dass, bei vorhandener Qualifikation, die Maschinenbedienenden eigenständig den Materialtransport vornahmen. Diese gesonderten Transporte dauerten durch die fehlende Routine in der

Regel länger als der Transport durch den dafür eigentlich vorgesehenen Transportprozess. Zudem standen während dieser Zeit die Maschinenbedienenden nicht an den Umformmaschinen zur Verfügung, um dort ihre originäre Aufgabe durchzuführen, wie beispielsweise die zwischenzeitliche Wartung der Maschinen, was teilweise zusätzlich zu Verzögerungen in der Bearbeitung der Produktionsaufträge führte und somit deren Durchlaufzeit verlängerte.

Zudem wurde ermittelt, dass Materialflussabrisse an den Umformmaschinen auftraten, da die Materialien die Vorverarbeitung noch nicht durchlaufen haben und somit noch nicht zum Transport bereitstanden. Eine Ursache hiervon ist, dass die Bearbeitungsreihenfolge der zur Bearbeitung ausstehenden Materialien auf Basis eines täglich erstellen Bearbeitungsplans beruht. Somit wird die Bearbeitungsreihenfolge nur in großen Abständen aktualisiert, ohne die aktuellen Gegebenheiten an den Umformmaschinen zeitnah zu berücksichtigen und ohne auf diese flexibel zu reagieren.

Auf Basis der identifizierten Ursachen für die auftretenden Materialflussabrisse wurden schließlich drei Verbesserungspotenziale identifiziert:

1. *Verbesserungspotenzial 1:* Steigerung der Effizienz der Transportprozesse durch Ausnutzung der verfügbaren Kapazitäten der Transportressource.
2. *Verbesserungspotenzial 2:* Objektivierung der Reihenfolgebildung der Abarbeitung von ausstehenden Materialbereitstellungen auf Basis der Dringlichkeit der Materialien.
3. *Verbesserungspotenzial 3:* Flexibilisierung der Abarbeitungsreihenfolge in der Vorverarbeitung, um auf die aktuellen Gegebenheiten an den Umformmaschinen zeitnah zu reagieren.

Die Ursachen von Verbesserungspotenzial 1 und Verbesserungspotenzial 2 haben insgesamt als Konsequenz eine mittlere Stillstandszeit der Umformmaschinen von 3,17 % im simulierten Zeitraum. Die Ursache von Verbesserungspotenzial 3 ist für eine ungeplante Stillstandszeit der Umformmaschinen von im Mittel 1,46 % des simulierten Zeitraums verantwortlich. Durch eine Reduktion der Materialflussabrisse werden die Produktionsaufträge früher fertiggestellt, da sich deren Durchlaufzeit um die Wartezeit auf Material reduziert. Durch diese frühzeitigere Fertigstellung kann die Termintreue sowohl innerhalb des Produktionssystems zu den nächsten Produktionsschritten als auch zum Kunden erhöht werden. Somit unterstützt eine Reduktion der Materialflussabrisse das Ziel des Projektes zur Steigerung der Liefertermintreue.

Die drei identifizierten Verbesserungspotenziale wurden schließlich priorisiert. In diesem Zusammenhang wurde entschieden, dass zunächst die Effizienz der Transportprozesse durch die Ausnutzung der verfügbaren Kapazitäten der Transportressource gesteigert werden sollte, da bei diesem Verbesserungspotenzial auch quantitativ die höchste Effizienzsteigerung zu erwarten war. Dazu sollten Materialtransporte gebündelt werden, sodass die Transportkapazitäten vollkommen ausgenutzt werden können. Dies sollte eine Reduktion der Fahrten für die gleiche Anzahl an zu transportierenden Materialien ermöglichen. Durch diese Effizienzsteigerung sind die Transportprozesse in der Lage, innerhalb des gleichen Zeitraums mehr Maschinen zu beliefern. Da dies die Anzahl an Fahrten reduzieren sollte, bestand somit die Möglichkeit, dass ein noch ausstehender Materialbedarf früher bearbeitet wird und somit nicht optimale Entscheidungen in der Bearbeitungsreihenfolge der Transporte toleriert werden können. Zudem können durch eine effizientere Bereitstellung von Materialien insgesamt die Materialflussabrisse auch an den vorverarbeitenden Maschinen reduziert werden. Somit sind diese in der Lage, mit der Vorverarbeitung der Materialien früher zu beginnen, sodass die Dauer der verspäteten Verfügbarkeit zur Bereitstellung an den Umformmaschinen reduziert wird. Verbesserungspotenzial 1 hatte somit gegebenenfalls einen positiven Einfluss auf die Ursachen, die Verbesserungspotenzial 2 und Verbesserungspotenzial 3 zugrunde liegen.

Evaluierung

Durch die Anwendung der Analyse der Ist-Situation erfolgte eine Teilevaluierung der Hypothese H-TFF2 *„Zur Identifikation von Verbesserungspotenzialen der Steuerung der Produktionslogistik eignet sich die Wertstrommethode, da durch diese die Materialflussprozesse hinreichend genau, in angemessener, nachvollziehbarer Weise abgebildet werden, erweitert um die Aufnahme von Variabilität innerhalb der Prozessschritte mithilfe von Fuzzy-Zahlen“.* Als Evaluierungskriterien wurden hierzu die „Abbildbarkeit der Prozesse“ sowie die „Identifikation relevanter Verbesserungspotenziale“ definiert. Im Rahmen des Anwendungsbeispiels konnten die Materialflussprozesse hinreichend genau, in angemessener und nachvollziehbarer Weise abgebildet werden. Dies ist in Abbildung 11-1 dargestellt. Somit kann das erste Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden. Zudem wurden drei Verbesserungspotenziale auf Basis der Modellierung der Prozessschritte und mit Hilfe der Fuzzy-Zahlen ermittelt. Das zweite Evaluierungskriterium fordert jedoch, dass diese Verbesserungspotenziale auch relevant sind. Die Relevanz der Verbesserungspotenziale kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden. Die Relevanz des am höchsten priorisierten Verbesserungspotenzials kann erst nach einem vollständigen Durchlauf der Methode beurteilt werden, nachdem das Verbesserungspotenzial umgesetzt und mit dem vorherigen Stand verglichen wurde. Anzumerken sei an dieser Stelle, dass insbesondere durch die Aufnahme von Kennzahlen mittels Fuzzy-Zahlen Sachverhalte modelliert wurden, die bei einer Modellierung des aktuellen Stands zu einem Zeitpunkt, also nur durch eine entsprechende Kennzahl, nicht abgebildet worden wären. So würde die Möglichkeit bestehen, dass das Verbesserungspotenzial „Bündelung von Transporten“ nicht erfasst worden wäre, da während der Betrachtung eventuell immer nur eine Transportmenge von eins transportiert wurde. Dies hätte zur Folge, dass aus der dann aufgenommenen Kennzahl der Transportmengen nicht ersichtlich gewesen wäre, dass die Möglichkeit der Bündelung von Transporten besteht.

Schritt 2: Auswahl, Modifikation und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren

Anwendung des Schrittes

Im Rahmen der Anwendung des Methodenschrittes „Auswahl, Modifikation und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren“ wurde aufbauend auf dem zuvor identifizierten und ausgewählten Verbesserungspotenzial durch eine Recherche nach bestehenden Steuerungsverfahren zunächst das Bestellbestandsverfahren für die Transporttypen 10, 20 und 40 als Steuerungsverfahren ermittelt und mit den Anforderungen des Prozesses und der Ressourcen abgeglichen, sodass dieses als ein geeignetes Steuerungsverfahren für die Auftragserzeugung identifiziert wurde. Dies wurde schließlich derart modifiziert, dass durch dessen Anwendung eine Reduktion der Materialflussabrisse erreicht werden sollte, indem durch eine Bündelung von Transporten die Transportkapazitäten der Transportressource maximal ausgelastet werden und somit weniger Transporte für die gleiche Anzahl an zu transportierenden Materialien erforderlich sind.

Das Bestellbestandsverfahren erzeugt in seiner Grundform einen Nachfertigungsauftrag, Transportportauftrag oder eine Bestellung mit einer festen Bestellgröße, wenn der vorhandene Bestand in einem Lager oder auf einem Pufferplatz einen definierten Bestellbestand erstmalig erreicht oder unterschreitet [LÖD16, S. 182]. Das Verfahren wurde dahingehend angepasst, dass sowohl der Bestellbestand, also der Zeitpunkt, ab wann ein Transportauftrag erzeugt wird, als auch die Bestellgröße, also wie viel Material bereitgestellt werden soll, dynamisch an die aktuell vorherrschende Situation angepasst werden. Da die für die Bearbeitung eines Produktionsauftrages reservierten Materialien immer nur durch eine Maschine bearbeitet werden, bevor es zu einem Auftragswechsel kommt, hat die Höhe der Bestände auf den zu den Maschinen gehörenden Pufferplätzen keine Auswirkung auf die Durchlaufzeit eines Produktionsauftrages. Somit kann der Bestand dort immer auf das maximal mögliche erhöht werden, sobald dies durch einen

einzigen Transport erfüllbar ist. Dieses Prinzip wurde der Anpassung des Bestellbestandsverfahrens zugrunde gelegt. Dazu wurde das Bestellbestandsverfahren mit Hilfe des in Abbildung 6-2 dargestellten „Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren“ angepasst, sodass bei jeder Entnahme eines Materials vom zur Maschine zugehörigen Pufferplatz zunächst geprüft wird, wie viele der noch zu transportierenden Drahtringe gleichzeitig durch die Transportressource aufgenommen werden können (nachfolgend bezeichnet als maximale Transportmenge) und ob die aktuell verfügbare Kapazität auf dem Pufferplatz für diese Menge ausreichend ist. Die maximale Transportmenge wird durch die Traglast sowie durch die Länge der Hebevorrichtung der Transportressource begrenzt. Die verfügbare Kapazität der Pufferplätze wird nur durch die jeweils verfügbare Abstellfläche begrenzt. Diese Identifikation der limitierenden Faktoren entspricht der *Datensammlung* im in Abbildung 6-2 dargestellten Verbesserungszyklus. Während die Kapazitäten der Transportressource und des Pufferplatzes konstant sind, variieren jedoch die Eigenschaften der zu transportierenden Materialien, wodurch sich der Bestellbestand bei jeder neuen Berechnung verschieben kann. Somit sind diese Informationen entsprechend dynamisch zu erheben (entspricht dem *Datenaustausch* im in Abbildung 6-2 dargestellten Verbesserungszyklus). Ist die auf dem Pufferplatz verfügbare Kapazität ausreichend, um die maximal mögliche Transportmenge abstellen zu können, so wird ein Transportauftrag erzeugt. Andernfalls wird die Erzeugung und anschließende Durchführung des Transportauftrages so lange aufgeschoben, bis die erforderliche Kapazität auf dem Pufferplatz verfügbar ist. Eine Berechnung, ob ein Transportauftrag ausgelöst wird, soll jeweils dann erfolgen, nachdem ein Material vom Pufferplatz entnommen und in die jeweilige Maschine eingesetzt wird oder ein Transportauftrag erfolgreich durchgeführt wurde. Der erste Auslöser der Berechnung erfolgt somit bei einer Erhöhung der verfügbaren Kapazität auf den Pufferplätzen. Der zweite Auslöser, nach erfolgreicher Bearbeitung eines Transportauftrages, ist für den Fall vorgesehen, dass nur eine geringe Transportmenge, die sich gegebenenfalls aus den Restriktionen der Transportressource ergeben hat, abgestellt wurde, die verbleibende Kapazität auf den Pufferplätzen jedoch ausreichen würde, um unter Ausnutzung der maximalen Transportkapazität der Transportressource weiteres Material erfolgreich zu transportieren. Würde dies nicht berücksichtigt werden, so würde die Möglichkeit bestehen, dass bei einer Transportmenge von eins ein neuer Transportauftrag zur Belieferung der Maschine erst dann generiert wird, wenn der Bestand auf dem Puffer auf null sinkt. Dies könnte wiederum dazu führen, dass Transportaufträge sehr kurzfristig vor dem Bedarf des Materials an der Maschine generiert werden und es zu Materialflussabrissen kommt, da die Transportressource zu diesem Zeitpunkt sehr hoch ausgelastet sein könnte. Die Beschreibung der Informationsverarbeitung sowie die Zeitpunkte, zu der diese durchgeführt werden soll, entspricht der *Analyse und Optimierung* des in Abbildung 6-2 dargestellten Verbesserungszyklus. Ein generierter Transportauftrag ist schließlich an die Transportressourcen digital zu übermitteln, sodass auf neue Transportaufträge schnell reagiert werden kann und nicht wie zuvor zyklisch durch die Entnahme von vordefinierten Blättern aus einem zentralen Ablagefach. Dies entspricht dem *Feedback* des Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren. Das angepasste Bestellbestandsverfahren wird im weiteren Verlauf des Anwendungsbeispiels als *sich dynamisch anpassendes Bestellbestandverfahren* bezeichnet.

Durch die Anwendung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* erfolgt die Belieferung der jeweiligen Maschinen nach dem Pull-Prinzip, da Materialien erst dann angefordert werden, wenn auch tatsächlich ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen, um die maximalen Transportkapazitäten der Transportressource auszunutzen. Somit kann dieses für die Transporte der Transporttypen 10, 20 und 40 eingesetzt werden. Für Transporte vom Transporttyp 30 hingegen ist dies nicht möglich, da deren Senke die Pufferplätze im Produktionsbereich sind und diese nicht aktiv Materialien nachfordern. Für

Transportaufträge von diesem Transporttyp ist vorgesehen, dass diese nach dem Push-Prinzip erzeugt werden. So wird ein Transportauftrag immer dann generiert oder angepasst, wenn auf den Pufferplätzen nach den vorverarbeitenden Maschinen ein Drahtring aus der Vorverarbeitung abgestellt wird. Dazu ist vorgesehen, dass zunächst geprüft wird, ob Transportaufträge vom Transporttyp 30 bestehen. Bestehen Transportaufträge dieses Transporttyps, so ist zu prüfen, ob sich das gerade vorverarbeitete Material mit den in den Transportaufträgen zum Transport vorgesehenen Materialien bündeln lässt, ohne dass die Transportkapazitäten der Transportressource überschritten werden. Ist eine Bündelung möglich, so wird der Transportauftrag um das entsprechende Material erweitert. Andernfalls wird ein neuer Transportauftrag generiert, der zunächst nur das vorverarbeitete Material beinhaltet. Als Abstellplatz auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich ist dabei vorgesehen, dass Materialien eines Produktionsauftrages, sofern möglich, auf einem gemeinsamen Pufferplatz abgestellt werden, damit diese bei einem Transport vom Transporttyp 40 mit einer Transportmenge größer eins vereinfacht vom gleichen Pufferplatz gebündelt aufgenommen werden können.

Evaluierung

Durch die Anwendung des Methodenschrittes Auswahl, Modifikation und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren wurde die Hypothese H-TFF3 *„Geeignete Steuerungsmethoden zur Umsetzung der identifizierten Verbesserungspotenziale lassen sich durch einen Abgleich der Funktionalität der Methoden mit Anforderungen der zu produzierenden Produkte, Prozessanforderungen und den zu erreichenden produktionslogistischen Zielen ermitteln. Durch eine systematische Anpassung der Verfahren mit Hilfe des ‚Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren' können, sofern notwendig, die Verfahren angepasst werden, sodass sich diese adaptiv an Prozessänderungen anpassen."* teilevaluiert. Als Evaluierungskriterien hierfür wurden die „Identifikation mindestens eines geeigneten Steuerungsverfahrens" sowie (sofern notwendig) die „Anwendbarkeit des Verbesserungszyklus zur Anpassung der Steuerungsverfahren" definiert. Mit dem Bestellbestandsverfahren wurde ein Steuerungsverfahren identifiziert, durch dessen Einsatz systematisch Transportaufträge generiert werden, sodass dies die Materialflussabrisse reduzieren könnte. Ob sich dieses ausgewählte Steuerungsverfahren jedoch auch eignet, kann an dieser Stelle noch nicht beurteilt werden, sondern erst nach einem vollständigen Durchlauf der Methode. Somit kann das erste Evaluierungskriterium nur teilevaluiert und bestätigt werden, dass mindestens ein Steuerungsverfahren identifiziert wurde. Durch die Anwendung des in Abbildung 6-2 dargestellten „Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren" wurde das Verfahren dahingehend angepasst, dass sich die einzustellenden Parameter (Transportmenge und Bestellbestand) wenn möglich dynamisch an die jeweilige Situation anpassen. Zur Anpassung des Steuerungsverfahrens hat sich der vorgeschlagene Verbesserungszyklus geeignet. Somit kann an dieser Stelle zumindest die Anwendbarkeit des Verbesserungszyklus bestätigt werden, wie es das zweite Evaluierungskriterium der Hypothese fordert. Ob die Anpassungen auch zielführend waren, erfolgt im Rahmen der Evaluierung des umgesetzten Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik.

Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen

Anwendung des Schrittes

Aus dem zuvor angewendeten Schritt 2 „Identifikation, Auswahl und Modifikation von Steuerungsverfahren" wurden die zur Umsetzung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* benötigten Informationen und Informationsflüsse abgeleitet und modelliert (dargestellt in Abbildung 11-2). Dies wird zunächst für Transportaufträge der Transporttypen 10, 20 und 40 beschrieben, da diese nach dem gleichen Prinzip generiert werden, und anschließend gesondert für Transportaufträge vom Transporttyp 30.

Zur Umsetzung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* für die Transporttypen 10, 20 und 40 werden die Längen der rohen Drahtringe (Drahtringe, die sich im Kragarmlager befinden), die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe (Drahtringe auf den Pufferplätzen hinter den vorverarbeitenden Maschinen und auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich) und die entsprechenden Gewichte der Drahtringe als Informationsart *zu verarbeitende Information* benötigt, damit aus diesen die maximal mögliche Transportmenge sowie die verfügbaren Kapazitäten auf den Pufferplätzen berechnet werden können. Diese werden als „Länge roher Drahtring", „Länge vorverarbeiteter Drahtring" sowie „Gewicht Drahtring" in der *Information-Swimlane* modelliert. Die „Länge roher Drahtring" bezieht sich dabei auf die Drahtringe im Kragarmlager sowie auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen. Daher werden diese Informationen über den jeweiligen Lagerorten modelliert und mit diesen verbunden. Die „Länge vorverarbeiteter Drahtring" wird für die Transporte vom Transporttyp 40 benötigt und bezieht sich auf die Drahtringe, die sich auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich befinden. Auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen können, je nach zu bearbeitenden Produktionsauftrag, entweder rohe oder vorverarbeitete Drahtringe gelagert werden. Aus diesem Grund werden über diesen Pufferplätzen beide Informationen modelliert. Dies hat den Vorteil, dass im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität (Schritt 4 der Methode) die Informationen separat betrachtet werden können und sich somit gegebenenfalls unterschiedlich ermittelte Anforderungen modellieren lassen. Sollte sich ergeben, dass diese identisch zu behandeln sind, so können die Informationen auch wieder zusammengefasst werden. Die Information „Gewicht je Drahtring" wird jeweils von den Materialien benötigt, die sich entweder im Kragarmlager oder auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich befinden und somit die Quellen für mögliche Transportaufträge darstellen.

Das Ergebnis des Steuerungsverfahrens ist die bedarfsgerechte Generierung eines Transportauftrages mit der entsprechenden Transportmenge. Diese Information ist an die den Transport durchführenden Prozessschritte zu übermitteln und wird als „Transportmenge" in der *Information-Swimlane* über diesen Prozessschritten als Informationsart *zu verarbeitende Information* modelliert.

Damit im Rahmen der Berechnung der Transportmenge die richtigen Materialien berücksichtigt werden, wird für die Auswahl der zu berücksichtigenden Materialien der aktuelle Produktionsauftrag benötigt, der an den Umformmaschinen beziehungsweise an den vorverarbeitenden Maschinen entweder in Bearbeitung ist oder als nächstes ansteht. Die Information „Produktionsauftrag" wird als Informationsart *Information im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung* modelliert und ist der jeweiligen Maschinen zugeordnet. Zudem benötigen die transportierenden Prozessschritte noch die Informationen über die Quelle und Senke des Transports sowie die genau zu transportierenden Materialien. Auch diese Informationen werden als Informationsart *Information im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung* modelliert. Die Quelle und Senke eines Transportauftrages wird den transportierenden Prozessschritten durch die Information „Quelle/Senke" übermittelt, die zu transportierenden Materialien über die Information „Material". Zur Ermittlung der Quelle und Senke sind jeweils die Lagerplätze, auf denen das zu transportierende Material liegt, sowie der Pufferplatz, der das Material „anfordert", erforderlich. Damit diese Informationen im Rahmen der Generierung von Transportaufträgen zur Verfügung stehen, ist jeweils der Lagerplatz als Information eines jeden Materials in den Pufferbereichen zu erfassen. Dies ist über den jeweiligen Pufferplätzen als Information „Lagerplatz" modelliert.

Zur Berechnung der verfügbaren Lagerkapazität eines Pufferplatzes sowie der maximalen Transportkapazität werden die jeweils limitierenden Faktoren der Ressourcen als Informationen benötigt. Für die Pufferplätze sind dies die individuellen Pufferplatzkapazitäten, für die Transportressourcen sind dies die

Längenkapazität der Hebevorrichtung sowie die Gewichtskapazität, im Sinne der maximalen Traglast. Diese Informationen werden als statisch angenommen, da sich diese nicht dynamisch während des Produktionsablaufs ändern, sondern nur bei baulichen Veränderungen der Pufferkapazitäten oder bei einem Wechsel auf eine andere Transportressource mit abweichenden Transportkapazitäten. Aus diesem Grund werden die individuellen Pufferplatzkapazitäten sowie die Längen- und Gewichtskapazität der Transportressource als *assoziierte Informationen* modelliert. Diese Informationen sind jeweils den entsprechenden Pufferplätzen zugeordnet beziehungsweise den Transportvorgängen, durch die die entsprechenden Materialbewegungen durchgeführt werden.

Die maximal mögliche Transportmenge wird ermittelt, indem jeweils die zu einem Produktionsauftrag gehörenden Materialien so lange aufaddiert werden, wie die Längen- beziehungsweise Gewichtskapazitäten der Transportressource durch die Eigenschaften der aufaddierten Materialien nicht überschritten werden. Das Ergebnis dieser Berechnung wird als Kapazitätsbedarf bezeichnet und im gleichnamigen Informationsbeschreibungsblock angegeben. Die Berechnung erfolgt im davor liegenden Informationsverarbeitungsbaustein gesondert für die Längen sowie für die Gewichte. Die mögliche Transportmenge ist schließlich in die gleiche Einheit zu überführen, in der die verfügbare Kapazität auf den Pufferplätzen ermittelt wird, damit diese miteinander verglichen werden können. Diese Einheit wird im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* festgelegt. Die verfügbare Kapazität auf den Pufferplätzen an den vorverarbeitenden Maschinen und den Umformmaschinen wird ermittelt, indem die dem Pufferplatz zugeordnete Lagerkapazität um die Längen der sich auf diesen befindlichen Materialien reduziert wird. Das Ergebnis der Berechnung der verfügbaren Kapazität auf den Pufferplätzen wird im Informationsbeschreibungsblock „Verfügbare Kapazität“ angegeben. Der Kapazitätsbedarf, der sich aus der maximalen Transportmenge ergibt, wird schließlich mit der verfügbaren Kapazität verglichen. Ist die verfügbare Kapazität größer oder gleich dem Kapazitätsbedarf, so wird ein Transportauftrag erzeugt. In diesem werden die Informationen über die Transportmenge, die zu transportierenden Materialien sowie die Quelle und die Senke des Transportauftrages zusammengefasst und an die den Transport durchführenden Prozessschritte übermittelt.

Da für Transporte vom Transporttyp 30 vorgesehen ist, dass diese laufend, nachdem jeweils ein Drahtring vorverarbeitet wurde, überprüft werden, ob der vorverarbeitete Drahtring zu bereits bestehenden Transportaufträgen ergänzt werden kann, sofern noch ausreichend Kapazität durch die Transportressource für einen kombinierten Transport verfügbar ist, sind für diese Überprüfung sowohl die Gewichte als auch die Längen der Drahtringe, die sich auf den Pufferplätzen nach den vorverarbeitenden Maschinen befinden, erforderlich. Diese sind als Informationsart *zu verarbeitende Information* über den Pufferplätzen modelliert. Zur Berechnung, ob Transportaufträge miteinander kombiniert werden können, sowie zur Durchführung der Transportprozesse, werden von dem den Transport durchführenden Prozessschritt die gleichen Informationen benötigt beziehungsweise an diesen übermittelt, wie es auch für Transporte der Transporttypen 10, 20 und 40 notwendig ist. Eine Ergänzung bei diesem Prozessschritt ist, dass das Steuerungsverfahren die noch ausstehenden Transportaufträge benötigt, um aus den Kapazitätsbedarfen der in diesen zum Transport vorgesehenen Materialien zu ermitteln, ob noch ausreichend Kapazität zur Erweiterung des Transportauftrages verfügbar ist. Diese Information wird als Informationsart *Information im Zusammenhang mit der Steuerungsentscheidung* über dem Prozessschritt modelliert. Zur Ermittlung, wo das zu transportierende Material auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich abgestellt werden kann, werden von diesen die aktuell verfügbaren Kapazitäten benötigt. Diese basieren auf den gleichen Informationen, wie sie auch im Rahmen der Generierung von Transportaufträgen vom Transporttyp 10, 20 und 40 vorgesehen sind. Daher wurden diese erforderlichen Informationen ergänzt, sofern sie nicht bereits zuvor modelliert

wurden, da sie zur Generierung von Transportaufträgen vom Typ 30 notwendig sind. Zum Abgleich, ob die Transportkapazität eines ausstehenden Transportauftrages vom Transporttyp 30 noch ausreichend ist, um diesen um das berücksichtigte Material zu ergänzen, werden die Kapazitäten bestimmt, die nicht durch das bereits eingeplante Material beansprucht werden. Dies erfolgt sowohl für die Längen- als auch für die Gewichtskapazität und wird in den Informationsbeschreibungsblöcken „Verfügbare Kapazität Gewicht“ und „Verfügbare Kapazität Länge“ angegeben. Die Ergebnisse sind die Differenz aus den jeweiligen Kapazitäten der Transportressource sowie der Länge beziehungsweise dem Gewicht der bereits eingeplanten Materialien. Diese Differenzen werden schließlich mit den Kapazitätsbedarfen des zu ergänzenden Materials verglichen. Ist ausreichend Kapazität verfügbar, so wird der Transportauftrag um das Material und zugehörige Informationen ergänzt. Zudem erfolgt dann eine Ermittlung, welcher Pufferplatz im Produktionsbereich noch ausreichend Kapazität zur Verfügung hat, um das Material dort abzustellen. Dazu wird analysiert, ob sich Materialien zu dem Produktionsauftrag bereits auf einem Pufferplatz befinden. Ist dies der Fall, so wird für das Material dieser Pufferplatz ebenfalls als Senke gewählt, damit diese Materialien bei einem Transport vom Transporttyp 40 vereinfacht, ohne einen weiteren Transport zu einem anderen Pufferplatz, gebündelt transportiert werden können. Die Prüfung, ob ein Transportauftrag ergänzt werden kann, erfolgt so lange, bis entweder ein passender Transportauftrag identifiziert wurde oder kein ausstehender Transportauftrag mehr zur Prüfung zur Verfügung steht. Wurde kein Transportauftrag, der eine Ergänzung ermöglicht, identifiziert, so wird für das Material ein neuer Transportauftrag vom Transporttyp 30 erstellt. Dieser wird schließlich den noch ausstehenden Transportaufträgen vom Transporttyp 30 hinzugefügt und im Rahmen einer möglichen Ergänzung des nächsten vorverarbeiteten Materials mitberücksichtigt.

Die zuvor beschriebenen Informationen und Informationsflüsse des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* sind entsprechend der vorgesehenen Notation im erweiterten Wertstromdiagramm in Abbildung 11-2 dargestellt.

Evaluierung

Innerhalb dieses Methodenschrittes wurde die Hypothese H-TFF4.1 *„Die Unterteilung des Wertstromdiagramms mittels Swimlanes in die Bereiche Prozess, Information und Informationsverarbeitung ermöglicht eine strukturierte Modellierung der Informationsflüsse, die durch die eingeführte Symbolik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modelliert werden können, sodass alle bis zur Durchführung von Methodenschritt 3 bekannten und relevanten Aspekte zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik durch eine harmonisierte Informationsqualität abgebildet werden können.“* evaluiert. Dies erfolgte anhand des Kriteriums „Abbildbarkeit der Informationen und Informationsflüsse des Steuerungsverfahrens gegeben“.

Die eingeführte Struktur des Wertstromdiagramms und die erweiterte Symbolik haben sich grundsätzlich für eine angemessene, nachvollziehbare und übersichtliche Modellierung der Informationsflüsse im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse für das Steuerungsverfahren dieses Anwendungsbeispiels geeignet. Somit kann das der Hypothese zugehörige Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden.

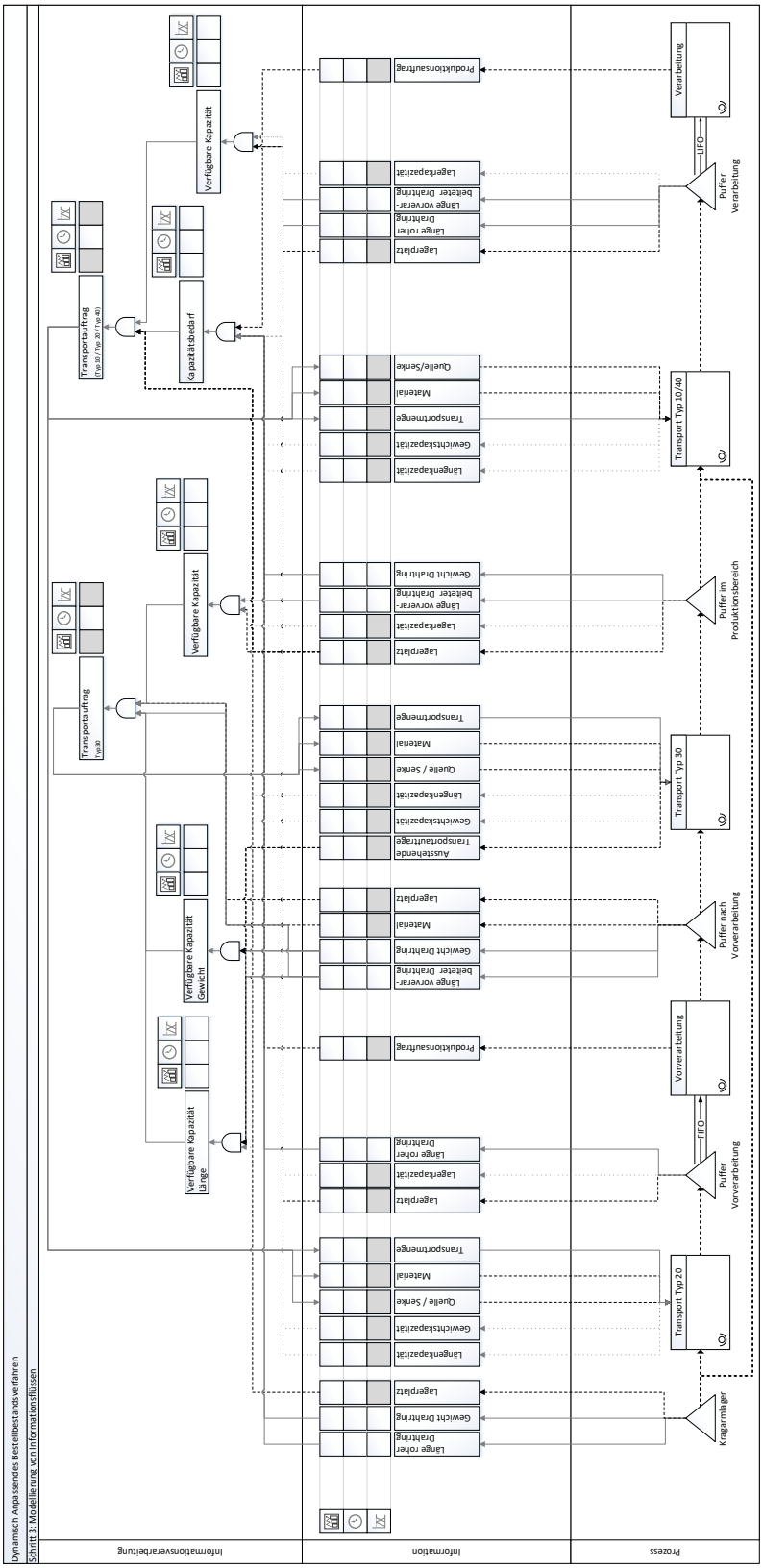

Abbildung 11-2: Um Informationsflüsse zum *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahren* erweitertes Wertstromdiagramm

Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität

Anwendung des Schrittes

Im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität wurden die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* der in Schritt 3 modellierten Informationen und Informationsflüsse analysiert und die jeweiligen Anforderungen an diese abgeleitet.

IQ-Dimension: Granularität

Zur Durchführung der durch das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* generierten Transportaufträge benötigen die Transportprozesse die Informationen über die Quelle(n) und Senke(n) des zu transportierenden Materials sowie die berechnete Transportmenge, wie es in Abbildung 11-2 dargestellt ist. Die Lagerplätze der zu transportierenden Drahtringe sind zwar bereits vor der Implementierung des entwickelten Steuerungsverfahrens bekannt, jedoch werden mehrere Drahtringe gleichzeitig auf einem Lagerplatz gelagert, ohne genaue Kenntnis, in welcher Reihenfolge sie auf diesen stehen. Somit unterscheiden sich die Materialien in ihrer Zugänglichkeit. Um keine Umlagerungsvorgänge zum Erreichen eines speziell vorgegebenen Materials zu generieren, ist eine detaillierte Angabe des spezifischen Drahtrings nicht sinnvoll. Um die Flexibilität zu schaffen, dass immer die am besten zu erreichenden Materialien, die zu einem Produktionsauftrag gehören, aufgenommen werden, ist es daher sinnvoll, dass die zu transportierenden Drahtringe durch die die Transportressourcen bedienenden Personen bestimmt werden. Für die IQ-Dimension *Granularität* bedeutet dies, dass die den Transport durchführenden Prozessschritte die Information über die „Transportmenge“ in der Granularität Stück erhalten sollten, in Verbindung mit den Lagerplätzen in Form der Information „Quelle/Senke“, die angibt, wo die entsprechenden Materialien, idealerweise gebündelt, gefunden beziehungsweise abgestellt werden können. Zusätzlich sollte die Information „Material“ nicht als individuelles Material angegeben werden, sondern stattdessen nur der zugehörige Produktionsauftrag. Die Wahl dieser Granularitätsstufe für das Material wird dadurch begründet, dass die möglichen Effizienzgewinne durch eine minimale Anzahl an Fahrten, die sich bei einer idealen Kombination der insgesamt zu transportierenden Drahtringe eines Produktionsauftrags ergeben würden, durch Suchzeiten und Umlagerungsvorgänge überkompensiert werden könnten, was somit insgesamt zu einer Reduktion der Effizienz der Transportprozesse führt. Eine Ausnahme hiervon bilden die Transportaufträge vom Transporttyp 30. Da bei der Anpassung der Transportaufträge dieses Typs mit individuellen Drahtringen berechnet wird, ob eine Erweiterung der Transportaufträge möglich ist, könnte eine freie Wahl der Drahtringe nur in Abhängigkeit der Produktionsaufträge, die sich auf diesen Pufferplätzen befinden, zu regelmäßigen Kapazitätsüberschreitungen der Transportressource führen. Aus diesem Grund wird für Materialien des Transporttyps 30 die individuelle Kennzeichnung der zu transportierenden Materialien angegeben. Mögliche Aufwände durch Suchzeiten und Umlagerungsvorgänge werden hierbei als gering eingeschätzt, da die Pufferplätze erheblich kleiner sind als die Pufferplätze im Produktionsbereich und im Kragarmlager.

Da für die Transportaufträge der Transporttypen 10, 20 und 40 durch die Anpassung der Granularität des zu transportierenden Materials nicht mehr bekannt ist, in welcher Reihenfolge die Materialien transportiert werden, sind innerhalb des Steuerungsverfahrens jeweils die maximalen Ausprägungen der zu berücksichtigenden Eigenschaften der für den Transport in Frage kommenden Materialien anzunehmen, um Kapazitätsüberschreitungen durch frei gewählte Materialien eines Produktionsauftrages zu vermeiden.

Wie bereits in Schritt 2 und Schritt 3 der Anwendung der Methode beschrieben, basiert die erhoffte Effizienzsteigerung der Transportvorgänge überwiegend auf der Möglichkeit, dass die zu transportierenden Materialien der Produktionsaufträge innerhalb eines Transportvorgangs gebündelt werden können, ohne

dass limitierende Faktoren überschritten werden. Diese limitierenden Faktoren sind das Gewicht und die Längen der Drahtringe. Zur Überprüfung, welche eine geeignete Granularitätsstufe der Informationen für diese Faktoren sind, wurden diese in Form von Fuzzy-Zahlen modelliert.

Das Gewicht der Drahtringe wurde bereits vor der Implementierung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* erhoben und innerhalb des ERP-Systems gespeichert. Auf diese Daten wurde für den Zeitraum zurückgegriffen, der im Rahmen der Analyse der Ist-Situation simuliert wurde. Dieser bildet laut Aussagen der Mitarbeitenden im Produktionssystem einen repräsentativen Zeitraum ab, in dem als repräsentativ anzusehende Materialien verarbeitet wurden. Das Gewicht der Drahtringe als Fuzzy-Zahl $\widetilde{GD}$ wurde auf Basis eines Histogramms der Materialien erstellt (entsprechend der in Schritt 1 der Methode vorgeschlagenen Histogrammkonstruktion). Die modellierte Fuzzy-Zahl sowie das zugrundeliegende Histogramm des Datensatzes sind in Abbildung 11-3 dargestellt.

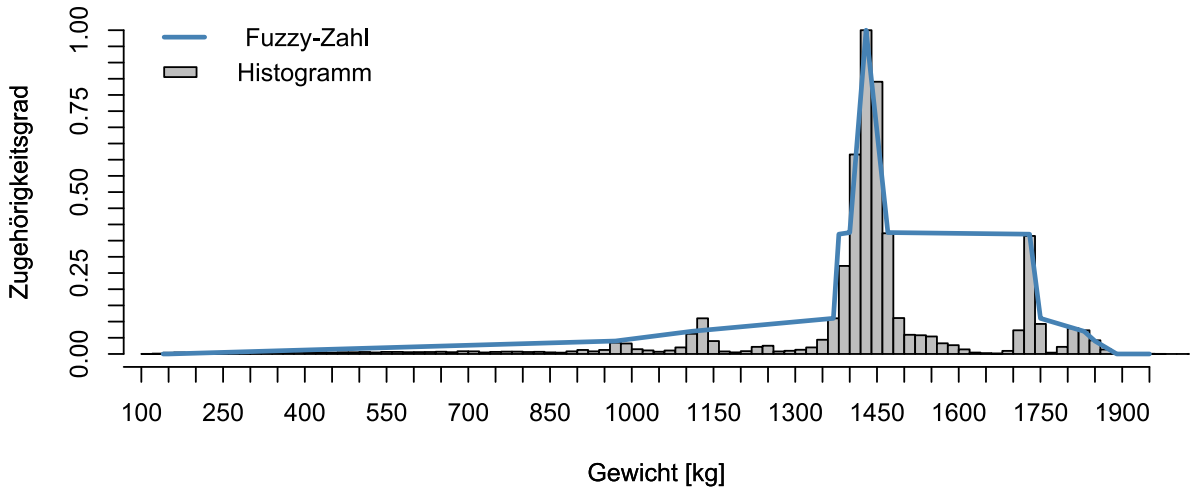

Abbildung 11-3: Modellierte Fuzzy-Zahl der Gewichte der Drahtringe $\widetilde{GD}$

Die Gewichte der Drahtringe konzentrieren sich zwar sehr stark auf den Bereich zwischen 1400 kg und 1500 kg, jedoch gibt es einige Ausreißer, die sich insbesondere bei einem Gewicht von etwa 1725 kg befinden. Würde das Gewicht für alle Materialien im Rahmen des *sich dynamischen anpassenden Bestellbestandsverfahrens* vereinheitlicht und in Form nur einer Gewichtsangabe angegeben werden, so besteht die Gefahr, dass insbesondere die Abweichungen der Ausreißer mit höherem Gewicht vernachlässigt und falsche Steuerungsentscheidungen generiert werden würden, die wiederum die Effizienz der Transportvorgänge vermindern könnten. Aus diesem Grund wurde zunächst als erforderliche Granularitätsstufe für die Information „Gewicht Drahtring“ Kilogramm ausgewählt. Da diese Granularitätsstufe mit der Information „Gewichtskapazität“ der Transportressource übereinstimmen muss, damit ein Vergleich durchführbar ist, wurde diese Information in derselben Granularitätsstufe angegeben. Dies gilt auch für den Informationsbeschreibungsblock „Verfügbare Kapazität Gewicht“, der im Rahmen der Generierung und Anpassung von Transportaufträgen des Transporttyps 30 modelliert wurde.

Die Länge der rohen Drahtringe sowie die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe wurden zum Zeitpunkt der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* dieser Informationen nicht routinemäßig erfasst. Zur Modellierung der jeweiligen Längen in Form von Fuzzy-Zahlen wurde daher ein Datensatz mit über 200 Materialien aufgenommen, der die individuellen Längen sowohl von rohen als auch von vorverarbeiteten Drahtringen beinhaltet. Auf Basis dieses Datensatzes wurden ebenfalls Histogramme erzeugt, die als

Modellierungsgrundlage für Fuzzy-Zahlen verwendet wurden. Die konstruierten Fuzzy-Zahlen mit den zugehörigen Histogrammen wurden schließlich mit den subjektiven Einschätzungen einiger Maschinenbedienenden und den Mitarbeitenden, die den Transport durchführen, abgestimmt, sodass diese als die realen Gegebenheiten repräsentierend angesehen werden können. Die modellierten Fuzzy-Zahlen ($\widetilde{LD}_{Roh}$ der rohen Drahtringe und $\widetilde{LD}_{VV}$ der vorverarbeiteten Drahtringe) mit den zugehörigen Histogrammen sind in Abbildung 11-4 dargestellt.

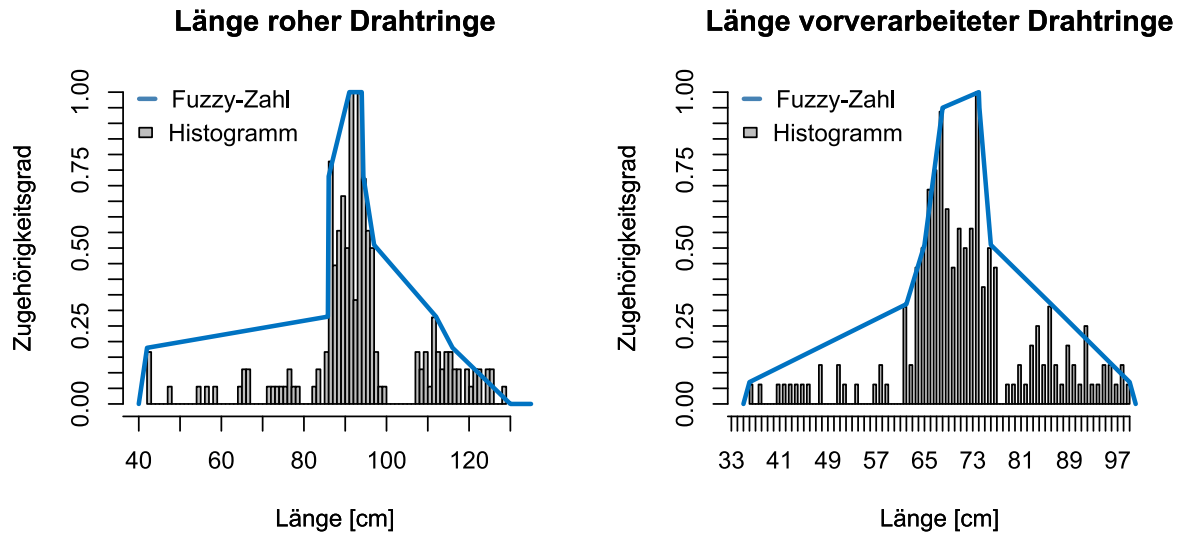

Abbildung 11-4: Modellierte Fuzzy-Zahl der Länge roher ($\widetilde{LD}_{Roh}$ links) und vorverarbeiteter ($\widetilde{LD}_{VV}$ rechts) Drahtringe

Die Länge der Drahtringe korreliert zwar positiv mit dem Gewicht, sodass sich auch die Fuzzy-Zahl der „Länge der rohen Drahtringe“ um einen gewissen Bereich konzertiert. Dieser Bereich wirkt jedoch größer im Vergleich zu den Gewichten. Dies ist plausibel, da die Materialien unterschiedliche Dichten besitzen, die somit das Volumen und dadurch auch die Länge der Drahtringe beeinflussen. Da die Länge der rohen Drahtringe sowohl bei der Berechnung der Transportmenge als auch bei der Berechnung der verfügbaren Kapazitäten auf den Pufferplätzen benötigt werden, erscheint eine Bündelung der Länge in Form nur einer repräsentierenden Kennzahl zunächst nicht sinnvoll, da dadurch, wie bei der Modellierung der Fuzzy-Zahl der Gewichte, mögliche entscheidende Informationen vernachlässigt werden könnten. Aus diesem Grund wurde für die IQ-Dimension *Granularität* die individuelle Länge der rohen Drahtringe in Zentimetern ausgewählt. Die Wahl der Einheit Zentimeter wurde gewählt, da bereits in diesem Schritt definiert wurde, dass eine Aufnahme der Längen in Millimetern zu sehr hohen Aufwänden in der Erfassung führen könnten. Die Längenangabe in Zentimetern wird daher auch immer auf die nächstgrößere Zentimeterangabe gerundet. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass Cluster von Materialien identifiziert werden könnten, für die jeweils eine repräsentative Länge der Materialien angegeben wird. Um zu untersuchen, ob die Bildung von Clustern möglich ist und ob sich für diese repräsentative Längen ermitteln lassen, ist jedoch ein ausreichend umfangreicher Datensatz erforderlich, um diese auch mittels statistischer Methoden abzusichern. Ein solcher Datensatz hat zum Zeitpunkt der Harmonisierung der Informationsqualität nicht vorgelegen und war auch nicht mit einem vertretbaren Aufwand zu ermitteln, sodass diese Möglichkeit zunächst nicht weiterverfolgt wurde. Diese Möglichkeit könnte es zu untersuchen gelten, sobald ein ausreichend großer

Datensatz vorliegen würde, da dies möglichen entstehenden Aufwand der notwendigen Erfassung der Längen der rohen Drahtringe verringern könnte.

Die Fuzzy-Zahl der „Länge der vorverarbeiteten Drahtringe“ wird im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* identisch behandelt, wie die Länge der rohen Materialien. Somit wird für diese Information ebenfalls die individuelle Länge in Zentimetern der Drahtringe als erforderliche Granularitätsstufe ausgewählt. Die Wahl dieser Granularitätsstufe wird dadurch bestärkt, dass sich insbesondere bei vorverarbeiteten Drahtringen die Längen untereinander stark unterscheiden.

Für die Informationen „Längenkapazität“ der Transportressourcen und „Lagerkapazitäten“ der Pufferplätze sowie für die Informationsbeschreibungsblöcke „Kapazitätsbedarf“ und „Verfügbare Kapazität“ ergibt sich aus den zuvor bestimmten Granularitätsstufen, dass diese jeweils auch in Zentimeter angegeben werden müssen, damit diese im Rahmen der Informationsverarbeitung miteinander verglichen werden können. Für den „Kapazitätsbedarf“ ist es notwendig, dass innerhalb des Informationsverarbeitungsbausteins zur Bestimmung des Kapazitätsbedarfs zunächst die maximale Transportmenge anhand der Gewichtseinschränkung und anschließend der zugehörige Längenkapazitätsbedarf in Zentimeter zu dieser Transportmenge, sofern die Transportmenge aufgrund der „Längenkapazität“ der Transportressource nicht geringer ausfallen sollte, ermittelt wird.

Da es sich bei den Informationsbeschreibungsblöcken „Transportauftrag“ um eine bündelnde Information handelt, aus der die relevanten Aspekte wieder gesondert an die transportierenden Prozessschritte übermittelt werden, wird für diese keine gesonderte Ausprägung der IQ-Dimension *Granularität* angegeben.

IQ-Dimension: Frequenz

Zur Bestimmung der IQ-Dimension *Frequenz* der sich dynamisch ändernden und für das Steuerungsverfahren relevanten Informationen wurde zunächst analysiert, wann sich die durch die Informationen repräsentierten realen Sachverhalte ändern.

Die „Längen der rohen Drahtringe“ sowie deren „Gewichte“ werden erstmals im Rahmen der Berücksichtigung im Steuerungsverfahren angegeben, sobald die Drahtringe im Kragarmlager eingelagert werden. Im Rahmen dieser Einlagerung wird auch der „Lagerplatz“ der entsprechenden Drahtringe vergeben. Bei einer „Materialentnahme“ aus dem Kragarmlager im Rahmen der Durchführung eines Transportauftrages ändern sich die Einheiten der zu transportierenden Drahtringe nicht. Da die zu transportierenden Drahtringe jedoch aus dem Kragarmlager entnommen werden, stellt dieses Ereignis ebenfalls eine Änderung des realen Sachverhaltes dar, da die Materialien nicht mehr für Transportaufträge vom Transporttyp 10 oder 20 berücksichtigt werden können. Die Ereignisse „Einlagerung“ sowie „Materialentnahme“ wurden in die entsprechenden Platzhalter für die IQ-Dimension *Frequenz* der Informationen über dem Kragarmlager eingetragen.

Die Änderungen der realen Sachverhalte, die die Eigenschaften (Länge und Gewicht) sowie die zugehörigen „Lagerplätze“ der Drahtringe auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen, den Pufferplätzen im Produktionsbereich und vor den Umformmaschinen angeben, werden nach der gleichen Logik definiert, wie es bereits zu den Informationen der Drahtringe im Kragarmlager beschrieben wurde. So ändern sich die entsprechenden Informationen auf den Pufferplätzen immer dann, wenn entweder ein „Transportauftrag beendet“ und somit das Material dort abgestellt wurde oder das Material „vom Pufferplatz entnommen“ wurde, indem es in eine Maschine eingesetzt oder zur Durchführung eines Transportauftrags vom Transporttyp 40 entnommen wurde.

Die „Länge vorverarbeiteter Drahtringe“ wird während des Vorverarbeitungsprozesses kontinuierlich geändert, steht jedoch erst endgültig fest, nachdem die „Vorverarbeitung abgeschlossen“ wurde. Dies ist auch der Zeitpunkt, zu dem das Material auf den Pufferplätzen nach der Vorverarbeitung abgestellt wird. Aus diesem Grund wurde dies als das Ereignis definiert, zu dem sich der reale Sachverhalt, der durch die Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ repräsentiert wird, auf dem entsprechenden Pufferplatz ändert. Zu diesem Zeitpunkt ist somit auch die Information „Gewicht“ des Materials auf dem Pufferplatz verfügbar, auch wenn dieses nicht durch die Vorverarbeitung verändert wird. Zudem wird auch zu diesem Zeitpunkt, entsprechend der vorher beschriebenen Logik, der „Lagerplatz“ des zu berücksichtigenden Materials angepasst. Eine Reduktion der zu berücksichtigenden Materialien mit ihren Eigenschaften erfolgt analog zu den Pufferplätzen im Produktionsbereich immer dann, wenn ein Transportauftrag, in diesem Fall vom Transporttyp 30, „begonnen“ wird. Die mit der Generierung von Transportaufträgen verbundenen Information „Ausstehende Transportaufträge“ ändert sich immer dann, wenn ein Transportauftrag entweder begonnen wurde und somit nicht mehr im Rahmen einer möglichen Anpassung berücksichtigt werden kann oder sobald ein neuer Transportauftrag vom Transporttyp 30 generiert wurde.

Der Produktionsauftrag, der bestimmt, welche Materialien der Transporttypen 10, 20 und 40 transportiert werden sollen, wird immer dann geändert, wenn an der entsprechenden Maschine mit dem „Produktionsauftrag begonnen“ oder der „Produktionsauftrag beendet“ wurde und somit der nächste Produktionsauftrag ausgewählt wird.

Anhand der identifizierten Ereignisse, zu denen sich die Informationen in den Informationsquellen ändern, konnte nun abgeleitet werden, wann die entsprechenden Zwischengrößen zur Überprüfung der Generierung von Transportaufträgen ermittelt und miteinander verglichen werden sollten. Für Transportaufträge vom Transporttyp 10, 20 und 40 erfolgt eine Berechnung der Informationen „Kapazitätsbedarf“ und „Verfügbare Kapazität“ immer dann, wenn sich der Bestand auf den Pufferplätzen und somit die Summe der Eigenschaften der zu berücksichtigenden Materialien auf den Pufferplätzen ändert. Eine Einlagerung von Materialien im Kragarmlager wurde in diesem Zusammenhang als Ereignis nicht berücksichtigt, da dieses Ereignis in der Regel vor der eigentlichen Freigabe des Produktionsauftrages und damit bereits vor der Generierung von Transportaufträgen stattgefunden hat. Somit werden Transportaufträge, die diese Materialien berücksichtigen, entweder zu den Zeitpunkten der Materialentnahme oder der Beendigung eines Transportauftrages generiert. Demnach werden auch bei diesen Ereignissen die zugehörigen Informationen an die die Transporte durchführenden Prozessschritte übermittelt, sofern die Informationen zu den Änderungen der realen Sachverhalte aktualisiert werden und bei der Informationsübermittlung keine Verzögerungen auftreten.

Da Transportaufträge vom Transporttyp 30 nach dem Push-Prinzip generiert werden, führt eine Änderung des Bestandes auf Pufferplätzen nach den vorverarbeitenden Maschinen nur dann zu einer Generierung beziehungsweise Anpassung von Transportaufträgen, wenn die Vorverarbeitung eines Materials abgeschlossen wurde, also eine Bestandserhöhung auf den entsprechenden Pufferplätzen erfolgte. Zu diesen Zeitpunkten werden die Zwischengrößen „Verfügbare Kapazität Gewicht“ und „Verfügbare Kapazität Länge“ ermittelt und entschieden, ob ein neuer Transportauftrag erzeugt oder ein bereits bestehender Transportauftrag angepasst wird. Dies ist somit auch das Ereignis, zu dem die zum Transportauftrag gehörenden Informationen an den entsprechenden Prozessschritt übermittelt werden, unter Annahme einer unmittelbaren Aktualisierung und Übertragung aller notwendigen Informationen zum Zeitpunkt der Änderung des realen Sachverhalts.

Nachdem die Ereignisse definiert wurden, durch die die durch die Informationen abgebildeten realen Sachverhalte geändert werden, galt es, mögliche Toleranzgrenzen zu ermitteln, ab denen eine vorzeitige oder verspätete Aktualisierung der Information zu möglichen Prozessbeeinträchtigungen führen könnte. Dies erfolgte, indem mögliche Szenarien gebildet wurden, die beschreiben, wie es zu einer Auswirkung kommen kann, die zu negativen Prozessbeeinträchtigungen führt. Zur Ermittlung der Toleranzgrenzen der Transportaufträge vom Transporttyp 10, 20 und 40 wurden zwei Szenarien ermittelt:

- *Szenario F-1: Verfrühte Aktualisierung der belegten Pufferkapazitäten*
  Durch eine verfrühte Reduktion der Information des Lagerbestandes an den vorverarbeitenden Maschinen beziehungsweise an den Umformmaschinen und somit eine verfrühte Reduktion der verfügbaren Kapazität des Pufferplatzes, obwohl der als entnommen vermerkte Drahtring real noch auf dem Pufferplatz steht, besteht die Möglichkeit, dass die Transportressource transportiertes Material nicht abstellen kann, da noch nicht ausreichend Abstellfläche real zur Verfügung steht. Falls dieser Fall eintritt, kann dies zur Folge haben, dass die Transportressource entweder so lange warten muss, bis die benötigten Kapazitäten auch real zur Verfügung stehen, oder die nicht abstellbaren Drahtringe müssen wieder zu ihrem ursprünglichen Ort transportiert werden. In beiden Fällen würde die Transportressource für eine gewisse Zeitspanne nicht zur Verfügung stehen, um andere auf Material wartende Ressourcen zu beliefern, was zu einer Verzögerung der Materialbereitstellung bis hin zu Materialflussabrissen führen könnte.
- *Szenario F-2: Verspätetes Nachfordern von Materialien*
  Durch eine verspätete Aktualisierung der Information, die angibt, dass der letzte Drahtring auf dem Pufferplatz der zugehörigen Maschine entnommen wurde, kann es zu einer zu verspäteten Generierung des Transportauftrages kommen, sodass zum Zeitpunkt der Generierung nicht mehr ausreichend viel Zeit zur Verfügung steht, dass der Transportauftrag rechtzeitig begonnen werden kann, um Materialflussabrisse an den Maschinen zu vermeiden.

Eine verfrühte Aktualisierung der Informationen nach dem Ereignis „Transportauftrag beendet“ ist nicht möglich, da zur Aktualisierung der Information der reale Sachverhalt auch tatsächlich stattgefunden haben muss. Somit ist dadurch eine Prozessbeeinträchtigung ausgeschlossen. Eine verspätete Aktualisierung der Informationen nach dem Ereignis „Transportauftrag beendet“ wird nicht berücksichtigt, da diese Verzögerung durch den Prozessschritt selbst erzeugt werden würde, der auf diese verzögerte Informationsaktualisierung reagieren muss. Zudem würde spätestens bei der Materialentnahme durch die Maschinen ein neuer Transportauftrag generiert werden und die sich daraus ergebende Toleranzgrenze wäre geringer als die der verspäteten Aktualisierung nach der Durchführung eines Transportauftrages.

Zur Berechnung, ab wann mögliche Ineffizienzen, wie sie in *Szenario F-1* beschrieben sind, auftreten würden, ist die Dauer der Transportzeiten zu analysieren. Die Transportzeit zur Durchführung von Transportaufträgen wurde mit Hilfe einer kleinen Stichprobe der realen Transportdauern und auf Basis der Einschätzungen der Mitarbeitenden, die die Transportprozesse durchführen, in Form einer Fuzzy-Zahl modelliert. Diese Transportdauer $\widetilde{TD}$ ist in Abbildung 11-5 dargestellt und umfasst alle zuvor beschriebenen Transporttypen. Innerhalb dieser Transportdauer sind die Zeitanteile beinhaltet, um Material(-ien) zu suchen, aufzunehmen, die notwendige Distanz von der Quelle zur Senke zu überbrücken und auf dem Zielort abzuladen. Die Dreiecke der modellierten Fuzzy-Zahl in Abbildung 11-5 geben relevante Transportdauern mit zugehörigen Zugehörigkeitsgraden an, die bei der Konstruktion der Fuzzy-Zahl durch das Expertenwissen oder Basis der geringen Stichprobe angegeben wurden.

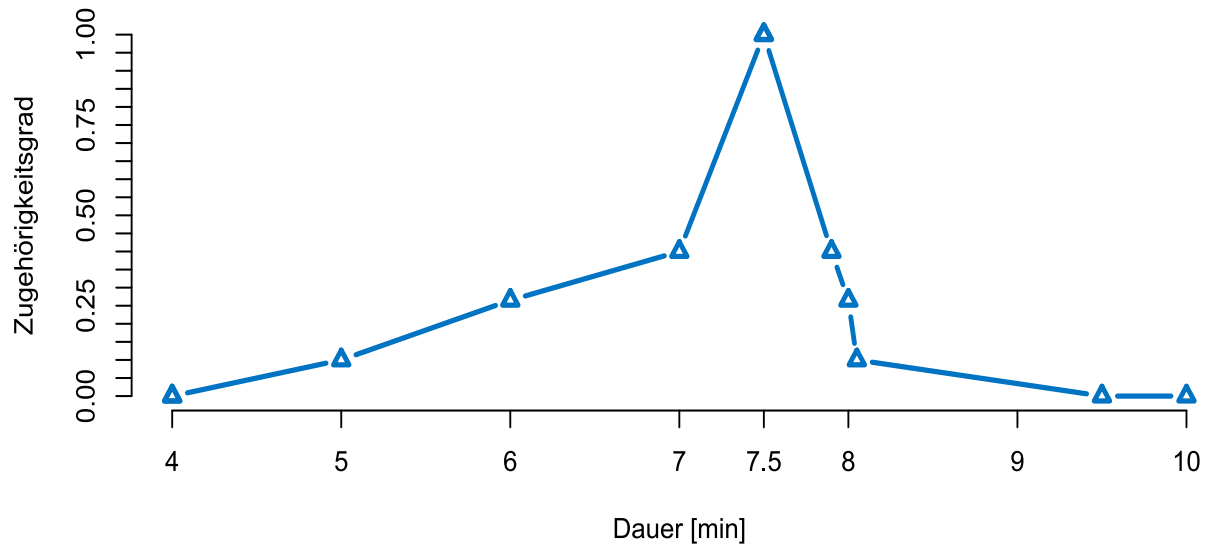

Abbildung 11-5: Als Fuzzy-Zahl modellierte Transportdauer $\widetilde{TD}$

Die Möglichkeit, dass die in *Szenario F-1* beschriebenen Ineffizienzen auftreten, ist erst dann gegeben, wenn die Information gegenüber dem realen Sachverhalt früher als die minimale Transportdauer aktualisiert wird. Aus der als Fuzzy-Zahl modellierten Transportdauer kann abgelesen werden, dass die minimale Transportdauer mehr als 4 Minuten beträgt. Erfolgt eine verfrühte Aktualisierung, die geringer als 4 Minuten vom realen Sachverhalt abweicht, besteht somit nicht die Möglichkeit, dass es zu Prozessbeeinträchtigungen kommt, da trotz einer verfrühten Generierung des Transportauftrags und dessen unmittelbaren Start innerhalb dieser Zeitspanne die erforderlichen Kapazitäten auf dem Pufferplatz durch ein Einsetzen der Materialien in die entsprechende Maschine bereitgestellt wurden. Dies stellt den Toleranzbereich für eine verfrühte Aktualisierung der Informationen dar und wurde in den Informationsbeschreibungsblöcken im Platzhalter der IQ-Dimension *Frequenz* ergänzt.

Zur Berechnung, ab wann mögliche Ineffizienzen, wie sie in *Szenario F-2* beschrieben sind, auftreten würden, ist zu ermitteln, wie viel Zeit $\tilde{T}$ bei rechtzeitiger Generierung eines Transportauftrags mindestens verbleiben würde, bevor es zu einem Materialflussabriss kommt. Dies ergibt sich aus der Verarbeitungszeit der Drahtringe an den vorverarbeitenden Maschinen sowie an den Umformmaschinen $\tilde{V}$ abzüglich der doppelten Transportzeit $\widetilde{TD}$. Die doppelte Transportzeit spiegelt den Fall wider, dass zum Zeitpunkt der Generierung des betrachteten Transportauftrags gerade mit einem anderen Transportauftrag begonnen wurde, der abgearbeitet wird, bevor der den Transport durchführenden Prozessschritt mit der Bearbeitung des gerade generierten Transportauftrages beginnen könnte. Dies ist in Formel 11-1 dargestellt:

$$\tilde{T} = \tilde{V} \ominus 2 \otimes \widetilde{TD}. \qquad 11\text{-}1$$

Die für diese Berechnung benötigte Vorverarbeitungsdauer und Verarbeitungsdauer der Drahtringe wurde ebenfalls jeweils als Fuzzy-Zahl mithilfe eines Histogramms modelliert[12]. Die dazu notwendigen Daten wurden bereits vor der Implementierung des Bestellbestandsverfahrens im ERP-System des Unternehmens durch manuelle Rückmeldungen gespeichert. Der linke Abschnitt der sich aus Formel 11-1 ergebenden

[12] Diese sind im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* in Abbildung A-1 und Abbildung A-2 dargestellt.

Fuzzy-Zahlen sowohl für Transportaufträge vom Transporttyp 10 und 40 sowie vom Transporttyp 20 sind in Abbildung 11-6 jeweils dargestellt.

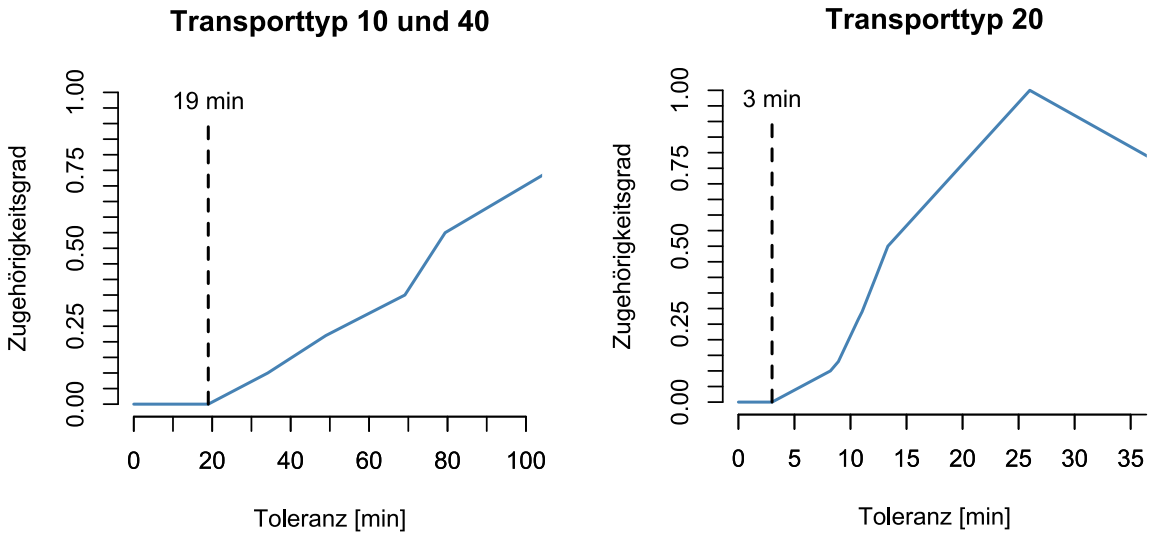

Abbildung 11-6: Berechneter Toleranzbereich $\widetilde{T}$ für verspätete Generierungen von Transportaufträgen

Die Berechnungen der Toleranzbereiche für die IQ-Dimension *Frequenz* und die nachfolgend aufgeführten Berechnungen zur Ermittlung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* wurden jeweils mithilfe der Bibliothek „FuzzyNumbers“ in RStudio durchgeführt.

Anhand der resultierenden Fuzzy-Zahl in Abbildung 11-6 links ist zu erkennen, dass bei einer rechtzeitigen Generierung eines Transportauftrages der Transporttypen 10 und 40 mindestens 19 Minuten Toleranz verfügbar sind, bevor es zu einem Materialflussabriss aufgrund eines verspätet generierten Transportauftrags kommen könnte. Damit diese Toleranzgrenze noch ausreichend ist, bevor es zu einem Materialflussabriss kommt, sind folgende Situationen gleichzeitig notwendig:

- Der Drahtring mit der geringsten Bearbeitungsdauer, die durch die Fuzzy-Zahl modelliert wurde, wird zum Zeitpunkt der Generierung des Transportauftrages auf der Maschine bearbeitet,
- zum Zeitpunkt der Generierung des Transportauftrages befindet sich kein weiteres Material auf dem entsprechenden Pufferplatz der Maschine,
- zum Zeitpunkt der Generierung des Transportauftrages wurde mit dem längst möglichen Transportauftrag begonnen und
- zur Durchführung des neuen Transportauftrags wird die längst mögliche Transportdauer benötigt.

Die Zunahme der möglichen Toleranz durch die jeweiligen Gegebenheiten, die nicht den zuvor aufgeführten Bedingungen entsprechen, sind in der resultierenden Fuzzy-Zahl des Toleranzbereichs mit den entsprechenden Zugehörigkeitsgraden dargestellt.

Für Transportaufträge vom Transporttyp 20 ergab sich, anhand der resultierenden Fuzzy-Zahl des Toleranzbereichs, dargestellt in Abbildung 11-6 rechts, dass mindestens eine Toleranz von 3 Minuten gegeben ist, bevor eine verspätete Generierung eines Transportauftrages zu einer Konsequenz führen könnte. Für diesen Fall müssen die gleichen Situationen eintreten, wie bereits zuvor für die Transportaufträge der Transporttypen 10 und 40 beschrieben. Dieser ermittelte Wert ist als untere Toleranzgrenze plausibel, da die Vorverarbeitungszeiten wesentlich kürzer sind als die Bearbeitungszeiten an den Umformmaschinen. Bereits hier sei anzumerken, dass davon auszugehen ist, dass aufgrund der deutlich größeren

Längenkapazität der Pufferplätze vor den vorverarbeitenden Maschinen, im Vergleich zu den Längenkapazitäten der Pufferplätze an den Umformmaschinen, in der Regel ein neuer Transportauftrag vom Transporttyp 20 immer dann generiert wird, sobald ein Transportauftrag beendet wurde, da vermutlich noch ausreichend Kapazität auf dem Pufferplatz für weiteres Material vorhanden ist. Ein Transportauftrag durch einen Einsatz von Material in eine vorverarbeitende Maschine wird somit nur generiert, wenn entweder der Pufferplatz zu dem Zeitpunkt des Einsatzes komplett gefüllt ist oder zuvor kein freigegebener Produktionsauftrag mehr besteht, sodass der Pufferplatz nicht weiter gefüllt werden kann. Somit besteht zwar die Möglichkeit, dass bei einer verspäteten Generierung von mehr als 3 Minuten ein Materialflussabriss an den vorverarbeitenden Maschinen auftritt, jedoch ist das Auftreten eines solchen Falls sehr unwahrscheinlich.

Für Transportaufträge vom Transporttyp 30 besteht die Möglichkeit, dass durch eine verfrühte Generierung eines Transportauftrags das Material noch nicht physisch vorhanden ist und die Transportressource somit auf die Verfügbarkeit des Materials warten muss. Dies wird als *Szenario F-3* bezeichnet. Damit ein weiterer Transportauftrag generiert werden kann, ist die Länge des vorverarbeiteten Drahtrings zu erfassen. Da diese Information erst zum Zeitpunkt der Bereitstellung des Materials auf dem Pufferplatz zur Verfügung steht, kann eine verfrühte Generierung des Transportauftrages vor diesem Ereignis ausgeschlossen werden.

Eine verspätete Generierung beziehungsweise Aktualisierung eines Transportauftrags vom Transporttyp 30 könnte zur Folge haben, dass ein Transportauftrag dieses Transporttyps erst verspätet gestartet wird, sodass nicht mehr rechtzeitig benötigte Kapazitäten auf den Pufferplätzen nach den vorverarbeitenden Maschinen durch einen Abtransport von Materialien geschaffen werden, um das neu vorverarbeitete Material dort abzustellen. Dadurch könnte es zu einer Blockierung der vorverarbeitenden Maschinen kommen, bis das Material auf dem Pufferplatz abgestellt werden kann. Damit dieser Fall eintritt, ist es erforderlich, dass dies der einzige Transportauftrag wäre, durch den Material von den entsprechenden Pufferplätzen abtransportiert werden würde. Andernfalls würden bereits andere Transportaufträge des Transporttyps bestehen, durch die entsprechende Kapazitäten auf den Pufferplätzen wieder geschaffen werden könnten. Damit der zuerst beschriebene Fall relevant ist, müsste entweder durch diesen einzigen Transportauftrag vorgesehen sein, dass dieser alle sich auf dem Pufferplatz befindenden Materialien transportiert oder der sich ergebende Toleranzbereich derart groß sein, sodass er die Bearbeitungsdauern mehrerer sich noch vor der Vorverarbeitung befindlichen Materialien umfassen würde. Aufgrund der bestehenden Transportkapazitäten der Transportressourcen kann der erste beschriebene Fall ausgeschlossen werden. Der zweite beschriebene Fall würde einen derart großen Toleranzbereich ergeben, dass dieser keine praktische Relevanz besitzt, und wurde daher nicht betrachtet.

Die berechneten Toleranzbereiche für verfrühte und verspätete Aktualisierung der Informationen wurden schließlich in den Platzhaltern der IQ-Dimension *Frequenz* der jeweiligen Informationsbeschreibungsblöcke ergänzt (dargestellt in Abbildung 11-11).

IQ-Dimension Verlässlichkeit

Für die Bestimmung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* wurden die Steuerungsentscheidungen mithilfe der Fuzzy-Zahlen des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* nachgerechnet und die Zugehörigkeitsgrade der Ergebnisse zu den zuvor identifizierten Tipping-Points interpretiert. Dies erfolgte zum einen für die Menge der zu transportierenden Materialien und zum anderen für die Menge der Materialien, die auf den Pufferplätzen gleichzeitig gelagert werden können.

Für die Berechnung der möglichen maximalen Transportmengen durch die Transportressource wurde anhand der modellierten Fuzzy-Zahlen der Kapazitätsbedarf, der in den gleichnamigen Informationsbeschreibungsblöcken angegeben wird, nachgerechnet. Dazu wurden zunächst die Transportkapazitäten der Transportressource (Längenkapazität $\widetilde{TL}$ und Gewichtskapazität $\widetilde{TG}$) als Singleton-Funktion in Form einer Fuzzy-Zahl modelliert. Die Längenkapazität der Transportressource beträgt dabei 150 cm, die Gewichtskapazität 3500 kg. Indem diese Transportkapazitäten durch die als Fuzzy-Zahlen ausgedrückten Ausprägungen der Längen (Rohmaterial $\widetilde{LD}_{Roh}$ und vorverarbeitetes Material $\widetilde{LD}_{VV}$) und Gewichte ($\widetilde{GD}$) der Drahtringe dividiert wurden, wurden jeweils die möglichen Transportmengen ($\widetilde{TM}_G$ durch die Einschränkung des Gewichts der Drahtringe, $\widetilde{TM}_{Roh}$ durch die Einschränkung der Länge der rohen Drahtringe und $\widetilde{TM}_{VV}$ durch die Einschränkung der Länge der vorverarbeiteten Drahtringe) mit Zugehörigkeitsgraden ermittelt. Die jeweiligen Berechnungen sind in den Formeln 11-2 bis 11-4 angegeben.

$$\widetilde{TM}_G = \widetilde{TG} \oslash \widetilde{GD} \qquad 11\text{-}2$$

$$\widetilde{TM}_{Roh} = \widetilde{TL} \oslash \widetilde{LD}_{Roh} \qquad 11\text{-}3$$

$$\widetilde{TM}_{VV} = \widetilde{TL} \oslash \widetilde{LD}_{VV} \qquad 11\text{-}4$$

Als Tipping-Points wurden in diesem Zusammenhang jeweils die ganzen Zahlen identifiziert, da keine Teilmengen von Drahtringen transportierbar sind. Somit findet an diesen Tipping-Points jeweils ein Übergang der durch das Steuerungsverfahren ermittelten möglichen Transportmenge statt. Die Ergebnisse der möglichen Transportmengen für die unterschiedlichen zu berücksichtigenden Faktoren sind in Abbildung 11-7 und Abbildung 11-8 dargestellt.

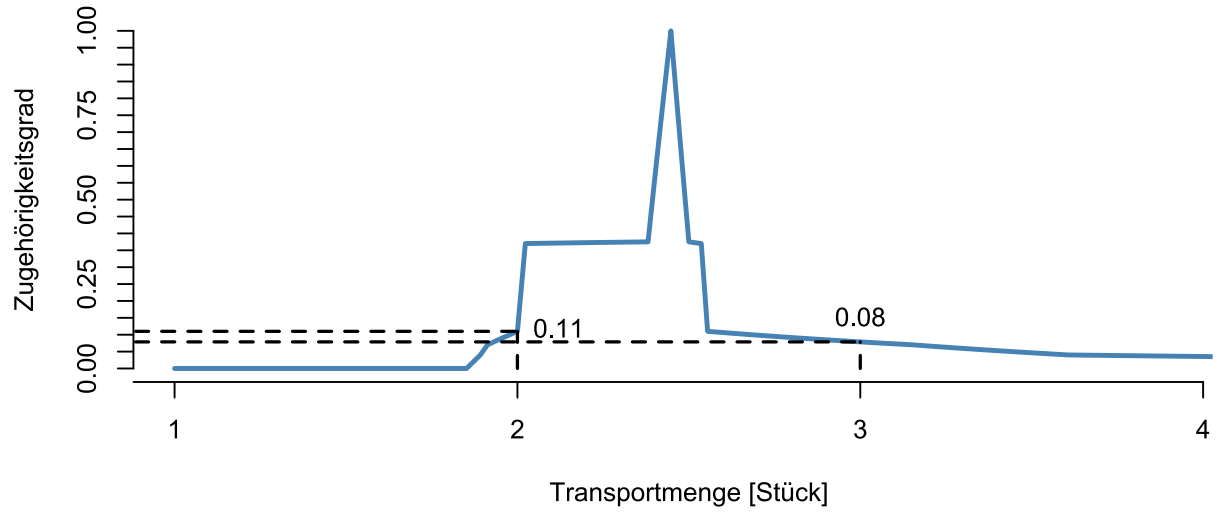

Abbildung 11-7: Transportmenge durch Einschränkung Gewicht $\widetilde{TM}_G$

Die berechnete mögliche maximale Transportmenge, sofern das Gewicht der einzig limitierende Faktor ist, hat den höchsten Zugehörigkeitsgrad zwischen eins und zwei zu transportierenden Materialien. Am identifizierten Tipping-Point bei zwei (Transportmenge geht von einer möglichen zu transportierenden Stückzahl von eins auf zwei über) besitzt die Fuzzy-Zahl einen Zugehörigkeitswert von 0,11. Am weiteren identifizierten Tipping-Point bei drei (Transportmenge geht von einer möglichen zu transportierenden Stückzahl von zwei auf drei über) besitzt die Fuzzy-Zahl einen Zugehörigkeitswert von 0,08. Aus diesen Zugehörigkeitsgraden lässt sich schließen, dass zwar die Möglichkeit besteht, dass eine Entscheidungssituation im Rahmen der Steuerungsentscheidung sich nahe diesen Tipping-Points befindet und somit sensitiv auf

Abweichungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* reagieren könnte, die Möglichkeit dieses Auftretens jedoch *sehr gering* ist. Dies bedeutet, dass selbst bei hohen Abweichungen der Information über das Gewicht der Drahtringe von den realen Gewichten zunächst keine negativen Auswirkungen auf die richtige Berechnung der Transportmenge erwartet werden dürften. Durch die geringen Zugehörigkeitsgrade wird der Information „Gewicht Drahtring“ eine *sehr geringe* Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zugeordnet, auf Basis der in Kapitel 8.2.3 eingeführten Likert-Skala.

Auswirkungen einer falschen Berechnung der zu transportierenden Transportmenge aufgrund einer unzureichenden *Verlässlichkeit* der Informationen wären, dass entweder zu wenig Material für den Transport eingeplant wird als möglich wäre, wenn eine ideale *Verlässlichkeit* der Informationen zur Berechnung zugrunde gelegt worden wäre, oder dass eine zu hohe Transportmenge berechnet wird, die die Transportkapazitäten der Transportressourcen überschreitet. Eine zu gering berechnete Transportmenge hätte zur Folge, dass die Effizienz der Transportprozesse reduziert wird, da für die gleiche Anzahl an zu transportierenden Materialien mehr Transportaufträge erzeugt und durchgeführt werden müssten. Da eine zu hoch berechnete Transportmenge die Transportkapazitäten der Transportressource überschreitet, wäre die Folge, dass das zu viel berechnete und gegebenenfalls schon aufgeladene Material wieder abgestellt werden müsste. Dies würde zu einer Verlängerung der Bearbeitung des Transportauftrages führen. Die dann korrigierte Transportmenge würde jedoch dann der unter idealer Verlässlichkeit berechneten Transportmenge entsprechen. Da das Auftreten dieser Konsequenzen aufgrund einer unzureichenden Verlässlichkeit der Gewichte derart gering ist, wird die als *sehr gering* ermittelte Anforderung nach dieser Betrachtung möglicher Konsequenzen nicht angepasst.

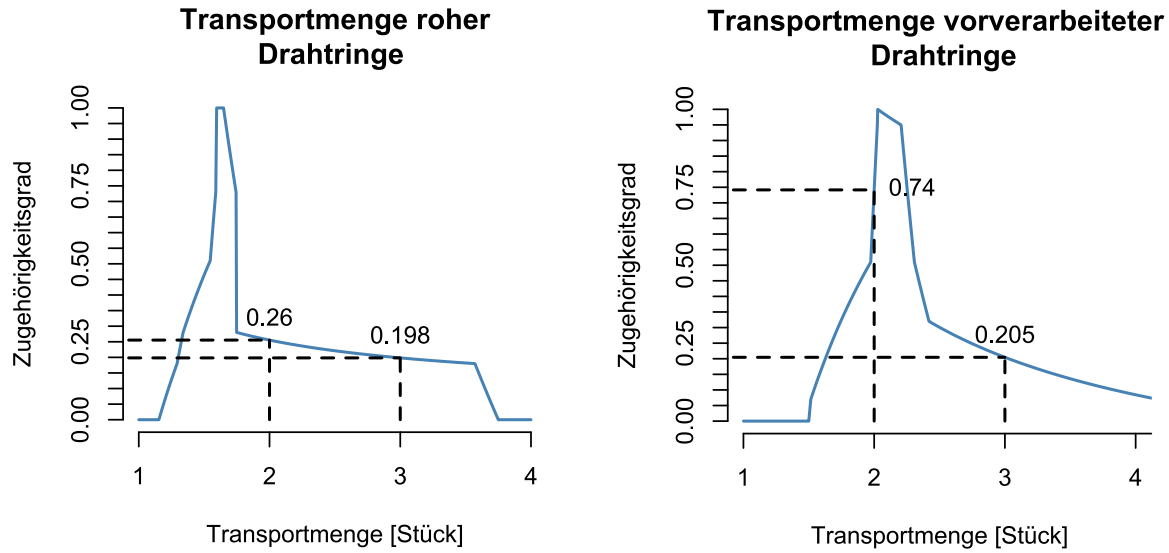

Abbildung 11-8: Transportmenge der Drahtringe durch Einschränkung Länge $\widetilde{TM}_{Roh}$ und $\widetilde{TM}_{VV}$

Durch die Ausprägungen der Länge des Rohmaterials ist es für die die Transportaufträge der Transporttypen 10 und 20 durchführenden Prozessschritte überwiegend nur möglich, einen Drahtring gleichzeitig zu transportieren. Dies drückt sich durch die in Abbildung 11-8 links dargestellten Fuzzy-Zahl $\widetilde{TM}_{Roh}$ anhand des höchsten Zugehörigkeitsgrades zwischen eins und zwei aus. Am Tipping-Point zwei besitzt die Fuzzy-Zahl einen Zugehörigkeitsgrad von 0,26. Durch diesen Zugehörigkeitsgrad wird der Information „Länge roher Drahtringe“ eine *geringe* Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zugeordnet. Zudem kann

aus diesem Ergebnis bereits jetzt geschlossen werden, dass sich für die rohen Drahtringe durch das Einführen des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* vermutlich nur geringe Effizienzsteigerungen ergeben werden, da sich die zu transportierende Menge je Transportvorgang vermutlich nur in wenigen Fällen gegenüber der ursprünglichen Situation (Transportmenge in der Regel eins) verändern wird. Die ermittelte Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* dieser Information gilt zunächst nur für die Materialien, die sich im Kragarmlager befinden. Die Anforderung an die Information über die Länge der rohen Drahtringe auf den Pufferplätzen wird separat im Rahmen der Betrachtung der möglichen Abstellmenge betrachtet. Mögliche Konsequenzen einer falschen Berechnung der Transportmenge sind identisch zu denen, die im Rahmen des limitierenden Faktors Gewicht betrachtet wurden. Daher wurde die Anforderung an die Verlässlichkeit der Information „Länge roher Drahtringe“, die sich im Kragarmlager befinden, nach Einschätzungen der Konsequenzen nicht angepasst.

Im Gegensatz zur Transportmenge der rohen Drahtringe besitzt die Transportmenge vorverarbeiteter Drahtringe $\widetilde{TM}_{VV}$ den höchsten Zugehörigkeitsgrad zwischen eins und zwei zu transportierenden Materialien, dargestellt in Abbildung 11-8 rechts. An den identifizierten Tipping-Points besitzt die berechnete maximale Transportmenge einen Zugehörigkeitsgrad von 0,74. Daraus lässt sich schließen, dass bereits geringe Abweichungen der Information von den realen Gegebenheiten zur Berechnung von Transportmengen führen können, die von der Berechnung bei einer idealen Verlässlichkeit abweichen. Durch den Zugehörigkeitsgrad von 0,74 wird der Information „Kapazitätsbedarf je Material Länge“ der vorverarbeiteten Drahtringe eine *hohe* Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zugeordnet. Aus der berechneten maximalen Transportmenge der vorverarbeiteten Materialien lässt sich schließlich auch ableiten, dass insbesondere durch diese Materialien eine Effizienzsteigerung gegenüber der Ausgangssituation möglich ist, da eine häufige Bündelung von Materialien möglich sein sollte. Auch diese ermittelte Anforderung wurde nach Analyse der Konsequenzen beibehalten.

Da in die modellierte Zwischengröße „Kapazitätsbedarf“ zur Generierung von Transportaufträgen vom Transporttyp 10, 20 und 40 sowohl die Informationen über die Länge der rohen als auch der vorverarbeiteten Drahtringe sowie die Gewichte eingehen, wird hier in den Platzhalter der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* die höchste ermittelte Anforderung eingetragen, in diesem Fall *hoch*.

Zur Berechnung der möglichen Abstellmengen auf den Pufferplätzen an den Maschinen wurde, analog zur Berechnung der Transportmenge, die Abstellmenge sowohl für das Rohmaterial ($\widetilde{AM}_{Roh}$), als auch für vorverarbeitetes Material ($\widetilde{AM}_{VV}$) mit Hilfe der Fuzzy-Zahlen berechnet. Dazu wurde jeweils die Pufferplatzlänge der Puffer der Umformmaschinen ($\tilde{P}_U$) durch die entsprechenden Längen der Drahtringe dividiert. Die Pufferplatzlängen der vorverarbeitenden Maschinen ($\tilde{P}_{VV}$) wurden separat betrachtet, da sich diese in ihren Dimensionen stark von den Pufferplatzlängen der Umformmaschinen unterscheidet, wodurch eine gemeinsame Betrachtung zu einer Verfälschung der Abbildung der Kapazitäten führen würde. Die jeweiligen Berechnungen für die Abstellmengen sind in Formel 11-5 und Formel 11-6 angegeben.

$$\widetilde{AM}_{Roh} = \tilde{P}_U \oslash \widetilde{LD}_{Roh} \text{ beziehungsweise } \widetilde{AM}_{Roh} = \tilde{P}_{VV} \oslash \widetilde{LD}_{Roh} \qquad 11\text{-}5$$

$$\widetilde{AM}_{VV} = \tilde{P}_U \oslash \widetilde{LD}_{VV} \qquad 11\text{-}6$$

Die Ergebnisse der Berechnung der Abstellmengen sind in Abbildung 11-9 und Abbildung 11-10 dargestellt. Dabei wären die Folgen einer fehlerhaft berechneten möglichen Abstellmenge, dass beispielsweise ein Transportauftrag erst später generiert wird, da laut der Information die verfügbare Kapazität noch nicht ausreichend ist, um die berechnete Transportmenge abstellen zu können. Eine weitere Folge einer

fehlerhaft berechneten möglichen Abstellmenge wäre, dass die verfügbare Kapazität laut der Information höher als die real verfügbare Kapazität ist und somit ein Transportauftrag generiert wird, die zu transportierende Anzahl an Materialien jedoch nicht vollständig abgestellt werden kann, sodass der nicht abstellbare Drahtring wieder zu seinem Ursprungsort transportiert werden muss.

Die möglichen Abstellmengen roher Drahtringe auf den Pufferplätzen vor den Umformmaschinen, dargestellt in Abbildung 11-9 links, besitzt den höchsten Zugehörigkeitsgrad zwischen einer Abstellmenge von zwei und drei. Auch bei der Berechnung der Abstellmenge stellen die ganzen Zahlen die Tipping-Points dar, da keine Teilmengen der Drahtringe abgestellt werden können. Aus diesem Grund findet bei einer Überschreitung dieser Tipping-Points eine Änderung am Ergebnis der Steuerungsentscheidung statt. Am Tipping-Point, an dem die Abstellmenge von zwei auf drei übergeht, besitzt die Fuzzy-Zahl der berechneten Abstellmenge einen Zugehörigkeitsgrad von 0,46. Dies stellt den höchsten Wert der identifizierten Tipping-Points dar und wird daher zur Definition der Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* verwendet. Aus dem Zugehörigkeitsgrad von 0,46 ergibt sich eine Anforderung die als *teil-teils* beschrieben wird, wenn man die in Kapitel 8.2.3 eingeführte Likert-Skala anwendet, für die Information „Länge roher Drahtring" der Drahtringe, die sich auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen befinden. Somit ergibt sich für diese Information, sobald sie im Rahmen der Berechnung der Verfügbarkeit der vorhandenen Kapazität auf den Pufferplätzen eingesetzt wird, eine abweichende Anforderung, als diejenige, die im Rahmen der Berechnung der Transportmengen bestimmt wurde.

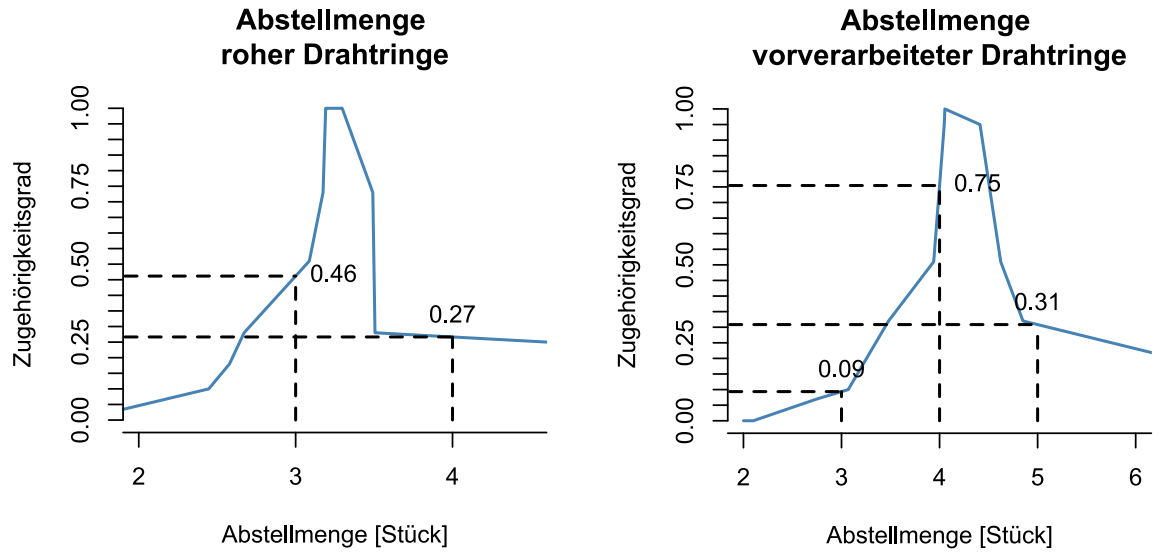

Abbildung 11-9: Abstellmengen ($\widetilde{AM}_{Roh}$ links & $\widetilde{AM}_{VV}$ rechts) der Drahtringe auf Pufferplätzen der Umformmaschinen $\widetilde{P}_U$

Die Auswirkung eines nicht abstellbaren Materials auf den Pufferplätzen mit der Konsequenz, dass dies wieder zum ursprünglichen Ort transportiert werden muss, wird als kritisch betrachtet. Diese als kritische eingestufte Auswirkung erfolgt dadurch, dass durch eine solche Situation zum einen ein nicht wertschöpfender Rücktransport erforderlich ist, der im zeitlichen Umfang etwa einem Transportauftrag entsprechen würde, und zum anderen ein weiterer Transportauftrag generiert wird, um das zurück transportierte Material erneut bereitzustellen. Dadurch würde die Transportressource etwa für die Dauer von zwei Transportaufträgen zusätzlich belegt sein. Damit dieser Fall gegeben ist, muss sich zuvor ausreichend Material auf den Pufferplätzen befinden, um dessen Kapazitäten zu überschreiten. Dies erfolgt nur dann, wenn der Transportauftrag sehr zeitnah nach seiner Generierung bearbeitet werden würde. In diesem Fall wird

davon ausgegangen, dass die Transportprozesse in einem solchen Fall zunächst andere Transportaufträge in der Bearbeitung vorziehen würden, auf deren Senke kein oder sich zumindest weniger Material befindet. Da in dem Fall, dass die berechnete Transportmenge nicht abgestellt werden kann, davon auszugehen ist, dass die verarbeitenden Prozesse eine zusätzliche Belegung der Transportressource tolerieren würden, da sich bereits überall ausreichend Material auf den Puffern befindet, wird trotz der als kritisch angesehenen Auswirkung die ermittelte Anforderung nicht angepasst.

Die berechnete Abstellmenge vorverarbeiteter Drahtringe auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen, als Fuzzy-Zahl, dargestellt in Abbildung 11-9 rechts, wurde identisch zur Abstellmenge roher Drahtringe berechnet. Mit einem Zugehörigkeitsgrad von 0,75 bei einer Abstellmenge von vier Drahtringen wird der Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen die Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit hoch* zugeordnet und geht mit der zuvor im Rahmen der möglichen Transportmenge ermittelten Anforderung einher. Die Auswirkungen eines nicht abstellbaren Materials sind identisch zu denen, die im Rahmen der Abstellmenge der rohen Drahtringe ermittelt wurden. Durch die bereits als *hoch* ermittelte Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* werden die Auswirkungen als ausreichend berücksichtigt angesehen.

Schließlich wurde noch die mögliche Abstellmenge roher Drahtringe auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen modelliert. Das Ergebnis dieser als Fuzzy-Zahl modellierten und in Abbildung 11-10 dargestellten Abstellmenge besitzt, wie die Abstellmenge auf den Pufferplätzen der verarbeitenden Maschinen, einen maximalen Zugehörigkeitsgrad von 0,46 an einem identifizierten Tipping-Point. Damit besitzt die Information „Länge roher Drahtring“ auf den Pufferplätzen der vorverarbeitenden Maschinen die gleiche Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit*, wie bei den Pufferplätzen der Umformmaschinen.

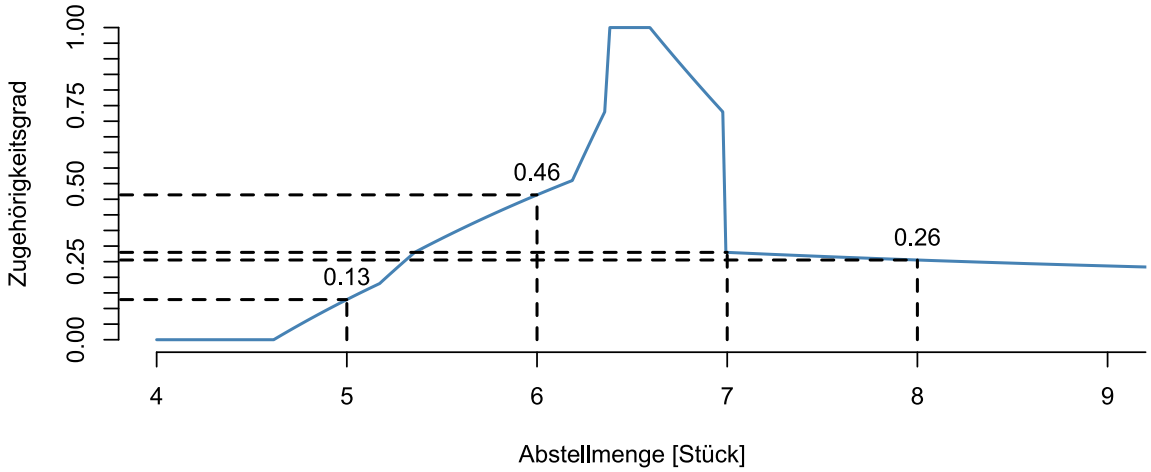

Abbildung 11-10: Abstellmenge roher Drahtringe auf Pufferplätzen zur Vorverarbeitung $\widetilde{P}_{VV}$

Anzumerken sei jedoch, dass der Zugehörigkeitsgrad bei einer Abstellmenge von sieben Materialien aufgrund der Modellierung der Fuzzy-Zahl geringer ist als 0,46, bei leichten Abweichungen der Modellierung würde sich jedoch ein höherer Wert ergeben. So besitzt die Fuzzy-Zahl einen Zugehörigkeitsgrad bei einer Abstellmenge von 6,9 den Wert 0,78. Würde dieser Zugehörigkeitsgrad zur Interpretation der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* zugrunde gelegt werden, so würde sich die Anforderung *hoch* ergeben. Durch diesen großen Unterschied der ermittelten Zugehörigkeitsgrade wird die Anforderung an die IQ-Dimension

Verlässlichkeit der rohen Drahtringe auf den Pufferplätzen der vorverarbeitenden Maschinen auf *hoch* korrigiert.

Da die Zwischengröße „Verfügbare Kapazität“ zur Berechnung der Transportmenge der Transportaufträge vom Transporttyp 10, 20 und 40 sowohl die Länge der rohen Drahtringe als auch die der vorverarbeiteten Drahtringe benötigt (in Abhängigkeit, welcher Produktionsauftrag aktuell oder als nächstes dort bearbeitet wird), wurde in den Platzhalter der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* die höchste ermittelte Anforderung eingetragen, in diesem Fall die Anforderung *hoch.*

Zur Generierung von Transportaufträgen vom Transporttyp 30 wurden die gleichen Anforderungen übernommen, die im Rahmen der Berechnung der Transportmenge ermittelt wurden, da das vorverarbeitete Material durch die gleiche Transportressource transportiert wird.

Zur Ermittlung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Materialien auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich, wenn diese nicht zur Berechnung der Transportmenge verwendet werden, sondern wenn ein Pufferplatz im Produktionsbereich für die Materialien vom Transporttyp 30 identifiziert werden soll, auf dem diese abgestellt werden können, wurden ebenfalls die möglichen Abstellmengen $\widetilde{AM}_{PP}$berechnet. Die zugehörige Berechnung ist in Formel 11-7 angegeben. Die Fuzzy-Zahl $\tilde{P}_{PP}$ gibt in diesem Zusammenhang die Kapazitäten der Pufferplätze im Produktionsbereich an.

$$\widetilde{AM}_{PP} = \tilde{P}_{PP} \oslash \widetilde{LD}_{VV} \qquad 11\text{-}7$$

Die verschiedenen Pufferplätze im Produktionsbereich lassen sich in drei Cluster unterteilen, in denen diese jeweils identische Längen besitzen. Für Cluster 1 und Cluster 2 (angegeben als $\widetilde{AM}_{PP1}$ und $\widetilde{AM}_{PP2}$) ergibt sich eine Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* von *sehr hoch*, für Cluster 3 (angegeben als $\widetilde{AM}_{PP3}$) die Anforderung *hoch*. Die dieser Ermittlung der Anforderungen zugrundeliegenden Interpretationen der als Fuzzy-Zahlen modellierten Abstellmengen sind im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* aufgeführt. Damit Material auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich nicht abgestellt werden kann und zurück zum Ausgangspunkt transportiert werden muss, müssen alle Pufferplätze bereits sehr gefüllt sein. Andernfalls besteht die Möglichkeit, dass das Material auf einem noch angrenzenden Pufferplatz, der ausreichend Kapazität verfügbar haben könnte, abgestellt wird. Da durch diese Möglichkeit die Auswirkung einer falschen Ermittlung des Abstellortes eines Materials als *gering* angesehen wird, wird die Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* auf *hoch* reduziert, sodass sie der bereits ermittelten Anforderung im Rahmen der Berechnung der Transportmenge für Transporte vom Transporttyp 40 entspricht.

Die ermittelten Anforderungen an die IQ-Dimensionen des sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens sind in Abbildung 11-11 in den entsprechenden Platzhaltern der Informationen dargestellt.

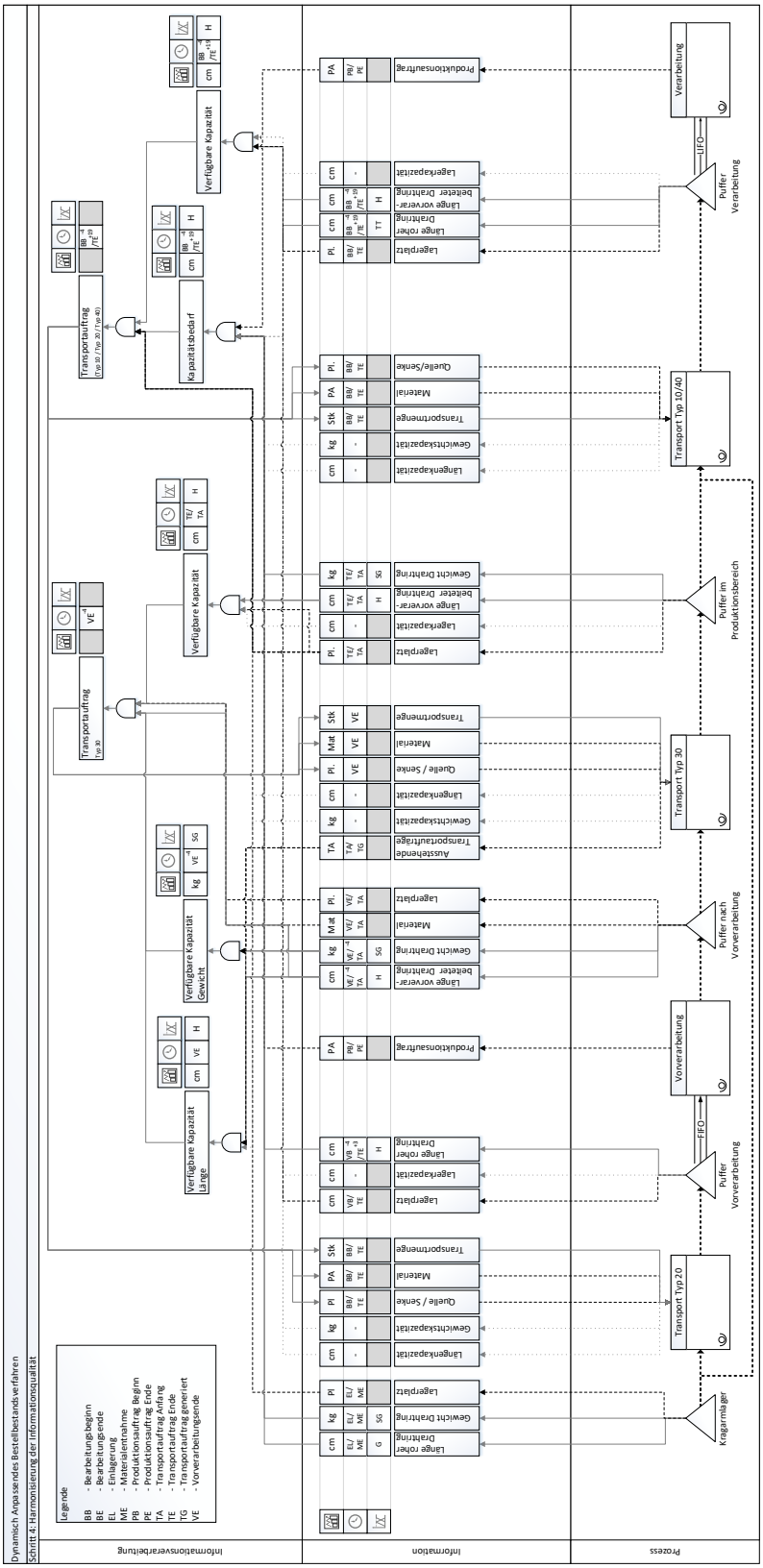

Abbildung 11-11: Um Anforderungen an die IQ-Dimensionen erweitertes Wertstromdiagramm des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens*

Evaluierung

Zur Evaluierung der Hypothese H-TFF5.1 *„Die Anforderungen an die IQ-Dimension Granularität für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch eine Identifikation der wertmaximierenden Granularität der Informationen im direkten Nutzungskontext bestimmen, von der ausgehend, Informationsfluss-aufwärts bis zur Informationsquelle, die Granularitäten der eingehenden Informationen abgeleitet werden können, sodass diese jeweils die zu berücksichtigenden Sachverhalte zur Generierung der Ausgangsinformation ausreichend widerspiegeln."* wurden die wertmaximierenden Granularitätsstufen in den Informationssenken ermittelt. So wurde ermittelt, dass eine zu detaillierte Informationsangabe über das aufzunehmende Material zu möglichen Ineffizienzen in den Prozessschritten führen kann. Ausgehend von den ermittelten Granularitätsstufen der Informationen in den Informationssenken konnten schließlich die Granularitätsstufen der in die Steuerungsentscheidung einfließenden Informationen abgeleitet werden. Dies erfüllt die zuvor aufgestellten Evaluationskriterien „Wertmaximierende Anforderung an die IQ-Dimension *Granularität* in der Informationssenke ermittelt" und „Notwendige Granularität in den Informationsquellen ermittelt" dieser Hypothese.

Zur Evaluierung der zuvor ermittelten Ergebnisse in Bezug auf die Harmonisierung der Informationsqualität der IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* wurde ein Simulationsmodell entwickelt, anhand dessen sich die Auswirkungen von Abweichungen der Informationsqualität ermitteln lassen. Dieses Simulationsmodell wurde derart gestaltet, dass die im Modell ablaufenden Prozesse auf Basis von Daten ablaufen, die das reale Verhalten widerspiegeln, die Steuerungsentscheidungen jedoch auf Basis von Informationen getroffen werden, deren Qualität in den IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* variiert werden können. Diese Trennung der Datengrundlage in Daten, die das Verhalten der realen Prozesse abbilden, und Daten, die als Informationsgrundlage für die Steuerungsentscheidungen dienen, ermöglicht eine detaillierte Analyse von Änderungen der Informationsqualität sowie deren Auswirkungen auf die Effizienz der Prozesse. Das in diesem Zusammenhang verwendete Simulationsprogramm FlexSim® eignet sich, um die notwendigen Strukturen und Prozesse des betrachteten Ausschnitts des Produktionssystems zu modellieren, und bietet gleichzeitig ausreichende Funktionalitäten zur statistischen Erfassung und Auswertung relevanter zu erfassender Kennzahlen [MDB14, S. 223]. Die Analyse der Auswirkungen unterschiedlicher Ausprägungen der Informationsqualität wurde über einen Zeitraum von mehr als vier Monaten auf Basis historischer Daten simuliert. Die ermittelten Simulationsergebnisse werden nachfolgend im Rahmen der Evaluierung der IQ-Dimensionen beschrieben und sind im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* detailliert aufgeführt.

Zur Evaluierung der Hypothese H-TFF5.2: *„Die Anforderungen an die IQ-Dimension Frequenz für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch die Ermittlung der Zeitpunkte der Änderungen des jeweiligen realen Sachverhalts in der geforderten Granularitätsstufe bestimmen, von denen ausgehend, durch Berücksichtigung der Prozesscharakteristika, durch Interpretation von berechneten Fuzzy-Zahlen mögliche zeitliche Toleranzen bis zur Reaktion auf die Änderung des realen Sachverhalts ermittelt werden können."* wurde für die Erstellung des Simulationsmodells das erstellte Wertstromdiagramm zunächst als Konzeptmodell und im Rahmen der Implementierung soweit wie möglich als formalisiertes Modell verwendet, wie es in der Durchführung einer Simulationsstudie nach VDI 3633-1 [VDI 3633-1, S. 19] vorgesehen ist. Das erstellte Simulationsmodell auf Basis des Wertstromdiagramms spiegelte das Verhalten der realen Abläufe im modellierten Produktionssystem ausreichend genau wider. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Zeitpunkte, zu denen sich die durch die Informationen abgebildeten realen Sachverhalte ändern, als korrekt identifiziert wurden. Die im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* ermittelten tolerierbaren zeitlichen Abweichungen zur Generierung von Transportaufträgen wurden evaluiert,

indem die Transportaufträge jeweils verfrüht beziehungsweise verspätet generiert wurden. Die Häufigkeit, wie oft es zu einem Rücktransport (verfrühte Generierung von Transportaufträgen) sowie die Häufigkeit, wie oft es zu einem Materialflussabriss (verspätete Generierung von Transportaufträgen, sodass zum Zeitpunkt der Generierung nicht mehr ausreichend Zeit zu dessen Durchführung verblieb) kam, sind in Abbildung 11-12 dargestellt.

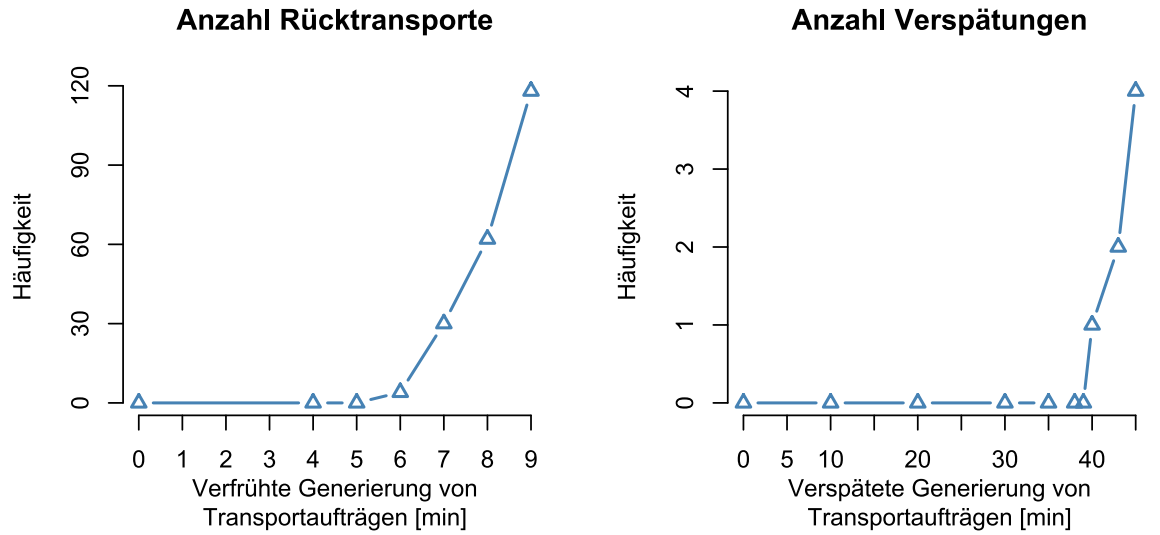

Abbildung 11-12: Auswirkungen verfrühter (link) und verspäteter (rechts) Generierungen von Transportaufträgen

Anhand von Abbildung 11-12 links ist zu erkennen, dass erst ab einer verfrühten Generierung von Transportaufträgen von sechs Minuten der Effekt auftritt, dass die in den Transportaufträgen vorgesehenen Materialien nicht auf den Pufferplätzen abgestellt werden konnten, da die für diese Materialien benötigten realen Kapazitäten noch nicht verfügbar waren. Dies bestätigt, dass bei einer verfrühten Generierung von Transportaufträgen, die kleiner oder gleich vier Minuten beträgt, keine der im Szenario berücksichtigten Auswirkungen auftreten dürften. Dass erst bei sechs Minuten Effekte zu beobachten sind und dies von der ermittelten Toleranzgrenze abweicht, ist dem geschuldet, dass bei der berechneten Toleranzgrenze mit dem Transportauftrag unmittelbar zum Zeitpunkt der Generierung begonnen werden muss und zur Durchführung die geringste Transportdauer, die im Rahmen der als Transportdauer modellierten Fuzzy-Zahl angegeben ist, benötigt wird. Dieser Fall war nicht gegeben.

In Abbildung 11-12 rechts ist die Anzahl an Verspätungen, in Abhängigkeit der verzögerten Generierung eines Transportauftrages vom Transporttyp 10 oder 40 durch eine Materialentnahme der Maschinenbedienenden an den Umformmaschinen dargestellt. Zur Ermittlung dieser Kennzahlen wurden die verbleibenden Reichweiten der Transportaufträge zum Zeitpunkt der verspäteten Generierung ermittelt, um die Transportdauer zur Durchführung dieses Transportauftrages und um die verbleibende Dauer zur Durchführung des Transportauftrages reduziert, der während der Generierung des verspäteten Transportauftrages bearbeitet wurde und dadurch eine mögliche unmittelbare Reaktion auf den erstellten Transportauftrag verzögerte. War die verbleibende Reichweite negativ, so kam es zu einem Materialflussabriss, der mit in der dargestellten Kennzahl berücksichtigt wurde. Ausgenommen von dieser Kennzahl sind entstandene Materialflussabrisse, die nicht auf eine verzögerte Generierung des

Transportauftrages zurückzuführen waren, sondern durch eine Überlastung der Transportprozesse. Eine Abweichung tritt demnach erst bei einer verspäteten Generierung der Transportaufträge von 40 Minuten auf. Dies bestätigt die berechnete Toleranzgrenze von 19 Minuten, bis zu der keine Auswirkungen durch eine verspätete Generierung von Transportaufträgen auftreten dürften. Das Eintreten von Verspätungen liegt jedoch bei einer Verzögerung, die mehr als doppelt so hoch ist, wie die ermittelte Toleranzgrenze. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass für diesen Fall die verschiedenen für das entwickelte Szenario eintretenden Bedingungen zeitgleich eintreten müssen. Da die Bearbeitungsdauer mit der Kapazität der Drahtringe positiv korreliert und diese wiederum mit der Länge der Drahtringe positiv korreliert, war zudem zu beobachten, dass insbesondere bei Drahtringen mit einer geringen Bearbeitungsdauer selten der Fall eintritt, dass erst bei einer Materialentnahme dieser Drahtringe ein Transportauftrag generiert wird. Vielmehr erfolgt eine Generierung der Transportaufträge in diesen Fällen bereits früher, da aufgrund ihrer oftmals geringeren Länge, bereits häufig schon frühzeitig ausreichend Kapazität auf den Pufferplätzen vorhanden ist, um die maximale Transportmenge abzsutellen. Durch diese Zusammenhänge, die im Rahmen der Szenarienbildung nicht berücksichtigt wurden, kann die hohe Abweichung der berechneten Toleranzgrenze und ermittelte Dauer bis zum Auftreten eines Effektes begründet und die ermittelte Kennzahl zur Evaluierung als plausibel angenommen werden.

Für Transportaufträge vom Transporttyp 20 wurden keine Auswirkungen durch eine verspätete Generierung von Transportaufträgen durch die Maschinenbedienenden der vorverarbeitenden Maschinen ermittelt. Dies ist dadurch zu begründen, dass, wie bereits im Rahmen der Szenariobildung beschrieben, die Pufferplätze der vorverarbeitenden Maschinen eine deutlich höhere Kapazität für Materialien besitzen im Vergleich zu den Pufferplätzen der Umformmaschinen. Dadurch wird häufig direkt nach Durchführung eines Transportauftrages bereits durch das Ereignis „Transportauftrag Ende“ ein weiterer Transportauftrag generiert (ohne zeitliche Verzögerung), da häufig noch ausreichend Kapazitäten zur Verfügung stehen, um die nächste als maximal berechnete Transportmenge (in der Regel von eins, da es sich um rohe Drahtringe handelt) abzustellen. Die Möglichkeit, dass ein Transportauftrag verspätetet generiert werden konnte, indem dies durch eine „Entnahme des Materials“ der vorverarbeitenden Maschinen ausgelöst wurde, trat somit nur dann ein, wenn sich bereits eine Vielzahl an Materialien auf dem Pufferplatz befand. Somit war die aggregierte Bearbeitungsdauer der sich auf dem Pufferplatz befindlichen Drahtringe entsprechend hoch, sodass dies eine sehr lange Verzögerung der Generierung von Transportaufträgen ermöglicht, bevor es zu einem Materialflussabriss kommen konnte. Dennoch bestätigt das Ausbleiben von Effekten die berechnete Toleranzgrenze, da bei einer verzögerten Generierung dieser Transportaufträge keine Auswirkungen aufgetreten sind.

Da unterhalb der berechneten Tolerenzgrenzen keine der in den entwickelten Szenarien auftretenden Effekte im Rahmen der Simulationsstudie zu beobachten waren, wird das Evaluierungskriterium zur Hypothese H-TFF5.2 als erfüllt angesehen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass das in Hypothese H-TFF5.2 beschriebene Vorgehen sich eignet, um zeitliche Abweichungen ermitteln zu können.

Zur Evaluierung der Hypothese H-TFF5.3 *„Die Anforderungen an die IQ-Dimension Verlässlichkeit für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch eine Berechnung kritischer Steuerungsentscheidungen und eine Interpretation der Ergebnisse im Zusammenhang mit ihrem Zugehörigkeitsgrad zu sogenannten Tipping-Points ermitteln in Verbindung mit einer Interpretation möglicher Auswirkungen.“* wurden die Auswirkungen möglicher Abweichungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen der Informationsart *zu verarbeitende Information* mittels verschiedener Simulationsläufe analysiert. Im Rahmen der Simulationsläufe wurden die Auswirkungen der Ausprägungen der *Verlässlichkeit* jeder Information auf drei

Stufen analysiert. Die Ergebnisse dieser Auswirkungen sind in Abbildung 11-13 dargestellt. Als Kennzahl zur Evaluierung der Auswirkungen wurde die mittlere Auslastung der Umformmaschinen ausgewählt, da sich alle möglichen Ineffizienzen in den vorgelagerten Prozessschritten schließlich auf diese Kennzahl auswirken. Die mittlere Auslastung der Umformmaschinen gibt in diesem Fall die Zeit an, in der sich die Maschinen aufgrund von Materialflussabrissen in ungeplanten Stillständen befunden haben. Stillstände der Umformmaschinen, beispielsweise durch einen Verschleiß der Werkzeuge, sind somit in dieser Kennzahl nicht berücksichtigt, sodass ausschließlich die Effekte der Transporteffizienz abgebildet werden. Eine detaillierte Auswertung der einzelnen Effekte anhand detaillierterer Kennzahlen, die spezifisch auf die Effekte eingehen, die schließlich die mittlere Auslastung der Umformmaschinen beeinflussen, ist im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* aufgeführt und diskutiert.

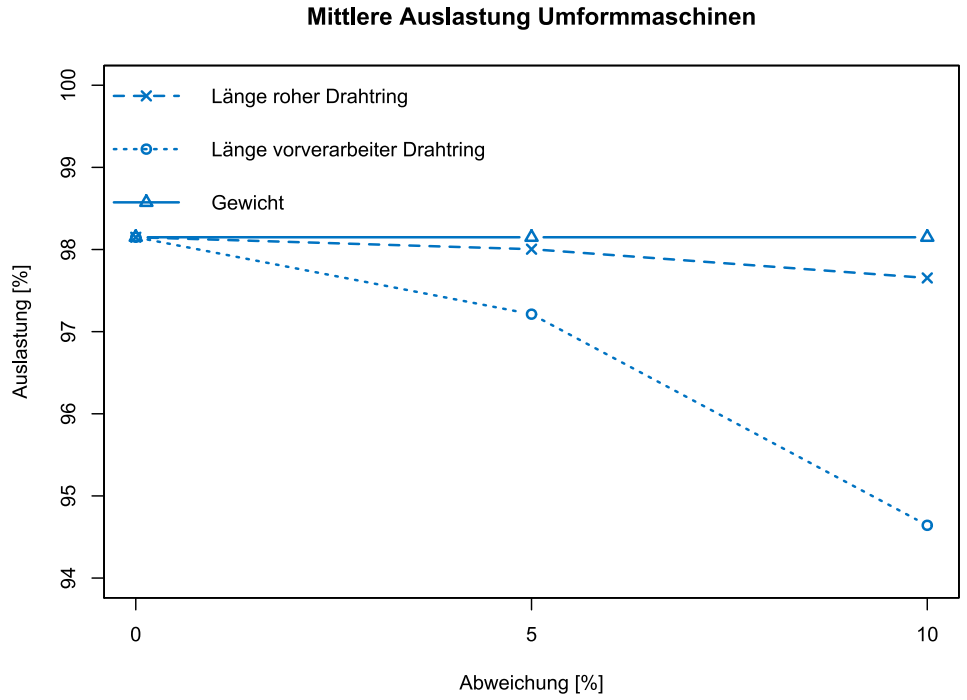

Abbildung 11-13: Effektdiagramm - Mittlere Auslastung Umformmaschinen

Zur Analyse der Auswirkungen von Beeinträchtigungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* wurden die Informationen „Länge roher Drahtring“, „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ sowie „Gewicht Drahtring“ auf drei Faktorstufen variiert, sodass diese in unterschiedlichen Ausprägungen von den realen Werten abweichen. Faktorstufe 1 spiegelt dabei keine Abweichung wider, Faktorstufe 2 eine Abweichung von bis zu 5 % und Faktorstufe 3 eine Abweichung von bis zu 10 % vom realen Wert. Die Abweichungen können dabei sowohl in positive (realer Wert wird überschätzt) als auch in negative (realer Wert wird unterschätzt) Richtung auftreten. Die Auslastungen der Umformmaschinen geben jeweils an, wie hoch der Zeitanteil im Simulationszeitraum war, zu dem diese nicht auf Material warten mussten und daher Material verarbeiteten oder sich im geplanten Stillstand befanden.

Wie anhand von Abbildung 11-13 zu erkennen ist, hat eine Abweichung der Information „Gewicht Drahtring“ keine Auswirkungen auf die mittlere Auslastung der Maschinen. Dies geht mit den definierten Anforderungen an diese Information einher, die als *sehr gering* bestimmt wurde.

Die Auswirkungen durch eine Beeinträchtigung der Information „Länge roher Drahtring“ belaufen sich bei einer Abweichung von bis zu 10 % auf eine Reduktion von ca. 0,5 Prozentpunkte der Auslastung der

Umformmaschinen. Dies ist zum Großteil auf Rücktransporte zurückzuführen, da die durch die Information berechnete zur Verfügung stehende Kapazität auf den Pufferplätzen nicht ausreichte, um die ermittelte Transportmenge dort abzustellen. Dieser Effekt tritt überwiegend bei Transporten vom Transporttyp 20 auf und nur zu sehr geringen Anteilen bei Transporten vom Transporttyp 10. Dies bestätigt die als *hoch* eingestufte Anforderung für die Länge der rohen Drahtringe auf den Pufferplätzen der vorverarbeitenden Maschinen sowie die geringere Anforderung an die Information auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen, die als *teils-teils* bestimmt wurde. Die gering auftretenden Effekte durch Beeinträchtigungen der Transportmenge stimmen ebenfalls mit der Anforderungserhebung überein, da für diese Berechnung die Anforderung als *gering* bestimmt wurde.

Die Auswirkungen durch eine Beeinträchtigung der Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ hat in der maximalen Abweichung einen negativen Effekt von etwa 3,5 Prozentpunkte auf die mittlere Auslastung der Umformmaschinen. Dieser recht deutliche Effekt ist überwiegend auf eine geringere mittlere Transportmenge zurückzuführen, im Vergleich zu einer idealen Informationsqualität (Faktorstufe 1). Dieser ermittelte Effekt bestätigt die für die Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ ermittelte Anforderung, die im Rahmen der Berechnung der Transportmenge als *hoch* definiert wurde. Erforderliche Rücktransporte, die daraus resultieren, dass Material auf den Pufferplätzen nicht abgestellt werden konnten, treten hingegen kaum auf. Somit wird für diesen Anwendungsfall die Anforderung überschätzt. Diese Überschätzung ist auf eine Wechselwirkung mit der Transportmenge zurückzuführen. So wird durch eine zu hoch berechnete Transportmenge, die die Transportkapazität der Transportressource übersteigt, die zu transportierende Menge häufig reduziert. Da das Abstellen der eigentlich höheren Transportmenge jedoch auf dem entsprechenden Pufferplatz vorgesehen war, wird durch eine geringere als vorgesehene Transportmenge die Möglichkeit reduziert, dass die Pufferplatzkapazitäten vollständig ausgeschöpft werden. Dies ist im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* anhand detaillierterer Simulationsergebnisse aufgezeigt.

Mit Ausnahme einer Anforderung, deren Überschätzung im Anhang diskutiert wurde, konnten mit der in der Hypothese H-TFF5.3 formulierten Vorgehensweise Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ermittelt werden, die mit den zu beobachtenden Effekten der Anforderungsermittlung zugrundeliegenden Szenarien einhergeht. Dies erfüllt das für Hypothese H-TFF5.3 definierte Evaluierungskriterium und bestätigt somit die in Hypothese H-TFF5.3 vorgeschlagene Vorgehensweise zur Ermittlung von Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit*.

Schritt 5: Detailplanung und Implementierung

Anwendung des Schrittes

Auf Basis der vorherigen Schritte wurde im Rahmen von Schritt 5 die Detailplanung und Implementierung des einzusetzenden Steuerungsverfahren abgeleitet und modelliert.

Die Länge der rohen Drahtringe im Kragarmlager besitzen zwar eine hohe Relevanz zur Berechnung der Transportmengen, besitzen jedoch eine *geringe* Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit*. Wie im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität ermittelt wurde, besteht häufig nicht die Möglichkeit, den Transport roher Drahtringe in einem Transportauftrag zu bündeln. Da diese Länge für jedes Material benötigt wird, unabhängig ob eine Vorverarbeitung erforderlich ist oder nicht, ist diese Information sehr häufig zu erfassen. Daraus würden sich bei einer manuellen Erfassung hohe Prozesskosten ergeben, da die Mitarbeitenden während der Aufnahme der Länge keine alternativen Tätigkeiten durchführen könnten. Um diese möglichen Prozesskosten so gering wie möglich zu halten, wird den rohen Drahtringen ein fixer Wert, der deren mittlere Länge repräsentiert, automatisch bei der Einlagerung zugeordnet. Um

trotzdem die Möglichkeit der Bündelung von Transporten beizubehalten und fehlerhafte Berechnungen der Transportmenge zu reduzieren, sind die Mitarbeitenden dazu angehalten, diesen fixen Wert durch ein manuelles Nachmessen abzuändern, sofern die Länge des Drahtrings deutlich unter der durchschnittlichen Länge liegt oder diese deutlich übersteigt. Wann die Länge eines rohen Drahtrings deutlich unter oder über der durchschnittlichen Länge der Drahtringe liegt, ist dabei subjektiv durch die Mitarbeitenden zu entscheiden. Sofern keine Korrektur des fixen Wertes durch die Mitarbeitenden vorgenommen wird, kann durch diese Vorgehensweise die angegebene individuelle Länge der rohen Drahtringe häufig recht deutlich von der jeweiligen realen Länge abweichen.

Über die bereits vorhandene individuelle Kennung der Drahtringe, ist es nicht erforderlich, dass die Länge nochmals an den nachfolgenden Pufferplätzen erfasst wird, da über die Kennung auf die entsprechende Länge referenziert werden kann. Für diese Art der Erfassung der Längen der sich dort befindenden Materialen wurde sich im Rahmen der Detailplanung entschieden. Somit basiert die berechnete verfügbare Kapazität auf den nachfolgenden Pufferplätzen zwar auf einer geringeren Verlässlichkeit als diejenige, die für die Berechnung der verfügbaren Kapazität ermittelt wurde, jedoch wird dies beabsichtigt in Kauf genommen, um weitere Erfassungsaufwände zu vermeiden.

Das Gewicht der Drahtringe stellt die Anforderung *sehr gering* an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit*. Somit könnte theoretisch auf eine Erfassung und Berücksichtigung im Rahmen des Steuerungsverfahrens verzichtet werden. Da diese Information jedoch aus buchhalterischen Gründen benötigt und erfasst wird und zudem verwendet wird, um die Anzahl an Drahtringen zu ermitteln, um das Auftragsvolumen zu erfüllen, ist diese bereits verfügbar. Diese Information wird mittels einer Waage erfasst. Die Berücksichtigung dieser Information trotz der sehr geringen Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ist dadurch begründet, dass der zusätzliche Implementierungsaufwand sehr gering ist und das Verfahren somit auch zukünftig, sollten sich die Anforderungen ändern, nicht in Bezug auf diese Information modifiziert werden muss.

Die jeweils aktuellen Lagerplätze der individuellen Drahtringe sind ebenfalls bereits vorhanden, damit eine Auffindbarkeit der Materialien im Rahmen der Prozesse gegeben ist. Diese werden jeweils nach Durchführung eines Transportprozesses aktualisiert, indem ein Barcode, der die individuelle Kennung der Drahtringe abbildet, sowie der zugehörige Lagerplatz, auf dem der Drahtring abgestellt wurde, mittels eines Handheld gescannt wird. Der zu scannende Lagerplatz ist in Form eines Barcodes auf einem Schild über jedem Pufferplatz angegeben. Diese Erfassungsart der aktuellen Lagerplätze zu den entsprechenden Ereignissen wird beibehalten.

Erfolgt eine Materialentnahme von einem Pufferplatz zur Bearbeitung durch eine Maschine (sowohl an den vorverarbeitenden Maschinen als auch an den Umformmaschinen), so wird die individuelle Kennung des Drahtrings an einem BDE-Terminal gescannt, dessen Bearbeitungsstartzeitpunkt angegeben und der Status des Materials auf „in Bearbeitung“ geändert. Dadurch wird das Material automatisch keinem Lagerplatz mehr zugeordnet. Auch diese Art der Aktualisierung des Lagerplatzes wird beibehalten. Da dies jedoch ein Auslöser zur Generierung von Transportaufträgen ist, gilt es, die entsprechenden Toleranzgrenzen zu berücksichtigen.

Da die Toleranzgrenze für eine verfrühte Aktualisierung an den Umformmaschinen geringer ist als für eine verspätete Aktualisierung, ist im Prozess vorgesehen, dass immer erst nach dem Einsetzen eines Materials dessen Zustand geändert werden soll. Dies ist innerhalb eines Zeitraums von 20 Minuten durchzuführen. Somit besteht für die Maschinenbedienenden die Möglichkeit, dass das „Anlaufen“ der Maschine mit dem neu eigesetzten Material beobachtet und mögliche Korrekturen vorgenommen werden können, damit kein Ausschuss durch eine mögliche fehlerhafte Einstellung entsteht, da die Maschine unüberwacht

anläuft. Bei einer Verzögerung von 20 Minuten wird zwar die Toleranzgrenze an den Umformmaschinen überschritten, jedoch nimmt durch diese geringe Überschreitung des Toleranzbereichs die Möglichkeit einer verspäteten Generierung eines Transportauftrages nur minimal zu.

Erfolgt eine Materialentnahme von einem Pufferplatz zur Vorverarbeitung durch die vorverarbeitenden Maschinen, so ist innerhalb von 10 Minuten die Information über das sich in Bearbeitung befindliche Material zu aktualisieren, sodass dadurch ein neuer Transportauftrag generiert werden kann. Dieser Wert liegt zwar über der ermittelten Toleranzgrenze von 3 Minuten Verzögerung, jedoch wird diese Überschreitung damit begründet, dass auch hier die Maschinenbedienenden die Möglichkeit haben, das „Anlaufen" der Maschine mit dem neu eigesetzten Material zu beobachten und mögliche Korrekturen vorzunehmen. Die Wahl von 10 Minuten an den vorverarbeitenden Maschinen statt 20 Minuten, wie an den Umformmaschinen, ist dadurch begründet, dass die Bearbeitungszeiten an den Umformmaschinen wesentlich geringer sind und dass die Bearbeitungsprozesse an den vorverarbeitenden Maschinen robuster sind und somit ein Auftreten eines Fehlers innerhalb der ersten Minuten nach dem Einsatz eines Materials als wesentlich geringer angesehen wird.

Die erfolgreiche Vorverarbeitung eines Drahtrings wird ebenfalls durch eine Bestätigung an einem BDE-Terminal dokumentiert. Im Rahmen dieser Dokumentation wird dem Drahtring auch der fixe Lagerplatz nach der zugehörigen vorverarbeitenden Maschine zugeordnet. Die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe besitzt eine hohe Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* und ist maßgeblich entscheidend dafür, ob sich Transporte bündeln lassen oder nicht. Diese Länge wird daher manuell im Anschluss an die Vorverarbeitung gemessen und in einem entsprechenden Feld im BDE-Terminal eingegeben.

Zur Erhöhung der Reaktionsfähigkeit auf neu generierte Transportaufträge durch die Transportprozesse sollten die abzuarbeitenden Transportaufträge digital erzeugt und auf einem Tablet angezeigt werden, sodass der nächste Transportauftrag direkt nach Abarbeitung des vorherigen ausgewählt werden kann. Dadurch werden alle relevanten Informationen zur Auswahl und Bearbeitung eines Transportauftrages über ein Tablet an die Transportprozessschritte übermittelt.

Durch die erforderliche Chargenrückverfolgbarkeit der verarbeiteten Materialien war bereits jeder Drahtring individuell bekannt. Die dazu notwendigen Informationen werden in einem eigens durch das Unternehmen entwickelten Modul „Materialmanagement" gespeichert, das eine Erweiterung des eingesetzten ERP-Systems darstellt. Dieses Modul bot sich an, um darin weitere zu erfassende Informationen in geeigneten Tabellen zu speichern, damit die Anforderungen an zu erstellende Schnittstellen zwischen verschiedenen Programmen oder Systemen geringgehalten werden. In diesem Modul befand sich bereits eine Tabelle „Material", in der die zu bearbeitenden Materialien mit ihrer individuellen Kennung, dem Gewicht, dem aktuellen Status (beispielsweise „in Bearbeitung"), ihrer Zugehörigkeit zu einem Produktionsauftrag sowie dem aktuellen Lagerplatz gespeichert werden. Die Länge der rohen Drahtringe sowie die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe wurden in dieser Tabelle in einer neu hinzuzufügenden Spalte gespeichert. Dies ermöglichte es, die Aufwände für die abzuändernden Eingabemasken an den BDE-Terminals zu reduzieren, da die dort eingesetzten Formulare bereits auf die gleiche Tabelle zugriffen und somit in diesem Zusammenhang keine Schnittstelle zu einem neuen System hergestellt werden musste. Da das Steuerungsverfahren zum Großteil auf Basis der Daten über die Eigenschaften der Materialien beruht und der Datentransfer geringgehalten werden sollte, wurde entschieden, dass die Generierung der Transportaufträge innerhalb des Moduls „Materialmanagement" erfolgen soll. Dazu wurde dieses Modul um die Tabellen „Pufferplätze", „Transporter" sowie „Transport" ergänzt. In der Tabelle Pufferplätze werden in Form von Stammdaten die Kapazitäten der Pufferplätze abgebildet sowie, falls vorhanden, ihre Zugehörigkeit zu den

vorverarbeitenden und den Umformmaschinen. In der Tabelle „Transporter“ wurden die Transportkapazitäten der Transportressource, die in dem Produktionsbereich zum Einsatz kommt, abgebildet. Auch dies geschieht in Form von Stammdaten. Die Tabelle „Transport“ beinhaltet alle generierten Transportaufträge, die zur Bearbeitung ausstehen. Der Inhalt dieser Tabelle wird über einen Webservice kontinuierlich abgefragt, sodass dieser auf einem Tablet für die Transportprozesse angezeigt werden kann. Dadurch findet die Datenspeicherung fast ausschließlich im Modul „Materialmanagement“ statt. Einzige Ausnahme stellt der aktuell zu bearbeitende Produktionsauftrag an den vorverarbeitenden Maschinen sowie an den Umformmaschinen dar. Dieser ist im Produktionsplan im ERP-System abgespeichert, was die einzige zu implementierende Schnittstelle zu einem anderen System darstellt.

Die einzusetzenden Erfassungs-, Übertragungs- und Speichertechnologien wurden im durchgehend erweiterten Wertstromdiagramm in Abbildung 11-14 ergänzt. Dieses Wertstromdiagramm stellte die Grundlage dar, auf der das Verfahren schließlich im realen Produktionssystem implementiert wurde. Zudem wurde es auch zur systematischen Erstellung des Simulationsmodells verwendet, anhand dessen die Harmonisierung der Informationsqualität in Schritt 4 der Methode evaluiert wurde.

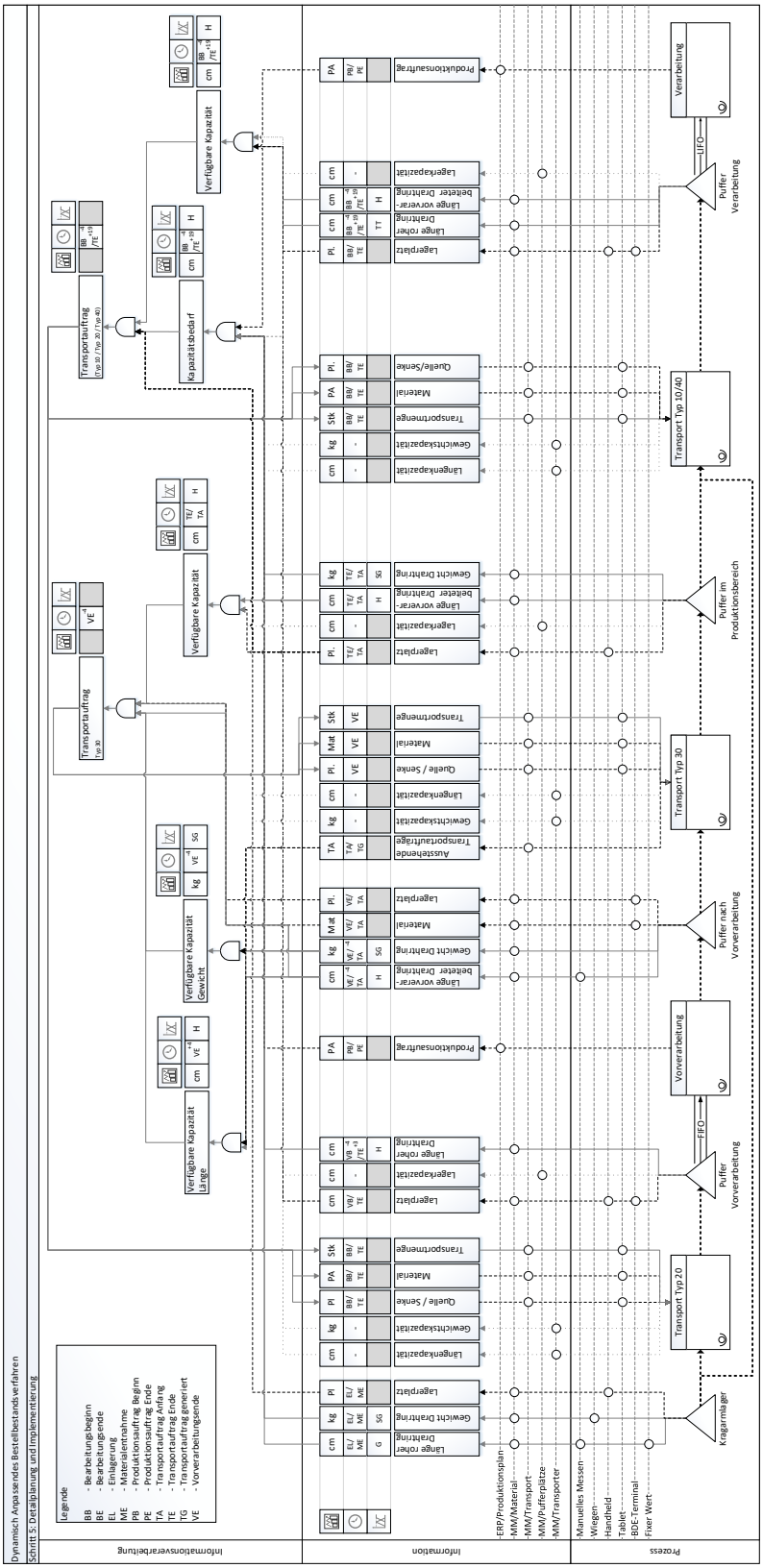

Abbildung 11-14: Wertstromdiagramm zur Implementierung des *sich dynamisch anpassenden Bestell-bestandsverfahrens*

Evaluierung

Durch die Anwendung von Schritt 5 der entwickelten Methode wurde die Hypothese H-TFF4.2 „*Durch die in den Informationsbeschreibungsblöcken angegebenen Anforderungen an die IQ-Dimensionen ist eine ausreichend genaue Grundlage geben, um darauf aufbauend die richtigen Informationserfassungs-, -speicherung-, und -übertragungstechnologien und Medien durch ein systematisches Technologiescouting identifizieren und bewerten zu können. Die Modellierung der Informationserfassungs- und -übertragungstechnologien sowie der Speichermedien durch horizontale Linien und der Kennzeichnung ihrer Zugehörigkeit zu Informationsflüssen eignen sich, um ein Konzept zur Implementierung abzuleiten.“* evaluiert, indem sowohl das Evaluierungskriterium „Möglichkeiten und Maßnahmen zur Erfassung und Übertragung der notwendigen Informationen ableitbar“ als auch das Evaluierungskriterium „Erfassungstechnologien und Speichermedien/-orte zur Umsetzung/Implementierung abbildbar“ überprüft wurden.

Durch die Modellierung der Informationen mit den zugehörigen Anforderungen an die IQ-Dimensionen war eine ausreichende Grundlage gegeben, um die notwendigen Erfassungstechnologien zu ermitteln sowie organisatorische Maßnahmen (wie beispielsweise die Festlegung, dass es zu keiner verfrühten Aktualisierung von Informationen kommen darf) zu definieren. Als Einschränkung gilt es hierbei zu erwähnen, dass dadurch, mit Ausnahme der IQ-Dimension *Granularität* nicht hervorgeht, ob auch die Anforderungen an die IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* erfüllt werden. Dies gilt es im Rahmen von Schritt 6 der Methode zu evaluieren. Zudem werden die Informationen überwiegend durch bereits vorhandene Methoden und Maßnahmen erfasst beziehungsweise aktualisiert. Damit wurde in diesem Anwendungsbeispiel kein systematisches Technologiescouting durchgeführt, um neue Technologien zu erfassen. Da jedoch Möglichkeiten und Maßnahmen zur Erfassung und Übertragung der Informationen ermittelt wurden, kann das erste zur Hypothese H-TFF4.2 aufgestellte Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden. Die identifizierten und definierten Technologien und Maßnahmen zur Erfassung, Speicherung und Übertragung der Informationen ließen sich im Wertstromdiagramm durch die vorgesehenen Modellierungsmöglichkeiten abbilden. Somit kann auch das zweite zur Hypothese aufgestellte Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden.

Zudem konnte aufbauend auf dem Wertstromdiagramm ein Konzept zur Implementierung des Verfahrens in einem Simulationsmodell abgeleitet und umgesetzt werden sowie das Wertstromdiagramm als Grundlage verwendet werden, um das Verfahren im realen Produktionssystem zu implementieren.

Durch die erfolgreiche Implementierung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* auf Basis des modellierten Wertstromdiagramms sowohl in einem Simulationsmodell (in dem die Schnittstellenproblematik zu vernachlässigen ist, da sich alle notwendigen Tabellen innerhalb eines Systems befinden) als auch in dem realen Produktionssystem (in dem die Schnittstellenproblematik zu berücksichtigen war), wird die Erfüllung der Evaluierungskriterien zu Hypothese H-TFF4.2 bestärkt.

Schritt 6: Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung

Anwendung des Schrittes

Im Rahmen der Evaluierung der entwickelten und implementierten verbesserten Steuerung der Produktionslogistik durch das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* wurde der gleiche Zeitraum, der im Rahmen der Analyse der Ist-Situation untersucht wurde, erneut unter Anwendung der Generierung von Transportaufträgen durch das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* simuliert. Dazu wurden die Informationen, insbesondere über die Längen der Drahtringe, derart modelliert, dass sie zu den zugehörigen Erfassungsarten passen. So sind die Längen der rohen Drahtringe überwiegend durch fixe Werte repräsentiert und nur die Ausreißer nach oben und nach unten sind individuell angegeben, wie es

im Rahmen der Erfassung dieser Informationen vorgesehen ist. Die Längen der vorverarbeitenden Drahtringe stimmen hingegen näherungsweise mit den als reale angegebenen Längen überein, jedoch sind auch hier geringe Abweichungen zufallsbasiert modelliert, die beispielsweise durch Messfehler im Rahmen der manuellen Messung auftreten können.

Ein Vergleich zwischen dem initialen Stand und dem finalen Stand nach Implementierung *des sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* ist in Abbildung 11-15 in Form eines Box-Plots dargestellt. In einem Box-Plot werden Kennwerte einer Verteilung grafisch abgebildet. Die Grenzen der jeweils dargestellten Box stellen dabei das obere und untere Quartil der Verteilung des abzubildenden Datensatzes dar. Diese umfasst somit 50 % der Daten. Der Strich innerhalb der Box (hier um eine jeweilige Einkerbung ergänzt) stellt den Median des Datensatzes dar. Durch die „Antennen“ (auch als Whiskers bezeichnet) werden Werte außerhalb der Box dargestellt. Diese umfassen alle Werte, die sich innerhalb des 1,5-Fachen des Interquartilabstandes (Ausdehnung der Box) befinden. Dabei endet die Antenne beim letzten Datenwert, der sich innerhalb dieses Abstands befindet. Datenwerte außerhalb der Antennen werden als Ausreißer in Form von Punkten dargestellt.

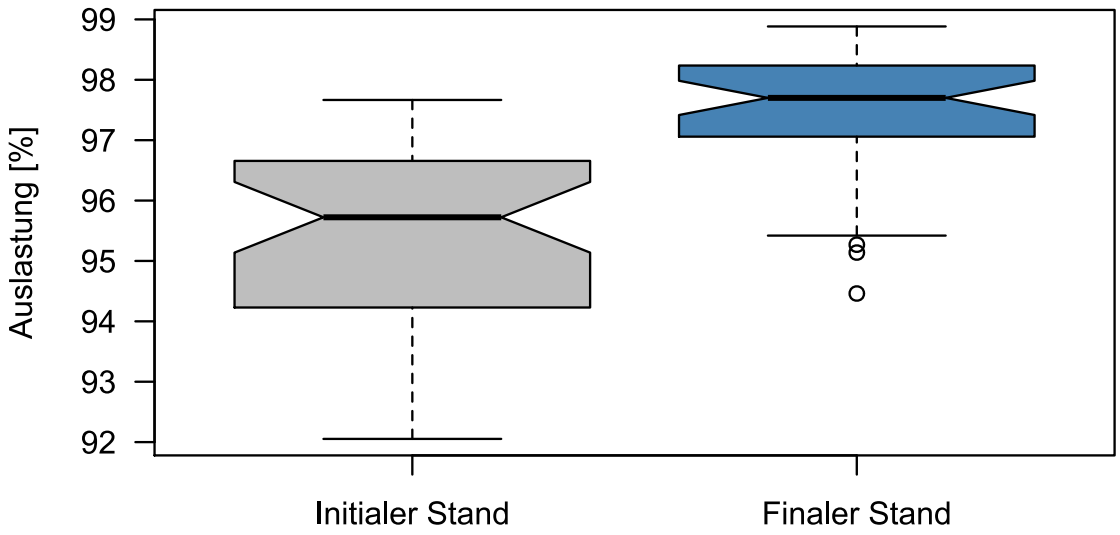

Abbildung 11-15: Evaluierung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens*

Wie anhand von Abbildung 11-15 zu erkennen ist, konnte die Lage des Medians der Auslastung der Umformmaschinen verbessert sowie die Streuung der Werte reduziert werden. So konnte die mittlere Auslastung der Umformmaschinen von 95,37 % um 2,06 Prozentpunkte auf etwa 97,43 % gesteigert werden. Da nur die Art der Auftragsgenerierung geändert wurde und durch das Verfahren nun Transporte gebündelt werden, ist dieser Effekt auf die Effizienzsteigerung der Transportprozesse zurückzuführen. Anzumerken hierbei sei, dass im Rahmen des implementierten Bestellbestandsverfahrens keine eigenständigen Transporte durch die Maschinenbedienenden mehr durchgeführt wurden. Durch die in Form der gesteigerten Auslastung der Umformmaschinen ausgedrückte Reduktion der Wartezeiten auf das Material konnten die Verspätungen in der Fertigstellung der Produktionsaufträge reduziert werden. Dadurch standen die Materialien für die nachfolgenden Produktionsschritte rechtzeitig zur Verfügung, wodurch die Termintreue insgesamt erhöht wurde. Somit konnte das Ziel, das im Rahmen der Ausgangssituation definiert wurde, erreicht werden. Die verbleibenden Stillstandszeiten setzten sich schließlich aus 2,05 % Wartezeit auf Belieferung mit verfügbarem Material (zuvor 3,17 %) sowie 0,52 % Wartezeit auf Material, das noch nicht rechtzeitig vorverarbeitet wurde (zuvor 1,46 %), zusammen. Somit konnte, wie bereits im Rahmen

der Priorisierung der identifizierten Verbesserungspotenziale in der Analyse der Ist-Situation aufgeführt, auch der Effekt der verspäteten Vorverarbeitung von Materialien reduziert werden, da durch die effizienteren Transportprozesse auch die vorverarbeitenden Maschinen früher mit Material beliefert werden können und somit Verzögerungen der Vorverarbeitung reduziert werden.

Der im Rahmen der Simulationsstudie ermittelte Effekt wurde durch Aussagen der Mitarbeitenden im realen Produktionssystem nach Implementierung und Anwendung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahren* mittels qualitativer Aussagen bestätigt.

Evaluierung

Durch die mittels der Simulation quantitativ nachgewiesene Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen lassen sich verschiedene Hypothesen, die zuvor nur eingeschränkt evaluiert werden konnten, bestätigen.

Im Rahmen der Hypothese H-TFF2 konnte zuvor nicht evaluiert werden, ob es sich auch um ein relevantes identifiziertes Verbesserungspotenzial handelt. Durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen, die auf die Umsetzung eines identifizierten Verbesserungspotenzials zurückzuführen ist, kann geschlussfolgert werden, dass es sich hierbei um ein relevantes Verbesserungspotenzial handelt. Somit kann das zugehörige Evaluierungskriterium von Hypothese H-TFF2 als erfüllt angesehen werden.

Hypothese H-TFF3 wurde bisher nur dahingehend evaluiert, dass sich Steuerungsverfahren identifizieren und mittels des beschriebenen Vorgehens modifizieren lassen. Offen blieb bisher, ob es sich bei dem ausgewählten und zum *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahren* modifizierten Steuerungsverfahren auch um ein geeignetes Steuerungsverfahren handelt. Die Eignung des Steuerungsverfahrens kann durch die gesteigerte Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen bestätigt werden, die auf eine gesteigerte Effizienz der Transportprozesse zurückzuführen ist. Somit werden die zur Hypothese H-TFF3 aufgestellten Evaluierungskriterien als erfüllt angesehen. Ob es sich um das ideale Steuerungsverfahren handelt, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden, dazu wäre ein Vergleich mit anderen Steuerungsverfahren erforderlich[13].

Durch die Auswahl der Art der Erfassung der Information über die Länge der rohen Drahtringe operiert das Steuerungsverfahren teilweise auf Informationen, die erheblich von den realen Gegebenheiten abweichen können. Trotz dieser teilweise erheblichen Abweichung konnte ein Ergebnis der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen erreicht werden, dass sich nur geringfügig von demjenigen unterscheidet, dass sich bei einer idealen Informationsqualität ergeben hätte. Würde man die in der Evaluierung modellierten geringen Abweichungen der Informationen über die Längen der vorverarbeiteten Drahtringe korrigieren, sodass diese den realen Längen entsprächen, so würde sich eine mittlere Auslastung der Umformmaschinen von 98,01 % ergeben, was nur 0,14 Prozentpunkte geringer ist als das Ergebnis bei einer idealen Verlässlichkeit aller dem Steuerungsverfahren zugrundeliegenden Informationen (98,15 %). Die Differenz zwischen den 98,01 % und den 97,43 %, die im Rahmen der Evaluierung ermittelt wurden, sind somit auf die geringen modellierten Abweichungen der Informationen der vorverarbeiteten Informationen zurückzuführen. Diese nicht im Rahmen der Evaluierung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik zu modellieren, würde im Simulationsmodell zu einer zu starken Verfälschung der realen Prozesse führen, in

[13] Die Auswahl eines idealen Steuerungsverfahrens wird nicht durch die Hypothese H-TFF3 beziehungsweise durch das zugehörige Evaluierungskriterium gefordert, sondern lediglich die Auswahl eines geeigneten Steuerungsverfahrens. Somit stellt die Auswahl des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* keine Einschränkung in der Evaluierung der Hypothese dar.

denen durchaus Abweichungen in der Erhebung von Informationen auftreten. Die Richtigkeit einer solchen Modellierung bestätigt auch Sonmez & Testik [SOTE17, S. 3257]. Ein Vergleich zwischen der Auslastung der Umformmaschinen bei einer idealen Informationsqualität und der der Evaluierung zugrundeliegenden Informationsqualität ist im Anhang *Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1* in Abbildung A-6 dargestellt. Aus den sich ergebenden Kennzahlen der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen, in Abhängigkeit der gewählten Informationsqualität, kann schließlich geschlussfolgert werden, dass die Angaben in den Informationsbeschreibungsblöcken geeignet waren, um in Schritt 5 der Methode geeignete Arten der Erfassung der Informationen zu identifizieren. Somit kann die zuvor beschriebene Einschränkung im Rahmen der Evaluierung von Hypothese H-TFF4.2 aufgehoben werden.

11.3 Anwendungsbeispiel 2: Verbesserung der Reihenfolgebildung

11.3.1 Beschreibung der Ausgangssituation und Zielstellung

Nachdem das zuvor beschriebene Anwendungsbeispiel mit Hilfe der entwickelten Methode durchlaufen wurde, wurde die Methode nochmals im gleichen Produktionssystem angewendet, wie es im Rahmen eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und der Struktur der Methode vorgesehen ist, um weitere Verbesserungspotenziale zu identifizieren und umzusetzen. Somit stellt der Endzustand des vorherigen Anwendungsbeispiels die Ausgangssituation dar, wobei die Zielstellung „Identifikation und Umsetzung von Verbesserungspotenzialen der Steuerung der Produktionslogistik zur Erhöhung der Liefertermintreue“ identisch geblieben ist.

11.3.2 Anwendung der entwickelten Methode

Schritt 1: Analyse der Ist-Situation

Anwendung des Schrittes

Da die Ist-Situation zu Beginn der weiteren Anwendung der entwickelten Methode dem Endzustand des vorherigen Durchlaufs der Methode entspricht, wird auf eine erneute Modellierung und allgemeine Beschreibung der Prozesse verzichtet.

Da sich die im untersuchten Produktionssystem ablaufenden Prozesse nicht grundlegend geändert haben, wurden im Rahmen der Analyse der sich neu ergebenden Ist-Situation zunächst die Kennzahlen, die den beiden weiteren zuvor identifizierten Verbesserungspotenzialen zugrunde liegen, analysiert. Dies geht mit der Evaluierung (Schritt 6) der vorherigen Anwendung der Methode einher. Die weiteren bereits zuvor identifizierten Verbesserungspotenziale sind zum einen die Objektivierung der Reihenfolgebildung der Abarbeitung von ausstehenden Materialbereitstellungen auf Basis der Dringlichkeit der Materialien und zum anderen die Flexibilisierung der Abarbeitungsreihenfolge in der Vorverarbeitung, um auf die aktuellen Gegebenheiten an den Umformmaschinen zeitnah zu reagieren.

Mit einer Reduktion auf eine mittlere ungeplante Stillstandszeit von 2,57 % der Umformmaschinen konnte die Leistungsfähigkeit der Prozesse zwar gesteigert, die Ursachen, die für die verbleibenden Effizienzeinbußen verantwortlich sind, jedoch nicht vollständig beseitigt werden. Diese 2,57 % ungeplante Stillstandszeit setzen sich zusammen aus 2,05 % ungeplanter Stillstandszeit im Simulationszeitraum durch eine verspätete Bereitstellung der Materialien an den Umformmaschinen und 0,52 % ungeplanter Stillstandszeit im Simulationszeitraum aufgrund einer verspäteten Verfügbarkeit vorverarbeiteter Drahtringe. So konnte zwar die mittlere Transportmenge der Transportprozesse gesteigert werden, jedoch ist durch eine weiterhin bestehende mittlere ungeplante Stillstandszeit von 2,57 % noch immer ein deutliches

Verbesserungspotenzial vorhanden. Da durch die Detaillierung der Kennzahl in einer möglichen Verbesserung der Steuerung der Transportprozesse ein höheres erhofftes Potenzial zur Steigerung der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen besteht als in der Flexibilisierung der Abarbeitungsreihenfolge an den vorverarbeitenden Maschinen, wird dieses höher priorisiert und zunächst im Rahmen der weiteren Anwendung der Methode fokussiert.

Die Transportaufträge zur Bereitstellung der Drahtringe an den vorverarbeitenden Maschinen (Transporttyp 20) und an den Umformmaschinen (Transporttyp 10 und 40) sowie zur Zwischenlagerung auf den Pufferplätzen im Produktionsbereich (Transporttyp 30) werden zwar nach dem ersten Durchlauf der Methode automatisch auf Basis von Informationsaktualisierungen erzeugt und den Transportprozessen digital zur Verfügung gestellt, jedoch erfolgte die Bestimmung der Abarbeitungsreihenfolge der ausstehenden Transportaufträge noch immer auf Basis subjektiver Einflüsse. Durch eine Befragung der Mitarbeitenden, die die Transportprozesse durchführen, wurde ermittelt, dass die Priorisierung der Transportprozesse überwiegend auf Basis des physischen Bestands an Materialien an den Umformmaschinen sowie vor und nach den vorverarbeitenden Maschinen durchgeführt wird. Somit werden Transportaufträge in der Regel höher priorisiert, wenn sich kein weiteres Material mehr auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen und den Umformmaschinen befindet, gegenüber denjenigen Transportaufträgen, auf deren Senke zum Zeitpunkt der Priorisierung noch Material verfügbar ist. Transportaufträge vom Transporttyp 30 wurden häufig dann hoch priorisiert, wenn der Bestand auf den entsprechenden Pufferplätzen bereits sehr hoch war. Ein hoher Bestand auf den Pufferplätzen hinter den vorverarbeitenden Maschinen könnte zur Folge haben, dass ein vorverarbeiteter Drahtring dort nicht mehr abgestellt werden kann. Dies hätte wiederum zur Folge, dass die vorverarbeitende Maschine dadurch so lange „blockiert“ ist, bis der Drahtring abstellbar ist. Somit wurde im Rahmen der Priorisierung der Transportaufträge durch die Mitarbeitenden, die die Transportprozesse ausführen, bereits die Dringlichkeit der Materialbedarfe indirekt berücksichtigt. Da jedoch keine Informationen über die verbleibenden Bearbeitungsdauern der sich aktuell in den Maschinen befindlichen Materialien verfügbar waren, wurde unter den Maschinen, die den gleichen geringsten Bestand besaßen (oder den gleich höchsten Bestand bei Transportaufträgen vom Transporttyp 30), häufig derjenige zugehörige Transportauftrag ausgewählt, der als erstes erzeugt wurde. Dies wurde als Anhaltspunkt genommen, um die verbleibende Bearbeitungsdauer abzuschätzen. Dabei wurde davon ausgegangen, dass ein früher erzeugter Transportauftrag durch den Einsatz eines Materials erzeugt wurde. Je früher das Material eingesetzt wurde, desto früher ist dessen Bearbeitung vermutlich abgeschlossen, sodass es zu einem Materialflussabriss kommen könnte (beziehungsweise zu einer Blockade der vorverarbeitenden Maschinen). Durch die hohe Spannweite der Bearbeitungsdauern der verschiedenen Drahtringe an den Maschinen (dargestellt jeweils als Fuzzy-Zahl im Anhang in Abbildung A-1 und Abbildung A-2) gibt diese Vorgehensweise zwar einen Anhaltspunkt, an dem eine Orientierung möglich ist, jedoch ist diese Vorgehensweise nicht geeignet, um eine Priorisierung der ausstehenden Transportaufträge verlässlich durchzuführen. So kann durch die unterschiedlichen Bearbeitungsdauern der Drahtringe an den Maschinen nicht verlässlich auf Basis der Bestände und der Generierungszeitpunkte der Transportaufträge abgleitet werden, wie die Abarbeitung der Transportaufträge in Abhängigkeit der Dringlichkeit durchzuführen ist.

Im Rahmen der erneuten Anwendung der entwickelten Methode wurde somit versucht, die beschriebene mögliche Ursache für verspätete Materialbereitstellungen zu beheben oder, falls nicht möglich, zumindest zu reduzieren. Dies sollte durch eine Objektivierung der Reihenfolgebildung der Abarbeitung von ausstehenden Transportaufträgen auf Basis der Dringlichkeit der Materialbereitstellung beziehungsweise des Abtransports erfolgen.

Evaluierung

Da auf eine erneute Modellierung der Materialflussprozesse im Rahmen dieses Anwendungsbeispiels verzichtet wurde und die bestehende Modellierung der Materialflussprozesse erneut verwendet wurde, kann das Evaluierungskriterium „Abbildbarkeit der Prozesse“ der Hypothese H-TFF2 nicht an einem weiteren Beispiel beurteilt werden. Durch die erneute Verwendbarkeit der Modellierung kann deren Eignungsfähigkeit jedoch bestärkt werden.

Die identifizierten Verbesserungspotenziale, die im Rahmen der Analyse der Ist-Situation ermittelt wurden, wurden bereits im Rahmen des ersten Anwendungsbeispiels bestimmt. Somit kann an dieser Stelle nicht erneut evaluiert werden, ob sich das in der Hypothese H-TFF2 beschriebene Vorgehen eignet, um weitere Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Dies ist jedoch nicht auf den Methodenschritt an sich zurückzuführen, sondern auf das Anwendungsbeispiel. Anhand der erneuten Anwendung der Methode kann jedoch gegebenenfalls bestätigt werden, dass es sich bei dem umzusetzenden Verbesserungspotenzial um ein relevantes Verbesserungspotenzial handelt, durch das die Leistungsfähigkeit des untersuchten Abschnitts des Produktionssystems gesteigert werden kann. Anhand der Modellierung der Bearbeitungsdauern der Drahtringe an den vorverarbeitenden Maschinen sowie an den Umformmaschinen mittels Fuzzy-Zahlen konnte verdeutlicht werden, dass sich die aktuelle Vorgehensweise zur Priorisierung der generierten Transportaufträge nicht eignet, um verlässlich die Bearbeitungsreihenfolge zu bestimmen. Die Evaluierung der Relevanz des Verbesserungspotenzials erfolgt im Rahmen der Anwendung von Schritt 6 der Methode in diesem Anwendungsbeispiel.

Schritt 2: Auswahl, Modifikation und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren

Anwendung des Schrittes

Zur Priorisierung der Transportaufträge durch die Transportprozesse wurde das Steuerungsverfahren *Geringster Restschlupf* als ein geeignetes Verfahren identifiziert, das auf Basis der Schlupfzeitregel Steuerungsentscheidungen trifft. Die Schlupfzeitregel erteilt dem Auftrag mit dem geringsten Schlupf die höchste Priorität zur Abarbeitung. Als Schlupf wird dabei die Zeitdauer bis zum geplanten Fertigstellungstermin des Auftrags bezeichnet, die nicht für die Bearbeitung oder eventuelle Übergangszeiten benötigt wird [LÖD16, S. 511]. Zur Berechnung des Schlupfs wird für die Transporttypen 10, 20 und 40 die Reichweite des Materials auf den Pufferplätzen sowie die Restreichweite des sich in Bearbeitung befindenden Materials in den Maschinen berechnet und laufend aktualisiert. Diese Kennzahl gibt somit an, wann es an einer Maschine zu einem Materialflussabriss kommen würde. Zur Berechnung des Schlupfs ist diese Reichweite um die Dauer zu reduzieren, die die Transportprozesse benötigen, um mindestens ein Material bereitzustellen.

Für Transportaufträge vom Transporttyp 30 ist dieses Verfahren zur Priorisierung in der Form wie für die Transporttypen 10, 20 und 40 nicht anwendbar, da die Pufferplätze im Produktionsbereich keine Reichweiten besitzen und somit auch keine Materialflussabrisse drohen. Da sich Materialien für Transportaufträge vom Transporttyp 30 auf den Pufferplätzen hinter den vorverarbeitenden Maschinen befinden, besteht, wie bereits im Rahmen der Analyse der Ist-Situation aufgezeigt, die Möglichkeit, dass sich in Vorverarbeitung befindliche Materialien nicht abgestellt werden können, sofern nicht ausreichend Kapazität auf den Pufferplätzen zur Verfügung steht. Dies würde zu einer „Blockierung“ der vorverarbeitenden Maschine führen, da diese erst dann weiteres Material bearbeiten kann, sobald das die Maschine blockierende Material abgestellt wurde. Zur Priorisierung von Transportaufträgen des Transporttyp 30 wurde daher ermittelt, dass diese anhand des Schlupfs priorisiert werden können, der angibt, wann es zu einer Blockierung der vorverarbeitenden Maschine kommen würde. Dazu wurde ein maximaler Bestand von

sechs Materialien festgelegt, der sich auf den Pufferplätzen befinden kann. Die Reichweite, bis eine Blockierung der Maschine entsteht, ergibt sich schließlich aus der Summe der verbleibenden Bearbeitungsdauer des Materials in der vorverarbeitenden Maschine sowie den Bearbeitungsdauern der Materialien auf den Pufferplätzen vor der vorverarbeitenden Maschine, bis der maximale Bestand überschritten werden würde. Besteht nicht die Möglichkeit, dass eine Blockierung der Maschine auftritt, so wird den Transportaufträgen ein fixer Wert als Restreichweite zugeordnet. Zur Berechnung des Schlupfs wird die ermittelte Reichweite bis zu einer Blockade der vorverarbeitenden Maschinen um die Zeit zur Aufnahme eines Materials reduziert, da durch dieses Ereignis wieder ausreichend Kapazität auf dem Pufferplatz zur Verfügung stehen sollte. Die maximale Anzahl von sechs Materialien wurde aus der mittleren Länge der vorverarbeiteten Drahtringe ermittelt, in Verbindung mit den Lagerkapazitäten der Pufferflächen zuzüglich eines Sicherheitszuschlages. Da nicht bekannt ist, welche Länge die Materialien nach der Vorverarbeitung besitzen werden, ist es nicht möglich, die maximale Menge dynamisch zu berechnen.

Evaluierung

Durch die Anwendung des Methodenschrittes Auswahl, Modifikation und Konfiguration produktionslogistischer Steuerungsverfahren wurde die Hypothese H-TFF3 *„Geeignete Steuerungsmethoden zur Umsetzung der identifizierten Verbesserungspotenziale lassen sich durch einen Abgleich der Funktionalität der Methoden mit Anforderungen der zu produzierenden Produkte, Prozessanforderungen und den zu erreichenden produktionslogistischen Zielen ermitteln. Durch eine systematische Anpassung der Verfahren mit Hilfe des ‚Verbesserungszyklus zur Anpassung und Modifikation von Steuerungsverfahren' können, sofern notwendig, die Verfahren angepasst werden, sodass sich diese adaptiv an Prozessänderungen anpassen."* erneut teilevaluiert. Das zur Evaluierung definierte Kriterium „Identifikation mindestens eines geeigneten Steuerungsverfahrens" kann an dieser Stelle durch die Auswahl des Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* dahingehend als erfüllt angesehen werden, dass ein Steuerungsverfahren identifiziert wurde. Ob es sich hierbei auch um ein geeignetes Steuerungsverfahren handelt, ist im Rahmen der Evaluierung der umgesetzten Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik zu beurteilen. Da dieses Verfahren in seiner Grundstruktur nicht modifiziert wurde, kann das zweite Evaluierungskriterium anhand dieses Anwendungsbeispiels nicht beurteilt werden.

Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen

Anwendung des Schrittes

Die Beschreibung der modellierten Informationen und Informationsflüsse für das Steuerungsverfahren *Geringster Restschlupf* erfolgt zunächst für die Transportaufträge der Transporttypen 10, 20 und 40, da das Verfahren für diese nach dem gleichen Prinzip erfolgt, und anschließend gesondert für Transportaufträge vom Transporttyp 30.

Zur Umsetzung des Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* werden für die Transportaufträge der Transporttypen 10, 20 und 40 die jeweiligen Reichweiten in Form der Bearbeitungsdauern der Materialien benötigt, die sich gerade in Bearbeitung beziehungsweise in Vorverarbeitung befinden, sowie die Bearbeitungsdauern der Materialien, die sich bereits auf den zugehörigen Pufferplätzen befinden. Diesen Bearbeitungsdauern sind mögliche notwendige Rüstzeiten sowie Zeiten für den Einsatz eines neuen Drahtrings in die Maschinen hinzuzurechnen, falls die Maschine für den entsprechenden Produktionsauftrag schon eingerüstet ist. Die Bearbeitungsdauern der Materialien, die sich auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen befinden, ergeben sich aus der Kapazität der Drahtringe sowie der geplanten Taktzahl, mit der die Kapazitätseinheiten der Drahtringe je Zeiteinheit verarbeitet beziehungsweise vorverarbeitet werden.

Zudem ist noch die Kapazität des sich aktuell in Vor-/Verarbeitung befindlichen Materials erforderlich sowie der Bearbeitungsfortschritt von diesen Materialien, zur Ermittlung wie lange sich dieses Material noch in Bearbeitung befinden wird. Da die Umformmaschinen nicht kontinuierlich beplant sind, tritt die Möglichkeit auf, dass der Schlupf nicht aus den bereits bereitgestellten Materialien berechnet werden kann, da sich aktuell kein Material in Bearbeitung befindet und auch keine Materialien auf den Pufferplätzen stehen. In diesem Fall ergibt sich der Schlupf aus der verbleibenden Stillstandszeit bis mit dem Produktionsauftrag planmäßig begonnen werden soll.

Die beschriebenen Informationen werden als Informationsart *zu verarbeitende Information* durch die Informationen „Kapazität Drahtringe“, „Taktzahl“, „Rüstzeit“, „Bearbeitungsfortschritt“ sowie „Verbleibende Stillstandszeit“ repräsentiert und in der *Information-Swimlane* den entsprechenden Prozessschritten beziehungsweise Pufferbereichen zugeordnet. Dies ist in Abbildung 11-16 dargestellt. Um zur Berechnung des Schlupfs die Reichweite um die notwendigen Zeiten zum Heben der Materialien sowie zum Abstellen des ersten Materials eines Transportauftrages zu verringern, ist die Information über die zu transportierende Menge, die durch den Transportauftrag vorgesehen ist, zu berücksichtigen. Diese wird als Information „Transportmenge“ über den Transportprozessen vom Typ 10, 20 und 40 modelliert. Die Zeiten zum Heben von Materialien sowie zum Abstellen sind als fixe Werte definiert und als Information der Informationsart *assoziierte Information* über den entsprechenden Transportprozessen modelliert.

Die eigentliche Steuerungsentscheidung, also welcher Transportauftrag als nächstes bearbeitet wird, wird durch die die Transporte durchführenden Prozessschritte getroffen. Dazu benötigen diese Prozessschritte den berechneten Schlupf. Diese Information wird als Informationsart *zu verarbeitende Information* durch die Information „Schlupf“ an die entsprechenden Prozessschritte übergeben und für jeden Transportauftrag separat aktualisiert.

Die Ermittlung des Schlupfs eines Transportauftrages wird jeweils berechnet, indem die Kapazität je Drahtring durch die dafür vorgesehene Taktzahl dividiert wird, zuzüglich einer möglichen erforderlichen Rüstzeit beziehungsweise der Zeit, die benötigt wird, um das Material in die Maschine einzusetzen. Das Ergebnis dieser Berechnung wird im Informationsbeschreibungsblock „Bearbeitungsdauer“ angegeben. Im Informationsverarbeitungsbaustein, der zum Informationsbeschreibungsblock „Verbleibende Bearbeitungsdauer“ hinführt, wird die Kapazität des aktuell in Bearbeitung befindlichen Drahtrings um den Bearbeitungsfortschritt reduziert und die verbleibende Kapazität durch die Taktzahl dividiert. Befindet sich der Produktionsauftrag aktuell im Rüstvorgang, so wird dem zuvor ermittelten Wert die verbleibende Rüstzeit hinzugefügt. Diese wird ermittelt, indem die Rüstzeit um die seit dem Start des Rüstens verstrichene Zeit reduziert wird. Befindet sich eine Umformmaschine in einem geplanten Stillstand, so wird als verbleibende Bearbeitungsdauer die bis zum Start des Produktionsauftrages verbleibende Zeit angegeben. Die Summe der ermittelten Informationen „Bearbeitungsdauer“ und „Verbleibende Bearbeitungsdauer“ wird im Informationsverarbeitungsbaustein, der zum Informationsbeschreibungsblock „Transportauftrag“ führt, berechnet. Diese Summe wird um die Zeiten zur Aufnahme der Materialien sowie um die Dauer zum Abstellen des ersten Materials reduziert. Die Zeit zum Aufnehmen der Materialien ergibt sich aus der Multiplikation der Transportmenge mit der Hebezeit. Auf eine genaue Berechnung der benötigten Transportzeit, die in der vollständigen Berechnung des Schlupfs berücksichtigt werden müsste, wird bereits an dieser Stelle verzichtet, da zu dessen hinreichend genauen Bestimmung zu viele Unwägbarkeiten bestehen würden, wie beispielsweise der aktuelle Ort der Transportressource zum Zeitpunkt der Auswahl des nächsten Transportauftrages sowie die Zugänglichkeit zu den zu transportierenden Drahtringen.

Der Informationsbeschreibungsblock „Transportauftrag“ spiegelt in diesem Zusammenhang den vollständigen Transportauftrag wider, der durch das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* erzeugt wurde, ergänzt um den Schlupf zur Priorisierung.

Für Transporte vom Transporttyp 30 wird die Reichweite ermittelt, ab wann keine Materialien mehr auf den Pufferplätzen nach der Vorverarbeitung abgestellt werden können und somit die jeweilige Vorverarbeitungsmaschine „geblockt“ wäre. Wie bereits in der Auswahl und Modifikation des Steuerungsverfahrens beschrieben, wird den Pufferplätzen eine maximale Lagerkapazität von sechs Materialien zugeordnet, da vor der Vorverarbeitung nicht bekannt ist, wie hoch der Kapazitätsbedarf eines Drahtrings nach der Vorverarbeitung sein wird. Diese maximale Lagerkapazität wird als „Maximaler Bestand“ bezeichnet, den Puffern nach der Vorverarbeitung zugeordnet und als statische Information angesehen. Somit wird diese Information als *assoziierte Information* modelliert. Zur Ermittlung, wie viele Materialien noch auf dem Pufferplatz abgestellt werden können, ist zudem die Information über den aktuellen Bestand auf dem Pufferplatz erforderlich. Diese wird als Informationsart *zu verarbeitende Information* modelliert. Schließlich ist noch ein fixer Wert erforderlich, der die Reichweite bis zu einer möglichen Blockade der vorverarbeitenden Maschine angibt, sollte nicht ausreichend Material in oder vor der vorverarbeitenden Maschine vorhanden sein, sodass eine Blockade tatsächlich auftreten könnte. Durch diesen fixen Wert kann diesen Transportaufträgen ebenfalls eine Priorität zugeordnet werden. Dieser fixe Wert wird als Information „Fixe Reichweite“ der Informationsart *assoziierte Information* modelliert. Da im Rahmen der Berechnung des Schlupfs von Transportaufträgen des Transporttyp 30 nur die Hebezeit des ersten Materials berücksichtigt wird, wird nur diese über dem zugehörigen Transportprozess als Informationsart *assoziierte Information* modelliert.

Die Reichweite bis zu einer Blockade der vorverarbeitenden Maschine wird ermittelt, indem aus der Differenz des maximalen Bestands und dem aktuellen Bestand berechnet wird, wie viele Materialien theoretisch noch auf den Pufferplätzen abgestellt werden können. Anschließend werden die Bearbeitungszeiten, identisch wie bei den Transportaufträgen der Transporttypen 10, 20 und 40, der Drahtringe ermittelt, bis die Anzahl der berücksichtigten Drahtringe der zuvor ermittelten Differenz entspricht. Auch diesen Bearbeitungszeiten sind die Rüstzeiten beziehungsweise Zeiten für das Einsetzen eines neuen Materials hinzuzufügen. Die Summe dieser Bearbeitungszeiten ergibt schließlich die Reichweite des Transportauftrages, bis es zu einer Blockade der vorverarbeitenden Maschinen kommt. Durch eine Reduzierung dieser Reichweite um die Hebezeit eines Materials wird schließlich der entsprechende Schlupf ermittelt.

Eine Besonderheit bei dieser Art der Berechnung des Schlupfs für Transporte vom Transporttyp 30 ist, dass mehrere Transportaufträge vom gleichen Pufferplatz ausgehend identische Restreichweiten besitzen können und somit theoretisch die gleiche Priorität haben. In diesem Fall ist durch die den Transport durchführenden Mitarbeitenden eigenständig, idealerweise in Abhängigkeit der Zugänglichkeit zu den Drahtringen, ein Transportauftrag auszuwählen, der als erstes bearbeitet wird.

Die zuvor beschriebenen Informationen und Informationsflüsse des Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* sind entsprechend der Notation im erweiterten Wertstromdiagramm in Abbildung 11-16 dargestellt.

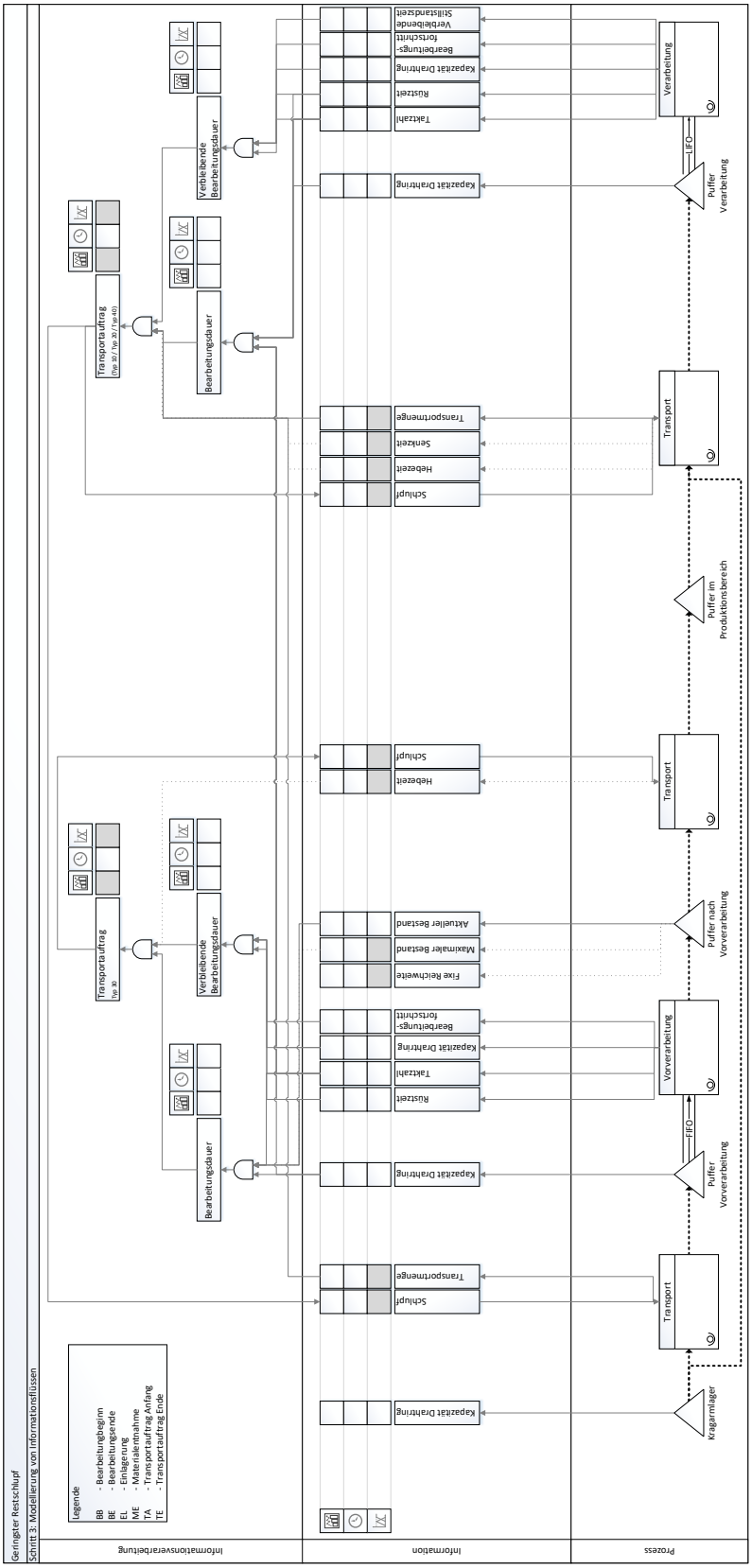

Abbildung 11-16: Um Informationsflüsse zum Verfahren *Geringster Restschlupf* erweitertes Wertstromdiagramm

Evaluierung

Innerhalb dieses Methodenschrittes wurde die Hypothese H-TFF4.1 *„Die Unterteilung des Wertstromdiagramms mittels Swimlanes in die Bereiche Prozess, Information und Informationsverarbeitung ermöglicht eine strukturierte Modellierung der Informationsflüsse, die durch die eingeführte Symbolik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modelliert werden können, sodass alle bis zur Durchführung von Methodenschritt 3 bekannten und relevanten Aspekte zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik durch eine harmonisierte Informationsqualität abgebildet werden können."* erneut evaluiert. Dies erfolgte anhand des Kriteriums „Abbildbarkeit der Informationen und Informationsflüsse des Steuerungsverfahrens gegeben".

Auch für das Steuerungsverfahren *Geringster Restschlupf* hat sich die eingeführte Struktur des Wertstromdiagramms und die erweiterte Symbolik grundsätzlich für eine angemessene, nachvollziehbare und übersichtliche Modellierung der Informationsflüsse im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse für dieses Anwendungsbeispiel geeignet und konnte als Kommunikationsmedium im Rahmen des Verbesserungsprojektes eingesetzt werden. Somit kann das der Hypothese zugehörige Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden.

Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität

Anwendung des Schrittes

Im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität wurden die IQ-Dimensionen *Granularität*, *Frequenz* und *Verlässlichkeit* der in Schritt 3 modellierten Informationen und Informationsflüsse analysiert und die jeweiligen Anforderungen an diese abgeleitet. Diese Harmonisierung wird nachfolgend für jede IQ-Dimension separat beschrieben.

IQ-Dimension: Granularität

Zur Priorisierung der Bearbeitung der durch das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* generierten Transportaufträge benötigen die Transportprozessschritte eine Liste der offenen Transportaufträge, aus der hervorgeht, in welcher Reihenfolge es an den Maschinen zu Stillständen durch Materialflussabrisse (Transportaufträge vom Transporttyp 10, 20 und 40) oder zu einer Blockierung der Maschine kommt, da das Material nicht abgestellt werden kann (Transportaufträge vom Transporttyp 30). Dies kann beispielsweise in Form der Reichweite bis zum erwarteten Eintreten des Ereignisses in Minuten als aufsteigend sortierte Liste oder durch anhand dieser Liste vergebenen Prioritätskennzahlen angegeben werden. Im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* wurde entschieden, dass der Schlupf in Minuten und nicht durch Prioritätskennzahlen angegeben wird. Die Angabe in Minuten hat den Vorteil, dass die Mitarbeitenden, die die Transportprozesse durchführen, einen direkten Eindruck über die Dringlichkeit des auszuwählenden Transportauftrages haben und dies in weitere Entscheidungen einfließen lassen können, wie beispielsweise der Einplanung von Pausen.

Die Bearbeitungsdauern von Materialien an den vorverarbeitenden sowie an den verarbeitenden Maschinen unterscheiden sich stark voneinander, wie im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens* bereits ermittelt wurde. Aus diesem Grund würde durch eine Vereinheitlichung der Bearbeitungsdauern der Materialien eine starke Abweichung der berechneten Bedarfszeitpunkte von den realen Bedarfen entstehen und die Priorisierung der Transportaufträge würde ähnlich dem Vorgehen, wie es in der Analyse der Ist-Situation beschrieben wurde, durchgeführt werden. Aus diesem Grund wird die Bearbeitungsdauer für die Vorverarbeitung sowie für die Verarbeitung für jeden Drahtring einzeln berechnet.

Zur individuellen Berechnung der Bearbeitungsdauer eines Drahtrings wird die Information „Kapazität Drahtring“ in der *Granularität* Stück erfasst. Diese beschreibt die Anzahl an Verbindungselementen, die aus einem Drahtring generiert werden können. Die Kapazität eines Drahtrings wird anhand des Gewichts des Drahtrings ermittelt, indem dieses durch das Referenzgewicht eines zu produzierenden Verbindungselements dividiert wird. Die Taktzahl, die die Geschwindigkeit der Bearbeitung der Drahtringe angibt, wird in der *Granularität* Stück pro Minute angegeben und entspricht der Einstellung, die an den Maschinen jeweils vorgenommen werden können. Die sich aus der Division dieser Informationen ergebende Bearbeitungszeit in Minuten ist um eine mögliche Rüstzeit oder, sofern die Maschine bereits für den Produktionsauftrag eingerüstet ist, um eine Zeit für das Einsetzen des Materials zu ergänzen. Diese ist, angeglichen an die berechnete Bearbeitungszeit, ebenfalls in der *Granularität* Minuten zu erfassen. Zur Berechnung des Bearbeitungsfortschrittes des sich aktuell in den Maschinen befindlichen Materials wird dessen Bearbeitungsfortschritt benötigt. Dieser kann in der verstrichenen Zeit in Minuten angegeben werden, seitdem sich der Drahtring auf der Maschine (sowohl auf den vorverarbeitenden Maschinen als auch auf den Umformmaschinen) in Bearbeitung befindet, sodass die verbleibende Bearbeitungsdauer sich aus der Differenz der geplanten Bearbeitungsdauer und der davon bereits verstrichenen Zeit ergibt. Durch diese Angabe würden jedoch mögliche ungeplante Stillstände der Maschinen nicht berücksichtigt werden, da in der Berechnung auf Basis dieser Größe von einer kontinuierlichen Bearbeitung in konstanter Geschwindigkeit ausgegangen werden würde. Die Vernachlässigung möglicher Stillstände ist an den vorverarbeitenden Maschinen unproblematisch, da diese nach Einsetzen eines Materials in der Regel einem sehr robusten Bearbeitungsprozess folgen, der sehr wenig anfällig gegenüber Störungen ist und in der Regel mit der geplanten Taktzahl abläuft. Somit konnte bei diesen Maschinen von einer kontinuierlichen Bearbeitung in konstanter Geschwindigkeit ausgegangen und der Bearbeitungsfortschritt in Minuten angegeben werden. An den Umformmaschinen treten jedoch häufig, insbesondere durch Verschleiß der Werkzeuge im Rahmen des Umformprozesses, ungeplante Stillstände auf. Um diese möglichen Stillstände der Maschinen in der Berechnung der verbleibenden Reichweite zu berücksichtigen, wird der Bearbeitungsfortschritt in Stück angegeben. Aus diesem lässt sich somit anhand der Anzahl der verbleibenden zu produzierenden Stück des eingesetzten Drahtrings berechnen, wie hoch deren verbleibenden Bearbeitungszeit ist. Die berechnete verbleibende Bearbeitungsdauer basiert dabei auf der geplanten Taktzahl, da keine Prognosen in die Berechnung mit inbegriffen sind, wie sich die Taktzahl für die verbleibende Zeit entwickeln wird. Da die reale Taktzahl an den Umformmaschinen durch die Maschinenbedienenden nicht höher eingestellt wird als die geplante Taktzahl, wird bei einer Abweichung der realen Taktzahl von der geplanten Taktzahl die Bearbeitungsdauer immer unterschätzt und somit ein zugehöriger Transportauftrag gegebenenfalls höher priorisiert.

Befindet sich die Umformmaschine in einem geplanten Stillstand, so wir die Information „Verbleibende Stillstandszeit“ in Minuten angegeben.

Wie bereits in Schritt 3 im Rahmen der Modellierung der Informationsflüsse beschrieben, kann vor der Vorverarbeitung noch keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe gegenüber den rohen Drahtringen verändern wird. Aus diesem Grund wird der aktuelle Bestand auf den Pufferplätzen nach den vorverarbeitenden Maschinen als Anzahl an Drahtringen angegeben. An diese Granularitätsstufe wird die Information „Maximaler Bestand“ angeglichen. Die „Fixe Reichweite“, sofern keine Blockierung der vorverarbeitenden Maschinen droht, die den Transportaufträgen des Transporttyps 30 zugeordnet wird, wird angeglichen an die definierte *Granularität* des zu übermittelnden Schlupfs in Minuten angegeben.

Um den Schlupf zu berechnen sind noch die „Hebe-“ und „Senkzeiten“ der Transportressource zu berücksichtigen sowie die zu transportierenden Mengen. Die „Hebe-“ und „Senkzeiten“ werden in der *Granularität* Minuten pro Stück angegeben, die Anzahl zu transportierender Drahtringe in der *Granularität* Stück.

Die ermittelten Anforderungen an die IQ-Dimension *Granularität* sind in Abbildung 11-18 in die entsprechenden Platzhalter der Informationsbeschreibungsblöcke eingetragen. Die durchgängige Normierung der Zeitangaben auf Minuten wurde maßgeblich durch die Einstellmöglichkeiten der Taktzahl (in Stück pro Minute) an den Umformmaschinen bestimmt. Diese Granularität wurde als ausreichend angesehen. Die detaillierte Ermittlung und Angabe des Schlupfs in Sekunden würden im Rahmen der Auswahl des nächsten zu bearbeitenden Transportauftrages zu keinem signifikanten Mehrwert führen.

IQ-Dimension Frequenz

Im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* wurde zunächst ermittelt, wann sich die realen Sachverhalte, die durch die Informationen abgebildet werden, ändern. Die Materialkapazitäten der Drahtringe auf den Pufferplätzen ändern sich, wenn entweder ein Transportauftrag beendet wird, also das Material dort abgestellt wurde (Erhöhung der dort vorhandenen Materialkapazität), oder eine Materialentnahme durch die die Drahtringe bearbeitenden Prozessschritte durchgeführt wurde (Reduktion der dort vorhandenen Materialkapazität). Die reale Restlaufzeit des sich in Bearbeitung befindlichen Materials ändert sich kontinuierlich, ebenso die geplante Stillstandszeit, bis zum Beginn des nächsten Produktionsauftrages. Hierzu wird die Angabe minütlich gewählt, da dies mit der in der Granularität definierten Einheit einhergeht. Die zu berücksichtigende Rüstzeit, die Taktzahl sowie die Kapazität des Drahtrings, der sich aktuell in Bearbeitung einer Maschine befindet, ändern sich jeweils zu Beginn einer Vor-/Verarbeitung. Der aktuelle Bestand auf den Pufferplätzen nach der Vorverarbeitung ändert sich, wenn entweder die Vorverarbeitung eines Materials abgeschlossen wurde oder durch die Bearbeitung eines entsprechenden Transportauftrages das Material entnommen wird.

Für die Berechnung der Restreichweite wird aus diesen unterschiedlichen Aktualisierungsfrequenzen die Aktualisierung jede Minute ausgewählt und in den jeweils zugehörigen Informationsbeschreibungsblock eingetragen. Somit würde bei Generierung eines Transportauftrages sich diese Information minütlich ändern und diese Änderung auch minütlich den Transportprozessen angezeigt werden.

Im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* ist zudem vorgesehen, dass mögliche zeitliche Abweichungen der Informationsaktualisierung von den durch sie repräsentierten realen Gegebenheiten ermittelt werden. Mögliche verzögerte Aktualisierungen würden bei dieser Berechnung der Steuerungsentscheidung keine Auswirkungen haben, wie es beispielsweise bei der Generierung der Transportaufträge möglich wäre. In diesem Fall wird hingegen nur eine Kenngröße des Transportauftrages verändert. Wird zum Beispiel der Bearbeitungsfortschritt an einer Umformmaschine verspätet aktualisiert, so ändert dies zwar verspätet den angegebenen Wert des Schlupfs, jedoch wurde dieser mindestens in Verbindung mit der Generierung eines Transportauftrages bereits einmal berechnet und steht somit zur Verfügung. Eine verspätete oder verfrühte Aktualisierung könnte in diesem Fall eine Auswirkung auf die *Verlässlichkeit* der Information haben. Dies wird im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* beschrieben. Somit erfolgt keine gesonderte Berechnung möglicher Toleranzgrenzen, bis zu denen es zu keinen Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit der Prozesse kommt. Durch die kontinuierliche Berechnung des Bearbeitungsfortschrittes an den Umformmaschinen werden auch ungeplante Stillstände berücksichtigt. Somit müssen diese nicht separat im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Frequenz* berücksichtigt werden. Eine Berücksichtigung dieser erfolgt im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*.

IQ-Dimension Verlässlichkeit

Zur Bestimmung der Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Information Schlupf, wurde zunächst das Steuerungsverfahren analysiert, um kritische Entscheidungssituationen zu identifizieren. Da das Steuerungsverfahren den noch ausstehenden Transportaufträgen Prioritäten in Abhängigkeit des verbleibenden Schlupfs zuordnet, ändert sich die aktuelle Entscheidung der Auswahl des nächsten Transportauftrages aufgrund einer schlechten Qualität der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* immer dann, wenn die Information über die Restreichweite des eigentlich auszuwählenden (auf Basis der realen Reichweite) Transportauftrags derart überschätzt wird, sodass diese die Restreichweite inklusive vorhandener Abweichungen den als nächst höher priorisierten Transportauftrag übersteigt. In diesem Fall kommt es zu einer Vertauschung in der Abarbeitung von Transportaufträgen. Dies tritt auch immer dann ein, wenn die Information über die Restreichweite des nächsthöheren Transportauftrags die Restreichweite des eigentlich am höchsten priorisierten Transportauftrags (sofern die realen Daten verwendet worden wären) unterschreitet. Durch diese Vertauschung möglicher Transportaufträge besteht die Möglichkeit, dass Verlängerungen von Wartzeiten auf Material an den Maschinen auftreten. Dies tritt jedoch nur dann auf, wenn der berechnete reale Schlupf des eigentlich auszuwählenden Transportauftrages geringer ist als die Summe der Transportdauern, die notwendig wären, um den eigentlich am höchsten sowie am zweithöchsten priorisierten Transportauftrag durchzuführen. Ist der Schlupf größer als diese Dauern, so hätte eine Vertauschung der Transportaufträge keine Konsequenz, da der Restschlupf beider Transportaufträge nach erfolgreicher Durchführung noch immer größer null ist und somit kein Materialflussabriss beziehungsweise keine Blockierung durch fehlende Kapazitäten auf den Puffern nach den vorverarbeitenden Maschinen entsteht.

Im Gegensatz zur Bestimmung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen zur Ermittlung der Transport- und Abstellmengen liegen zur Bestimmung dieser Anforderungen bei der Berechnung des Schlupfs keine verfügbaren Daten vor. Ebenfalls besteht nicht uneingeschränkt die Möglichkeit, auf Basis des vorhandenen Prozesses eine repräsentative Stichprobe zu erheben, auf deren Basis die Anforderungserhebung durchgeführt werden könnte. Das Erheben einer Stichprobe ist nicht uneingeschränkt möglich, da dazu alle notwendigen Daten zunächst manuell zusammengetragen werden müssten, um den Schlupf zu berechnen. Während dieser Zeit müsste der Transportprozess so lange auf das Ergebnis der Berechnung warten, um sich entsprechend des Steuerungsverfahrens zu verhalten. Durch diese Wartezeiten würde es zu einer Reduktion der Effizienz in den Materialbereitstellungsprozessen kommen, sodass vermehrt Materialflussabrisse entstehen würden. Somit würde die Erhebung der Stichprobe zu Lasten der operativen Leistung führen, was nicht verhältnismäßig in diesem Zusammenhang ist. Da die Definition der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* jedoch trotzdem auf Basis einer Datengrundlage erfolgen soll, wurde ein Simulationsmodell erstellt, durch das ein geeigneter Datensatz generiert werden kann. In diesem Simulationsmodell ist sowohl das *sich dynamisch anpassende Bestellbestandsverfahren* als auch die Reihenfolgebildung der Bearbeitung der Transportaufträge nach dem Verfahren G*eringster Restschlupf* implementiert. Die Informationen über die Längen der Drahtringe, die im Rahmen der Generierung der Transportaufträge benötigt werden, entsprechen der *Verlässlichkeit*, die im Rahmen des ersten Anwendungsbeispiels definiert wurden. Die Verlässlichkeit des Schlupfs innerhalb des Simulationsmodells wird als ideal angenommen, sodass es zu keinen Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit durch diese IQ-Dimension kommt. Die *Granularität* der dem Simulationsmodell zur Verfügung stehenden Daten entspricht derjenigen, die zuvor im Rahmen der Anforderungserhebung an die IQ-Dimension *Granularität* ermittelt wurde. Die Frequenz der Aktualisierung der Informationen erfolgt dabei zunächst unverzüglich zu den im Prozess entsprechenden realen Zeitpunkten beziehungsweise kontinuierlich.

Um zu bestimmen, wann eine mögliche Vertauschung von durchzuführenden Transportaufträgen aufgrund eines von den realen Gegebenheiten ermittelten abweichenden Schlupfs auch tatsächlich eine Konsequenz haben könnte, wurde mittels des erstellten Simulationsmodells ein Datensatz generiert, der den Schlupf zu Beginn der Durchführung eines Transportauftrages darstellt. Der Schlupf wurde auf dieser Basis als Fuzzy-Zahl modelliert und ist in Abbildung 11-17 links dargestellt.

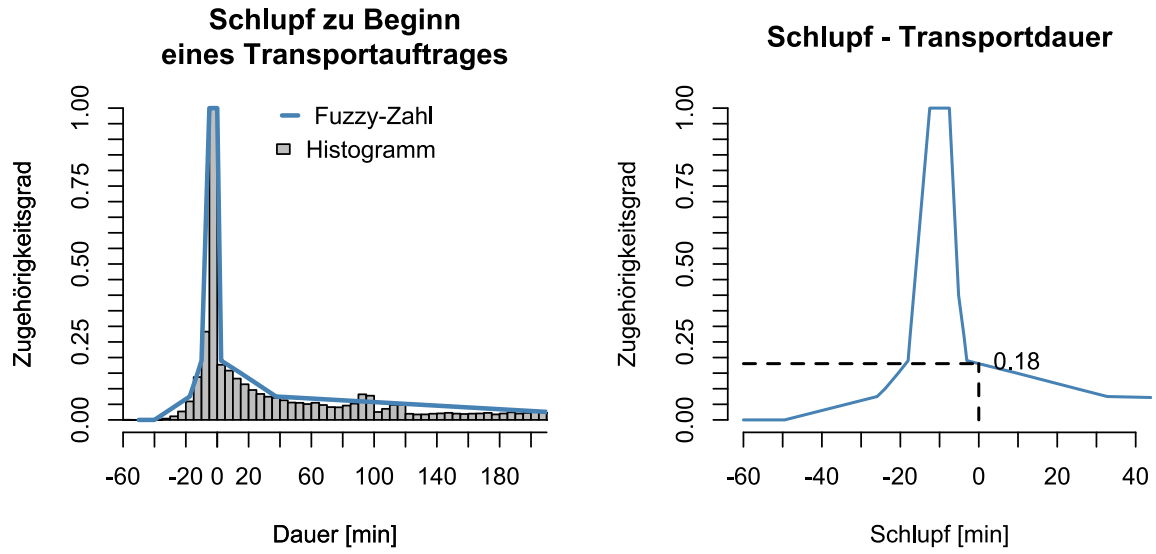

Abbildung 11-17: Schlupf zu Beginn von Transportaufträgen (links) und Schlupf abzüglich Transportzeit (rechts)

Aus der modellierten Fuzzy-Zahl geht hervor, dass die Durchführung der Transportaufträge häufig erst kurz vor einem drohenden Materialflussabriss beziehungsweise vor einer möglichen Blockade der vorverarbeitenden Maschinen begonnen wird. Da in die Berechnung des Schlupfs die Bearbeitungszeiten der sich auf den Pufferplätzen befindenden Materialien mit eingeht, konnte geschlussfolgert werden, dass sich zu diesen Zeitpunkten oftmals keine Materialien mehr auf den Pufferplätzen befinden. Dadurch wurde die Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Information „Kapazität Drahtring“ auf den entsprechenden Pufferplätzen als *sehr gering* eingeschätzt. Somit ist die Information „Verbleibende Bearbeitungsdauer“ die ausschlaggebende Größe, die maßgeblich die Auswahl des nächsten zu bearbeitenden Transportauftrages anhand des Schlupfs beeinflusst. Auch die Rüstzeit ist in diesem Zusammenhang von geringer Bedeutung, da bei einem kurz vor einem Materialflussabriss drohenden Beginn das Rüsten bereits erfolgte. Somit wurde auch der Rüstzeit eine Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* von *sehr gering* zugeordnet

Zieht man die Transportdauer vom Schlupf zu Beginn der Durchführung eines Transportauftrages ab, dargestellt als Fuzzy-Zahl in Abbildung 11-17 rechts, ist zu erkennen, dass sehr häufig die Möglichkeit besteht, dass eine mögliche Vertauschung von Transportaufträgen zu einer Verlängerung der Wartezeit auf Materialien beziehungsweise zu einer Blockade der vorverarbeitenden Maschinen führt. So ist mit einem Zugehörigkeitsgrad von 0,18 an der Stelle null die Möglichkeit als *sehr gering* einzuschätzen, dass ein Vertauschen von Transportaufträgen zu keiner Auswirkung führt, da die Restreichweite nach Bearbeitung beider vertauschter Transportaufträge eine verbleibende Reichweite geringer null betragen würde. Aus der

Interpretation, dass die Möglichkeit einer Tolerierung einer Vertauschung sehr gering ist, wurde geschlussfolgert, dass die Anforderung an die Information „Verbleibende Bearbeitungsdauer“ *sehr hoch* ist.

Die Auswirkungen bei Eintritt einer Vertauschung der Bearbeitungsreihenfolge von aufeinanderfolgenden Transportaufträgen werden als gering eingeschätzt, da die Summe der Wartezeiten auf Materialien an den Maschinen unabhängig von der Bearbeitungsreihenfolge ist, sofern es bei beiden Maschinen zu einem Materialflussabriss kommen würde. In diesem Fall würde eine Vertauschung, bei identisch benötigter Dauer zur Durchführung der jeweiligen Transportaufträge, lediglich zu einer Änderung der Aufteilung der Wartezeiten auf Material führen. Bei unterschiedlichen Dauern zur Durchführung der Transportaufträge kann es hingegen zu einer Veränderung der Summe der Wartezeiten auf Material an den Maschinen kommen. Diese beträgt dann die Differenz der Transportdauern der jeweiligen Transportaufträge. Aus der Spannweite der als Fuzzy-Zahl modellierten Transportdauer (dargestellt in Abbildung 11-5) kann ermittelt werden, dass diese Auswirkung höchstens bei etwa 5,5 Minuten liegen würde, sofern der längst mögliche mit dem kürzest möglichen Transportauftrag vertauscht wird. Diese maximale Auswirkung wird als tolerierbar eingeschätzt, sodass sie erforderliche Investitionen oder Aufwände zur Erfassung für eine sehr verlässliche Information über die Restreichweite nicht rechtfertigen würde. Auf Basis dieser Analyse wurde die Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* korrigiert und als *teils-teils* definiert. Diese Anforderung wurde in den Platzhalter der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* des Informationsbeschreibungsblocks der Zwischengröße „Verbleibende Restbearbeitungsdauer“ in Abbildung 11-18 eingetragen, sowohl für die Berechnung des Schlupfs von Transportaufträgen vom Transporttyp 10, 20 und 40 sowie von Transportaufträgen vom Transporttyp 30.

Da sich diese Zwischengröße aus verschiedenen dynamisch ändernden Informationen der Informationsart *zu verarbeitende Information* zusammensetzt, wird diese ermittelte Anforderung auf die eingehenden Informationen übertragen, mit Ausnahme der Rüstzeit, deren Anforderung bereits zuvor als *sehr gering* bewertet wurde.

Abschließend ist die Anforderung an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Information „Aktueller Bestand“ zu bestimmen. Eine Abweichung dieser Information würde dazu führen, dass entweder zu viele oder zu wenige Bearbeitungsdauern der Materialien, die sich auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen oder in der vorverarbeitenden Maschine befinden, berücksichtigt werden. Eine solche Abweichung hat eine sehr hohe Auswirkung, da dadurch der Schlupf um die durch die Abweichung des aktuellen Bestands nicht berücksichtigten Vorverarbeitungszeiten verändert wird. Aus diesem Grund wird der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Information „Aktueller Bestand“ die Anforderung *sehr hoch* zugeordnet.

Die ermittelten Anforderungen an die IQ-Dimensionen des Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* sind in Abbildung 11-18 in den entsprechenden Platzhaltern der Informationen dargestellt.

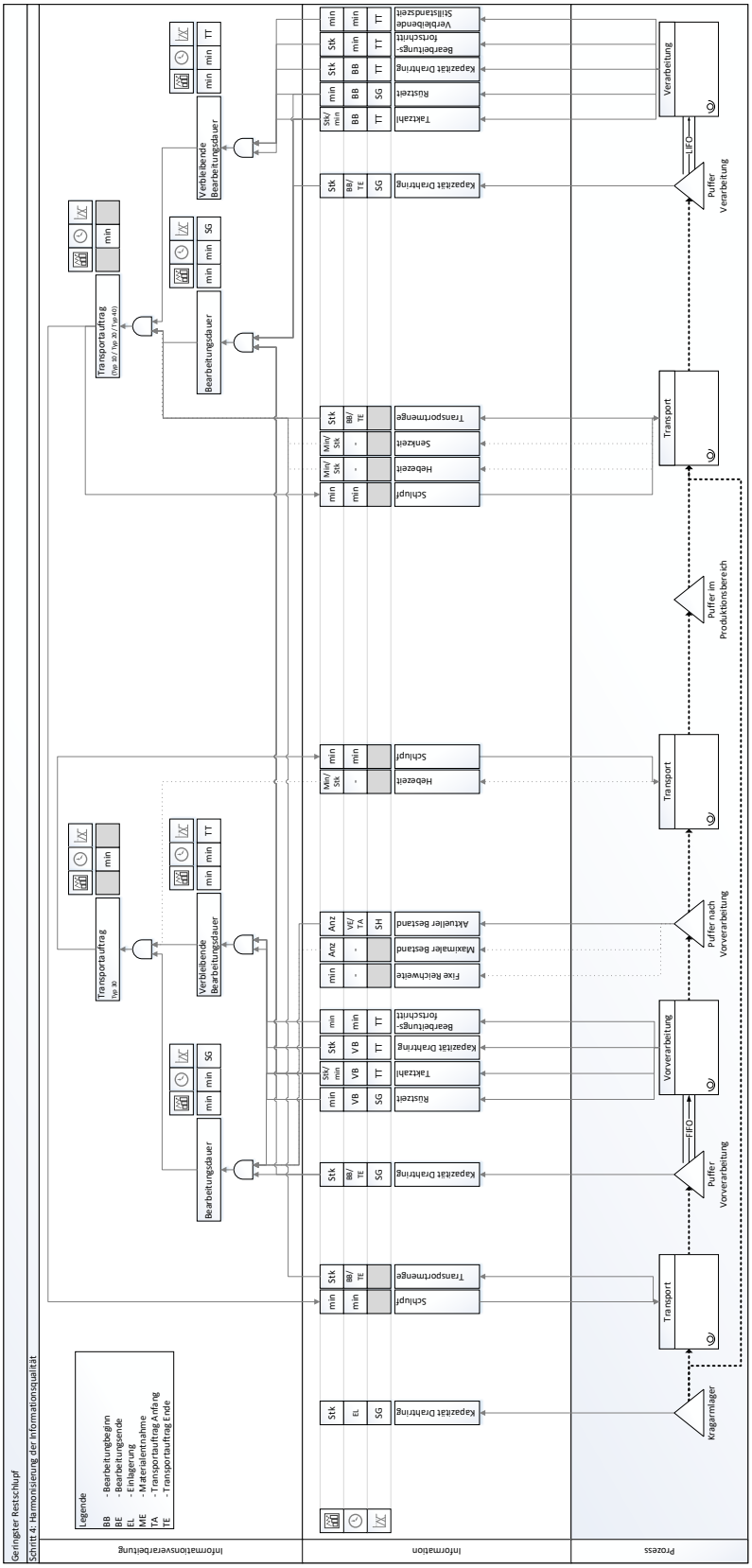

Abbildung 11-18: Um Anforderungen an die IQ-Dimensionen erweitertes Wertstromdiagramm für das Steuerungsverfahren *Geringster Restschlupf*

Evaluierung

Im Rahmen der in Hypothese H-TFF5.1 *„Die Anforderungen an die IQ-Dimension Granularität für die zu betrachtenden Informationen lassen sich durch eine Identifikation der wertmaximierenden Granularität der Informationen im direkten Nutzungskontext bestimmen, von der ausgehend, Informationsfluss-aufwärts bis zur Informationsquelle, die Granularitäten der eingehenden Informationen abgeleitet werden können, sodass diese jeweils die zu berücksichtigenden Sachverhalte zur Generierung der Ausgangsinformation ausreichend widerspiegeln."* vorgeschlagenen Vorgehensweise wurden passende Granularitätsstufen in den Informationssenken ermittelt. Als wertmaximierend kann diese jedoch nicht bezeichnet werden, da die Wahl einer anderen Granularitätsstufe für den Schlupf, wie beispielsweise durch die Angabe der Prioritätskennzahl, zu keiner Beeinträchtigung der Auswahl des Schlupfs führen würde. Ausgehend von der geforderten Granularität in der Informationssenke konnten jedoch die erforderlichen Anforderungen an die IQ-Dimension *Granularität* der in das Steuerungsverfahren eingehenden Informationen ermittelt werden. Dadurch können die zur Evaluierung der Hypothese definierten Evaluierungskriterien als erfüllt angesehen werden.

Die im Rahmen der Ermittlung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Frequenz* bestimmten Ereignisse, zu denen sich die realen Sachverhalte der Informationen ändern, die sich nicht kontinuierlich im Zeitverlauf verändern, wurden durch ein Simulationsmodell bestätigt. Dazu wurden, identisch wie in Anwendungsbeispiel 1, die im Wertstromdiagramm eingetragenen Ereignisse verwendet, um die realen Sachverhalte sowie die zugehörigen Informationen im erstellten Simulationsmodell zu aktualisieren. Durch eine Verifikation und Validierung des Simulationsmodells wurde dessen Verhalten mit den realen Abläufen des Produktionssystems abgeglichen. Dadurch, dass das Simulationsmodell das Verhalten des realen Systems hinreichend genau abbildet und auf Basis der definierten Ereignisse im Wertstromdiagramm beruht, kann geschlussfolgert werden, dass die richtigen Ereignisse definiert wurden, zu denen sich die realen Sachverhalte ändern und somit auch die Informationen. Die Informationen, deren Sachverhalte sich im Zeitverlauf kontinuierlich anpassen, wurden im Simulationsmodell ebenfalls als sich kontinuierlich (minütlich zeitgesteuert) anpassende Informationen modelliert. Da das Steuerungsverfahren somit mit Informationen Steuerungsentscheidungen generieren konnte, die sich in der angegebenen Frequenz (minütlich) aktualisieren, kann auch diese Aktualisierungsfrequenz als „richtig ermittelt bestimmt" werden. Da keine Toleranzgrenzen für eine verfrühte und verspätete Aktualisierung der Informationen ermittelt wurden, bis zu denen es zu keinen Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit der Prozesse kommt, kann dies in diesem Anwendungsbeispiel nicht evaluiert werden. Somit kann das zur Evaluierung der Hypothese H-TFF5.2 definierte Kriterium nicht beurteilt werden.

Zur Evaluierung der Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen wurden im Rahmen einer Simulationsstudie die Auswirkungen von Abweichungen der *Verlässlichkeit* des berechneten Schlupfs der Transportaufträge untersucht. Diese Auswirkungen werden, wie bereits in Anwendungsbeispiel 1, anhand der mittleren Auslastung der Umformmaschinen analysiert, da sich beispielsweise eine Vertauschung von Transportaufträgen aufgrund einer geringen Verlässlichkeit des Schlupfs letztendlich auf diese Kennzahl auswirkt. Zur Evaluierung der Auswirkungen auf diese Kennzahl wurden die Informationen über die verbleibenden Bearbeitungsdauern auf drei Faktorstufen untersucht, sodass sie entweder gar nicht (Faktorstufe 1), bis zu 5 % (Faktorstufe 2) oder bis zu 10 % (Faktorstufe 3) der Gesamtbearbeitungsdauer eines Drahtrings abweichen. Die Abweichungen wurden modelliert als die Gesamtabweichung in der Bearbeitung eines Materials. Somit besteht die Abweichung bereits zu Beginn der Bearbeitung eines Drahtrings und ändert sich nicht konstant mit dem Fortschritt der Bearbeitung und wird dementsprechend auch in absoluten Zahlen nicht immer kleiner. Die absolute Abweichung bleibt hingegen über den

Bearbeitungsfortschritt konstant, sodass die relative Abweichung im Zeitverlauf zu nimmt. Die Effekte auf die mittlere Auslastung der Umformmaschinen durch die modellierten Abweichungen sind in Abbildung 11-19 dargestellt.

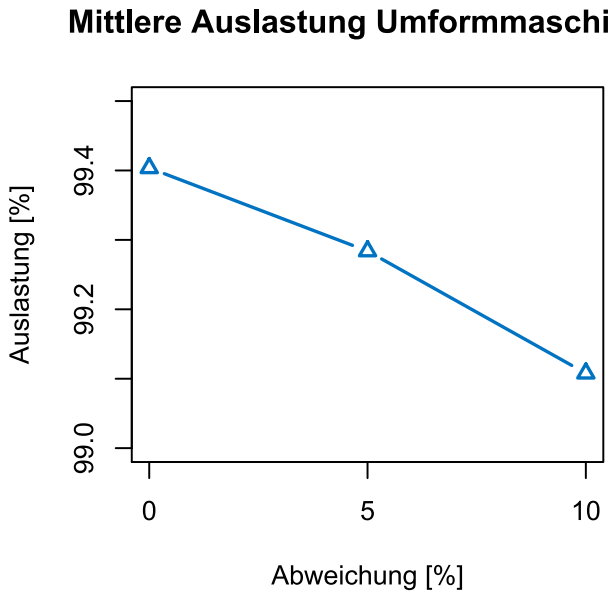

Abbildung 11-19: Effektdiagramm Verlässlichkeit Schlupf

Wie in Abbildung 11-19 dargestellt ist, führen bereits Abweichungen von 5 % zu einer erkennbaren Reduktion der mittleren Auslastung der Umformmaschinen. Dies kann als Bestätigung der ermittelten Anforderung angesehen werden, dass die Möglichkeit *sehr hoch* ist, dass eine Vertauschung der Transportaufträge aufgrund einer Beeinträchtigung der Verlässlichkeit durch den noch vorhandenen Schlupf nicht kompensiert wird. Der auftretende Effekt beläuft sich lediglich auf ca. 0,12 Prozentpunkten und bestätigt die vorgenommene Korrektur der Anforderung von *sehr hoch* auf *teils-teils*. Diese Korrektur unterliegt jedoch subjektiven Einflüssen, sodass nicht beurteilt werden kann, ob die abgeänderte definierte Anforderung korrekt ist.

Aus den zuvor aufgeführten Effekten durch Beeinträchtigungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit,* die anhand der Simulationsstudie nachgewiesen wurden, können die ermittelten Anforderungen als bestätigt angesehen werden und somit auch die Hypothese H-TFF5.3 beziehungsweise das dazu definierte Evaluierungskriterium.

Schritt 5: Detailplanung und Implementierung

Anwendung des Schrittes

Zur Umsetzung des Steuerungsverfahrens wurde im Rahmen von Schritt 5 die Detailplanung und Implementierung des einzusetzenden Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* ausgestaltet und modelliert.

Da das Steuerungsverfahren die im Rahmen des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahren* erzeugten Transportaufträge um deren Schlupfzeit ergänzt, wurde die Detailplanung an die dort definierte Struktur der Erfassung, Übermittlung (an die Prozessschritte) und Speicherung der Daten angelehnt. So wird der Schlupf eines Transportauftrages ebenfalls auf einem Tablet den Mitarbeitenden, die die Transportprozesse durchführen, zu dem entsprechenden Transportauftrag angezeigt und in der gleichen Tabelle gespeichert, in der auch die offenen Transportaufträge abgelegt sind. Auf diese Tabelle wird auch zurückgegriffen, um die Information über die Anzahl der zu transportierenden Materialien innerhalb eines

Transportauftrags zu erhalten. Die Hebe- und Senkzeiten sind der Transportressource zugeordnet. Diese Zeiten werden in der bereits vorhandenen Tabelle „Transporter“ in jeweils einer neuen Spalte in Form von Stammdaten gespeichert.

Die zur Berechnung der Reichweite beziehungsweise der Restbearbeitungsdauer benötigte Kapazität der Drahtringe wurde bisher ermittelt, indem die Drahtringe vor der Einlagerung gewogen werden und das Gewicht anhand eines Referenzgewichts in die mögliche Anzahl der zu produzierenden Verbindungselemente umgerechnet wird. Bei dieser Art der Ermittlung der Kapazität der Drahtringe kommt es zu geringen Abweichungen aufgrund von Messungenauigkeiten beim Wiegen sowie durch geringe Abweichungen der Gewichte der produzierten Verbindungselemente vom Referenzgewicht. Da die Anforderung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* an die Kapazität der Drahtringe jedoch in der maximalen Ausprägung *teils-teils* beträgt, wurden diese Abweichungen als tolerierbar angesehen, sodass diese Art der Informationserfassung beibehalten bleibt. Zudem wurde im Rahmen des Technologiescoutings keine wirtschaftlich lohnende Alternative identifiziert, mit der die Art dieser Informationsermittlung möglich gewesen wäre. Da die Kapazität der Drahtringe mit der Einlagerung im Kragarmlager für das Steuerungsverfahren bekannt wird, wurde die Information zusätzlich über diesem modelliert, sodass dies bei der Umsetzung des Steuerungsverfahrens berücksichtigt werden konnte. Die Kapazität der Drahtringe wird bereits in der Tabelle „Material“ für jeden Drahtring individuell gespeichert und wurde beibehalten. Auf diesen Wert wird jeweils im Rahmen der Berechnung der Reichweiten referenziert. Die Kapazitäten der Drahtringe auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen sowie vor den Umformmaschinen werden ermittelt, indem die Summe der Kapazitäten der Drahtringe ermittelt wird, die dem Lagerplatz zugeordnet sind, die jeweils zu den Senken der entsprechenden Transportaufträgen gehören. Somit ändert sich die Ausprägung der ermittelten Information zwar nicht mehr, jedoch erfolgt eine Änderung der zu berücksichtigenden Drahtringe mit denselben Ereignissen, zu denen auch die Längen der zu berücksichtigenden Drahtringe im *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahren* geändert wird (Entnahme zur Bearbeitung und Beendigung eines Transportauftrages). Die Kapazitäten der Drahtringe, die sich in den jeweiligen Maschinen befinden, wird ermittelt, indem das Material berücksichtigt wird, das dem entsprechenden Produktionsauftrag auf der Maschine zugeordnet ist und den Status „in Bearbeitung“ besitzt. Die Änderung des Status eines Materials auf „in Bearbeitung“ erfolgt, indem dessen individuelle Kennung durch die Maschinenbedienenden an einem BDE-Terminal gescannt wird. Zur Berechnung der „Verbleibenden Bearbeitungsdauer“ der sich in Bearbeitung befindenden Materialien in den vorverarbeitenden Maschinen wird die Differenz zwischen der aktuellen Zeit und dem Startzeitpunkt der Bearbeitung von der Summe der aus Rüstzeit, Kapazität des Drahtrings und Taktzahl ermittelten Bearbeitungszeit reduziert. Die Rüstzeiten, die Zeiten zum Wechsel eines Materials bei einer bereits eingerüsteten Maschine sowie die geplante Taktzahl sind in der Tabelle „Produktionsplan“ des ERP-Systems hinterlegt. Auf diese wird entsprechend des zu bearbeitenden Produktionsauftrages zurückgegriffen. Da der Prozess der Vorverarbeitung sehr robust abläuft, sind die Abweichungen der berechneten verbleibenden Bearbeitungsdauer und der realen Bearbeitungsdauer gering. Größere Abweichungen durch längere Stillstände der Maschinen treten hingegen selten auf, sodass entschieden wurde, dass dies nicht durch weitere Erfassungstechnologien oder durch gegebenenfalls auftretende Prozesskosten, indem die Mitarbeitenden dies stets aktuell dokumentieren müssen, zu ermitteln ist. Dies wurde auch schon bereits im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* berücksichtigt.

Im Gegensatz zu den vorverarbeitenden Maschinen treten bei den Umformmaschinen regelmäßig unterschiedlich lange ungeplante Stillstände auf, die unter anderem auf den Verschleiß der Umformwerkzeuge zurückzuführen sind. Um diese ungeplanten Stillstände in der Berechnung der verbleibenden

Bearbeitungsdauer nicht zu vernachlässigen, was zu einer regelmäßigen Unterschätzung der Dauern führen würde, wurde bereits im Rahmen der Harmonisierung der IQ-Dimension *Granularität* bestimmt, dass der Fortschritt der Bearbeitung in Stück kontinuierlich ermittelt werden soll. Dies soll ermöglichen, dass aus der Differenz der generierten Verbindungselemente und der Kapazität des sich in Bearbeitung befindlichen Drahtrings mittels der geplanten Taktzahl die verbleibende Bearbeitungsdauer ermittelt werden kann. Im Rahmen des Technologiescoutings wurden dazu zwei verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung des Bearbeitungsfortschrittes in der *Granularität* Stück identifiziert. Die erste identifizierte Möglichkeit besteht darin, dass die produzierte Stückzahl, ähnlich wie bei der Ermittlung der Kapazität der Drahtringe, kontinuierlich gewogen und über einen Umrechnungsfaktor bestimmt wird. Dazu müssten die Umformmaschinen mit Waagen unter den Sammelbehältnissen ausgestattet werden, in die die produzierten Verbindungselemente aus der Maschine automatisch abgeführt werden. Die Waagen müssen wiederum kontinuierlich das gemessene Gewicht in ein zu definierendes System rückmelden, in dem die verbleibende Bearbeitungsdauer berechnet werden kann. Durch diese Möglichkeit könnte der Bearbeitungsfortschritt in einer Verlässlichkeit ermittelt werden, wie es bereits durch das Wiegen der Drahtringe erfolgt. Eine weitere identifizierte Möglichkeit zur Erfassung der produzierten Stückzahl besteht in der Ausrüstung der Umformmaschinen mit einer sogenannten Kraft-Wege-Überwachung. In einem solchen System ist eine automatische Zähleinrichtung integriert, die aus den mechanischen Bewegungen der Umformmaschinen die produzierten Stückzahlen kontinuierlich ermittelt. Auch mit diesem System könnte eine ähnlich hohe Verlässlichkeit der Information „Bearbeitungsfortschritt“ wie mit den Wagen erreicht werden. Während die nachträglich zu integrierenden Waagen jedoch nur auf diesen einzelnen Anwendungsfall zur Berechnung des Schlupfs beschränkt wären, bieten die Systeme zur Kraft-Wege-Überwachung weitere Funktionalitäten, mit denen das Verhalten der Umformmaschinen besser im Detail analysiert werden kann. Dadurch können gegebenenfalls Maßnahmen identifiziert werden, durch die deren Stillstände, die sich aus der Produktion heraus ergeben, durch konstruktive Anpassungen der Maschinen und der Werkzeuge reduziert werden. Durch diese weitere Einsatzmöglichkeit wurde sich für die Erfassung des Bearbeitungsfortschrittes mittels der Kraft-Wege-Überwachung entschieden. Dieses System aktualisiert die produzierte Stückzahl an Verbindungselementen kontinuierlich und speichert dies in einer gesonderten Tabelle „Werkercockpit“ im ERP-System ab, da die auf dieser Tabelle bereits bestehenden Formulare explizit zur Informationsbereitstellung für sich dynamisch ändernde Informationen zu den Umformmaschinen und den vorverarbeitenden Maschinen entwickelt wurden. In dieser Tabelle wird auch der Bearbeitungsfortschritt an den vorverarbeitenden Maschinen zeitbasiert gespeichert.

Da die Rüstzeiten an den vorverarbeitenden Maschinen in der Regel nur geringfügig von den vorgesehenen Rüstzeiten abweichen, wird ein Abschluss des Rüstens nicht gesondert dokumentiert, sondern im Rahmen der verbleibenden Bearbeitungszeit berücksichtigt. Die Rüstzeit an den Umformmaschinen weicht hingegen häufiger von der geplanten Rüstzeit ab. Um dies zu berücksichtigen, wird, solange die Umformmaschine nichts produziert, angenommen, dass sie sich im Rüsten befindet. Ist die geplante Rüstzeit überschritten und die Bearbeitung ist noch nicht begonnen, so bleibt die verbleibende Reichweite so lange bei der Dauer, die für die Bearbeitung des Drahtrings vorgesehen ist. Dies wird dann geändert, sobald das System der Kraft-Wege-Überwachung ein produziertes Stück erfasst.

Befindet sich eine Umformmaschine in einem geplanten Stillstand, so wird die Information „Verbleibender Stillstand“ aus der Differenz der aktuellen Zeit und der Zeit bis zum geplanten Start der Bearbeitung berechnet. Der geplante Startzeitpunkt eines Produktionsauftrags ist in der Tabelle „Produktionsplan“ im ERP-System hinterlegt.

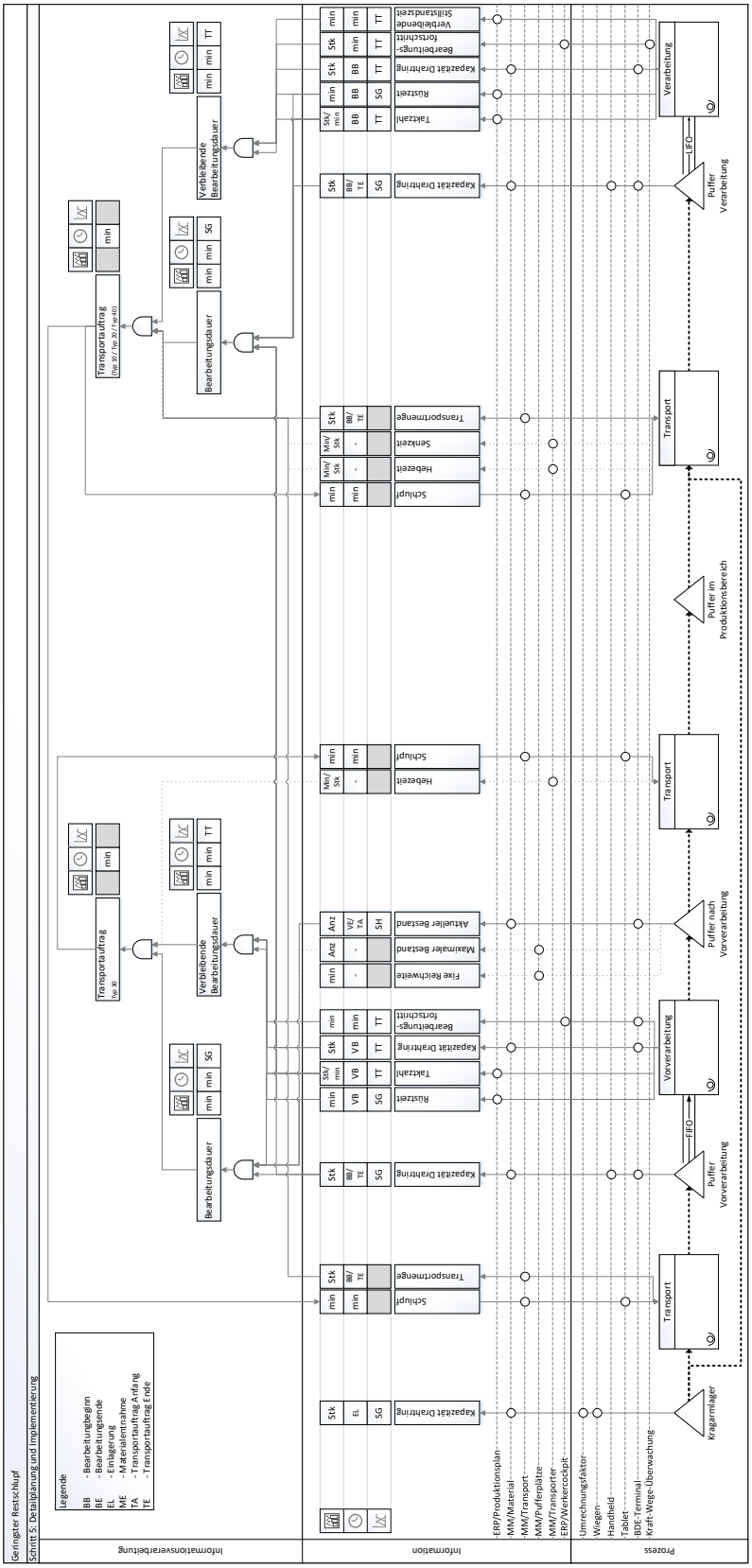

Abbildung 11-20: Finales Wertstromdiagramm zur Implementierung des Steuerungsverfahren *Geringster Restschlupf*

Der maximale Bestand auf einem Pufferplatz nach der Vorverarbeitung, der zur Berechnung der verbleibenden Reichweiten von Transportaufträgen des Transporttyp 30 benötigt wird, wird als statische Information in der Tabelle Pufferplätze gespeichert. In dieser Tabelle erfolgt auch eine Speicherung der fixen Reichweite, die angegeben wird, sofern keine Blockierung der vorverarbeitenden Maschinen droht. Der aktuelle Bestand, der sich auf diesen Pufferplätzen befindlichen Materialien wird ermittelt, indem die Anzahl der Materialien, die dem entsprechenden Pufferplatz zugeordnet sind, zusammengezählt wird.

Die ermittelten Arten zur Erfassung, Speicherung und Übertragung der Informationen wurden im Wertstromdiagramm in Abbildung 11-20 zusammengefasst. Auch dieses Wertstromdiagramm wurde als Grundlage verwendet, auf der das Verfahren im realen Produktionssystem implementiert wurde.

Evaluierung

Durch die Anwendung von Schritt 5 der entwickelten Methode wurde Hypothese H-TFF4.2 *„Durch die in den Informationsbeschreibungsblöcken angegebenen Anforderungen an die IQ-Dimensionen ist eine ausreichend genaue Grundlage geben, um darauf aufbauend die richtigen Informationserfassungs-, -speicherung-, und -übertragungstechnologien und Medien durch ein systematisches Technologiescouting identifizieren und bewerten zu können. Die Modellierung der Informationserfassungs- und -übertragungstechnologien sowie der Speichermedien durch horizontale Linien und der Kennzeichnung ihrer Zugehörigkeit zu Informationsflüssen eignen sich, um ein Konzept zur Implementierung abzuleiten."* erneut evaluiert.

Auch in diesem Anwendungsbeispiel konnte durch die Modellierung der Informationen mit den zugehörigen Anforderungen an die IQ-Dimensionen eine ausreichende Grundlage gegeben werden, um die notwendigen Erfassungstechnologien zu ermitteln. Im Gegensatz zum ersten Anwendungsbeispiel erfolgte insbesondere die Auswahl der Möglichkeit zur Erfassung des Bearbeitungsfortschrittes an den Umformmaschinen auf Basis eines Technologiescoutings. Zudem konnten auch auf in diesem Wertstromdiagramm die Speicherorte definiert werden, in denen die Informationen abgelegt werden, sodass daraus die zu implementierenden Schnittstellen zwischen verschiedenen Systemen bestimmt werden können. Durch die identifizierten Möglichkeiten und Maßnahmen zur Erfassung und Übertragung sowie deren Abbildbarkeit im Wertstromdiagramm werden die zur Evaluierung von Hypothese H-TFF4.2 aufgestellten Evaluierungskriterien als erfüllt angesehen.

Schritt 6: Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung

Anwendung des Schrittes

Zur Evaluierung der entwickelten und implementierten verbesserten Steuerung der Produktionslogistik nach dem zweiten Durchlauf der Methode wurde abermals der gleiche Zeitraum simuliert, der im Rahmen der Ist-Analyse untersucht wurde, unter Anwendung des Verfahrens *Geringster Restschlupf*. Auch in diesem Anwendungsbeispiel wurden die für das Steuerungsverfahren relevanten Informationen derart modelliert, dass sie zu den ermittelten Erfassungsarten passen. Die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen ist dabei derart ausgeprägt, dass der durch das Steuerungsverfahren ermittelte Schlupf zufällig schwankt und bis zu 5 % vom realen Schlupf abweicht[14]. Die modellierten Abweichungen der Informationsqualität, die im Rahmen der Evaluierung des ersten Anwendungsbeispiels der Methode berücksichtigt wurden, sowie im Rahmen der Analyse der Ist-Situation, bestehen weiterhin im erstellten Simulationsmodell und wurden somit mitberücksichtigt.

[14] Somit ist das im Rahmen der Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung verwendete Simulationsergebnis mit dem Simulationsergebnis identisch, dass auch im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität verwendet wurde.

Der Effekt des Verfahrens *Geringster Restschlupf* im Vergleich zum Ausgangszustand der erneuten Anwendung der Methode (nach Einführung des *sich dynamisch anpassenden Bestellbestandsverfahrens*) ist in Abbildung 11-21 dargestellt.

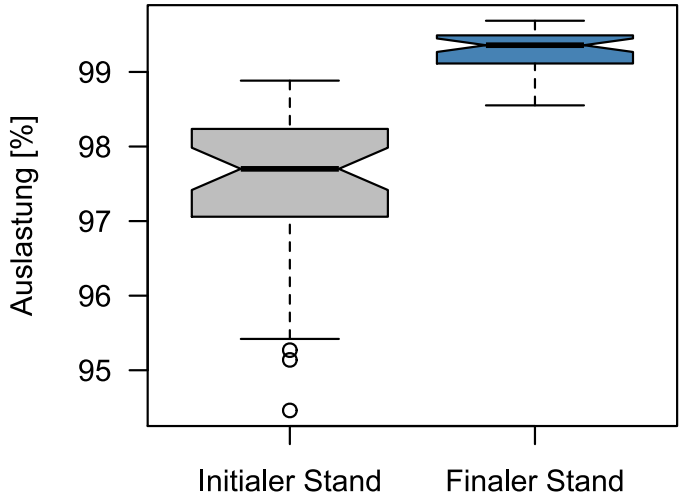

Abbildung 11-21: Effekt des Verfahrens *Geringster Restschlupf*

Die mittlere Auslastung der Umformmaschinen konnte von etwa 97,43 % um 1,85 Prozentpunkte auf ca. 99,28 % gesteigert werden. Zudem konnte die Streuung der Auslastungen der Umformmaschinen durch die Einführung des Steuerungsverfahrens *Geringster Restschlupf* reduziert werden. Die verbleibenden 0,72 % der mittleren Wartezeit der Umformmaschinen im Simulationszeitraum setzen sich zusammen aus etwa 0,56 Prozentpunkte (zuvor 2,05 Prozentpunkte) durch eine verspätete Bereitstellung vorhandener Materialien an den Umformmaschinen sowie aus etwa 0,15 Prozentpunkte (zuvor 0,52 Prozentpunkte) durch Wartezeiten, die aus einer nicht rechtzeitigen Verfügbarkeit von vorverarbeiteten Materialien resultierte. Aus diesen Werten ist zu erkennen, dass das Verfahren *Geringster Restschlupf* auch Auswirkungen auf die Verfügbarkeit der vorverarbeiteten Materialien hat. Dies ist dadurch zu begründen, dass durch das eingesetzte Steuerungsverfahren auch die Materialien zur Vorverarbeitung fristgerecht bereitgestellt werden. Dadurch wird die Wartezeit auf Materialien an den vorverarbeitenden Maschinen reduziert, sodass diese mit dem Vorverarbeitungsprozess früher beginnen können und somit das Material auch für den Transport zu den Umformmaschinen früher bereitsteht.

Der im Rahmen der Simulationsstudie ermittelte Effekt des Steuerungsverfahrens wurde für dieses Anwendungsbeispiel durch Aussagen der Mitarbeitenden im realen Produktionssystem nach Implementierung und Anwendung mittels qualitativer Aussagen bestätigt.

Um die verbleibenden Verbesserungspotenziale umzusetzen, so wie es durch die Struktur der Methode als Verbesserungszyklus vorgesehen ist, besteht die Möglichkeit, dass das im Rahmen der Analyse der Ist-Situation identifizierte Verbesserungspotenzial der Flexibilisierung der Abarbeitungsreihenfolge in der Vorverarbeitung, um auf die aktuellen Gegebenheiten an den Umformmaschinen zeitnah zu reagieren, umgesetzt wird. Dadurch könnte die Problematik der verspäteten Verfügbarkeit der vorverarbeiteten Materialien behoben werden. Zur weiteren Reduktion der Wartezeiten durch verspätete Materialbereitstellungen an den Umformmaschinen besteht die Möglichkeit, dass dies über eine temporäre Erhöhung der Kapazitäten der Transportprozesse erfolgen kann. Um diese temporären Kapazitätssteigerungen zielgerichtet einzusetzen, bietet es sich an, zu untersuchen, ob sich und falls ja, welche, Verfahren der Kapazitätssteuerung eignen. Eine weitere Möglichkeit, die verbleibenden Stillstandszeiten der

Umformmaschinen zu reduzieren, besteht in der Anpassung des Produktionsplans, sodass bei dessen Erstellung die Häufigkeit der Belieferung der Maschinen in Abhängigkeit der zu produzierenden Verbindungselemente auf Basis historischer Daten mitberücksichtigt wird. Dadurch kann die Dringlichkeit der Materialbereitstellungen entzerrt werden. Eine solche Anpassung wäre dem Bereich des Operations-Research zuzuordnen und liegt außerhalb des Anwendungsbereichs der entwickelten Methode.

Evaluierung

Durch die mittels der Simulation quantitativ nachgewiesene Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen lassen sich verschiedene Hypothesen, die zuvor nur eingeschränkt evaluiert werden konnten, bestätigen. So kann die zuvor nur eingeschränkt evaluierte Hypothese H-TFF2 nun bestätigt werden, dass sich um ein relevantes Verbesserungspotenzial handelt. Somit kann das Evaluierungskriterium, das fordert, dass es sich um ein relevantes Verbesserungspotenzial handelt, als erfüllt angesehen werden.

Hypothese H-TFF3 wurde bisher nur dahingehend evaluiert, dass ein Steuerungsverfahren identifiziert wurde. Offen blieb, ob es sich bei dem ausgewählten Steuerungsverfahren auch um ein geeignetes Steuerungsverfahren handelt. Die Eignung des Steuerungsverfahrens konnte durch die gesteigerte Leistungsfähigkeit der Umformmaschinen bestätigt werden, die auf eine gesteigerte Effizienz der Transportprozesse zurückzuführen ist. Somit kann das zugehörige Evaluierungskriterium als erfüllt angesehen werden.

11.4 Überprüfung der Anforderungserfüllung & kritische Reflexion

Zur Evaluierung der aufgestellten Hypothesen wurden jeweils Evaluierungskriterien definiert, deren Erfüllung im Rahmen der zuvor beschriebenen Anwendungsbeispiele ermittelt wurden. Dies erfolgte für die Hypothesen H-TFF2 bis H-TFF5.3. Offen ist die Evaluierung der Hypothese H-TFF1 *„Die Granularität, Frequenz und Verlässlichkeit sind für die Steuerung der Produktionslogistik relevante Informationsqualitätsdimensionen.“*. Die zu dieser Hypothese aufgestellten Evaluierungskriterien fordern eine Bestätigung über die Relevanz der jeweiligen IQ-Dimensionen für die Steuerung der Produktionslogistik. Diese Kriterien können als erfüllt angesehen werden, da deren Relevanz in jeweils mindestens einem Anwendungsbeispiel im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität nachgewiesen wurde. Dies erfolgte, indem aufgezeigt wurde, dass eine nicht ausreichende Qualität der jeweiligen IQ-Dimension zu einer Beeinträchtigung der produktionslogistischen Leistungsfähigkeit führt. Im Rahmen des ersten Anwendungsbeispiels konnte für die IQ-Dimension *Granularität* argumentativ und für die IQ-Dimensionen *Frequenz* und *Verlässlichkeit* anhand des im Rahmen der Evaluierung des Methodenschrittes eingesetzten Simulationsmodells im Rahmen einer Simulationsstudie die Relevanz aufgezeigt werden. In Anwendungsbeispiel 2 wurde die Relevanz der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ebenfalls durch eine Simulationsstudie bestätigt.

Die Erfüllung der Evaluierungskriterien ist in Tabelle 11-1 gebündelt zusammengefasst.

Tabelle 11-1: Übersicht der Erfüllung der Evaluierungskriterien der Hypothesen

Schritt	Hypothese	Evaluierungskriterium	Beispiel 1	Beispiel 2
-	H-TFF1	Relevanz der IQ-Dimension *Granularität* bestätigt	erfüllt	nicht evaluiert
		Relevanz der IQ-Dimension *Frequenz* bestätigt	erfüllt	nicht evaluiert
		Relevanz der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* bestätigt	erfüllt	erfüllt
1	H-TFF2	Abbildbarkeit der Prozesse	erfüllt	nicht evaluiert
		Identifikation relevanter Verbesserungspotenziale	erfüllt	erfüllt
2	H-TFF3	Identifikation mind. eines geeigneten Steuerungsverfahrens	erfüllt	erfüllt
		Anwendbarkeit des Verbesserungszyklus zur Anpassung der Steuerungsverfahren	erfüllt	nicht evaluiert
3	H-TFF4.1	Abbildbarkeit der Informationen und Informationsflüsse des Steuerungsverfahrens gegeben	erfüllt	erfüllt
4	H-TFF5.1	Wertmaximierende Anforderung an die IQ-Dimension *Granularität* in der Informationssenke ermittelt	erfüllt	erfüllt
		Notwendige Granularität in den Informationsquellen ermittelt	erfüllt	erfüllt
	H-TFF5.2	Bestätigte Toleranzgrenzen der IQ-Dimension *Frequenz* ermittelt	erfüllt	nicht evaluiert
	H-TFF5.3	Bestätigte Anforderung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ermittelt	erfüllt	erfüllt
5	H-TFF4.2	Möglichkeiten und Maßnahmen zur Erfassung und Übertragung der notwendigen Informationen ableitbar	erfüllt	erfüllt
		Erfassungstechnologien und Speichermedien/-orte zur Umsetzung/Implementierung abbildbar	erfüllt	erfüllt

Wie anhand von Tabelle 11-1 zu erkennen ist, wurde jedes Evaluierungskriterium in mindestens einem Anwendungsbeispiel erfüllt und durch kein Anwendungsbeispiel als nicht erfüllt eingestuft. Da die Hypothesen eine Beantwortung der aufgestellten (Teil-)Forschungsfragen sind und diese aus den zu erfüllenden Anforderungen der Methode abgeleitet wurden, können durch die Erfüllung der Hypothesen die anfangs aufgestellten Anforderungen als erfüllt angesehen werden. Eine Diskussion der Erfüllung der Anforderungen erfolgt anhand einer kritischen Reflexion der Beantwortung der (Teil-)Forschungsfragen.

(Teil-)Forschungsfrage 1

(Teil-)Forschungsfrage 1 *„Welche Dimensionen der Informationsqualität sind für die Steuerung der Produktionslogistik relevant?“* wurde beantwortet, indem die IQ-Dimensionen *Granularität, Frequenz* und *Verlässlichkeit* als relevant für die Steuerung der Produktionslogistik identifiziert wurden. Durch diese Identifikation wurde die Gestaltung der Methode maßgeblich beeinflusst, indem im Rahmen der

„Harmonisierung der Informationsqualität“ diese IQ-Dimensionen fokussiert wurden. Durch die aufgezeigten Auswirkungen von Abweichungen der erforderlichen Informationsqualität in diesen IQ-Dimensionen kann die Relevanz deren Berücksichtigung im Rahmen der entwickelten Methode hervorgehoben werden.

(Teil-)Forschungsfrage 2

(Teil-)Forschungsfrage 2 *„Wie kann ein Produktionsprozess mit zugehöriger Produktionslogistik hinreichend genau in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise abgebildet werden, um effizient Verbesserungspotenziale zur Steuerung der Produktionslogistik zu identifizieren?“* wurde durch Hypothese H-TFF2 beantwortet und anhand eines modellierten Materialflussprozesses sowie der Identifikation von verschiedenen Verbesserungspotenzialen nachgewiesen. Durch die in Hypothese H-TFF2 vorgeschlagene Vorgehensweise wird somit Anforderung P-1 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist der zu steuernde Prozess in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise zu erfassen.“* erfüllt.

(Teil-)Forschungsfrage 3

(Teil-)Forschungsfrage 3 *„Wie lassen sich geeignete Steuerungsmethoden und/oder -verfahren zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ermitteln und gegebenenfalls modifizieren, um identifizierte Verbesserungspotenziale umsetzen zu können?“* wurde durch Hypothese H-TFF3 beantwortet. Durch die Identifikation von geeigneten Steuerungsverfahren in den beiden Anwendungsbeispielen sowie der Modifikation eines Steuerungsverfahrens anhand des vorgeschlagenen Verbesserungszyklus im Rahmen von Schritt 2 der entwickelten Methode wurde die Anwendbarkeit der in Hypothese H-TFF3 vorgeschlagenen Vorgehensweise bestätigt. Somit wird im Rahmen der entwickelten Methode Anforderung P-2 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist das beziehungsweise sind die eingesetzten Steuerungsverfahren auf ihre Kompatibilität in Bezug auf den zu steuernden Prozess, zu den logistischen Zielgrößen und weiteren eingesetzten Steuerungsverfahren zu analysieren, gegebenenfalls zu modifizieren oder neue geeignete Steuerungsverfahren auszuwählen.“* erfüllt.

(Teil-)Forschungsfrage 4

(Teil-)Forschungsfrage 4 *„Wie lassen sich Informationsflüsse zur Steuerung der Produktionslogistik angemessen, nachvollziehbar und übersichtlich modellieren, um darauf aufbauend die Qualität der Informationen zu harmonisieren und ein Konzept zur Implementierung des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik abzuleiten?“* wurde durch die Hypothesen H-TFF4.1 und H-TFF4.2 beantwortet.

In Schritt 3 „Modellierung von Informationsflüssen“ der entwickelten Methode konnten in den beiden Anwendungsbeispielen jeweils die Informationen und Informationsflüsse sowie die Verarbeitung der einzusetzenden Steuerungsverfahren modelliert werden. Dies erfüllt Anforderung I-1 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die von den Steuerungsverfahren benötigten Informationen zu identifizieren und anforderungsgerechte Erfassungspunkte (Informationsquellen) im Produktionsprozess zu definieren, an denen diese Informationen generiert und erfasst werden.“,* Anforderung I-4 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die Verarbeitung der Informationen durch die Steuerungsverfahren in angemessener, nachvollziehbarer und übersichtlicher Weise im Informationsfluss zu modellieren.“* sowie Anforderung I-5 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die Empfangenden beziehungsweise Nutzenden der durch die Steuerungsverfahren generierten Entscheidungen sowie anforderungsgerechte Übermittlungspunkte (Informationssenken) im Produktionsprozess zu definieren und im Informationsfluss zu modellieren.“*

Im Rahmen von Schritt 5 „Detailplanung und Implementierung“ konnten geeignete Technologien zur Erfassung, Übertragung und Speicherung der Informationen identifiziert und im Wertstromdiagramm modelliert werden. Dies erfüllt Anforderung I-2 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die zur Erfassung der Informationen an den anforderungsgerechten Erfassungspunkten im Produktionsprozess eingesetzten Technologien und Methoden im Informationsfluss zu modellieren.“*, Anforderung I-3 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die eingesetzten Medien zur Speicherung der Informationen zu modellieren.“* sowie Anforderung I-6 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität sind die zur Übermittlung der Informationen an den anforderungsgerechten Punkten im Produktionsprozess eingesetzten Methoden und Technologien zu modellieren.“*.

Anzumerken zur Art der Modellierung der Erfassungsmöglichkeiten von Informationen sei, dass diese die Möglichkeit bietet, auch unterschiedliche Erfassungsarten gleichzeitig zu modellieren, wie es anhand der Länge der rohen Drahtringe mit dem „Manuellen Messen“ und der Zuordnung durch einen „Fixen Wert“ beispielsweise im ersten Anwendungsbeispiel erfolgte oder bei der Änderung des Lagerplatzes. Was aus dieser Art der Modellierung jedoch nicht hervorgeht, ist die Angabe, wann welche Erfassungsart zu verwenden ist. Für die unterschiedlichen Aktualisierungsereignisse, wie es bei einer Änderung des Lagerplatzes der Fall ist, könnte dies modelliert werden, indem die Information doppelt modelliert wird und der Platzhalter für die IQ-Dimension *Frequenz* jeweils nur durch ein Ereignis beschrieben wird. Die unterschiedlichen Erfassungstechnologien je Ereignis könnten somit eindeutig zugeordnet werden. Die Art der Erfassung, die sich jedoch für das gleiche Ereignis unterscheiden kann, wie es im Rahmen der Ermittlung der Länge der Drahtringe vorkommen kann, kann durch die bisher vorgesehenen Modellierungsmöglichkeiten nicht zusätzlich abgebildet werden. Die Abbildung dieser Möglichkeit stellt eine Erweiterung der Modellierung dar, die sich beispielsweise über weitere zu definierende Beschreibungsblöcke abbilden lassen könnte.

(Teil-)Forschungsfrage 5

(Teil-)Forschungsfrage 5 *„Wie lässt sich die für die Steuerungsverfahren erforderliche Informationsqualität ermitteln, sodass bei Einhaltung der erforderlichen Qualität die Steuerungsentscheidungen mit den Anforderungen des zu steuernden Prozesses harmonisiert sind?“* wurde durch die Hypothesen H-TFF5.1, H-TFF5.2 und H-TFF5.3 beantwortet. Durch die Anwendung in Schritt 4 „Harmonisierung der Informationsqualität“ der Methode der in den Hypothesen zu (Teil-)Forschungsfrage 5 angegebenen Vorschlägen zur Harmonisierung der jeweiligen IQ-Dimension konnte Anforderung Q-1 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die anforderungsgerechte Granularität der zu erfassenden, zu verarbeitenden und an die Informationsnutzenden zu übertragenden Informationen zu bestimmen.“*, Anforderung Q-2 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist die anforderungsgerechte Frequenz der Aktualisierung der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen sowie damit verbundene tolerierbare Abweichungen zu bestimmen.“* sowie Anforderung Q-3 *„Zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ist eine anforderungsgerechte Verlässlichkeit der zu erfassenden und zu übertragenden Informationen zu bestimmen.“* erfüllt werden.

Als Einschränkung der Erfüllung der Anforderung Q-3 gilt es anzumerken, dass lediglich qualitative Einschätzungen über die Anforderungen an die IQ-Dimension *Verlässlichkeit* ermittelt werden und die Auswirkungen einer nicht ausreichenden Informationsqualität nur abgeschätzt werden können. Zudem

werden im Rahmen der Ermittlung der Anforderung nur diejenigen Aspekte berücksichtigt, die im Rahmen der Berechnung der entwickelten Szenarien abgebildet wurden. Dies ist jedoch kein spezielles Problem der Anforderungsermittlung dieser IQ-Dimension, sondern besitzt auch Gültigkeit bei der allgemeinen Erhebung von Anforderungen in anderen Bereichen. Um dieser Einschränkung entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit, dass die Analyse der Auswirkungen von verschiedenen Ausprägungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* mittels einer Simulationsstudie untersucht wird, wie es im Rahmen der Evaluierung des Methodenschrittes „Harmonisierung der Informationsqualität“ durchgeführt wurde. Dadurch würde die Möglichkeit bestehen, dass explorativ, durch einzustellende Parameter der Informationsqualität, die Auswirkungen der Ausprägungen der Informationsqualität untersucht werden können. Die Erstellung eines Simulationsmodells ist jedoch mit Implementierungsaufwand verbunden, da bisher kein Simulationswerkzeug gefunden wurde, mit dem die Informationsqualität analysiert werden kann, ohne dass dazu eigene Modelle entwickelt werden müssten. Somit sind zur Durchführung dieser Möglichkeit der Harmonisierung der Informationsqualität Simulationsexperten notwendig, wie es auch die VDI-Richtlinie 3633-1 [VDI 3633-1, S. 32] bestätigt. Eine Diskussion dieser Möglichkeit zur Harmonisierung der Informationsqualität wird im Ausblick dieser Arbeit beschrieben.

Aus der kritischen Reflexion der (Teil-)Forschungsfragen konnte die Erfüllung der funktionalen Anforderungen begründet werden. Zudem wurden noch die nicht-funktionalen Anforderungen M-1 bis M-4 aufgestellt, die es noch zu evaluieren gilt.

Anforderung M-1

Anforderung M-1 *„Die Methode ist nachvollziehbar und bezogen auf die Problemstellung allgemein anwendbar.“* zielt auf die Validität ab. Durch die Struktur der Methode wird in jedem Schritt ein Ergebnis ermittelt, das im Rahmen der Anwendung der Methode nach und nach in das Wertstromdiagramm integriert wird und die Umsetzung der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik konkretisiert. Durch den strukturierten Ablauf der Methode mit einhergehender Dokumentation in Form der Erweiterungen des Wertstromdiagramms ist eine Nachvollziehbarkeit gegeben. Die zweite Forderung der Anforderung, dass die Methode allgemein anwendbar ist und somit nicht nur auf einen Einzelfall beschränkt ist, kann dadurch als erfüllt angesehen werden, dass die Methode für zwei unterschiedliche Steuerungsverfahren angewendet werden konnte, die jeweils einer anderen Aufgabe der Steuerung der Produktionslogistik, nach dem Modell der Fertigungssteuerung von Lödding, zugeordnet werden. Somit ist eine mögliche Einschränkung der Anwendbarkeit für nur ein Steuerungsverfahren aufgehoben. Eine Einschränkung dieser Anforderungserfüllung ist jedoch, dass durch die beiden durchgeführten Anwendungsbeispiele nicht die Grenzen der Anwendbarkeit der Methode in Bezug auf die zu berücksichtigenden Steuerungsverfahren angegeben werden kann.

Anforderung M-2

Anforderung M-2 *„Die Ergebnisse der Methode sind bei ähnlichen Randbedingungen zuverlässig und weichen nicht wesentlich voneinander ab.“* zielt auf die Reliabilität der Methode ab. Zur verlässlichen Überprüfung der Erfüllung dieser Anforderung hätte die Methode für die gleichen Anwendungsbeispiele durch unterschiedliche Personen durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen werden müssen. Da dies nicht erfolgte, kann die Erfüllung dieser Anforderung nur argumentativ begründet werden. Durch die angegebenen Beschreibungen zur Anwendung der jeweiligen Schritte der Methode wird den Anwendern eine Struktur vorgegeben, wie systematisch Verbesserungspotenziale identifiziert und deren Umsetzung unter Berücksichtigung der Harmonisierung der Informationsqualität durchgeführt werden kann. Durch die Struktur und die Beschreibung der Schritte sollte die Möglichkeit gegeben sein, dass bei ähnlichen

Randbedingungen zuverlässig Ergebnisse generiert werden, die sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Die Möglichkeit, dass abweichende Ergebnisse der Methode bei ähnlichen Ausgangssituationen erzeugt werden, ist trotzdem gegeben. Dies kann unter anderem durch unterschiedliche Kenntnisstände über bestehende Steuerungsverfahren sowie deren Grenzen erfolgen. Dies ist im Rahmen der Methode nicht ausschließbar, da sonst die Methode zu starr gestaltet werden müsste, sodass sie für zukünftige Neuerungen, wie beispielsweise die Entwicklung neuer Steuerungsverfahren, nicht mehr anwendbar wäre. Durch die Vorgabe der Struktur der Methode sowie der Beschreibung der Anwendung der Schritte wird daher Anforderung M-2 als erfüllt angesehen.

Anforderung M-3

Anforderung M-3 *„Die Nützlichkeit der Ergebnisse muss gewährleistet sein."* zielt auf die Utilität der Methode ab. Diese Anforderung kann als erfüllt angesehen werden, da im Rahmen der Anwendung der Methode an den beiden Anwendungsbeispielen jeweils eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik erreicht werden konnte. Dies wurde erreicht, obwohl einige Informationen in ihrer Verlässlichkeit stark von ihren realen Sachverhalten abweichen. Dies unterstreicht insbesondere die Nützlichkeit der Harmonisierung der Informationsqualität, da dadurch Aufwände zur exakten Erfassung von Informationen reduziert werden konnten.

Anforderung M-4

Anforderung M-4 *„Die Methode verfolgt ein stringentes Vorgehen zur Erfüllung der Zielstellung."* kann dadurch als erfüllt angesehen werden, wenn die in der Methode beschriebenen Schritte notwendig sind und nicht weggelassen werden können. Die Begründung der Erfüllung dieser Anforderung durch die entwickelte Methode erfolgt argumentativ anhand des Ablaufs der Methode.

Das Ziel der Methode ist es, eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität zu erreichen. Damit diese Verbesserung erreicht werden kann, ist es zunächst notwendig, Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Dies erfolgt in Schritt 1 der Methode, wodurch die Notwendigkeit dieses Schrittes begründet wird und dieser nicht weggelassen werden kann.

In Schritt 2 erfolgt aufbauend auf Schritt 1 das „Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik". Dieses Design ist die Grundlage für die Durchführung der nachfolgenden Schritte der Methode. Ohne diesen Methodenschritt würde kein Steuerungsverfahren zur Verfügung stehen, das zu einer Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik beitragen kann.

Die Modellierung der Informationen und Informationsflüsse in Schritt 3 der Methode ist zum einen erforderlich, um die im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität zu berücksichtigenden Informationen zu ermitteln und um anhand der Informationsflüsse kritische Entscheidungssituationen nachzuvollziehen, die für die Harmonisierung der Informationsqualität erforderlich sind. Zum anderen ist dieser Schritt notwendig, um die Grundlage für die Detailplanung und Implementierung zu schaffen.

Schritt 4 „Harmonisierung der Informationsqualität" ist erforderlich, da ohne diesen Schritt das zentrale Ziel der Methode nicht berücksichtigt werden würde. Ohne diesen Methodenschritt würde die Möglichkeit bestehen, dass eine zu hohe, und damit entstehende hohe Investitionen und Prozesskosten, oder eine zu niedrige Informationsqualität, und damit verbundene Ineffizienzen der Prozesse, im Rahmen der Umsetzung des ausgewählten Steuerungsverfahrens ausgewählt werden würden.

In Schritt 5 der Methode wird auf Basis der harmonisierten Informationsqualität das Konzept zur Umsetzung des Steuerungsverfahrens erstellt. Dieser Schritt ist somit erforderlich, damit die Verbesserung der

Steuerung der Produktionslogistik auch umgesetzt wird, was in der Zielstellung der Methode angegeben ist.

Zur Absicherung, dass die Umsetzung auch tatsächlich zu einer Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik führte, ist Schritt 6 erforderlich.

Durch die dargestellte Abfolge der entwickelten Methode, in der jeder Methodenschritt auf dem vorherigen aufbaut und die Durchführung der jeweiligen Schritte notwendig ist, kann Anforderung M-4 als erfüllt angesehen werden.

Aus den zuvor aufgeführten Begründungen und Nachweisen kann zusammengefasst werden, dass die entwickelte Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität die aufgestellten Anforderungen erfüllt. Da im Rahmen der Entwicklung und Anwendung der Methode keine weiteren Anforderungen identifiziert wurden, die es noch zu berücksichtigen gilt, und die Methode unter der Erfüllung der definierten Anforderungen im Rahmen von zwei Anwendungsbeispielen die definierte Zielstellung erfüllen konnte, wird von einer Vollständigkeit der definierten Anforderungen ausgegangen, sodass alle relevanten Aspekte berücksichtigt wurden.

(Haupt-)Forschungsfrage

Die eingangs der Arbeit aufgestellte (Haupt-)Forschungsfrage *„Aus welchen Schritten muss eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität bestehen und wie sind diese Schritte auszugestalten?“* kann schließlich mit Hilfe der erfüllten Anforderungen beantwortet werden. Durch die Erfüllung der Anforderung M-4 kann begründet werden, dass die Methode *mindestens* aus den sechs entwickelten Schritten bestehen muss. Dies deckt den ersten Teil der Hauptforschungsfrage ab. Der Aspekt der Ausgestaltung der Methodenschritte wird durch die beschriebenen Vorgehensweisen, die in den bestätigten Hypothesen der (Teil-)Forschungsfrage angegeben sind, beantwortet.

12 Zusammenfassung, kritische Reflexion und Ausblick

Die vorliegende Arbeit stellt eine Methode vor, durch deren Anwendung eine Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität erreicht werden kann. Diese Methode wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand von zwei Anwendungsbeispielen evaluiert. Das vorliegende Kapitel schließt die Arbeit mit einer Zusammenfassung des Erreichten, einem Fazit sowie dem Aufzeigen möglicher zukünftiger Erweiterungen und Forschungsfragen ab.

12.1 Zusammenfassung

Viele produzierende Unternehmen werden durch die kontinuierliche Zunahme an Varianten bei gleichzeitig immer geringer werdenden Losgrößen pro Variante mit einer gesteigerten Komplexität innerhalb der Produktion konfrontiert. Dies drückt sich unter anderem dadurch aus, dass die Produktion individueller Produkte eine Planung und Steuerung individueller Produktions- und Logistikabläufe benötigt. Durch diese Zunahme der Komplexität erfolgt eine immer schwieriger werdende Nachvollziehbarkeit und Vorhersagbarkeit der Produktions- und Logistikabläufe. Für die Produktionslogistik bedeutet dies, dass erstellte Produktionspläne zur Erreichung produktionslogistischer Ziele häufig nur begrenzt Gültigkeit besitzen, sofern die Steuerung der Produktionslogistik nicht in der Lage ist, diesen Plan, trotz auftretender nicht eingeplanter Ereignisse, zu realisieren. Zur Beherrschung der Komplexität und somit auch zur Erreichung produktionslogistischer Ziele ist die Erfassung von Informationen aus den laufenden Prozessen sowie deren Verwendung zur zielgerichteten Steuerung ein entscheidender Faktor. Die richtigen Informationen, in der richtigen Form, am richtigen Ort und in ausreichender Qualität bilden somit die Grundlage für eine leistungsfähige Steuerung der Produktionslogistik. Dies gilt es im Rahmen von Projekten zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik zu berücksichtigen.

Um die Steuerung der Produktionslogistik zu verbessern und dabei den entscheidenden Faktor der Informationen und ihre Qualität zu berücksichtigen, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Methode bestehend aus sechs Schritten entwickelt. Dazu wurde zunächst die Steuerung der Produktionslogistik heutiger Produktionssysteme beschrieben und die Relevanz von Informationen und deren Qualität verdeutlicht. Aus dieser Beschreibung wurden insgesamt elf Anforderungen abgeleitet, die sich in die Anforderungscluster „Produktionslogistischer Prozess & Steuerung“, „Informationen und Informationsflüsse“ sowie „Informationsqualität“ unterteilen lassen. Diese elf Anforderungen sollte eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik mit besonderem Fokus auf die Informationsqualität erfüllen. Aufbauend auf diesen Anforderungsclustern wurden im Rahmen der Analyse des Stands der Erkenntnisse Forschungscluster identifiziert, in denen sich bereits bestehende Ansätze befinden, die die Anforderungen vollumfänglich oder zumindest teilweise erfüllen. Die Analyse des Stands der Erkenntnisse ergab dabei, dass keiner der identifizierten Ansätze die aufgestellten Anforderungen vollumfänglich erfüllt, sondern jeweils nur vereinzelt. Durch diese Analyse konnte jedoch die Relevanz der aufgestellten Anforderungen belegt werden. Durch das Nichterfüllen der Anforderungen durch mindestens einen bereits existierenden Ansatz wurde schließlich eine Forschungslücke identifiziert, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand der entwickelten Methode geschlossen wurde.

Die entwickelte Methode besteht aus sechs Schritten, deren Durchlaufen eine systematische Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität ermöglicht. Dies erfolgt, indem zunächst die Ist-Situation eines Ausschnitts eines Produktionssystems mit Hilfe der Wertstrommethode aufgenommen und analysiert wird sowie Verbesserungspotenziale aus dieser

Analyse abgeleitet werden (*Schritt 1: Analyse der Ist-Situation*). In diesem Zusammenhang werden bestehende Variabilitäten innerhalb der Prozessschritte mittels Fuzzy-Zahlen modelliert. Aufbauend auf den identifizierten Verbesserungspotenzialen erfolgt das Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik (*Schritt 2: Design einer verbesserten Steuerung der Produktionslogistik).* Dazu werden systematisch Steuerungsverfahren identifiziert und, sofern erforderlich, modifiziert, sodass durch deren Anwendung die zuvor identifizierten Verbesserungspotenziale umgesetzt werden können. Zur Konkretisierung der Umsetzung der identifizierten und gegebenenfalls modifizierten Steuerungsverfahren und zur Harmonisierung der Informationsqualität werden im nächsten Schritt (*Schritt 3: Modellierung von Informationsflüssen)* die für die Anwendung des Steuerungsverfahrens benötigten Informationen und die zugehörigen Informationsflüsse in einer Erweiterung des klassischen Wertstromdiagramms modelliert. Im Rahmen der anschließenden Harmonisierung der Informationsqualität (*Schritt 4: Harmonisierung der Informationsqualität*) werden die Anforderungen an die Informationsqualitätsdimensionen Granularität, Frequenz und Verlässlichkeit ermittelt. Dies erfolgt unter anderem durch eine Analyse der mittels Fuzzy-Zahlen aufgenommenen Variabilitäten der Prozesse und der Eigenschaften der zu produzierenden Produkte sowie einer Interpretation von Zugehörigkeitsgraden der Fuzzy-Zahlen zu sogenannten Tipping-Points, die im Rahmen des Methodenschrittes definiert werden. Nachdem die Anforderungen an die Informationsqualität der Informationen für das Steuerungsverfahren ermittelt wurden, wird im Rahmen einer Detailplanung und Implementierung (*Schritt 5: Detailplanung und Implementierung*) konkretisiert, durch welche Technologien und Maßnahmen die Informationen in ausreichender Qualität erfasst werden können und wo diese Informationen zu speichern sind. Abschließend sieht die Methode eine Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik (*Schritt 6: Evaluierung der entwickelten und implementierten Verbesserung*) vor. Zentrales Element der Methode ist ein erweitertes Wertstromdiagramm, das als durchgängiges Modellierungs- und Kommunikationsmedium dient und innerhalb der Methodenschritte aufeinander aufbauend ergänzt und befüllt wird.

Anhand von zwei Anwendungsbeispielen der Methode in einem realen Produktionssystem erfolgte eine Evaluierung der entwickelten Methode. Der Nachweis der Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik gegenüber der Ausgangssituation sowie der Nachweis zur Harmonisierung der Informationsqualität innerhalb der Anwendungsbeispiele erfolgte mittels Simulationsstudien.

12.2 Kritische Reflexion und Ausblick

Zur systematischen Erarbeitung der zuvor beschriebenen Methode wurde der Forschungsansatz *Design Science Research* angewendet und das Vorgehen an die Vorgehensweise von Dresch et al. [DLA15] angelehnt. In diesem Zusammenhang wurde die (Haupt-)Forschungsfrage *„Aus welchen Schritten muss eine Methode zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität bestehen und wie sind diese Schritte auszugestalten?“* aufgestellt und mittels weiterer (Teil-)Forschungsfragen konkretisiert. Durch eine Beantwortung der (Teil-)Forschungsfragen in Form von Hypothesen, die evaluiert und bestätigt werden konnten, stellt die entwickelte Methode die Antwort auf die aufgestellte (Haupt-)Forschungsfrage dar.

Der generellen Anwendbarkeit der entwickelten Methode, damit diese verlässlich zu dem definierten Ziel einer Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik auf Basis einer harmonisierten Informationsqualität führt, liegen einige implizite Annahmen und Einschränkungen zugrunde, die es kritisch zu reflektieren gilt. Zudem bestehen einige Erweiterungsmöglichkeiten der Methode. Die kritische Reflexion der Methode und mögliche Erweiterungen werden im Nachfolgenden beschrieben.

Grundlage zur Verbesserung der Steuerung der Produktionslogistik ist die Identifikation von Verbesserungspotenzialen Im Rahmen der Anwendung der Methode wird auf verschiedene Techniken verwiesen, mögliche Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Diese Techniken basieren jedoch überwiegend auf einer manuellen Aufnahme, Aufbereitung, Modellierung und Interpretation von Prozessschritten und Kennzahlen (Schritt 1 der Methode). Eine Erweiterungsmöglichkeit der Methode zur Automatisierung der Modellierung des Ist-Prozesses besteht in der Anwendung des Process Minings. Process Mining ist eine dem Prozessmanagement zugeordnete Technik. Sie ermöglicht es, aus bestehenden Transaktions- und Vorgangsdaten Erkenntnisse über Prozesse zu gewinnen [PET18, S. 1]. So besteht die Möglichkeit, aus bestehenden Daten (sofern diese in ausreichender Qualität im zu untersuchenden Produktionsbereich bereits vorhanden sind) den zu analysierenden Prozess automatisiert zu modellieren beziehungsweise zu verifizieren, ob der modellierte Prozess mit dem durch die Daten dargestellte Prozess übereinstimmt [MBB20, S. 121]. Durch mögliche Abweichungen des sich aus den Daten ergebenden Prozess und dem erwarteten/modellierten Prozess sowie durch eine automatisierte Aufbereitung von möglichen Kennzahlen kann der Anwendende der Methode bei der Identifikation von Verbesserungspotenzialen unterstützt werden. Einen Ansatz die Technik des Process Minings mit der Wertstrommethode, mit der die Prozessmodellierung im Rahmen der vorgestellten Methode erfolgt, zu verknüpfen diskutiert Mertens et al. [MBB20].

Zur Umsetzung der identifizierten Verbesserungspotenziale der produktionslogistischen Steuerung ist die Identifikation, Auswahl und gegebenenfalls Modifikation von Steuerungsverfahren im Rahmen von Schritt 2 der Methode erforderlich. Der Prozess der richtigen Auswahl eines Steuerungsverfahrens kann zwar anhand verschiedener aufgezeigter Kriterien unterstützt werden, jedoch setzt dies voraus, dass der Anwender der Methode Zugang zu einer ausreichenden Beschreibungsgrundlage von Steuerungsverfahren hat, um ein Steuerungsverfahren anhand der zu beurteilenden Kriterien auswählen zu können. Dies ist aktuell insbesondere in der Praxis nicht uneingeschränkt gewährleistet[15], was zu einer Einschränkung der berücksichtigbaren Steuerungsverfahren führen kann. In diesem Fall werden die im Rahmen des Designs der verbesserten Steuerung der Produktionslogistik berücksichtigten Steuerungsverfahren zum einen durch die Expertise der Anwendenden der Methode eingegrenzt sowie zum anderen durch eine Zugänglichkeit zu Informationsquellen über bestehende Steuerungsverfahren und deren Anforderungen beziehungsweise Eignungskriterien in Bezug auf produktionslogistische Zielgrößen. Diese Einschränkung könnte durch eine frei zugängliche Sammlung von bestehenden Steuerungsverfahren reduziert werden, die idealerweise derart abgelegt ist, dass Tool-unterstützt das passende Steuerungsverfahren in seiner Grundform identifiziert werden kann.

Im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität sind durch den Anwendenden der Methode Szenarien zu entwickeln und kritische Steuerungsentscheidungen zu identifizieren, anhand derer die Anforderungen an die Informationsqualitätsdimensionen abgeleitet werden. Damit dies zu verlässlichen Ergebnissen führt, wird in der Methode die Entwicklung und Identifikation dieser Szenarien und kritischen Steuerungsentscheidungen vorausgesetzt. Möglichkeiten zur Entwicklung und Identifikation dieser Szenarien und kritischer Steuerungsentscheidungen werden zwar aufgezeigt, jedoch ist auch dies von der Expertise der Anwendenden abhängig. Dies umfasst zum Beispiel die Kenntnis des Anwendenden über Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Effekten, die durch die Informationsqualität beeinflusst werden. Zudem werden mithilfe der Vorgehensweise qualitative Aussagen über die erforderliche Informationsqualität getroffen, die als Anhaltspunkte zur Auswahl der richtigen Erfassungstechnologien und Maßnahmen

[15] Die systematische Bewertung und Auswahl von Steuerungsverfahren durch Methoden, die im Stand der Erkenntnisse analysiert wurden, basiert teilweise auf nicht frei zugänglichen Katalogen (bspw. [MUNY09])

dienen. Über den quantitativen Effekt, wie hoch die Auswirkungen bei einer nicht anforderungsgerechten Informationsqualität sind, kann im Rahmen der Harmonisierung der Informationsqualität bisher keine Aussage getroffen werden. Die aufgeführten Punkte stellen explizite Erweiterungsmöglichkeit der Methode dar.

Die beschriebene Vorgehensweise zur Harmonisierung der Informationsqualität setzt implizit voraus, dass die Steuerungsentscheidungen nachvollziehbar sind, indem die Steuerungsverfahren deterministisch ablaufen, um auf dieser Basis kritische Entscheidungssituation zu identifizieren. Mit den vermehrt neu aufkommenden Methoden und Technologien der Künstlichen Intelligenz, wie dem „Machine Learning“, die auch im Rahmen der Steuerung der Produktionslogistik eingesetzt werden könnten, ist diese implizite Voraussetzung nicht mehr gegeben. Zur Berücksichtigung dieser Methoden und Technologien kann die Grundstruktur der Methode beibehalten bleiben, jedoch wären in diesem Fall mindestens die Schritte „Modellierung der Informationsflüsse“ sowie „Harmonisierung der Informationsqualität“ an sich neu ergebende Anforderungen, anzupassen.

Schließlich besteht neben der inhaltlichen Ausgestaltung der Methode zudem noch die Möglichkeit, deren Anwendungsbereich zu erweitern. So beschränkt sich der Anwendungsbereich der Methode bisher auf die Steuerung der Produktionslogistik. Mögliche weitere Anwendungsbereiche der Methode wären die Produktionsplanung sowie Steuerung von Logistikprozessen in Supply Chains. Art und Umfang der Anwendung der Methode in diesen Anwendungsbereichen ist über zu definierende Anforderungen zu evaluieren.

Anhang

Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 1

Tabelle A-1: Als TFZ aufgenommene Kennzahlen der Ist-Situation von Anwendungsbeispiel 1

Prozessschritt/ Puffer	Bezeichnung [Einheit]	Kennzahl (Fuzzy-Zahl)			
		$\widetilde{M}$	m	α	β
Transporttyp 20	Transportmenge [Stk.]	$\widetilde{TM}_{20}$	1	0	0
Puffer v. VV	Bestand [Stk.]	$\tilde{B}_{v.VV}$	1	1	5
Puffer n. VV	Bestand [Stk.]	$\tilde{B}_{n.VV}$	1	1	4
Transporttyp 30	Transportmenge [Stk.]	$\widetilde{TM}_{30}$	2	1	1
Puffer Produktion	Bestand [Stk.]	$\tilde{B}_{Prod}$	5	5	9
Transporttyp 10 & 40	Transportmenge Transporttyp 10 [Stk.]	$\widetilde{TM}_{10}$	1	0	1
	Transportmenge Transporttyp 40 [Stk.]	$\widetilde{TM}_{40}$	1	0	1
Puffer v. V	Bestand [Stk.]	$\tilde{B}_{v.V}$	1	1	3
Verarbeitung	Anteilige Stillstandszeit durch Wartezeit auf Material [%]	$\widetilde{U}_V$	95,37	3,32	2,29
	Stillstand durch verspätete Bereitstellung [%]	$\tilde{S}_T$	3,17	1,12	2,66
	Stillstand durch verspätete Vorverarbeitung [%]	$\tilde{S}_{VV}$	1,46	1,46	2,89
Transporttyp 10, Transporttyp 20, Transporttyp 30 & Transporttyp 40	Auslastung Transportressource [%]	$\widetilde{U}_{TR}$	100	0	0

Modellierung der Bearbeitungsdauern der Drahtringe mittels Histogrammkonstruktion

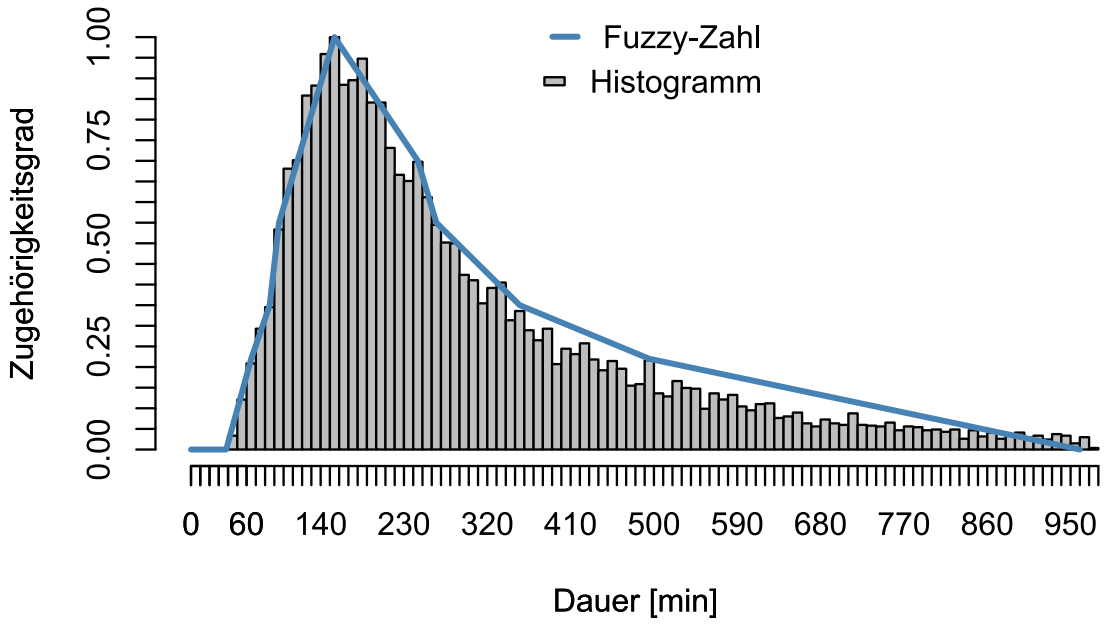

Abbildung A-1: Bearbeitungsdauern der Drahtringe an den Umformmaschinen

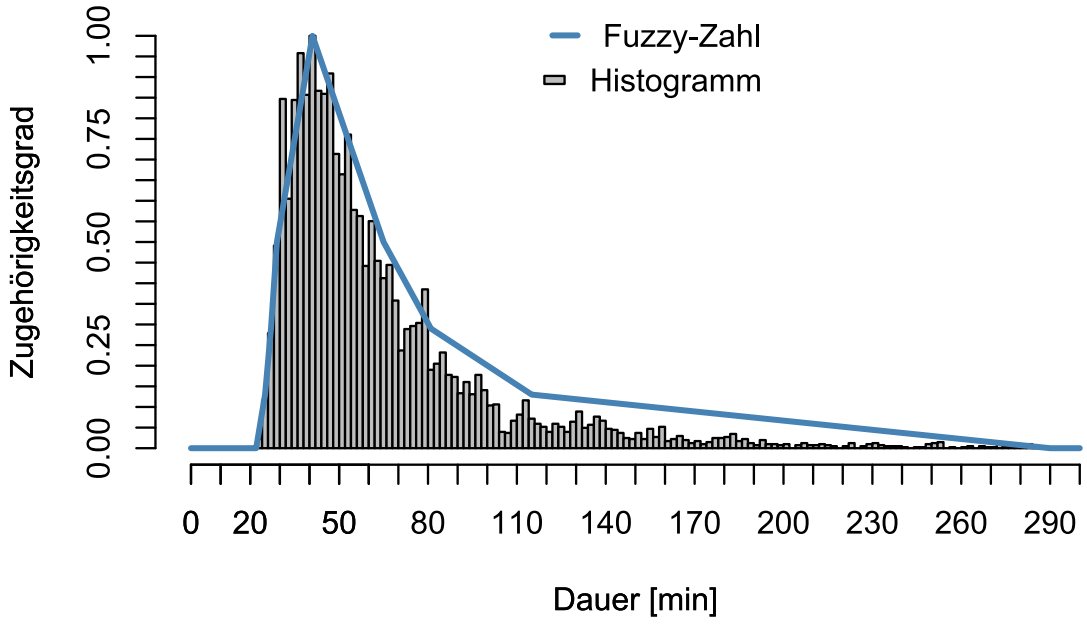

Abbildung A-2: Bearbeitungsdauer der Drahtringen an den vorverarbeitenden Maschinen

Berechnete Abstellmengen vorverarbeiteter Drahtringe auf den Puffern im Produktionsbereich

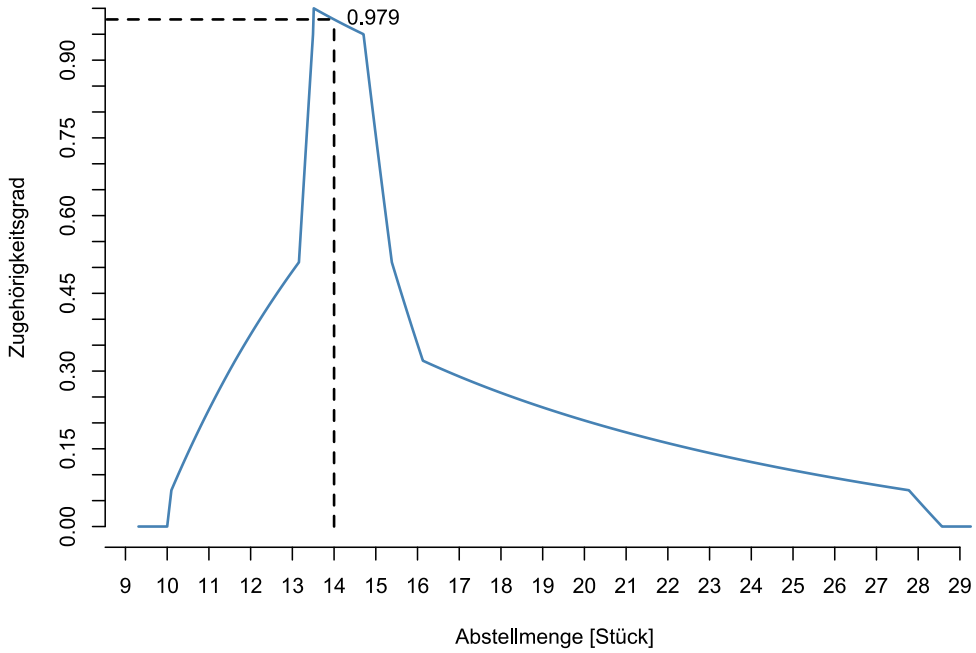

Abbildung A-3: Abstellmenge vorverarbeiteter Drahtringe Cluster 1 $\widetilde{AM}_{PP1}$

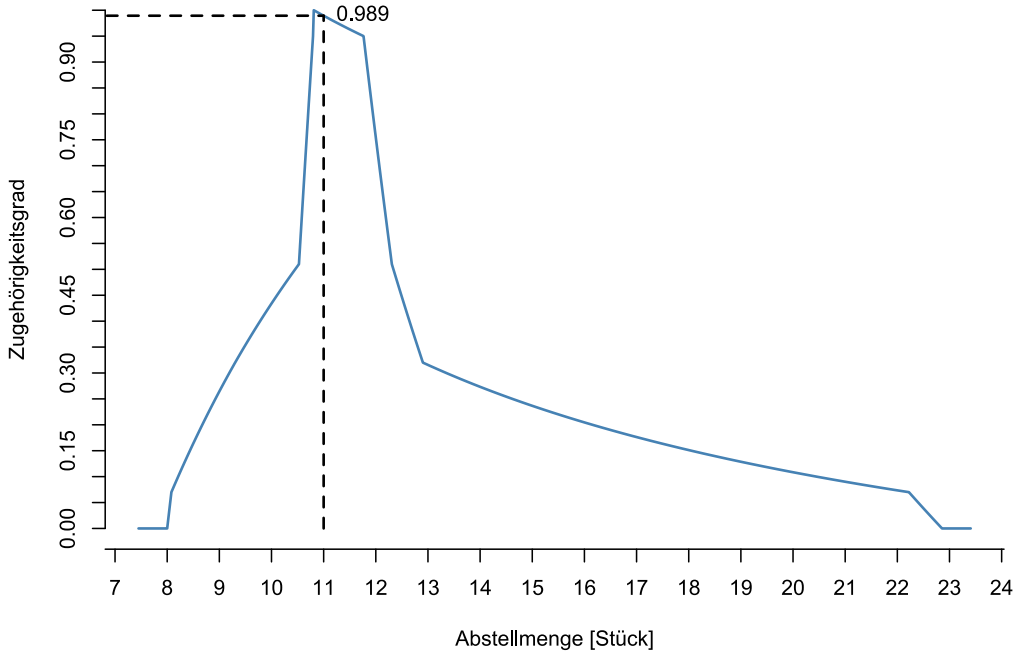

Abbildung A-4: Abstellmenge vorverarbeiteter Drahtringe Cluster 2 $\widetilde{AM}_{PP2}$

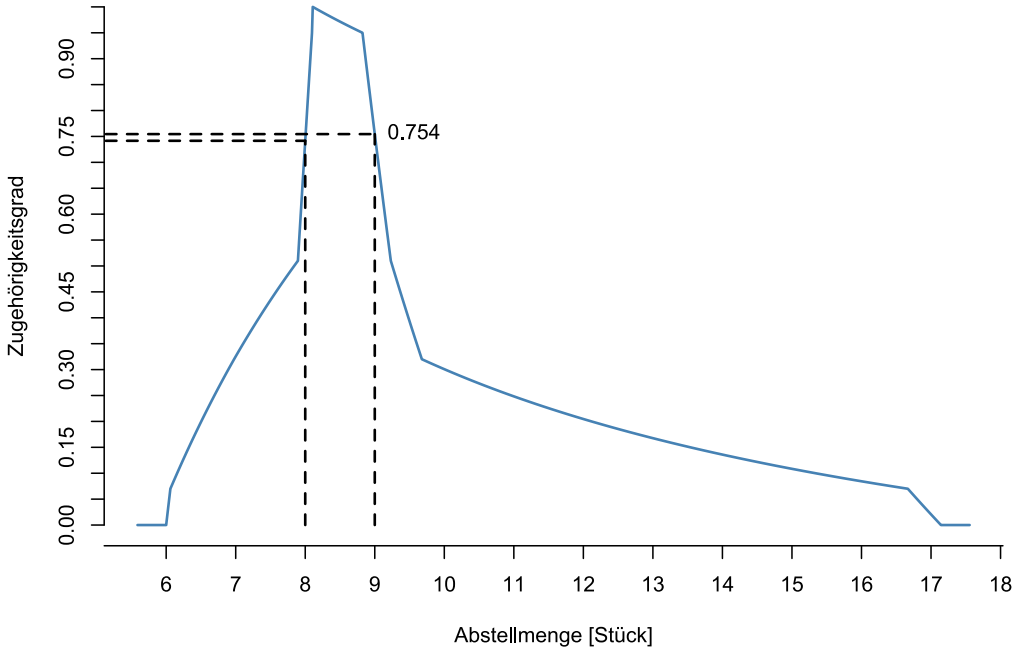

Abbildung A-5: Abstellmenge vorverarbeiteter Drahtringe Cluster 3 $\widetilde{AM}_{PP3}$

Diskussion der Simulationsergebnisse der IQ-Dimension *Verlässlichkeit*

Die Simulationsergebnisse der Analyse der Auswirkungen durch Abweichungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Informationen „Gewicht“, „Länge roher Drahtring“ sowie „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ sind in Tabelle A-2 bis Tabelle A-4 dargestellt. Die angegebenen Verlustgründe der jeweiligen Transporttypen sind folgenden Kennzahlen zugeordnet:

- *Verlustgrund 10:* Eingeplantes Material konnte (teilweise) durch Kapazitätsüberschreitung der Längenkapazität der Transportressource nicht aufgenommen werden und musste wieder abgestellt werden.
- *Verlustgrund 20:* Eingeplantes Material konnte (teilweise) durch Kapazitätsüberschreitung der Gewichtskapazität der Transportressource nicht aufgenommen werden und musste wieder abgestellt werden.
- *Verlustgrund 30:* Eingeplantes Material konnte (teilweise) durch Kapazitätsüberschreitung der Gewichtskapazität und der Längenkapazität der Transportressource nicht aufgenommen werden und musste wieder abgestellt werden.
- *Verlustgrund 40:* Eingeplantes Material konnte (teilweise) durch Kapazitätsüberschreitung der Längenkapazität der Pufferplätze nicht abgestellt werden und musste wieder an den Ursprungsort transportiert werden (bezeichnet als Transporttyp 90). Bei Transportaufträgen vom Transporttyp 30 erfolge statt einem Rücktransport zum Ursprungsort zunächst die Prüfung, ob das Material auch auf einem angrenzenden Pufferplatz im Produktionsbereich abstellbar ist (wurde im Rahmen der Bearbeitung vom Transporttyp 30 behandelt und nicht gesondert als Transporttyp 90 ausgewiesen). Nur wenn dies nicht möglich war, erfolgte ein Rücktransport auf die Pufferplätze hinter den vorverarbeitenden Maschinen (dann als Transporttyp 90 ausgewiesen).

Transporte des Transporttyp 90 beschreiben die zusätzlich generierten Transportaufträge zurück zum Ursprungsort, die aus einem Verlustgrund 40 entstanden sind.

Diskussion der Simulationsergebnisse der Information „Gewicht“

Die ermittelten Simulationsergebnisse auf Grund der im Simulationsmodell modellierten Abweichungen der Information „Gewicht“ sind in Tabelle A-2 zusammengefasst. Wie bereits im Rahmen der Evaluierung der Harmonisierung der Informationsqualität von Anwendungsbeispiel 1 beschrieben, haben Abweichungen der Information Gewicht von dem realen Wert von bis zu 10 % keine Auswirkungen auf die Auslastung der Umformmaschinen. Zudem werden alle Steuerungsentscheidungen identisch zu denen getroffen, wie bei einer idealen Informationsqualität. Die Plausibilität der Ergebnisse ist zum einen durch die geringen Zugehörigkeitsgrade an den Tipping-Points der Transportmenge $\widetilde{TM}_G$ zu begründen. Zudem korrelieren die Längen der Drahtringe positiv mit dem Gewicht der Drahtringe. Somit wird teilweise eine falsche Steuerungsentscheidung durch eine mögliche Abweichung durch die Information „Gewicht“ verhindert, da gegebenenfalls die zu dem Drahtring angegebene Länge verhindert, dass ein weiteres Material zu sehr schweren Drahtringen für einen Transportauftrag eingeplant wird.

Tabelle A-2: Simulationsergebnisse der Information „Gewicht“

Abweichung	**0 %**	**± 5 %**	**± 10 %**
Auslastung Umformmaschinen	**98,15 %**	**98,15 %**	**98,15 %**
Wartezeit auf Material	*1,75 %*	*1,75 %*	*1,75 %*
Fehlende Vorverarbeitung	*0,10 %*	*0,10 %*	*0,10 %*
Auslastung Transportprozesse	99,55 %	99,55 %	99,55 %
Mittlere Transportmenge [Stk.]	1,244	1,244	1,244
Transporttyp 10 [Anz.]	**5692**	**5692**	**5692**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,041*	*10,041*	*10,041*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 20 [Anz.]	**8532**	**8532**	**8532**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1*	*1*	*1*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 30 [Anz.]	**5420**	**5420**	**5420**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,574*	*1,574*	*1,574*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 40 [Anz.]	**5533**	**5533**	**5533**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,508*	*1,508*	*1,508*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 90 [Anz.]	**0**	**0**	**0**

Diskussion der Simulationsergebnisse der Information „Länge roher Drahtring“

Die ermittelten Simulationsergebnisse auf Grund der im Simulationsmodell modellierten Abweichungen der Information „Länge roher Drahtring“ sind in Tabelle A-3 zusammengefasst. Die Werte können als plausibel angesehen werden. So ist zu erkennen, dass die mittlere Transportmenge der Transportaufträge der Transporttypen 10 und 20 (in denen diese Information berücksichtigt wird) bei einer Zunahme der Abweichungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* dieser Information sinkt. Dies führt dazu, dass vermehrt Transportaufträge durchgeführt werden müssen, um die gleiche Menge an Material zu den entsprechenden Pufferplätzen der Maschinen zu transportieren, wie es bei einer idealen Informationsqualität möglich wäre, da diese nicht gebündelt werden. Eine Folge davon ist, dass sich zum einen die Wartezeit auf Material an den Umformmaschinen erhöht, da das Material häufiger verspätet bereitgestellt wird und zudem auch der Anteil der Stillstände, der auf eine verspätete Bereitstellung der vorverarbeiteten Materialien zurückzuführen ist, erhöht. Die Erhöhung des Anteils der Stillstände aufgrund der verspäteten Bereitstellung der vorverarbeiteten Materialien erfolgt dadurch, dass durch die Reduktion der mittleren Transportmenge der Transporttypen 10 und 20 auch diese Maschinen länger auf Material warten müssen und somit mit der Vorverarbeitung der Materialien erst später beginnen können. Die als *gering* eingestufte Anforderung an die Länge der Drahtringe im Kragarmlager kann als bestätigt angesehen werden, da es nur zu wenigen Korrekturen durch den Verlustgrund 10 kommt. Die Anforderung *teils-teils* an die Information „Länge der roher Drahtringe“ der Materialien auf den Pufferplätzen an den Umformmaschinen ist im Vergleich zur *geringen* Anforderung an die gleiche Information der Materialien im Kragarmlager zu hoch eingestuft, da der mit dieser Information in Verbindung stehende Verlustgrund 40 geringer ausfällt. Dies ist jedoch auf die in der Ermittlung der Anforderungen nicht berücksichtigen Wechselwirkungen zurückzuführen. Durch die geringere Effizienz der Transportprozesse der Transporttypen 10 und 20 steigt die Auslastung der Transportressource. Durch diesen Anstieg der Auslastung werden Transportaufträge erst kurzfristiger bearbeitet. Dadurch wiederum ist der Pufferplatz häufig bereits leer, sobald ein Transportauftrag bearbeitet wird. Somit ist auf diesem in der Regel ausreichend Platz, sodass die transportierte Transportmenge abgestellt werden kann. Zudem beeinflusst der Verlustgrund 10 den Verlustgrund 40. Durch eine Zunahme des Verlustgrunds 10 wird die Anzahl der zu transportierenden Materialien reduziert. Durch die dann geringere als geplante Transportmenge besteht weniger die Gefahr, dass die Kapazitäten des Pufferplatzes überschritten werden, da dies ja bereits im Steuerungsverfahren berücksichtigt wurde. Die als *hoch* eingestufte Anforderung an die Information „Länge roher Drahtring“ der Materialien, die sich auf den Pufferplätzen vor den vorverarbeitenden Maschinen befinden, kann als bestätigt angesehen werden, da insbesondere bei Transportaufträgen vom Transporttyp 20 häufig der Verlustgrund 40 auftritt.

Zudem gilt es den Effekt zu diskutieren, dass die mittlere Transportmenge über alle Transporttypen betrachtet bei einer steigenden relativen Abweichung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* der Information „Länge roher Drahtring“ ansteigt. Dies wird insbesondere durch die Transportaufträge vom Transporttyp 30 beeinflusst. Der kausale Zusammenhang dahinter ist, dass auch diese Transportaufträge durch die reduzierte Effizienz der Transportprozesse erst später bearbeitet werden. Somit stehen die zugehörigen Materialien Länger auf den Pufferplätzen hinter den vorverarbeitenden Maschinen. Durch das längere Warten, bis eine Bearbeitung der zugehörigen Transportaufträge begonnen wird, besteht vermehrt die Möglichkeit, dass ein Transportauftrag durch ein passendes Material erweitert werden und somit die Effizienz des Transportprozesses dieses Transporttyps erhöht werden kann.

Tabelle A-3: Simulationsergebnisse der Information „Länge roher Drahtring“

Abweichung	**0 %**	**± 5 %**	**± 10 %**
Auslastung Umformmaschinen	**98,15 %**	**98,00 %**	**97,65 %**
Wartezeit auf Material	*1,75 %*	1,79 %	1,89 %
Fehlende Vorverarbeitung	*0,10 %*	0,21 %	0,45 %
Auslastung Transportprozesse	99,55 %	99,90 %	100,00 %
Mittlere Transportmenge [Stk.]	1,244	1,245	1,245
Transporttyp 10 [Anz.]	**5692**	**5711**	**5707**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,041*	*1,038*	*1,036*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*20*	*38*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*5*	*7*
Transporttyp 20 [Anz.]	**8532**	**8623**	**8660**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1*	*0,989*	*0,983*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*95*	*145*
Transporttyp 30 [Anz.]	**5420**	**5263**	**5163**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,574*	*1,620*	*1,648*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 40 [Anz.]	**5533**	**5532**	**5547**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,508*	*1,507*	*1,500*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 90 [Anz.]	**0**	**100**	**152**

Diskussion der Simulationsergebnisse der Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“

Die ermittelten Simulationsergebnisse auf Grund der im Simulationsmodell modellierten Abweichungen der Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“ sind in Tabelle A-4 zusammengefasst. Diese Werte sind als plausibel anzusehen. So nimmt bei einer Zunahme der Abweichungen der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* die Auslastung der Umformmaschinen ab beziehungsweise die Wartezeit auf Material durch verspätet durchgeführte Transporte sowie aufgrund einer fehlenden Vorverarbeitung zu. Die Zunahme der ungeplanten Stillstände der Umformmaschinen basieren auf den gleichen kausalen Zusammenhängen, wie sie bereits für die Länge der vorverarbeiteten Drahtringe diskutiert wurden. Die Effekte der Abweichungen dieser Information fallen höher aus als die der „Länge roher Drahtring“, da die vorverarbeiteten Drahtringe ein größeres Potenzial zur Bündelung von Transporten aufgewiesen haben. Dies hat sich insbesondere durch die als *hoch* definierte Anforderung im Rahmen der Berechnung der Transportmenge $\widetilde{TM}_{VV}$ herausgestellt. So ist zu erkennen, dass bei Transportaufträgen vom Transporttyp 30 und 40 sehr häufig der Verlustgrund 10 eintritt, weil die reale Länge der vorverarbeiteten Drahtringe durch die Information unterschätzt wird. Zudem ist für die Transportaufträge vom Transporttyp 40 zu erkennen, dass sich die mittlere Transportmenge bei einer Zunahme der Abweichungen erkennbar verringert. Dies ist überwiegend auf eine Überschätzung der realen Länge zurückzuführen, sodass im Rahmen der Generierung der Steuerungsentscheidungen geringere Transportmengen ermittelt werden. Somit kann die als *hoch* eingestufte Anforderung für diese Information im Rahmen der Berechnung der Transportmenge $\widetilde{TM}_{VV}$ als bestätigt angesehen werden.

Der Information auf den Pufferplätzen der Umformmaschinen wurde ebenfalls die Anforderung *hoch* zugeordnet. Der Verlustgrund 40 tritt jedoch nur sehr gering auf. Dies ist auf die nicht berücksichtigte Wechselwirkungen mit den Effekten, die dem Verlustgrund 10 zugrunde liegen, sowie auf die Effizienz der Transportprozesse zurückzuführen. So verhindert die hohe Anzahl des Verlustgrundes 10, dass häufig die für den Transportprozess vorgesehene Transportmenge auch tatsächlich zur Senke transportiert wird. Zudem werden die Transportaufträge in der Regel später bearbeitet, sodass dadurch der Puffer der Umformmaschinen in der Regel bereits frei und nicht durch weitere Materialien belegt ist. Dadurch wird die Möglichkeit einer Überschreitung der verfügbaren Kapazität der Pufferplätze vermindert.

Die Zunahme der mittleren Transportmenge bei Transportaufträgen vom Transporttyp 30 ist, ähnlich wie bei der Beschreibung dieses Effektes für die Länge der rohen Drahtringe, auf die Ineffizienz der Transportaufträge (ausgedrückt in der Zunahme der Auslastung der Transportprozesse) zurückzuführen. Da Transportaufträge vom Transporttyp 30 erst später bearbeitet werden, besteht vermehrt die Möglichkeit, dass noch ausstehende Transportaufträge um ein weiteres Material ergänzt werden können. Durch das sehr häufige Auftreten des Verlustgrundes 10 bei diesem Transporttyp wird die mittlere Transportmenge im Vergleich zu der ermittelten Transportmenge bei einer idealen Informationsqualität nicht reduziert, sondern auf das gleiche Niveau angepasst. Durch das erneute Abstellen des Materials, da die Längenkapazität der Transportressource überschritten wurde, wird hingegen die Dauer zur Durchführung der Transportprozesse beeinflusst. Der Effekt der Möglichkeit der Ergänzung der Transportaufträge durch eine spätere Bearbeitung überkompensiert dabei sogar den Effekt, der eine Bündeldung von Materialien in einem Transportauftrag durch eine Überschätzung der realen Länge der vorverarbeiteten Drahtringe verhindert. Durch diese Zusammenhänge ist die Zunahme der mittleren Transportmenge des Transporttyp 30 bei einer ansteigenden Abweichung der IQ-Dimension *Verlässlichkeit* als plausibel anzunehmen.

Tabelle A-4: Simulationsergebnisse der Information „Länge vorverarbeiteter Drahtring“

Abweichung	**0 %**	**± 5 %**	**± 10 %**
Auslastung Umformmaschinen	**98,15 %**	**97,21 %**	**94,64 %**
Wartezeit auf Material	*1,75 %*	2,26 %	2,82 %
Fehlende Vorverarbeitung	*0,10 %*	0,53 %	2,53 %
Auslastung Transportprozesse	99,55 %	99,42 %	100,00 %
Mittlere Transportmenge [Stk.]	1,244	1,242	1,227
Transporttyp 10 [Anz.]	**5692**	**5692**	**5654**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,041*	*1,041*	*1,041*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 20 [Anz.]	**8532**	**8523**	**8474**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1*	*1*	*1*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Transporttyp 30 [Anz.]	**5420**	**5272**	**5206**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,574*	*1,617*	*1,625*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*287*	*554*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*21*	*2*
Transporttyp 40 [Anz.]	**5533**	**5721**	**6021**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,508*	*1,457*	*1,376*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*88*	*116*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*3*	*3*
Transporttyp 90 [Anz.]	**0**	**3**	**3**

Die Anzahl der Transportaufträge vom Transporttyp 90 entspricht der Anzahl der Transportaufträge mit einem Verlustgrund 40 des Transporttyps 40 und nicht der Summe der aufgetretenen Verlustgründe 40. Dies ist dadurch zu begründen, da bei einem Verlustgrund 40 bei einem Transportauftrag vom

Transporttyp 30 das Material auf weitere Pufferplätze im Produktionsbereich transportiert werden konnte, sodass kein Rücktransport zur Quelle notwendig war. Der Transport zu einem anderen Pufferplatz im Produktionsbereich wurde im Rahmen der Bearbeitung des Transporttyps 30 durchgeführt.

Vergleich der Berücksichtigung der Abweichungen der Information „Länge roher Drahtring“

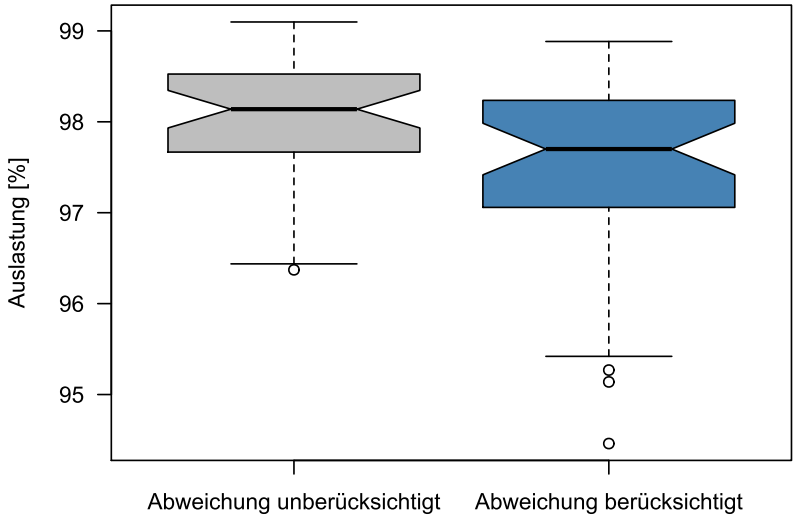

Abbildung A-6: Gegenüberstellung der Auswirkungen unberücksichtigter und berücksichtigter Abweichungen der Information „Länge roher Drahtring“

Ergänzungen zum Anwendungsbeispiel 2

Tabelle A-5: Gegenüberstellung Initialer Stand, nach Anwendungsbeispiel 1 und Anwendungsbeispiel 2

	Initialer Stand	Anwendungsbeispiel 1	Anwendungsbeispiel 2
Auslastung Umformmaschinen	**95,37 %**	**97,43 %**	**98,93 %**
Wartezeit auf Material	*3,17 %*	*2,05 %*	*0,66 %*
Fehlende Vorverarbeitung	*1,46 %*	*0,52 %*	*0,41 %*
Auslastung Transportprozesse	100,00 %	100,00 %	100,00 %
Mittlere Transportmenge [Stk.]	1,149	1,243	1,252
Transporttyp 10 [Anz.]	**5857**	**5752**	**5749**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,008*	*1,028*	*1,030*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*1*	*1*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*1*	*36*	*23*
Transporttyp 20 [Anz.]	**8485**	**8589**	**8712**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1*	*0,991*	*0,977*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*80*	*203*
Transporttyp 30 [Anz.]	**4933**	**5178**	**4936**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,719*	*1,643*	*1,723*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*86*	*113*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*4*	*7*
Transporttyp 40 [Anz.]	**7870**	**5606**	**5518**
Mittlere Transportmenge [Stk.]	*1,058*	*1,484*	*1,507*
Verlustgrund 10 [Anz.]	*0*	*22*	*24*
Verlustgrund 20 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 30 [Anz.]	*0*	*0*	*0*
Verlustgrund 40 [Anz.]	*0*	*3*	*2*
Transporttyp 90 [Anz.]	**1**	**119**	**228**

Literaturverzeichnis

[AANY95] A. Aamodt, M. Nygård: *Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge — An AI perspective on their integration.* Data & Knowledge Engineering, Vol. 16 (3), 1995, S. 191–222.

[AHL19] B. Axmann, W. Hamberger, T. Liegl: *Digitalisierung der Fabrik – Datenqualität als Schlüssel zum Erfolg.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 114 (5), 2019, S. 302–305.

[AIK+08] D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, K. Furmans: *Handbuch Logistik*. 3., neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2008 (VDI-Buch).

[APG+11] A. Azadegan, L. Porobic, S. Ghazinoory, P. Samouei, A. Saman Kheirkhah: *Fuzzy logic in manufacturing: A review of literature and a specialized application.* International Journal of Production Economics, Vol. 132 (2), 2011, S. 258–270.

[ARFU19] D. Arnold, K. Furmans: *Materialfluss in Logistiksystemen*. 7. Auflage, 2019.

[ARN14] M. Alnahhal, A. Ridwan, B. Noche: *In-plant milk run decision problems.* In: *2014 International Conference on Logistics Operations Management:* IEEE, S. 85–92, 2014.

[BASC16] C. Batini, M. Scannapieco: *Data and Information Quality.* Cham: Springer International Publishing, 2016.

[BAU15] J. Bauer: *Produktionslogistik.* In: Böge, Böge (Hrsg.): *Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik ; mit 424 Tabellen.* 22., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 1455–1479, 2015.

[BAU17] T. Bauernhansl: *Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma.* In: Vogel-Heuser, Bauernhansl, Hompel (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–31, 2017.

[BCF+09] C. Batini, C. Cappiello, C. Francalanci, A. Maurino: *Methodologies for data quality assessment and improvement.* ACM Computing Surveys, Vol. 41 (3), 2009, S. 1–52.

[BDF+18] P. Burggräf, M. Dannapfel, R. Forstmann, T. Adlon, C. Folling: *Data quality-based process enabling: Application to logistics supply processes in low-volume ramp-up context.* In: *2018 International Conference on Information Management and Processing (ICIMP):* IEEE, S. 36–41, 2018.

[BEC18] T. Becker: *Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren*. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.

[BED13] B. Bede: *Mathematics of Fuzzy Sets and Fuzzy Logic.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 2013 (Studies in Fuzziness and Soft Computing, 295).

[BER18] F. Bertagnolli: *Lean Management: Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie.* Wiesbaden: Springer Gabler, 2018.

[BFS18] S.-V. Buer, G.I. Fragapane, J.O. Strandhagen: *The Data-Driven Process Improvement Cycle: Using Digitalization for Continuous Improvement.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 51 (11), 2018, S. 1035–1040.

[BFZ09] M. Braglia, M. Frosolini, F. Zammori: *Uncertainty in value stream mapping analysis.* International Journal of Logistics Research and Applications, Vol. 12 (6), 2009, S. 435–453.

[BLO14] E. Bräkling, J. Lux, K. Oidtmann: *Logistikmanagement: Mit Logistik-Power schnell, schlank und fehlerfrei liefern.* Wiesbaden: Springer Gabler, 2014.

[BOT95] H.-H. Bothe: *Fuzzy Logic: Einführung in Theorie und Anwendungen*. Zweite, erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 1995.

[BSS+18] S.J. Blöchl, M. Schmitt, M. Schneider, A. Binder: *Industrie 4.0 in der Produktionslogistik.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 113 (3), 2018, S. 178–181.

[BSC18] S.-V. Buer, J.O. Strandhagen, F.T.S. Chan: *The link between Industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda.* International Journal of Production Research, Vol. 56 (8), 2018, S. 2924–2940.

[BSS+20] S.-V. Buer, M. Semini, J.O. Strandhagen, F. Sgarbossa: *The complementary effect of lean manufacturing and digitalisation on operational performance.* International Journal of Production Research, 2020, S. 1–17.

[CDL14] M.J. Cloud, B.C. Drachman, L.P. Lebedev: *A Brief Introduction to Interval Analysis.* In: Cloud, Drachman, Lebedev (Hrsg.): *Inequalities.* Cham: Springer International Publishing, Vol. 5, S. 179–193, 2014.

[CKW97] R. Caprihan, S. Kumar, S. Wadhwa: *Fuzzy systems for control of flexible machines operating under information delays.* International Journal of Production Research, Vol. 35 (5), 1997, S. 1331–1348.

[DAW14] H. Dawood: *Interval Mathematics as a Potential Weapon against Uncertainty.* In: Giannoccaro, Chakraverty (Hrsg.): *Mathematics of Uncertainty Modeling in the Analysis of Engineering and Science Problems:* IGI Global (Advances in Computational Intelligence and Robotics), S. 1–38, 2014.

[DIC15] P. Dickmann (Hrsg.): *Schlanker Materialfluss: Mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. 3. Auflage. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch), 2015.

[DIN EN ISO 12100] DIN EN ISO 12100. *Sicherheit von Maschinen,* 2011.

[DIN EN ISO 9000] DIN EN ISO 9000. *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe,* 2015.

[DIN EN 62264-1] DIN EN 62264-1. *Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie,* 2013.

[DLA15] A. Dresch, D.P. Lacerda, J.A.V. Antunes Jr: *Design Science Research.* Cham: Springer International Publishing, 2015.

[DMO+16] T. Drews, P. Molenda, O. Oechsle, R. Steinhilper: *Value-focused Design of Lean Production Systems Based on a System Dynamics Approach.* Procedia CIRP, Vol. 50, 2016, S. 478–483.

[DoDi18] U. Dombrowski, Y. Dix: *An Analysis of the Impact of Industrie 4.0 on Production Planning and Control.* In: Moon, Lee et al. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Smart Manufacturing for Industry 4.0.* Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), Vol. 536, S. 114–121, 2018.

[DoMi15] U. Dombrowski, T. Mielke (Hrsg.): *Ganzheitliche Produktionssysteme: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen.* Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch), 2015.

[DSD+20] U. Dombrowski, M. Sendler, Y. Dix, T. Adams, M. Kaufmann: *PPS 4.0 – Erfolgreiche Integration von Industrie-4.0-Ansätzen in der Produktionsplanung und -steuerung.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 115 (1-2), 2020, S. 8–14.

[DySp05] H. Dyckhoff, T. Spengler: *Produktionswirtschaft: Eine Einführung für Wirtschaftsingenieure.* Berlin: Springer, 2005 (Springer-Lehrbuch).

[EpHe04] M. Eppler, M. Helfert: *A classification and analysis of data quality costs.* In: *International Conference on Information Quality,* S. 311–325, 2004.

[Erl10] K. Erlach: *Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik*. 2., bearb. und erweiterte Aufl. Berlin, New York: Springer, 2010 (VDI-Buch).

[Eve96] W. Eversheim: *Produktionstechnik und -verfahren.* In: Kern (Hrsg.): *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft.* 2., völlig neu gestaltete Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre, Bd. 7), S. 1534–1546, 1996.

[FlMa05] E. Fleisch, F. Mattern (Hrsg.): *Das Internet der Dinge: Ubiquitous computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen.* Berlin: Springer, 2005.

[For07] H. Forslund: *Measuring information quality in the order fulfilment process.* International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 24 (5), 2007, S. 515–524.

[Fri97] A. Friedrich: *Logik und Fuzzy-Logik: Eine leichtverständliche Einführung mit Beispielen aus Technik und Wirtschaft.* Renningen-Malmsheim: expert-Verl., 1997.

[GCW+19] L.C. Günther, E. Colangelo, H.-H. Wiendahl, C. Bauer: *Data quality assessment for improved decision-making: a methodology for small and medium-sized enterprises.* Procedia Manufacturing, Vol. 29, 2019, S. 583–591.

[Gil14] T. Gilz: *Requirements Engineering und Requirements Management.* In: Eigner, Roubanov, Zafirov (Hrsg.): *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 53–75, 2014.

[GUD12] T. Gudehus: *Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien*. Studienausg. der 4., aktualisierten Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2012.

[GÜTE07] H.-O. Günther, H. Tempelmeier: *Produktion und Logistik*. 7., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2007.

[GUWÄ09] M. Gustavsson, C. Wänström: *Assessing information quality in manufacturing planning and control processes.* International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. 26 (4), 2009, S. 325–340.

[HAHO10] G. Hachtel, U. Holzbaur: *Management für Ingenieure: Technisches Management für Ingenieure in Produktion und Logistik.* Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.

[HAN05] M. Hanss: *Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.

[HBP+19] C. Hildebrandt, T. Bandyszak, A. Petrovska, N. Laxman, E. Cioroaica, S. Törsleff: *EURECA: epistemic uncertainty classification scheme for runtime information exchange in collaborative system groups.* SICS Software-Intensive Cyber-Physical Systems, Vol. 34 (4), 2019, S. 177–190.

[HBR19] G. Hoellthaler, S. Braunreuther, G. Reinhart: *Requirements for a methodology for the assessment and selection of technologies of digitalization for lean production systems.* Procedia CIRP, Vol. 79, 2019, S. 198–203.

[HIC07] B.J. Hicks: *Lean information management: Understanding and eliminating waste.* International Journal of Information Management, Vol. 27 (4), 2007, S. 233–249.

[HJS94] M. Hapke, A. Jaszkiewicz, R. Slowinski: *Fuzzy project scheduling system for software development.* Fuzzy Sets and Systems, Vol. 67 (1), 1994, S. 101–117.

[HMP+04] Hevner, March, Park, Ram: *Design Science in Information Systems Research.* MIS Quarterly, Vol. 28 (1), 2004, S. 75–105.

[HMS+18] L. Hartmann, T. Meudt, S. Seifermann, J. Metternich: *Value stream method 4.0: holistic method to analyse and design value streams in the digital age.* Procedia CIRP, Vol. 78, 2018, S. 249–254.

[HOHE11] M. ten Hompel, V. Heidenblut: *Taschenlexikon Logistik: Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik*. 3., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.

[HON05] K. Hon: *Performance and Evaluation of Manufacturing Systems.* CIRP Annals, Vol. 54 (2), 2005, S. 139–154.

[HOSP04] W.J. Hopp, M.L. Spearman: *To Pull or Not to Pull: What Is the Question?* Manufacturing & Service Operations Management, Vol. 6 (2), 2004, S. 133–148.

[HPO16] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto: *Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios.* In: *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS):* IEEE, S. 3928–3937, 2016.

[HSN17] L. Härtel, M. Schmidt, P. Nyhuis: *Logistikcontrolling der unternehmensinternen Lieferkette.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 112 (4), 2017, S. 238–242.

[HZV11] A. Haug, F. Zachariassen, D. van Liempd: *The costs of poor data quality.* Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 4 (2), 2011, S. 168–193.

[JAK19] W. Jakoby: *Qualitätsmanagement für Ingenieure: Ein praxisnahes Lehrbuch für die Planung und Steuerung von Qualitätsprozessen,* 2019 (Lehrbuch).

[JEG+19] R. Joppen, S.v. Enzberg, J. Gundlach, A. Kühn, R. Dumitrescu: *Key performance indicators in the production of the future.* Procedia CIRP, Vol. 81, 2019, S. 759–764.

[JÜBE98] R. Jünemann, A. Beyer: *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen: Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik.* Berlin, Heidelberg: Springer, 1998.

[KAAU17] G. Kasakow, J.C. Aurich: *Reactive Production Control - Information to Control a Production.* Applied Mechanics and Materials, Vol. 869, 2017, S. 151–158.

[KIDI09] A.D. Kiureghian, O. Ditlevsen: *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural Safety, Vol. 31 (2), 2009, S. 105–112.

[KIST01] K.-P. Kistner, M. Steven: *Produktionsplanung*. Dritte, vollständig überarbeitete Auflage. Heidelberg: Physica-Verlag HD, 2001.

[KLE06] J. Kletti: *MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.

[KLE09] W. Kleppmann: *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. 6., überarb. Aufl. München: Hanser, 2009 (Praxisreihe Qualitätswissen).

[KLSC14] J. Kletti, J. Schumacher: *Die perfekte Produktion: Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT)*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014.

[KOC15] S. Koch: *Einführung in das Management von Geschäftsprozessen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[KOC18] C. Koch: *Wertstromanalyse und -design für Auftragsfertiger.* Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg. Dissertation, 2018.

[KOR10] Y. Koren: *The global manufacturing revolution: Product-process-business integration and reconfigurable systems.* Hoboken, NJ: Wiley a John Wiley & Sons Inc, 2010 (Wiley series in systems engineering and management).

[KOZÜ15] D. Kolberg, D. Zühlke: *Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 48 (3), 2015, S. 1870–1875.

[KWH13] H. Kagermann, W. Wahlster, J. Helbig: *Umsetzungsempfehlungen für das ZukunftsprojektIndustrie 4.0,* 2013.

[LAU10] T. Lauer: *Change Management: Grundlagen und Erfolgsfaktoren.* Berlin: Springer, 2010.

[LI13] Q. Li: *A novel Likert scale based on fuzzy sets theory.* Expert Systems with Applications, Vol. 40 (5), 2013, S. 1609–1618.

[LIGR09] M. Lindemann, N. Gronau: *Gestaltung marktorientierter Produktionssysteme.* In: Specht (Hrsg.): *Weiterentwicklung der Produktion.* Wiesbaden: Gabler, S. 43–59, 2009.

[LÖD12] H. Lödding: *A manufacturing control model.* International Journal of Production Research, Vol. 50 (22), 2012, S. 6311–6328.

[LÖD16] H. Lödding: *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016 (VDI-Buch).

[LÖD19] H. Lödding: *Produktionslogistik.* In: Furmans, Kilger (Hrsg.): *Betrieb von Logistiksystemen.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Fachwissen Logistik), Vol. 35, S. 107–131, 2019.

[LOO99] P. Loos: *Grunddatenverwaltung und Betriebsdatenerfassung als Basis der Produktionsplanung und –steuerung.* In: Corsten (Hrsg.): *Einführung in das Produktionscontrolling.* München: Vahlen (Controlling), S. 227–252, 1999.

[LUWI17] A. Lugert, H. Winkler: *Von der Wertstromanalyse zum Wertstrommanagement.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 112 (4), 2017, S. 261–265.

[LUWI19] A. Lugert, H. Winkler: *Zukunftsfähigkeit der Wertstrommethode im Kontext von Industrie 4.0.* Logistics Journal, Vol. 2019, 2019, S. 1–10.

[LVF17] M. Lewin, S. Voigtlander, A. Fay: *Method for process modelling and analysis with regard to the requirements of Industry 4.0: An extension of the value stream method.* In: *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society:* IEEE, S. 3957–3962, 2017.

[MBB20] K. Mertens, R. Bernerstätter, H. Biedermann: *Value Stream Mapping and Process Mining: A Lean Method Supported by Data Analytics.* In: *Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020).* Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover, S. 119–126, 2020.

[MDB14] D. Mourtzis, M. Doukas, D. Bernidaki: *Simulation in Manufacturing: Review and Challenges.* Procedia CIRP, Vol. 25, 2014, S. 213–229.

[MEN07] A. Märtens, M. Elsweier, R. Nickel: *Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung: Flexible Dezentralität auf Basis eines Modulkonzepts.* wt Werkstattstechnik online, Vol. 97 (6), 2007, S. 471–478.

[MESC19] M. Messer, G. Schneider: *Statistik: Theorie und Praxis im Dialog.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019.

[MIA17] H. Meissner, R. Ilsen, J.C. Aurich: *Analysis of Control Architectures in the Context of Industry 4.0.* Procedia CIRP, Vol. 62, 2017, S. 165–169.

[MJH+19] P. Molenda, A. Jugenheimer, C. Haefner, O. Oechsle, R. Karat: *Methodology for the visualization, analysis and assessment of information processes in manufacturing companies.* Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, S. 5–10.

[MLM16] T. Meudt, C. Leipoldt, J. Metternich: *Der neue Blick auf Verschwendungen im Kontext von Industrie 4.0.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 111 (11), 2016, S. 754–758.

[MMA17] T. Meudt, J. Metternich, E. Abele: *Value stream mapping 4.0: Holistic examination of value stream and information logistics in production.* CIRP Annals, Vol. 66 (1), 2017, S. 413–416.

[MMM+17] J. Metternich, M. Müller, T. Meudt, C. Schaede: *Lean 4.0 – zwischen Widerspruch und Vision.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 112 (5), 2017, S. 346–348.

[MÖBE04] B. Möller, M. Beer: *Fuzzy Randomness: Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics.* Berlin, Heidelberg: Springer, 2004.

[MPL+18] A. Moeuf, R. Pellerin, S. Lamouri, S. Tamayo-Giraldo, R. Barbaray: *The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0.* International Journal of Production Research, Vol. 56 (3), 2018, S. 1118–1136.

[MRB+16] T. Meudt, M.P. Rößler, J. Böllhoff, J. Metternich: *Wertstromanalyse 4.0.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 111 (6), 2016, S. 319–323.

[MUNY09] B. Muenzberg, P. Nyhuis: *Individual Configuration Of Production Control To Suit Requirements.* International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering, Vol. 3 (11), 2009, S. 1374–1379.

[MÜNY10] B. Münzberg, P. Nyhuis: *Konfiguration der Fertigungssteuerung: Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen.* wt Werkstattstechnik online, Vol. 100 (4), 2010, S. 285–290.

[MYR17] P. Myrelid: *Information quality deficiencies in delivery schedules and their impact on production scheduling.* Production Planning & Control, Vol. 28 (3), 2017, S. 232–243.

[NEB09] T. Nebl: *Produktionswirtschaft*. 6., vollst. überarb. und erw. Aufl. München: Oldenbourg, 2009 (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).

[NHQ+17] P. Nyhuis, M. Hübner, M. Quirico, P. Schäfers, M. Schmidt: *Veränderung in der Produktionsplanung und -steuerung.* In: Reinhart (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik.* München: Hanser, S. 31–50, 2017.

[NMK09] P. Nyhuis, B. Münzberg, M. Kennemann: *Configuration and regulation of PPC.* Production Engineering, Vol. 3 (3), 2009, S. 287–294.

[NMK14] P. Nyhuis, J. Mayer, T. Kuprat: *Die Bedeutung von Industrie 4.0 als Enabler für logistische Modelle: Vorteile von Industrie 4.0 durch die Verbesserung von Entscheidungsunterstützungen auf Grundlage logistischer logistischer Modelle.* In: Kersten, Koller, Lödding (Hrsg.): *Industrie 4.0: Wie intelligente Vernetzung und*

kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Berlin: Gito mbH Verlag (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)), S. 79–100, 2014.

[NMP+16] P. Nyhuis, J. Mayer, J. Pielmeier, C. Berger, F. Engehausen, T. Hempel, P. Hünnekes: *Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen: Studienergebnisse.* Garbsen: PZH Verlag, Oktober 2016.

[NOH01] H. Nohr: *Management der Informationsqualität.* In: Riekert, Michelson (Hrsg.): *Informationswirtschaft.* Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, S. 57–77, 2001.

[NUL01] F. Nullmeier: *Input, Output, Outcome, Effektivität und Effizienz.* In: Blanke, Bandemer et al. (Hrsg.): *Handbuch zur Verwaltungsreform.* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 357–363, 2001.

[NYH18] P. Nyhuis: *PPS-Report 2017/18: Studienergebnisse*. 1. Erstausgabe. Garbsen: TEWISS, 2018 (Berichte aus dem IFA, 2018).

[NYWI12] P. Nyhuis, H.-P. Wiendahl: *Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen*. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012 (VDI-Buch).

[OBK12] D. Oedekoven, F. Bauhoff, S. Kompa: *Harmonisierung von ERP-/PPS-Prozessen und -Systemen.* In: Schuh, Stich (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung.* 4., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 380–424, 2012.

[OLH03] J. Olhager: *Strategic positioning of the order penetration point.* International Journal of Production Economics, Vol. 85 (3), 2003, S. 319–329.

[OST12] M. Ostgathe: *System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage.* München, Technischen Universität München, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften. Dissertation, 2012.

[PAR19] A. Parchami: *Calculator for fuzzy numbers.* Complex & Intelligent Systems, Vol. 5 (3), 2019, S. 331–342.

[PAW07] G. Pawellek: *Produktionslogistik: Planung - Steuerung - Controlling ; mit 42 Übungsfragen*. 1. Aufl. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2007.

[PET18] R. Peters: *Process-Mining: Geschäftsprozesse: Smart, Schnell und Einfach.* Wiesbaden: Gabler, 2018 (Essentials Ser).

[PFO16] H.-C. Pfohl: *Logistikmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

[PFO18] H.-C. Pfohl: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 9., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018.

[PRW01] A. Picot, R. Reichwald, R.T. Wigand: *Die grenzenlose Unternehmung.* Wiesbaden: Gabler Verlag, 2001.

[PUH20] J. Puhani: *Statistik: Einführung mit praktischen Beispielen*. 13th ed. 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.

[RBH+17] C. Reuter, F. Brambring, T. Hempel, P. Kopp: *Benefit Oriented Production Data Acquisition for the Production Planning and Control.* Procedia CIRP, Vol. 61, 2017, S. 487–492.

[RBH16] C. Reuter, F. Brambring, T. Hempel: *Increasing the Traceability Through Targeted Data Acquisition for Given Product Process Combinations.* Procedia CIRP, Vol. 52, 2016, S. 210–215.

[RBW+16] C. Reuter, F. Brambring, J. Weirich, A. Kleines: *Improving Data Consistency in Production Control by Adaptation of Data Mining Algorithms.* Procedia CIRP, Vol. 56, 2016, S. 545–550.

[RCS+19] M. Rossini, F. Costa, A.P. Staudacher, G. Tortorella: *Industry 4.0 and Lean Production: an empirical study.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 52 (13), 2019, S. 42–47.

[RCT+19] M. Rossini, F. Costa, G.L. Tortorella, A. Portioli-Staudacher: *The interrelation between Industry 4.0 and lean production: an empirical study on European manufacturers.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 102 (9-12), 2019, S. 3963–3976.

[REBR16] C. Reuter, F. Brambring: *Improving Data Consistency in Production Control.* Procedia CIRP, Vol. 41, 2016, S. 51–56.

[RFH+19] D. Romero, M. Flores, M. Herrera, H. Resendez: *Five Management Pillars for Digital Transformation Integrating the Lean Thinking Philosophy.* In: *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC):* IEEE, S. 1–8, 2019.

[RKM+18] J.P. Rohweder, G. Kasten, D. Malzahn, A. Piro, J. Schmid: *Informationsqualität – Definitionen, Dimensionen und Begriffe.* In: Hildebrand, Gebauer et al. (Hrsg.): *Daten- und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information Excellence.* 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 23–43, 2018.

[RKW19] P. Roh, A. Kunz, K. Wegener: *Information stream mapping: Mapping, analysing and improving the efficiency of information streams in manufacturing value streams.* CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 25, 2019, S. 1–13.

[RMA14] M.P. Roessler, J. Metternich, E. Abele: *Learning to See Clear: Quantification and Multidimensional Assessment of Value Stream Mapping Alternatives Considering Variability.* Business and Management Research, Vol. 3 (2), 2014, S. 93–109.

[ROAB15] M.P. Roessler, E. Abele: *Enhancement of the overall equipment effectiveness measure: a contribution for handling uncertainty in shop floor optimisation and production planning.* International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol. 20 (2), 2015, S. 141.

[ROE16] M.P. Roessler: *Information Management in Improvement Projects: Qualitative and Linguistic Approaches to Value Stream Design.* Applied Mechanics and Materials, Vol. 826, 2016, S. 123–127.

[ROH19] P. Roh: *Methoden zur datengetriebenen Lokalisierung des Verbesserungspotentials in Produktionsabläufen.* Zurich, ETH Zurich. Dissertation, 2019.

[ROSH18] M. Rother, J. Shook: *Learning to see: Value stream mapping to create value and eliminate muda*. 20th anniversary edition, Version 1.5. Boston, MA: Lean Enterprise Institute, 2018.

[RÖß16] M.P. Rößler: *Verfahren zur industriellen Produktionssystemoptimierung unter Berücksichtigung systemimmanenter Unsicherheiten.* Darmstadt, TU Darmstadt. Dissertation, 2016.

[RSD12] M. Rosemann, A. Schwegmann, P. Delfmann: *Vorbereitung der Prozessmodellierung.* In: Becker, Kugeler, Rosemann (Hrsg.): *Prozessmanagement: Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung.* Siebte, korrigierte und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler, S. 47–111, 2012.

[SCFR07] B. Scholz-Reiter, M. Freitag: *Autonomous Processes in Assembly Systems.* CIRP Annals, Vol. 56 (2), 2007, S. 712–729.

[SCFU15] G. Schuh, C. Fuß (Hrsg.): *ProSense: Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes ; hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik*. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verl., 2015.

[SCH98] L. Schwarz: *A New Teaching Paradigm: The Information/ Control/Buffer Portfolio.* Production and Operations Management, Vol. 7 (2), 1998, S. 125–131.

[SCH99] E. Schnieder: *Methoden der Automatisierung: Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme.* Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1999 (Studium Technik).

[SCH07] G. Schuh: *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung Und Konzepte.* Dordrecht: Springer, 2007 (VDI-Buch).

[SCH13] S. Schreiber: *Entwicklung einer Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit von dezentralen Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme.* Hamburg, Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Institut für Automatisierungstechnik. Dissertation, 2013.

[SCH20] P. Schönsleben: *Integrales Logistikmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.

[SCKL11] G. Schuh, S. Klappert: *Technologiemanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

[SCSC17] M. Schmidt, P. Schäfers: *The Hanoverian Supply Chain Model: modelling the impact of production planning and control on a supply chain's logistic objectives.* Production Engineering, Vol. 11 (4-5), 2017, S. 487–493.

[SCST12] G. Schuh, V. Stich (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung*. 4., überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch), 2012.

[SCWE19] G. Schuh, P. Wetzchewald: *Increasing the Regulability of Production Planning and Control Systems.* In: Ameri, Stecke et al. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Towards Smart Production Management Systems.* Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), Vol. 567, S. 231–239, 2019.

[SESE90] A. Sethi, S. Sethi: *Flexibility in manufacturing: A survey.* International Journal of Flexible Manufacturing Systems, Vol. 2 (4), 1990.

[SEW16] A. Sanders, C. Elangeswaran, J. Wulfsberg: *Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing.* Journal of Industrial Engineering and Management, Vol. 9 (3), 2016, S. 811.

[SHB13] V. Stich, N. Hering, T. Brosze: *Beschaffungslogistik.* In: Schuh, Stich (Hrsg.): *Logistikmanagement.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 77–113, 2013.

[SHH+18] M. Seitz, L. Härtel, M. Hübner, L. Merkel, J. be Isa, F. Engehausen, M. Schmidhuber, F. Sauermann, P. Hünnekes: *PPS-Report 2017/2018.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Vol. 113 (12), 2018, S. 840–844.

[SHM15] V. Stich, N. Hering, J. Meißner: *Cyber Physical Production Control.* In: Umeda, Nakano et al. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth.* Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), Vol. 459, S. 308–315, 2015.

[SJF11] S. Schreiber, S. Jerenz, A. Fay: *Anforderungen an Steuerungskonzepte für moderne Fertigungsanlagen: Herausforderungen für dezentrale Ansätze in der Automatisierungstechnik.* In: Adolphs (Hrsg.): *Automation 2011: Der 12. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik ; Kongress Baden-Baden, 28. und 29. Juni 2011.* Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 2143, Buch), S. 28–29, 2011.

[SKP+10] G. Schuh, A. Kampker, T. Potente, A. Stollwerk, C. Müller: *Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung mit Enterprise Dynamics.* In: Zülch, Stock (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal: Integration aspects of simulation: equipment, organization and personnel ; Karlsruhe, 7. und 8. Oktober 2010.* Karlsruhe: KIT Scientific Publ (ASIM-Mitteilung, AM 131), S. 413–420, 2010.

[SKR+17] A. Sanders, K.R. K. Subramanian, T. Redlich, J.P. Wulfsberg: *Industry 4.0 and Lean Management – Synergy or Contradiction?* In: Lödding, Riedel et al. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. The Path to Intelligent, Collaborative and Sustainable Manufacturing.* Cham: Springer International Publishing (IFIP Advances in Information and Communication Technology), Vol. 514, S. 341–349, 2017.

[SMN19A] P. Schäfers, A. Mütze, P. Nyhuis: *Digital Production Order Processing Support System Using Real Time Data.* In: Dimitrov, Hagedorn-Hansen, Leipzig (Hrsg.):

International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19). Stellenbosch: Department of Industrial Engineering, Stellenbosch University, S. 28–34, 2019.

[SMN19B] P. Schäfers, A. Mütze, P. Nyhuis: *Integrated Concept for Acquisition and Utilization of Production Feedback Data to Support Production Planning and Control in the Age of Digitalization.* Procedia Manufacturing, Vol. 31, 2019, S. 225–231.

[SNR+15] G. Schuh, P. Nyhuis, C. Reuter, A. Hauptvogel, S. Schmitz, J. Nywlt, F. Brambring, F. Schulte, J. Hansen: *Produktionsdaten als Enabler für Industrie 4.0: Gemeinsame Studie der produktionstechnischen Institute IFA, IPMT, Fraunhofer IWU und WZL.* wt Werkstattstechnik online, Vol. 105 (4), 2015, S. 200–203.

[SOC08] I. Serrano, C. Ochoa, R.D. Castro: *Evaluation of value stream mapping in manufacturing system redesign.* International Journal of Production Research, Vol. 46 (16), 2008, S. 4409–4430.

[SOTE17] V. Sonmez, M.C. Testik: *Using accurately measured production amounts to obtain calibration curve corrections of production line speed and stoppage duration consisting of measurement errors.* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 88 (9-12), 2017, S. 3257–3263.

[SPF+12] G. Schuh, T. Potente, S. Fuchs, C. Thomas: *Analyzing the Effects of Production Control on Logistic Targets with Web-Based Simulation Model.* In: Frick, Laugen (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (IFIP Advances in Information and Communication Technology), Vol. 384, S. 190–199, 2012.

[SPH+13] G. Schuh, T. Potente, A. Hauptvogel, C. Thomas, C. Müller: *Wertstromorientierte Konfiguration der Produktionssteuerung durch webbasierte Simulation.* In: Dangelmaier, Laroque, Klaas (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013: Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung.* Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn (ASIM-Mitteilung, 147), S. 651–660, 2013.

[SPR+17] G. Schuh, T. Potente, C. Reuter, A. Hauptvogel: *Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme.* In: Vogel-Heuser, Bauernhansl, Hompel (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Vol. 59, S. 75–92, 2017.

[SPT+12] G. Schuh, T. Potente, C. Thomas, A. Hauptvogel, C. Mueller, A. Stollwerk: *Web-based value stream oriented simulation of production control.* In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference (WSC):* IEEE, S. 1–10, 2012.

[SRL+19] V. Simard, M. Rönnqvist, L. Lebel, N. Lehoux: *A General Framework for Data Uncertainty and Quality Classification.* IFAC-PapersOnLine, Vol. 52 (13), 2019, S. 277–282.

[SRP+17] G. Schuh, C. Reuter, J.-P. Prote, F. Brambring, J. Ays: *Increasing data integrity for improving decision making in production planning and control.* CIRP Annals, Vol. 66 (1), 2017, S. 425–428.

[SSB+11] G. Schuh, V. Stich, T. Brosze, S. Fuchs, C. Pulz, J. Quick, M. Schürmeyer, F. Bauhoff: *High resolution supply chain management: optimized processes based on self-optimizing control loops and real time data.* Production Engineering, Vol. 5 (4), 2011, S. 433–442.

[STE13] M. Steven: *Einführung in die Produktionswirtschaft.* Stuttgart: Kohlhammer Verlag, 2013.

[STM+13] S.M. Seyedhosseini, A.E. Taleghani, A. Makui, S.M. Ghoreyshi: *Fuzzy value stream mapping in multiple production streams: A case study in a parts manufacturing company.* International Journal of Management Science and Engineering Management, Vol. 8 (1), 2013, S. 56–66.

[SWH90] M.L. Spearman, D.L. Woodruf, W.J. Hopp: *CONWIP: a pull alternative to kanban.* International Journal of Production Research, Vol. 28 (5), 1990, S. 879–894.

[SWW+17] W. Shou, J. Wang, P. Wu, X. Wang, H.-Y. Chong: *A cross-sector review on the use of value stream mapping.* International Journal of Production Research, Vol. 55 (13), 2017, S. 3906–3928.

[THAL11] U. Thonemann, M. Albers: *Operations Management: Konzepte, Methoden und Anwendungen*. 2., aktualisierte Aufl., [Nachdr.]. München: Pearson Studium, 2011 (Wi - Wirtschaft).

[VDI 2870-1] VDI 2870-1. *Ganzheitliche Produktionssysteme,* 2012.

[VDI 3633-1] VDI 3633-1. *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen,* 2014.

[VDI 4400-2] VDI 4400-2. *Logistikkennzahlen für die Produktion,* 2004.

[VDI 5201-1] VDI 5201-1. *Beschreibung und Messung der Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen,* 2017.

[VDM18] VDMA Forum Industrie 4.0: *Lean trifft Industrie 4.0: Wertschöpfung ganzheitlich steigern.* Frankfurt/Main: VDMA Verlag GmbH, 2018.

[VDZV15] VDI, ZVEI: *Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0),* Düsseldorf. 2015.

[WAHÜ95] H.J. Warnecke, M. Hüser: *Lean production.* International Journal of Production Economics, Vol. 41 (1-3), 1995, S. 37–43.

[WAN10] H. Wannenwetsch: *Integrierte Materialwirtschaft und Logistik: Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion*. 4., aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010 (Springer-Lehrbuch).

[WAST96] R.Y. Wang, D.M. Strong: *Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers.* Journal of Management Information Systems, Vol. 12 (4), 1996, S. 5–33.

[WEDE06] E. Westkämper, M. Decker: *Einführung in die Organisation der Produktion.* Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006 (Springer-Lehrbuch).

[WELÖ16] E. Westkämper, C. Löffler: *Strategien der Produktion.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.

[WER13] H. Werner: *Grundlagen.* In: Werner (Hrsg.): *Supply Chain Management.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–90, 2013.

[WES01] J.R. Westphal: *Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik: Ein Ansatz zur flussorientierten Gestaltung und Lenkung heterogener Produktionssysteme*. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag, 2001 (Gabler Edition Wissenschaft).

[WIE10] H.-P. Wiendahl: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2010.

[WIE14] R.J. Wieringa: *Design Science Methodology for Information Systems and Software Engineering.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.

[WOL16] C. Wolfsgruber: *Informatization in Production Planning and Control: A Simulation based Evaluation of the Impacts in Flow Shop Production Systems.* Graz, TU Graz. Dissertation, 2016.

[WOLI16] C. Wolfsgruber, G. Lichtenegger: *Optimal Configuration in Production Planning and Control.* BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 161 (5), 2016, S. 221–224.

[WRN14] H.-P. Wiendahl, J. Reichardt, P. Nyhuis: *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser, 2014.

[WRN15] H.-P. Wiendahl, J. Reichardt, P. Nyhuis: *Handbook factory planning and design.* Heidelberg: Springer, 2015.

[WWB+14] M. Weyrich, I. Wior, D. Bchennati, A. Fay: *Flexibilisierung von Automatisierungssystemen: Systematisierung der Flexibilitätsanforderungen von Industrie 4.0.* wt Werkstattstechnik online, Vol. 104 (3), 2014, S. 106–111.

[XXL18] L.D. Xu, E.L. Xu, L. Li: *Industry 4.0: state of the art and future trends.* International Journal of Production Research, Vol. 56 (8), 2018, S. 2941–2962.

[YSL18] Y. Yin, K.E. Stecke, D. Li: *The evolution of production systems from Industry 2.0 through Industry 4.0.* International Journal of Production Research, Vol. 56 (1-2), 2018, S. 848–861.

[ZAD99] L.A. Zadeh: *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility.* Fuzzy Sets and Systems, Vol. 100, 1999, S. 9–34.

[ZAM15] F. Zammori: *Fuzzy Overall Equipment Effectiveness (FOEE): capturing performance fluctuations through LR Fuzzy numbers.* Production Planning & Control, Vol. 26 (6), 2015, S. 451–466.

[ZBF11] F. Zammori, M. Braglia, M. Frosolini: *Stochastic overall equipment effectiveness.* International Journal of Production Research, Vol. 49 (21), 2011, S. 6469–6490.

[ZXY+20] Z. Zhiwen, Y. Xiaoying, X. Yujun, G. Limin, L. Junxing: *Supply Chain Logistics Information Quality Evaluation From Just-in-Time Perspective.* IEEE Access, Vol. 8, 2020, S. 105728–105743.