

Automatisierte Modellbildung und Parametrierung für die Simulation globaler Produktionsnetzwerke

Michael Milde

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Die Dissertation wurde am 18.06.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 13.11.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwb ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwb. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwb-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Forschungsmethodik und -umgebung	6
1.3.1 Forschungsfragen	6
1.3.2 Adaption der Design Research Methodology	6
1.3.3 Forschungsumgebung und Beschreibung des Anwendungs- falls	8
1.4 Aufbau der Arbeit	10
2 Grundlagen	13
2.1 Produktionsnetzwerke und Auftragsabwicklung	13
2.1.1 Produktionsnetzwerke	13
2.1.2 Auftragsabwicklung	14
2.1.3 Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken	18
2.2 Simulation	20
2.2.1 Vorgehen in Simulationsprojekten	21
2.2.2 Werkzeuge für Simulationsprojekte	23
2.3 Simulation der Auftragsabwicklung in GPN	26
3 Stand der Technik	29
3.1 Überblick über den Stand der Technik	29
3.2 Ansätze zur Effizienzsteigerung in Simulationsprojekten	31
3.2.1 Strukturbasierte Modellbildung und Parametrierung	32
3.2.2 Extraktionswerkzeuge	34
3.2.3 Wissensbasierte Modellbildung und Parametrierung	37
3.2.4 Datenbasierte Modellbildung und Parametrierung	40
3.2.5 Automatisierte Modellgenerierung	47
3.3 Zusammenfassung und Forschungsmöglichkeiten	52
4 Konzeptionelle Gestaltung des Ansatzes	57
4.1 Anforderungen	57
4.2 Übersicht	60
4.2.1 Wissensmodell OntoGPN	65

4.2.2	Datenidentifikation und -aufbereitung	66
4.2.3	Allgemeine Simulationsbausteine SimGPN	70
4.2.4	Automatisierten Modellbildung und Parametrierung	71
4.3	Gesamtdarstellung des AutoGPN-Ansatzes	72
5	Detaillierte Gestaltung des Ansatzes	75
5.1	Entwicklung eines allgemeinen Modells der Auftragsabwicklung in GPN	75
5.1.1	Vorgehen bei der Entwicklung	75
5.1.2	Literaturrecherche über relevante Ontologien	77
5.1.3	Aufbau der Ontologie	80
5.1.4	First Level Ontology	81
5.1.5	Abbildung des Materialflusses	85
5.1.6	Abbildung des Informationsflusses	86
5.1.7	Abbildung von Planungs- und Steuerungsprozessen	87
5.2	Entwicklung eines datenbasierten Abbilds von Produktionsnetz- werken	90
5.2.1	Ziel-Datenstruktur	90
5.2.2	Identifikation von Daten in IT-Systemen	95
5.2.3	Standardisierte Eingangsdatentabellen	97
5.2.4	Datenverarbeitung	101
5.3	Entwicklung allgemeiner Simulationsbausteine	105
5.3.1	Kerngedanken und Vorgehen bei der Bausteinentwicklung	106
5.3.2	Grundlegende Entscheidungen zur Modellierung	109
5.4	Methoden zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung	112
5.4.1	Identifikation der Modellstruktur	113
5.4.2	Identifikation der Beziehungen	118
5.4.3	Identifikation der Parameterwerte	122
6	Anwendung und Evaluation	131
6.1	Anwendung in der industriellen Praxis	131
6.1.1	Charakterisierung des industriellen Umfelds	131
6.1.2	Anwendung des Ansatzes	133
6.2	Evaluation des Ansatzes	136
6.2.1	Erfüllung der Anforderungen	136
6.2.2	Limitationen	141
6.2.3	Betriebswirtschaftliche Betrachtung	142
6.2.4	Evaluation der spezifischen Hypothese	145
7	Zusammenfassung und Ausblick	147
7.1	Zusammenfassung	147
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	150
	Literaturverzeichnis	151
A	Anhang	165
A.1	Eine Ontologie für die Auftragsabwicklung in GPN	165

A.1.1	Bewertung der Literatur	165
A.1.2	Aufzählung relevanter Begriffe	170
A.1.3	Klassen und Relationen	173
A.2	Ableitung und Entwicklung allgemeiner Simulationsbausteine	182
A.2.1	Auflistung aller Simulationsbausteine	182
A.2.2	Detaillierte Implementierung der Rückterminierung	196
A.3	Automatisierten Modellbildung und Parametrierung	196
A.3.1	Zusätzliche Eingangsdaten	196
A.3.2	Algorithmus zur Identifikation aktiver Kunden-Lieferanten- Bezieh-ungen	198
A.3.3	Ergebnisdaten	199
A.4	Betreute Studienarbeiten	205
A.5	Publikationsliste	207
Abbildungsverzeichnis		207
Tabellenverzeichnis		212

Abkürzungsverzeichnis

CMSD	Core Manufacturing Simulation Data
DRM	Design Research Methodology
ERP	Enterprise Ressource Planning
FF	Forschungsfrage
FLO	First Level Ontologien
GPN	Globale Prouktionsnetzwerke
IT	Informationstechnik
KGH	Kurbelgehäuse
KW	Kurbelwelle
LA	Lieferabruf
MES	Manufacturing Execution Systems
MM	Motormontage
MSE	Manufacturing System Engineering
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PSL	Process Specification Language
SBM	Shortblock montiert
SCOR-Modell	Supply-Chain-Operations-Reference-Modell
SQL	Structured Query Language
SWAT	Soll-Warenausgangstermin
SWET	Soll-Wareneingangstermin
ULO	Upper Level Ontologien
UML	Unified Modeling Language
XML	Extensible Markup Language
ZK	Zylinderkopf
ZKM	Zylinderkopf montiert

Kapitel 1

Einleitung

Das Jahr 2020 zeigte durch den Ausbruch der globalen COVID-19-Pandemie, dass sich das weltweite Leben und die Rahmenbedingungen für Unternehmen schlagartig und grundlegend ändern können. Menschen und Unternehmen müssen sich auf eine neue, ungewisse und hochkomplexe Situation einstellen und in dieser richtige Entscheidungen treffen. Aber auch abgesehen von derart drastischen Einschnitten wie der COVID-19-Pandemie, ändern sich globale Rahmenbedingungen in höherer Geschwindigkeit. Unternehmen stehen stetig neuen Kundenwünschen und Anforderungen, wie neuen Produktvarianten und kurzen Lieferzeiten, gegenüber (ABELE und REINHART 2011; ELMARAGHY et al. 2012). Gleichzeitig werden diese durch die Globalisierung in einen weltweiten Wettbewerb um Kundinnen und Kunden, Ressourcen und Lieferanten gezwungen (SCHMIDT 2011). Das Aufkommen von disruptiven, neuen Technologien greift bestehende Geschäftsmodelle an und erfordert eine stetige Evaluation und Anpassung der eigenen Position (HOFER et al. 2020; WIENDAHL et al. 2007). Insgesamt wird in diesem Zusammenhang auch von einem volatilen (Volatility), unsicheren (Uncertainty), komplexen (Complexity) und mehrdeutigen (Ambiguity), einem sogenannten VUCA-Umfeld gesprochen (BENNETT und LEMOINE 2014).

1.1 Ausgangssituation und Motivation

In diesem Marktumfeld setzen produzierende Unternehmen auf die verteilte Wertschöpfung in globalen Produktionsnetzwerken (GPN). Die Produktion von Zwischen- und Endprodukten findet in GPN über mehrere Produktionsstufen und -ressourcen hinweg an verschiedenen Standorten statt, wobei diese über Material- und Informationsflüsse miteinander vernetzt sind (HOCHDÖRFFER et al. 2015; SAGER 2018). Die Internationalisierung der Wertschöpfung ebenso wie die Aufteilung der Produktion auf verschiedene Standorte ermöglicht den Unternehmen eine Vielzahl an Wettbewerbsvorteilen (FERDOWS 1997). Darunter fallen zum einen Kostensenkungspotenziale durch die Reduzierung direkter und indirekter Kosten, der Zugang zum globalen Lieferantenmarkt und die Nähe zu den einzelnen Kundenmärkten mit ihren individuellen Bedürfnissen (FERDOWS

1997; FRIEDLI et al. 2017; SCHMIDT 2011). Zum anderen ergibt sich durch die Aufteilung der Produktion ein höheres Maß an Flexibilität, um auf Schwankungen der Nachfrage, Störungen in der Zulieferkette oder lokale Engpässe zu reagieren (FRIEDLI et al. 2017). Gerade in einem VUCA-Marktumfeld mit stetig steigender Dynamik stellt die Flexibilität in der Produktion einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil dar (LIEBLER et al. 2013).

Neben den Vorteilen entstehen in GPN jedoch neue Herausforderungen. Oftmals sind GPN historisch gewachsen und weniger das Ergebnis einer zentralen und standardisierten Planung (FRIEDLI et al. 2017; JACOB 2006; SAGER 2018). Infolgedessen führt dies dazu, dass auch innerhalb eines Unternehmens eine hohe Diversität an eingesetzten Produktionssystemen, Prozessen und auch Systemen der Informationstechnik (IT) vorliegt (THOMAS 2013). Dies spiegelt sich ebenso organisatorisch in fragmentierten Entscheidungsstrukturen wider, welche oft nur lokale Gegebenheiten beachten und nicht das globale Netzwerk im Blick behalten (LANZA und TREBER 2019). Jedoch erfordert eine erfolgreiche Auftragsabwicklung im Netzwerk die effiziente Zusammenarbeit dieser heterogenen Systeme (LIEBLER et al. 2013). Die Auftragsabwicklung stellt dabei alle Schritte dar, vom Eingang des Kundenauftrags, dessen Verarbeitung in Planungs- und Steuerungsprozessen, die Produktion und Logistik von Zwischen- und Endprodukten, bis hin zum Versand des fertigen Produkts an den Kunden (LIEBLER et al. 2013; WAGENITZ 2007). In heutigen Produktionsnetzwerken ist es üblich, dass sich die Produktion über eine Vielzahl an (Zwischen-)Produkten über mehrere Standorte erstreckt. In Kombination mit dem Trend einer steigenden Anzahl an Produktvarianten ergibt sich so eine Vielzahl an vernetzten Material- und Informationsflüssen zwischen Standorten, aber auch zwischen einzelnen Produktionslinien innerhalb einer Fabrik (WAGENITZ 2007). Weiterhin erfordern kürzer werdende Produktlebenszyklen ständige Änderungen am Produktportfolio und somit auch an den Produktionssystemen. Die Auftragsabwicklungsprozesse mit ihren vernetzten Material- und Informationsflüssen unterliegen also einer stetigen Dynamik. Hinzukommen stochastische Effekte, wie eine schwankende Kundennachfrage und Störungen in Produktions- oder Logistikprozessen (KUNATH und WINKLER 2018; LANZA und TREBER 2019). Insgesamt unterliegt die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken einer hohen Komplexität (KUNATH und WINKLER 2018).

Diese Komplexität stellt produzierende Unternehmen vor die Herausforderung, die Auftragsabwicklung in ihren GPN effizient zu gestalten und die richtigen Planungsentscheidungen zu treffen. Gerade an den Schnittstellen zwischen Produktion und Logistik sowie zwischen Produktionsstufen und Standorten treten Ineffizienzen auf. Für die Bestimmung und Bewertung von optimalen Bestandshöhen, Entkopplungs- und Belieferungsstrategien sowie der optimalen Parameter und Strategien für Planungs- und Steuerungsprozesse muss das Netzwerk in seiner Gesamtheit mit den dynamischen und stochastischen Einflussfaktoren untersucht werden, damit ein globales Optimum erreicht werden kann. Im komplexen System der Auftragsabwicklung sind die Auswirkungen von Änderungen oder Entscheidungen nur noch schwer allein durch den Menschen

zu bewerten (BARLAS und HEAVEY 2016). In dieser Situation sind Unternehmen derzeit nicht in der Lage, das volle Potenzial ihrer Produktionsnetzwerke auszuschöpfen (THOMAS 2013).

Ein Ansatzpunkt, die Auftragsabwicklung in GPN zu optimieren und Planungsentscheidungen zu erleichtern, ist der Einsatz von detaillierten und umfassenden Simulationsmodellen (FRIEDLI et al. 2017; WAGENITZ 2007; WERNER 2001). Simulationen stellen, gerade unter dynamischen und stochastischen Rahmenbedingungen wie sie in der Auftragsabwicklung in GPN vorliegen, ein geeignetes Werkzeug zur Modellierung und Bewertung komplexer Systeme dar (LIEBLER et al. 2013; MOURTZIS 2019). Anhand des Simulationsmodells können alternative Szenarien bewertet oder Prognosen für die Zukunft untersucht werden, ohne damit das reale System zu beeinträchtigen (ELEY 2012; MOURTZIS 2019). Die aus diesen Simulationsstudien erhaltenen Erkenntnisse unterstützen die Entscheidungsfindung und führen zu qualitativ besseren Resultaten (MOURTZIS 2019; TEMPELMEIER 2018).

In der industriellen Praxis stehen dem Einsatz von Simulationsmodellen jedoch einige Herausforderungen gegenüber. Die Entwicklung von validen Simulationsmodellen im richtigen Detaillierungsgrad ist gekennzeichnet durch lange Entwicklungszeiten und hohe manuelle Aufwände (BARLAS und HEAVEY 2016; MÜLLER-SOMMER 2013). Zudem sind Simulationsmodelle nur selten wiederverwendbar, da sich das zu simulierende System schnell ändert (SKOOGH, PERERA et al. 2012). Dies steht den Anforderungen an eine schnelle Entscheidungsfindung entgegen (SKOOGH, JOHANSSON und STAHR 2012). Folglich bleibt das Potenzial von Simulationen in der Industrie und im Speziellen in der Auftragsabwicklung in GPN unausgeschöpft (FRIEDLI et al. 2017).

Entsprechend einer Studie unter Simulationsexperten¹ (MAYER und MIESCHNER 2017) ist nur 12% der Zeit in Simulationsprojekten wertschöpfend, also Zeit, die mit der Durchführung und Analyse von Simulationsexperimenten verbracht wird. Der Großteil der aufgewendeten Zeit entfällt mit 35% auf die Modellbildung und mit 28% auf Datenbeschaffung und -aufbereitung (BARLAS und HEAVEY 2016; MÜLLER-SOMMER 2013). Innerhalb der Modellbildung stellt besonders die Systemanalyse und die Wahl des richtigen Detaillierungsgrades eine Herausforderung dar. Die Informationsbeschaffung für die Modellbildung basiert auf der Befragung von Wissensträgern zum System und der Analyse unstrukturierter Informationen und stellt damit einen manuellen und zeitaufwändigen Prozessschritt dar (SKOOGH, PERERA et al. 2012). Im Schritt der Datenbeschaffung und -aufbereitung müssen die richtigen Daten und IT-Systeme zunächst identifiziert werden, was bei einer Vielzahl an Systemen, die wiederum aus einer hohen Anzahl verschiedener Tabellen bestehen können, zu langen Recherchezeiten führt (BARLAS und HEAVEY 2016). Weiterhin liegen die Daten für die Verwendung in Simulationsmodellen häufig in einer ungeeigneten Form vor und müssen erst manuell aufbereitet werden (SKOOGH, JOHANSSON und

¹Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

STAHRE 2012). Auch die Datenqualität und -aktualität entspricht häufig nicht den Anforderungen einer validen Simulation, sodass Annahmen oder Abschätzungen getroffen werden müssen (SKOOGH, JOHANSSON und STAHRE 2012). Diese allgemeinen Herausforderungen in Simulationsprojekten werden in der Domäne globaler Produktionsnetzwerke noch einmal verstärkt, da eine hohe Anzahl heterogener Prozesse und IT-Systeme und die Vielzahl an Material- und Informationsflussbeziehungen über Standorte hinweg die Komplexität erhöht. Gleichzeitig sind Wissensträger global über das GPN verteilt. Abbildung 1.1 stellt die allgemeinen Herausforderungen in Simulationsprojekten und die verstärkend auf diese wirkenden Charakteristika von GPN dar.

Den Herausforderungen stehen jedoch neue Möglichkeiten gegenüber. Aufgrund einer fortlaufenden Digitalisierung stehen in produzierenden Unternehmen eine wachsende Menge an aktuellen und hoch granularen Daten aus Produktion, Logistik und Planungsprozessen zur Verfügung (LUGARESI und MATTA 2018). In Kombination mit neuen Entwicklungen im Bereich der Datenanalyse können diese Datenmengen verarbeitet werden und damit Rückschlüsse auf die Prozesse der Auftragsabwicklung liefern (PIELMEIER 2019). Mit diesem Datenstrom lassen sich, wie durch PIELMEIER (2019) gezeigt, effizientere Produktionssteuerungsverfahren entwickeln. Die Daten lassen sich außerdem auch im Zuge von Simulationsprojekten nutzen. Auch wenn die Masse an zur Verfügung stehenden Daten die Identifikation der richtigen Daten nicht vereinfachen, so verspricht diese dennoch eine aktuelle Datenbasis mit hohem Informationsgehalt. Aus diesen können Informationen zum realen Systemverhalten gewonnen und für Modellbildung und Parametrierung detaillierter Simulationen der Auftragsabwicklung in GPN genutzt werden.



Abbildung 1.1: Allgemeine Herausforderungen und verstärkende Charakteristika von GPN.

1.2 Zielsetzung

Simulationen stellen ein etabliertes Werkzeug dar, um produzierende Unternehmen in der Entscheidungsfindung, Analyse und Optimierung ihrer Auftragsabwicklung in GPN zu unterstützen (LIEBLER et al. 2013). Aufgrund der hohen Komplexität im GPN ist auch der Einsatz von Simulationen mit Herausforderungen verbunden, sodass deren Potenzial bisher nicht genutzt werden kann

(FRIEDLI et al. 2017). *Ziel dieser Arbeit ist es, die genannten Herausforderungen zu überwinden, indem ein effizienter und effektiver Ansatz für die Modellierung und Parametrierung von Simulationen der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken entwickelt wird.* Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz ist dabei ein Vorgehensmodell bestehend aus mehreren integrierten Methoden, die einen hohen Grad an Automatisierung der Modellierung und Parametrierung ermöglichen. Folglich wird der entwickelte Ansatz als AutoGPN bezeichnet. Mit dem Einsatz von AutoGPN gewinnt der Anwender Zeit, sich auf die wertschöpfende Arbeit in Simulationsprojekten sowie die Durchführung und Analyse von Experimenten zur Entscheidungsunterstützung zu fokussieren.

Das Ziel der Arbeit unterteilt sich in vier Teilziele, die sich von den einzelnen, oben beschriebenen Herausforderungen ableiten:

TZ1. Entwicklung eines allgemeinen Modells der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken

Um ein grundlegendes Systemverständnis für die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken zu schaffen, definiert das allgemeine Modell deren grundsätzliche Bestandteile, Beziehungen und Eigenschaften. Das allgemeine Modell stellt die Grundlage für die Datenidentifikation und die einzelnen Elemente des Simulationsmodells dar. Das Adjektiv „allgemein“ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf die Unabhängigkeit zu einem Anwendungsfall und einer konkreten Implementierung einer Simulation.

TZ2. Unterstützung bei der Identifikation von Daten aus anwendungsfallspezifischen IT-Systemen und deren Aufbereitung

Eine hinreichend genaue Definition der notwendigen Daten, ihrer Struktur und der IT-Systeme, in denen diese zu finden sind, reduziert den Aufwand der Datenidentifikation. Durch die Entwicklung von Algorithmen zur Datenaufbereitung werden zeitintensive Arbeitsschritte in Simulationsprojekten automatisiert.

TZ3. Entwicklung allgemeiner Simulationsbausteine für die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken

Simulationsbausteine definieren und detaillieren die Bestandteile der Simulation, welche durch die gezielte Auswahl und richtige Parametrierung die Auftragsabwicklung im betrachteten GPN abbilden können. Durch die Implementierung in Simulationssoftware reduzieren die Bausteine den Aufwand der Modellgenerierung und geben gleichzeitig bereits den Detaillierungsgrad der Simulation vor.

TZ4. Entwicklung von Methoden zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung der Simulation auf Basis der identifizierten Daten

Mit den entwickelten Methoden sollen anhand der identifizierten Daten automatisiert die richtigen Simulationsbausteine zur Abbildung des realen Systems ausgewählt, in Beziehung zueinander gesetzt und mit validen Parameterwerten belegt werden. Die manuellen Schritte der Parametrierung und Modellbildung werden hierdurch automatisiert.

1.3 Forschungsmethodik und -umgebung

Zur Erreichung des Hauptziels und der vier Teilziele dieser Arbeit werden für die Bearbeitung des Forschungsprojekts etablierte Forschungsmethodiken verwendet. Im Folgenden werden die angewandten Methoden des Projekts, die gesetzte Forschungsfrage (FF), die Adaption der Design Research Methodology (DRM) sowie die Forschungsumgebung, in der die Forschungsarbeit des Projekts hauptsächlich stattfand, beschrieben.

1.3.1 Forschungsfragen

Abgeleitet vom Hauptziel und den Teilzielen dieser Arbeit stellen sich die folgenden Forschungsfragen:

- FF1. Welche Wechselwirkungen bestehen zwischen Informationsflüssen, Planungs- und Steuerungsprozessen sowie Materialflüssen in der Auftragsabwicklung in GPN und wie kann die Auftragsabwicklung als Ganzes allgemein beschrieben werden?
- FF2. Welche Daten, die in der Auftragsabwicklung entstehen, können für Modellbildung und Parametrierung von Simulationen genutzt werden, in welcher Form liegen sie vor und wie müssen sie für die weitere Nutzung verarbeitet werden?
- FF3. Wie kann die Auftragsabwicklung in GPN in einem Simulationsmodell abgebildet werden?
- FF4. Wie können aus den identifizierten Daten Informationen gewonnen und damit automatisiert ein Simulationsmodell aufgebaut und parametriert werden?

1.3.2 Adaption der Design Research Methodology

Das Forschungsprojekt lässt sich dem Bereich der Produktionstechnik und damit den Ingenieurwissenschaften zuordnen. Zur Strukturierung von Forschungsprojekten sind diverse Forschungsmethodiken entwickelt worden, die je nach Anwendungsdomäne unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Gemäß KOCH (2017) stellt die DRM die umfassendste und detaillierteste Methodik für die Ingenieurwissenschaften dar. Die DRM beinhaltet zum einen die Entwicklung von Theorien, unterstützt zum anderen aber auch die Einführung, Verbesserung und Evaluation von Methoden.

Das Forschungsprojekt wurde angelehnt an die DRM durchgeführt, welche ein vierstufiges Vorgehen mit unterstützenden Methoden und Richtlinien als Rahmenwerk für die Durchführung von Forschungsvorhaben darstellt (BLESSING

und CHAKRABARTI 2009). Abbildung 1.2 zeigt die vier Schritte der DRM mit den jeweiligen Ergebnissen. Weiterhin werden die Arbeitsweisen in den einzelnen Phasen dargestellt, die in diesem Forschungsprojekt gewonnenen Erkenntnisse aufgeführt und die angewandten Forschungsmethoden aufgelistet.

In der ersten Phase der DRM, der Definition des Forschungsbereichs, wird ein grundlegendes Verständnis des Forschungsgegenstands aufgebaut. Ergebnis dieser Phase ist die Definition der Ziele des Forschungsvorhabens. (BLESSING und CHAKRABARTI 2009)

Im vorliegenden Projekt wurden in dieser Phase mittels Literaturrecherchen und strukturierten Experteninterviews systematisch ein grundlegendes Verständnis über die Chancen und Herausforderungen in globalen Produktionsnetzwerken, der Auftragsabwicklung und dem Einsatz von Simulationen geschaffen. Die Ergebnisse dieser Phase stellen die ersten Abschnitte dieses Kapitels dar und münden in die oben definierten Ziele des Vorhabens.

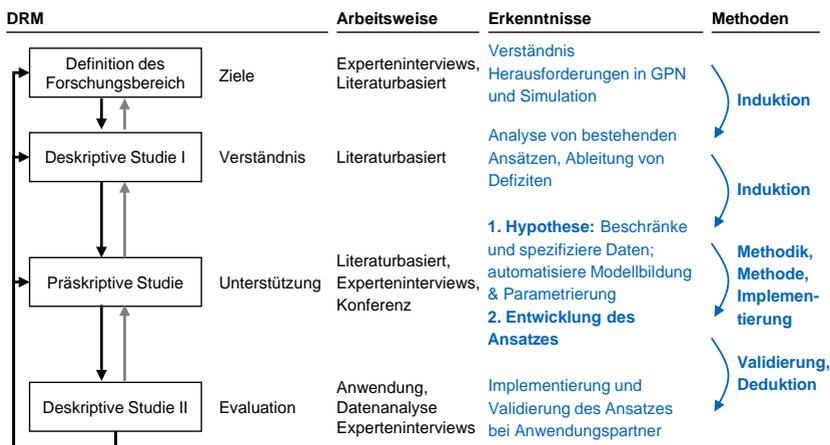


Abbildung 1.2: Adaption der Design Reseach Methodology.

In der zweiten Phase, der deskriptiven Studie I, werden das initiale Verständnis erweitert sowie die beeinflussenden Faktoren im Forschungsgebiet identifiziert (BLESSING und CHAKRABARTI 2009). Ziel ist ein vollständiges Verständnis über das Forschungsgebiet und dessen Stand der Technik und Wissenschaft. Hierfür wurde im vorliegenden Forschungsvorhaben literaturbasiert gearbeitet und bestehende Ansätze, die Simulationsprojekte bei Parametrierung und Modellerstellung unterstützen, untersucht. Anhand der in der ersten Phase erarbeiteten Herausforderungen, wurden anschließend induktiv Bewertungskriterien herausgearbeitet, mit denen der Stand der Technik bewertet wurde. Anhand dieser Bewertung konnten aktuelle Defizite im Stand der Technik und Forschungspotenziale abgeleitet werden.

Die präskriptive Studie stellt die dritte Phase der DRM dar und fokussiert sich auf die Entwicklung einer Unterstützung (BLESSING und CHAKRABARTI 2009). Die Unterstützung stellt hierbei ein Artefakt dar, welches die bestehenden Defizite reduziert und die Situation durch seinen Einsatz verbessert (BLESSING und CHAKRABARTI 2009). Für die Entwicklung der Unterstützung wurde wiederum auf Literaturanalysen und Experteninterviews zurückgegriffen sowie die grundlegenden Hypothesen des Ansatzes auf einer Konferenz in der wissenschaftlichen Gesellschaft diskutiert. Erster Schritt bei der Entwicklung der Unterstützung war die Spezifikation von Anforderungen, welche induktiv aus den Defiziten im Stand der Technik abgeleitet wurden. Anschließend wurde die grundlegende Hypothese des Ansatzes aufgestellt. Die darauffolgend entwickelte Unterstützung als Ganzes stellt dann eine Methodik dar, welche einzelne Methoden beinhaltet. Diese wurden in Form von Anleitungen für Anwender, Datenstrukturen und Algorithmen implementiert.

In der vierten Phase, der deskriptiven Studie II, wird die Wirkung des entwickelten Artefakts untersucht (BLESSING und CHAKRABARTI 2009). Hierfür wurde der entwickelte Ansatz im Produktionsnetzwerk eines Industrieunternehmens aufgebaut, eingesetzt und validiert. Die Evaluierung erfolgte deduktiv und schloss eine Bewertung der Anforderungserfüllung, eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sowie eine Diskussion der Grenzen des Ansatzes mit ein. Insgesamt ermöglichen die Evaluation und Diskussion die Bewertung der in der präskriptiven Studie aufgestellten Hypothese.

1.3.3 Forschungsumgebung und Beschreibung des Anwendungsfalls

Das Forschungsprojekt wurde vom Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) durchgeführt. Eingebunden in das Forschungsprojekt war ein deutscher Automobilhersteller, welcher aus Gründen der Anonymität in dieser Arbeit als Auto AG bezeichnet wird. Die Forschungsarbeiten wurden im GPN der Motorenproduktion der Auto AG durchgeführt, wobei Experten aus technischer Planung, Produktionsplanung und -steuerung, Produktion und Logistik wertvolle Einsichten in die industrielle Praxis lieferten und ihre Einschätzungen zur Bewertung der Ergebnisse abgaben. Dies geschah je nach Phase des Forschungsprojekts in Form von strukturierten Experteninterviews und Gruppenworkshops, bei denen mehrere Experten in gemeinsamer Diskussion Fragestellungen beantworteten oder die Ergebnisse des entwickelten Ansatzes bewerteten. Dabei wurden Experten aus den verschiedenen Werken und den zentralen, übergreifenden Stellen konsultiert.

Um in den nachfolgenden Kapiteln dem Leser das Verständnis zu vereinfachen, werden an vielen Stellen Beispiele aus der realen Praxis dargestellt. Hierfür wird an dieser Stelle das Produktionsnetzwerk für Verbrennungsmotoren der Auto AG kurz vorgestellt, welches den Anwendungsfall für die Evaluation der Forschungsergebnisse darstellt. Aus Gründen des Datenschutzes sind die Daten anonymisiert und Namen abgeändert.

Das Motoren-Produktionsnetzwerk der Auto AG produziert an drei Standorten in Europa Verbrennungsmotoren für die europäischen, amerikanischen und afrikanischen Fahrzeugwerke der Auto AG sowie für Drittkunden. Neben der Motor-Endmontage sowie der Auslieferung der Motoren an die Kunden, produziert die Auto AG auch eine Auswahl an Zwischenprodukten unternehmensintern, welche über Vormontagen zu weiteren Zwischenprodukten montiert werden und abschließend die Endmontagelinien versorgen. Der gesamte interne Produktionsprozess zieht sich über drei Stufen in sechs Gewerken. Hierbei steht zu Beginn des Prozesses die mechanische Fertigung der Bauteile Zylinderkopf (ZK), Kurbelwelle (KW) und Kurbelgehäuse (KGH). In der nachfolgenden Produktionsstufe werden Kurbelwelle und Kurbelgehäuse gemeinsam mit weiteren Zukaufteilen zu einem Shortblock montiert (SBM) und der Zylinderkopf in einem anderen Gewerk ebenfalls mit weiteren Zukaufteilen zu einem vollständigen Zylinderkopf montiert (ZKM). SBM und ZKM stellen dann, neben weiteren Zukaufteilen, die Eingangsstoffe für die Motormontage (MM) dar. Der Produktionsprozess ist in Abbildung 1.3 schematisch dargestellt.

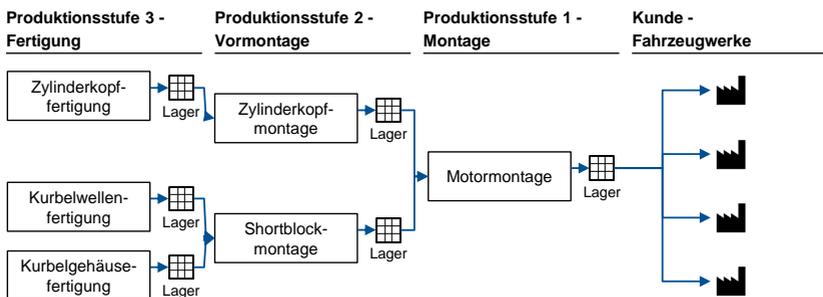


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung des Motoren-Produktionsprozesses bei der Auto AG.

Die Produktion ist in Form von Produktionslinien organisiert, welche zwischen und innerhalb der Gewerke unterschiedliche Charakteristika, wie beispielsweise Rüstzeiten, Losgrößen und befähigte Produkte aufweisen können. Ebenso unterscheiden sich auch die Standorte. Jeder Standort weist eine andere Anzahl an Linien auf, wobei ein Standort über keine KW-, KGH-, sowie SBM-Produktion verfügt und mit SBM von einem anderen Standort aus versorgt wird. Weiterhin bestehen zwischen allen Standorten Lieferbeziehungen über alle Zwischenprodukte hinweg.

Neben den vielfältigen Produktionsressourcen liegt ebenfalls eine hohe Anzahl an zu produzierenden Motorvarianten vor. Das Produktspektrum erstreckt sich von 3-Zylinder- bis 12-Zylinder-Motoren, jeweils als Diesel- und/oder Benzinmotor. Insgesamt ergeben sich um die 800 verschiedene Motorvarianten. Diese Variantenvielfalt dehnt sich auf die vorgelagerten Produktionsstufen und Gewerke aus, wenn auch in geringerer Anzahl an Varianten. In den Gewerken SBM, ZKM, ZK,

KGH und KW können über das Netzwerk hinweg je Gewerk zwischen 20 und 50 verschiedene Varianten unterschieden werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1.4 dargestellt und im Folgenden beschrieben. In Kapitel 1 ist die Ausgangssituation und die Motivation des Vorhabens dargelegt, aus der auch die Ziele der Forschung sowie Forschungsfragen abgeleitet werden. Im 2. Kapitel werden die theoretischen Grundlagen in den Bereichen Produktionsnetzwerke, Auftragsabwicklung, Simulation und Simulationswerkzeuge dargestellt. Kapitel 3 stellt den Stand der Technik im Gebiet der effizienten Simulationsmodellentwicklung und Parametrierung dar. Die relevanten Publikationen werden gemäß ihrer Anwendbarkeit auf die Auftragsabwicklung in GPN sowie ihre Eignung zur Reduzierung bestehender Herausforderungen in Simulationsprojekten bewertet. Die hierbei identifizierten Defizite werden in Kapitel 4 durch die Vorstellung eines neuen Ansatzes adressiert. Dieser basiert auf einer Einschränkung und Definition der notwendigen Daten. Weiterhin werden Algorithmen zur automatisierten Datenaufbereitung, Simulationsmodellbildung und Parametrierung vorgestellt. In Kapitel 5 werden die dem Ansatz zugrunde liegenden Konzepte spezifiziert. Diese sind die Modellierung der Auftragsabwicklung in GPN in Form einer Ontologie sowie die Definition notwendiger Daten und die Entwicklung von Algorithmen zur Datenaufbereitung. Weiterhin erfolgt eine Spezifikation der allgemeine Simulationsbausteine für die Auftragsabwicklung in GPN und der Algorithmen zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung. In Kapitel 6 wird die Anwendung des Ansatzes beschrieben, diskutiert und einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unterzogen. In Kapitel 7 werden die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und zukünftige Forschungsrichtungen dargelegt.

Kapitel und Inhalte	Ergebnisse	DRM Schritt
1 Einleitung <ul style="list-style-type: none"> • Ausgangssituation • Motivation • Ziele der Arbeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Forschungsziel • Forschungsfragen 	Definition des Forschungsbereich
2 Grundlagen <ul style="list-style-type: none"> • Auftragsabwicklung in GPN • Simulationsprojekte und Werkzeuge • IT-Systeme, Daten und Methoden 	<ul style="list-style-type: none"> • Theoretisches Verständnis angrenzender Forschungsfelder und des Anwendungskontext 	
3 Stand der Technik <ul style="list-style-type: none"> • Recherchevorgehen • Effiziente Simulationsmodellentwicklung und Parametrierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Defizite • Forschungspotenziale 	Deskriptive Studie I
4 Konzeption Ansatz <ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen • Übersicht über den Ansatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Anforderungen • Konzept • Methodik 	
5 Detaillierung Ansatz <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung Ontologie • Datenbasierte Abbild GPN • Simulation der Auftragsabwicklung in GPN • Automatisierte Modellbildung • Automatisierte Parametrierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Ontologie der Auftragsabwicklung in GPN • Datenbasierte Abbild GPN • Simulationsbausteine • Modellbildungsalgorithmen • Parametrierungsalgorithmen 	Präskriptive Studie
6 Anwendung und Evaluation <ul style="list-style-type: none"> • Industrielle Anwendung • Evaluation 	<ul style="list-style-type: none"> • Anwendung in der Automobilindustrie • Bewertung Konzept und industrieller Nutzen 	Deskriptive Studie II
7 Zusammenfassung <ul style="list-style-type: none"> • Zusammenfassung • Forschungsmöglichkeiten 	<ul style="list-style-type: none"> • Zukünftige Forschungspotenziale 	

Abbildung 1.4: Aufbau der Arbeit.

Kapitel 2

Grundlagen

Um das gesetzte Ziel dieser Arbeit zu erreichen, sollen im folgenden Kapitel die theoretischen Grundlagen für die nachfolgende Analyse des Stands der Technik und den zu entwickelnden Ansatz gelegt werden. Hierfür wird zunächst die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken beleuchtet und deren grundsätzliche Prinzipien dargelegt. Anschließend werden die Grundlagen des Themenbereichs Simulation beschrieben sowie Werkzeuge und Möglichkeiten zur Unterstützung von Simulationsprojekten aufgezeigt. Abschließend werden beide Themenstränge kombiniert und der Systemkontext von Simulationen der Auftragsabwicklung für diese Arbeit abgegrenzt.

2.1 Produktionsnetzwerke und Auftragsabwicklung

Die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken stellt die Anwendungsdomäne der in dieser Arbeit entwickelten Ansätze dar. Hierbei werden Produktionsnetzwerke und Auftragsabwicklung zunächst getrennt vorgestellt. Anschließend erfolgt die Synthese der beiden Bereiche, um die Anwendungsdomäne detailliert zu beschreiben.

2.1.1 Produktionsnetzwerke

Ein Produktionsnetzwerk ist der Zusammenschluss von miteinander verbundenen Funktionen, Vorgängen und Transaktionen, durch die bestimmte Produkte hergestellt und an Kunden ausgeliefert werden (COE et al. 2008). Genauer können Produktionsnetzwerke durch Knoten und Kanten beschrieben werden, wobei Knoten Standorte, Produktionsressourcen oder Lager darstellen können, und Kanten die Verbindungen zwischen den Knoten, über die Materialien und Informationen ausgetauscht werden (SAGER 2018). Die Produktion einzelner Produkte erfolgt im Netzwerk über die Lieferkette. Dabei beschreibt die Lieferkette alle Prozesse zur Erfüllung eines Kundenauftrags, wozu Beschaffung, Produktion, Logistik und Informationsfluss gehören (KNÖSSL 2013; RUDBERG

und OLHAGER 2003). Damit entspricht die Lieferkette dem Weg eines Auftrags über die Knoten und Kanten des Netzwerks. Gerade für komplexe Produkte erstreckt sich die Lieferkette über verschiedene Produktionsschritte zur Herstellung von Zwischenprodukten, welche jeweils über verschiedene Standorte im Netzwerk verteilt sein können und über mehrere Produktionsstufen, bestehend aus Fertigungs-, Vormontage- und Montageschritten, abgewickelt werden. Für die Abwicklung von Kundenaufträgen entstehen im Netzwerk somit Beziehungen zwischen den einzelnen Standorten. Bei diesen kann zwischen horizontalen und vertikalen Beziehungen unterschieden werden (SCHENK et al. 2012). Horizontale Beziehungen beschreiben, dass mehrere Standorte im Netzwerk die gleichen Produkte fertigen können, wohingegen vertikale angeben, dass am Produktionsprozess eines Produkts mehrere Standorte beteiligt sind, folglich innerhalb des Netzwerks Kunden-Lieferanten-Beziehungen vorliegen (SCHENK et al. 2012). Die vorliegenden Beziehungen haben einen hohen Einfluss auf den Koordinationsaufwand im Netzwerk, weshalb die Klassifikation der Standortbeziehungen auch als Koordinationsform des Netzwerks bezeichnet wird (SCHENK et al. 2012). Während horizontale Beziehungen lediglich einfache Koordinationsmaßnahmen, wie Qualitäts- und Terminabstimmungen sowie Kapazitätsverteilungen, erfordern, sind bei vertikalen Beziehungen Material- und Informationsflüsse zwischen den Werken zu koordinieren sowie die Planung und Steuerung von Produktion und Logistik der verbundenen Standorte aufeinander abzustimmen. In der Praxis treten nur selten Produktionsnetzwerke mit rein vertikalen oder rein horizontalen Beziehungen auf. Bestehende Produktionsnetzwerke weisen Mischformen aus vertikalen und horizontalen Beziehungen auf, welche sich auch über Produktionsstufen hinweg ändern können (LANZA et al. 2019).

Neben den Beziehungen ist auch die Anzahl an beteiligten Standorten und Organisationen ausschlaggebend für die Beschreibung von Produktionsnetzwerken. Eine Typisierung von Netzwerken erfolgt hierbei über die am Netzwerk beteiligte Anzahl an Organisationen und deren Anzahl an im Netzwerk integrierten Standorten. Sind mehrere Organisationen mit jeweils einem Standort beteiligt, sprechen RUDBERG und OLHAGER (2003) von einer Supply Chain, bei mehreren Standorten pro Organisation von einem unternehmensübergreifenden Netzwerk. Ist lediglich eine Organisation mit mehreren Standorten beteiligt, so handelt es sich um eine unternehmensinternes Netzwerk. (RUDBERG und OLHAGER 2003)

2.1.2 Auftragsabwicklung

Die Auftragsabwicklung wird als der zentrale Prozess in produzierenden Unternehmen gesehen, da dieser die eigentliche Leistungserstellung für den Kunden darstellt und die Differenzierung vom Wettbewerb ermöglicht (WAGENITZ 2007). Der Prozess der Auftragsabwicklung beinhaltet alle Tätigkeiten, die mit dem Auslösen eines Kundenauftrags beginnen und mit der Auslieferung des bestellten Produkts enden (WAGENITZ 2007). Nach PFOHL (2010) kann die Auftragsabwicklung in die technische und kaufmännische Auftragsabwicklung unterteilt werden, wobei im Rahmen der vorliegenden Arbeit nur die technische Auf-

tragsabwicklung betrachtet und vertieft wird. Diese gliedert sich nach SCHUH und STICH (2012) in die Tätigkeiten Vertrieb, Konstruktion, Einkauf, Fertigung, Montage sowie Logistik und Versand. Die Tätigkeiten werden von KUNATH und WINKLER (2018) in die Funktionsbereiche der Auftragsabwicklung, bestehend aus Materialfluss, Informationsfluss und Produktionsplanung und -steuerung (PPS), eingeteilt. Dabei fließen Informationen in Form eines Kundenauftrags durch den Funktionsbereich der PPS, welche einen entgegengesetzten Materialfluss von Zwischen- und Endprodukten in Richtung Kunde auslöst (STRZELCZAK et al. 2015). Die einzelnen Funktionsbereiche sind in Abbildung 2.1 mit ihren gegenseitigen Wechselwirkungen dargestellt und werden nachfolgend einzeln detailliert.

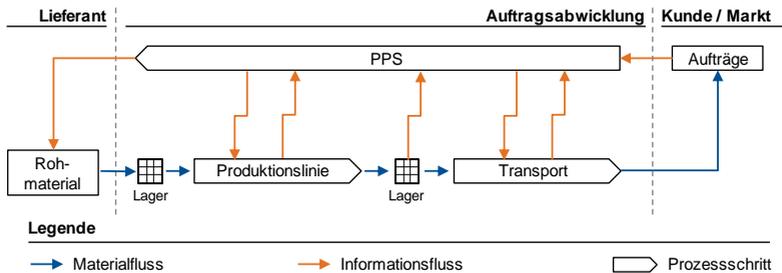


Abbildung 2.1: Funktionsbereiche der Auftragsabwicklung und ihre Wechselwirkungen.

Produktionsplanung und -steuerung

Die PPS als ein Funktionsbereich der Auftragsabwicklung besteht wiederum aus einer Vielzahl an Aktivitäten, die sich entsprechend ihrem zeitlichen Planungshorizont in eine strategische, taktische und operative Planungsebene einordnen lassen (SCHUH und STICH 2012). Weiter untergliedern SCHUH und STICH (2012) die Aktivitäten der PPS in Netzwerkaufgaben, Kernaufgaben und Querschnittsaufgaben. Hierbei ist zu beachten, dass der PPS-Begriff entgegen der ursprünglichen Beschreibungsmodelle und des Namens um die Aspekte der Planung und Steuerung der Logistik erweitert wird, um eine ganzheitliche Beschreibung der Planungsprozesse in der Auftragsabwicklung zu erhalten (PFOHL 2010).

Die Netzwerkaufgaben bestehen aus den Aktivitäten der Netzwerkkonfiguration, der Netzwerkaufgabeplanung und der Netzwerkbearbeitungsplanung. Das Feld der Netzwerkaufgaben ist verantwortlich für die Auslegung der grundlegenden Struktur der Auftragsabwicklung und setzt die Rahmenbedingungen, wie die Verteilung von Produktions- und Logistikkapazitäten oder die Bestimmung der Produktallokation im Netzwerk. Hierbei basieren die Entscheidungen vorwiegend auf langfristigen Prognosen und nicht auf bereits vorhandenen spezifizierten Kundenaufträgen. Die Netzwerkaufgaben sind damit der strategischen Planungsebene zugeordnet. (SCHUH und STICH 2012)

Die Kernaufgaben beinhalten die Produktionsprogrammplanung, die auf Basis der in den Netzwerkaufgaben definierten Kapazitäten die Kundennachfrage an die einzelnen Produktionsressourcen verteilt und eine Grobterminierung der Produktion vornimmt. Mit der Produktionsbedarfsplanung wird das Produktionsprogramm auf benötigte Sekundärbedarfe an Zwischenprodukten oder Rohteilen heruntergebrochen. Diese werden anschließend an Lieferanten übermittelt. Programmplanung und Produktionsbedarfsplanung sind der taktischen Ebene zugeordnet und liefern die Randbedingungen für die operative Ebene, welche die Aufgabe der Produktionssteuerung umfasst. Diese erstellt aus dem Produktionsprogramm einzelne Produktionsaufträge, bestimmt Produktionsreihenfolgen, plant Losgrößen und führt eine Feinterminierung der Aufträge durch. Nach einem ähnlichen Prinzip lassen sich auch die Planungsaktivitäten für die Logistik beschreiben, in denen auf taktischer Ebene ein Transportprogramm erstellt und dieses in der Steuerung durch konkrete und terminierte Transportaufträge umgesetzt wird. (SCHUH und STICH 2012)

Ergänzt werden die Netzwerk- und Kernaufgaben durch die Querschnittsaufgaben. Zu den Querschnittsaufgaben gehören die Überwachung von Produktion, Aufträgen und Beständen sowie die Rückmeldung von Informationen an die Netzwerk- und Kernaufgaben der PPS. (SCHUH und STICH 2012)

Planungs- und Steuerungsprozesse werden in regelmäßigen Abständen wiederholt ausgeführt, um die Planungsentscheidungen an die aktuell vorherrschende Situation anzupassen. Die zeitlichen Abstände der Iterationen richten sich hierbei ebenfalls nach den Planungsebenen. Strategische Planungsaufgaben werden in langfristigen Zyklen, oft auf Jahresbasis, wiederholt. Entscheidungen der taktischen Ebene werden monatlich aktualisiert. Die operative Planung und Steuerung reagiert auf kurzfristige Entwicklungen und wird daher in der Regel auf täglicher Basis wiederholt.

Für die konkrete Ausgestaltung der PPS-Prozesse im jeweiligen Unternehmen ist der Kundenentkopplungspunkt von großer Bedeutung. Dieser unterteilt den Auftragsabwicklungsprozess in einen kundenspezifischen und einen kundenanonymen Teil. Im kundenspezifischen Teil entstehen Produktionsaufträge direkt aus Kundenaufträgen (Assemble-to-order, Make-to-order) und sind diesen auch zugeordnet, wobei in der kundenanonymen Auftragsabwicklung ein innerbetrieblicher Auftraggeber anhand von Prognosen Produktionsaufträge einsteuert (Make-to-stock). Eingehende Kundenaufträge werden in der kundenanonymen Auftragsabwicklung dann aus dem vorliegendem Lagerbestand bedient. Je nach Lage des Kundenentkopplungspunktes in der Auftragsabwicklung variieren die genauen Abläufe innerhalb der PPS. (WAGENITZ 2007)

Materialfluss

Der Materialfluss stellt die zentrale Funktion der Lieferkette dar und umfasst „Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von stofflichen Gütern“ (KLAUS et al. 2009). Dies umfasst alle physischen Produktions- und Logistikprozesse, die Zwischen- und Endprodukte innerhalb der Auftragsab-

wicklung durchlaufen. Diese Prozesse können hierbei als Transformationsprozess nach HOMPEL et al. (2018), bestehend aus einem Objekt, einem Operator und einem Prozess, beschrieben werden. Das Objekt entspricht dabei einem Bauteil oder einer Menge an Bauteilen, der Operator dem ausführenden Produktions- oder Logistiksystem und der Prozess der Art der Transformation. Im Bereich der Produktion kann der Transformationsprozess entweder eine mechanische Bearbeitung oder eine Montage, bei der mehrere Bauteile miteinander verbunden werden, sein. Innerhalb der Montage kommt es somit zu einem Konvergieren der Materialflüsse der einzelnen Eingangsprodukte.

In der Logistik kann zwischen der Intralogistik, welche den Transport und die Lagerung von Bauteilen innerhalb eines Standortes umfasst, und der externen Logistik, die den Transport von Waren zwischen Standorten oder von einem Standort zum Kunden beinhaltet, unterschieden werden (MARTIN 2009).

Informationsfluss

Materialflüsse entstehen nicht von selbst, sondern werden durch Informationen aus der Planung und Steuerung ausgelöst. Die Aufnahme, Verarbeitung und Weitergabe von Informationen innerhalb der Auftragsabwicklung stellt den Informationsfluss dar. Die PPS als Informationen verarbeitender Prozess gehört ebenfalls zum Informationsfluss, wurde jedoch aufgrund ihres Funktionsumfanges als eigener Funktionsbereich der Auftragsabwicklung definiert und beschrieben. Die von der PPS verarbeiteten und innerhalb der Planung weitergegebenen Informationen, beginnend mit dem Eingang eines Kundenauftrags, stellen den dem Materialfluss entgegen laufenden Informationsfluss dar und bildet die Verbindung von Kundenauftrag zu notwendigen Materialflussprozessen (KOWALSKI und QUINK 2013). Dies schließt auch Informationen, die im Planungsprozess entstehen, wie beispielsweise Produktionsprogramme, mit ein. Die Verbindung von PPS zu den Operatoren des Materialflusses wird als auslösender Informationsfluss bezeichnet. Je nach Lage des Kundenentkopplungspunktes erfolgt spätestens zu Beginn des auslösenden Informationsflusses der Übergang von einer mengenbasierten Planung zu einzelnen und konkret ausführbaren Aufträgen (SCHENK et al. 2012).

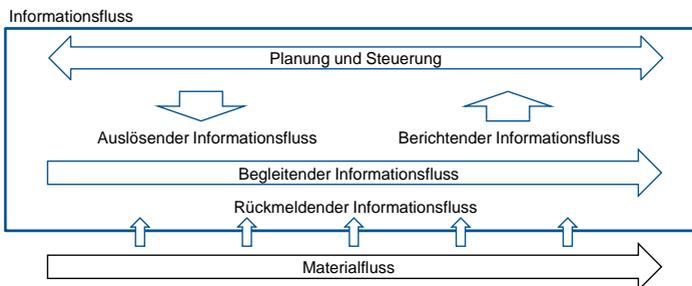


Abbildung 2.2: Zusammenspiel von Planung und Steuerung, Informationsfluss und Materialfluss.

Die Produktions- und Logistikaufträge bilden hierbei den begleitenden Informationsfluss. Aufträge entsprechen damit dem digitalen Gegenstück des Bauteils oder eines Ladungsträgers und spiegeln deren aktuellen Status wider. Die Aufträge begleiten den Materialfluss. Der Status eines Auftrags wird durch den rückmeldenden Informationsfluss entsprechend dem Fortschritt im Materialfluss aktualisiert. Die Status von Aufträgen werden über den berichtenden Informationsfluss an die PPS gemeldet, sodass diese den Zustand der Materialflussoperatoren und einzelner Aufträge in die Planungsentscheidungen einbeziehen kann. Das Zusammenspiel von Planung und Steuerung, Informationsfluss und Materialfluss ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

2.1.3 Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken

In diesem Kapitel sollen die beschriebenen Grundlagen zu Produktionsnetzwerken mit denen der Auftragsabwicklung verknüpft und damit ein umfassendes Bild der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken geschaffen werden. Hierbei erfolgt auch eine Eingrenzung des in dieser Arbeit betrachteten Systemkontext. Abbildung 2.3 gibt einen Überblick über die zusammenwirkenden Elemente bei der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken, welche im Folgenden näher beschrieben werden.

Werden Auftragsabwicklung und Produktionsnetzwerke zusammen betrachtet, muss zunächst die Systemgrenze bezüglich der Anzahl beteiligter Organisationen bestimmt werden. Die Auftragsabwicklung beschreibt als Prozess die Tätigkeiten, die ein Unternehmen zur Wertschöpfung betreibt. Weitere Organisationen werden von der Auftragsabwicklung entweder als Kunde oder Lieferant betrachtet und sind daher außerhalb des Systems der Auftragsabwicklung angesiedelt. In unternehmensübergreifenden Produktionsnetzwerken oder Supply Chains legen die beteiligten Organisationen zwar gemeinsam die Rahmenbedingungen für die gemeinsame Wertschöpfung fest, für die Ausgestaltung der eigenen Auftragsabwicklung sind diese jedoch wiederum selbst verantwortlich (RUDBERG und OLHAGER 2003). Daher soll im Folgenden der Begriff des Produktionsnetzwerks auf unternehmensinterne Netzwerke festgelegt werden, wobei die Schnittstellen zu Lieferanten und Kunden weiter betrachtet werden.

Zur Untersuchung der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken muss auch die Betrachtungstiefe bestimmt werden. Hierfür kann das Ebenen-Modell der Produktion von WIENDAHL et al. (2007) herangezogen werden. SAGER (2018) schlägt eine Betrachtung der Ebenen Netzwerk bis Linie bei der Untersuchung von Produktionsnetzwerken vor, da das Zusammenspiel von Produktionsressourcen im Fokus steht. Die Linie umfasst alle Prozesse zur Herstellung eines (Zwischen-) Produktes. Eine tiefere Untergliederung der Linie ist für die Entscheidungen der Auftragsabwicklung nicht mehr relevant (SAGER 2018). In Abbildung 2.3 sind alle Ebenen und deren Zusammenwirken dargestellt. Jeder Knoten des Produktionsnetzwerks wird bis zur Linienebene aufgelöst betrachtet.

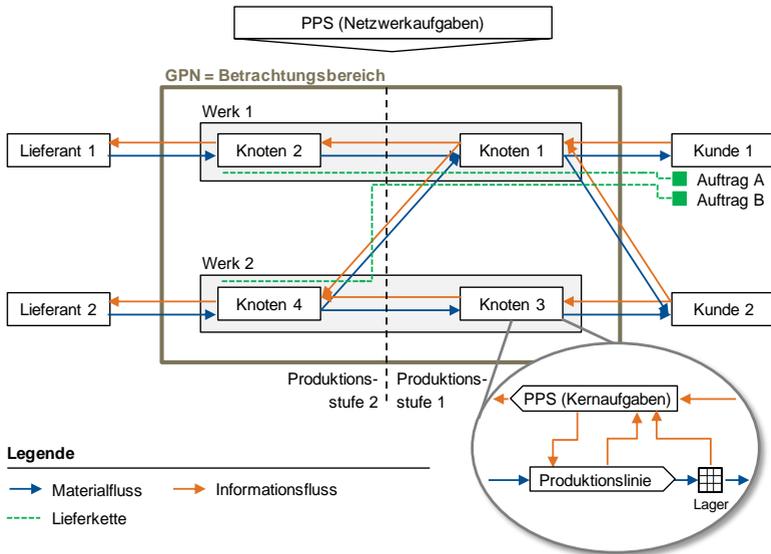


Abbildung 2.3: Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken.

Zentral für die gemeinsame Betrachtung von Auftragsabwicklung und GPN ist die Lieferkette, die ein einzelner Auftrag durchläuft. Erstreckt sich diese über mehrere Bauteilarten und Produktionsstufen, verknüpfen sich über interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen auch die Prozesse der Auftragsabwicklung. In Abbildung 2.3 entsprechen die Material- und Informationsflussverbindungen zwischen den einzelnen Knoten den internen Kunden-Lieferanten-Beziehungen. Insbesondere die Prozesse der Planung und Steuerung einzelner Knoten sind voneinander abhängig, da die Ergebnisse der Planung der nachgelagerten Produktionsstufe die Eingangsinformationen der vorgelagerten Stufe darstellen (dargestellt über die ein- und ausgehenden Informationsflussverbindungen). Folglich bilden sich neben verknüpften Materialflüssen auch Verkettungen zwischen den Planungs- und Steuerungsaufgaben, die bei einer Betrachtung der Auftragsabwicklung in GPN beachtet werden müssen.

Entlang dieser Lieferkette kann sich auch die Produktionsstrategie innerhalb des Netzwerks ändern. Beispielsweise kann die Montage noch nach dem Make-to-Order-Prinzip geplant werden, die notwendigen Vorprodukte aber nach Prognose und einer Make-to-Stock-Strategie. Entsprechend kann der Kundenentkopplungspunkt im Netzwerk variieren und damit auch die Abläufe der PPS-Prozesse.

Weiterhin kann die Lieferkette für eine Produktvariante in GPN variabel gestaltet sein. Gerade in modernen Produktionsnetzwerken liegen horizontale und vertikale Standortbeziehungen vor, was dazu führt, dass mehrere interne Lieferanten parallel vorliegen können. Abbildung 2.3 verdeutlicht dies über die unterschiedlichen Lieferketten der beispielhaften Aufträge A und B. Beide bezie-

hen sich auf die gleiche Produktvariante, jedoch wurden die Arbeitsschritte der zweiten Produktionsstufe an unterschiedlichen Standorten durchgeführt. Durch diese parallelen Produktionsbefähigungen können Unternehmen die Flexibilität und Resilienz ihrer Netzwerke stärken, erhöhen jedoch gleichzeitig deren Komplexität. Die Verteilung von Bedarfen auf verschiedene Ressourcen im Netzwerk, je nach Kapazitäten, stellt folglich eine entscheidende Charakteristik der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken dar.

Eine zusätzliche Eingrenzung der Auftragsabwicklung in GPN geschieht über die Auswahl der betrachteten Planungsebenen. Die strategischen Aufgaben der Auftragsabwicklung in GPN entscheiden über die grundsätzliche Struktur des Netzwerks, also über die Anzahl an Standorten, Linien, Kapazitäten sowie befähigte Produkte und Lieferbeziehungen. Damit spannen diese Entscheidungen den Rahmen für die taktische und operative Ebene der Auftragsabwicklung auf. Innerhalb dieser Ebenen geschieht der Betrieb der in der Strategie definierten Strukturen, indem reale Kundenaufträge in die Auftragsabwicklung einfließen und abgewickelt werden müssen. Dies schließt die Kernaufgaben der PPS, also mittelfristige Programm- und Bedarfsplanung, sowie die kurzfristige Steuerung von Produktion und Logistik mit ein. Ebenso fallen die Querschnittsaufgaben in den Betrachtungsbereich. Diese enthalten die Verwaltung von Lagerbeständen, Rückmeldungen aus der Produktion und das Erreichen von Lieferzielen. In Abbildung 2.3 sind die Querschnittsaufgaben indirekt über die Informationsflüsse von Produktionslinie und Lager zu den Kernaufgaben der PPS angedeutet.

Entsprechend den beschriebenen Herausforderungen in GPN, wie beispielsweise Ineffizienzen an den Schnittstellen zwischen Linien und Standorten oder der Bewertung der optimalen Entkopplungs- und Lieferstrategien, fokussiert sich diese Arbeit auf die taktisch operative Ebene der Auftragsabwicklung. Die Netzwerkaufgaben der strategischen Ebene liegen folglich außerhalb des Betrachtungsbereichs. Für eine optimale Gestaltung der strategischen Ebene sei auf die Arbeiten von SAGER (2018) und UDE (2010) verwiesen. Deren Arbeiten werden durch BAUER (2019) ergänzt, der die Optimierung der Distribution im Netzwerk in den Fokus nimmt.

2.2 Simulation

Unter Simulation wird das Nachbilden eines geplanten oder bestehenden Systems mit seinen zugehörigen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell verstanden. Mit Hilfe der Simulation sollen auf die Realität übertragbare Erkenntnisse generiert werden. Mit diesen sollen das Verständnis des abgebildeten Systems gesteigert, verschiedene, das System betreffende Entscheidungsalternativen untersucht und letztendlich bessere Entscheidungen getroffen werden. (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014)

Das Simulationsmodell bildet hierbei die untersuchungsrelevanten Eigenschaften des realen Systems innerhalb eines Toleranzbereichs, der von den Zielen

der Simulationsstudie abhängt, ab, wobei nicht relevante Eigenschaften des Systems im Modell vernachlässigt werden können. Prozesse beschreiben dabei die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden“ (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014). Das zu untersuchende System stellt hierbei „eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“ dar (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014).

Simulationsmodelle lassen sich gemäß grundlegender Eigenschaften charakterisieren. Eine Dimension ist hierbei die Integration einer zeitlichen Betrachtung. Bildet das Modell eine zeitliche Entwicklung des Systems ab, so handelt es sich um ein dynamisches Modell, wohingegen ein statisches Modell keine zeitlichen Entwicklungen betrachtet. Für dynamische Modelle kann weiterhin die Art, wie die zeitliche Entwicklung modelliert wird, unterschieden werden. In kontinuierlichen Modellen können Zustandsvariablen im Modell einer dauerhaften Änderung unterliegen, während dies in zeitdiskreten Modellen nur zu bestimmten Zeitpunkten geschehen kann. Hierbei kann weiter zwischen ereignisorientierten und zeitgesteuerten Modellen unterschieden werden. Bei ersteren werden Zustandsänderungen durch das Eintreten von Ereignissen ausgelöst. Bei zeitgesteuerten Modellen erfolgt die zeitliche Entwicklung in festgelegten, zeitlichen Inkrementen. (WENZEL et al. 2008)

Neben der zeitlichen Dimension stellt der Umgang mit stochastischem Verhalten eine weitere Eigenschaft von Modellen dar. Stochastische Modelle integrieren zufällige Zustandsänderung, sodass bei mehrmaliger Ausführung der Simulation bei gleichen Bedingungen unterschiedliche Ergebnisse auftreten können. Deterministische Modelle betrachten keine Zufälligkeiten, sodass sich unter gleichen Bedingungen stets gleiche Ergebnisse ergeben. (MOURTZIS et al. 2014)

Für Simulationen im Produktionsumfeld, insbesondere die Abbildung von Prozessen, werden stochastische, dynamische, zeit-diskrete und ereignisorientierte Modelle, kurz ereignisdiskrete Simulationen, eingesetzt (WAGENITZ 2007). Im Folgenden ist der Begriff der Simulation sinnbildlich für entsprechend stochastische, dynamische, zeit-diskrete und ereignisorientierte Simulationen zu verstehen.

2.2.1 Vorgehen in Simulationsprojekten

Der Einsatz von Simulationen weist einen projektartigen Charakter auf. Bevor Erkenntnisse mit Hilfe von Simulationsexperimenten gewonnen werden können, gilt es zunächst Problemstellung und Ziele zu definieren und anschließend ein geeignetes Simulationsmodell zu entwickeln. Ein Vorgehen, welches die einzelnen Schritte in Simulationsprojekten aufzeigt und in Relation setzt, ist in Abbildung 2.4 gezeigt. (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014)

Zu Beginn des Projektes steht die Aufgabendefinition, in der Simulationsziele formuliert und daraus die Aufgaben abgeleitet werden, welche vom Simulati-

onsmodell abgebildet werden müssen. Im Schritt der Systemanalyse wird der Systemkontext der Simulation eingegrenzt und der notwendige Detaillierungsgrad zur Erfüllung der Zielstellung festgelegt. Hierfür wird das abzubildende System gemäß der Zielstellung abstrahiert und idealisiert. Es entsteht ein grobes Konzeptmodell, welches die grundlegenden abzubildenden Eigenschaften des Systems aufführt. In der Phase der Modellformalisierung wird das grobe Konzeptmodell weiterentwickelt und finalisiert. Das resultierende Konzeptmodell entspricht dann einer vollständigen Beschreibung des Simulationsmodells, in der alle Objekte mit deren Beziehungen und Eigenschaften sowie notwendigen Logiken enthalten sind. Im Schritt der Implementierung wird das Konzeptmodell dann in ein ausführbares Simulationsmodell in der gewählten Simulationssoftware überführt. (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014)

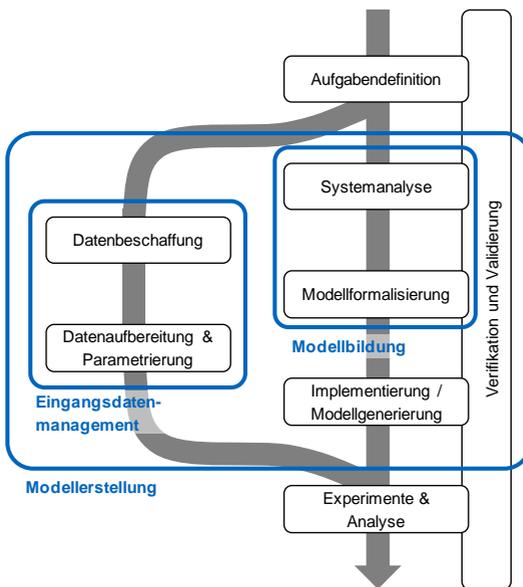


Abbildung 2.4: Vorgehensmodell in Simulationsprojekten (in Anlehnung an VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2014)).

Parallel zu den Schritten der Systemanalyse, der Modellformalisierung und der Implementierung verläuft die Phase der Datenbeschaffung und -aufbereitung. Innerhalb der Datenbeschaffung müssen notwendige Daten und deren IT-Systeme identifiziert und die Daten extrahiert werden. Oftmals liegen die identifizierten Daten nicht in einer für die Simulation direkt nutzbaren Form vor und erfordern eine Bereinigung und Aufbereitung. Gerade für die Bestimmung von stochastischen Größen für die Simulation ist eine Aufbereitung erforderlich, da entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Datenerfassungssystemen der Produktion nicht explizit aufgezeichnet werden. Diese müssen aus aufge-

zeichneten Daten errechnet und in die benötigten Parameterwerte überführt werden. (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. 2014)

Neben allen Schritten gilt es, die einzelnen Zwischenergebnisse im Simulationsprojekt zu validieren und verifizieren. Ist dies für alle Schritte erfolgt und das ausführbare Simulationsmodell als validiert und verifiziert einzustufen, so kann mit der eigentlich wertschöpfenden Arbeit im Simulationsprojekt, dem Schritt Experiment und Analyse begonnen werden. (WENZEL et al. 2008)

Neben den einzelnen Schritten werden in der Literatur oft auch weitere Begriffe, welche mehrere Schritte im Simulationsprojekt zusammenfassen, verwendet. Für den weiteren Verlauf der Arbeit sollen diese wie folgt definiert werden:

Unter Modellerstellung wird der gesamte Prozess ab der Aufgabedefinition bis zum Schritt Experimente und Analyse verstanden, also die Schritte der Systemanalyse, der Modellformalisierung und Implementierung sowie Datenbeschaffung und Datenaufbereitung. Der Begriff der Modellbildung kombiniert die Schritte der Systemanalyse und Modellformalisierung und beinhaltet somit alle Aufgaben, die zur Beschreibung eines Systems in Form einer Simulation nötig sind. Die Parametrierung stellt dann die Belegung der Parameter des Konzeptmodells mit konkreten Werten dar, worin auch eine Berechnung dieser Parameterwerte durch den Schritt der Datenaufbereitung enthalten ist. Ebenfalls gebräuchlich ist der Begriff des Eingangsdatenmanagement (englisch „Input Data Management“) (BARLAS und HEAVEY 2016; SKOOGH, JOHANSSON und STAHR 2012), welcher alle Schritte von der Datenidentifikation bis zum Abschluss der Parametrierung beinhaltet.

2.2.2 Werkzeuge für Simulationsprojekte

Um die Durchführung der einzelnen Schritte in Simulationsprojekten zu unterstützen, können verschiedene Methoden und Werkzeuge eingesetzt werden. Diese Methoden oder Werkzeuge sind hierbei nicht zwingend explizit für den Einsatz in Simulationsprojekten entwickelt worden, wurden aber entweder bereits in Simulationsprojekten angewandt oder werden in der vorliegenden Arbeit zur Unterstützung der Modellerstellung eingesetzt. Im Folgenden sollen die für diese Arbeit entscheidenden Methoden und Werkzeuge grundlegend beschrieben werden.

Modularisierung und allgemeine Bausteinbibliotheken

Um die Entwicklung von insbesondere großen und komplexen Simulationsmodellen zu unterstützen, kam in der Literatur bereits zu Beginn der 2000er-Jahre die Idee der Modularisierung und in diesem Zuge die Entwicklung von allgemeinen Bausteinbibliotheken auf (siehe MCLEAN und LEONG (2002)). Unter Modularisierung wird die Aufteilung des zu untersuchenden Systems in einzelne, funktionsfähige Einheiten, die Module, verstanden, welche jeweils eine eigenständige, in sich geschlossene Aufgabe übernehmen (POMBERGER und PREE

2004). Module verfügen über fest definierte Schnittstellen zur Außenwelt bzw. anderen Modulen. Um sie in das Gesamtsystem zu integrieren, ist daher keine genaue Kenntnis über ihren inneren Aufbau, sondern nur über die Schnittstellen, nötig. (POMBERGER und PREE 2004)

Eng verknüpft mit der Modularisierung ist das Konzept der Objektorientierung. In diesem wird zwischen den Konzepten Klasse und Objekt unterschieden. Ein Objekt stellt hier, in großer Ähnlichkeit zu der Beschreibung der Module, ein definiertes und abgegrenztes (Teil-)System oder Konstrukt dar, welches Eigenschaften (Attribute) und Funktionalitäten (Methoden) besitzt. Das Konzept der Klasse stellt eine allgemeine Beschreibung eines Sachverhalts dar, unter dem Objekte aufgrund ähnlicher Eigenschaften zusammengefasst werden können. Durch Instanziierung einer Klasse entsteht ein Objekt mit den in der Klasse angelegten Eigenschaften und Funktionalitäten, wobei die Eigenschaften der Instanz alle Werte, die in dem vordefinierten Wertebereich der Klasse enthalten sind, annehmen kann. Ein weiteres wichtiges Konzept in der Objektorientierung ist die Vererbung. Erbt eine Klasse von einer anderen Klasse, so übernimmt sie alle Eigenschaften und Funktionen der letzteren. Die geerbte Klasse kann dann um eigene Funktionalitäten und Eigenschaften erweitert werden. (BROY 2019; POMBERGER und PREE 2004)

Die Entwicklung eines Moduls entspricht damit dem Konzept der Klasse in der Objektorientierung. Zur Abbildung eines Systems in einem Simulationsmodell können so ähnliche Subsysteme durch die Entwicklung eines Moduls modelliert werden. Im Simulationsmodell werden dann einzelne Module mehrfach eingesetzt, also instanziiert und mit den entsprechenden Werten parametrisiert. In Produktionsnetzwerken bietet sich beispielsweise die Entwicklung eines Moduls für eine Produktionslinie an, welches dann mehrfach in der Simulation, mit unterschiedlichen Werten für den Linienbezeichner, Losgröße, Durchlaufzeit, etc., eingesetzt wird.

Die Kapselung des Gesamtsystems in Module kann die Komplexität in der Modellbildung reduzieren und ermöglicht weiterhin die einfachere Wartung und Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen. Kommerzielle Simulationssoftware stellt dem Anwender daher bereits sehr grundlegende Module, oftmals Simulationsbausteine genannt, zur Verfügung. Diese können je nach Software bereits domänenspezifisch ausfallen, wie beispielsweise die Fokussierung auf den Produktionsbereich bei Siemens Plant Simulation, oder eher allgemeiner gehalten sein, wie beispielsweise bei AnyLogic. In der Literatur finden sich auch spezialisierte Bausteinbibliotheken für einzelne Domänen wie den Schiffsbau (STEINHAEUER und SOYKA 2012), die Montage von Elektronikbauteilen (MUKKAMALA et al. 2003) und die Automobilindustrie (MAYER und PÖGE 2010). Für die Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken findet sich im Stand der Technik keine spezialisierte Bausteinbibliothek.

Ontologien zur Unterstützung von Modellbildung und Datenbeschaffung

Die Entwicklung von detaillierten und validen Simulationsmodellen erfordert ein hohes Maß an Wissen aus verschiedenen Bereichen. Hierunter fällt der Bereiche der Softwareentwicklung für die Implementierung der Simulation, Wissen über IT-Systeme, Datenanalyse und -aufbereitung und tiefgehendes Wissen über das abzubildende System, im Falle dieser Arbeit Produktions- und Logistikprozesse (BERGMANN 2013). Dies erfordert in Simulationsprojekten die Zusammenarbeit von Produktions- und IT-Experten, welche jeweils unterschiedliche Sichten auf das zu untersuchende System vertreten. Die Experten aus der Produktion verstehen ihre Anlagen und Prozesse, haben jedoch die dabei entstehenden Daten und deren Struktur nicht im Blick. Ein IT-Experte weiß, welche IT-Systeme welche Daten speichern, kann diese Daten jedoch nur schwer mit den Produktionsprozessen und deren Eigenschaften assoziieren. Innerhalb dieses Spannungsfeldes operiert der für die Entwicklung des Simulationsmodells verantwortliche Simulationsexperte. Um die wissensintensive Arbeit in Simulationsprojekten zu unterstützen, eignet sich der Einsatz von Ontologien (RABE und GOCEV 2012). Ontologien werden zum einen als Unterstützung für die Modellbildung eingesetzt, können zum anderen aber auch für die Datenidentifikation genutzt werden (RABE und GOCEV 2012), wie Veröffentlichung aus dem Bereich des Data Mining, welcher mit vergleichbaren Herausforderungen in der Datenidentifikation konfrontiert ist, erfolgreich aufzeigen konnten. Ontologien werden von Ansätzen dieses Bereichs oft zur Schaffung eines gemeinsamen Verständnisses zwischen Domänenexperten und IT-Experten verwendet (CALVANESE et al. 2015; KNOLL et al. 2019). Die Ontologie beschreibt die zu untersuchende Domäne und wird dann dazu verwendet, die für die Data-Mining-Ansätze relevanten Daten zu identifizieren und mit IT-Experten gemeinsam diese Daten in den IT-Systemen zu finden.

Eine Ontologie ist eine Form der Wissensdarstellung, die alle Informationen zu einem abgesteckten Bereich festhält und einen ordnenden Rahmen gibt (GRUBER 1993). Grundlegende Elemente einer Ontologie sind Klassen, Attribute und Relationen. Klassen geben eine natürlichsprachliche Beschreibung eines Konzepts des betrachteten Bereichs. Attribute stellen die Eigenschaften von Klassen dar. Relationen modellieren die Beziehungen zwischen Klassen. Entsprechend dem Konzept der Objektorientierung stellen auch in Ontologien Klassen die allgemeinen Überbegriffe dar. Konkrete Objekte entstehen durch Instanziierung der Klassen. (NOY und MCGUINNESS 2001)

In der Literatur zu Simulationen wird der Einsatz von Ontologien zu mehreren Zwecken beschrieben. Zur Unterstützung der Systemanalyse haben mehrere Autoren Ontologien als Wissensmodelle für bestimmte Domänen, wie Produktionslinien oder die Halbleiter-Fertigung entwickelt. Die Ontologie unterstützt den Simulationsexperten hierbei, das Wissen zum zu simulierenden System zusammenzutragen und strukturiert zu speichern. Die Ontologie bildet dann die Grundlage für den Aufbau des Konzeptmodells. Andere Ansätze gehen nicht von der abzubildenden Domäne, sondern von Seiten des Simulationsmodells aus. Diese Ansätze entwickeln Ontologien, die die grundlegenden Konzepte eines

Simulationsmodells abbilden und so die Konzeptmodellentwicklung durch Instanziierung in der jeweiligen Ontologie verlagern (MILLER und BARAMIDZE 2005). Hierdurch weisen derartige Ansätze eine gewisse Nähe zu den oben beschriebenen Bausteinbibliotheken auf, jedoch auf Ebene des Konzeptmodells und nicht als ausführbares Simulationsmodell. Auch die Kombination beider Strömungen wurde untersucht. COPE (2008) stellt eine Ontologie für die Simulation von Supply Chains vor, welche auch zur Sammlung von Informationen an Stakeholder in der Supply Chain verschickt werden kann. Durch ein derartiges Vorgehen kann die Ontologie neben Systemanalyse und Konzeptmodellentwicklung auch die Datenbeschaffung effizienter gestalten.

2.3 Simulation der Auftragsabwicklung in GPN

Auf Basis der vorgestellten Grundlagen und der beschriebenen Herausforderungen in GPN soll im Folgenden eingegrenzt werden, wie eine Simulation der Auftragsabwicklung in GPN gestaltet sein muss.

Ausgangspunkt hierfür sind die Herausforderungen und Fragestellungen im Betrieb von GPN, aus denen sich mögliche Untersuchungsziele einer Simulationsstudie ergeben. Anhand der Untersuchungsziele wird der notwendige Detaillierungsgrad eines Simulationsmodells abgeleitet. Dieser definiert zum einen, welche Elemente des zu untersuchenden Systems in welcher Tiefe abgebildet und zum anderen, welche Anforderungen an die Simulationsausführung gestellt werden. Letzte beziehen sich auf die Art der Simulation sowie bei dynamischen Simulationen auf Zeitraum und zeitliche Auflösung eines Simulationslaufes.

Als grundlegende Fragestellung ist die Untersuchung von Potenzialen zur Effizienzsteigerung in der Auftragsabwicklung von GPN zu nennen. Gerade zwischen Linien verschiedener Produktionsstufen und Werken ist die Bestimmung von optimalen Bestandshöhen komplex und nicht mehr analytisch bestimmbar (KUNATH und WINKLER 2018). Die Folge sind zu hohe Bestände oder häufiges Umplanen der Produktion, da Bauteile nicht verfügbar sind. Mittels Simulation können unter Einbeziehung von zufällig auftretenden Störungen alternative Szenarien mit geringeren Beständen untersucht und auf das Risiko von fehlenden Bauteilen bewertet werden. Auch die Untersuchung von neuen Belieferungsstrategien, wie interne Just-In-Time-Verfahren, oder geänderte Planungs- und Steuerungsprozesse können mit Simulationen im Vorfeld erprobt und evaluiert werden.

Weitere Herausforderung in GPN ist der Umgang mit kurzfristigen Störungen und die schnelle Reaktion darauf (FRIEDLI et al. 2017). FRIEDLI et al. (2017) schlagen als Lösungsmethoden hierfür eine hohe, auf Rückmeldedaten basierende Transparenz und den Einsatz von Simulationen vor. Mit Hilfe von Simulationen sollen schnell mögliche Maßnahmen evaluiert oder bereits im Vorfeld der Störung Handlungsoptionen für den Störfall entwickelt werden.

Insgesamt erfordern die Fragestellungen und Einsatzmöglichkeiten der Simulation in GPN ein Modell des Netzwerkbetriebs. Hierfür muss die Auftragsabwicklung auf taktisch, operativer Ebene im unternehmensinternen Netzwerk abgebildet werden (siehe Betrachtungsbereich in Kapitel 2.1.3). Dies beinhaltet die taktischen und operativen Aufgaben der PPS und des zugehörigen Materialflusses. Operative und taktische Planungsentscheidungen werden folglich innerhalb der Simulation getroffen und nicht als Parameterwerte zu Simulationsbeginn übergeben.

Auf Ebene des Materialflusses muss das Zusammenspiel verschiedener Ressourcen untersucht werden. Folglich erfolgt eine Auflösung bis zur Ebene der Produktionslinie. Im Bereich der Logistik ist die Lagerung von Bauteilen und der Transport zwischen Werken und zum Kunden zu betrachten. Eine Detaillierung von Prozessen der Intralogistik ist nicht erforderlich, da deren Ausführungsdauern als vernachlässigbar gegenüber dem externen Transport sowie der Bearbeitungszeit der Produktion angenommen werden können.

Als Anforderungen an die Simulation ergibt sich aus den Fragestellungen die notwendige Integration von Dynamik, im Zuge stetig neuer Bedarfe, die in das Netzwerk eingesteuert werden, und Stochastik, damit Untersuchungen bezüglich möglicher Risiken im Netzwerk durchgeführt werden können. In Kombination mit dem prozessualen Charakter der Auftragsabwicklung bietet sich somit eine ereignisdiskrete Simulation an (siehe WAGENITZ (2007)).

Zusätzlich ergeben sich Anforderungen an die notwendige zeitliche Auflösung der Simulation sowie den zu simulierenden Zeitraum. Letzter ergibt sich aus dem taktisch operativen Rahmen der zu untersuchenden Fragestellungen. Folglich müssen taktische Zeiträume von mehreren Monaten bis hin zu zwei Jahren simulierbar sein. Um Fragestellungen bezüglich Belieferungsstrategien, wie Just-in-Time-Strategien, zu untersuchen, ist eine hohe zeitliche Auflösung bis hin zu Minuten erforderlich, um Liefertreue und Systemleistung adäquat zu modellieren und analysieren.

Kapitel 3

Stand der Technik

Die in Kapitel 1 beschriebenen Herausforderungen beim Einsatz von Simulationen begleiten Wissenschaftler und Praktiker bereits seit deren ersten Aufkommen in der industriellen Praxis. Gleichzeitig haben sich diese über den gleichen Zeitraum auch mit möglichen Lösungen zu diesen Herausforderungen beschäftigt. In diesem Kapitel sollen daher die publizierten Ansätze vorgestellt, untersucht und bewertet werden, die zum Ziel haben, die Aufwände in Simulationsprojekten zu senken, indem einzelne Aufgaben unterstützt oder automatisiert werden. Hierfür wird in Kapitel 3.1 zunächst ein Überblick über den Stand der Technik und dessen Bewertung gegeben, in Kapitel 3.2 werden die einzelnen Ansätze vorgestellt und diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 3.3 neue Forschungsmöglichkeiten identifiziert.

3.1 Überblick über den Stand der Technik

Im Themenbereich der Unterstützung und Automatisierung der Simulationsmodellerstellung wurden seit der frühen 2000er-Jahre mehrere Literaturübersichten von verschiedenen Autoren veröffentlicht. Einen jeweils generellen Überblick bezogen auf die Teilschritte des Simulationsdatenmanagements wurde von ROBERTSON und PERERA (2001) und SKOOGH und JOHANSSON (2007) veröffentlicht. Hierbei basieren beide Veröffentlichungen auf einer wiederholt durchgeführten Studie unter Praktikern über die auftretenden Arbeitsaufwände im Datenmanagement in Simulationsprojekten. Die Autoren unterscheiden vier Ansätze: (1) das manuelle und direkte Einfügen von Daten in das Simulationsmodell, (2) die manuelle Sammlung von Daten und deren strukturierte Speicherung außerhalb des Simulationsmodells, (3) die automatisierte Sammlung von Daten und deren Speicherung in einer eigenen Datenbank und (4) der direkte Zugriff des Simulationsmodells auf Daten aus den Unternehmens-IT-Systemen (ROBERTSON und PERERA 2001).

BARLAS und HEAVEY (2016) stellen die Ergebnisse ihrer strukturierten Literaturrecherche zur Automatisierung in Simulationsmodellerstellung und dem

Eingangsdatenmanagement dar und liefern einen umfassenden Überblick über den damaligen Stand der Technik. Aufbauend auf ROBERTSON und PERERA (2001) kategorisieren die Autoren den Stand der Technik nach 5 Themenfeldern: (1) dem Einsatz einer Datenbank zur Datenhaltung für Simulationsmodelle, (2) die Ableitung von Simulationsmodellen anhand von Programmcode aus speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), (3) die Entwicklung von Werkzeugen für die Datenaufbereitung, (4) die Nutzung von Standards und Schnittstellen sowie (5) die direkte Integration der IT-Infrastruktur in Simulationsmodelle.

REINHARDT et al. (2019) veröffentlichen die Ergebnisse ihrer strukturierten Literaturrecherche zur automatischen Modellerstellung für Materialflusssimulationen im Produktionsbereich und erweitern damit die Übersicht von BARLAS und HEAVEY (2016) um neue Ansätze, wobei die Autoren insbesondere auf die verwendeten Datenquellen sowie die Verarbeitung von darin befindlichen Informationen für Modellbildung und Parametrierung eingehen. Bei den in Simulationsprojekten verwendeten Datenquellen unterscheiden die Autoren zwischen Computer-Aided-Design-Daten (CAD), Daten aus Unternehmens-IT-Systemen, wie Enterprise Resource Planning (ERP) oder Manufacturing Execution Systems (MES), Wissensdatenbanken, SPS-Programmcode und Sensordaten, wie RFID (englisch „radio-frequency identification“), und manuellen Nutzereingaben. Die Gewinnung von Informationen und Daten für die Simulationsmodellerstellung aus diesen Systemen erfolgt entweder explizit oder implizit, wobei bei der impliziten Verarbeitung zwischen den eingesetzten Methoden wie Analyse von Programmcode, Inferenz, maschinellem Lernen, Mustererkennungen, etc., unterschieden wird.

Die veröffentlichten Literaturübersichten zeigen zum einen das große Interesse an Methoden zur Unterstützung in Simulationsprojekten, zum anderen aber auch die Vielzahl an Ansätzen und grundlegenden Ideen in diesem Themenbereich. Insgesamt lassen sich aber in Anlehnung an die vorgestellten Klassifizierungen der einzelnen Ansätze verschiedene Forschungsströmungen identifizieren, in die sich der Stand der Technik untergliedern lässt. Mit Bezug zur Anwendungsdomäne dieser Arbeit, der Auftragsabwicklung in GPN, können fünf Forschungsströmungen definiert werden:

1. Strukturbasierte Modellbildung und Parametrierung
2. Extraktionswerkzeuge
3. Wissensbasierten Modellbildung und Parametrierung
4. Datenbasierte Modellbildung und Parametrierung
5. Automatisierten Modellgenerierung

Ansätze der *strukturbasierten Modellbildung und Parametrierung* greifen auf SPS-Programme zurück, um anhand derer automatisiert Eingangsdaten für Simulationsmodelle bereitzustellen oder die Modellbildung zu unterstützen. In der

Forschungsströmung *Extraktionswerkzeuge* finden sich Arbeiten, die Methoden zur Unterstützung oder Automatisierung der Datenaufbereitung und Parametrierung entwickeln. Zur Forschungsströmung der *wissensbasierten Modellbildung und Parametrierung* werden alle Ansätze gezählt, die mittels allgemeiner Wissensmodelle, entweder über Simulation allgemein, oder über spezifische Domänen, wie beispielsweise die Halbleiterfertigung, Simulationsexperten bei der Modellbildung unterstützen. Die *datenbasierte Modellbildung und Parametrierung* umfasst alle Ansätze, die Methoden beschreiben, welche aus bestehenden Datenquellen automatisiert Informationen für die Modellerstellung gewinnen. Abschließend stellen Ansätze der Forschungsströmungen der *automatisierten Modellgenerierung*, aufbauend auf einer vollständigen Beschreibung eines Simulationsmodells, Automatisierungslösungen für die Überführung dieser Beschreibung in Simulationssoftware und damit ein ausführbares Simulationsmodell dar. Die Nutzung von CAD-Daten für die Modellbildung (siehe beispielsweise LINDWORSKY (2011)) oder Methoden des maschinellen Sehens (siehe UHLEMANN et al. (2017) und SOMMER et al. (2020)) stellen nach REINHARDT et al. (2019) weitere Forschungsströmung dar, welche im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet werden, da beide Strömungen genaue räumliche Abbildungen von Produktionsanlagen fokussieren. Für eine Betrachtung der Auftragsabwicklung in GPN sind räumliche Informationen auf Anlagenebene nur von einem geringen Mehrwert für die Modellbildung, da die Zusammenhänge über Linien-, Segment- und Werksgrenzen hinweg im Fokus stehen und Übergangszeiten deshalb nicht von den räumlichen Verhältnissen abhängen.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die relevanten Veröffentlichungen des Stands der Technik gegliedert nach Forschungsströmungen vorgestellt und diskutiert. Einige Ansätze vereinen dabei Eigenschaften mehrerer Forschungsströmungen, werden jedoch in der Strömung mit der höchsten Übereinstimmung vorgestellt. Die Diskussion richtet sich hierbei zum einen an den in Kapitel 1 vorgestellten Herausforderungen in Simulationsprojekten und inwiefern die vorgestellten Arbeiten die Schritte der Datenidentifikation, Datenaufbereitung, Parametrierung, Modellbildung und Modellgenerierung unterstützen und automatisieren. Zum anderen werden die Arbeiten auf ihre Einsetzbarkeit oder Übertragbarkeit auf die Auftragsabwicklung in GPN hin bewertet, wobei sich dies anhand der in Kapitel 2.1 beschriebenen Bestandteile der Auftragsabwicklung und Charakteristika von Produktionsnetzwerken orientiert. Die Herausforderungen in Simulationsprojekten sowie die Abdeckung der Domäne stellen die Bewertungskriterien für die Evaluation des Standes der Technik dar.

3.2 Ansätze zur Effizienzsteigerung in Simulationsprojekten

Im Folgenden werden, sortiert nach den jeweiligen Forschungsströmungen, zunächst die relevantesten Arbeiten vorgestellt und anschließend bezüglich der

eingesetzten Methoden diskutiert, wobei sich die Diskussion nach den aufgestellten Kriterien gliedert.

3.2.1 Strukturbasierte Modellbildung und Parametrierung

Der verbindende Kerngedanke hinter den einzelnen Arbeiten der Forschungsströmung strukturbasierter Modellbildung und Parametrierung ist die Ausnutzung bestehender, meist aus der Planung der Produktionssysteme stammenden, strukturierter Informationen. Dabei wurden diese Informationen, wie CAD-Zeichnungen oder Steuerungsprogrammcode, nicht mit der Intention erstellt, als Grundlage für ein Simulationsmodell zu dienen. Strukturbasierte Ansätze versuchen, die für ein Simulationsmodell notwendigen Informationen und Daten aus diesen bereits vorliegenden Informationen zu extrahieren.

Vorstellung der Arbeiten

PARK et al. (2010) wollen den Aufwand für die Erstellung eines Simulationsmodells reduzieren, mit dem die Funktionsweise von SPS-Programmcode getestet werden kann, ohne in die reale Produktionsanlage eingreifen zu müssen. Hierfür nutzen die Autoren den bereits bestehenden SPS-Programmcode und standardisieren diesen mit Hilfe einer vorgestellten Namenskonvention. Ein von den Autoren entwickelter Algorithmus liest den bearbeiteten SPS-Programmcode ein, identifiziert automatisiert Objekte und Steuerungslogiken der Produktionsanlage und erzeugt hieraus ein parametriertes Simulationsmodell.

POPOVICs et al. (2012) nutzen ebenfalls SPS-Programmcode, erweitern den Grad der Automatisierung im Vergleich zu PARK et al. (2010) jedoch. Die entwickelte Methode identifiziert anhand des SPS-Programmcodes neben einzelnen Objekten und deren Steuerungslogik zusätzlich noch die Verbindungen zwischen den einzelnen Objekten. Aus diesen kann ein gerichteter Graph abgeleitet werden, der den möglichen Materialflüssen der Anlage entspricht. Durch die Integration von Log-Daten aus MES-Systemen identifizieren die Autoren die real auftretenden Parameterwerte für Prozesszeiten einzelner Teile der betrachteten Produktionsanlage. Im Anwendungsfall, der Entwicklung einer Simulation für ein Fördersystem, kann so die Topologie des Simulationsmodells automatisiert identifiziert werden. Die Berechnungslogiken für Parameterwerte sind nach einmaliger, aber manueller Konfiguration im Anwendungsfall ebenfalls automatisiert ausführbar. Insgesamt ermöglicht der Ansatz eine automatisierte initiale Modellbildung und eine automatisierte Aktualisierung der Modellparametrierung.

BIESINGER et al. (2019) entwickeln ein Konzept für einen digitalen Zwilling des Karosseriebaus in der Automobilproduktion. Der digitale Zwilling enthält dabei ein Modell der Produktionsanlage, welches stetig an die realen Gegebenheiten der Anlage angepasst und aktualisiert werden soll. Um diese Aktualisierung zu ermöglichen, stellen die Autoren ein Konzept vor, mit dem sämtliche Informationen des Modells automatisch aktualisiert werden können. Hierfür untersuchen die

Autoren den Informationsgehalt von SPS-Programmcode in einzelnen Roboterzellen des Karosseriebaus. Im Vergleich zu POPOVICs et al. (2012) identifizieren BIESINGER et al. (2019) weiterhin Informationen bezogen auf einzelne Produktvarianten und nicht nur in Bezug auf die Anlage als Ganzes. Die Autoren nutzen zudem die gespeicherten Zeitpunkte, an welchen einzelne Funktionen im Programmcode ausgeführt wurden, um anhand dieser Information Prozesszeiten zu bestimmen. Die Nutzung von MES-Daten kann hierdurch umgangen werden und somit die Anzahl notwendiger Systeme zur Modellerstellung reduziert werden. Insgesamt stellt der Ansatz von BIESINGER et al. (2019) jedoch lediglich ein Konzept dar, woher notwendige Informationen für eine Modellaktualisierung kommen können. Eine genaue Detaillierung oder die Entwicklung und Implementierung von Methoden, die anhand der aufgezeigten Daten automatisiert ein Modell erstellen können, wird in der Veröffentlichung nicht behandelt.

Methodische Diskussion

Alle vorgestellten Ansätze der strukturbasierten Methoden basieren auf der Nutzung von SPS-Programmcode auf in Produktionssystemen bestehenden Informationen. Durch den Fokus auf SPS-Programmcode wird eine klare Bestimmung der für die Modellerstellung notwendigen Daten gegeben, wodurch sich die Herausforderungen für die Identifikation der richtigen Datenquellen für den Anwender stark reduzieren. Folglich gilt aber auch, dass das Vorliegen von durchgängigem SPS-Programmcode über das ganze zu simulierende System eine zwingende Voraussetzung für die Anwendung darstellt. Zudem ist eine realitätsnahe Modellerstellung rein auf SPS-Programmcode nur in Teilen möglich, da stochastische Abweichungen, beispielsweise Maschinenausfälle, nicht im Programmcode gespeichert werden. Hier müssen Messdaten einbezogen werden. POPOVICs et al. (2012) und BIESINGER et al. (2019) geben hierfür Indikationen, welche Messdaten zur realitätsnahen und stochastischen Abbildung von Prozesszeiten genutzt werden können. Eine klare und allgemeine Definition der Datenformate bleibt jedoch aus.

Bezüglich der Datenaufbereitung und Überführung in nutzbare Simulationsparameter stellen insbesondere POPOVICs et al. (2012) einen automatisierten Ansatz für die Bestimmung von Prozesszeiten vor. In Simulationsmodellen komplexer Produktions- und Logistiksysteme sind eine Vielzahl weitere Parameter, wie beispielsweise Ausfallzeiten, Verteilungen über Qualitätsaspekte, etc., von großer Bedeutung, werden von den Autoren jedoch nicht weiter behandelt. POPOVICs et al. (2012) beschreiben somit einen ersten Ansatz, um die Datenaufbereitung und Parametrierung in Simulationsprojekten zu automatisieren, welcher für eine vollständige Abbildung von komplexen Produktionssystemen jedoch noch zu erweitern ist.

Neben der Datenaufbereitung weisen die strukturbasierten Ansätze auch einen hohen Automatisierungsgrad bezüglich der initialen Modellbildung auf. Bei POPOVICs et al. (2012) erfolgt die erste Modellbildung anhand des SPS-Programmcodes automatisiert, wobei Anlagen und deren Verknüpfungen sowie Steue-

rungslogiken erkannt und in ein Simulationsmodell umgewandelt werden. Der Automatisierungsgrad bei PARK et al. (2010) ist hierbei verglichen mit POPOVICs et al. (2012) geringer, da im Vorfeld der SPS-Programmcode manuell in die notwendige Namenskonvention überführt werden muss.

Diesem hohen Automatisierungsgrad steht jedoch der Nachteil gegenüber, dass alle Ansätze auf das Vorhandensein von SPS-Programmcode angewiesen sind. Damit eignen sich die Ansätze für hoch-automatisierte Produktionssysteme, sind jedoch kaum für Systeme geeignet, die nicht vollständig durch SPS-Programmcode gesteuert werden. Gerade bei der Betrachtung von Produktionsnetzwerken stellt dies ein Problem dar, da insbesondere Lieferbeziehungen zwischen Werken, aber auch die Intralogistik, nicht über SPS-Programmcode gesteuert werden. Somit lassen sich wichtige Informationen in GPN, wie die Verknüpfungen von Produktionslinien und Werken sowie deren Eigenschaften, mit strukturbasierten Verfahren nicht vollständig automatisiert abbilden.

3.2.2 Extraktionswerkzeuge

Die Ansätze der Forschungsströmung Extraktionswerkzeuge zeichnen sich durch die Gemeinsamkeit aus, ein allgemeines Werkzeug zu entwickeln, welches unabhängig vom Anwendungsfall bei der Datenextraktion, -aufbereitung und Parametrierung unterstützt sowie eine regelmäßige Wiederholung dieser Prozessschritte automatisiert.

Vorstellung der Arbeiten

SKOOGH, JOHANSSON und STAHR (2012) stellen in ihrer Veröffentlichung mit dem Generic Data Management (GDM) Tool eine Softwareanwendung vor, mit der flexibel aus Unternehmens-IT-Systemen Daten extrahiert, transformiert und in die für das Simulationsmodell nötige Form gebracht und exportiert werden (siehe Abbildung 3.1). Für die Datenextraktion stellt das GDM-Tool dabei Funktionen für die Anbindung an verschiedene Datenquellen, wie Datenbanken von IT-Systemen, aber auch Tabellenkalkulationsprogramme und andere Datenformate bereit. Im Prozessschritt der Datentransformation ermöglicht das GDM-Tool den Einsatz von Filtermöglichkeiten, die Zusammenführung von Daten aus unterschiedlichen Quellen, mathematische Operation und die statistische Repräsentation der Daten. Die mittels der Datentransformation bestimmten Parameter werden im Schritt der Ergebnisausgabe in einer XML-Datei nach Formatierung mittels Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) ausgegeben. Das CMSD-Format stellt ein Standardformat zur Beschreibung von Simulationsmodellen dar, welches in Kapitel 3.2.3 detailliert vorgestellt wird. Für den Einsatz muss die GDM-Anwendung vom Anwender initial konfiguriert werden, also die entsprechenden Anbindungen an Datenquellen und die Schritte der Datentransformation im Tool aufgesetzt werden. Nach der Konfiguration können Datenextraktion und -transformation automatisiert ausgeführt werden, sodass

die Aktualisierung von Parameterwerten im Simulationsmodell ohne manuellen Aufwand erfolgt.

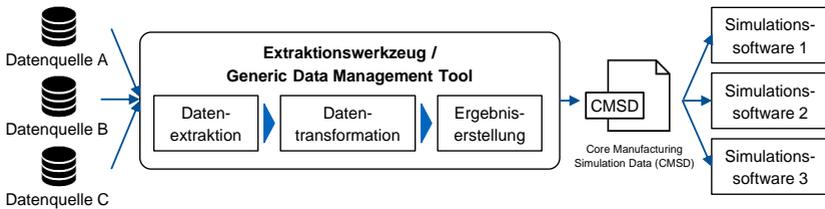


Abbildung 3.1: Architektur des Generic Data Management Tools (SKOOGH, JOHANSSON und STAHR 2012).

BARLAS et al. (2015) präsentieren mit dem Knowledge Extraction (KE) Tool eine Erweiterung des GDM-Tools mit einem höheren Funktionsumfang und in Form einer Open-Source-Software-Lösung. Die grundlegende Struktur des KE-Tools entspricht der Architektur des GDM-Tools, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Im Bereich der Datenextraktion und der Ergebnisausgabe werden mehr Dateiformate unterstützt, um die Flexibilität des Tools zu erhöhen. Zudem werden die Funktionalitäten im Bereich der Datentransformation um weitere statistische Methoden ergänzt. Die Autoren validieren das KE-Tool in einem Simulationsprojekt zur Abbildung einer Produktionslinie für medizinische Geräte und berichten von einer Aufwandsreduzierung im Datenmanagement des Projekts von 81%.

Einen ähnlichen Ansatz wie SKOOGH, JOHANSSON und STAHR (2012) und BARLAS et al. (2015) verfolgen AUFENANGER et al. (2010). Ihr Machine-Data-Acquisition-Tool (MDA) arbeitet nach der gleichen Architektur wie GDM- und KE-Tool, fokussiert sich in der Datenextraktion jedoch auf Produktionsanlagen und IT-Systeme, die aufgezeichnete Daten per Webservices in der Devices-Profile-for-Web-Services-Spezifikation bereitstellen. Das MDA-Tool stellt ebenfalls eine grafische Benutzeroberfläche für die initiale Konfiguration bereit, bietet für die Datentransformation jedoch weniger Funktionalitäten. Im automatisierten Betrieb aktualisiert das MDA-Tool die Parameter des Simulationsmodells direkt in der Simulationssoftware und verzichtet auf die Ergebnisausgabe in Form einer standardisierten Datei. Ziel des MDA-Tools ist es, Simulationsstudien möglichst in Echtzeit ausgehend vom aktuellen Zustand des Produktionssystems durchzuführen, um die kurzfristige, operative Entscheidungsfindung zu unterstützen.

RODRIGUEZ (2015) entwickelt eine Softwareanwendung zur Unterstützung der Datenaufzeichnung und anschließender Datentransformation. Anders als bei den bereits vorgestellten Extraktionswerkzeugen, greift die Anwendung nicht auf bestehende IT-Systeme zu, sondern erfordert die manuelle Eingabe von Rohdaten, beispielsweise Zeitmessungen im Produktionsbetrieb. Der Autor definiert hierfür drei Klassen möglicher Datenformate und entwickelt für jede Klasse einen automatisiert ablaufenden Transformationsprozess, in dem statistische Vertei-

lungen identifiziert, parametrisiert und visualisiert werden. Eine automatisierte Übertragung der identifizierten Parameter ist nicht Bestandteil der Lösung.

Methodische Diskussion

Allen Ansätzen, die den Extraktionswerkzeugen zugeordnet werden, ist gemein, dass sie eine allgemeine und flexible Lösung, unabhängig von einem speziellen Anwendungsfall oder einer Domäne, entwickeln, um dem Anwender in den Schritten von der Datenidentifikation bis zur Parametrierung des Simulationsmodells zu unterstützen. Die grundlegende Idee hinter den Extraktionswerkzeugen ist, dass für alle Parameter eines Simulationsmodells dieser Prozess initial von einem Anwender konfiguriert wird. Nach dieser Konfiguration können die Prozessschritte automatisiert ablaufen und somit eine stetige Aktualisierung der Parameterwerte in der Simulation ermöglichen. Hierdurch bieten Extraktionswerkzeuge zwar eine gute Lösung, um die Wiederverwendbarkeit von Simulationsmodellen zu erhöhen, reduzieren jedoch durch die initiale Konfiguration den Aufwand beim erstmaligen Aufbau eines Simulationsprojekts nur begrenzt. Die zeitintensiven Schritte der Systemanalyse und Modellbildung müssen weiterhin manuell vom Anwender übernommen werden. Positiv hervorzuheben ist die Bereitstellung einer Vielzahl von mathematischen und statistischen Methoden zur Datenverarbeitung, welche den Anwender auch bereits bei der Konfiguration in der Datenaufbereitung unterstützen.

Der Ansatz von RODRIGUEZ (2015) gibt zudem Hilfestellung bei der Identifikation von Daten, indem in der Realität häufig vorkommende Datenformate in Klassen eingeteilt und mit ihren Eigenschaften beschrieben werden. Die nachfolgenden Prozesse der Datenverarbeitung sind auf diese Eigenschaften hin angepasst und weisen somit eine einfachere Handhabbarkeit für den Anwender auf. Die anderen Extraktionswerkzeuge legen den Fokus auf die Flexibilität bei Datenquellen und Formaten und geben damit dem Anwender keine spezifischen Hinweise, welche Daten, Datenquellen und Formate für die Simulationsmodellerstellung relevant sind.

Der Schritt der Modellgenerierung wird von AUFENANGER et al. (2010) explizit unterstützt, indem das MDA-Tool die berechneten Parameterwerte direkt in das ausführbare Simulationsmodell integriert. SKOOGH, JOHANSSON und STAHR (2012) und BARLAS et al. (2015) liefern durch einen Export der Ergebnisse in standardisierten Datenaustauschformaten die Grundlage für eine automatisierte Modellgenerierung.

Die vorgestellten Ansätze sind aufgrund ihres allgemeinen und flexiblen Charakters nicht speziell auf die untersuchte Domäne der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken zugeschnitten, können diese voraussichtlich aber nach einer ausführlichen initialen Konfiguration abdecken.

3.2.3 Wissensbasierte Modellbildung und Parametrierung

Die grundlegende Idee hinter den Ansätzen, die der wissensbasierten Modellbildung und Parametrierung zugeordnet sind, ist die Bereitstellung einer strukturierten Sammlung von Wissen, entweder über Simulation allgemein, über die zu simulierende Domäne oder die Kombination, also ein Wissensmodell, wie eine bestimmte Domäne simuliert werden kann. Die Wissensbasis leitet den Anwender im Anwendungsfall durch die Systemanalyse, stellt bereits Möglichkeiten zur Modellierung bestimmter Sachverhalte bereit und gibt notwendige, zu bestimmende Parameterwerte oder verwendbare Rohdaten an. Da die grundlegenden Zusammenhänge bereits in der Wissensbasis beschrieben sind, reduziert sich für den Entwickler des Simulationsmodells der Aufwand. Da die Wissensbasis unabhängig von der Simulationssoftware gehalten ist, ist diese auch von Nicht-Simulationsexperten nutzbar und damit eher dazu geeignet mit anwendungsfallspezifischen Daten und Informationen von Domänenexperten angereichert zu werden.

Innerhalb der wissensbasierten Modellbildung und Parametrierung kann wiederum zwischen unterschiedlichen Herangehensweisen unterschieden werden. Zum einen werden Standarddatenformate zur Speicherung von Simulationsmodellen und deren Austausch zwischen Softwareanwendungen entwickelt. Weiterhin kommen Ontologien zum Einsatz, die als grundsätzliches Modell von Simulationen allgemein gedacht sind. Diese lassen sich als Überführung der Standarddatenformate in Ontologien verstehen, wobei nicht die Austauschbarkeit zwischen Softwareanwendungen, sondern die allgemeine Struktur von Simulationsmodellen im Vordergrund steht. Dem gegenüber stehen Standardmodelle für einzelne Domänen, die Wissen über diese in strukturierter Form darstellen. Liegt eine derartige Wissensbasis für einen Anwendungsfall vor, so reduziert diese die Aufwände für die Informationsbeschaffung in Simulationsprojekten erheblich. Abschließend kombinieren mehrere Ansätze die beiden Herangehensweisen und entwickeln Wissensmodelle für die Abbildung einer bestimmten Domäne in Simulationsmodellen.

Vorstellung der Arbeiten

Eines der häufigst erwähnten Standardaustauschformate für Simulationsmodelle stellt das CMSD-Format dar (BERGMANN 2013). Mit dem CMSD-Format wird das Ziel verfolgt, den Datenaustausch zwischen Simulationsanwendungen, Datenbanken und anderen Softwareanwendungen, wie MES- oder ERP-Systemen zu ermöglichen und die Entwicklung von Simulationen im Produktionsbereich zu unterstützen (JOHANSSON et al. 2007). Das CMSD-Format beschreibt die wesentlichen Entitäten in der Produktionsdomäne und die Beziehungen zwischen diesen Entitäten, die für die Erstellung von Simulationen notwendig sind, in objektorientierter Form. Hierdurch werden Simulationsexperten bei der Modellbildung und Parametrierung unterstützt, indem sie auf vorgefertigte Strukturen zurückgreifen können und anhand deren Eigenschaften, welche die zu bestimmenden Parameter der Simulation darstellen, gezielt Daten zur Bestimmung von

Parameterwerten identifizieren können. Trotz einer stetigen Weiterentwicklung von ersten Implementierungen von JOHANSSON et al. (2007) bis zur detaillierten Anwendung des CMSD-Formats von BERGMANN (2013), wird von allen Autoren angemerkt, dass das CMSD-Format Lücken aufweist und komplexere Anwendungsfälle nur selten vollständig ohne spezifische Anpassungen abdeckt.

Als ähnlichen Ansatz neben CMSD, entwickelt HUANG (2011) auf Basis der Systems Modeling Language (SysML), eine grafische und objektorientierte Modellierungssprache, eine formale Beschreibung für Modellierung und Simulation ereignisdiskreter Logistiksysteme. Ergänzend zur formalen Beschreibung nutzt HUANG (2011) Methoden zur Modelltransformation, um die formale Beschreibung in ausführbaren Simulationsprogrammcode zu übersetzen. MCGINNIS et al. (2011) zeigt die Anwendbarkeit des Ansatzes von HUANG (2011) anhand mehrerer Beispielfälle und der Nutzung zweier unterschiedlicher Simulationssoftwareanwendungen. BATARSEH und MCGINNIS (2012) wenden den Ansatz erfolgreich in einer Montage für Elektronikbauteile an.

Neben CMSD und SysML nutzen mehrere Ansätze Ontologien zur formalen Beschreibung von Simulationsmodellen. RABE und GOCEV (2008) entwickeln mit der Reference Manufacturing Ontology eine formale Beschreibung für Produktionssysteme, mit dem Ziel, die Schritte der Systemanalyse, Modellformalisierung und Parametrierung zu unterstützen. Die Ontologie wird verwendet, um von verschiedenen Fachexperten aus Entwicklung, Produktion oder Instandhaltung strukturiert Informationen über den Anwendungsfall zu sammeln, diese in Form von Instanzen in die Ontologie einzufügen und fehlende Informationen mittels Inferenz zu ergänzen. Die instanziierte Ontologie stellt dann die vollständige Wissensdatenbank für das zu untersuchende System dar und kann entweder manuell für die Modellerstellung verwendet oder über Abfragen direkt mit dem Simulationsmodell verbunden werden (RABE und GOCEV 2012).

Während die Ontologie von RABE und GOCEV (2008) ihren Ursprung in der formalen Abbildung von Produktionssystemen verortet, so fokussieren sich die Arbeiten über die Entwicklung der Discrete-event Modeling Ontology (DeMO) auf die formale Abbildung von ereignisdiskreten Simulationsmodellen (MILLER und BARAMIDZE 2005; SILVER et al. 2011). Mit der Entwicklung von DeMO wird von den Autoren das Ziel verfolgt, die Abläufe in Simulationen besser verständlich zu machen (MILLER und BARAMIDZE 2005).

COPE (2008) entwickelt einen Ansatz für die effiziente Generierung von Supply-Chain-Simulationen. Die Grundlage hierfür stellt eine Ontologie dar, die Simulations- und Domänenwissen integriert. Die Ontologie ermöglicht die Beschreibung der Supply-Chain-Struktur und dem daraus folgenden Simulationsmodell. Ergänzend zur Ontologie entwickelt die Autorin allgemeine Simulationsmodule in der Simulationssoftware Arena. Mit einer grafischen Benutzeroberfläche kann die Ontologie angereichert und ein Simulationsmodell aufgebaut werden. Ein Modellgenerator greift auf die eingegebenen Daten zu, übersetzt diese in die Simulationsmodule und generiert ein ausführbares Simulationsmodell.

LÜTJEN (2014) entwickeln eine Planungsunterstützung für die Fertigungslinien kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK). Kernstück ist eine eigene domänenspezifische Modellierungssprache unter Verwendung der Unified Modeling Language (UML), die gleichzeitig eine grafische Unterstützung der Planung von Produktionssystemen bereitstellt und für die Erzeugung von Simulationsmodellen genutzt werden kann. Hierbei sind die Modellierung von Materialflüssen und grafische Repräsentation von Steuerungslogiken die Hauptbestandteile der Modellierungssprache. Ein Modellgenerator, entwickelt in der Simulationssoftware Siemens Plant Simulation, greift auf die Ergebnisse des Planungsprozesses zu und erstellt daraus ein ausführbares Simulationsmodell. Ursprünglich ist der Ansatz für die Domäne der CFK-Fertigung entwickelt worden, wurde jedoch von LÜTJEN et al. (2015) auch auf die Mikrofertigung übertragen.

UDE (2010) stellt in seiner Dissertation ein Verfahren zur Bewertung von alternativer Netzwerkkonfiguration von GPN vor. Für die Analyse entwickelt der Autor ein allgemeines Modell von den Abläufen in Produktionsnetzwerken in Form von Simulationsbausteinen. Diese erlauben die flexible und effiziente Erstellung der Netzwerkalternativen und die Durchführung von Parameterstudien. Der Fokus liegt bei UDE (2010) jedoch stark auf der strategischen Ebene der Netzwerkkonfiguration und weniger auf der taktisch operativen Auftragsabwicklung. Die entwickelten Bausteine enthalten daher nur vereinfachte Modelle der PPS, liefern jedoch einen guten Ausgangspunkt für die Modellierung von Produktionsnetzwerken.

Methodische Diskussion

Die großen Herausforderungen im Aufbau von Simulationsmodellen liegen in der Beschaffung von Daten, Informationen, Wissen und Verständnis über das abzubildende System und die Überführung derer in ein adäquates Modell. Wissensbasierte Ansätze unterstützen den Simulationsexperten in dieser Aufgabe, indem bestehendes, allgemeines Wissen über Simulation oder einzelnen Domänen der Produktion strukturiert in einem Wissensmodell aufbereitet sind. Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz dieser Ansätze ist jedoch, dass der Anwender im Umgang mit dem Wissensmodell, meist in Form einer Ontologie, vertraut ist. In der Realität kann dies im Produktionsbereich nicht vorausgesetzt werden. Die Ansätze erfordern somit eine entsprechende Einarbeitungszeit beim Anwender, was einem Effizienzgewinn in der Modellentwicklung entgegensteht. Weiterhin stellen die Wissensmodelle eine Verallgemeinerung realer Begebenheiten dar, die im Anwendungsfall um dessen Spezifika erweitert werden müssen, was auch laut der Autoren, insbesondere in Bezug auf CMSD, eine Herausforderung darstellt und Effizienzgewinne reduziert (BERGMANN 2013). Gerade Wissensmodelle wie DeMO, die die Simulation von Produktionssystemen modellieren, sind für den praktischen Einsatz oft zu abstrakt und allgemein gehalten. Sie liefern dem Anwender lediglich konzeptionelle Grundbausteine, aus welchen ein Simulationsmodell bestehen kann. Ein grundsätzlicher Verständnisaufbau über das vorliegende System und die Entscheidungen, wie dieses modelliert

werden soll, werden somit nicht unterstützt. Domänenspezifische Ansätze, wie von RABE und GOCEV (2008), oder kombinierte Ansätze, wie von COPE (2008) und LÜTJEN (2014), unterstützen den Anwender an dieser Stelle stärker, sind gleichzeitig aber auch nur für begrenzte Einsatzgebiete verfügbar. Gerade die Arbeit von COPE (2008) ist hervorzuheben, da das entwickelte Wissensmodell durch implementierte und damit direkt einsetzbare Simulationsbausteine ergänzt wird. Der Anwender kann damit nicht nur bei der Systemanalyse und formalen Modellbildung auf die Wissensbasis aufbauen, sondern auch in der Implementierung vorgefertigte Bausteine nutzen. UDE (2010) wählt einen ähnlichen Ansatz und entwickelt ebenfalls Simulationsbausteine, stellt jedoch kein strukturiertes Wissensmodell zur Verfügung. Die Reduzierung von Aufwänden in der Systemanalyse und Modellbildung ist daher als geringer einzuschätzen als bei COPE (2008).

Die Parametrierung von Simulationsmodellen wird durch wissensbasierte Ansätze dahingehend unterstützt, dass Parameter im Wissensmodell definiert und beschrieben werden. Hierbei gehen viele Ansätze auch so weit, mehrere Möglichkeiten der Parameterdefinition, also die Darstellung als Wert, Wahrscheinlichkeitsverteilung oder Histogramm, zur Abbildung stochastischen Verhaltens zu modellieren. Die genauen Werte der einzelnen Parameter im Anwendungsfall müssen jedoch weiterhin vom Anwender ermittelt und auch regelmäßig aktualisiert werden. Die Aufwände in der Phase der Datenaufbereitung und Parametrierung werden von wissensbasierten Ansätzen folglich nur begrenzt reduziert.

Entsprechend dem Anwendungsgebiet dieser Arbeit bearbeitet lediglich der Ansatz von UDE (2010) die Domäne GPN. UDE (2010) fokussiert jedoch weniger die taktisch operative Auftragsabwicklung als die strategische Ausrichtung der Netzwerkplanung. Die entwickelten Simulationsbausteine weisen daher einen zu geringen Detaillierungsgrad auf, da beispielsweise Informationsfluss- und PPS-Prozesse nur abstrakt modelliert oder für die strategische Betrachtung nicht notwendig sind. Für die taktisch operative Auftragsabwicklung in GPN besteht folglich kein Wissensmodell, um die Simulationsmodellentwicklung zu unterstützen.

3.2.4 Datenbasierte Modellbildung und Parametrierung

Die Ansätze im Bereich der datenbasierten Modellbildung und Parametrierung vereint der Grundgedanke, Daten aus bestehenden IT-Systemen im Produktionsumfeld für die Automatisierung von Modellbildung und Parametrierung zu nutzen. Innerhalb dieser Kategorie von Ansätzen finden sich verschiedene Ausprägungen im Automatisierungsgrad, die von teilautomatisierter Parametrierung bis hin zur automatisierten Modellbildung und integrierter Parametrierung reichen. Ebenso unterscheiden sich die Ansätze im Grad der Übertragbar- und Allgemeingültigkeit, beginnend bei der Entwicklung von Systemen zur automatisierten Parametrierung in einem konkreten Anwendungsfall bis hin zu allgemeinen Konzepten für die Modellbildung.

Vorstellung der Arbeiten

Innerhalb des Bereichs der datenbasierten Modellbildung und Parametrierung bildet sich eine Gruppe von Ansätzen heraus, die mit Hilfe der direkten Kopplung von Simulation und Shop Floor die Produktionssteuerung, insbesondere in der Feinplanung von Fertigungsaufträgen, unterstützen wollen. Die Autoren INGEMANSSON et al. (2005), FRAZZON et al. (2018), KÁDÁR et al. (2010), WANG et al. (2011) und BAGCHI et al. (2008) entwickeln, jeweils auf die spezifischen Anwendungsfälle zugeschnitten, Systeme, in denen Simulationsmodelle Daten aus MES- und ERP-Systemen direkt und automatisiert nutzen, um zum einen die Parameter im Simulationsmodell zu aktualisieren und zum anderen Simulationsexperimente mit dem aktuellen Zustand des Produktionssystems zu initialisieren. Das Hauptziel der Ansätze ist hierbei die Unterstützung von Steuerungsentscheidungen am Shop Floor, indem verschiedene Entscheidungsalternativen mit der Simulation durchgespielt und vor Ausführung bewertet werden können. Alle Ansätze erfordern den initialen Aufbau des Simulationsmodells und der Algorithmen zur Parametrierung und Initialisierung angepasst an den jeweiligen Anwendungsfall durch einen Simulationsexperten. Der Fokus liegt somit auf der Automatisierung der wiederkehrenden Aufgabe der Aktualisierung von Simulationsmodellen. Auf die notwendigen Parameter und die zur Aktualisierung dieser genutzten Quelldaten gehen WANG et al. (2011), INGEMANSSON et al. (2005) und BAGCHI et al. (2008) ein. Die Autoren beschreiben die Parameter in ihren Veröffentlichungen, wobei WANG et al. (2011) ein detailliertes Informationsmodell mit allen zu simulierenden Objekten und jeweiligen Parametern vorlegt. INGEMANSSON et al. (2005) greift auf Rückmeldedaten der am Shop Floor eingesetzten Maschinen zurück und zeigt, wie aus aufgezeichneten Maschinenausfällen die Parameterwerte für Ausfallwahrscheinlichkeiten und -dauern bestimmt werden können. BAGCHI et al. (2008) unterscheidet bei den zur Verfügung stehenden Daten zwei Kategorien: Unveränderliche Stammdaten, die in IT-Systemen hinterlegt und das Produktionssystem beschreiben sowie Rückmeldedaten, die im Prozess anfallen. Erstere, wie beispielsweise Daten zu Stücklisten, nutzen die Autoren direkt in der Parametrierung des Simulationsmodells, Letztere zur Berechnung und Aktualisierung von Bearbeitungszeiten einzelner Prozessschritte. Wie auch die anderen Autoren dieser Forschungsströmung bleiben auch BAGCHI et al. (2008) und INGEMANSSON et al. (2005) bei der genauen Implementierung der Berechnungsalgorithmen und einer genauen datentechnischen Beschreibung der verwendeten Quelldaten vage. Der Fokus liegt auf dem spezifischen Anwendungsfall und der Vorstellung des Gesamtsystems. Ein allgemeingültiges und übertragbares Vorgehen zur automatisierten Parametrierung ist durch die genannten Ansätze nicht gegeben.

JENSEN (2007) verfolgt im Rahmen seiner Dissertation das Ziel, die Planung der Teilefertigung in Produktionsunternehmen mit Hilfe von teilautomatisierten Simulationsmodellen zu unterstützen. Die Grundannahme ist hierbei, dass sämtliche Informationen, die für Simulationen benötigt werden, in verteilten Datenbanken im Unternehmen gespeichert und abrufbar sind. JENSEN (2007) untergliedert seinen Ansatz daher in zwei Module: Das Simulationsdaten-Framework

und das Modellgenerierungs-Framework. In Ersterem werden Möglichkeiten des Datenaustausches, der Datenverarbeitung und der notwendigen IT-Infrastruktur detailliert vorgestellt. Der Fokus liegt hierbei auf der Architektur von Client-Server-Anwendungen und der Kommunikationsschnittstelle zwischen den entwickelten Anwendungen und den einzelnen Datenbanksystemen, welche auf XML aufbaut. Auf die Modellbildung und die benötigten Informationen aus produktions technischer Sicht geht der Autor im erstgenannten Modul nur peripher ein. Bezüglich der Datenverarbeitung und Parametrierung stellt JENSEN (2007) ein Vorgehen zur Berechnung von Simulationsparametern zu Maschinenausfallwahrscheinlichkeiten und -dauern vor, wofür statistische Methoden verwendet werden. Eine detaillierte Erklärung, aus welchen Systemen diese und weitere benötigte Daten kommen, erfolgt nicht. Das entwickelte Simulationsdaten-Framework bleibt somit eher ein Konzept, welches im spezifischen Anwendungsfall initial manuell eingerichtet werden muss. Im Modellgenerierungs-Framework stellt JENSEN (2007) ein allgemeines Informationsmodell für Simulationen der Teilefertigung basierend auf dem Format Extensible Markup Language (XML) vor, welches vergleichbar mit wissensbasierten Ansätzen, wie CMSD, ist. Neben dem Informationsmodell werden allgemeine Simulationsbausteine und Modellgeneratoren für verschiedene Simulationsumgebungen entwickelt und validiert. Der Ansatz von JENSEN (2007) ist somit neben der datenbasierten Parametrierung auch den wissensbasierten Ansätzen und Modellgeneratoren zuzuordnen. Übertragbare Algorithmen zur Datenverarbeitung, Parametrierung und Modellbildung sind im Ansatz nur teilweise beschrieben. Auch eine genaue Definition von Datenquellen und Daten erfolgt nur in Teilen. Weiterhin liegt der Fokus auf der eingegrenzten Domäne der Teilefertigung, wodurch die Einsetzbarkeit des Ansatzes in anderen Domänen eingeschränkt ist.

Eine ähnliche Richtung verfolgt der Ansatz von GOODALL et al. (2019). Die Autoren entwickeln ein Framework für die automatisierte Modellgenerierung für Remanufacturing-Prozesse. Das entwickelte Framework besteht aus drei Ebenen, namentlich (1) der adaptiven Remanufacturing-Simulation, (2) des Remanufacturing-Informationsmodells und (3) der Information-Service-Ebene. Ziel des Frameworks ist die Entkapselung von Daten und Logik vom eigentlichen Simulationsmodell. Die Ebene des adaptiven Simulationsmodells stellt die Funktionen der automatisierten Modellgenerierung bereit, wobei diese auf eine instanziierte Version des Informationsmodells, entsprechend definiert in Ebene 2, zugreift. Die initiale Instanziierung des Informationsmodells sowie dessen regelmäßige Aktualisierung erfolgt über die Information-Service-Ebene, welche für das Simulationsmodell benötigte Informationen als sogenannte Services zur Verfügung stellt. Hierfür greifen die einzelnen Services dieser Ebene auf IT-Systeme in der Fabrik zurück. Insgesamt stellen die Autoren ein flexibles Framework für die automatisierte Aufbereitung von Eingangsdaten und die automatisierte Modellgenerierung vor. Allerdings werden gerade die einzelnen Services zur Datenanbindung und -aufbereitung nicht spezifiziert und müssen für jeden Anwendungsfall neu entwickelt werden. Folglich sind auch die benötigten Rohdaten und IT-Systeme nicht spezifiziert und müssen im Anwendungsfall neu identifiziert werden. Gleiches gilt für die prozessuale Beschreibung und

die Topologie des zu untersuchenden Produktionssystems, welche manuell vom Anwender in Form eines Prozessgraphen angegeben und auch regelmäßig aktualisiert werden muss. Somit liegt auch in diesem Ansatz ein hoher initialer Konfigurationsaufwand vor, bis die Vorteile der Automatisierung genutzt werden können. Der Ansatz ist folglich insbesondere für die regelmäßige Aktualisierung von Simulationsmodellen zu nutzen.

Ein Konzept zur automatisierten Parametrierung und Modellgenerierung stellen OVERBECK et al. (2020) vor. Ziel der Autoren ist der Aufbau eines digitalen Zwilings, welcher neben einer stetig aktuellen Datenbasis, dem digitalen Schatten, auch ein stetig aktuelles Simulationsmodell einer Produktionslinie beinhaltet. Das Simulationsmodell muss initial manuell erstellt werden und dient als digitales Mastermodell für die Produktionslinie. Als Datenquellen werden Bewegungs- und Rückmeldedaten verwendet, welche durch Planungsdaten, beispielsweise Stücklisteninformationen, ergänzt werden. Erstere extrahieren die Autoren aus MES, Letztere erfordern die Einbindung von ERP-Systemen. Zur Überführung der Rohdaten aus den Quellsystemen in eine für die Simulation nutzbare Form setzen die Autoren lernende Algorithmen und statistische Methoden ein. Insbesondere liegt der Fokus auf der Erkennung von Veränderungen des Produktionssystems im operativen Betrieb, beispielsweise durch veränderte Arbeitsabläufe oder die Einführung neuer Produktvarianten. Der vorgestellte Ansatz wurde in einer halbautomatisierten Montagelinie angewandt und konnte auch auf baugleiche Produktionslinien übertragen werden.

KIRCHHOF (2016) stellt einen Ansatz für die automatisierte Parametrierung, Modellbildung und -generierung für einen Anwendungsfall in der Fließfertigung der Automobilmontage vor. Der Autor entwickelt zunächst generische Simulationsbausteine zur Modellierung der Montagelinie im Anwendungsfall. Mittels Verknüpfung zum ERP- und MES-System des Unternehmens, werden die Simulationsbausteine automatisiert ausgewählt, im Modell platziert, miteinander verbunden, um den Materialfluss abzubilden, und anschließend parametriert. Die Daten zur Modellierung wie Schichtkalender oder Details zu Arbeitsplätzen extrahiert der Ansatz aus SAP, Daten zu Aufträgen, geplanter Produktionssequenz und aktuellem Arbeitsfortschritt aus dem MES. Die genaue Funktionsweise des Ansatzes beschreibt der Autor jedoch nicht. Ebenso ist die Übertragbarkeit auf weitere Anwendungsfälle aus der Publikation nicht ermittelbar.

Neben den Ansätzen, die sich auf eine datenbasierte Parametrierung und Modellgenerierung fokussieren, integrieren die folgenden Ansätze auch die Modellbildung, indem lediglich aufgezeichnete Daten aus dem Betrieb des Produktionssystems zugrunde gelegt werden.

Ein frühes Beispiel aus dem Jahr 2005 für dieses Vorgehen ist der Ansatz von SELKE (2005). Ziel des Autors ist die teilautomatisierte Modellbildung, Parametrierung und Modellgenerierung von Simulationsmodellen in der Werkstattfertigung, wobei der Fokus auf einer automatisierten Identifikation von Steuerungslogiken, wie Reihenfolge- und Losgrößengestaltung, innerhalb der Fertigung liegt. Grundlage für den Ansatz stellt die Verwendung heterogener Eventlogs dar, wobei diese

vom Anwender manuell in die richtige Form gebracht und in das, in Microsoft Excel entwickelte Werkzeug übertragen werden müssen. In diesem werden Simulationsparameter, wie Systemlast- und technische Daten direkt referenziert. Weiterhin werden anschließend mit Methoden der Mustererkennung und Regelklassifikation sowie integriertem Expertenwissen zu produktionslogistischen Beziehungen verwendet, um aus den Eventlogs Steuerungsstrategien in den einzelnen Abschnitten der Fertigung zu ermitteln. Können aus den Daten keine eindeutigen Steuerungsstrategien extrahiert werden, so können diese stochastisch approximiert werden. Insgesamt zeigt SELKE 2005 viele einzelne Methoden auf, mit denen Teilbereiche der Modellbildung und Parametrierung automatisiert werden können. Eine übergreifende automatisierte Methodik ist aufgrund vieler manueller Schritte zwischen den vorgestellten Methoden bei SELKE (2005) nicht ersichtlich. Ebenso wird die Datenidentifikation und -transformation nicht unterstützt.

Einen Ansatz mit höherem Automatisierungsgrad entwickeln CHARPENTIER und VÉJAR (2014). Die Autoren nutzen Positions- und Zeitpunktdaten einzelner Bauteile innerhalb einer Produktionslinie. Mit einem entwickelten Algorithmus extrahieren die Autoren aus diesen Daten ein Materialflussmodell des Produktionssystems in Form eines gerichteten Graphen. Hierbei werden Bearbeitungsstationen durch Wartezeiten, also Zeitspannen, in denen Bauteile am gleichen Ort bleiben, identifiziert. Die Bewegungsphasen der Bauteile ermöglichen die Bestimmung von Verkettungen zwischen den Bearbeitungsstationen. In den industriellen Anwendungsszenarien könnten die Autoren mit ihrem Ansatz ebenso zeigen, dass auch zeitliche Veränderungen, also beispielsweise das Hinzufügen einer neuen Bearbeitungsstation, von ihrem Ansatz erfolgreich erkannt werden kann und somit auch die Topologie des Simulationsmodells automatisiert aktualisiert werden kann. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Ansätzen dieser Forschungsströmung ist kein initialer Aufwand für die Modellbildung notwendig. Eine Überführung in eine eventdiskrete Simulation und eine Bestimmung von Parameterwerten, wie Durchlaufzeiten, beschreiben die Autoren nicht. Der Fokus liegt auf der Bestimmung des Materialflusses und dessen Überführung in ein Modell in Form eines gerichteten Graphen.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt SMITH (2015), erweitert diesen aber durch die Überführung des Materialflussmodells in eine ereignisdiskrete Simulation und die Bestimmung von Parameterwerten. Grundlage stellen GPS- und Zeitpunkt-Daten dar, die durch an Bauteilen angebrachten Sendern erzeugt werden. SMITH (2015) entwickelt einen Algorithmus, der anhand dieser Daten zunächst die einzelnen Prozessschritte, die die Bauteile durchlaufen, wie Bearbeitungsstationen, Puffer oder logistische Verbindungen, identifiziert und dann mit Hilfe des Materialflusses die Verbindungen zwischen den Prozessschritten extrahiert. Anschließend werden Parameterwerte wie Durchlaufzeiten ermittelt und in ein ausführbares Simulationsmodell überführt. Modellbildung, Parametrierung und Modellgenerierung erfolgen bei SMITH (2015) somit automatisiert. Aufgrund der eingeschränkten Datenbasis erfolgt keine Unterscheidung verschiedener Produktvarianten. Eine Identifikation von Steuerungslogiken innerhalb des Mate-

rialflusses, wie beispielsweise Routing-Entscheidungen, kann nicht automatisiert erfolgen und muss vom Simulationsexperten im Anschluss an die automatisierten Phasen des Ansatzes erfolgen.

LUGRESI und MATTA (2020) entwickeln einen Ansatz zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung für Produktionslinien. Als Eingangsdaten werden im operativen Betrieb aufgezeichnete Eventlogs genutzt, welche aufzeichnen, zu welchem Zeitpunkt ein bestimmtes Bauteil einen bestimmten Sensor passiert hat. Aus diesen, genau definierten Rückmeldedaten konstruieren die Autoren mit Hilfe von Process Mining die Topologie des Produktionssystems, also einzelne Bearbeitungsstationen und deren Verbindungen untereinander sowie grundlegende Parameter von Stationen und Transportwegen, wie Kapazitäten und Durchlaufzeiten. Weiterhin wird ein Vorgehen zum Modell-Tuning vorgestellt, der die Modellgüte durch Reduzierung von irrelevanten Sensordaten weiter verbessert. Ziel des Modell-Tunings ist damit, die Modellbildung im gewünschten Detaillierungsgrad automatisiert zu ermöglichen und nicht zu detaillierte und damit komplexe Modelle zu erhalten. Der vorgestellte Ansatz zeigt, welcher Grad an Automatisierung auch in der Modellbildung, bei gleichzeitig geringen Anforderungen an Daten und Datenquellen sowie deren manueller Aufbereitung, möglich ist. Dennoch wird die Abhängigkeit der Modellbildung von mehreren Produktvarianten mit dem Ansatz nicht adressiert. Aufgrund der Fokussierung auf Produktionslinien erfolgt auch keine Betrachtung von GPN-spezifischen Charakteristika.

Methodische Diskussion

Die Ansätze der datenbasierten Modellbildung und Parametrierung zeichnen sich insgesamt durch ihren Grad an Automatisierung und damit einer Effizienzsteigerung in Simulationsprojekten aus. Über die Ansätze hinweg variiert dieser Grad jedoch erheblich. Die Arbeiten von INGEMANSSON et al. (2005), FRAZZON et al. (2018), KÁDÁR et al. (2010), WANG et al. (2011) und BAGCHI et al. (2008) automatisieren Teile der Parametrierung, oftmals mit dem Fokus auf eine regelmäßige Aktualisierung des Simulationsmodells bezüglich Änderungen im realen System. Die Autoren bleiben jedoch größtenteils vage bei der genauen Definition von Berechnungslogiken für die einzelnen Parameter. Ebenso erfordern alle Vorgehen eine initiale Konfiguration, was die Effizienzgewinne in Simulationsprojekten mehr in Richtung deren einfacher Wiederverwendbarkeit und weniger in die Richtung der initialen Modellbildung und Parametrierung verschiebt. Eine Automatisierung der Modellbildung bleibt bei den Ansätzen aus und muss durch einen Experten manuell erstellt werden.

JENSEN (2007), GOODALL et al. (2019) und OVERBECK et al. (2020) entwickeln hingegen ganze Frameworks, die neben einer Automatisierung der Parametrierung auch Kommunikationsschnittstellen zwischen genutzten IT-Systemen, aus denen Produktions- und Stammdaten bezogen werden, und dem Simulationsmodell beschreiben. Hiermit stellen die Autoren wichtige Anhaltspunkte und Strategien vor, wie Simulationen betriebsbegleitend und stetig aktualisiert in

die IT-Landschaft produzierender Unternehmen eingebunden werden können, bleiben gerade bei einer allgemeinen Beschreibung zur Datenverarbeitung von Rohdaten hin zu Simulationsparametern jedoch unspezifisch. Trotz der Anwendungsergebnisse von OVERBECK et al. (2020) bleiben die Autoren vage, welche Daten genau in welcher Form verwendet und an welcher Stelle welche Algorithmen eingesetzt werden. Auch muss bei allen Ansätzen eine initiale und manuelle Konfiguration der einzelnen Datentransformationsprozesse erfolgen. Positiv hervorzuheben sind die Umfänge der vorgestellten Ansätze von JENSEN (2007) und GOODALL et al. (2019), die in ihre Frameworks ebenso Wissensmodelle und Modellgeneratoren integrieren. Die Unterstützung in der Modellbildungsphase bleibt jedoch auf die Wissensmodelle beschränkt und wird nicht automatisiert.

Eine Automatisierung ebendieser Modellbildung rein anhand von aufgezeichneten Daten und ohne vorhergehende, initiale Systemanalyse und Konfiguration durch einen Experten haben die Ansätze von SELKE (2005), CHARPENTIER und VÉJAR (2014), SMITH (2015) und LUGARESI und MATTA (2020) zum Ziel. CHARPENTIER und VÉJAR (2014) und SMITH (2015) rekonstruieren aus Positionsdaten automatisiert die Topografie des Simulationsmodells, also einzelne Stationen im Produktionssystem sowie deren Verbindungen untereinander. LUGARESI und MATTA (2020) nutzen hierfür Eventlog-Daten und Process Mining. Ebenso erfolgt bei allen Arbeiten eine automatisierte Parametrierung der identifizierten Materialflussbausteine, meist in Form der Parameter Durchlaufzeit und Kapazität. Die Ansätze erreichen folglich einen hohen Automatisierungsgrad in den Phasen der Modellbildung und Parametrierung. Dennoch weisen auch diese Ansätze noch Potenziale auf. In keinem der Ansätze werden unterschiedliche Produktvarianten betrachtet. Für eine realitätsnahe Modellierung ist dies jedoch unabdingbar, da verschiedene Varianten unterschiedliche Wege durch die Produktion nehmen und Parameterwerte, wie beispielsweise Bearbeitungszeiten, oftmals von der bearbeiteten Variante abhängig sind. Weiteres Potenzial liegt in einer detaillierteren Parametrierung. Für ein valides Simulationsmodell sind weitere Eingangsdaten, wie beispielsweise Ausfallzeiten, Schichtkalender und Stücklisten notwendig, welche von den bisherigen Ansätzen nicht automatisiert ermittelt werden können. Ebenso fehlt, mit Ausnahme der Arbeit von SELKE (2005), die automatisierte Identifikation von Steuerungslogiken in den Ansätzen. SELKE (2005) legt in seiner Dissertation den Fokus auf ebendiese und stellt mehrere Methoden zu deren Ermittlung bereit. Die automatisierte Identifikation der Systemtopologie, der einzelnen Materialflusselemente, deren Verbindungen sowie Parameterwerte werden von SELKE (2005) nur teilweise betrachtet. Weiterhin bleiben die Methoden zur Rekonstruktion von Steuerungslogiken alleinstehend und gliedern sich nicht in eine übergreifende Methodik ein, wodurch Effizienzgewinne im Simulationsprojekt nicht voll zur Geltung kommen können. Insgesamt zeigen die beschriebenen Ansätze dennoch sehr gut auf, wie viele Informationen sich aus reinen Rückmeldedaten aus dem Produktionsbetrieb automatisiert extrahieren lassen und anschließend für eine Modellbildung und Parametrierung genutzt werden können.

Entsprechend der grundlegenden Idee aller Ansätze dieser Forschungsströmung, auf bestehende Daten zuzugreifen, wird auch die Herausforderung der Datenidentifikation und Aufbereitung aufgegriffen. Alle Ansätze gehen prinzipiell auf die genutzten IT-Systeme ein, insbesondere die Frameworks von JENSEN (2007) und GOODALL et al. (2019) zeigen auf, welche Systeme angebunden und für die Informationsbeschaffung hilfreich sein können. Dies ist in der industriellen Praxis ein guter Ansatzpunkt, löst die Herausforderungen aber nur teilweise auf. Gerade ERP- und MES-Systeme vereinen eine Vielzahl verschiedener Daten in komplexen Datenmodellen, die oftmals aus mehreren hundert Tabellen bestehen. Die richtigen Daten in die richtige Form für die Berechnung von Parameterwerten zu identifizieren und zu überführen, bleibt damit im Anwendungsfall die Aufgabe der initialen Konfiguration der Ansätze. Ausnahmen stellen hierzu die Ansätze von CHARPENTIER und VÉJAR (2014), SMITH (2015) und LUGARESI und MATTÀ (2020) dar, die die verwendeten Daten und deren Format beschreiben. Eine Beschreibung, in welchen Systemen die Rohdaten zu finden und zu identifizieren sind, wird von den Autoren jedoch nicht gegeben.

Bezüglich der Anwendungsdomäne fokussieren sich alle Ansätze auf Produktionslinien oder die Werkstattfertigung. Eine Betrachtung der Auftragsabwicklung oder von GPN mit den entsprechenden Charakteristika findet in keinem der Ansätze statt. Dennoch haben einige grundlegende Ideen das Potenzial für eine Übertragung auf die genannten Domänen.

3.2.5 Automatisierte Modellgenerierung

Im Kontrast zu den datenbasierten Ansätzen haben die Ansätze der automatisierten Modellgenerierung das Ziel, den manuellen Aufwand in Simulationsprojekten durch die Automatisierung der Implementierung eines formalen Konzeptmodells in ein ausführbares Simulationsmodell zu reduzieren. Dabei ist eine vollständige Beschreibung der Modellstruktur, Logik sowie aller Parameter und deren spezifischer Werte die Grundlage für diese Ansätze, wohingegen datenbasierte Ansätze ebendiese Beschreibungen automatisiert erzeugen. Die automatisierte Modellgenerierung kann damit auf den Einsatz von datenbasierten Ansätzen folgen, ist jedoch auch unabhängig von diesen einsetzbar.

Vorstellung der Arbeiten

Einen frühen Modellgenerator für Simulationen in der Halbleiterfertigung entwickeln MUELLER et al. (2007). Die Simulation erfolgt anhand von Petri-Netzen, welche von den Autoren um Zeitaspekte und Prioritätsregeln erweitert wurden, um so die Simulation von Steuerungsprozessen innerhalb der betrachteten Fertigung zu ermöglichen. Der Modellgenerator basiert zum einen auf dem vom Anwender vorzugebenden Petri-Netz, aus welchem die Topologie des Simulationsmodells ausgeleitet wird und zum anderen auf einer von den Autoren entwickelten Datenstruktur im XML-Format. Alle Eingabedateien müssen vom

Anwender manuell mit Daten angereichert und bereitgestellt werden. Der Ansatz wird speziell auf große Modelle der Halbleiterfertigung angewandt und liefert effizient valide Ergebnisse. Die Autoren berichten, dass gerade bei großen Modellen durch automatisierte Modellgenerierung viel Aufwand und Zeit im Simulationsprojekt eingespart werden konnte.

Einen weiteren Modellgenerator, spezialisiert auf diskrete Produktion und die Simulationssoftware Plant Simulation, stellen HARASZKÓ und NÉMETH (2015) vor. Ausgehend von einer kladistischen Klassifizierung von Produktionssystemen leiten die Autoren Simulationsbausteine, mitsamt Layout und Steuerungslogiken, ab und implementieren diese in Plant Simulation. Mit Hilfe einer bereitgestellten Softwareanwendung außerhalb der Simulationssoftware wird der Anwender durch einen Prozess zur Auswahl der erforderlichen Bausteine geführt und zur Eingabe der notwendigen Parameter aufgefordert. Das Ergebnis dieses Prozesses wird von Plant Simulation eingelesen und dort, durch von den Autoren entwickelten Algorithmen, in ein ausführbares Simulationsmodell übersetzt. Ziel der Autoren ist es, mit Hilfe des Ansatzes schnell und effizient Simulationsmodelle für mehrere mögliche Linienszenarien zu erhalten, welche durch Simulationsstudien besser bewertet, verglichen und im weiteren Verlauf optimiert werden können. Der Ansatz entfaltet sein Potenzial somit insbesondere in der frühen Phase der Produktionslinienplanung.

Ebenfalls zur Unterstützung der Produktionssystemplanung in der frühen Phase entwickeln RUDTSCH et al. (2013) einen Modellgenerator auf Basis der Modellierungssprache AutomationML im XML-Format und der Spezifizierungstechnik CONSENS (Conceptual Design Specification Technique for the Engineering of Complex Systems). Die Autoren entwickeln hierfür ein spezielles Add-In für die Visualisierungssoftware Microsoft Visio, mit dem Produktionssysteme nach der CONSENS-Technik modelliert werden können. Dies beinhaltet zum einen die prozessuale Darstellung des Materialflusses mit der Topologie des geplanten Systems sowie die Eigenschaften der einzelnen Prozessschritte. Das Add-In stellt zudem eine Export-Funktion bereit, mit der das erstellte Modell, welches mit einem Konzeptmodell in Simulationsprojekten vergleichbar ist, in das AutomationML-Format überführt und exportiert. Weiterhin werden die einzelnen Klassen, aus denen die Systembeschreibung in der AutomationML-Notation aufgebaut ist, auf eigens implementierte Simulationsbausteine abgebildet. Die AutomationML-Datei wird vom entwickelten Modellgenerator eingelesen, die entsprechenden Bausteine ausgewählt, parametrisiert und miteinander verbunden. Ergebnis ist ein automatisiert erstelltes ausführbares Simulationsmodell. Der Vorteil des Ansatzes besteht darin, dass die Produktionssystemplanung in den Planern vertrauten Anwendungen und Techniken auf visuelle Weise durchgeführt werden kann und aus diesen Planungsständen dann automatisiert Simulationsmodelle erzeugt werden können, ohne dass die Planer Erfahrungen mit Simulationssoftware einbringen müssen.

Ein ähnliches Vorgehen wie HARASZKÓ und NÉMETH (2015) verfolgen auch TANNOCK et al. (2007), wobei sich ihr Ansatz auf die automatisierte Modellgenerierung von Supply-Chain-Simulationen bezieht. Die Spezifikation aller

notwendigen Daten zur Modellgenerierung erfolgt durch manuelle Eingaben des Anwenders in einer speziell entwickelten Nutzeroberfläche. Der Anwender wählt geföhrt die benötigten Entitäten der zu untersuchenden Supply Chain aus, parametrisiert diese und legt Produkte, Vorerzeugnisse und Stücklisten an. Im Unterschied zu den anderen bereits vorgestellten Ansätzen stellen die Entitäten der Simulation nicht einzelne Arbeitsstationen, sondern Fabriken verschiedener Teilnehmer der Supply Chain sowie Transportbeziehungen zwischen diesen dar. Ein Modellgenerator, implementiert in der Simulationssoftware Arena, übersetzt die Nutzereingaben dann in Simulationsbausteine der Arena-Software und generiert damit ein ausführbares Simulationsmodell. Besonders hervorzuheben ist die Integration verschiedener Steuerungslogiken, zwischen denen der Anwender bei Spezifikation des Modells auswählen kann. Es kann zwischen einer einfachen Push-Steuerung über am Bestand orientierten Bestellungen zwischen den Supply-Chain-Akteuren bis hin zu einer zentralen, Supply-Chain-übergreifenden Steuerungslogik gewählt werden. Neben der ausführlichen Beschreibung der bereitgestellten Simulationsbausteine adressieren die Autoren auch die Vorteile ihres Ansatzes zur Aufwandsreduzierung in Validierung und Verifikation des generierten Simulationsmodells. Durch die entwickelte automatisierte Modellgenerierung entfällt die manuelle Implementierung und die damit einhergehenden Aufwände zur Validierung und Verifikation dieses Schrittes. Die Autoren argumentieren, dass sich hiermit neben den Aufwänden der Implementierung durch die automatische Modellgenerierung auch Aufwände in der Validierung und Verifikation einsparen lassen. Die Autoren können dies auch in der praktischen Anwendung in einer Supply Chain der Luftfahrtindustrie aufzeigen.

BERGMANN (2013) stellt in seiner Dissertation einen umfassenden Ansatz zur Reduzierung von Aufwänden in Simulationsprojekten dar, wobei er Ideen aus wissens- und datenbasierten Ansätzen sowie der automatisierten Modellgenerierung aufgreift. Grundlage stellt eine ausführliche Interpretation des CMSD-Formats in der Domäne der Werkstatt- und Fließfertigung mit anschließender Überführung in implementierte Simulationsbausteine dar.

Hierbei arbeitet der Autor neben den notwendigen Parametern zur Beschreibung des Produktionssystems insbesondere auch notwendige Daten zur Initialisierung von betriebsbegleitenden Simulationsmodellen heraus. Dies beinhaltet Daten, wie Pufferbestände, Maschinenbelegungen und Bauteilpositionen zum Startzeitpunkt der angestrebten Simulationsstudie. Der entwickelte Modellgenerator auf CMSD-Basis erweitert die Funktionsumfänge bisher vorgestellter Generatoren entsprechend auch um eine automatisierte Modellinitialisierung. Die automatisierten generierten Modelle entsprechen damit bei Simulationsausführung nahezu vollständig dem aktuellen Zustand des zu untersuchenden Produktionssystems. BERGMANN (2013) zeigt umfassend auf, aus welchen Systemen Daten für die Instanziierung der CMSD-Struktur gewonnen werden können, unterstützt den Nutzer bei Datenaufbereitung, Systemanalyse und Modellformalisierung nur durch Hilfestellung und nicht durch Automatisierung. Es bleibt also in der Verantwortung der Anwender, die von BERGMANN (2013) vorgestellte CMSD-Struktur mit den richtigen Werten anzureichern. Eine Ausnahme stellt jedoch die

Identifikation von Steuerungsstrategien, wie Routing-Entscheidungen, dar, die der Autor als große Herausforderung in der Systemanalyse und Modellformalisierung sieht. BERGMANN (2013) untersucht daher den Einsatz von künstlichen neuronalen Netzen, welche anhand von historischen Daten das Steuerungsverhalten erlernen und dann im Simulationsmodell dieses realitätsgetreu nachbilden können. Mit dieser zusätzlichen datenbasierten Komponente schafft BERGMANN (2013) einen umfassenden Ansatz zur Reduzierung manueller Aufwände in Simulationsprojekten.

BLOCK (2020) entwickelt in seiner Dissertation eine Methodik zur teilautonomen Modellgenerierung in cyberphysischen Produktionssystemen (CPPS), um damit kurzfristige Planungsentscheidungen auf Linien- und Fabrikebene zu unterstützen. Die Methodik basiert auf einer detaillierten Ausgestaltung, semantischer Beschreibung und Implementierung des CMSD-Formats, welches zudem für die dezentrale Speicherung in und den Austausch zwischen cyberphysischen Systemen (CPS) angepasst wurde. Einzelne CPS beinhalten dabei ihre eigene CMSD-konforme Modellbeschreibung mitsamt aktuellen, selbst-errechneten Parameterwerten, welche über verschiedene Datenaustauschprotokolle in ein Simulationsmodell des ganzen CPPS zusammengeführt werden. Mit Hilfe eines entwickelten Modellgenerators wird das umfassende CMSD-Modell automatisiert in ein ausführbares Simulationsmodell überführt.

BLOCK (2020) automatisiert in diesem Zuge die Modellgenerierung und unterstützt durch die Ausgestaltung des CMSD-Formats, in gleicher Weise wie wissensbasierte Ansätze, die Modellbildung. Eine Automatisierung der Modellbildung sowie der Datenbeschaffung und -aufbereitung werden jedoch in den Verantwortungsbereich der einzelnen CPS verschoben und damit in der Arbeit auch nicht beschrieben. Eine vollständige Automatisierung der Simulationsmodellentwicklung ist somit nur erreichbar, wenn in jedem CPS die entsprechende Beschreibung im CMSD-Format sowie die Logik zur Berechnung eigener Parameterwerte hinterlegt ist. Dies erfordert einen hohen initialen Aufwand und häufig auch ein Nachrüsten bestehender Anlagen.

Einen weiteren Ansatz, der insbesondere für die Domäne der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken interessant ist, beschreibt WAGENITZ (2007) in seiner Dissertation. Der Autor entwickelt eine eigene Simulationsumgebung für die Simulation der Auftragsabwicklung der Automobilindustrie, welcher auch Elemente der automatisierten Modellgenerierung aufweist. WAGENITZ (2007) analysiert hierfür zunächst die grundlegenden Prozessschritte der Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie ausgehend vom Kundenauftrag über Märkte und Händler, die Kapazitätsplanung in den Produktionswerken des Automobilherstellers und die Auflösung von Sekundärbedarfen, deren Weiterleitung an Lieferanten sowie deren Kapazitätsplanungen. Im Materialfluss wird dann die Fertigung in den Werken der Lieferanten und beim Automobilhersteller sowie die Distribution von Lieferant zu Hersteller und von Hersteller zum Markt modelliert. Der Fokus des entwickelten Simulationswerkzeugs liegt zudem auf der realitätsnahen Abbildung von verschiedenen Produktvarianten mitsamt ihrer Ausstattungsmerkmale und der Generierung von Aufträgen, welche das ge-

samte Produktspektrum umfassen. Die Simulation erstellt zunächst Prognosen zu Aufträgen über den zu simulierenden Zeitraum und legt Produktionskapazitäten in Werken und bei Zulieferern fest. Über den Verlauf der Simulation werden dann konkrete Aufträge erzeugt und durch simulierte Planungsprozesse in Werken eingeplant, produziert und über das Distributionsnetzwerk zu den Kunden transportiert. Umgesetzt wird die Simulation der Auftragsabwicklung mit Hilfe von objektorientierten Simulationsbausteinen innerhalb der eigens entwickelten Simulationsumgebung, dem sogenannten OTD-NET-Simulator. Für die konkrete Modellierung und Simulation eines Anwendungsfalles erfasst ein Anwender zunächst die Struktur der abzubildenden Auftragsabwicklung und der notwendigen Parameterwerte, beschreibt diese in einer vom Autor vorgegebenen XML-Struktur und übergibt diese Beschreibung an den Simulator. Dieser erstellt hieraus automatisiert das Simulationsmodell und startet die Simulation. Die automatisierte Modellgenerierung von WAGENITZ (2007) folgt damit dem Vorbild der bereits beschriebenen Ansätzen dieser Forschungsströmung. Die Relevanz für die vorliegende Arbeit liegt in der ausführlichen Beschreibung und Modellierung der Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie. Gerade diese Beschreibung sowie die von WAGENITZ (2007) bereitgestellte Definition von Simulationsbausteinen und deren Parameter ermöglichen eine Reduzierung des Aufwands in Simulationsprojekten zur Betrachtung der Auftragsabwicklung in Netzwerken.

Methodische Diskussion

Entsprechend der Benennung der Forschungsströmung zeigen die beschriebenen Ansätze ihren Mehrwert in einem reduzierten Aufwand in der Modellgenerierung, welche von allen Ansätzen automatisiert durchgeführt wird. Gleichzeitig ist jedoch auch allen Ansätzen gemein, dass die Herausforderungen in Modellbildung und Parametrierung indirekt gelöst werden. Da alle Ansätze eine grundlegende Datenstruktur erfordern und/oder diese definieren, innerhalb der der Anwender das Modell aufbauen und mit Parameterwerten versehen muss, geben sie dem Anwender in gewissem Grad eine Anleitung und Struktur für diese Projektphasen und verringern damit den Aufwand. Dennoch ist ein hohes Maß an Systemverständnis sowie Kompetenz in Modellbildung und Parametrierung erforderlich. Einige Ansätze, wie BLOCK (2020) und BERGMANN (2013) stechen durch ihre ausführliche Beschreibung der notwendigen Datenstruktur und Simulationsbausteine heraus und sind damit auch mit wissensbasierten Ansätzen und deren Vorteilen vergleichbar.

Als weitere Unterstützung stellen einige der Ansätze auch grafische Nutzoberflächen bereit, in denen die Simulationsmodelle nutzerfreundlich aufgebaut werden können. Diese Ansätze treten in dieser Funktionalität damit in Konkurrenz zu kommerzieller Simulationssoftware. Entsprechend der Fokussierung auf einzelne Domänen, können die Ansätze damit Vorteile in der Modellbildung gegenüber den kommerziellen Lösungen erzielen. Diese Vorteile gehen jedoch einher mit der Einschränkung auf diese Domänen und damit mit einer geringeren Allgemeingültigkeit.

Eine Unterstützung der Phasen der Datenidentifikation und -aufbereitung wird von den beschriebenen Ansätzen in der Regel nicht ermöglicht. Ausnahmen hierzu stellen die Ansätze von BLOCK (2020) und BERGMANN (2013) mit ihren ausführlichen Wissensmodellen dar.

Der Anwendungsfokus der vorgestellten Arbeiten bezieht sich hauptsächlich auf Fertigung und Produktion auf Linienebene. Die Ansätze von TANNOCK et al. (2007) und WAGENITZ (2007) beschäftigen sich mit Supply Chain und der Auftragsabwicklung in Netzwerken der Automobilindustrie, womit sie größere Überschneidungen mit der Anwendungsdomäne dieser Arbeit aufweisen. Dennoch wird von keiner der Arbeiten allgemein die Auftragsabwicklung in GPN im nötigen Detaillierungsgrad behandelt. TANNOCK et al. (2007) betrachtet einzelne Standorte verschiedener Unternehmen, löst diese aber nicht mehr weiter in einzelne Produktionsstufen und Linien auf. WAGENITZ (2007) betrachtet die Prozesse der Auftragsabwicklung, also Informationsfluss, Planung und Steuerung sowie den Materialfluss im Ganzen auf Netzwerkebene. Jedoch liegt der Fokus des Ansatzes klar auf der Automobilindustrie und deren Auftragsabwicklungsprozess, was eine Einschränkung darstellt und gegebenenfalls größere Adaptionen am Simulator erfordert, welche den Effizienzgewinnen entgegenwirken. Ebenso führt die umfassende Modellierung der Auftragsabwicklung zu einem Detaillierungsgrad, der für eine taktisch-operative Betrachtung von Produktion und Logistik teilweise nicht ausreichend ist. Dies äußert sich insbesondere durch die reine Abbildung von Werken, nicht jedoch eine Auflösung des Netzwerks bis auf Linienebene. Zwar ermöglicht WAGENITZ (2007) die weitere Untergliederung von Werken in Subprozesse, die Abbildung vernetzter Materialflüsse und Produktionsstufen innerhalb eines Werks ist nicht möglich. Dies stellt jedoch einen zentralen Bestandteil einer allgemeinen Simulation der Auftragsabwicklung in GPN dar. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass grundlegende Elemente für die Simulation der Auftragsabwicklung in GPN bereits existieren und hierbei auf die Ansätze von WAGENITZ (2007) und TANNOCK et al. (2007) zurückgegriffen werden kann. Eine vollständige Simulation auf taktisch-operativer Ebene besteht jedoch bisher nicht.

3.3 Zusammenfassung und Forschungsmöglichkeiten

Die Literaturübersicht über die verschiedenen Forschungsströmungen mit ihren spezifischen Ansätzen zeigt zum einen auf, dass die Reduzierung von Aufwänden in Simulationsprojekten Gegenstand einer Vielzahl an Veröffentlichungen ist, und zum anderen bereits eine Vielzahl an möglichen Lösungswegen existiert. In den folgenden Absätzen sollen die Erkenntnisse aus der Literaturrecherche zusammengefasst, im Kontext der Ziele dieser Arbeit diskutiert und Forschungsmöglichkeiten identifiziert werden. Die vorgestellten Ansätze sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 übersichtlich bewertet.

Tabelle 3.1: Evaluation von ausgewählten Publikationen zu strukturbasierten und wissensbasierten Ansätzen sowie zu Extraktionswerkzeugen.

	Auftragsabwicklung in GPN				Unterstützung in Simulationsprojekten				
	Materialfluss	Informationsfluss	Planung und Steuerung	Produktionsnetzwerk	Datenidentifikation	Datenaufbereitung	Parametrierung	Modellbildung	Modellgenerierung
Strukturbasiert									
POPOVICS et al. (2012)	●	○	●	○	●	◐	◐	●	◐
BIESINGER et al. (2019)	●	○	●	○	●	◐	◐	◐	○
PARK et al. (2010)	●	○	◐	○	●	◐	○	○	○
Extraktionswerkzeuge									
SKOOGH, JOHANSSON und STAHR (2012)	●	◐	○	○	○	◐	◐	○	○
BARLAS et al. (2015)	●	◐	○	○	○	◐	◐	○	○
AUFENANGER et al. (2010)	●	◐	○	○	◐	◐	◐	○	●
RODRIGUEZ (2015)	●	◐	○	○	◐	◐	◐	○	○
Wissensbasiert									
BERGMANN (2013)	◐	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐
JOHANSSON et al. (2007)	◐	○	◐	○	○	○	◐	◐	◐
HUANG (2011)	◐	○	◐	○	○	○	◐	◐	●
RABE und GOCEV (2008)	◐	◐	◐	○	◐	○	◐	◐	○
SILVER et al. (2011)	◐	◐	◐	○	○	○	◐	◐	○
COPE (2008)	●	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	●
LÜTJEN (2014)	●	◐	●	○	○	○	◐	◐	●
UDE (2010)	●	◐	◐	●	○	○	◐	◐	◐

● vollständig behandelt, ◐ teilweise behandelt, ○ nicht behandelt

Tabelle 3.2: Evaluation von ausgewählten Publikationen der datenbasierten Ansätze und der Modellgenerierung.

		Auftragsabwicklung in GPN				Unterstützung in Simulationsprojekten				
		Materialfluss	Informationsfluss	Planung und Steuerung	Produktionsnetzwerk	Datenidentifikation	Datenaufbereitung	Parametrierung	Modellbildung	Modellgenerierung
Datenbasiert										
INGEMANSSON	et al. (2005)	●	●	○	○	●	●	●	○	○
FRAZZON	et al. (2018)	●	●	○	○	○	●	●	○	○
KÁDÁR	et al. (2010)	●	●	○	○	○	●	●	○	○
WANG	et al. (2011)	●	●	○	○	●	●	●	○	○
BAGCHI	et al. (2008)	●	●	○	○	●	●	●	○	○
JENSEN	(2007)	●	●	○	○	●	●	●	●	●
GOODALL	et al. (2019)	●	●	○	○	○	●	●	○	●
OVERBECK	et al. (2020)	●	●	○	○	●	●	●	○	●
KIRCHHOF	(2016)	●	●	○	○	○	●	●	●	●
SELKE	(2005)	●	●	●	○	○	○	●	●	●
CHARPENTIER	und VÉJAR (2014)	●	●	○	○	●	●	○	●	○
SMITH	(2015)	●	●	○	○	●	●	●	●	●
LUGARESI	und MATTA (2020)	●	●	○	○	●	●	●	●	●
Modellgenerierung										
MUELLER	et al. (2007)	●	●	●	○	○	○	○	○	●
HARASZKÓ	und NÉMETH (2015)	●	●	●	○	○	○	○	○	●
RUDTSCH	et al. (2013)	●	●	●	○	○	○	○	○	●
TANNOCK	et al. (2007)	●	●	●	●	○	○	○	○	●
BERGMANN	(2013)	●	○	●	○	○	○	●	●	●
BLOCK	(2020)	●	●	●	●	○	○	●	●	●
WAGENITZ	(2007)	●	●	●	●	○	○	●	●	●

● vollständig behandelt, ● teilweise behandelt, ○ nicht behandelt

Die bestehenden Ansätze nutzen verschiedene Vorgehensweisen. Zum einen wirken sie unterstützend auf den Anwender ein, um diese Hilfestellung, beispielsweise bei Modellbildung, Systemanalyse oder Datenaufbereitung, zu geben. Zum anderen werden einzelne Aufgaben durch die Ansätze automatisiert. Insbesondere einige der datenbasierten Ansätze erreichen einen hohen Automatisierungsgrad, stellen jedoch hohe Anforderungen an die Datenerfassung, wie die Ausstattung von Bauteilen mit GPS-Sensoren. Zudem bilden diese Ansätze bisher nur einen geringen Teil der notwendigen Funktionalitäten für die Erstellung detaillierter Simulationsmodelle ab, da unterschiedliche Produktvarianten und Parameterwerte, wie Ausfallzeiten, Schichtmodelle, etc. nicht automatisiert erkannt werden können. Weiterhin wird die Aufgabe der Datenidentifikation und Datenaufbereitung nicht ausführlich betrachtet. Lediglich einige domänenspezifische, wissensbasierte Ansätze zeigen auf, wo im Produktionssystem Daten anfallen und wie diese für die Parametrierung genutzt werden können. Für die anschließende Datenaufbereitung und Parametrierung stellen Extraktionswerkzeuge zwar einen Satz an Methoden, wie die Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und weiteren stochastischen Methoden, bereit, jedoch muss weiterhin der Anwender das nötige System- und Datenverständnis aufbringen, um die richtigen Werkzeuge an der richtigen Stelle auch einzusetzen.

Bezogen auf den Anwendungsfall dieser Arbeit, der Auftragsabwicklung in GPN, existieren nur vereinzelte Veröffentlichungen im Bereich der wissensbasierten Ansätze und der Modellgenerierung. Alle anderen Ansätze fokussieren sich auf Simulationsprojekte auf Ebene einzelner Produktionslinien oder der Werkstattfertigung.

Insgesamt fehlt es somit an einem integrierten und allgemeinem Ansatz, mit dem eine initiale Systemanalyse, Datenidentifikation und -aufbereitung sowie Modellbildung und Parametrierung aufwandsarm und in geringer Zeit durchgeführt werden kann. Die Entwicklung und Evaluation eines derartigen Ansatzes stellt damit aktuell ein Defizit im Stand der Technik dar, welches im Folgenden durch den Ansatz AutoGPN geschlossen werden soll.

Kapitel 4

Konzeptionelle Gestaltung des Ansatzes

Das übergreifende Ziel dieser Arbeit ist es, einen effizienten Ansatz für die Modellbildung und Parametrierung von Simulationen der Auftragsabwicklung in GPN zu entwickeln. Mit Hilfe dieses Ansatzes sollen die Entwicklungszeit und der Aufwand für die Erstellung von Simulationsmodellen reduziert werden. Dadurch kann der wertschöpfende Zeitanteil, also die Durchführung und Analyse von Experimenten, in Simulationsprojekten erhöht werden. Die Kernidee besteht dabei in der Automatisierung von großen Teilen der Datenaufbereitung, Modellbildung und Parametrierung. Der zu entwickelnde Ansatz wird daher als AutoGPN bezeichnet.

Als Grundlage für die Entwicklung von AutoGPN wurden aus dem Stand der Technik im vorherigen Kapitel bestehende Ansätze analysiert und Forschungspotenziale identifiziert. Zum Erreichen des Ziels dieser Arbeit werden die Herausforderungen in Simulationsprojekten und das Forschungsdefizit zunächst in Anforderungen übersetzt (siehe Kapitel 4.1). Anschließend werden die grundlegenden Ideen hinter AutoGPN und dessen Gesamtkonzept vorgestellt (siehe Kapitel 4.2). Abschließen erfolgt eine Gesamtdarstellung des AutoGPN-Ansatzes (siehe Kapitel 4.3).

4.1 Anforderungen

Die Anforderungen an den zu entwickelnden Ansatz lassen sich in drei Bereiche gliedern.

Domänenspezifische Anforderungen

Domänenspezifische Anforderungen befassen sich mit der Auftragsabwicklung in GPN und dem zugehörigen Simulationsmodell, welches durch AutoGPN erzeugt wird.

- A1. *Abbildung der Charakteristika der Auftragsabwicklung in GPN.* Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz unterstützt in Simulationsprojekten, die

die Auftragsabwicklung in GPN untersuchen. Ergebnis eines Simulationsprojektes ist ein ausführbares Simulationsmodell, welches das Verhalten des zu untersuchenden Systems entsprechend der vorgenommenen Eingrenzung valide widerspiegelt. Es ermöglicht damit, über Experimente Rückschlüsse auf das Verhalten des realen Systems zu ziehen. Hieraus ergibt sich für den gesamten Ansatz die Anforderung, die Charakteristika der Auftragsabwicklung in GPN abzubilden. Dies gilt sowohl bei grundlegenden Beschreibungen, anhand derer die Methoden und Bausteine des Ansatzes entwickelt werden, als auch für das durch Ausführung des Ansatz entstehende Simulationsmodell. Die Charakteristika der Auftragsabwicklung in GPN sind in Kapitel 2.1.3 detailliert beschrieben.

- A2. *Taktisch operative Simulation der Auftragsabwicklung in GPN.* Das durch Ausführung des entwickelten Ansatzes entstehende Simulationsmodell muss die taktisch operative Auftragsabwicklung in GPN in ausreichender Detaillierung simulieren können. Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, erfordert dies einen Simulationszeitraum von mehreren Monaten und eine sekundengenaue Zeitauflösung innerhalb der Simulation.
- A3. *Schaffung eines strukturierten Verständnisses der Auftragsabwicklung in GPN.* In der Literatur existieren bisher nur wenige Ansätze, welche sich mit der Simulation der Auftragsabwicklung in GPN beschäftigen. Um ein grundsätzliches Verständnis des zu simulierenden Systems zu schaffen, bieten sich strukturierte Wissensmodelle an, die oftmals in Form von Ontologien vorliegen. Diese unterstützen bei der genauen Definition des Untersuchungsgegenstands und der Systemanalyse.

Anforderungen an das Datenmanagement

In der Literatur wird das Datenmanagement in Simulationsprojekten als Herausforderung beschrieben. Entsprechend ist die Phase des Datenmanagements mit einem hohen manuellen Aufwand verbunden und führt zu langen Entwicklungszeiten. Ein Ansatz zur effizienten und effektiven Modellbildung und Parametrierung muss daher folgende Anforderungen in Bezug auf Daten und Datenverarbeitung erfüllen.

- A4. *Unterstützung bei der Datenidentifikation durch strukturierte Beschreibung von Daten und Quellsystemen.* Für ein effizientes und effektives Datenmanagement muss dem Anwender eine klare Beschreibung der entstehenden Daten sowie deren Verbindung zum produktionstechnischen System an die Hand gegeben werden. Durch eine strukturierte Darstellung soll die Grundlage für ein gemeinsames Verständnis der Daten unter den beteiligten Stakeholdern aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen, wie Produktion, Logistik und IT, geschaffen werden.
- A5. *Nutzung standardisierter Systemdaten.* Der Ansatz soll lediglich weit verbreitete, möglichst unverarbeitete Eingangsdaten verwenden, um eine

Anwendbarkeit über verschiedene GPN sicherzustellen. Gleichzeitig sollen die geforderten Eingangsdaten in Form und Art den Datenformaten gängiger IT-Systeme entsprechen. So soll der Aufwand beim Export der Daten aus den Quellsystemen und deren Übertragung zur Nutzung in diesem Ansatz gering gehalten werden.

- A6. *Bereitstellung einer standardisierten Schnittstelle zur effizienten Anbindung der Rohdaten.* Um eine effiziente Übertragung der Rohdaten aus den Quellsystemen im Anwendungsfall zu ermöglichen, ist eine definierte und standardisierte Schnittstelle notwendig. Die Schnittstelle unterstützt den Anwender beim Datenmanagement der exportierten Daten, indem eine vordefinierte Datenstruktur zur Verfügung gestellt wird. Außerdem ermöglicht diese die Entkopplung der weiteren Datenverarbeitungsschritte von den IT-Systemen des Anwendungsfalles. Hierdurch soll die Übertragbarkeit des Ansatzes sichergestellt werden.
- A7. *Bereitstellung eines strukturierten Datenmodells.* Durch die Erstellung eines datenbasierten Abbilds des untersuchten Produktionsnetzwerks sollen alle relevanten Daten in strukturierter Form gespeichert und für nachfolgende Prozessschritte der Modellbildung und Parametrierung bereitgestellt werden. In der Literatur zu datenbasierten Ansätzen entspricht das datenbasierte Abbild den Eingangsdaten dieser Ansätze.
- A8. *Bereitstellung von Algorithmen zur Datenverarbeitung.* Die Überführung der Rohdaten in eine strukturierte Form, welche für die Modellbildung und Parametrierung genutzt werden kann, wird in der Literatur nur selten detailliert beschrieben. Bestehende Ansätze unterstützen den Anwender lediglich methodisch bei der Datentransformation oder setzen bereits das Vorhandensein einer strukturierten Datenbasis voraus. Der zu entwickelnde Ansatz soll Algorithmen bereitstellen, welche die Datenverarbeitung automatisieren und damit den manuellen Aufwand im Simulationsprojekt reduzieren.

Anforderungen an Modellbildung und Parametrierung

Modellbildung und Parametrierung stellen in Simulationsprojekten die Prozessschritte mit dem geringsten Automatisierungsanteil und dem größten Forschungspotenzial dar. Für eine Effizienzsteigerung in diesen Projektschritten soll der zu entwickelnde Ansatz die folgenden Anforderungen erfüllen.

- A9. *Bereitstellung von Algorithmen zur Modellbildung.* Die Modellbildung basiert in der industriellen Praxis auf der manuellen Entwicklung durch einen Simulationsexperten und ist in großem Maße von dessen Erfahrung und Expertenwissen abhängig. In der Literatur wurden in den letzten Jahren erste automatisierte, jedoch weiterhin prototypische Ansätze entwickelt, die Potenzial für weitere Entwicklungen zeigen. Der zu entwickelnde Ansatz soll Algorithmen bereitstellen, die produktionstechnisches Wissen über die Auftragsabwicklung in GPN mit aufgezeichneten Daten

aus dem Betrieb im Anwendungsfall kombinieren und die Modellbildungsaufgabe übernehmen.

- A10. *Bereitstellung von Algorithmen zur Parametrierung.* Es wurden bereits eine Vielzahl an Herangehensweisen entwickelt, wie die Parametrierung von Simulationsmodellen effizienter gestaltet werden kann. Oftmals sind jedoch die genauen Algorithmen nicht gegeben oder entsprechend auf den Anwendungsfall angepasst. Für die Parametrierung von Simulationen der Auftragsabwicklung in GPN existiert bisher keine Methode. Der zu entwickelnde Ansatz soll diese Lücke schließen und anhand einer klar definierten Eingangsdatenbasis einen Algorithmus zur Parametrierung bereitstellen.
- A11. *Automatisierung von Modellbildung und Parametrierung.* Um den Anteil der wertschöpfenden Zeit in Simulationsprojekten zu erhöhen und schneller Aussagen über das Systemverhalten zu erhalten, soll der Automatisierungsgrad in allen Schritten der Simulationsentwicklung erhöht werden. Der zu entwickelnde Ansatz soll daher die Modellbildung und Parametrierung automatisiert ohne manuellen Aufwand durchführen.
- A12. *Sicherstellung der Übertragbarkeit.* In der Literatur lässt sich eine Lücke zwischen hohen Automatisierungsgraden in konkreten Anwendungsfällen und allgemein einsetzbaren, anwendungsfallunabhängigen Methoden mit geringem Automatisierungsgrad erkennen. Der zu entwickelnde Ansatz soll derart gestaltet sein, dass die entwickelten, automatisierten Algorithmen anwendungsfallunabhängig anwendbar sind und damit in einer Vielzahl realer Produktionsnetzwerke zum Einsatz kommen können.

4.2 Übersicht

Im Folgenden sollen zunächst die grundlegenden Kernideen des AutoGPN-Ansatzes beschrieben und ein Überblick über den Ansatz gegeben werden. Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert, stellt die Auftragsabwicklung in GPN ein komplexes System dar, in dem eine systematische Untersuchung der Wirkungszusammenhänge ohne technische Hilfsmittel kaum möglich ist. Eine lauffähige Simulation als dynamische Abbildung des realen Systems ermöglicht diese Untersuchungen, sodass bessere Entscheidungen für die Planung und Steuerung getroffen werden können. Dabei kann ein Simulationsmodell als valide angesehen werden, wenn bei der Einspeisung historischer Eingangsdaten ein ähnliches Verhalten wie im realen System über den gleichen historischen Betrachtungszeitraum beobachtet werden kann.

Diesen Vorteilen von Simulationsmodellen steht die Herausforderung gegenüber, dass die Abbildung eines komplexen Systems in Form eines Modells ebenfalls eine komplexe Aufgabe ist. Dies geht einher mit hohem manuellen Aufwand, langen

Entwicklungszeiten und dem Risiko einer zu geringen Aussagekraft. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde mit AutoGPN eine Methodik geschaffen, die die Modellbildung und Parametrierung von Simulationsmodellen effizient und effektiv gestaltet.

Dabei ist die Kernidee von AutoGPN, die im operativen Betrieb des GPNs anfallenden Daten intelligent zu nutzen. Abbildung 4.1 zeigt die Zusammenhänge zwischen realem System, Simulation und AutoGPN. Dabei wird die Auftragsabwicklung vereinfacht dargestellt. Ausgelöst wird diese durch den Eingang von Aufträgen in Form von Bestellungen. Die Aufträge durchlaufen die Planungs- und Steuerungsprozesse und lösen die zur Erfüllung der Aufträge notwendigen Produktions- und Logistikprozesse aus. Bei der Durchführung all dieser Prozesse fällt eine Vielzahl von Daten (z. B. Logistikdaten, Maschinendaten, Auftragsdaten) in unterschiedlichen IT-Systemen an. Diese Daten können dann für die Simulationsmodellerstellung genutzt werden.

Die Grundideen hinter AutoGPN sind die Steigerung der Effizienz durch Automatisierung und die Steigerung der Effektivität durch Standardisierung. AutoGPN ist dabei als Anwendermethodik konzipiert, die im realen Anwendungsfall eingesetzt werden kann. Grundlage für den Einsatz von AutoGPN sind Daten, die bei der Auftragsabwicklung anfallen. Diese Daten allein reichen jedoch für eine vollständige Modellierung und Parametrierung nicht aus, da Informationen über Logiken und Prozesszusammenhänge nur implizit in den Daten enthalten sind. Ein funktionsfähiges Simulationsmodell erfordert jedoch eine explizite Modellierung von Logiken und Prozesszusammenhängen, um zur Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden zu können. In AutoGPN werden daher Daten mit produktionstechnischem Wissen über die Prozesse der Auftragsabwicklung in GPN kombiniert, um ein Simulationsmodell des realen Systems zu erstellen. Daraus ergibt sich die generelle Hypothese als Forschungsgrundlage für die Entwicklung und Erprobung von AutoGPN:

Allgemeine Hypothese. Aus historischen Daten des Systemverhaltens und einem allgemeinen Wissensmodell kann automatisiert ein valides Simulationsmodell erzeugt werden.

Im realen Anwendungsfall entsteht während des Betriebs von GPN eine große Menge an Daten, die für das gegebene Ziel nicht relevant sind (z. B. Drehmomentverläufe von Schraubwerkzeugen in der Montage). Die Identifizierung der Daten, die den größten Mehrwert für den Aufbau eines Simulationsmodells liefern, ist einer der Schritte mit dem höchsten manuellen Aufwand, wie auch in der Literatur zu Simulationsprojekten ersichtlich wird.

Um die angestrebten Effizienz- und Effektivitätssteigerungen zu erreichen, werden die verfügbaren Daten in AutoGPN eingeschränkt. Dies ermöglicht eine gezielte Identifikation der Daten in den IT-Systemen im Anwendungsfall. Insgesamt kombiniert AutoGPN ausgewählte Daten aus dem realen Betrieb des GPN mit produktionstechnischem Wissen, um effizient und effektiv ein Simulationsmodell der Auftragsabwicklung zu erstellen (siehe Abbildung 4.2).

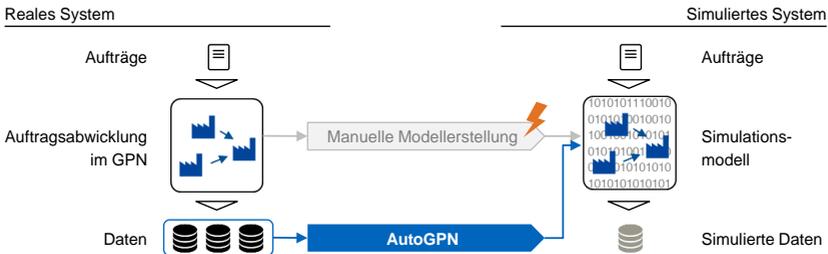


Abbildung 4.1: Zusammenhang zwischen realem System, Simulation und AutoGPN.

Die Eingrenzung der Daten verfolgt das Ziel, möglichst wenige unterschiedliche Datenarten und Datenquellen zu verwenden. Gleichzeitig sollen die ausgewählten Daten eine möglichst hohe Informationsdichte aufweisen. Darüber hinaus sollen die ausgewählten Daten die definierten Anforderungen A4 bis A6 erfüllen. Diese stellen sicher, dass die Daten strukturiert, einfach beschreibbar und standardisierbar sind. Ebenso sollen die Daten in den in der Industrie verbreiteten Systemen, wie beispielsweise den ERP-Systemen von SAP oder Microsoft, standardmäßig vorgefunden werden können.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden als Eingangsdaten für den Ansatz Tracking- und Tracing-Daten genutzt. Diese stellen Rückmeldungen aus dem realen Materialfluss in Produktion und Logistik dar und werden daher auch als Rückmeldedaten bezeichnet. Abbildung 4.3 zeigt, wie Tracking- und Tracing-Daten entstehen und in ihrer grundlegenden Form aussehen. Tracing-Daten werden erfasst, wenn einzelne Bauteile definierte Punkte, sogenannte Zählpunkte, im Materialfluss passieren und dies in Informationssystemen mit dem Zeitpunkt der Passage erfasst wird (NEUGEBAUER et al. 2008). Tracking-Daten zeigen den aktuellen Zustand eines Bauteils und ermöglichen dessen Nachverfolgbarkeit. Sie dokumentieren den Verbau eines einzelnen Bauteils in ein anderes einzelnes Bauteil (NEUGEBAUER et al. 2008). Tracking- und Tracing-Daten entstehen für jedes Bauteil im GPN als Rückmeldungen direkt im Materialfluss. In ihrer Gesamtheit enthalten sie somit Informationen über das dynamische Verhalten des Systems. Da das Ziel einer Simulation der Auftragsabwicklung in GPN die



Abbildung 4.2: AutoGPN kombiniert spezielle Daten aus der Auftragsabwicklung mit produktionstechnischem Wissen, um ein ausführbares Simulationsmodell des realen Systems zu erzeugen.

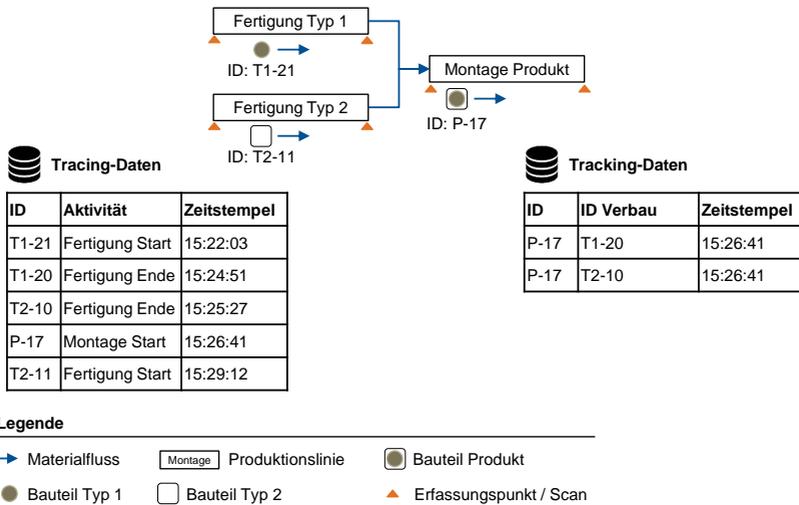


Abbildung 4.3: Entstehung und beispielhafte Darstellung von Tracking- und Tracing-Daten.

Abbildung dieses dynamischen Systemverhaltens ist, kann davon ausgegangen werden, dass Tracking- und Tracing-Daten einen ausreichenden Informationsgehalt vorweisen, um einen Großteil von simulationsrelevanten Informationen aus diesen zu extrahieren und für die Modellerstellung einzusetzen.

Gleichzeitig werden Tracking- und Tracing-Daten für die Funktionsweise von Planungs- und Steuerungsprozessen in Produktion und Logistik benötigt und sind daher in den gängigen Informationssystemen, wie SAP oder Microsoft Dynamics, vorhanden. Informationssysteme benötigen auf Unternehmensebene unter anderem die Rückmeldung, ob sich eine Komponente in der Produktion oder im Lager befindet, in einer anderen Komponente verbaut oder versendet wurde. Diese Informationen werden verwendet, um Bestände zu aktualisieren und Planungsprozesse durchzuführen. Es kann daher von einer hohen Verbreitung dieser Daten ausgegangen werden.

Mit der Eingrenzung auf Tracking- und Tracing-Daten lässt sich die Forschungshypothese dieser Arbeit weiter spezifizieren:

Spezifizierte Hypothese. Aus historisierten Tracking- und Tracing-Daten und einem allgemeinen Modell der Auftragsabwicklung in GPN kann automatisiert ein valides Simulationsmodell erzeugt werden.

Durch die Entwicklung und Erprobung von AutoGPN soll im Laufe dieser Arbeit die spezifizierte Hypothese evaluiert werden. AutoGPN als Methodik besteht dabei aus 2 Prozessschritten und 2 Modellkomponenten. Die Schritte und Komponenten von AutoGPN sind in Abbildung 4.4 visualisiert. In der Abbildung stellen

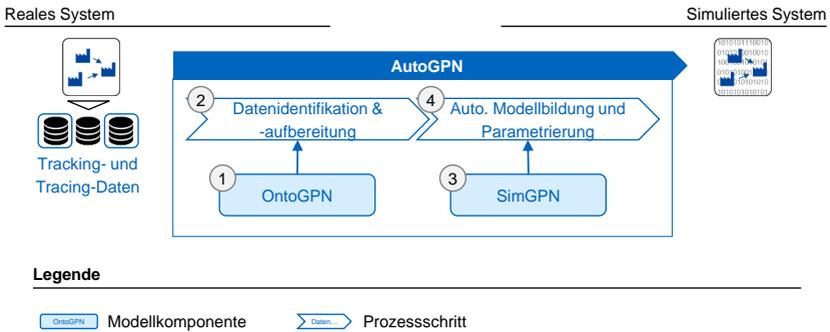


Abbildung 4.4: Detaillierte Darstellung von AutoGPN mit Prozessschritten und Modellkomponenten.

die Ziffern 2 und 4 die Prozessschritte sowie 1 und 3 die Modellkomponenten dar. In der Anwendung werden die Prozessschritte vom Anwender durchlaufen und innerhalb dieser die Modellkomponenten eingesetzt.

Die Modellkomponente 1 - OntoGPN - ist ein allgemeines Wissensmodell der Auftragsabwicklung in GPN in Form einer Ontologie. Dieses Wissensmodell wird im Prozessschritt Datenidentifikation und -aufbereitung (Punkt 2) verwendet.

Der Prozessschritt 2 stellt dem Anwender eine Methode zur Verfügung, um die Identifikation der notwendigen Tracking- und Tracing-Daten im Anwendungsfall zu erleichtern. Darüber hinaus liefert der Prozessschritt eine standardisierte Datenschnittstelle sowie Algorithmen zur automatisierten Datenverarbeitung. Das Ergebnis des Prozessschritts ist ein Prozessdatenmodell, das als datenbasiertes Abbild des GPN fungiert.

In der Modellkomponente SimGPN werden allgemeine Simulationsbausteine zur Abbildung der Auftragsabwicklung in GPN bereitgestellt. Die Simulationsbausteine sind in Simulationssoftware implementiert und können durch geeignete Auswahl und Parametrierung reale GPN und deren Auftragsabwicklung abbilden. Das Wissensmodell OntoGPN bildet dabei die Grundlage für die Ableitung der Simulationsbausteine.

Der Prozessschritt „Automatisierte Modellbildung und Parametrisierung“ ermöglicht den automatisierten Aufbau des Simulationsmodells unter Verwendung des datenbasierten Abbilds des GPN aus Prozessschritt 2 und der allgemeinen Simulationsbausteine. Das Ergebnis ist eine Sammlung und Aufbereitung aller Informationen, die zur Generierung eines lauffähigen und validen Simulationsmodells des Anwendungsfalles benötigt werden. Die Modellgenerierung selbst ist nicht Bestandteil des Ansatzes. An dieser Stelle wird jedoch auf bestehende Konzepte zur Automatisierung dieses Schritts aus BERGMANN (2013) verwiesen.

Die einzelnen Komponenten von AutoGPN stellen die Ergebnisse von 4 Forschungsmodulen dar (siehe Abbildung 4.5). Die Forschungsmodule beschreiben die theoretische Entwicklung (z. B. getroffene Annahmen, literaturbasier-

te Entwicklung) und die Forschungsergebnisse (z. B. Ontologie, Algorithmen, Datenmodelle, Simulationsbausteine). Jedes Forschungsmodul zielt dabei auf die Beantwortung einer Forschungsfrage ab (siehe Kapitel 1.3.1). Die detaillierte Herleitung und Ausgestaltung sowie die gewonnenen wissenschaftlichen Erkenntnisse werden in den Unterkapiteln des Kapitels 5 beschrieben. Eine vertiefende Beschreibung der Ergebnisse und der einzelnen Bestandteile von AutoGPN erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln.

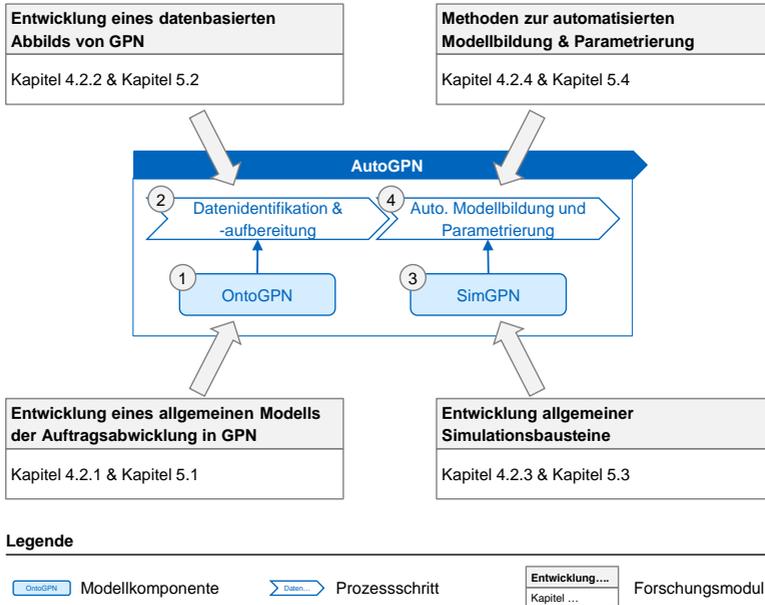


Abbildung 4.5: Zusammenhang von Forschungsmodulen und Modellkomponenten sowie Prozessschritten von AutoGPN.

4.2.1 Wissensmodell OntoGPN

Die grundlegende Modellkomponente von AutoGPN ist das allgemeine Wissensmodell OntoGPN. Ziel von OntoGPN ist es, das Wissen über die Auftragsabwicklung als Ganzes strukturiert zu sammeln, damit es einerseits dem Anwender als Unterstützung bei der Datenidentifikation und Systemanalyse und andererseits als theoretische Basis für die Entwicklung der allgemeinen Simulationsbausteine dienen kann. Um diese beiden Ziele zu erreichen, bietet sich die Modellierung in Form einer Ontologie an. Wie in Kapitel 3 beschrieben, werden Ontologien bereits erfolgreich zur Unterstützung der Datenidentifikation in Simulationsprojekten eingesetzt (siehe KNOLL et al. (2019) und CALVANESE et al. (2015)). Sie dienen als zentrales Vokabular, definieren die zur Systembeschreibung notwendigen Begriffe und setzen diese zueinander in Beziehung. Damit wird die

Grundlage für ein gemeinsames Systemverständnis geschaffen, das den Austausch zwischen den am Simulationsprojekt beteiligten Stakeholdern erleichtert. Insbesondere bei Simulationsprojekten in globalen Produktionsnetzwerken müssen unterschiedliche Experten aus den Bereichen Produktion, Logistik, IT und Simulation zusammenarbeiten, wobei häufig jeder Produktionsstandort eigene Experten und Besonderheiten aufweist. Hinzu kommen heterogene Bezeichnungen für Prozesse, IT-Systeme oder spezifische Punkte in Produktion und Logistik zwischen den einzelnen Werken, die historisch oder sprachlich bedingt sein können.

Um dieses Ziel zu erreichen, liefert die Ontologie eine integrierte Sicht auf die Auftragsabwicklung in GPN, die Materialfluss, Informationsfluss sowie Planungs- und Steuerungsprozesse abbildet und miteinander verknüpft. Ergänzt wird diese Sicht durch eine Modellierung der in den Prozessen erzeugten und ausgetauschten Daten sowie der verarbeitenden IT-Systeme. Dadurch werden die Zusammenhänge zwischen Produktions- und Logistikprozessen und den Rückmeldedaten deutlich, die einzelne Punkte in Produktion und Logistik mit den entstehenden Datenpunkten verknüpfen. Ebenso werden Verbindungen zwischen Planung und Steuerung sowie Materialfluss modelliert, die ein klares Verständnis der komplexen Wirkungszusammenhänge in der Auftragsabwicklung fördern. Das Wissensmodell gibt dem Simulationsexperten eine strukturierte Vorlage für den Aufbau des Systemverständnisses im Anwendungsfall.

Die entwickelte Ontologie besteht aus 127 Klassen und 278 Relationen. Die Entwicklung erfolgte nach dem Vorgehensmodell nach NOY und MCGUINNESS (2001) und integriert Erkenntnisse aus einer strukturierten Literaturrecherche, bei der 119 veröffentlichte Ontologien analysiert und in die Entwicklung einbezogen wurden. Eine detaillierte Ausführung zu Entwicklung und Aufbau wird in Kapitel 5.1 gegeben. Alle Relationen werden im Anhang A.1.2 aufgelistet.

4.2.2 Datenidentifikation und -aufbereitung

Im Gegensatz zur Ontologie in Modellkomponente 1 liegt der Fokus des Prozessschritts der Datenidentifikation und -aufbereitung auf der datentechnischen Umsetzung. Dabei steht die Identifikation, Verarbeitung und Speicherung großer Datenmengen aus dem Produktionsbetrieb im Vordergrund. Eine Ontologie als technisches Hilfsmittel ist für eine effiziente Verarbeitung und Speicherung von Daten nicht geeignet.

Der Prozessschritt der Datenidentifikation und -aufbereitung stellt den Startpunkt der Anwendermethodik dar. Durch die bereitgestellten Methoden und Artefakte wird die Phase des Eingangsdatenmanagements in Simulationsprojekten abgedeckt (siehe Kapitel 2.2.1). Diese reicht von der Datenidentifikation über die Datenaufbereitung hin zur Bereitstellung der verarbeiteten Daten in strukturierter Form für die Modellbildung und Parametrierung.

AutoGPN stellt dem Anwender im Prozessschritt 2, der Datenidentifikation und -aufbereitung, vier Artefakte zur Verfügung. Die Artefakte lösen den Prozessschritt

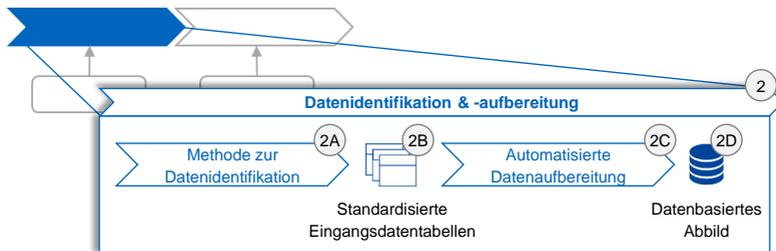


Abbildung 4.6: Detaillierung des Prozessschritts Datenidentifikation und -aufbereitung.

feiner auf und sind in Abbildung 4.6 dargestellt (2A - 2D). Eine Methode zur Datenidentifikation (2A) unterstützt den Anwender bei der korrekten Identifikation von IT-Systemen sowie Tracking- und Tracing-Daten im Anwendungsfall unter Zuhilfenahme des Wissensmodells OntoGPN. Es wurden standardisierte Eingangsdatentabellen (2B) entwickelt, in welche die identifizierten Daten überführt werden können. Die Eingangsdatentabellen geben eine Datenstruktur vor, die sich an der Rohdatenstruktur von Tracking- und Tracing-Daten orientiert. Im Anwendungsfall exportiert der Anwender die identifizierten Daten aus den IT-Systemen direkt in die Struktur der Eingangsdatentabellen. Die so standardisierten Rohdaten werden im folgenden Schritt automatisiert aufbereitet (2C). Die im Forschungsmodul entwickelten Algorithmen verknüpfen die Daten miteinander und überführen sie in ein strukturiertes Prozessdatenmodell. Dieses Modell bildet das datenbasierte Abbild des GPN (2D) und dient als Ausgangspunkt für die automatisierte Modellbildung und Parametrierung in den weiteren Schritten von AutoGPN.

Im Anwendungsfall müssen alle Schritte durchlaufen werden. Lediglich die Datenidentifikation und die Ausleitung der Rohdaten in die standardisierten Eingangsdatentabellen erfolgen manuell und angepasst auf den Anwendungsfall. Durch die Standardisierung der Eingangsdatentabellen kann die automatisierte Datenaufbereitung ohne Anpassungen an den jeweiligen Anwendungsfall vollständig automatisiert ablaufen.

Im Folgenden werden die Grundgedanken der entwickelten Artefakte des Prozessschritts der Datenidentifikation und -aufbereitung dargestellt, beginnend mit dem datenbasierten Abbild des GPNs als Zielzustand der Datenverarbeitung. Ist der Zielzustand definiert, werden die vorgelagerten Schritte in ihrer prozessualen Reihenfolge (2A bis 2C) weiter ausgeführt.

Datenbasiertes Abbild als Ziel-Datenstruktur (2D)

Die Auftragsabwicklung stellt in sich einen Prozess dar, der beginnend bei eingehenden Aufträgen, Materialien mittels verknüpfter Produktions- und Logistikschritte bearbeitet und damit einen Wertschöpfungsprozess auslöst.

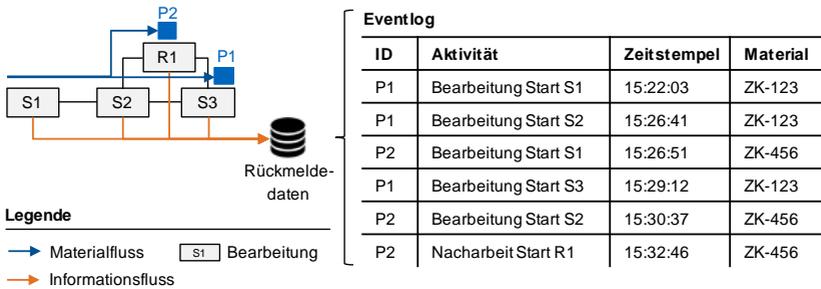


Abbildung 4.7: Beispielhafte Darstellung eines Produktionsprozesses mit resultierendem Eventlog.

Entsprechend ist die grundlegende Idee hinter dem datenbasierten Abbild des Produktionsnetzwerks, diese prozessuale Struktur datentechnisch abzubilden, sodass für jedes Bauteil zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Status im Prozess abfragbar ist. Aus den Statuswerten aller Bauteile lässt sich folglich der Zustand des Gesamtsystems ableiten. Zum Beispiel kann jederzeit ermittelt werden, wie viele Bauteile sich in den einzelnen Produktionslinien oder in den Lagern befinden.

Derartige prozessorientierte Datenstrukturen lassen sich in Form von Eventlogs abbilden, bei denen einer Prozessinstanz (in der Literatur auch oft Fall bzw. englisch „Case“ genannt) eine Menge von Aktivitäten zugeordnet wird. Sind den Aktivitäten zusätzlich Zeitstempel zugeordnet, lässt sich für jeden Fall der Prozessfortschritt über die Zeit verfolgen. In dieser Arbeit stellen einzelne Bauteile die Prozessinstanzen und durchlaufene Punkte in Produktion und Logistik die Aktivitäten dar. (VAN DER AALST 2016)

Eventlogs werden im Bereich der datenbasierten Ansätze von LUGARES I und MATTA (2020) und CHARPENTIER und VÉJAR (2014) genutzt, stellen aber vor allem im Process Mining die grundlegende Datenstruktur dar (KNOLL et al. 2019; VAN DER AALST 2016). Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft einen Produktionsprozess mit resultierendem Eventlog.

Für die Anwendung in GPN muss die Eventlog-Struktur erweitert werden, um die Charakteristika von GPN abbilden zu können. Konvergierende Materialflüsse aufgrund von Montageprozessen erfordern die Verknüpfung einzelner Fälle zu einem übergeordneten Fall, um die Verfolgbarkeit individueller Bauteile auch nach deren Verbau sicherzustellen. Gleichzeitig existieren im Netzwerk verschiedene Arten von Bauteilen mit unterschiedlichen Eigenschaften, welche ebenfalls im Eventlog hinterlegt werden müssen.

Im datenbasierten Abbild wird die vorgestellte Eventlog-Tabelle zu einem Prozessdatenmodell, bestehend aus mehreren Tabellen, weiterentwickelt. Das entwickelte Prozessdatenmodell schafft so die Möglichkeit, die Beziehungen einzelner Bauteile zueinander abzubilden und in eine übergeordnete Prozessinstanz zu-

sammenzuführen. Gleichzeitig können unterschiedliche Attribute verschiedener Bauteilarten in das Datenmodell aufgenommen und gespeichert werden.

Das Datenmodell ermöglicht eine effiziente Abfrage des gesamten Lebenszyklus jedes im Netzwerk produzierten Bauteils über alle durchlaufenen Prozessschritte hinweg, basierend auf den tatsächlich aufgezeichneten Rückmeldungen. Durch entsprechende Datenschnitte ist somit zu jeder Zeit im Datenzeitraum auch der Zustand des Netzwerks bekannt. Der detaillierte Aufbau des Datenmodells ist in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Um das datenbasierte Abbild des GPN mit Daten anzureichern, müssen im Anwendungsfall zunächst die richtigen Rohdaten identifiziert, extrahiert und verarbeitet werden. Die von AutoGPN hierzu bereitgestellten Methoden werden im Folgenden beleuchtet.

Methode zur Datenidentifikation (2A)

Die Identifikation der richtigen Daten in den IT-Systemen des GPN stellt den ersten Schritt der Anwendermethodik dar. Ziel der Methode zur Datenidentifikation ist es, die manuellen Aufwände zu reduzieren. Neben der Eingrenzung der zu identifizierenden Daten auf Tracking- und Tracing-Daten wird dies durch die in Forschungsmodul 1 entwickelte Ontologie ermöglicht. Aus der Literatur ist bekannt, dass Ontologien bei der Datenidentifikation unterstützen können (CALVANESE et al. 2015; KNOLL et al. 2019). Aufgrund der Vielzahl an komplexen und heterogenen IT-Systemen, die in der industriellen Praxis wiederum aus technischen Datenmodellen mit einer Vielzahl an Tabellen, Attributen und Beziehungen bestehen (BECKER et al. 2017; WESTKÄMPER et al. 2013), erfordert die Datenidentifikation die Beteiligung von Experten aus Produktion, Logistik und IT. Die OntoGPN als strukturiertes Wissensmodell schafft ein gemeinsames Verständnis zwischen den beteiligten Experten, indem sie aufzeigt, welche Daten erforderlich sind, wie diese entstehen und wie sie mit Prozessen aus Produktion und Logistik in Verbindung stehen. Explizit zeigt OntoGPN die Entstehung von Tracking-Daten durch Erfassungsprozesse zu Beginn und am Ende jedes Materialflussprozesses. Ebenso werden die Zusammenhänge zwischen Bauteilen und deren datentechnische Erfassung in Tracing-Daten abgebildet. Gleichzeitig fungiert die Ontologie als Wissensdatenbank für bereits identifizierte Daten, Datenquellen und technische Bezeichnungen. Entsprechend konnte in der Literatur gezeigt werden, dass Ontologien die Zeit für die Datenidentifikation reduzieren können (KNOLL 2021).

Standardisierte Eingangsdatentabellen (2B)

Um eine Schnittstelle zwischen den identifizierten Rohdaten und den weiteren, automatisierten Schritten von AutoGPN zu schaffen, werden standardisierte Eingangsdatentabellen bereitgestellt. Diese Tabellen orientieren sich an der grundlegenden Struktur der Tracking- und Tracing-Daten. Der Anwender erhält hierdurch eine weitere Hilfestellung, in welcher Form die notwendigen Daten in IT-Systemen vorliegen. Gleichzeitig soll die an die Rohdaten angelehnte Struktur

den Export vereinfachen und eine manuelle Vorverarbeitung der exportierten Rohdaten gering halten oder ganz vermeiden.

Insgesamt bestehen die Eingangsdatentabellen aus vier Tabellen, die durch eine weitere Tabelle je Bauteilart im Anwendungsfall ergänzt werden. Alle Tabellen sind aus OntoGPN abgeleitet und für jede Tabellenspalte ist der Bezug zur Ontologie sowie der entsprechende Datentyp definiert.

Innerhalb der Anwendermethodik ist es die Aufgabe des Anwenders, die identifizierten Rohdaten zu exportieren und in die jeweilige Eingangstabelle zu überführen. Dabei nehmen die einzelnen Eingangstabellen auch Daten aus verschiedenen Exporten und IT-Systemen auf und konsolidieren diese. Die Herleitung und der Aufbau der Eingangstabellen wird in Kapitel 5.2.3 dargelegt.

Automatisierte Datenaufbereitung (2C)

Nach Extraktion der Daten in die Eingangstabellen müssen die Rohdaten verarbeitet, standardisiert und in das datenbasierte Abbild überführt werden. Um diese Aufgaben automatisieren zu können, stellt AutoGPN Algorithmen bereit, die aus den Rohdaten einzelne Fälle und deren Attribute gewinnen, Bauteile gemäß den Verbaurelationen zu einer gemeinsamen Prozessinstanz zusammenführen und die je Instanz durchlaufenen Aktivitäten extrahieren. Weiterhin erfolgt eine Standardisierung der Aktivitäten, indem den technischen Bezeichnungen der Erfassungspunkte eine übergreifende Bezeichnung zugewiesen wird. Das Ergebnis der Datenverarbeitung ist das mit Daten angereicherte Prozessdatenmodell. Da bereits mit den Eingangstabellen eine standardisierte Schnittstelle geschaffen wurde, sind die Algorithmen unabhängig vom Anwendungsfall und damit allgemeingültig konzipiert und implementiert. Eine Adaption durch den Anwender ist daher nicht erforderlich. Die Algorithmen können in ihrer implementierten Form ohne initialen Aufwand eingesetzt werden. Die exakte Definition und Funktionsweise der Datenverarbeitung wird in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

4.2.3 Allgemeine Simulationsbausteine SimGPN

Um aus den strukturierten Daten des datenbasierten Abbilds des GPN eine vollständige Simulation zu generieren, muss zunächst die Frage beantwortet werden, wie die grundlegenden Komponenten der Auftragsabwicklung in ausführbarer Form modelliert und anschließend in Simulationssoftware implementiert werden können. Hierzu wird entsprechend der in Kapitel 3 ausgewerteten Literatur auf die Idee vordefinierter und bereits implementierter Simulationsbausteine zurückgegriffen (siehe UDE (2010) oder COPE (2008)). Die Bausteine stellen dabei einzelne Elemente dar, durch deren Auswahl und Kombination die Auftragsabwicklung in GPN für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle in einem Simulationsmodell abgebildet werden kann. Im Forschungsmodul werden daher

die allgemeinen Simulationsbausteine SimGPN entwickelt, wobei auf die Ontologie der Auftragsabwicklung in GPN (OntoGPN) zurückgegriffen wird. Dabei ist das wissenschaftliche Ziel des Forschungsmoduls, die Simulationsbausteine aus der Ontologie abzuleiten und die notwendigen Modellierungsentscheidungen zu treffen, d.h. in welcher Weise die in der Ontologie beschriebenen Begriffe und Beziehungen in Simulationssoftware umgesetzt werden. Im Sinne der Anwendungsmethodik werden die entwickelten Bausteine dazu genutzt, das Simulationsmodell des zu untersuchenden Systems aufzubauen

In die Entwicklung der SimGPN-Bausteine fließen neben der Ontologie zum einen Aspekte der Benutzerfreundlichkeit ein, um eine gute Verständlichkeit und damit eine höhere Vertrauenswürdigkeit des entstehenden Simulationsmodells zu erreichen. Zum anderen wird die Idee der Modularisierung mit ihren Konzepten der Hierarchisierung, Abstraktion und Kapselung verfolgt (WEYRICH und STEDEN 2013). Insgesamt werden 18 Simulationsbausteine aus den Klassen der Ontologie und deren Beziehungen abgeleitet und implementiert. Die Simulationsbausteine beinhalten dabei Funktionen zur Ausführung spezifischer Simulationsaufgaben sowie Parameter, um das Verhalten der Bausteine entsprechend dem Verhalten im realen System anpassen zu können. Die Herleitung der einzelnen Bausteine, die getroffenen Modellierungsentscheidungen, Funktionen und Parameter sind in Kapitel 5.3 detailliert beschrieben.

4.2.4 Automatisierten Modellbildung und Parametrierung

Um eine lauffähige Simulation der Auftragsabwicklung in GPN zu erhalten, müssen je nach Anwendungsfall die richtigen Simulationsbausteine ausgewählt, miteinander verknüpft und parametriert werden. Ziel des vierten Forschungsmoduls ist die Automatisierung dieser Aufgabe durch die Entwicklung und Implementierung von Methoden zur automatisierten Modellierung und Parametrierung. Dies wird durch einen dreistufigen Prozess erreicht, der in Abbildung 4.8 dargestellt ist. Innerhalb der Anwendermethodik wird dieser Prozess von einem Anwender automatisiert durchlaufen. Hierbei soll keine Anpassungen oder weitere Interaktion mit einem Experten erforderlich sein. Das wissenschaftliche Ziel des Forschungsmoduls ist die Entwicklung von Algorithmen zur Modellierung und Parametrierung auf Basis der bereitgestellten Daten.

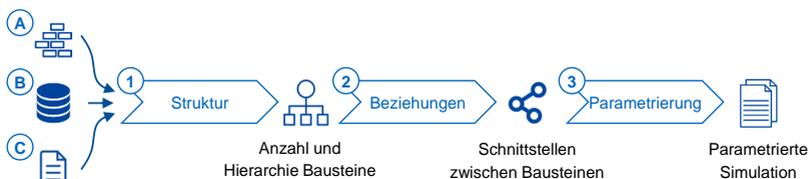


Abbildung 4.8: Automatisierter Prozess zur Parametrierung basierend auf den allgemeinen Simulationsbausteinen (A), dem datenbasierten Abbild (B) und allgemeinen Simulationsdaten (C).

Das Verfahren basiert auf dem datenbasierten Abbild des GPN, den Simulationsbausteinen sowie allgemeinen Informationen über das Simulationsmodell und den Simulationslauf selbst, die nicht aus den aufgezeichneten Daten gewonnen werden können. Letztere werden über eine Datei importiert, die vom Benutzer manuell mit Werten zu belegen ist (siehe Anhang A.3.1).

Anhand der Datenbasis wird in einem ersten Schritt die Struktur des GPN ermittelt. Hierdurch werden die Anzahl und die Positionierung der für die Abbildung des Anwendungsfalles notwendigen Simulationsbausteine festgelegt. Beispielsweise werden alle Werke, Produktionsstufen und Linien sowie die zugehörigen Bausteine identifiziert und in der richtigen Hierarchieebene verortet.

Aufbauend auf diesem Schritt werden die Beziehungen zwischen den identifizierten Bausteinen aus dem datenbasierten Abbild rekonstruiert. Dies umfasst das Verknüpfen von Bausteinen über Schnittstellen sowie die Identifikation aktiver Kunden-Lieferanten-Beziehungen.

Im dritten Schritt ermitteln Algorithmen zur automatisierten Parametrierung die konkreten Parameterwerte der identifizierten Bausteine. Dabei werden auf die in den Schritten 1 und 2 generierten Informationen sowie auf das datenbasierte Abbild zurückgegriffen. Die Algorithmen kombinieren diese mit produktionstechnischem Wissen über die Auftragsabwicklung in GPN und rekonstruieren Parameterwerte wie Schichtkalender, Ausbringungsmengen und Durchlaufzeitverteilungen.

Das Ergebnis der Algorithmen ist eine vollständige Auflistung aller Simulationsbausteine, ihrer Beziehungen und Parameterwerte in einer menschen- und maschinenlesbaren Form. Die Ausgabedateien enthalten alle notwendigen Informationen für die Modellgenerierung und entsprechen somit einem parametrisierten formalen Simulationsmodell. Eine detaillierte Beschreibung der Algorithmen findet sich in Kapitel 5.4.

4.3 Gesamtdarstellung des AutoGPN-Ansatzes

Aus den aufgebauten Prozessschritten und Modellkomponenten lässt sich eine detaillierte Gesamtdarstellung von AutoGPN generieren, die in Abbildung 4.9 dargestellt ist. Insgesamt stellt AutoGPN einen Prozess dar, der im Anwendungsfall durchlaufen wird. Dabei werden das Wissensmodell OntoGPN und die allgemeinen Simulationsbausteine SimGPN innerhalb der Anwendermethodik verwendet. Der Anwender wendet im ersten Schritt die Methode zur Datenidentifikation an und identifiziert sowie extrahiert alle notwendigen Daten. Diese exportiert er in die standardisierten Eingangsdatentabellen. Anschließend führt der Anwender die Algorithmen zur Datenaufbereitung aus, wodurch automatisiert das datenbasierte Abbild des GPNs erzeugt wird. Durch die Ausführung der Algorithmen zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung werden alle notwendigen Simulationsbausteine ausgewählt und parametrisiert, die zur

Modellierung des GPNs benötigt werden. Das Ergebnis von AutoGPN ist die strukturierte Ausgabe aller für die Simulationsmodellgenerierung notwendigen Daten sowie der dabei verwendeten Simulationsbausteine.

Auf der Grundlage der standardisierten Eingabedatentabellen kann die Methodik für den Anwender in zwei Teile, A und B, unterteilt werden. Teil A der Methodik stellt den manuellen und anwendungsfallspezifischen Teil dar. Teil B ist unabhängig vom jeweiligen Anwendungsfall, erfordert also keine Anpassungen und kann ohne weitere Eingaben durch den Anwender vollautomatisch ablaufen. Diese Entkopplung von den Spezifika des Anwendungsfalles wird durch die Eingangsdatentabellen als standardisierte Schnittstelle ermöglicht.

Gerade durch diese Entkopplung kann AutoGPN die gesetzten Ziele zur Effizienz- und Effektivitätssteigerung in Simulationsprojekten erreichen. Lediglich der Schritt der Datenidentifikation und die Ausleitung der Daten in die standardisierten Eingangsdatentabellen erzeugt manuellen Aufwand, wobei dieser durch die von AutoGPN bereitgestellte Methode zur Datenidentifikation im Vergleich zur konventionellen Vorgehensweise in Simulationsprojekten gering gehalten wird. Die überwiegende Anzahl der Schritte in Simulationsprojekten kann durch AutoGPN automatisiert werden.

Die einzelnen Prozessschritte und Modellkomponenten von AutoGPN sind Ergebnisse der zugehörigen Forschungsmodule. Im folgenden Kapitel werden die Forschungsmodule mit dem Entwicklungsvorgehen und den Ergebnissen beschrieben. Jedes Forschungsmodul zielt dabei auf die Beantwortung einer Forschungsfrage ab (siehe Kapitel 1.3.1). Die Beantwortung der Forschungsfrage stellt den wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn des Forschungsmoduls dar.

Darüber hinaus soll die spezifische Hypothese durch die Entwicklung und Erprobung von AutoGPN evaluiert werden. Eine strukturierte Diskussion der Gültigkeit der spezifischen Hypothese stellt einen weiteren Beitrag zum Stand der Wissenschaft dar, den diese Arbeit leisten will. Die Diskussion der spezifischen Hypothese erfolgt in Kapitel 6.2 nach der Evaluation des Einsatzes von AutoGPN in der Industrie.

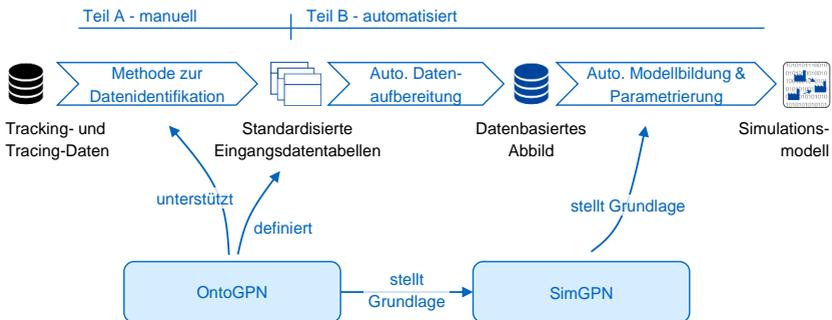


Abbildung 4.9: Detaillierter Überblick über den Ansatz AutoGPN

Kapitel 5

Detaillierte Gestaltung des Ansatzes

5.1 Entwicklung eines allgemeinen Modells der Auftragsabwicklung in GPN

Aus der Literaturanalyse geht hervor, dass sich Ontologien zur Unterstützung der Systemanalyse in Simulationsprojekten eignen. Durch deren Einsatz als strukturiertes Wissensmodell lassen sich Effizienzgewinne in der Simulationsmodellentwicklung erzielen. Gleichzeitig zeigen Veröffentlichungen verwandter Forschungs- und Anwendungsgebiete die Vorteile des Einsatzes von Ontologien bei der Datenidentifikation und -extraktion. Um die Vorteile von Ontologien auch in Simulationsprojekten für die Auftragsabwicklung in GPN nutzen zu können, wurde die Ontologie OntoGPN für die entsprechende Domäne entwickelt. OntoGPN unterstützt den Anwender bei der Systemanalyse und fördert das allgemeine Verständnis des Anwenders über die Auftragsabwicklung. Darüber hinaus liefert sie eine klare Definition von in der Auftragsentwicklung entstehenden Daten und deren Form. Damit vereinfacht sie die Datenidentifikation und -extraktion. Ebenso dient die Ontologie mit ihrer umfassenden Beschreibung der Auftragsabwicklung in GPN als Startpunkt für die Ableitung allgemeiner Simulationsbausteine. Diese setzen die in OntoGPN beschriebenen Prozesse und Objekte in Simulationssoftware um. In diesem Kapitel wird die Entwicklung von OntoGPN und damit das Forschungsmodul 1 vorgestellt. Dabei wird, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, das Teilziel 1 erreicht und Forschungsfrage 1 beantwortet.

5.1.1 Vorgehen bei der Entwicklung

Die Entwicklung der Ontologie erfolgt nach dem Vorgehensmodell von NOY und MCGUINNESS (2001), welches in Abbildung 5.2 dargestellt ist. Im ersten Schritt werden zur Definition von Domäne und Umfang die Ziele dieser Arbeit herangezogen. Ergänzt werden diese durch die Anforderungen an ein strukturiertes Wissensmodell zur Unterstützung in Simulationsprojekten und bei der

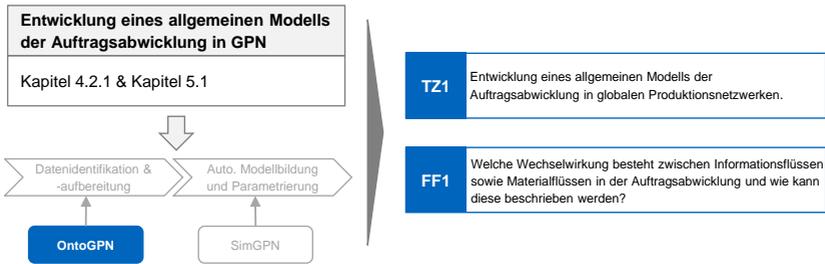


Abbildung 5.1: Forschungsmodul mit zugehörigen Teilziel und Forschungsfrage

Datenidentifikation. Diese werden in die nachfolgenden Fragestellungen, in der Ontologieentwicklung „Competency Questions“ genannt, übersetzt:

- Aus welchen Prozessschritten bestehen Materialfluss, Informationsfluss sowie Planung und Steuerung in der Auftragsabwicklung in GPN?
- Welche Beziehungen bestehen zwischen den Prozessschritten und welche Informationen werden ausgetauscht?
- Welche Systeme führen die einzelnen Prozessschritte aus?
- Welche Strukturen existieren in GPN und wie hängen diese zusammen?
- Welche Bauteile, Zwischen- und Endprodukte, fließen durch die Auftragsabwicklung?
- Welche Eigenschaften weisen Prozesse, Systeme, Strukturen und Bauteile auf?
- Welche Prozessschritte wurden zu welcher Zeit von welchem Objekt durch welche Ressource ausgeführt?
- Wie verhalten sich Planung und reale Ausführung der Prozessschritte der Auftragsabwicklung zueinander?

Im zweiten Schritt des Vorgehens werden bestehende Ontologien eingebunden. Hierfür wurde eine strukturierte Literaturrecherche durchgeführt (siehe Kapitel 5.1.2). Im dritten Schritt erfolgt die Erhebung bedeutender Begriffe zur Beschreibung der Domäne. In diesen Schritt fließen zum einen die Grundlagen zur Auftragsabwicklung in GPN ein (siehe Kapitel 2.1.3) und zum anderen die Ergebnisse der in der Literaturrecherche identifizierten relevanten Ontologien. Die Aufzählung relevanter Begriffe ist in Anhang A.1.2 aufgeführt. Im vierten, fünften und sechsten Schritt erfolgt der Aufbau der Ontologie (siehe Kapitel 5.1.3 bis 5.1.7). In diesen Schritten wird jeweils wieder auf die Integration bestehender Ontologien und deren Konzepte Wert gelegt. Hierbei wird ein rein

manueller Ansatz bei der Fusionierung der Ontologien verfolgt, da die Ergebnisqualität gegenüber effizienterer Entwicklung, durch Nutzung automatisierter Fusionierungsansätze, priorisiert wurde. Für die Definition von Klassen und deren Hierarchien wurde der Middle-Out-Ansatz verwendet. Beim Middle-Out-Ansatz wird von den wichtigsten Begriffen ausgegangen und diese weiter spezifiziert, geteilt und mit Relationen versehen, was die Bildung und logische Darstellung erleichtert (NOY und MCGUINNESS 2001; USCHOLD und GRUNINGER 1996). Die Erstellung von Instanzen erfolgt nicht im Zuge der allgemeinen Entwicklung der Ontologie, sondern ist Bestandteil der Anwendung der Ontologie im konkreten Anwendungsfall.

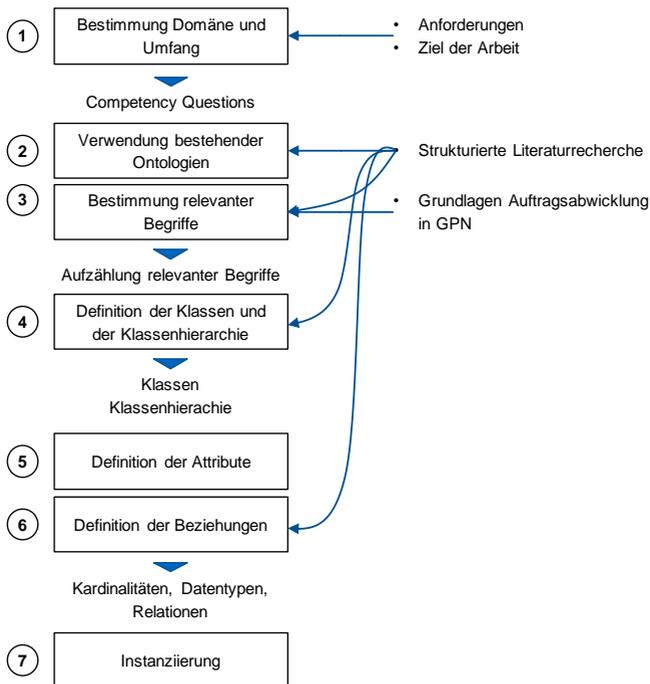


Abbildung 5.2: Vorgehen bei der Entwicklung der Ontologie (in Anlehnung an NOY und MCGUINNESS (2001)).

5.1.2 Literaturrecherche über relevante Ontologien

Um an bestehende und in Forschung und Industrie akzeptierte Konzepte in die Ontologieentwicklung anzuknüpfen, wurde eine strukturierte Literaturrecherche über relevante Ontologien durchgeführt. Um ein vollständiges Bild über bestehende Veröffentlichungen zu erhalten, wurden in der Suchstrategie das Schlüsselwort „ontology“ mit Schlüsselwörtern zur Beschreibung der Domäne

und zur Beschreibung des Untersuchungsbereichs kombiniert. Die Suche erfolgte in englischer Sprache, wobei die Suchbegriffe über den AND-Operator kombiniert wurden. Die englische Sprache wurde gewählt, da auch die zu entwickelnde Ontologie in Englisch erstellt werden soll. Dies ermöglicht einen einfachen Einsatz an globalen Standorten. Die Suchstrategie ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Für die Suche wurde die Scopus-Literaturdatenbank verwendet und Veröffentlichungen im Zeitraum von 1999 bis zum 15. Mai 2019, dem Zeitpunkt der Überprüfung, betrachtet. Mit dieser Suchstrategie wurden 747 Publikationen identifiziert, welche weiter eingegrenzt wurden, indem zunächst Duplikate entfernt und dann die Publikationen auf ihre Zitierhäufigkeit untersucht wurden. Veröffentlichungen ohne Zitation wurden nicht weiter berücksichtigt. Die verbleibenden Publikationen wurden anhand des Titels und der Schlagworte auf ihre Relevanz für das betrachtete Gebiet sowie Schlüsselwörter analysiert und dadurch weiter eingeschränkt. Insgesamt beschränkt sich die Anzahl der relevanten Publikationen auf 119.

Die verbliebenen Veröffentlichungen werden entsprechend nachfolgender Kriterien aus drei Kategorien detailliert untersucht und damit die Grundlage für eine spätere Integration in die zu entwickelnde Ontologie gelegt. Die Kriterien der ersten Kategorie bewerten die Darstellung der Domäne Auftragsabwicklung in GPN in den veröffentlichten Ontologien. Diese unterteilen sich gemäß der Abbildung der Komponenten der Auftragsabwicklung in Logistik, Produktion, Informationsfluss und die Planung und Steuerung. Des Weiteren erfolgt die Bewertung der gefundenen Publikationen anhand der Berücksichtigung einer prozessorientierten Sicht auf die Auftragsabwicklung. Für die prozessuale Darstellung wird die Abbildung von Prozess, Objekt und Operator (Ressource) in den Ontologien analysiert. Darüber hinaus wird evaluiert, inwieweit die Publikationen den Fokus auf Auftragsabwicklung und globale Produktionsnetzwerke widerspiegeln. Weiterhin lassen sich die Veröffentlichungen in sieben thematische Bereiche einordnen, wobei im Folgenden die relevantesten Veröffentlichungen für diese Arbeit vorgestellt werden. Eine vollständige Übersicht über die Bewertung der Literatur findet sich in Anhang A.1.1.

Tabelle 5.1: Suchstrategie für die strukturierte Literaturrecherche.

		order processing		network
		supply chain		global
ontology	UND	logistics	UND	planning
		manufacturing		information flow
		production		

Sogenannte Upper Level Ontologien (ULO) behandeln generelle Aspekte und Strukturen, entkoppelt von spezifischen Domänen. Der Bezug zu Produktion, Logistik oder Auftragsabwicklung fällt bei diesen Ontologien gering aus. Dennoch stellen einige ULOs Konzepte zur Verfügung, welche für diese Arbeit relevant sind. Die ULOs Process Specification Language (PSL) (SCHLENOFF et al. 2000), KNOWN-ONT (KUMAR und PARK 2010) und DOLCE (GANGEMI et al. 2002) fokus-

sieren sich auf die Modellierung von Prozessen und weisen dabei einen hohen Grad an Allgemeingültigkeit auf. Enterprise Ontology (USCHOLD et al. 1998) und FLEXINET (PALMER et al. 2017) sind ebenfalls prozessorientiert aufgebaut, integrieren jedoch zusätzlich eine allgemeine Modellierung von Unternehmen. Letztere eignet sich auch für die Darstellung von GPN. Die ULO Manufacturing System Engineering (MSE) (LIN und HARDING 2007) modelliert ebenfalls GPN, zeigt aber wenig Bezug zu Prozessen. LEUKEL und KIRN (2008) entwickeln eine ULO zur prozessorientierten Modellierung von Lieferketten, basierend auf dem Supply-Chain-Operations-Reference-Modell (SCOR-Modell). Eine allgemeine Abbildung von Produkten und Objekten in Form einer ULO bieten ONTO-PDM (PANETTO et al. 2012) und PRONTO (VEGETTI et al. 2005).

Für den Bereich der Produktion finden sich in der Literatur weitere relevante Ontologien, welche teilweise auf den vorgestellten ULOs aufbauen. Produktionsontologien mit speziellem Bezug zur Auftragsabwicklung werden von MÖNCH und STEHLI (2003) sowie LIN et al. (2004) vorgestellt. Eine genauere Betrachtung der Produktion aus der Netzwerkperspektive erfolgt in LEMAIGNAN et al. (2006). Die Arbeit von SMIRNOV et al. (2013) liefert Ansätze zur Kombination von Material- und Informationsfluss im Produktionsumfeld. JÄRVENPÄÄ et al. (2019) detaillieren das Konzept der Operatoren, als ausführende Instanz in einem Prozess, und QIAO et al. (2011) übertragen die ULO PSL auf den Produktionsbereich.

Im Bereich der Logistik konzentrieren sich die meisten Arbeiten auf die Intralogistik und decken somit nur einen Teil der Logistik in GPN und der aufgestellten Bewertungskriterien ab. GPN werden nur von FAYEZ et al. (2005), GRUBIC et al. (2011) und THIERS und MCGINNIS (2011) behandelt. Die Arbeit von FAYEZ et al. (2005) basiert auf dem prozessorientierten SCOR-Modell und deckt damit die festgelegten Kriterien im Bereich der Logistik am umfassendsten ab. THIERS und MCGINNIS (2011) konzentrieren sich auf die Planungs- und Steuerungsebene in der Logistik. LIBERT et al. (2010) und BLESING et al. (2017) führen agentenbasierte Kommunikationsmodelle ein und modellieren damit den Bereich der Planung und Steuerung mit Fokus auf die Logistik.

Nur wenige Veröffentlichungen mit Fokus auf den Themenbereich Informationsfluss beschäftigen sich explizit mit dem Informationsfluss in GPN. Die Arbeiten von NEGRI et al. (2015) und SANFILIPPO et al. (2018) zeichnen sich durch eine gute Orientierung an Prozessen und Operatoren aus, wobei auch die Domänen Produktion und Logistik berücksichtigt werden. Darüber hinaus sticht die Arbeit von ZAYATI et al. (2010) durch eine gute Verbindung zur Planung und Steuerung sowie zur Auftragsabwicklung hervor.

Im Bereich der Planung und Steuerung gibt es eine Vielzahl von Ontologien, die aber oft die Anwendungsdomäne außer Acht lassen. Hervorzuheben ist die Arbeit von STRZELCZAK et al. (2015), die verschiedene Ebenen der Planung modelliert. HERDING und MÖNCH (2017) gehen auf die Abhängigkeiten zwischen den Planungsebenen ein. SOLANO et al. (2014) erweitern PSL um eine Planungsebene.

SOARES et al. (2000) betrachten das Zusammenspiel von globalen und lokalen Planungsentscheidungen.

Im Bereich der Auftragsabwicklung ist nach den definierten Kriterien die Ontologie von OBITKO et al. (2010) relevant, die sich mit Produkten und Planungsprozessen beschäftigt. Für die Abbildung von Prozessen und Operatoren in der Auftragsabwicklung ist die Arbeit von GARETTI und FUMAGALLI (2012) hervorzuheben.

Ontologien zur Modellierung von GPN werden nur durch wenige Veröffentlichungen ausreichend thematisiert. YE et al. (2008) konzentriert sich auf eine Ontologie für die Auftragsabwicklung in Build-to-Order-Lieferketten. JULES et al. (2015) reflektieren die Auftragsabwicklung in der Struktur von GPN. MUNOZ et al. (2011) beziehen insbesondere die Planungsebenen in diesen Bereich ein.

Nach Bewertung des Standes der Technik kann festgestellt werden, dass in den einzelnen Bereichen, die für die Auftragsabwicklung in GPN relevant sind, bereits eine Vielzahl von Ontologien existiert. So existieren beispielsweise Ontologien, die logistische Prozesse inklusive Informationsfluss und Planung gut beschreiben, aber primär die externe Beschaffung berücksichtigen. Auch gibt es Ontologien, die Prozesse oder die globale Struktur einer Supply Chain detailliert modellieren, aber die Produktion vernachlässigen, wie QIAO et al. (2011), Planungsaspekte unbeachtet lassen, wie MÖNCH und STEHLI (2003), oder den Informationsfluss nicht modellieren, wie LEMAIGNAN et al. (2006). Insgesamt existiert keine Ontologie, welche die Auftragsabwicklung in GPN, entsprechend den Zielen dieser Arbeit, vollständig modelliert. Die Entwicklung einer entsprechenden Ontologie stellt folglich ein Forschungspotenzial dar.

5.1.3 Aufbau der Ontologie

Um die umfassende Domäne übersichtlich abzubilden, wird die Ontologie in zwei Stufen aufgeteilt. Die Stufe 1 gibt der Ontologie eine grundsätzliche Struktur und integriert das Konzept der Prozessorientierung, ohne die Domäne zu spezifizieren. Die obere Stufe verfolgt damit ähnliche Ziele wie eine ULO, ist im klassischen Sinne aber bereits zu spezifisch, um als allgemeine ULO bezeichnet werden zu können, weshalb im Folgenden der Begriff First Level Ontologien (FLO) verwendet wird. Die Entwicklung der FLO ist erforderlich, da keine ULO die Anforderungen vollständig abbildet. Die FLO ist wiederum in zwei Sub-Stufen unterteilt, wobei die Sub-Stufe 1 die Definition von Prozessen ermöglicht und Sub-Stufe 2 eine Unterteilung nach Material- und Informationsfluss implementiert. Beide Sub-Stufen sind unabhängig von der Domäne, weswegen sie zur FLO gezählt werden. Die Stufe 2 von OntoGPN spezifiziert die FLO durch Unterklassen zur spezifischen Beschreibung der Auftragsabwicklung in GPN. Der stufenweise Aufbau von OntoGPN ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

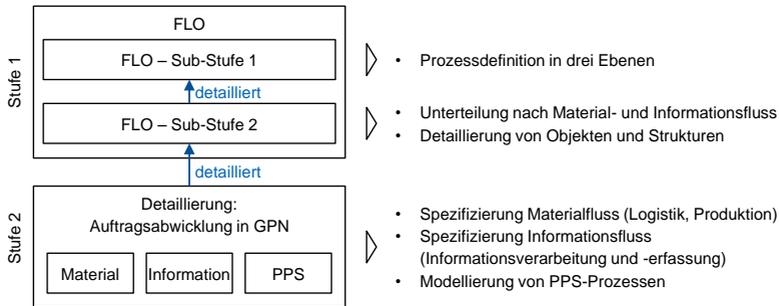


Abbildung 5.3: Aufbau von OntoGPN.

5.1.4 First Level Ontology

Die FLO hat zum Ziel, die grundlegenden Konzepte der Auftragsabwicklung in GPN zu modellieren. Die FLO bildet im Kern die prozessuale Struktur der Auftragsabwicklung ab, ergänzt diese jedoch um die Beschreibung von Ressourcen und der Organisation des Unternehmens als Ganzes und modelliert eine Unterteilung zwischen Materialfluss- und Informationsflussprozessen.

Bei der Modellierung von Prozessen werden zur Erfüllung der Anforderungen zwei Sichtweisen verfolgt. Zum einen können mit der Ontologie Prozesse mit ihren Prozessschritten und Eigenschaften, seien es Materialfluss- oder Informationsflussprozesse, definiert werden. Zum anderen kann die individuelle Ausführung des Prozesses, beispielsweise der spezifische Montageprozess eines spezifischen Bauteils mit entsprechenden Eigenschaften, wie die Zeitpunkte des Produktionsbeginns und -endes, abgebildet werden. PSL als ULO integriert diese beiden Sichten auf Prozesse bereits (SCHLENOFF et al. 2000), weswegen deren Konzepte als zentrales Element in die FLO übernommen werden. Dies geschieht durch die Einführung der Klassen *Activity*, *ActivityOccurence* und *DateTimePoint*.

Im Gegensatz zu PSL wird die PSL-Klasse *Object* in die Klassen *Operator* und *Object* unterteilt, um die Prozessdefinition weiter zu detaillieren. Dabei repräsentiert der *Operator* den aktiven Teil des Prozesses, der den passiven Teil, das *Object*, transformiert. Diese Trennung wird in Anlehnung an EO (USCHOLD et al. 1998) und KNOWN-ONT (KUMAR und PARK 2010) modelliert. Dabei ist der Prozess durch den *Operator* an eine physische Struktur gebunden, welche über die Klasse *Structure* nach dem Vorbild von EO (USCHOLD et al. 1998) und MSE (LIN und HARDING 2007) modelliert wird.

In Anlehnung an die Prozessfassung nach GOLDSTEIN (1999) können Prozesse gemäß Abbildung 5.4 strukturiert werden. Die einzelnen Prozessbestandteile werden in OntoGPN über die zugeordneten FLO-Klassen modelliert. Ein einfacher Materialflussprozess, bestehend aus einer Produktionslinie mit angeschlossenem Lager, lässt sich damit über Instanzen der beschriebenen FLO-Klassen abbilden,

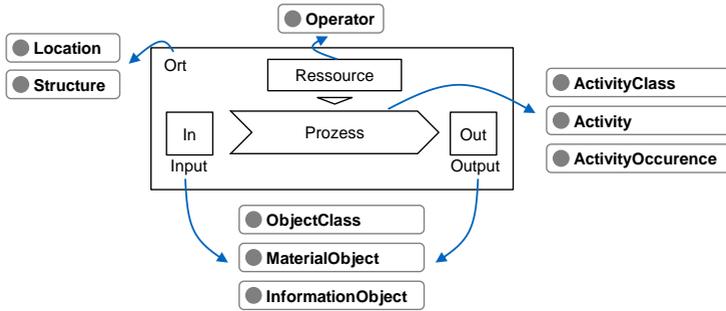


Abbildung 5.4: Allgemeine Darstellung von Prozessen mit korrespondierenden FLO-Klassen in OntoGPN.

wie in Abbildung 5.4 gezeigt wird. Dabei sind bereits Beziehungen zwischen den Klassen in Form von Relationen verzeichnet, auf die später noch detailliert eingegangen wird.

Da sowohl physische (z.B. Bauteile) als auch digitale (z.B. Kundenaufträge) Objekte in der Auftragsabwicklung betrachtet werden, wird diesem Umstand bereits auf der höchsten FLO-Ebene Rechnung getragen, indem eine Trennung in `MaterialObject` und `InformationObject` vorgenommen wird. Diese Trennung basiert auf den großen Unterschieden zwischen physischen und digitalen Objekten und folgt den Modellierungsansätzen von MSE (LIN und HARDING 2007) und EO (USCHOLD et al. 1998). Weiterhin wird die Idee der „Activity Specification“ nach USCHOLD et al. (1998) aufgegriffen und die Klassen `ObjectClass` und `ActivityClass` definiert. Beide Klassen ermöglichen die Modellierung von übergeordneten Gruppen über Prozessschritte und Objekte. Abbildung 5.6 zeigt die Klassenhierarchie der FLO.

Zentral für jede Ontologie ist die Grundklasse `Thing` von der alle Klassen abgeleitet sind. In der Sub-Stufe 2 der FLO wird für die Darstellung von Bauteilen die Unterklasse `Part` unter `MaterialObject` eingeführt, welche ein spezifisches

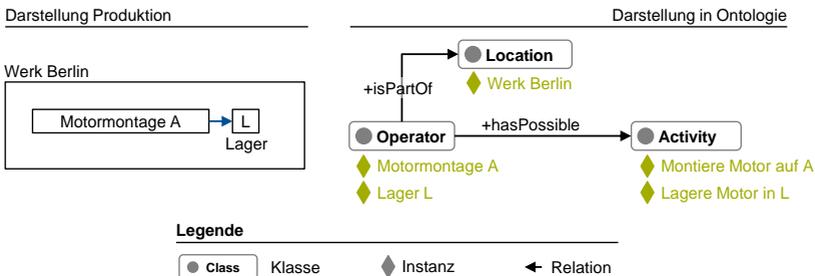


Abbildung 5.5: Exemplarische Instanziierung eines einfachen Materialflusses in OntoGPN.

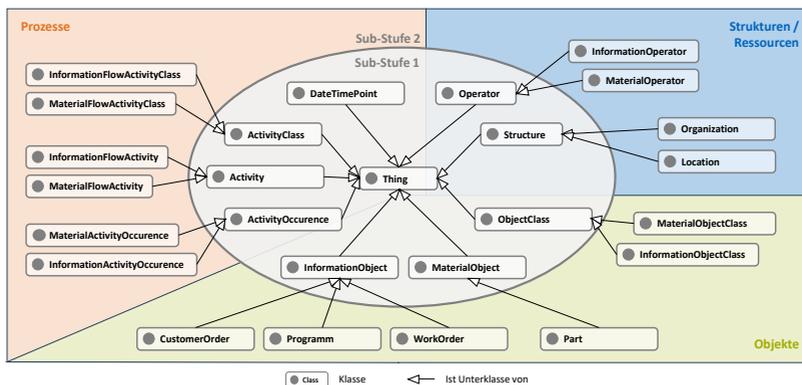


Abbildung 5.6: Klassenhierarchie der FLO.

Bauteil repräsentiert. Dem gegenüber steht die Klasse `MaterialObjectClass`, welche eine übergeordnete Bauteilfamilie beschreibt. Instanzen können unter anderem nach `MaterialObjectClass` Motoren in Vier-Zylinder- und Sechszylinder-Motoren unterscheiden, wobei ein spezifischer produzierter Motor eine Instanz der Klasse `Part` darstellt.

Das `InformationObject` wird durch die Definition von weiteren Unterklassen zu den FLO-Klassen detailliert. Diese Unterklassen modellieren Objekte des begleitenden und rückmeldenden Informationsflusses sowie Ein- und Ausgänge von Planungs- und Steuerungsprozessen. Eine detaillierte Beschreibung erfolgt in den Kapiteln 5.1.6 und 5.1.7.

Weiterführend wird in Anlehnung an GRUBIC et al. (2011) zwischen Informationsfluss und Materialfluss unterschieden. Diese Unterteilung erfolgt für die Klassen `Activity`, `ActivityOccurrence`, `ObjectClass` und `Operator`. Die Differenzierung auf FLO-Ebene erhöht die Klarheit und Eindeutigkeit in der Ontologie.

Die Abbildung der räumlichen Strukturen in GPN, also verschiedene Organisationen, Standorte und Produktionsressourcen innerhalb der Standorte, erfolgt über die Einführung der Klassen `Structure`, `Organization` und `Location`. Die Klasse `Structure` modelliert das Unternehmen als Organisation (`Organization`), integriert aber auch Standortinformationen (`Location`). Dies ermöglicht die Modellierung von Produktionsnetzwerken. Die Aufteilung in `Operator`, `Location` und `Organization` ermöglicht die Modellierung mehrerer Operatoren an einem Standort und mehrerer Standorte in einer Organisation oder einem Unternehmen. MÖNCH und STEHLI (2003) treffen eine ähnliche Unterscheidung zwischen dem Bereich der Struktur und den eigentlichen Betreibern, weshalb dieses Konzept übernommen wurde.

Mit der vorgestellten Klassenstruktur der FLO können Prozesse auf drei verschiedenen Ebenen modelliert werden, die Ebenen (1) der allgemeinen Prozessdefinition, (2) der Prozessdefinition in der GPN-Struktur und (3) der konkreten

Prozessausführung. Hierfür werden Relationen zwischen den Klassen eingeführt. Die Prozessmodellierung wird in Abbildung 5.7 dargestellt. In der Abbildung sind in Anlehnung an den exemplarischen Materialfluss aus Abbildung 5.5 auch die Instanzen auf jeder Ebene dargestellt.

Auf der ersten Ebene findet eine allgemeine Prozessdefinition statt. Dies geschieht durch Instanziierung der `ActivityClass`, die über die Relation `hasInput/hasOutput` einem allgemeinen Prozessteilnehmer der `ObjectClass` zugeordnet wird. Operatoren haben die Fähigkeit, bestimmte Prozesse auszuführen. Diese werden dem Operator über die Relation `hasCapability` zur `ActivityClass` zugewiesen.

Auf der zweiten Ebene findet die Prozessdefinition mit Bezug zur Struktur des GPN statt. Hier wird die Netzstruktur, die durch Instanzen der Klasse `Operator` dargestellt wird, mit der allgemeinen Prozessdefinition zusammengeführt. Das Ergebnis sind Instanzen der Klasse `Activity`. Dies ermöglicht die Unterscheidung, dass ein Operator zwar befähigt ist, einen auf der ersten Ebene definierten Prozess auszuführen, diesen Prozess aber im aktuellen Zustand des Netzwerks nicht ausführt. Beispielhaft kann in einem Netzwerk eine Montagelinie auch zur Montage von Sechs-Zylinder-Motoren genutzt werden, wird in der aktuellen Netzwerkplanung aber lediglich zur Produktion von Vier-Zylinder-Motoren verwendet.

Auf der dritten Ebene wird die konkrete Ausführung eines Prozesses mit einem bestimmten `MaterialObject` oder `InformationObject` zu einem bestimmten Zeitpunkt über `DateTimePoint` modelliert. Die Ausführungsebene basiert auf der Modellierung in PSL (SCHLENOFF et al. 2000), auf die an dieser Stelle verwiesen wird.

Mit der Modellierung in drei Ebenen werden mehrere Anforderungen erfüllt. Erstens ermöglicht diese Modellierung die Trennung von Prozessdefinition und Prozessausführung (siehe auch PSL (SCHLENOFF et al. 2000) und EO (USCHOLD et al. 1998)). Zweitens erlaubt diese Modellierung, die Beschreibung von Prozessen in der Ontologie flexibel und damit unabhängig von der Art des Netzes

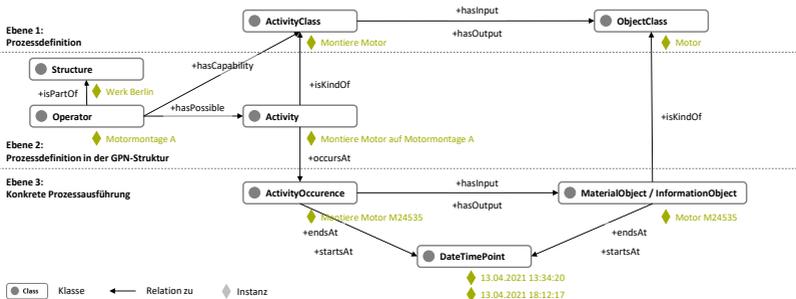


Abbildung 5.7: Modellierung von Prozessen auf verschiedenen Ebenen: FLO-Klassen mit Beziehungen und exemplarischen Instanzen.

und der Branche zu gestalten. Es ist im konkreten Anwendungsfall in einem Unternehmensnetzwerk nicht notwendig, neue Klassen in der Ontologie einzuführen, wie beispielsweise Produktfamilien oder Bauteilgruppen. Diese werden über Instanzen unter die entsprechenden -Class-Klassen abgebildet. Drittens ist die Trennung von allgemeiner Prozessdefinition und Prozessdefinition auf Netzwerkebene für die Modellierung unterschiedlicher Planungsprozesse notwendig. Der Planungsprozess der Netzwerkconfiguration verwendet unter anderem die allgemeine Prozessdefinition als Input für die Entscheidung, welcher Prozess von welchem Operator ausgeführt werden soll. Der Planungsschritt definiert also die Prozesse auf Netzwerkebene. Eine detaillierte Modellierung der Planungsprozesse ist in Abschnitt 5.1.7 beschrieben.

5.1.5 Abbildung des Materialflusses

Nachdem mit der FLO die grundlegende Klassenstruktur eingeführt und die Modellierung von Prozessen allgemein definiert wurde, kann die Ontologie auf der nächsten Stufe um die Spezifika der Auftragsabwicklung in GPN erweitert werden. Hierbei soll im Folgenden der Materialfluss in GPN detailliert werden. Dies beinhaltet die Modellierung von physischen Prozessen, der Netzwerkstruktur und von Bauteilen. Hierfür werden die Klassen der FLO durch abgeleitete Unterklassen ergänzt. Abbildung 5.8 zeigt die Klassen des Materialflusses mit Beziehungen zu den Klassen der FLO und ihren Relationen. Ebenso wird bereits die Verbindung zu den Klassen des Informationsflusses aufgezeigt, welche nachfolgend relevant wird.

Die Modellierung des Materialflusses beginnt mit der Unterteilung von physischen Prozessen in logistische Prozesse und Produktionsprozesse, um die Modellierung der spezifischen Eigenschaften von Logistik- und Produktionsprozessen

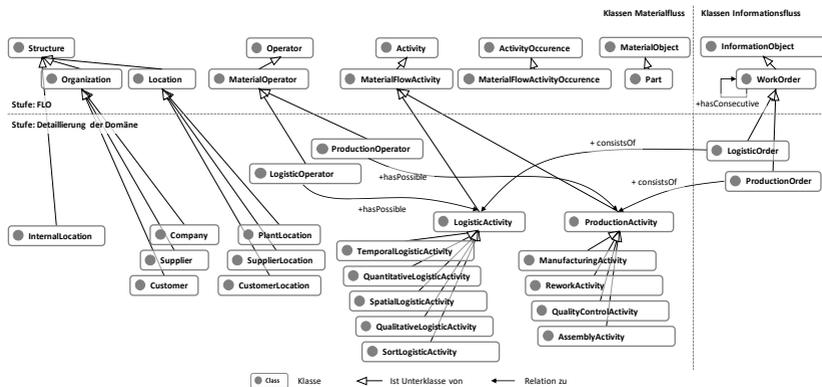


Abbildung 5.8: Detaillierung des Materialflusses mit Relationen und Bezug zu Klassen des Informationsflusses.

zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden entsprechende Unterklassen für Operatoren, der `ProductionOperator` und der `LogisticOperator`, und Materialflussaktivitäten, die `ProductionActivity` und die `LogisticActivity`, eingeführt. Diese Aktivitäten werden in weitere Unterklassen zur weiteren Spezifizierung der Prozesse unterteilt. Die Unterteilung in der Logistik orientiert sich an KLAUS et al. (2009) und KNÖSSL (2013), in der Produktion an SCHMIDT und SCHÄFERS (2017).

Um intralogistische Materialflussprozesse abzubilden, wird die Unterklasse `InternalLocation` unterhalb der `Structure` eingeführt (vgl. LIBERT et al. (2010), LEMAIGNAN et al. (2006)). Die `InternalLocation` beschreibt Bereiche innerhalb eines Standorts. Die Klasse `Operator` ist über die Relationen `hasStart/hasEnd` mit der `InternalLocation` verbunden, um Ortswechsel innerhalb eines Standorts (`Location`) beschreiben zu können.

Als verbindendes Element zwischen Material- und Informationsfluss dient die Klasse `WorkOrder` in Anlehnung an die Ontologie von MÖNCH und STEHLI (2003), ZAYATI et al. (2010) und OBITKO et al. (2010). `WorkOrder` entspricht einem spezifischen Arbeitsauftrag, der aus Planungs- und Steuerungsprozessen hervorgegangen ist. Der Auftrag bezieht sich auf die Ausführung einer `MaterialFlowActivity` über die Relation `consistsOf`. Ebenso erfasst die `WorkOrder` über die Relation zur Klasse `MaterialFlowActivityOccurrence` die Bestätigung der Ausführung der Aktivität. Die `WorkOrder` löst also nicht nur den Materialfluss aus, sie stellt auch das digitale Gegenstück zum tatsächlich transformierten Bauteil (`MaterialObject`) dar. Mit der Relation `hasConsecutiveWorkOrder` können Ketten von mehreren Aktivitäten gebildet werden (siehe NEGRI et al. (2015)). Entsprechend der Unterteilung im Materialfluss ist auch die `WorkOrder` in einen Produktionsauftrag (`ProductionOrder`) und einen Logistik- oder Transportauftrag (`LogisticOrder`) unterteilt. Die `WorkOrder` ist Teil des Informationsflusses, der im Folgenden beschrieben wird.

5.1.6 Abbildung des Informationsflusses

Wie bei der Modellierung des Materialflusses erfolgt die Abbildung des Informationsflusses in der Ontologie über die Einführung detaillierender Unterklassen unterhalb der `FLO`-Klassen. Dabei wird zunächst der begleitende Informationsfluss und dessen Kopplung an den Materialfluss gemäß Abbildung 5.8 beschrieben. Die weiteren Komponenten des Informationsflusses werden im Abschnitt 5.1.7 über die Modellierung der Planung und Steuerung genauer erläutert.

Die zentrale Klasse des begleitenden Informationsflusses ist der Arbeitsauftrag (`WorkOrder`). Die Verbindung zwischen Materialfluss und Informationsfluss erfolgt über eine datentechnische Rückmeldung, die z. B. das Scannen einer Komponente an einer bestimmten Position im Materialfluss sein kann. Dieser Rückmeldeprozess aktualisiert den begleitenden Informationsfluss und damit den Arbeitsauftrag. In der Ontologie werden diese Rückmeldeprozesse unter dem Begriff `InformationGathering` eingeführt und folgen der Prozessdarstellung

1. Die Modellierung einzelner Prozessschritte der Planung, zum Beispiel die Planung des Produktionsprogramms oder von Versandaufträgen.
2. Die Modellierung von ausgetauschten Informationen, z. B. das Produktionsprogramm oder ein Versandauftrag.
3. Die Modellierung, welche Informationen der Planungsprozess als Input benötigt und welche Informationen dieser als Planungsergebnisse ausgibt.

Aufgrund des prozessualen Charakters der PPS kann diese ebenfalls in die FLO eingegliedert werden. Die Planungsaufgaben werden zentral als Unterklassen der `InformationProcessingActivity`, also als unter dem Begriff der aktiven Informationsverarbeitung, modelliert (Unterklasse von `InformationFlowActivity`). Die ausgetauschten Daten werden in den Unterklassen der `InformationObjectClass` definiert. Die konkreten Planungsergebnisse, die bei der Ausführung von Planungsprozessen entstehen, werden als Unterklassen von `InformationObject` modelliert.

Der `InformationProcessingOperator` (Unterklasse von `Operator`) repräsentiert das entsprechende Informationssystem, in welchem der Planungsprozess ausgeführt wurde. Am Beispiel des Prozesses der „Produktionsprogrammplanung“ entspricht der `InformationProcessingOperator` dem Algorithmus oder Softwareprogramm der Produktionsprogrammplanung.

Im Gegensatz zum Materialfluss steht bei der Modellierung der PPS nicht die Möglichkeit der flexiblen Prozessdefinition im Vordergrund. Ziel ist es, die möglichen Prozessschritte der PPS mit ihren Abhängigkeiten direkt in die Ontologie einzubringen. Dabei stellen die PPS-Modelle von SCHUH und STICH (2012) und SCHMIDT und SCHÄFERS (2017) die Grundlage dar. In der Ontologie sind die Prozessschritte der PPS folglich entsprechend der Modelle vordefiniert.

Diese feste Prozessdefinition wird in der Ontologie umgesetzt, indem im Bereich der Planung und Steuerung vom FLO-Konzept der `InformationFlowActivityClass` abgewichen wird. Stattdessen werden die einzelnen Planungsaktivitäten der PPS als konkrete Unterklassen der `InformationProcessingActivity` modelliert. Die Ontologie spezifiziert somit die möglichen Planungsprozesse als Klassen, im Gegensatz zur Definition von Instanzen der `ActivityClass` im Materialfluss.

Darüber hinaus werden die Planungsprozesse über die Relation `isPlanningFor` auf die Struktur des GPN bezogen. Diese können Planungsergebnisse für einzelne Ressourcen (`MaterialOperator`) erzeugen, sich aber auch auf den Standort (`Location`) oder das gesamte Unternehmen (`Organization`) beziehen. Dies ermöglicht die Modellierung der Planung auf verschiedenen Planungsebenen, wie sie von SCHUH et al. (2012) durch die Unterteilung der PPS in Netzwerk- und Kernaufgaben gefordert wird.

Für die Modellierung in der Ontologie werden die in Kapitel 2.1.2 vorgestellten Aufgaben der PPS in eine prozessuale Darstellung mit zugehörigen Ein- und Ausgangsinformationen überführt. Abbildung 5.11 zeigt diese Zusammenhänge auf, wobei der Fokus auf der taktischen und operativen Planungsebene, entsprechend

auf den Kernaufgaben der PPS, liegt. Die ontologische Gestaltung in Form von Unterklassen der Prozessschritte sowie der entstehenden Informationen wird in Abbildung 5.12 dargestellt.

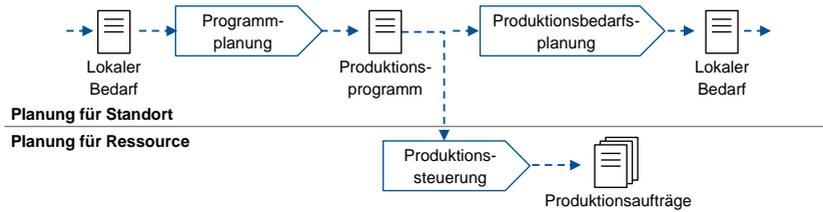


Abbildung 5.11: Prozessuale Darstellung der PPS-Aufgaben mit Ein- und Ausgangsinformationen.

Das Ergebnis der Kernaufgaben Produktionsprogrammplanung (Klasse LocalProductionPlanning) ist ein Produktionsprogramm für eine Bauteilart und einen Standort, welches die zu produzierenden Mengen je Bauteilvariante und Zeitraum den Produktionslinien am Standort zuweist (Klasse LocalProductionProgram). Als Eingangsinformation erhält die Produktionsprogrammplanung den lokalen Bedarf an Produktvarianten mit entsprechenden Kundeninformationen und Lieferterminen (Klasse LocalDemand). Zur Beschaffung für die Produktion notwendiger Vorprodukte greift die Produktionsbedarfsplanung (Klasse LocalDemandPlanning) auf das lokale Produktionsprogramm zu und löst es über Stücklisteninformationen in Bedarfe auf. Diese entsprechen wiederum lokalen Bedarfen der Bauteilarten der Vorprodukte, welche an die in- und externen Lieferanten weitergeleitet werden. Diese nutzen die Bedarfe wiederum als Eingangsinformation für ihre Produktionsprogrammplanung. Auf der Strukturstufe der einzelnen Produktionslinien überführt die Produktionssteuerung (Klasse ProductionControl) das Produktionsprogramm in einzelne Produktionsaufträge (Klasse WorkOrder). Die Planung der Logistik ist auf gleiche Weise modelliert, wobei die Bedarfsplanung hier nicht notwendig ist.

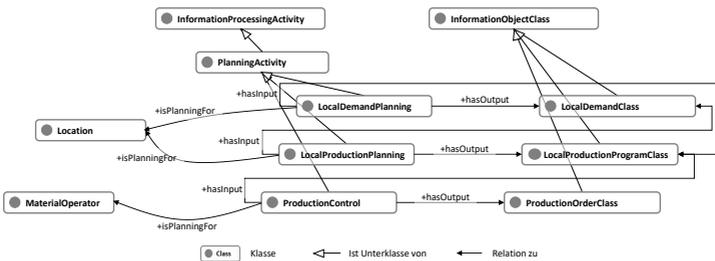


Abbildung 5.12: Ontologieklassen der PPS mit Relationen.

Durch die Modellierung der PSS stellt OntoGPN alle Bereiche der Auftragsabwicklung in GPN dar. OntoGPN dient damit als Grundlage für die weiteren Bestandteile von AutoGPN.

5.2 Entwicklung eines datenbasierten Abbilds von Produktionsnetzwerken

Nachdem die Prozesse der Auftragsabwicklung in GPN mit Hilfe der Ontologie OntoGPN allgemein beschrieben wurden, wird im zweiten Forschungsmodul dieser Arbeit die grundlegende Datenstruktur und Datenverarbeitungslogik entwickelt. Ziel ist es, mit dem datenbasierten Abbild des GPN eine fundierte Datenbasis über das reale Verhalten des GPN mit hohem Informationsgehalt zu schaffen, welches die Grundlage für die automatisierte Modellentwicklung und Parametrierung bildet. Ergebnisse des Forschungsmoduls sind zum einen die Methoden und Artefakte des AutoGPN-Prozessschrittes Datenidentifikation und -aufbereitung. Zum anderen wird mit dem Forschungsmodul das Teilziel 2 erreicht und die Forschungsfrage 2 beantwortet (siehe Abbildung 5.13).

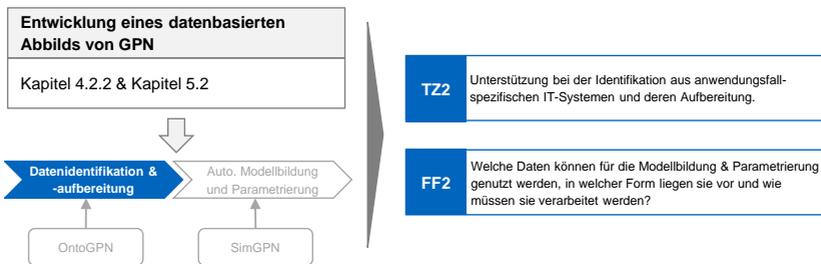


Abbildung 5.13: Forschungsmodul mit zugehörigem Teilziel und Forschungsfrage

Im Folgenden gliedert sich die Beschreibung des Forschungsmoduls nach den einzelnen Methoden und Artefakten des Prozessschrittes Datenidentifikation und -aufbereitung. Die Gliederung ist in Abbildung 5.14 dargestellt. Zunächst wird das entwickelte Datenmodell als Zieldatenstruktur für die Datenaufbereitung vorgestellt (2D). Anschließend wird der Datenverarbeitungsprozess, beginnend mit der Identifikation der Daten (2A) in IT-Systemen mit Hilfe der Ontologie OntoGPN, über die standardisierten Eingangsdatentabellen (2B), die als Schnittstelle zwischen Datenextraktion und -verarbeitung fungieren, bis hin zur automatisierten Datenverarbeitung (2C), die die Inhalte der Eingangsdatentabellen in die Zieldatenstruktur überführt, dargestellt.

5.2.1 Ziel-Datenstruktur

Wie in Kapitel 4.2.2 bereits beschrieben, sollen die Tracking- und Tracing-Daten gemeinsam mit produktionstechnischem Verständnis über die Abläufe in GPN zu einem strukturierten Datenmodell zusammengeführt werden. Da Tracking- und Tracing-Daten Rückmeldungen aus Produktions- und Logistikprozessen darstellen, muss auch die zu entwickelnde Datenstruktur eine Orientierung am Prozess

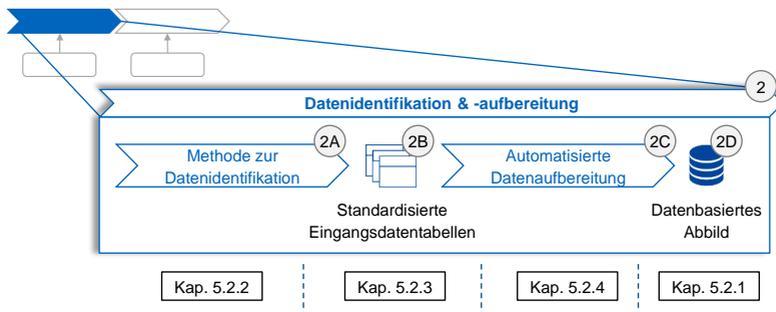


Abbildung 5.14: Aufgliederung des Kapitels zur Beschreibung der Entwicklung des Prozessschritts Datenidentifikation und -aufbereitung.

aufweisen. Hierfür bieten sich Eventlogs aus dem Bereich des Process Minings an, welche alle Aktivitäten, die eine Prozessinstanz ausführt, strukturiert speichern (VAN DER AALST 2016). GPN sind jedoch geprägt von mehreren Charakteristika, die sich mit der konventionellen Struktur für Eventlogs nicht abbilden lassen.

Eventlogs benötigen eine einheitliche Prozessinstanz, die eindeutig identifizierbar ist und den Prozess durchläuft. Im Produktionskontext ist dies meist ein einzelnes Bauteil, welches über seine eindeutige Seriennummer identifiziert wird. In GPN liegen aufgrund der verschiedenen Produktionsstufen auch mehrere Bauteilarten vor, die unterschiedliche Eigenschaften aufweisen und unterschiedliche Prozesse durchlaufen. In der Motorenproduktion werden beispielsweise Kurbelwellen und Zylinderköpfe im gleichen GPN produziert, wobei beide Bauteilarten eigene Eigenschaften aufweisen und in unterschiedlichen Prozessen bzw. Produktionslinien gefertigt werden. Eine einheitliche Definition einer Prozessinstanz ist somit schwierig. Eine Datenstruktur angepasst für den Einsatz in GPNs muss dieser Charakteristik Rechnung tragen.

Weiterhin sorgen konvergierende Materialflüsse durch Montageprozesse in GPN dafür, dass Prozessinstanzen sich im Laufe des Wertschöpfungsprozesses verändern und nicht mehr datentechnisch erfasst werden. Dies lässt sich anhand der beispielhaften Darstellung in Abbildung 5.15 verdeutlichen. Dabei werden zwei Bauteilarten (Typ 1 und Typ 2) in unterschiedlichen Fertigungsprozessen produziert und anschließend in einer Montagelinie zu einem Produkt montiert. Dabei erfolgt die Datenerfassung der Bauteile in der Fertigung auf Basis ihrer individuellen Seriennummern. Innerhalb und im Anschluss an die Montage wird nur noch die Seriennummer des Produkts erfasst, obwohl auch die beiden in das Produkt montierten Bauteile die nachfolgenden Prozessschritte durchlaufen. In der konventionellen Eventlog-Struktur lassen sich diese Übergänge in der Prozessinstanz nicht abbilden und erfordern eine Anpassung an die Prozesse in GPN.

Schließlich ist es gegenüber der ursprünglichen Vorgehensweise bei der Erstellung von Eventlogs notwendig, auch Prozessinstanzen mit einem noch nicht

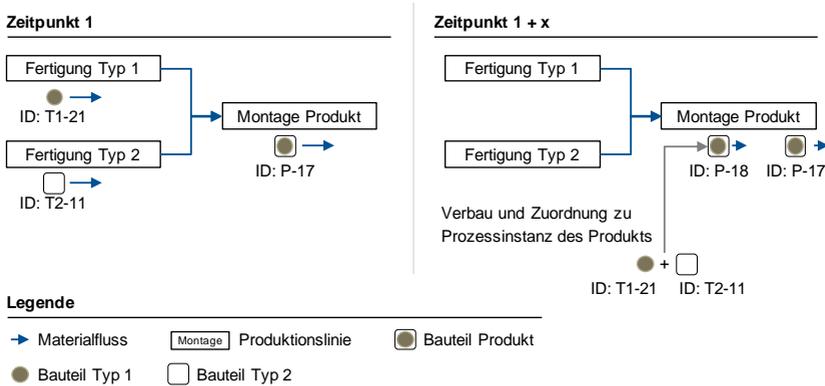


Abbildung 5.15: Beispielhafte Darstellung der variierenden Zuordnung zur übergeordneten Prozessinstanz über den Produktionsfortschritt.

vollständig abgeschlossenen Prozess in die Datenstruktur zu integrieren. Komponenten mit unvollständig abgeschlossenen Prozessen befinden sich zum Zeitpunkt der Analyse entweder noch in der Produktion und sind somit noch nicht zu einem fertigen Endprodukt mit Auslieferung an einen Kunden fortgeschritten oder die Prozesse wurden abgebrochen, was einer Verschrottung der Komponente gleichkommt. Erstere sind entscheidend für Analysen des aktuellen Zustandes des Netzwerkes und werden bei der Parametrierung des Simulationsmodells für die Initialisierung von Simulationsexperimenten mit den vorliegenden realen Gegebenheiten des Netzwerkes benötigt. Letztere sind insbesondere für eine historische Betrachtung aus Sicht des Produktions- und Logistiksystems von Interesse, da trotz Verschrottung des Bauteils dieses durch seine Produktion Kapazitäten im System belegt hat und ein Ausschluss dieser Prozesse Analysen zur Systemleistung verfälschen würde. Die Folge wären verfälschte Werte für wichtige Simulationsparameter wie Kapazitäten, Durchlaufzeiten und Ausschussraten. Die Datenstruktur für GPN muss daher auch Prozessinstanzen mit unvollständig abgeschlossenen Prozessen integrieren.

Um den beschriebenen Gegebenheiten zu genügen, wird die ursprüngliche Eventlog-Struktur zu einem Prozessdatenmodell, bestehend aus mehreren Tabellen, erweitert. Abbildung 5.16 zeigt das Prozessdatenmodell im Format eines UML-Diagramms exemplarisch für zwei Bauteilarten.

Der erste Schritt der Erweiterung des Eventlogs ist die Trennung von Aktivitäten (Tabelle ACTIVITIES) und Fällen (Tabelle CASES) in jeweils eigene Tabellen. Die Prozessinstanzen, die in GPN einzelne Bauteile, also Rohteile, Zwischen- oder Endprodukte, darstellen, werden in mehreren Tabellen, den bauteilartspezifischen Fall-Tabellen abgebildet. Hierfür wird für jede Bauteilart eine eigene Fall-Tabelle angelegt, in der jeweils auch bauteilartspezifische Attribute hinterlegt werden können. Das Attribut CaseID beschreibt hierbei die eindeutige Prozessinstanz, zu welchem das einzelne Bauteil zugehörig ist. Gleichzeitig wird

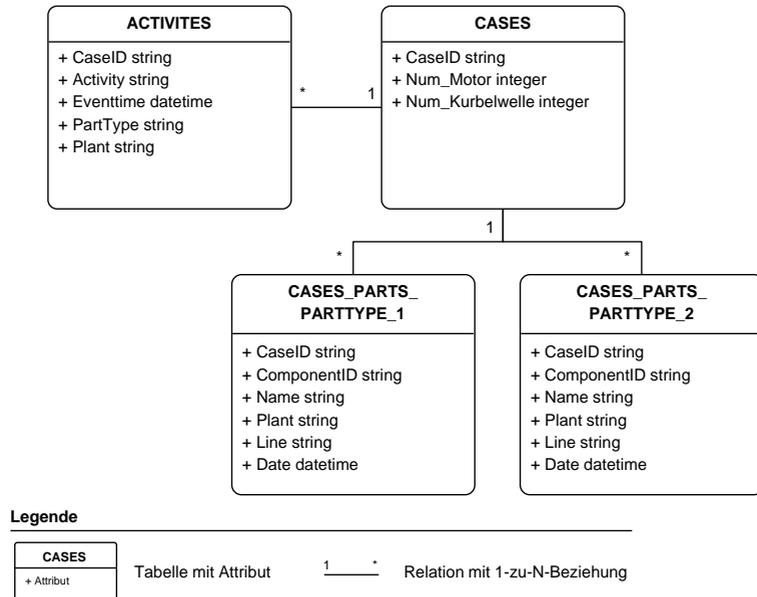


Abbildung 5.16: Prozessdatenmodell mit einzelnen Tabellen, Attributen und Relationen.

im Attribut `ComponentID` die Kennzeichnung des einzelnen Bauteils, also eine Serien- oder Identifikationsnummer, welche es eindeutig identifizierbar macht, abgespeichert. Weitere Eigenschaften, wie die Bezeichnung der Bauteilvariante (`Name`), des Werk (`Plant`) und der Produktionslinie (`Line`), auf denen das Bauteil produziert wurde sowie das Produktionsdatum (`Date`), der einzelnen Bauteile werden als Tabellenspalten in den bauteilspezifischen Fall-Tabellen hinterlegt.

Die `ACTIVITIES`-Tabelle enthält alle Rückmeldungen zu Prozessschritten mit einem Verweis auf die Prozessinstanz. Dabei wird die Prozessinstanz in der Spalte `CaseID`, die Bezeichnung der Aktivität in `Activity`, der Zeitpunkt des konkreten Auftretens (`Eventtime`), die Bauteilart der Prozessinstanz (`PartType`) und der Produktionsstandort (`Plant`), an dem die Aktivität aufgezeichnet wurde, hinterlegt.

Um die in GPN auftretenden konvergierenden Materialflüsse im Prozessdatenmodell abzubilden, müssen auch die Verbindungen zwischen den einzelnen Bauteilen im Datenmodell integriert werden. Hierfür wird mit der `CASES`-Tabelle eine übergeordnete Prozessinstanz eingeführt. Dabei entspricht jeder Eintrag der `CASES`-Tabelle einer Prozessinstanz, welche über das Attribut `CaseID` eindeutig identifizierbar ist und der über eine 1-zu-N-Beziehung zur `ACTIVITIES`-Tabelle alle zugehörigen Aktivitäten zugeordnet werden. Gleichzeitig werden den einzelnen Prozessinstanzen auch deren zugehörige Bauteile über alle Bauteilarten hinweg zugeordnet. Dies geschieht ebenso über 1-zu-N-Beziehungen zwischen

der CASES-Tabelle und den bauteilartspezifische CASES_PART-Tabellen. Dabei verweist jeder Eintrag der bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabellen genau auf einen Eintrag in der CASES-Tabelle. Die Einträge der CASES-Tabelle bieten somit eine übergeordnete Struktur, in der alle Subprozesse zur Produktion und Montage von Zwischen- und Endprodukten zu einer gemeinsame Prozessinstanz zusammengefasst werden. In der CASES-Tabelle ist zudem für jede Bauteilart eine Spalte Number definiert, welche als Zähler für die im übergeordneten Fall enthaltenen Teile pro Bauteilart agieren.

Die Zuordnung einzelner Bauteile zur übergeordneten Prozessinstanz variiert über deren Produktionsfortschritt. Abbildung 5.15 stellt diese Situation beispielhaft dar. Zum Zeitpunkt 1 befinden sich zwei Bauteile in der Fertigung und stellen eigenständige Prozessinstanzen dar. Jedes Bauteil erzeugt zunächst jeweils einen Eintrag in der bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabelle mit allen entsprechenden Eigenschaften und einen Eintrag in der übergeordneten CASES-Tabelle. Dabei ist der übergeordneten Prozessinstanz in erster Linie kein weiteres Bauteil zugeordnet. Werden die Bauteile nun in ein anderes Bauteil integriert, so ändert sich der Verweis auf die übergeordnete Prozessinstanz in der CASES-Tabelle. Die verbauten Bauteile verweisen nun auf die Prozessinstanz, also den Eintrag in der CASES-Tabelle, des Bauteils, in das sie verbaut wurden. Dies ist in Abbildung 5.15 auf der rechten Seite abgebildet. Die beiden einzelnen Bauteile aus den Fertigungslinien werden in der Montage zu einem Produkt, einem Bauteil mit eigener Identifikationskennzeichnung und Datenerfassung, montiert. Im Prozessdatenmodell werden damit die einzelnen Prozessinstanzen in der Prozessinstanz des Produkts zusammengefasst.

Gleichzeitig werden auch alle Aktivitäten, die die verbauten Bauteile bis zu diesem Zeitpunkt durchlaufen haben, aktualisiert, sodass sie auf die neue Prozessinstanz verweisen. Die ursprüngliche Prozessinstanz der verbauten Bauteile in der CASES-Tabelle ist überflüssig und wird entfernt. Der genaue Ablauf und dessen Implementierung wird in Kapitel 5.2.4 näher erläutert.

Mit dieser datentechnischen Modellierung werden auch Bauteile, die noch nicht zum Kunden ausgeliefert oder bereits bis zum Endprodukt prozessiert wurden, im Prozessdatenmodell mit allen Aktivitäten integriert. Auch Bauteile mit einem unvollständigen Prozess werden weiterhin als Prozessinstanz im datenbasierten Abbild des GPNs erfasst. Gleichzeitig ist mit dem entwickelten Prozessdatenmodell die Möglichkeit gegeben, alle Prozessschritte eines Zwischenprodukts, auch wenn es bereits in eine andere Komponente verbaut wurde, nachzuvollziehen. Somit ist für jedes Bauteil, welches in den IT-Systemen des GPNs erfasst wird, eine vollständige Rückverfolgung aller Prozessschritte in zeitlicher wie geografischer Dimension möglich. Hierdurch können alle Charakteristika von GPN im Prozessdatenmodell abgebildet werden.

5.2.2 Identifikation von Daten in IT-Systemen

Nachdem die Zieldatenstruktur erarbeitet und beschrieben wurde, muss sie in der AutoGPN-Anwendung mit Daten aus dem Informationssystem des betrachteten GPN gefüllt werden. Hierfür müssen zunächst die relevanten Rohdaten identifiziert werden. Innerhalb dieses Forschungsmoduls wird daher eine Methode entwickelt, die die Datenidentifikation unter Zuhilfenahme der Ontologie OntoGPN unterstützt. Als Wissensmodell gibt diese einen Überblick über die Zusammenhänge zwischen Produktions- und Logistikprozessen, der Entstehung von Tracking- und Tracing-Daten sowie deren Verarbeitungen in den IT-Systemen. Durch die Möglichkeit der Instanziierung bleibt das Wissensmodell jedoch nicht nur ein allgemeines Modell, sondern kann im Anwendungsfall mit den unternehmensspezifischen Prozessen, Bezeichnungen und Zusammenhängen angereichert werden.

Ziel der von AutoGPN bereitgestellten Methode ist es, die Instanziierung der Ontologie so anzuleiten, dass es zu einem strukturierten gemeinsamen Verständnis über die Verbindungen zwischen den physischen Produktions- und Logistikprozessen und den zugehörigen Datenerfassungsprozessen kommt. Im Anschluss können dann die, den Datenerfassungsprozessen zugehörigen IT-Systeme benannt werden. Die Methode und die einhergehende Instanziierung von OntoGPN wird hierfür im Anwendungsfall von einer Gruppe an Experten aus Produktion, Logistik und IT durchgeführt.

Die Methode hat die Kernidee, den Experten einen Leitfaden zur Instanziierung der Ontologie zu geben. Dabei wird schrittweise vom „Sichtbaren“, den physischen Strukturen, zum „Unsichtbaren“, den entstehenden Daten, vorgegangen, um stets den Bezug zum GPN zu halten. Die Methode gliedert sich in neun Schritte auf und wird in Abbildung 5.17 dargestellt. Das Ergebnis jedes Schritts ist die Instanziierung einer oder mehrerer Klassen oder Relationen von OntoGPN.

1. Definition von Bauteilarten. Im ersten Schritt der Methode werden zunächst alle zu betrachtenden Bauteilarten, also Komponenten, Zwischenprodukte oder Produkte, die im GPN produziert werden, identifiziert und als Instanzen der Klasse `Part` in die Ontologie eingebracht.

2. Definition von physischen Strukturen. Im zweiten Schritt werden die physischen Strukturen des betrachteten GPNs identifiziert. Dies sind zum einen die Werksstandorte, die als Instanzen der Klasse `Location` integriert werden, sowie Produktionslinien und Lager (Instanzen der Klasse `MaterialOperator`) als Ausführungsorte von Prozessen.

3. Definition von physischen Prozessen. Im dritten Schritt werden alle physischen Prozesse wie Produktion bzw. Fertigung einzelner Bauteilarten sowie Transporte definiert. Ergebnis des Prozessschritts sind Instanzen der Klasse `MaterialFlowActivity`.

4. Zuordnung Prozesse zu physischen Strukturen. Im vierten Schritt werden die zuvor definierten Prozesse im GPN verortet, indem die in OntoGPN definier-

Prozessschritte		Ergebnisse
1	Definition von Bauteilarten Komponenten, Zwischenprodukte, Produkt	Instanziierung der Klasse <code>Part</code>
2	Definition physischer Strukturen Werke, Linien, Lager	Instanziierung der Klassen <code>Location</code> und <code>MaterialOperator</code>
3	Definition von physischen Prozessen Produktion Bauteil A, Fertigung Bauteil B, Transport	Instanziierung der Klasse <code>MaterialFlowActivity</code>
4	Zuordnung Prozesse zu physischen Strukturen Produktion Bauteil A, Fertigung Bauteil B, Transport	Relation zw. Instanzen von phy. Prozessen und physischen Strukturen
5	Definition Relationen zwischen Prozessen Input-Output-Beziehungen, Lieferbeziehungen	Relation zw. Instanzen von phy. Prozessen
6	Definition Datenerfassungsprozesse Scan-Prozesse, Zählpunkte	Instanziierung der Klasse <code>InformationGatheringActivity</code>
7	Definition Relationen phy. Prozesse zu Datenerf. Datenerfassung an Start und Ende jedes Prozesses	Relation zw. Instanzen von phy. Prozessen und Datenerfassungsprozessen
8	Definition Systeme der Datenerfassungsprozesse Bauteil-Scan zu Beginn von Fertigung Bauteil B	Instanziierung der Klasse <code>InformationOperator</code> (= IT-Systeme)
9	Definition Relationen Erfassungspro. und System Bauteil-Scan zu Beginn von Fertigung Bauteil B	Relation zw. Instanzen von Datenerfassungsprozessen und Systemen

Abbildung 5.17: Schritte der Methode zur Datenidentifikation mit den jeweiligen Ergebnissen der einzelnen Schritte.

ten Relationen zwischen den Instanzen der Prozesse und den Instanzen der Strukturen instanziiert werden.

5. *Definition Relationen zwischen Prozessen.* Im fünften Schritt werden die Prozesse untereinander, ebenfalls über die Instanziierung der Relationen entsprechend des Materialflusses vernetzt.

6. *Definition Datenerfassungsprozesse.* Im sechsten Schritt erfolgt die Benennung von Datenerfassungsprozessen, wobei sich auf die in OntoGPN angegebenen Erfassungsprozesse zu Beginn und zum Ende eines physischen Prozesses sowie beim Verbau von Bauteilen beschränkt werden kann. Das Ergebnis ist die Instanziierung der Klasse `InformationGatheringActivity`.

7. *Definition Relationen physische Prozesse und Datenerfassungsprozesse.* Wie bereits in vorgelagerten Schritten werden in diesem Schritt über Relationen die logischen Verbindungen zwischen Datenerfassungsprozessen und physischen Prozessen identifiziert und in OntoGPN definiert. Das Ergebnis ist eine vollständige Beschreibung, welche Datenerfassungsprozesse für welchen Produktions- oder Logistikprozess existieren und wie diese beschaffen sind.

8. *Definition Systeme der Datenerfassungsprozesse.* Im vorletzten Schritt werden die existierenden IT-Systeme benannt, die die Datenerfassungsprozesse ausführen. Ergebnis sind Instanzen der Klasse `InformationOperator`.

9. *Definition Relationen Datenerfassungsprozesse und Systeme.* Im letzten Schritt erfolgt die Verbindung von Datenerfassungsprozessen mit den zugehörigen IT-Systemen in Form von instanziierten Relationen.

Ergebnis ist eine für den Anwendungsfall instanziierte Ontologie `OntoGPN`, die die Verbindungen von physischen Prozessen und Datenerfassungsprozessen mit samt deren IT-Systemen exakt benennt und beschreibt. Aufgabe der IT-Experten ist im nächsten Schritt der Export der Daten aus den Systemen, um diese für die automatisierte Modellbildung und Parametrierung von Simulationsmodellen zu nutzen. Zur Unterstützung des Exports und als Schnittstelle zu den nachfolgenden Schritten werden im Folgenden die standardisierte Eingangstabelle dargestellt.

5.2.3 Standardisierte Eingangstabelle

Die Eingangstabelle entkoppeln die Anwendermethodik von `AutoGPN` von den im Anwendungsfall eingesetzten IT-Systemen. Sie dienen als Schnittstelle zwischen den manuellen und automatisierten Bestandteilen des Ansatzes. Die Schnittstelle besteht aus vier anwendungsfallunabhängigen Eingangstabellen und einer variablen Anzahl an Tabellen, entsprechend einer Tabelle je Bauteilart im Anwendungsfall. In Abbildung 5.18 werden die Eingangstabellen für einen Anwendungsfall mit zwei Bauteilarten (Parttype 1 und Parttype 2) dargestellt. Weiterhin kann man zwischen Eingangstabellen unterscheiden, die mit Bewegungsdaten aus den Informationssystemen gespeist werden, und zwei Definitionstabellen, in denen Spezifika des Anwendungsfalles integriert und Informationen hinterlegt werden, die für die Standardisierung der Aktivitäten über verschiedene Standorte und IT-Systeme hinweg notwendig sind. Im Folgenden werden die einzelnen Tabellen vorgestellt, wobei für jedes Tabellenattribut die Verbindung zur Ontologie hergestellt wird.

Die Tabellen mit dem Präfix `PARTS` sind die Schnittstelle für die Aufnahme von Bauteildaten. Wie bei der Entwicklung des Ziel-Datenmodells beschrieben, stellen die einzelnen Bauteile, die im `GPN` produziert und transportiert wurden, die Prozessinstanzen und damit aus Eventlog-Sicht die Fälle des ablaufenden Prozesses dar. In `OntoGPN` entsprechen die Einträge in die Bauteil-Tabellen den einzelnen Instanzen der Klasse `Part` als Unterklasse des `MaterialObject`.

Für jede Bauteilart wird eine `PARTS`-Tabelle erstellt und mit den Informationen zu jedem einzelnen Bauteil angereichert. Dabei stellen die Spalten der Tabelle die notwendigen Attribute dar, die in den Folgeschritten zur Modellbildung und Parametrierung benötigt werden. Jedes Bauteil wird mit seiner eindeutigen Identifikationskennzeichnung (Spalte `PartID`) und seiner Variantenbezeichnung (Spalte `Name`), in der Industrie oft Materialnummer oder Sachnummer genannt,

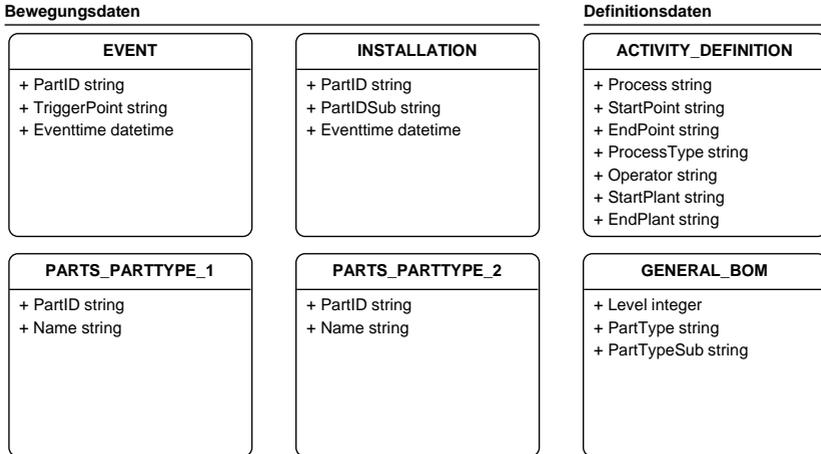


Abbildung 5.18: Übersicht über die Eingangsdatentabellen.

in der Tabelle hinterlegt. Tabelle 5.2 zeigt die Spalten der Bauteil-Tabelle, deren Datentypen sowie deren Verortung in der Ontologie.

Die Verbaubeziehungen zwischen einzelnen Bauteilen werden in der Eingangsdatentabelle *INSTALLATION* erfasst (Tabelle 5.3). In tabellarischer Form setzen sich Tracking-Daten aus drei Informationen zusammen: (1) Dem übergeordneten Bauteil (Spalte *PartID*), in welches (2) das untergeordnete Bauteil (Spalte *PartIDSub*) zu (3) einem gewissen Zeitpunkt (Spalte *Eventtime*) verbaut wird. Werden in ein Bauteil mehrere untergeordnete Bauteile verbaut, resultiert dies für jede Verbaubeziehung in einer Tabellenzeile. Ontologisch sind die Verbaubeziehungen über die Ausführung eines Materialflussprozesses (*MaterialFlowActivityOccurence*), welcher über die Relation *hasInput* eine beliebige Anzahl an konkreten Bauteilen (*PART*) und über die Relation *hasOutput* das übergeordnete Teil zugeordnet werden.

Tracing-Daten werden in tabellarisierter Form in der *EVENTS*-Tabelle abgebildet (Tabelle 5.4). Entsprechend der ontologischen Darstellung stellen Tracing-Daten die Ausführung einer Rückmeldeaktivität, also einer *InformationGatheringActivityOccurence*, dar. Die Rückmeldung vereint dabei drei Attribute in sich: (1) die Identifikationskennzeichnung des Bauteils (Spalte *PartID*), welches die

Tabelle 5.2: Eingangsdatentabelle *PARTS*.

Spalte	Attribute	Datentyp	Ontologie
1	<i>PartID</i>	<i>string</i>	<i>Part has ID</i>
2	<i>Name</i>	<i>string</i>	<i>Part is_kind_of MaterialObjectClass</i>

Tabelle 5.3: Eingangsdatentabelle INSTALLATION.

Spalte	Attribute	Datentyp	Ontologie
1	PartID	<i>string</i>	MaterialFlowActivity hasOutput Part has ID
2	PartIDSub	<i>string</i>	MaterialFlowActivity hasInput Part has ID
3	Eventtime	<i>datetime</i>	MaterialFlowActivityOccurrence startsAt DateTimePoint

Rückmeldung auslöst, den zugehörigen Punkt (Spalte *TriggerPoint*), an dem die Rückmeldung passiert, und der Zeitpunkt der Rückmeldung (Spalte *Eventtime*). In der industriellen Praxis sind den Tracing-Daten häufig auch weitere Attribute, wie Messwerte oder Prüfergebnisse, zugeordnet, welche für den hier entwickelten Ansatz jedoch nicht relevant sind. Die genutzten Attribute stellen somit die minimalen Anforderungen an Rückmeldedaten, wodurch von einer großen Verbreitung über in der Industrie eingesetzte IT-System ausgegangen werden kann.

Tabelle 5.4: Eingangsdatentabelle EVENTS.

Spalte	Attribute	Datentyp	Ontologie
1	PartID	<i>string</i>	InformationGatheringActivityOccurrence hasParticipant Part has ID
2	TriggerPoint	<i>string</i>	InformationGatheringActivityOccurrence isOccurrenceOf InformationGatheringActivity
3	Eventtime	<i>datetime</i>	InformationGatheringActivityOccurrence occurrencesAt DateTimePoint

Um ein umfassendes datenbasiertes Abbild des GPN aufzubauen, welches die Daten für die automatisierte Modellbildung und Parametrierung liefert, müssen die einzelnen Rückmeldedaten den zugehörigen Prozessschritten im Materialfluss zugeordnet werden. Die Eingangsdatentabelle *ACTIVITY_DEFINITION*, detailliert in Tabelle 5.5, stellt die Schnittstelle für diese Zuordnung dar. Jeder Aktivität (Spalte *Process*), abgebildet durch die Ontologie-Klasse *MaterialFlowActivity*, kann ein Startpunkt (Spalte *StartPoint*) und ein Endpunkt (Spalte *EndPoint*) zugeordnet werden, an denen Tracing-Daten entstehen. Diese Erfassungsvorgänge für die Tracing-Daten, in der Ontologie repräsentiert durch *InformationGatheringActivity*, stellen die Verbindung zu den einzelnen, im Betrieb ausgeführten Rückmeldungen der *EVENTS*-Tabelle dar. Für eine algorithmische Weiterverarbeitung ist zudem noch die Kategorisierung des Prozessschritts, also ob es sich um eine Produktionsaktivität, wie Montage oder Fertigung, oder eine Logistikaktivität, wie Lagerung oder Versand, handelt. Dies

entspricht der weiteren Untergliederung der Ontologie-Klasse `MaterialFlowActivity` in verschiedene Unterklassen (vergleiche Abbildung 5.8). Die Kategorie des Prozessschritts wird in der Spalte `ProcessType` erfasst. Weiterhin ist jedem Prozessschritt eine ausführende Ressource (Spalte `Operator`), also eine bestimmte Produktionslinie oder ein Lager, zugeordnet. Ergänzt wird die Information zum Operator noch durch die Angabe seiner Standortinformationen. Jedem Operator sind dabei zwei Standorte, der Standort an dem der Operator mit der Prozessausführung beginnt (Spalte `StartPlant`) und an dem diese endet (Spalte `EndPlant`). Für Produktionslinien stellt dies jeweils den gleichen Produktionsstandort dar. Der Zwischenwerksversand, in der Ontologie eine Unterklasse des `LogisticOperator`, hingegen hat Start- und Endpunkt in unterschiedlichen Werken.

Tabelle 5.5: Eingangsdatentabelle `ACTIVITY_DEFINITION`.

Spalte	Attribute	Datentyp	Ontologie
1	<code>Process</code>	<i>string</i>	<code>MaterialFlowActivity</code> has name
2	<code>StartPoint</code>	<i>string</i>	<code>MaterialFlowActivity</code> hasStartAt InformationGatheringActivity
3	<code>EndPoint</code>	<i>string</i>	<code>MaterialFlowActivity</code> hasEndAt InformationGatheringActivity
5	<code>ProcessType</code>	<i>string</i>	Unterklasse von <code>MaterialFlowActivity</code>
5	<code>Operator</code>	<i>string</i>	<code>MaterialFlowActivity</code> isPerformedBy Operator
6	<code>StartPlant</code>	<i>string</i>	Operator startsAt Location
7	<code>EndPlant</code>	<i>string</i>	Operator endsAt Location

Als weitere Information für die algorithmische Weiterverarbeitung der Daten benötigen die nachfolgenden Verarbeitungsschritte noch Daten über die allgemeine Verknüpfung der einzelnen Bauteilarten in Form einer allgemeinen Stückliste. Die Eingangsdatentabelle `GENERAL_BOM` spiegelt die Verbaurelationen zwischen den einzelnen Teilearten wider (siehe Tabelle 5.6). Jede Verbaurelation ist als Zeile dargestellt, wobei in die Spalte `PartType`, die übergeordnete Bauteilart und in `PartTypeSub` die zu verbauende Bauteilart erfasst wird. In der Spalte `Level` wird die Strukturstufe der Bauteile angegeben, wobei diese vom Endprodukt aus aufsteigend gezählt wird. Werden beispielsweise für die Montage eines Motors ein Zylinderkopf und ein Shortblock benötigt, so resultiert dies in zwei Einträgen in der `GENERAL_BOM`-Tabelle, jeweils mit dem Eintrag `Motor` in der Spalte `PartType` sowie in einer Zeile `Zylinderkopf` in der Spalte `PartTypeSub` und der anderen Zeile `Shortblock` in der `PartTypeSub`. Da Motoren das Endprodukt im betrachteten Netzwerk darstellen, ist eine 1 in beiden Zeilen für die Strukturstufe einzutragen.

Tabelle 5.6: Eingangsdatentabelle GENERAL_BOM

Spalte	Attribute	Datentyp	Ontologie
1	Level	<i>integer</i>	
2	PartType	<i>string</i>	
3	PartTypeSub	<i>string</i>	

5.2.4 Datenverarbeitung

Durch die Eingangsdatentabellen ist zwar eine grundsätzliche Struktur für die Rohdaten vorhanden, diese bilden in der vorliegenden Form jedoch noch kein Datenkonstrukt, welches die effiziente Analyse der zusammenhängenden Produktions- und Logistikprozesse über Produktionsstufen und Werksgrenzen hinweg ermöglicht. Für die Überführung der Rohdaten in das datenbasierte Abbild des GPNs als Zieldatenstruktur werden in diesem Forschungsmodul drei Algorithmen entwickelt.

Algorithmus 1, die Initialisierung der Fall-Tabellen, legt für jedes Bauteil in den Rohdaten eine Prozessinstanz mitsamt zugehörigen Attributen an. Algorithmus 2, die Ermittlung von Verbaurelationen, verbindet Prozessinstanzen miteinander. Algorithmus 3, die Initialisierung der Aktivitäten-Tabelle, identifiziert alle durchlaufenen Prozessschritte je Bauteil und ordnet diese der Prozessinstanz zu. In Abbildung 5.19 sind die Algorithmen in Form eines Datenflussdiagramms dargestellt, inklusive ihrer Beziehungen zueinander, zu den Eingangsdaten und dem resultierenden Prozessdatenmodell. Im Folgenden werden die Algorithmen detailliert beschrieben.

Der erste Schritt ist das Erzeugen und Befüllen der CASES-Tabelle und der bauteilspezifischen CASES-Tabellen im Prozessdatenmodell, welches über den Algorithmus 1 automatisiert wird.

Entsprechend der im Anwendungsfall vorkommenden unterschiedlichen Bauteilarten werden zunächst für jede Bauteilart eine bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabelle mit den grundlegenden Spalten CaseID, ComponentID, Name, Plant, Line und Date angelegt. Anhand der Informationen aus den PARTS-Tabellen der Eingangsdatentabellen werden anschließend die zugehörigen bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabellen angereichert. Für die Bestimmung der Produktionslinie, des Produktionswerks und des Produktionsstartdatums wird die erste Produktionsaktivität jedes Bauteils und die entsprechende Definitionstabelle ACTIVITY_DEFINITION verwendet. Für jedes Bauteil wird neben dem Eintrag in der bauteilspezifischen CASES_PART-Tabelle auch ein Eintrag in der übergeordneten CASES-Tabelle angelegt. Ergebnis des ersten Schritts ist die Abbildung jedes in den Eingangsdatentabellen vorkommenden Bauteils mit seinen Eigenschaften im Prozessdatenmodell, wobei jedes Bauteil noch als eigenständig und nicht in ein anderes Bauteil integriert betrachtet wird. Ebenso besteht umgekehrt auch noch keine Beziehung zu den Komponenten, die in ein Bauteil verbaut wurden.

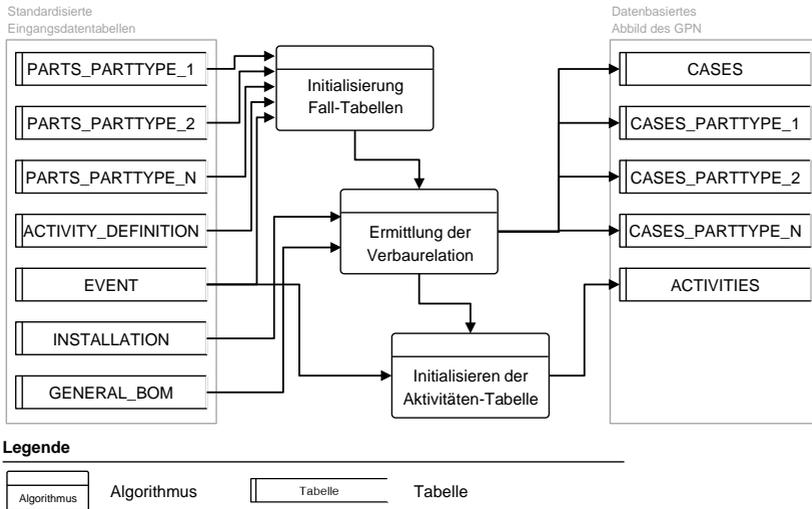


Abbildung 5.19: Datenflussdiagramm für die Datenverarbeitung von den standardisierten Eingangsdatentabellen bis zum datenbasierten Abbild.

Die Informationen über Verbaubeziehungen werden im zweiten Schritt, dargestellt in Algorithmus 2, in das Prozessdatenmodell integriert. Grundgedanke ist es, mit Hilfe der Tracing-Daten, die ein übergeordnetes Bauteil mit verbauten, untergeordneten Bauteilen verknüpfen, die Verbindung zwischen bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabellen und übergeordneter CASES-Tabelle zu aktualisieren.

Gemäß den Daten aus der INSTALLATION-Tabelle wird das untergeordnete Bauteil, welches in der Spalte PartIDSub angegeben ist, mit dem übergeordneten Bauteil, angegeben in Spalte PartID, verknüpft. Dies geschieht durch eine Aktualisierung der Spalte CaseID in der bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabelle des untergeordneten Bauteils, wobei deren Wert auf die CaseID des übergeordneten Bauteils gesetzt wird. Auf den ursprünglichen Eintrag des verbauten Bauteils in der CASES-Tabelle ist dieses nun nicht mehr verlinkt, weshalb der Eintrag gelöscht werden kann. Abbildung 5.20 visualisiert exemplarisch den Verbau eines Teiles in ein übergeordnetes Bauteil und zeigt die Änderung im Verweis auf die übergeordnete Prozessinstanz.

Zur Abbildung der Verbaubeziehungen über mehrere Produktionsstufen erfolgt der Prozess zur Aktualisierung der Verbindungen im Prozessdatenmodell vom Endprodukt aus über die Lieferkette zu den Rohteilen hin, sodass immer nur Aktualisierungen in den Tabellen der verbauten Bauteile erfolgen müssen.

Im dritten Schritt erfolgt die Initialisierung der ACTIVITIES-Tabelle und deren Belegung mit Werten. Das Vorgehen ist in Algorithmus 3 dargestellt.

Die Tracing-Rohdaten sind in der Tabelle EVENTS der Eingangsdatentabellen hinterlegt, wobei sich die einzelnen Aktivitäten auf die Identifikationsnummern

Algorithmus 1 Initialisierung der Fall-Tabellen.

Input: Aufzählung der Bauteilarten $\langle \theta_1, \dots, \theta_N \rangle$
Input: EVENTS-Tabelle als E
Input: PARTS-Tabellen als $\langle P_{\theta_1}, \dots, P_{\theta_N} \rangle$
Input: ACTIVITY_DEFINITION-Tabelle als A
Input: Leere CASES-Tabelle C
Input: Leere CASES_PART-Tabellen $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$
Output: Initialisierte CASES-Tabelle C
Output: Initialisierte CASES_PART-Tabellen $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$

- 1: \triangleright Erzeuge Struktur der Tabelle C
- 2: Initialisiere C mit der Spalte CaseID
- 3: Füge eine Spalte Number_ θ pro Bauteilart θ in $\langle \theta_1, \dots, \theta_N \rangle$ zu C hinzu
- 4: **for all** P_θ in $\langle P_{\theta_1}, \dots, P_{\theta_N} \rangle$ **do**
- 5: \triangleright Erzeuge Struktur der Tabellen CC_θ
- 6: Initialisiere CC_θ mit den Spalten CaseID, ComponentID, Plant, Line, Date
- 7: Date
- 8: **for each** Zeile R von P_θ **do**
- 9: \triangleright Befülle CC_θ unter Verwendung von P_θ
- 10: $CC_i(\text{CaseID}) \leftarrow R(\text{PartID})$
- 11: $CC_\theta(\text{ComponentID}) \leftarrow R(\text{PartID})$
- 12: Finde chronologisch ersten Eintrag z in E bei dem gilt $E(\text{PartID}) = R(\text{PartID})$
- 13: $R(\text{PartID})$
- 14: Finde Eintrag y in A bei dem gilt $A(\text{StartPoint}) = z(\text{TriggerPoint})$
- 15: $CC_i(\text{Date}) \leftarrow z(\text{Eventtime})$
- 16: $CC_i(\text{Line}) \leftarrow y(\text{Operator})$
- 17: $CC_i(\text{Plant}) \leftarrow y(\text{StartPlant})$
- 18: \triangleright Befülle C unter Verwendung von P_θ
- 19: $C(\text{CaseID}) \leftarrow P(\text{PartID})$
- 20: Setze $C(\text{Number}_\theta)$ entsprechend der Bauteilart θ von P_θ auf 1

der ausführenden Bauteile beziehen. Um die Aktivitäten eines Roh- oder Zwischenprodukts dem entsprechenden übergeordneten Bauteil zuzuordnen, müssen die Daten aus der EVENTS-Tabelle mit den Daten der bauteilartspezifischen CASES_PART-Tabellen verknüpft werden. In die ACTIVITIES-Tabelle des Prozessdatenmodells werden dann nicht mehr die Identifikationskennzeichen des ausführenden Bauteils mit der Aktivität verknüpft, sondern deren übergeordnete CaseID. Um die Bezeichnungen der Aktivitäten über die Standorte im GPN und verschiedenen technischen Bezeichnungen in deren Informationssystemen zu standardisieren, wird diese aus Definitionstabelle ACTIVITY_DEFINITION bezogen. Handelt es sich beim Zählpunkt um den Start- bzw. Endpunkt der Aktivität, so wird der Aktivitätsbezeichnung ein „Start“ bzw. „Ende“ vorangestellt.

Algorithmus 2 Ermittlung der Verbaurelationen.

Input: INSTALLATION-Tabelle als I
Input: GENERAL_BOM-Tabelle als B
Input: PARTS-Tabellen als $\langle P_{\theta_1}, \dots, P_{\theta_N} \rangle$
Input: Initialisierte CASES-Tabelle C
Input: Initialisierte CASES_PART-Tabellen $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$
Output: Aktualisierte CASES-Tabelle C
Output: Aktualisierte CASES_PART-Tabellen $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$

- 1: Sortiere B nach $B(\text{Level})$ und $B(\text{PartType})$ absteigend
- 2: **for each** Untergeordnete Bauteilart θ_{SUB} pro Bauteilart θ_{UP} in B **do**
- 3: **for each** Zeile R in I **do**
- 4: Finde Fall des übergeordneten Bauteils x_{UP} in $CC_{\theta_{\text{UP}}}$ bei dem
- 5: $CC_{\theta_{\text{UP}}}(\text{ComponentID}) == R(\text{PartID})$
- 6: Finde Fall des untergeordneten Bauteils x_{SUB} in $CC_{\theta_{\text{SUB}}}$ bei dem
- 7: $CC_{\theta_{\text{SUB}}}(\text{ComponentID}) == R(\text{PartIDSub})$
- 8: Aktualisiere $x_{\text{SUB}}(\text{CaseID}) \leftarrow x_{\text{UP}}(\text{CaseID})$
- 9: Finde Fall des übergeordneten Bauteils y_{UP} in C bei dem $C(\text{CaseID})$
- 10: $== x_{\text{UP}}(\text{CaseID})$
- 11: Addiere 1 zu $y_{\text{UP}}(\text{Number}_{\theta_{\text{SUB}}})$
- 12: Finde Fall des untergeordneten Bauteils y_{SUB} in C bei dem $C(\text{CaseID})$
- 13: $== x_{\text{SUB}}(\text{ComponentID})$ und lösche diesen aus C

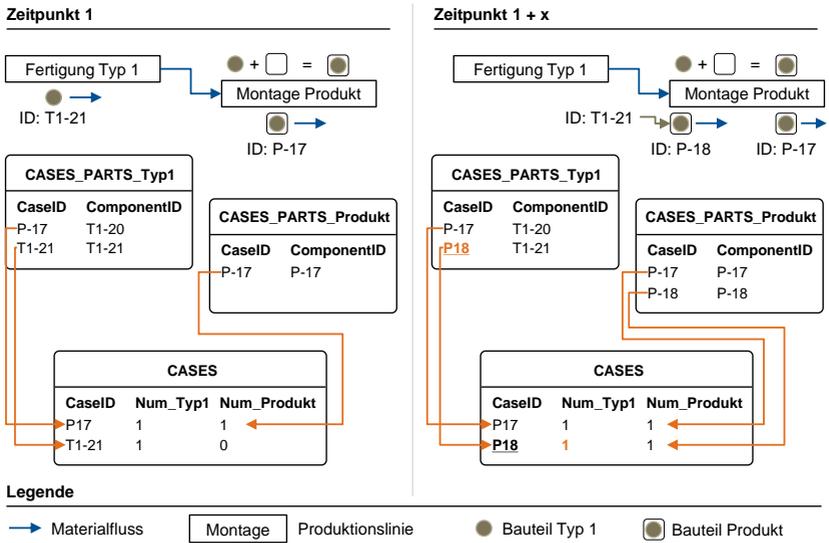


Abbildung 5.20: Exemplarische Darstellung für die datentechnische Änderung der Prozessinstanz bei Teileverbau.

Algorithmus 3 Initialisieren der Aktivitäten-Tabelle.

Input: EVENTS-Tabelle als E
Input: ACTIVITY_DEFINITION-Tabelle als T
Input: CASES_PART-Tabellen als $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$
Output: Befüllte ACTIVITIES-Tabelle als A

- 1: **for each** CASES_PART-Tabelle CC in $\langle CC_{\theta_1}, \dots, CC_{\theta_N} \rangle$ **do**
- 2: \triangleright Finde alle Aktivitäten zu Fällen der Bauteilart
- 3: Verbinde EVENTS E mit CC über $E(\text{PartID}) = CC(\text{ComponentID})$
- 4: \triangleright Füge weitere Information von T hinzu.
- 5: \triangleright Verbinde zunächst alle Start-Aktivitäten.
- 6: Verbinde Ergebnis mit T über $E(\text{TriggerPoint}) = T(\text{StartPoint})$
- 7: \triangleright Befülle A
- 8: $A(\text{CaseID}) \leftarrow CC(\text{CaseID})$
- 9: \triangleright Benennung der Aktivität: Start des Prozessschritts
- 10: $A(\text{Activity}) \leftarrow \text{„Start“} + T(\text{Process})$
- 11: $A(\text{Eventtime}) \leftarrow E(\text{Eventtime})$
- 12: $A(\text{PartType}) \leftarrow$ Bauteilart θ von CC
- 13: $A(\text{Plant}) \leftarrow \theta$ von $T(\text{StartPlant})$
- 14: \triangleright Verbinde nun alle Ende-Aktivitäten.
- 15: Verbinde Ergebnis mit T über $E(\text{TriggerPoint}) = T(\text{EndPoint})$
- 16: \triangleright Befülle A
- 17: $A(\text{CaseID}) \leftarrow CC(\text{CaseID})$
- 18: \triangleright Benennung der Aktivität: Ende des Prozessschritts
- 19: $A(\text{Activity}) \leftarrow \text{„Ende“} + T(\text{Process})$
- 20: $A(\text{Eventtime}) \leftarrow E(\text{Eventtime})$
- 21: $A(\text{PartType}) \leftarrow$ Bauteilart θ von CC
- 22: $A(\text{Plant}) \leftarrow \theta$ von $T(\text{EndPlant})$

5.3 Entwicklung allgemeiner Simulationsbausteine

Die Entwicklung und Implementierung allgemeiner Simulationsbausteine ist gemäß der Literatur eine häufig verwendete Methode, um die Aufwände in Simulationsprojekten zu reduzieren (siehe UDE (2010) oder COPE (2008)). Innerhalb von AutoGPN stellen die entwickelten allgemeinen Simulationsbausteine eine Überführung der Ontologie in ausführbare und in Simulationssoftware implementierte Teilabschnitte eines Simulationsmodells dar. Hierfür müssen Aspekte der Nutzerfreundlichkeit beachtet und Modellierungsentscheidungen getroffen werden. Die Simulationsbausteine SimGPN sind das Ergebnis des dritten Forschungsmoduls, mit dem das Teilziel 3 erreicht werden soll. Ebenso soll im Forschungsmodul auch die Forschungsfrage zur Abbildung der Auftragsabwicklung in einem Simulationsmodell beantwortet werden (siehe Abbildung 5.21).

Im Folgenden werden zunächst die Kerngedanken hinter den Bausteinen und das Vorgehen bei deren Entwicklung erläutert. Anschließend werden die grund-

legenden Entscheidungen zur Modellierung von Stochastik, Dynamik und Materialfluss dargelegt. Eine Dokumentation der einzelnen Bausteine mit Auflistung aller Schnittstellen, Parameter und assoziierter Ontologieklassen befindet sich im Anhang A.2.

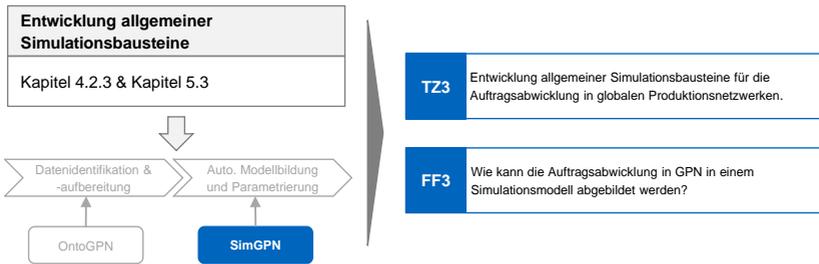


Abbildung 5.21: Forschungsmodul mit zugehörigen Teilziel und Forschungsfrage

5.3.1 Kerngedanken und Vorgehen bei der Bausteinentwicklung

Vor der inhaltlichen Ausgestaltung der Simulationsbausteine müssen grundlegende Gestaltungsprinzipien als Rahmenbedingungen bedacht werden. Hierunter fällt die Nutzerfreundlichkeit der Simulation. Als Werkzeug, mit dem die Komplexität der Auftragsabwicklung in GPN handhabbar gemacht werden soll, muss die Simulation trotz der Komplexität des abzubildenden Systems für einen menschlichen Entscheider nachvollziehbar sein. Wenn auf Basis von Simulationsexperimenten Entscheidungen getroffen werden sollen, so müssen die Entscheider den Ergebnissen der Simulation vertrauen, was ein grundlegendes Verständnis der Vorgänge in der Simulation voraussetzt. In der Simulation von Produktionssystemen wird daher der Materialfluss in den Mittelpunkt der Simulation gestellt, da (1) physische Strukturen wie Produktionslinien oder Bauteile einfacher vorstellbar sind als abstrakte Informationsflüsse und (2) die Herstellung von Produkten die Kernaufgabe produzierender Unternehmen darstellt. Entsprechend sind die entwickelnden Bausteine orientiert am Materialfluss gestaltet, obwohl bei der Simulation der Auftragsabwicklung der Planung und Steuerung sowie allgemein den Informationsflüssen eine große Rolle zukommen. Ein derartiges Vorgehen wird auch von anderen Autoren im Bereich der Simulationsbausteinentwicklung gewählt (siehe UDE (2010) oder COPE (2008)).

Weiterhin müssen die entwickelten allgemeinen Simulationsbausteine die Flexibilität aufweisen, eine Vielzahl von Anwendungsfällen abbilden zu können, ohne Adaptionen in den Funktionalitäten der Bausteine vornehmen zu müssen. Hierfür wird die Idee der Modularisierung mit ihren Konzepten der Hierarchisierung, Abstraktion und Kapselung verfolgt (WEYRICH und STEDEN 2013). Gemäß der Orientierung am Materialfluss kann bei der Simulation von GPN auch bei der Hierarchisierung auf die physische Struktur zurückgegriffen werden. Hierfür wird das Ebenen-Modell der Produktion herangezogen (WIENDAHL et al. 2007).

Die Simulationsbausteine gliedern sich entsprechend den Ebenen von Netzwerk bis Produktionslinie, wobei Bausteine, die Strukturen der höheren Ebene darstellen, Bausteine tieferer Ebenen enthalten. Ein Werk kann damit mehrere Produktionsstufen und eine Produktionsstufe mehrere Linien enthalten.

Neben der Hierarchie müssen weiterhin wiederholbare Strukturen in der Auftragsabwicklung in GPN identifiziert werden, welche sich klar von anderen Aufgaben und Strukturen abkapseln lassen und eigenständig funktionierende Einheiten bilden (Kapselung). Diese Strukturen enthalten dann alle für die Aufgabe der Struktur notwendigen Prozessschritte und Informationen der Auftragsabwicklung. Zur Kommunikation mit anderen gekapselten Strukturen werden Schnittstellen definiert.

Mit den beschriebenen Rahmenbedingungen, (1) der Orientierung am Materialfluss, (2) der Hierarchisierung entsprechend des Ebenen-Modells der Produktion sowie (3) der Kapselung in wiederholbare Strukturen, werden die zu entwickelnden Bausteine aus der Ontologie OntoGPN abgeleitet.

Ausgangspunkt bilden die Ontologieklassen zur Beschreibung der Struktur, wobei zunächst anhand der Klasse `Organization` zwischen der Kundenseite (`Customer`) und dem unternehmensinternen GPN (`Company`) unterschieden wird. Beide Bereiche werden anschließend gemäß der Klasse `Location` in einzelne Standorte unterteilt. Diese werden wiederum über die zugeordneten Produktionslinien (`ProductionOperator`) sowie Logistikressourcen (`LogisticOperator`) und deren Positionierung im Standort (über die Klasse `InternalLocation`) detailliert.

Die genannten Klassen dienen nun als Startpunkt für die Bausteinentwicklung und werden über die in der Ontologie definierten Relationen um weitere Funktionen, Prozesse und Attribute erweitert. Insbesondere die Prozesse der PPS und des Informationsflusses sollen gemäß der Materialflussorientierung Elementen des Materialflusses zugeordnet werden. Hierfür werden die Relationen `isPlanningFor` und `isConnectedTo` genutzt, da diese die Beziehungen von Informationsfluss zu Materialfluss und Struktur herstellen. Insgesamt ergeben sich durch dieses Vorgehen verschiedene Cluster an zusammengefassten Ontologieklassen, welche bereits mögliche prototypische Beschreibungen für Simulationsbausteine darstellen. In diesen Clustern werden anschließend wiederholbare Komponenten identifiziert, die sich für eine Kapselung eignen und sich damit in einen Simulationsbaustein überführen lassen.

Für die Auftragsabwicklung in GPN bietet sich die einzelne Produktionsstufe als zentrale Struktur an, aus der ein beliebig wiederhol- und einsetzbares Element mit allen relevanten Prozessen aufgebaut werden kann. Diese ergibt sich ontologisch aus den Beziehungen zwischen den Klassen `Operator`, `ActivityClass` und `MaterialObjectClass`, die den Zusammenhang zwischen Bauteilarten, den zugehörigen Produktions- und Logistikprozessen und den ausführenden Ressourcen beschreiben. Ergänzt werden diese Klassen, die alle dem Materialfluss zuzuordnen sind, um die PPS-Prozesse, die für deren Planung zuständig sind (siehe Abbildung 5.11 und 5.12).

Eine Produktionsstufe umfasst somit alle Planungs- und Materialflussprozesse zur Produktion und Distribution einer Bauteilart sowie die Schnittstellen zur Aufnahme von Bedarfen und zur Absetzung von Sekundärbedarfen an Eingangsmaterialien. Entsprechend kann über die Verkettung des Produktionsstufenelements über GPN-interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen eine beliebige Wertschöpfungsstufe an (Vor-)Produkten abgebildet werden. Abbildung 5.22 zeigt die Kernprozesse und deren Relationen innerhalb einer Produktionsstufe sowie die Kapselung gegenüber vor- und nachgelagerten Produktionsstufen.

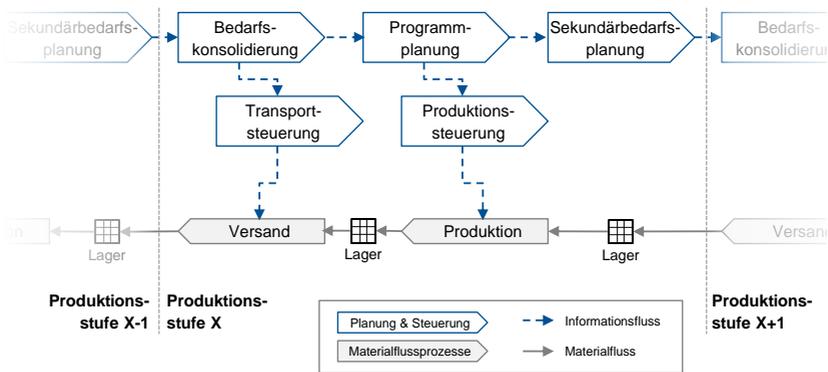


Abbildung 5.22: Schematische Darstellung der Auftragsabwicklung pro Produktionsstufe.

Der erste Prozessschritt der Auftragsabwicklung innerhalb einer Produktionsstufe ist die Konsolidierung aller eingehenden Bedarfe (Ontologiekategorie `LocalDemand`). Diese stellen die Eingangsinformation für die Transportsteuerung dar, um Versandaufträge zu erstellen und sie an den physischen Versand weiterzuleiten. Die Programmplanung verarbeitet die eingehenden Bedarfe und erstellt ein Produktionsprogramm (`LocalProductionProgram`). Das Programm dient als Input für die Produktionssteuerung (`ProductionControl`), die konkrete Produktionsaufträge (`ProductionOrder`) erstellt, sie in Lose und eine Reihenfolge einordnet und an die Produktionslinie weiterleitet. Die Sekundärbedarfsplanung erzeugt aus dem Programm Sekundärbedarfe von benötigten Vorprodukten (`LocalDemand`) und bestellt diese bei der vorgelagerten Produktionsstufe.

Auf der Materialflussebene produziert die Produktionslinie die Bauteile entsprechend den Aufträgen, entnimmt die benötigten Rohteile aus dem vorgelagerten Lager und liefert die fertigen Komponenten an das nachgelagerte Lager.

Entsprechend dieser Kapselung lassen sich beliebig tiefe Ketten von Produktionsstufenelementen bilden, wobei der ersten Produktionsstufe externe Kunden nachgelagert sind, welche ihre Bedarfe in die Auftragsabwicklung des GPN einspeisen.

Die Kapselung in Produktionsstufen wird über die aus dem Ebenen-Modell der Produktion folgende Hierarchie in die Tiefe erweitert. Einerseits können innerhalb einer Produktionsstufe mehrere Produktionslinien mit jeweils eigenen

dezentralen Planungsprozessen vorhanden sein. Andererseits können auch Produktionsstufen zur Herstellung verschiedener Komponenten parallel zueinander existieren. Dies ist dann der Fall, wenn intern mehrere verschiedene Arten von Zwischenprodukten hergestellt werden, die als Input für eine nachgelagerte Produktionsstufe benötigt werden. Beispielsweise stellen Kurbelwellen- und Kurbelgehäusefertigung parallele Produktionsstufen in der Motorenproduktion dar.

Die Kerngedanken der Orientierung am Materialfluss, der Hierarchiebildung durch die Ebenen der Produktion und der Produktionsstufe als zentrales Element übersetzen sich in die Struktur der entwickelten Bausteine. Diese ist in Abbildung 5.23 als UML-Diagramm mit den entsprechenden Kardinalitäten, die Anzahl weiterer Module in einem Modul, dargestellt. Diese werden in der Abbildung durch Buchstaben beschrieben, welche für eine beliebige natürliche Zahl stehen. Eine Produktionsstufe kann zum Beispiel l Produktionslinien enthalten, aber nur ein Lager.

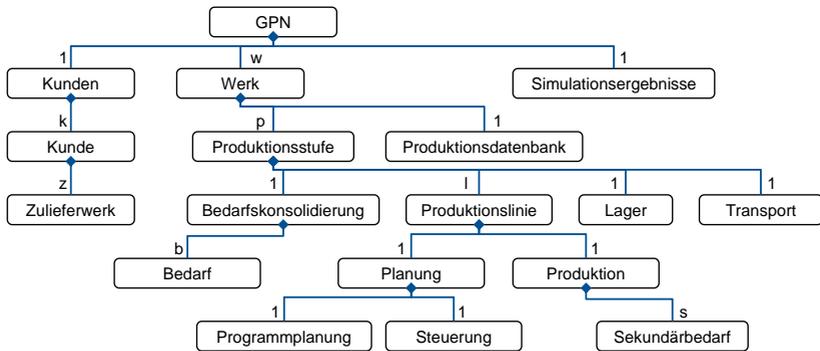


Abbildung 5.23: UML-Diagramm der Simulationsbausteine.

Im Anwendungsfall wird das abzubildende System aus den Bausteinen zusammengesetzt. Die in Abbildung 5.23 gezeigten Beziehungen bzw. Hierarchieebenen übersetzen sich dann in die Verwendung von Bausteinen innerhalb anderer Bausteine. Abbildung 5.24 zeigt ein einfaches Beispiel für den Einsatz der Bausteine zur Abbildung eines Produktionssystems. Dieses Produktionssystem besteht aus einem Werk mit zwei Produktionsstufen, welches Bedarfe von zwei Kunden erhält. Neben den verwendeten Bausteinen sind auch deren Schnittstellen, unterschieden nach Materialfluss- und Informationsflussbeziehungen, eingezeichnet.

5.3.2 Grundlegende Entscheidungen zur Modellierung

Entscheidend für die Qualität und die Nutzbarkeit eines aus den Bausteinen erzeugten Simulationsmodells sind die getroffenen Modellierungsentscheidungen zur Implementierung der Funktionalitäten der einzelnen Bausteine. Diese

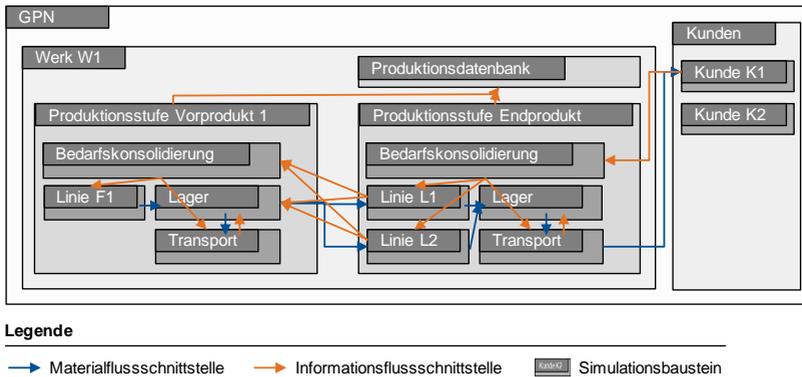


Abbildung 5.24: Beispielhafte Verwendung der Bausteine zur Abbildung eines GPN mit eingezeichneten Schnittstellen zwischen den Bausteinen.

müssen die Charakteristika von GPN abbilden und die in Kapitel 2.3 gestellten Anforderungen bezüglich des Detaillierungsgrads sowie die Modellierung von Stochastik und Dynamik erfüllen.

Unter stochastische Einflüsse fallen zufällig auftretende Ereignisse, die vom erwarteten bzw. geplanten Verhalten abweichen. Bei Betrachtung der Auftragsabwicklung in GPN sind die Haupttreiber für Abweichungen zu einer Änderung in den eingespeisten Kundenbedarfen. Diese können sich in der bestellten Menge, den bestellten Varianten oder Bestellzeitpunkten verändern, worauf die Auftragsabwicklung reagieren muss. Zum anderen kommen zufällige Abweichungen aus dem Materialfluss hinzu. Dabei handelt es sich in der Produktion beispielsweise um Störungen von Maschinen oder den Ausschuss von qualitativ minderwertigen Bauteilen. Zudem können Transportzeiten aufgrund außerordentlicher Verkehrsaufkommens variieren. Alle genannten stochastischen Einflussfaktoren werden in den Simulationsbausteinen über parametrisierte Zufallsverteilungen modelliert.

Unter Dynamik wird die Modellierung einer voranschreitenden Simulationszeit und der damit einhergehenden Änderung des simulierten Systems und dessen Eingangsdaten verstanden. Auf Seiten des Materialflusses umfasst dies den Produktionsfortschritt, das Auftreten von Störungen und deren Behebung sowie den Transport. Weiterhin unterliegen auch die eingespeisten Kundenbedarfe einer Dynamik. Mit fortschreitender Simulationszeit kommen neue Bedarfe, die bisher in den Planungsprozessen nicht berücksichtigt wurden, in das System und müssen dynamisch von diesem verplant und erfüllt werden. Dies erfordert eine regelmäßige Adaption der taktischen und operativen Planung, um auf veränderte Bedarfe oder Störungen zu reagieren und die bisherige Produktionsplanung umzuplanen. Abgebildet werden die dynamischen Einflussfaktoren in mehreren Simulationsbausteinen. Erstens erfolgt eine in Simulationszeit tägliche Anpassung von eingespeisten Bedarfen. Zweitens wird jedes einzelne Bauteil in der Produktion

bzw. jede Lieferung bei Transporten gesondert einer stochastischen Modellierung unterzogen. Dadurch treten über den Simulationsverlauf dynamische Abweichungen von der Planung auf. Drittens erfolgt eine in Simulationszeit tägliche Ausführung der Planungsalgorithmen, die den aktuellen Zustand des Systems heranziehen und eine aktualisierte Produktionsplanung errechnen. Insgesamt ergibt sich so aus den Simulationsbausteinen ein dynamisches und stochastisches Simulationsmodell, welches die realen Begebenheiten der Auftragsabwicklung in GPN abbilden kann. Im Folgenden werden die Implementierung von stochastischen und dynamischen Effekten in den dafür relevanten Simulationsbausteinen detaillierter erläutert.

Modellierung von Bedarfen

Die Modellierung von schwankenden und dynamischen Bedarfen erfolgt im Baustein **Kunde**. Zur Abbildung deren Verhaltens sind in den Simulationsbausteinen Bedarfe in Form von Lieferabruf (LA) modelliert, wie sie auch in der Industrie häufig vorkommen. Ein LA enthält dabei für jeweils eine Bauteilvariante die pro Lieferdatum benötigten Mengen des Bauteils. Die Lieferdaten erstrecken sich über einen definierten Horizont in die Zukunft. Im Laufe der Simulationsausführung aktualisiert der **Kunde**-Baustein den LA stetig, indem Bedarfe der Vergangenheit aus dem LA entfernt und neue Bedarfe an den LA angehängt werden, wodurch ein dynamisches Verhalten erzeugt wird. Gleichzeitig werden die abgerufenen Mengen bei jeder Aktualisierung zufällig modifiziert, um die stochastischen Einflüsse zu modellieren.

Modellierung von Planung und Steuerung

Um auf die sich ändernden Bedarfe zu reagieren, werden die Planungs- und Steuerungsalgorithmen ebenfalls in regelmäßigen zeitlichen Abständen über einen Simulationslauf aufgerufen. Dabei werden die eingegangenen aktuellen Bedarfe über alle Kunden konsolidiert und für jede Bedarfsposition der Soll-Warenausgangstermin (SWAT) sowie ein Produktionsstarttermin errechnet (siehe hierzu A.2.2). Weiterhin wird der aktuelle Zustand, wie Lager- und Umlaufbestand, zu diesem Simulationszeitpunkt abgefragt. Auf Basis dieser Informationen erstellen die Planungs- und Steuerungsprozesse in der Simulation aktualisierte Produktionsprogramme. Durch diese regelmäßige Ausführung der Prozesse wird die dynamische Reaktion der Auftragsabwicklung auf Änderungen modelliert.

Modellierung des Materialflusses

Eine weitere Quelle für stochastisches und dynamisches Verhalten stellt in der Realität der Materialfluss dar. In den SimGPN-Bausteinen wird diese Dynamik und Stochastik im Simulationsbaustein **Produktionslinie** modelliert. Da die Produktionslinie nicht bis Maschinenebene abgebildet werden kann und muss, ist deren grundlegendes Verhalten zu aggregieren und vereinfacht darzustellen. Dabei werden die stochastischen Effekte gemäß HEITMANN (1999) abstrahiert und verdichtet modelliert. Um das Zusammenspiel der Ressourcen im GPN zu untersuchen, sind insbesondere drei Eigenschaften von Bauteilen abzubilden: Der Zeitpunkt, zu dem Bauteile in die Produktion auf der Linie starten, ob sie die Linie verlassen oder während des Produktionsprozesses verschrottet werden und zu welchem Zeitpunkt sie die Linie als fertiges Bauteil verlassen.

Dieses Verhalten wird über die drei grundsätzliche Parameter Taktzeit, Ausschussquote und Durchlaufzeit modelliert. Innerhalb der simulierten Schichtzeiten wird zunächst der nächste Produktionsauftrag aus dem Auftragspuffer der Linie entnommen. Anschließend wird mittels Zufallsgenerator und der angegebenen Ausfallquote ermittelt, ob es sich bei dem Bauteil um Ausschuss handelt. Kommt es zum Ausschuss, so wird nach Verstreichen der Taktzeit der nächste Auftrag bearbeitet. Wird das Bauteil nicht als Ausschuss klassifiziert, so wird die Durchlaufzeit des Auftrages durch stochastisches Ziehen eines Werts aus einem als Parameter hinterlegten Histogramm ermittelt. Das hinterlegte Histogramm setzt sich dabei aus real gemessenen Durchlaufzeiten zusammen, in denen auch die Einflüsse von Störungen oder Nacharbeiten enthalten sind und so das reale Verhalten der Linie aggregiert abbildet. Die ermittelte Durchlaufzeit wird zum aktuellen Simulationszeitpunkt unter Berücksichtigung von Schichtzeiten addiert. Zum errechneten Zeitpunkt wird das fertige Bauteil dann im zugehörigen Lager eingelagert. Dieser Prozess wird, nach Abwarten der Taktzeit, für den nächsten Auftrag wiederholt.

Durch die beschriebenen Implementierungen können die stochastischen und dynamischen Verhaltensweisen der realen Auftragsabwicklung in den SimGPN-Bausteinen abgebildet werden. Dabei sind auch die Anforderungen an den Detaillierungsgrad abgebildet, indem einzelne Bauteile simuliert und eine zeitliche Auflösung auf Minuten-Ebene erfolgt. Für eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Bausteine mit weiteren Funktionalitäten wird auf den Anhang A.2 verwiesen.

5.4 Methoden zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung

Mit den allgemeinen Simulationsbausteinen SimGPN liegen die grundlegenden Elemente zum Aufbau einer ausführbaren Simulation der Auftragsabwicklung in GPN vor. Um ein GPN im Anwendungsfall simulieren zu können, müssen die richtigen Bausteine ausgewählt, in Beziehung zueinander gesetzt und mit den richtigen Parameterwerten belegt werden. Um diese Schritte auf Basis des datenbasierten Abbilds automatisiert zu durchlaufen, werden im vierten Forschungsmodul Algorithmen entwickelt, die diese Aufgabe erfüllen. Wie in Abbildung 5.25 dargestellt, wird im Forschungsmodul das Teilziel 4 erreicht und Forschungsfrage 4 beantwortet.

Im Folgenden werden die entwickelten Algorithmen entlang der drei Prozessschritte der automatisierten Modellbildung und Parametrierung, (1) der Identifikation der Modellstruktur, (2) der Rekonstruktion von Beziehungen zwischen Bausteinen und (3) der Bestimmung von Parameterwerten beschrieben. Abbildung 5.26 stellt die drei Schritte dar und zeigt exemplarisch deren Ergebnisse in Form eines sich aufbauenden Simulationsmodells. Während des ersten Prozessschritts werden die notwendigen SimGPN-Bausteine identifiziert, die zur

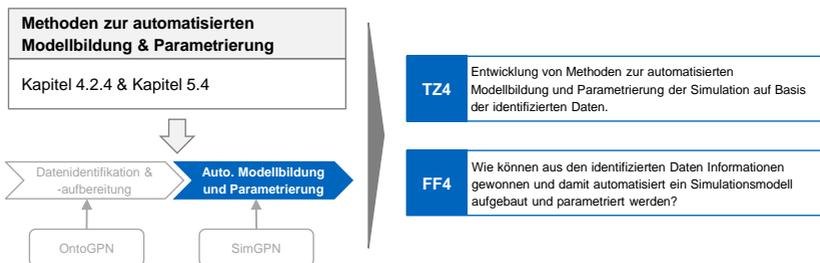


Abbildung 5.25: Forschungsmodul mit zugehörigem Teilziel und Forschungsfrage

Abbildung eines konkreten GPNs notwendig sind. Im zweiten Schritt werden die Beziehungen zwischen den Bausteinen rekonstruiert. Im letzten Schritt werden die Parameter der Bausteine mit den aus den Daten gewonnenen Parameterwerten belegt. Die genaue Funktionsweise der einzelnen Prozessschritte wird im Folgenden detailliert ausgeführt.

5.4.1 Identifikation der Modellstruktur

Ziel der automatisierten Identifikation der Modellstruktur ist es, anhand der vorliegenden Eingangsdaten alle zur Abbildung des Anwendungsfalls notwendigen Simulationsbausteine zu identifizieren und in die richtige hierarchische Struktur zu bringen. Hierfür wird das Simulationsmodell in Form einer Baumstruktur aufgebaut, die nach dem gleichen Prinzip wie die Simulationsbausteine gestaltet ist (siehe UML-Diagramm in Abbildung 5.23). Knoten in der Baumstruktur stellen Simulationsbausteine dar. Verbindungen zwischen Knoten bilden ab, dass die untergeordneten Bausteine in den übergeordneten platziert sind. Dargestellt wird die Baumstruktur über Pfade, in denen Punkte die Verschachtelung der Bausteine angeben. Über die Pfade ist jeder Baustein eindeutig im Simulationsmodell identifizierbar und hierarchisch positioniert. Auch der Zugriff auf Funktionen und Informationen innerhalb eines Bausteins erfolgt in der Implementierung über den Pfad. Abbildung 5.27 zeigt ein exemplarisches Simulationsmodell mit resultierender Baumstruktur und zugehörigen Pfaden.

Ergebnis des Prozessschritts ist eine tabellarische Aufzählung und Einordnung der ausgewählten Bausteine, die zur Abbildung des Anwendungsfalls notwendig sind. Die Tabelle gibt dabei jeweils eine Bezeichnung, beispielsweise den Namen eines Produktionsstandortes, um welchen allgemeinen Baustein es sich handelt und den absoluten Pfad im Simulationsmodell an. Der Aufbau der Ausgabe ist in Tabelle A.29 im Anhang dargestellt.

Bei der Identifikation der Bausteine wird das Prinzip der Vollständigkeit verfolgt. Es werden zunächst sämtliche mögliche Bausteine identifiziert und in das Modell aufgenommen, auch wenn diese in der Realität des Anwendungsfalls nicht aktiv genutzt werden. Dies führt dazu, dass zum einen Produktionsstufen für jede Bau-

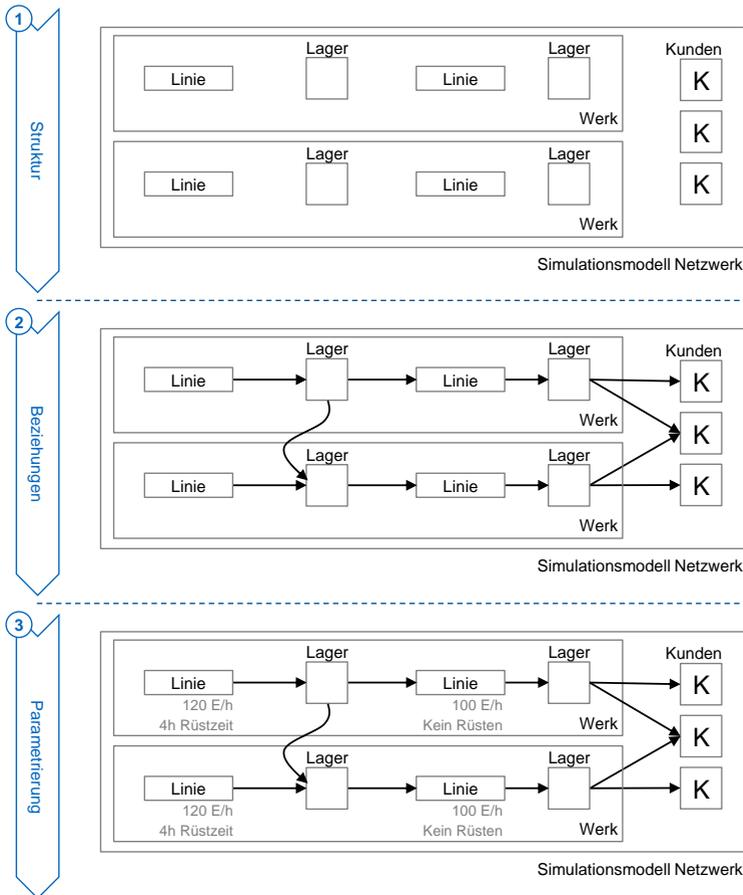


Abbildung 5.26: Prozessualer Ablauf der automatisierten Modellbildung und Parametrierung mit exemplarischer Darstellung der identifizierten Simulationsmodellbestandteile.

teilarbeit standardmäßig in jedem Produktionsstandort angelegt und zum anderen alle möglichen internen und externen Kunde-Lieferanten-Beziehungen in Form von Bedarf-Bausteinen, als Empfänger für eingehende Bestellungen, eingesetzt werden. Die Aktivierung dieser Beziehungen gemäß dem realen Systemverhalten wird dann im zweiten Prozessschritt vollzogen. Der Vorteil dieses Vorgehens liegt darin, dem Anwender bereits in der Modellbildung Strukturen bereitzustellen, mit denen dieser effizient alternative Szenarien aufbauen und simulieren kann.

Neben dem Prinzip der Vollständigkeit nimmt die Struktur der allgemeinen Simulationsbausteine bereits einige Entscheidungen bei der Identifikation der notwendigen Bausteine vorweg. Alle Bausteine, die eine Kardinalität von Eins besitzen, werden standardmäßig mit Einsetzen des übergeordneten Bausteins

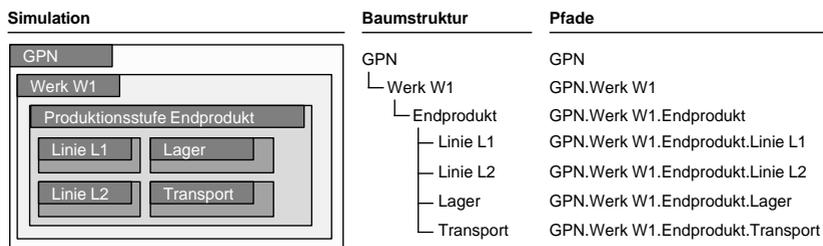


Abbildung 5.27: Beispielhafte Darstellung eines Simulationsmodells mit resultierender Baumstruktur und Pfaden.

ebenfalls eingesetzt. Bei der Abbildung einer Produktionsstufe in einem Werk werden entsprechend die Bausteine Lager, Transport und Bedarfskonsolidierung direkt in den Baustein Produktionsstufe eingesetzt.

Startpunkt der Strukturidentifikation ist der Baustein GPN, innerhalb dessen das gesamte Simulationsmodell abgebildet wird. Der Baustein stellt damit die Wurzel der Baumstruktur und den Startpunkt aller Pfade im Modell dar.

Die erste Ebene innerhalb des Simulationsmodells stellt die Netzwerkebene dar. Die Ebene beinhaltet mit den Kunden (Baustein Kunden) die externe Seite der Auftragsabwicklung und mit den Produktionsstandorten die physische Struktur des abzubildenden Netzwerks. Der Kunden-Baustein kann anwendungsfallunabhängig direkt gesetzt werden. Zur Identifikation der Produktionsstandorte im Netzwerk wird auf das datenbasierte Abbild des Netzwerks zurückgegriffen. Dabei wird ausgenutzt, dass für jedes datentechnisch erfasste Bauteil das Produktionswerk hinterlegt ist. Für jedes auftretende Werk im datenbasierten Abbild muss folglich ein Werk-Baustein im Simulationsmodell eingesetzt werden. Hierfür werden aus den bauteilartspezifischen Fall-Tabellen (CASES_PART) alle unterschiedlichen Produktionswerke (Spalte Plant) extrahiert und Bausteine mit der entsprechenden Bezeichnung auf Netzwerkebene platziert. Das Vorgehen ist in Abbildung 5.28 unter (1) exemplarisch verdeutlicht.

Zur Ausgestaltung des Kunde-Bausteins werden die Eingaben des Anwenders aus den allgemeinen Simulationsdaten herangezogen. Für jeden Eintrag in der Zeile Kunden wird ein Kunde-Baustein erzeugt und mit der entsprechenden Bezeichnung versehen. Um Bedarfe an die Auftragsabwicklung einzusteuern, müssen für jeden Kunden die Schnittstelle zu den Produktionsstandorten des Netzwerks über Zulieferwerk-Bausteine definiert werden. Gemäß der Idee der Vollständigkeit werden direkt für jeden Kunden Schnittstellen zu allen Werken erstellt, indem für jedes Werk ein Zulieferwerk unterhalb jedes Kunde-Bausteins angelegt wird.

Nach Detaillierung der Kunden-Ebene wird das Simulationsmodell auf Ebene des Produktionsstandorts weiter vervollständigt. Dabei werden die identifizierten Standorte iterativ durchlaufen und jeweils die nachfolgenden Schritte ausgeführt.

Innerhalb jedes Produktionsstandortes werden gemäß dem Prinzip der Vollständigkeit Bausteine für alle im Anwendungsfall auftretenden Produktionsstufen gesetzt. Algorithmisch werden die Produktionsstufen anhand der allgemeinen Stückliste (Tabelle GENERAL_BOM) bestimmt, indem sämtliche Einträge mit unterschiedlicher Bezeichnung extrahiert werden, wie unter (2) in Abbildung 5.28 dargestellt. Neben der einfachen Erweiterung des Modells zu alternativen Szenarien leistet die standardmäßige Implementierung aller Produktionsstufen noch eine weitere Funktion. Auch wenn eine Bauteilvariante nicht in einem Werk produziert wird, so kann diese doch als Eingangsmaterial für eine nachgelagerte Produktionsstufe benötigt werden. Die hierfür erforderliche Simulation von Lagerkapazitäten wird dann von dem in der gesetzten Produktionsstufe enthaltenem Lager-Baustein übernommen.

Innerhalb einer Produktionsstufe sind die Bausteine Lager, Transport und Bedarfskonsolidierung standardmäßig gesetzt. Abhängig vom Anwendungsfall ist die Anzahl an Produktionslinien. Zu deren Bestimmung wird ähnlich dem Vorgehen bei der Identifikation der Werke auf die bauteilartspezifischen Fall-Tabellen im datenbasierten Abbild zugegriffen. Sind Bauteile im Zeitraum des Datenstandes auf einer Linie produziert worden, so ist diese auch im Simulationsmodell abzubilden. Für jedes Werk und jede Produktionsstufe werden die zur Bauteilart der Produktionsstufe passende CASES_PART zunächst entsprechend dem Werk in Spalte Plant gefiltert und anschließend alle verschiedenen Linien in Spalte Line identifiziert (siehe (3) in Abbildung 5.28). Für jeden unter-

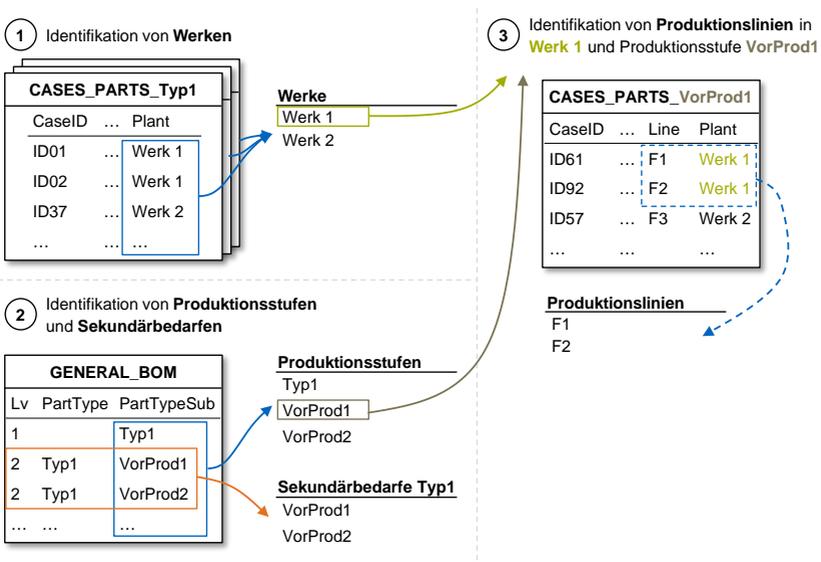


Abbildung 5.28: Vorgehen der Strukturidentifikation für (1) Werke, (2) Produktionsstufen und Sekundärbedarfe sowie (3) Produktionslinien.

schiedlichen Eintrag wird ein Produktionslinie-Baustein erzeugt sowie in Werk und Produktionsstufe eingegliedert. Werden zu einer Werk-Produktionsstufen-Kombination keine Einträge gefunden, so wird im Anwendungsfall diese Bauteilart auch nicht in diesem Werk produziert. Es werden folglich auch keine Produktionslinien im Simulationsmodell angelegt.

Mit Platzierung der Produktionslinie-Bausteine werden automatisiert auch die der Linie hierarchisch untergeordneten Bausteine mit in das Simulationsmodell aufgenommen. Spezifisch für den Anwendungsfall müssen im Anschluss die Sekundärbedarf-Bausteine bestimmt werden, damit für jede Linie jeder Produktionsstufe benötigte Eingangsmaterialien durch Stücklistenauflösung ermittelt und bei vorgelagerten Produktionsstufen bestellt werden können. Abgeleitet werden Anzahl und Art der Sekundärbedarf-Bausteine aus der allgemeinen Stückliste der Eingangsdatentabellen. Für jede Produktionsstufe werden aus dieser alle Einträge der Spalte PartTypeSub extrahiert. Für jeden Eintrag wird ein Sekundärbedarf-Baustein in jeder Produktionslinie der Produktionsstufe erzeugt, wobei der Baustein mit dem entsprechenden Wert der Spalte PartTypeSub benannt wird (siehe (2) in Abbildung 5.28).

Letzter Schritt in der Struktur-Identifikation ist die Bestimmung aller notwendigen Bedarf-Bausteine in der Bedarfskonsolidierung aller Produktionsstufen und Werke. Der Bedarf-Baustein modelliert das Empfangen von eingehenden Bedarfen aus (internen) Kunde-Lieferanten-Beziehungen. Gemäß dem Konzept der Vollständigkeit werden wieder alle Möglichkeiten durch das Setzen von Bausteinen abgedeckt. Im Fall der Bedarf-Bausteine bedeutet dies, für jeden möglichen Sender von Bestellungen einen Empfänger in Form eines Bedarf-Bausteins zu erzeugen.

In der Simulation können drei verschiedene Arten von Kunden-Lieferanten-Beziehungen modelliert werden: (1) Die Bestellung von Endprodukten durch externe Kunden, (2) die Bestellung von benötigten Eingangsmaterialien über die Sekundärbedarf-Bausteine der Produktionslinien und (3) die Weiterleitung von Bedarfen gleicher Bauteilart an andere Werke im Netzwerk zum Ausgleich von Kapazitäten.

Bestellungen von Kunden sind nur für die Bedarfskonsolidierung in der Produktionsstufe des Endprodukts relevant. Da jeder Kunde prinzipiell bei jedem Werk bestellen kann, wird in den Bedarfskonsolidierung-Bausteinen der Produktionsstufe des Endprodukts in jedem Werk für jeden Kunden ein Bedarf als Empfänger möglicher Bedarfe hinterlegt.

In vorgelagerten Produktionsstufen sind Bedarf-Bausteine als Empfänger für interne Kunde-Lieferanten-Beziehungen zu integrieren. Für jede Bauteilart müssen hierfür die möglichen internen Kunden identifiziert werden. Diese sind zum einen die Produktionslinien der nachgelagerten Produktionsstufe, die die betrachtete Bauteilart als Eingangsmaterial benötigt, zum anderen die Produktionsstandorte im Netzwerk, die Bedarfe an das betrachtete Werk auslagern können. Zur Identifikation der notwendigen Bedarf-Bausteine in ersterem Fall wird aus der allgemeinen Stückliste zunächst die Bauteilart ermittelt, welche die betrachte-

te Bauteilart als Eingangsmaterial benötigt. Anschließend werden alle Linien dieser Bauteilart bestimmt und für jede ein Bedarf-Baustein benannt nach der Linie im Bedarfskonsolidierung-Baustein angelegt. Weitere Bedarf-Bausteine werden für jedes andere Werk, mit Ausnahme des aktuell betrachteten Werks, erzeugt. Jedes Werk im GPN ist somit in jeder Produktionsstufe dafür befähigt, Bedarfe, die aus Kapazitätsgründen nicht selbst produziert werden können, an andere Werke auszulagern. Im GPN des Anwendungsfalls müssen die hierdurch modellierten Kunde-Lieferanten-Beziehungen jedoch nicht aktiv sein. Welche Verbindungen aktiv in der Realität genutzt werden, wird im folgenden Schritt, der automatisierten Identifikation von Beziehungen zwischen den Bausteinen, ermittelt und im Simulationsmodell parametriert.

5.4.2 Identifikation der Beziehungen

Nach Bestimmung der grundlegenden Modellstruktur werden im zweiten Prozessschritt die Beziehungen zwischen den Bausteinen identifiziert. Hierbei kann zwischen zwei Arten von Beziehungen unterschieden werden. Zum einen müssen aus Implementierungsgründen die Schnittstellen zwischen Bausteinen gesetzt werden, damit in der Baumstruktur des Simulationsmodells einzelne Bausteine auf die Funktionalitäten und Informationen anderer Bausteine zugreifen können. Diese Beziehungen folgen aus der Struktur der allgemeinen Simulationsbausteine. Hierunter fallen die Verknüpfungen im Materialfluss zwischen Lager, Produktionslinie und Transport und die Sender-Empfänger-Beziehung zwischen Kunde- und Bedarf-Bausteinen. Weiterhin werden auch die im Anwendungsfall aktiven internen Kunde-Lieferanten-Beziehungen identifiziert und als Information für jeden auftretenden Baustein vom Typ Sekundärbedarf und Bedarfskonsolidierung bereitgestellt.

Schnittstellen zwischen den Bausteinen

Damit die identifizierten Bausteine ein ausführbares Simulationsmodell des Anwendungsfalls ergeben können, müssen die Schnittstellen zwischen den Bausteinen mit den entsprechenden Pfaden parametriert werden. Dabei treten Schnittstellen zu einzelnen Bausteinen, aber auch zu Verbindungen zu mehreren Bausteinen einer bestimmten Bausteinart auf. Beispielsweise benötigt der Baustein Transport Zugriff zu allen Bedarf-Bausteinen der Produktionsstufe, um je nach Bedarf der einzelnen Kunden Versandaufträge planen zu können.

Ergebnis der Schnittstellen-Identifikation ist eine Tabelle (siehe Tabelle A.30 im Anhang). Pro identifiziertem Baustein sind die Schnittstellenbezeichnung, die Bausteinart und der Pfad zum Simulationsbaustein, auf den Zugriff ermöglicht werden soll, aufgelistet.

Die in diesem Abschnitt zu bestimmenden Schnittstellen ergeben sich rein aus der Struktur der Bausteine. Sie sind folglich über die Position des Bausteins in der Modellstruktur, dem Prinzip der Vollständigkeit und der Benennung des Bausteins

nach klar definierbaren Regeln identifizierbar. Der entwickelte Algorithmus implementiert diese Regeln entsprechend der Bausteinart und durchsucht die Baumstruktur des Modells nach dem Schnittstellenpartner.

Um die vollständigen Ergebnisdaten zu erzeugen, iteriert der entwickelte Algorithmus über die Auflistung aller Bausteine aus der Strukturidentifikation und bestimmt die jeweiligen Schnittstellen.

Identifikation der aktiven internen Kunden-Lieferanten-Beziehungen

Zur Abbildung von internen Kunden-Lieferanten-Beziehungen sind in den Simulationsbausteinen zwei grundsätzliche Möglichkeiten implementiert. Die Bestellung über Sekundärbedarfe und die Bedarfsweitergabe innerhalb von Produktionsstufen gleicher Bauteilart an andere Werke im Zuge der Bedarfskonsolidierung. Um die Realität in verschiedenen Anwendungsfällen möglichst detailliert abbilden zu können, sind Kunde-Lieferanten-Beziehungen immer auf Basis der Bauteilvariante spezifiziert. Für jede Variante kann folglich ein eigener Lieferant je Produktionslinie oder Werk bestimmt werden.

In der Realität treten häufig auch mehrere Lieferanten je Bauteilvariante auf, da Bauteile je nach verfügbaren Kapazitäten parallel an mehreren Standorten produziert werden. In den Simulationsbausteinen wird dies in der Bedarfsweitergabe zwischen Werken abgebildet, was beispielhaft in Abbildung 5.29 dargestellt ist. Jeder Produktionslinie wird im Sekundärbedarf pro Bauteilvariante ein fester Lieferant zugeordnet. Bezieht die Linie in der Realität jedoch eine Bauteilvariante von mehreren Lieferanten, so ist dies in der Simulation über die Bedarfsweitergabe beim Lieferanten der Linie im Baustein Sekundärbedarf abgebildet, der den Bedarf ganz oder in definierten Anteilen an ein anderes Werk weiterleitet. Hierdurch wird die Flexibilität in der Verteilung von Bedarfen, die einer der Vorteile der Produktion in Netzwerken ist, auch in der Simulation abgebildet.

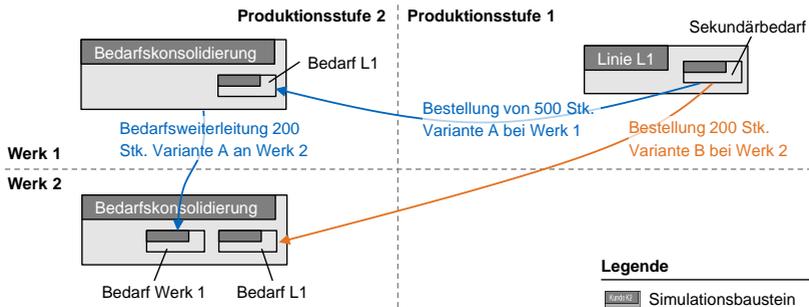


Abbildung 5.29: Beispielhafte Darstellung von Bestellungen bei internen Lieferanten und der Bedarfsweitergabe zwischen Werken.

Um die aktiven Kunde-Lieferanten-Beziehungen im Anwendungsfall zu identifizieren, wird das datenbasierte Abbild des GPN genutzt. Grundlage ist die im Datenmodell abgebildete Vernetzung jedes einzelnen Bauteils mit den Bauteilen, die im Produktionsverlauf in dieses verbaut wurden. Gleichzeitig ist für jedes Bauteil bekannt, in welchem Produktionsstandort und auf welcher Linie es produziert wurde. Hieraus lassen sich für jede Position der allgemeinen Stückliste, also die Verbaubeziehung zwischen zwei Bauteilarten, für jede Linie und Bauteilvariante die entsprechende verbaute Bauteilvariante und deren Produktionslinie und -standort feststellen. Das Vorgehen zur Bestimmung dieser Beziehungen ist in Abbildung 5.30 dargestellt. Aus dieser Auflistung an Beziehungen B sind nun die für die Simulation notwendigen Schnittstellen und Parameter abzuleiten. Die Vorgehensweise wird im Folgenden beschrieben und ist formal in Algorithmus 4 im Anhang dargestellt.

Zunächst wird aus der Auflistung an Beziehungen die Stückliste auf Basis der Bauteilvarianten bestimmt. Für jede Produktionslinie sind in Tabelle B die dort produzierten Bauteilvarianten mitsamt den Varianten der untergeordneten Bauteilart, die in diese verbaut wurden, aufgeführt, woraus sich die Stückliste für die Parametrierung des Sekundärbedarf-Bausteins der entsprechenden Linie ablesen lässt. Anschließend wird für jede der verbauten Varianten der Lieferant bestimmt. Für jede Linie und verbaute Variante sind in Tabelle B auch alle in Realität auftretenden Produktionsstandorte der verbauten Variante vermerkt. Ist die Beziehung zum Produktionsstandort eindeutig, so kann dieser als Lieferantenstandort direkt gesetzt werden. Liegen im Falle der parallelen Produktion mehrere Standorte vor, so wird mit höherer Priorität das eigene Werk im Vergleich zur aktuell betrachteten Linie gewählt. Sind nur andere Werke vorhanden, so wird beliebig eines davon als Lieferant ausgewählt. Dieses Vorgehen spiegelt auch ein typisches Verhalten in der Realität der Auftragsabwicklung

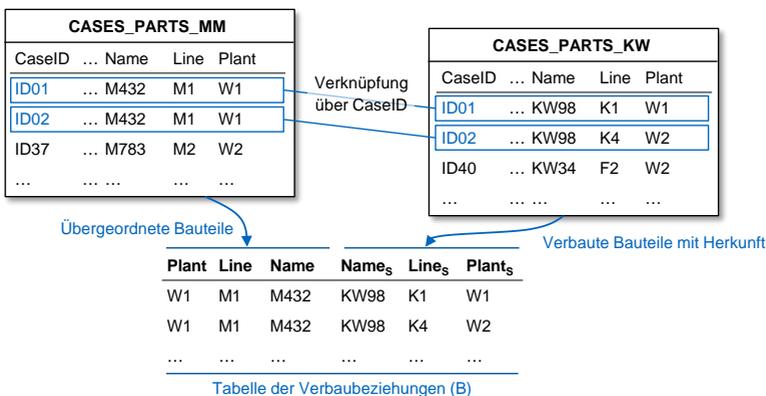


Abbildung 5.30: Beispielhafte Darstellung der Rekonstruktion von Verbaubeziehungen zwischen Produktionslinien nach Bauteilvarianten.

wider. Zunächst werden Sekundärbedarfe werksintern bei der vorgelagerten Produktionsstufe bestellt. Sollten sich in deren Planung Engpässe bei Kapazitäten ergeben, so ist es Aufgabe der vorgelagerten Stufe, in anderen Werken Kapazitäten anzufragen und Bauteile zu bestellen. Befinden sich im eigenen Werke keine Produktionsressourcen für die benötigte Bauteilart, so wird ein anderes Werk zum Hauptlieferanten, dem wiederum die Aufgabe der Bedarfsverteilung im Engpassfall zukommt.

Ergebnis ist eine Auflistung von je einem Lieferantenwerk je verbauter Bauteilvariante je Produktionslinie. Diese Informationen werden zur vollständigen Definition der Schnittstelle noch um die notwendigen Pfade ergänzt. Dies ist zum einen der Pfad des Sekundärbedarf-Bausteins der Linie der übergeordneten Bauteilart, der als Sender des Bedarfs fungiert und in dem die Lieferanten pro Bauteilvariante hinterlegt werden. Zum anderen ist dies der Pfad des jeweiligen Bedarf-Empfängers, also dem Bedarf-Baustein der untergeordneten Bauteilart im Lieferantenwerk. Die Ausgabe erfolgt in Tabellenform, definiert in Tabelle A.31 im Anhang.

Nach Identifikation der Lieferanten zu Bauteilvarianten in den Sekundärbedarf-Bausteinen erfolgt die Bestimmung der Lieferanten in der Bedarfsweitergabe, abgebildet in den Bedarfskonsolidierung-Bausteinen. Es wird ein ähnliches Vorgehen verfolgt, jedoch die Sichtweise auf die Materialflussbeziehungen umgekehrt. Wurde bei den Lieferanten der Sekundärbedarf-Bausteine aus Sicht der bestellenden Produktionsstufe agiert, so wechselt diese nun zur Produktionsstufe, bei der bestellt wird. Für jeden Bedarfskonsolidierung-Baustein gilt es zu identifizieren, welche Bauteilvariante bei diesem bestellt wird und in welchen Werken diese in Realität gefertigt wurden. Sind andere Werke als das Werk des betrachteten Bausteins als Produktionsstandorte aufgelistet, so werden diese als Lieferanten für diese Bauteilvariante gesetzt. Inwiefern und in welcher Menge Bedarfe an andere Standorte weitergeleitet werden, wird im Kapitel 5.4.3 in Form einer Quotierung bestimmt.

Das algorithmische Vorgehen zur Identifikation der Lieferanten pro Bauteilvariante in der Bedarfsweitergabe ist in Abbildung 5.31 beispielhaft veranschaulicht.

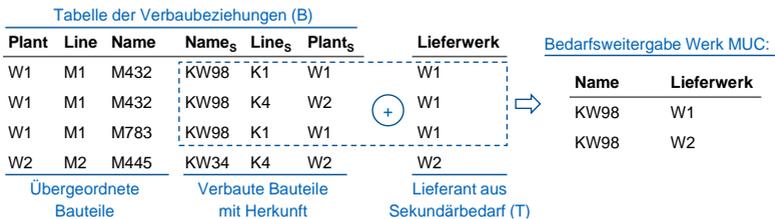


Abbildung 5.31: Beispielhafte Darstellung zu Identifikation der Lieferanten pro Bauteilvariante in der Bedarfsweitergabe.

Jedem Eintrag in Tabelle B wird die Spalte Lieferant aus der Bausteinvariante-zu-Lieferant-Tabelle T angefügt, bei denen die Linie und Bauteilvariante (in

B die Spalte Name_s) in beiden Tabellen übereinstimmen. Anschließend werden für jede Lieferantenwerk-Bauteilvariante-Kombination alle Produktionswerke der Bauteilvariante aufgelistet. Sind in der Auflistung Werke andere Werke als das Lieferantenwerk vorhanden, so wird im Bedarfskonsolidierung-Baustein des Lieferantenwerks diese Bauteilvariante bei diesen Werken bestellt. Um das Ergebnis in den Simulationsbausteinen verwenden zu können, werden noch der Pfad zum Bedarfskonsolidierung-Baustein des betrachteten Lieferantenwerks und zum Bedarf-Baustein am Produktionsstandort angefügt. Ergebnis ist eine Tabelle in der für jeden Bedarfskonsolidierung-Baustein, jede zu bestellende Bauteilvariante mit Produktionslinie, dem Lieferanten und dem Pfad zum Bedarf-Baustein, der die abgesendeten Bestellungen empfängt. Das Tabellenformat ist in Tabelle A.32 im Anhang dargestellt.

5.4.3 Identifikation der Parameterwerte

Nach Identifikation von Struktur und Beziehungen ist die Topologie des Simulationsmodells vollständig definiert. Im abschließenden Schritt erfolgt die automatisierte Parametrierung des Modells. Der Grundgedanke hinter den Methoden der automatisierten Parametrierung ist die Nutzung der Daten des datenbasierten Abbilds, da diese das reale Systemverhalten widerspiegeln und damit eine realitätsgetreuere Modellierung ermöglichen als der Rückgriff auf Planungsdaten oder Abschätzungen. Für die Parametrierung müssen die prozessorientierten Daten aus Sicht einzelner Bauteile in eine ressourcenorientierte Sicht übersetzt werden, da Parameterwerte über das Produktionssystem und nicht für einzelne Bauteile bestimmt werden sollen. Da für jedes Bauteil in den Falltabellen hinterlegt ist, welche Ressourcen durchlaufen wurden, können daraus alle Materialflussaktivitäten auch Ressourcen zugeordnete und so auf deren Eigenschaften hin untersucht werden. Somit ist bekannt, zu welcher Zeit welche Ressource welche Prozessschritte mit welchen Bauteilen ausgeführt hat.

Die aufgezeichneten Daten spiegeln somit wider, was tatsächlich im Materialfluss vorgefallen ist. Sie stellen das Ergebnis eines Prozesses dar, in dem Planungsvorgaben und Eigenschaften von Ressourcen und stochastisches Verhalten zusammentreffen. Beispielsweise wird mit einer definierten Ausbringung einer Produktionslinie während einer Schicht geplant, welche aufgrund von auftretenden Störungen in der Realität jedoch unterschritten werden kann.

Für die automatisierte Parametrierung des Simulationsmodells müssen anhand der aufgezeichneten Daten Rückschlüsse auf die Planungsvorgaben und die stochastischen Einflüsse gezogen werden und in verschiedenen Parameterwerten hinterlegt werden. Ein Beispiel hierfür sind die Plan-Durchlaufzeit einer Produktionslinie, welche die Planvorgabe darstellen, und das hinterlegte Histogramm mit der realen Verteilung der Durchlaufzeiten, anhand der die stochastischen Schwankungen modelliert werden.

Ergebnis des Prozessschritts sind mehrere Tabellenstrukturen, die detailliert in Anhang A.3.3 beschrieben und mit Beispieldaten versehen sind.

Im Folgenden werden die einzelnen Methoden zur Ermittlung der Parameterwerte vorgestellt. Die Parameterwerte auf Netzwerkebene werden dabei direkt aus den manuell zugespielten Eingangsdaten mit allgemeinen Informationen zum Simulationsmodell übertragen.

Schichtkalender

Unterschiedliche Schichtmodelle zwischen in Beziehung stehenden Ressourcen haben einen hohen Einfluss auf die Gestaltung der Auftragsabwicklung. Unterscheiden sich Arbeitszeiten, so müssen Maßnahmen der Entkopplung implementiert werden, um eine dauerhafte Produktionsfähigkeit bei allen Ressourcen sicherzustellen. Arbeitet beispielsweise eine Fertigungslinie im Ein-Schicht-System und beliefert eine Montagelinie im Zwei-Schicht-System, so erfordert dies ausreichende Puffer-Bestände, um die Montage in beiden Schichten mit Teilen zu versorgen. Die realitätsgetreue Abbildung von Schichtkalendern stellt damit eine wichtige Aufgabe der Parametrierung dar.

Zur automatisierten Identifikation von Schichtkalendern werden die aufgezeichneten Materialflussaktivitäten im datenbasierten Abbild für die betrachtete Linie herangezogen. Grundgedanke ist die Unterscheidung von Zeiträumen, in denen Aktivitäten auftreten gegenüber den Zeiträumen, in denen dies nicht der Fall ist. Zeiträume in denen Aktivitäten stattfinden, können mit Arbeitszeiten und damit Schichten assoziiert werden, wie in Abbildung 5.32 dargestellt ist.

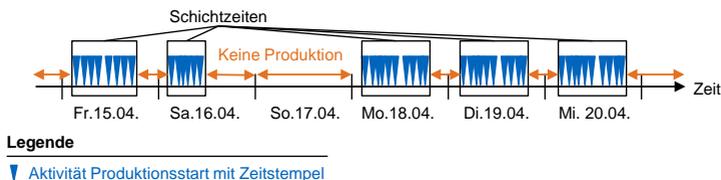


Abbildung 5.32: Identifikation von Schichtzeiten.

Hierfür werden zunächst alle Aktivitäten aus der Tabelle ACTIVITIES, die zur betrachteten Ressource gehören, ausgewählt. Anschließend werden für jeden Tag im Betrachtungszeitraum die Aktivitäten dieses Tages aufsteigend nach dem Ausführungszeitpunkt (Spalte *Eventtime*) sortiert. Dabei kann der früheste bzw. späteste Zeitpunkt als realer Schichtbeginn bzw. reales Schichtende interpretiert werden. Die Differenz beider Zeitpunkte entspricht der realen Schichtdauer des Tages.

Um die geplanten Schichten mit zugehörigen Start- und Endzeiten zu ermitteln, wird davon ausgegangen, dass die Plan-Werte einem konstanten Muster unterliegen und im Betrachtungszeitraum keine unregelmäßigen Schwankungen aufweisen. Dies entspricht der gängigen industriellen Praxis, bei der Arbeitszeiten geregelt und nur selten angepasst werden. Da die Start- und Endzeitpunkte in der Realität, wie Abbildung 5.33 dargestellt, Schwankungen unterliegen, werden

diese zur Bestimmung der Plan-Werte gemittelt. Sollten sich im betrachteten Zeitraum mehrere Änderungen im Schichtmodell ergeben haben, so kann dies zu verfälschten Ergebnissen bei der Ermittlung der Schichtkalender führen. Gleichmaßen kann ein zu kurz gefasster Datenzeitraum ebenso zu Verfälschungen führen, da bei einer kleinen Stichprobe außerplanmäßige Abweichungen, wie Störungen, einen höheren Einfluss aufweisen.

Aufgrund möglicher unterschiedlicher Schichtzeiten an verschiedenen Wochentagen, beispielsweise durch kürzere Wochenendschichten, werden hierfür Gruppen von Tagen anhand gleicher Schichtdauer, gerundet auf Stunden, bestimmt und über diese Gruppen jeweils der Median der Start- und Endzeiten ermittelt. Diese werden den entsprechenden Tagen zugeordnet und ergeben den Schichtkalender für jeden Tag im Betrachtungszeitraum, mit welchem die Simulationsbausteine parametrisiert werden.

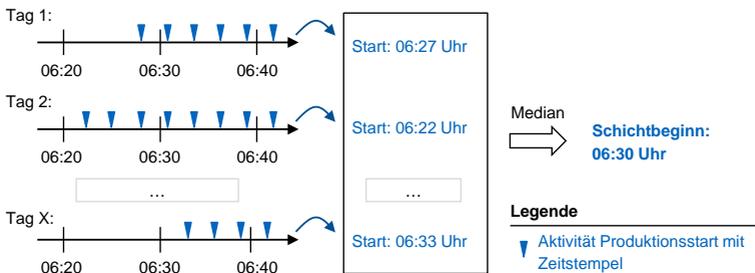


Abbildung 5.33: Real auftretende Schwankungen bei Zeitpunkten zum Schichtstart.

Transport

Für den Transport-Baustein sind zwei Parameter zu bestimmen: Die Transportzeitmatrix, die die mittleren Transportzeiten zwischen den Produktionsstandorten angibt, und die Transportkapazität, die die Menge in einer Lieferung transportierbaren Bauteilen je Bauteilart wiedergibt.

Zur Bestimmung der Transportzeitmatrix werden die aufgezeichneten Zeitpunkte von Versand- und Einlagerungsaktivitäten betrachtet und für jede Transportrichtung zwischen zwei Werken mit dem Median gemittelt.

Um diese Informationen aus dem datenbasierten Abbild zu extrahieren, müssen die einzelnen Lieferbeziehungen identifiziert werden. Hierfür müssen zunächst Start- und Zielpunkte für jedes Bauteil mit Versandaktivitäten bestimmt werden. Als Startpunkt kann das Produktionswerk aus der bauteilartspezifischen Fall-Tabelle verwendet werden. Der Zielpunkt wird über den Ort des Verbaus des jeweiligen Teils bestimmt und entspricht damit dem Produktionsort des übergeordneten Bauteils. Für jede Verbaubeziehung der allgemeinen Stückliste werden dafür alle zusammengehörigen Bauteile (Bauteile mit gleicher CaseID)

und deren Produktionsstandorte ermittelt. Anschließend werden alle Versandaktivitäten, eingeschränkt auf den Versand des untergeordneten Bauteils (Selektion nach der Bauteilart in Spalte `PartType`) aus der Tabelle `ACTIVITIES` bestimmt. Endpunkt des Transports ist in der datentechnischen Aufzeichnung die erste Einlagerungsaktivität des Bauteils, die zeitlich nach der Versandaktivität liegt. Auf diese Weise lassen sich für jedes Bauteil jeder Verbaubeziehung, der Startpunkt, der Endpunkt, der Versand- und der Einlagerzeitpunkt sowie deren Differenz als real aufgetretene Transportzeit der Lieferung aus den Daten extrahieren. Aus diesen Daten wird für jede Start- und Endpunkt-Kombination der Median über die Transportzeiten gebildet und als Parameterwert für diese Lieferbeziehung angesetzt.

Die Bestimmung der Transportkapazität je Lieferung wird für jeden Transport-Baustein und damit für jede Bauteilart und jeden Produktionsstandort getrennt vorgenommen. Die zugrunde liegende Annahme bei der automatisierten Bestimmung der Kapazität ist die zeitgleiche Erfassung der Versand-Aktivität für alle Bauteile, die einer Lieferung angehören. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass in der Realität versucht wird, die Kapazitäten voll auszuschöpfen und die Transportmittel mitsamt deren Kapazitäten über den betrachteten Zeitraum konstant bleiben.

Algorithmisch wird dies je Transport-Baustein, für das Absender-Werk und die zu versendende Bauteilart, die aus der Struktur bekannt ist, wie folgt umgesetzt.

Aus der bauteilartspezifischen Fall-Tabelle werden zunächst alle Bauteile ausgewählt, die im betrachteten Werk produziert wurden. Für diese Bauteile werden dann alle Versand-Aktivitäten aus der Tabelle `ACTIVITIES` vom Typ der aktuell betrachteten Bauteilart (Spalte `PartType`) selektiert. Die Aktivitäten werden anschließend nach dem Aktivitätszeitpunkt gruppiert und für jede Gruppe die unterschiedlichen Bauteile gezählt. Diese Menge stellt nun alle im Betrachtungszeitraum verschickten Versandlose und deren Größe dar. Aus diesen wird das Los mit der maximalen Größe gewählt und als Parameter für die Transportkapazität gesetzt.

Produktionslinie

Für die realitätsgetreue Abbildung der einzelnen Produktionslinien sind mehrere Parameterwerte pro Linie zu bestimmen.

Um die Befähigung, also die Auflistung aller Bauteilvarianten, die von der betrachteten Produktionslinie produziert werden können, zu bestimmen, wird von der Annahme ausgegangen, dass alle Bauteilvarianten, die innerhalb eines betrachteten Zeitraums die Linie durchlaufen haben, auch befähigt sind. Die Befähigung wird aus den bauteilartspezifischen Fall-Tabellen gewonnen, indem die Tabelle über die Spalte `Line` auf die betrachtete Tabelle eingegrenzt und alle unterschiedlichen Bauteilvarianten in Spalte `Name` extrahiert werden.

Der Parameter Ausbringung gibt die geplante Anzahl an zu produzierenden Teilen für jeden Tag im Simulationszeitraum an und stellt damit eine Planvorgabe dar.

In der Realität kann diese Planungsvorgabe aufgrund von Störungen unterschritten, oder, insofern bereits das Auftreten von Störungen in den Planungsvorgaben einkalkuliert war, auch überschritten werden. Bei einer realistischen Planungsvorgabe ist über einen ausreichend langen Zeitraum davon auszugehen, dass diese im Mittel auch erfüllt wird.

Die Bestimmung der Ausbringung erfolgt über die Ermittlung der real fertigestellten Bauteile je Tag. Hierfür werden im datenbasierten Abbild zunächst alle Bauteile identifiziert, die auf der betrachteten Linie produziert wurden, anschließend deren Aktivitäten aus der ACTIVITIES-Tabelle ausgelesen und diese wiederum auf die Aktivitäten reduziert, die den Produktionsstart auf der Linie aufgezeichnet haben. Entsprechend dem Zeitstempel der Aktivitäten werden diese nach Tagen gruppiert und gezählt. Die Verwendung des Produktionsstarts gegenüber dem Produktionsende liegt in der Tatsache begründet, dass Bauteile aufgrund von Qualitätsmängeln zwar geplante Kapazität der Linie verbrauchen, für diese jedoch keine Fertigstellungsaktivität aufgezeichnet wird. Eine Nutzung der Produktionsende-Aktivität würde die Ausbringung daher im Vergleich zum realen Wert unterschätzen.

Aus der ermittelten Zahl an Start-Aktivitäten pro Tag müssen nun die Planvorgaben bestimmt werden. Da die reale Ausbringung um die geplanten Werte schwankt, werden letztere mittels des Medians über Zahl der Start-Aktivitäten ermittelt. Der Median ist im Vergleich zum arithmetischen Mittel weniger anfällig für Schwankungen und wird diesem daher vorgezogen. Weiterhin müssen die Zusammenhänge zum Schichtkalender beachtet werden, da die geplante Ausbringung auch in Abhängigkeit der verfügbaren Produktionszeit steht. Die Ausbringung wird daher als Median über die realen Ausbringungszahlen von Tagen mit gleichen Schichtlängen berechnet und anschließend als Parameterwert für diese Tage gesetzt.

Kerngedanke der Simulation von Produktionslinien in den Bausteinen ist die Modellierung der Durchlaufzeit als im Simulationslauf zufällig gezogener Wert aus der real aufgezeichneten Verteilung über alle Durchlaufzeiten. Dabei sind ungeplante Situationen, die die Durchlaufzeit verlängern, wie Störungen oder Nacharbeitsprozesse, implizit in der Verteilung enthalten und dadurch auch realistisch in der Simulation abgebildet.

Zur Bestimmung der Durchlaufzeiten-Verteilung wird für jedes Bauteil aus den Aktivitäten die zeitlich erste Produktionsstart- und die zeitliche letzte Produktionsende-Aktivität auf der betrachteten Linie identifiziert. Anschließend wird die Differenz beider Zeitpunkte unter Berücksichtigung der Schichtzeiten errechnet (siehe Abbildung 5.34). Die Menge an so errechneten Durchlaufzeiten wird in ein Histogramm mit gleicher Bin-Breite übertragen. Zur Bestimmung der Anzahl der Bins wird auf die Regel nach Freedman–Diaconis zurückgegriffen (FREEDMAN und DIACONIS 1981). Der Median der Menge an Durchlaufzeiten wird als Parameterwert für die Plan-Durchlaufzeit der Linie herangezogen.

Für die Bestimmung der Ausschussquote werden je Produktionslinie alle Bauteile bestimmt, die mindestens eine Produktionsstart-Aktivität aufweisen, jedoch keine

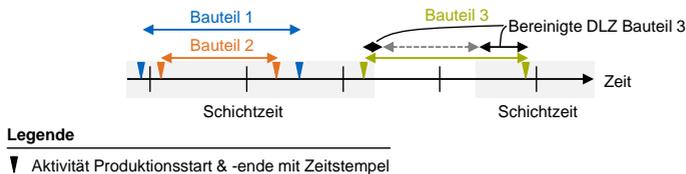


Abbildung 5.34: Bestimmung von Durchlaufzeiten und deren Bereinigung um Schichtzeiten.

für das Produktionsende. Dividiert zur Anzahl der im Zeitraum auf der Linie gefertigten Bauteile, ergibt sich die Ausschussquote in Prozent. Um durch den begrenzten Zeitraum keine Verfälschungen durch Bauteile zu erhalten, die noch innerhalb des Betrachtungszeitraumes in die Produktion gestartet sind, deren Fertigstellung jedoch außerhalb des Zeitraums liegt, werden zur Berechnung nur Teile herangezogen, deren Produktionsstart eine definierte Zeit vor Ende des Zeitraums liegt. Hierfür bietet sich der maximale Wert der aufgezeichneten Durchlaufzeiten an, womit Verfälschungen weitestgehend reduziert werden.

Weiterer Parameter innerhalb der Produktionslinie im Baustein Sekundärbedarf sind die Stücklisten für jede auf der Linie produzierte Bauteilvariante. Die Stücklisten sind bereits als Zwischenergebnis bei der Identifikation der aktiven Kunde-Lieferanten-Beziehungen in Kapitel 5.4.2 bestimmt worden und werden nun auch für die Parametrierung genutzt.

Lager

Um valide und mit der Realität vergleichbare Simulationsergebnisse zu erhalten, müssen die Startbedingungen bei Ausführung eines Simulationslaufs mit den aktuellen Zuständen des realen Systems übereinstimmen. Durch eine automatisierte Bestimmung des initialen Bestands in jedem Lager des GPN wird dieser Anforderung Rechnung getragen. Zur Bestimmung des Bestands anhand des datenbasierten Abbilds ist eine Überführung der prozessbezogenen Daten, die jeweils Änderungen im System aufzeichnen, in eine statische, auf bestimmte Zeitpunkte beschränkte Form vorzunehmen. Hierfür wird der Lagerbestand für jeden Tag (Zeitpunkt 0 Uhr) im Datenzeitraum bestimmt. Die Herausforderung besteht darin, dass durch Ein- und Auslagerungsaktivitäten zwar die zeitliche Veränderung des Bestands in den Daten aufgezeichnet ist, die absolute Bestandshöhe jedoch nicht explizit vorhanden ist. Diese lässt sich implizit bestimmen, indem alle Bauteile identifiziert werden, die im betrachteten Zeitraum der Datenaufzeichnung lediglich eine Auslagerungsaktivität vorweisen (Fall 1 in Abbildung 5.35). Da diese Teile nicht eingelagert wurden, müssen diese zu Beginn des betrachteten Zeitraums bereits im Lager gelegen haben und folglich den Bestand zu Beginn des Zeitraums darstellen. Verfälscht werden kann dieses Ergebnis durch Bauteile, welche zu Beginn des Zeitraums im Lager liegen, aber weder ein- noch ausgelagert und damit in keiner Weise im datenbasierten Abbild erfasst wurden (Fall 3 in Abbildung 5.35). Um diese Unsicherheit zu reduzieren,

sollte der betrachtete Zeitraum möglichst so gewählt sein, dass eine komplette Umschichtung der Lager in dieser Zeit geschehen sein sollte. Bauteile, die innerhalb des Datenzeitraums ein- und ausgelagert wurden, sind für die Bestimmung des initialen Bestands nicht notwendig, werden aber für die Berechnung des Bestandsverlaufs verwendet (Fall 2 in Abbildung 5.35).

Algorithmisch ist die Bestimmung des Bestands für jedes Lager, identifizierbar über Bauteilart und Werk, wie folgt aufgebaut: Im ersten Schritt werden aus der ACTIVITIES-Tabelle alle Ein- und Auslagerungsaktivitäten passend zu betrachtetem Lager (Spalte `Plant`) und Bauteilart (Spalte `PartType`) ausgewählt. Anschließend werden für jedes Bauteil die Anzahl an Ein- bzw. Auslagerungsaktivitäten bestimmt, indem über die Bauteilidentifikationskennzeichnung `CaseID` gruppiert wird. Für Bauteile ohne Einlagerungsaktivität wird über die bauteilspezifische Fall-Tabelle deren Variante (Spalte `Name`) ermittelt, nach dieser gruppiert und die Anzahl verschiedener Bauteile bestimmt. Die Bauteilanzahl pro Bauteilvariante entspricht dem Lagerbestand zu Beginn des betrachteten Zeitraums.

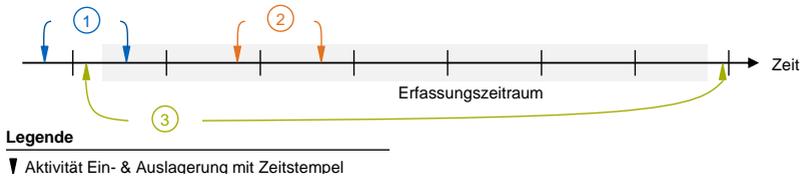


Abbildung 5.35: Ein- und Auslagerungsaktivitäten in Bezug auf den Erfassungszeitraum und deren Relevanz für die Bestimmung des initialen Bestands.

Im zweiten Schritt werden die Bestandshöhen für auf Tagesbasis über den gesamten betrachteten Zeitraum ermittelt. Dafür werden wiederum die Ein- und Auslagerungsaktivitäten zum betrachteten Lager bestimmt, nach dem Datum des Zeitstempels (Spalte `Eventtime`) sowie der Bauteilvariante aus der zugehörigen Fall-Tabelle gruppiert und die Ein- und Auslagerungsaktivitäten für diese Gruppierung gezählt. Ergebnis ist eine Auflistung der Ein- und Auslagerungen pro Variante und Tag. Ausgehend vom Datum des im ersten Schritt errechneten Anfangsbestands wird über jeden Tag im Zeitraum iteriert, je Variante zum Bestand des Vortages die Anzahl an Einlagerungen addiert und die der Auslagerungen subtrahiert und das Ergebnis als Bestand für den betrachteten Tag gesetzt.

Zur Ermittlung des Parameters „initialer Bestand“ in den Lager-Bausteinen wird der Bestand zum Simulationsstartdatum gewählt und ausgegeben. Der zweite zu parametrierende Wert im Lager-Bausteinen, die im Lager befähigten Bauteilvarianten, wird auf die gleiche Weise wie bei Produktionslinien bestimmt.

Bedarfsaufteilung

Die Bedarfsaufteilung stellt in der Realität eine Planungsentscheidung der Produktionsplanung in der betrachteten Produktionsstufe dar. Die Informationen darüber, wann und in welchen Mengen Bedarfe bei anderen Werken bezogen

werden, ist nicht explizit in den verwendeten Daten vorhanden. Eine Möglichkeit diese Information implizit aus den aufgezeichneten Daten zu erhalten, verläuft über die Mengen verbauter Teile bei der nachfolgenden Produktionsstufe und deren Herkunft. Wurden beispielsweise 60 Prozent der verbauten Kurbelwellen einer Motorvariante im eigenen Werk und 40 Prozent in einem anderen Werk produziert, so ermöglicht dies den Rückschluss auf die Aufteilung der Bedarfe in der Kurbelwellen-Planung im eigenen Werk. Modelliert wird diese Planungsentscheidung daher über die Angabe von Quoten für jeden Tag im Betrachtungszeitraum, wie der eingehende Bedarf jeder Variante zu welchem Anteil in welchem Werk produziert wird.

Die Ermittlung dieses Parameters erfolgt wiederum für jeden Baustein der Bedarfskonsolidierung jeder Bauteilart und jedes Werks einzeln. Hierfür wird auf die Ergebnisse und Prozessschritte aufgebaut, die bereits zur Bestimmung der aktiven Kunde-Lieferanten-Beziehungen in Kapitel 5.4.2 eingesetzt wurden, aufgesetzt. Grundlage stellen die Verbaubeziehungen, definiert durch Werk, Produktionslinie und Variante der übergeordneten Bauteilart sowie Werk, Produktionslinie und Variante der untergeordneten Bauteilart, in Kombination mit dem Lieferantenwerk dar (siehe exemplarische Darstellung in Abbildung 5.36). Für jede Verbaubeziehung wird für jeden Tag im Betrachtungszeitraum die Häufigkeit des Auftretens bestimmt. Dies erfolgt über die Kombination der bauteilartspezifischen Fall-Tabellen über die gemeinsame Spalte CaseID und deren Einschränkung auf den betrachteten Tag. Anschließend wird nach der Verbaubeziehung gruppiert und die Einträge gezählt. Das Ergebnis wird an die um das Lieferantenwerk aus den Sekundärbedarf-Bausteinen erweiterte Tabelle der Verbaubeziehungen angefügt. Zur Berechnung der Quoten wird die sich ergebende Tabelle aus Sicht des Lieferantenwerks betrachtet und für jede Variante der untergeordneten Bauteilart zunächst die gesamte Menge und dann die Menge pro Produktionslinie bestimmt. Hieraus werden anschließend die Quoten als prozentualer Anteil der Menge der einzelnen Linien an der Gesamtmenge errechnet. Ergebnis des Vorgehens ist eine Tabelle pro Bedarfskonsolidierung-Baustein, die für jede Variante und jeden Tag eine Quote zur Aufteilung eingehender Bedarfe enthält. Eine beispielhafte Darstellung findet sich im Anhang A.3 in Tabelle A.45.

Tabelle der Verbaubeziehungen (B)								Quotierung W1 15.10.21			
Plant	Line	Name	Name _s	Line _s	Plant _s	Lieferwerk	15.10.21	Variante	Linie	Quote	
W1	M1	M432	KW98	K1	W1	W1	15	⇒	KW98	K1	75 %
W1	M1	M432	KW98	K4	W2	W1	25		KW98	K4	25 %
W1	M1	M783	KW98	K1	W1	W1	60				
W2	M2	M445	KW32	K4	W2	W2	30				
Übergeordnete Bauteile			Verbaute Bauteile mit Herkunft			Lieferant aus Sekundärbedarf	Verbaute Teile pro Tag				

Abbildung 5.36: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Quotierung der Bedarfsaufteilung im Werk W1 zu einem definierten Datum.

Kapitel 6

Anwendung und Evaluation

Dieses Kapitel fokussiert sich auf die Evaluation von AutoGPN anhand einer exemplarischen Anwendung. Hierfür wurde der Ansatz im GPN der Motorenproduktion eines Automobilherstellers angewandt. Die Erfahrungen und Ergebnisse der Anwendung werden in Kapitel 6.1 dargestellt. Anschließend erfolgt die allgemeine Evaluation des Ansatzes bezüglich der Erfüllung der gesetzten Anforderungen (Kapitel 6.2.1), eine Diskussion über die Limitationen des Ansatzes (Kapitel 6.2.2) sowie eine betriebswirtschaftliche Bewertung (Kapitel 6.2.3). Mit der Anwendung und allgemeinen Evaluation wird die Phase der deskriptiven Studie II der DRM abgeschlossen.

6.1 Anwendung in der industriellen Praxis

Im Folgenden wird zunächst das industrielle Umfeld der Anwendung näher charakterisiert und gegenüber dem in Kapitel 1.3.3 beschriebenen Überblick weiter detailliert. Anschließend erfolgt die Beschreibung des Einsatzes des Ansatzes.

6.1.1 Charakterisierung des industriellen Umfelds

Zur Evaluation des Ansatzes wurde ein Ausschnitt des Motoren-Produktionsnetzwerks der Auto AG betrachtet. Integriert wurden die Gewerke der Motormontage, die Shortblock-Montage, die Zylinderkopfmontage sowie die mechanische Fertigung des Zylinderkopfs. Die Gewerke Kurbelwellen- und Kurbelgehäuse-Fertigung wurden nicht für die Simulation berücksichtigt, da diese für die zu untersuchenden Fragestellungen nicht relevant waren. Das betrachtete GPN besteht aus drei Produktionsstandorten: Ingolstadt (ING), Deutschland, Pilzen (PLZ), Tschechien, und Dublin (DUB), Irland. Produziert wird auf fünf Motor Montagelinien, drei Shortblock-Montagelinien, vier Zylinderkopfmontagen und vier Zylinderkopffertigungen. Kunden für Motoren sind 11 Fahrzeugwerke der Auto AG in Europa, Amerika und Asien. Das betrachtete GPN ist mit internen und externen Lieferbeziehungen in Abbildung 6.1 dargestellt.

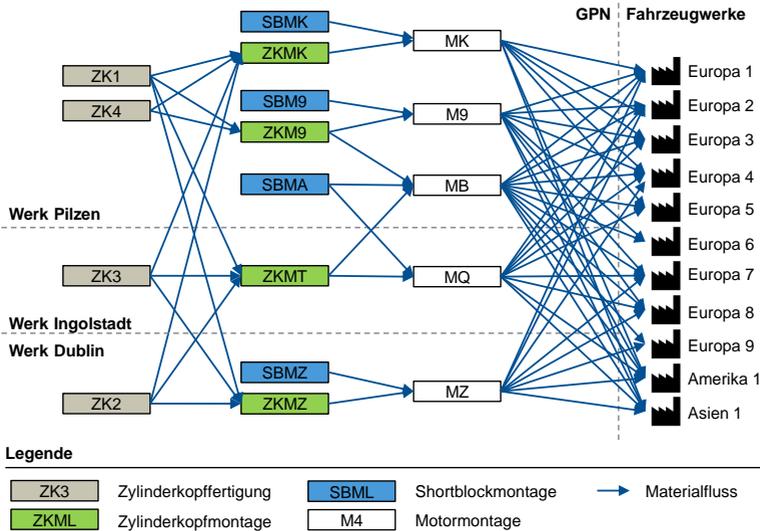


Abbildung 6.1: Darstellung des betrachteten GPN der Motorenproduktion der Auto AG.

Alle Produktionslinien sind stark flexibilisiert und produzieren in Losgröße eins. Die Programmplanung der Produktionslinien erfolgt für jede Linie einzeln und richtet sich nach der Bestandsreichweite einzelner Varianten. Die Bestandsreichweite gibt den Zeitraum in Tagen an, in dem die eingegangenen Bedarfe gedeckt werden können, ohne neue Teile der Variante produzieren zu müssen.

Als erster Untersuchungsgegenstand und Hauptgrund für die Notwendigkeit einer Simulation führt das Management der Auto AG hohe Lagerliegezeiten und Bestände an. Diese bestehen in allen Gewerken, sind aber nach der Zylinderkopffertigung besonders ausgeprägt. Mit der Simulation soll die Frage untersucht werden, ob das System auch mit einem geringeren Bestandslevel betrieben werden kann, ohne die geforderte Liefertreue von Motoren an Fahrzeugwerke von 100 Prozent zu beeinträchtigen. Im Rahmen dieser Untersuchung ist insbesondere auf die Abhängigkeiten zur Prozessstabilität einzugehen, welche sich durch eine Spreizung der Durchlaufzeit in der Produktion auszeichnen. Diese Spreizung wird durch Nacharbeit und Störungen verursacht. Simulation bietet sich in diesem Fall als passendes Werkzeug an, da diese stochastische Betrachtungen und die Evaluation verschiedener Szenarien ermöglicht.

Simulationen wurden bei der Auto AG vor dieser Anwendung lediglich auf Ebene der Produktionslinien eingesetzt. Eine Betrachtung von mehreren, verketteten Linien, Werken oder des Netzwerks wurde laut der hinzugezogenen Simulationsexperten aus Gründen der hohen Komplexität bisher nicht durchgeführt.

Die Anwendung des Ansatzes erfolgte von Quartal 3 2019 bis Quartal 1 2020. Als Zeitraum der Betrachtung wurde das Jahr 2018 bestimmt, um ein vollständiges Jahr mit allen saisonalen Einflussfaktoren, wie Betriebsurlaube und Produktionsunterbrechnungen für Umbauten, einzubeziehen. Für diesen Zeitraum sollten mit Hilfe der Simulation Szenarien mit geringeren Bestandsleveln untersucht und mit dem realen Verhalten im Zeitraum abgeglichen werden.

6.1.2 Anwendung des Ansatzes

Im Folgenden werden die Erfahrungen und Ergebnisse bei der Anwendung des Ansatzes bei der Auto AG beschrieben. Dabei wird zunächst auf den manuellen Teil der Datenidentifikation, dann die automatisierte Datenverarbeitung und das datenbasierte Abbild sowie abschließend die automatisierte Modellbildung und Parametrierung eingegangen. Innerhalb jedes Schrittes erfolgt auch eine Bewertung über die Validität des Ansatzes.

Abschließend werden die Ergebnisse der automatisierten Modellbildung und Parametrierung sowie die Simulationsbausteine genutzt, um ein ausführbares Simulationsmodell des Anwendungsfalls zu generieren. Innerhalb dieses Prozesses werden auch die Planungsalgorithmen der Auto AG in das Modell implementiert. Das so entstandene Simulationsmodell wird verifiziert und validiert. Dabei werden Simulationsergebnisse mit dem realen historischen Systemverhalten verglichen. Kann dadurch die Validität des Simulationsmodells bestätigt werden, so lässt dies auch den Rückschluss zu, dass der entwickelte Ansatz als Ganzes valide Ergebnisse erzeugt.

Manuelle Datenidentifikation

Um die richtigen IT-Systeme zu identifizieren, die benötigten Daten zu extrahieren und diese über alle Prozessschritte im Netzwerk zu standardisieren, wurde die von AutoGPN bereitgestellte Methode zur Datenidentifikation sowie die Ontologie OntoGPN genutzt. Die Methode wurde dabei gemeinsam mit Experten der Auto AG aus den Bereichen Produktionsplanung und -steuerung, IT und Produktion durchgeführt. Dabei wurden sieben IT-Systeme identifiziert, aus denen Daten für die Eingangsdatentabellen exportiert werden konnten.

Für die Ausleitung der identifizierten Daten lagen in allen identifizierten IT-Systemen bereits vorgefertigte Exportfunktionen vor, die von Fachexperten der Produktionsplanung ohne vertiefte IT-Expertise bedient und mit denen die benötigten Daten ausgeleitet werden konnten. Zur Überführung in das Format der Eingangsdatentabellen waren nur wenige Anpassungen notwendig.

Automatisierte Datenverarbeitung und datenbasierte Abbild

Die Algorithmen der Datenverarbeitung sind in den Programmiersprachen Python und Structured Query Language (SQL) implementiert und konnten in dieser

Form auch bei der Auto AG ausgeführt werden. Aus den Daten im Format der Eingangsdatentabellen konnte automatisiert das datenbasierte Abbild des GPNs der Auto AG aufgebaut werden. Eine Adaption der Algorithmen für den Anwendungsfall war nicht notwendig, sodass keine initialen Aufwände beim Einsatz der Algorithmen anfielen.

Zur Validierung der Datenaufbereitung wurden die im datenbasierten Abbild enthaltenen Stückzahlen mit den tatsächlich produzierten Stückzahlen im gleichen Zeitraum verglichen und von Experten der Auto AG begutachtet. Alle Zahlen wiesen nur geringe Abweichungen auf und entsprachen den Erwartungen. Die Experten bewerteten die Datenbasis und die Datenaufbereitung als valide.

Automatisierte Modellbildung und Parametrierung

Die Algorithmen zur automatisierten Modellbildung und Parametrierung sind ebenfalls in Python sowie SQL implementiert und konnten in dieser Form bei der Auto AG vollkommen automatisiert ausgeführt werden. Alle Ausgabedateien wurden erwartungsgemäß erzeugt.

Zur Validierung des Schrittes der automatisierten Modellbildung und Parametrierung wurden die erzeugten Parameterwerte mit den real gemessenen Werten aus der Historie des GPNs verglichen und Abweichungen von Experten der Auto AG bewertet. Als wichtige Parameterwerte wurden zum einen die rekonstruierten Schichtkalender und zum anderen die Soll-Ausbringungszahlen der Produktionslinien für die Validierung herangezogen. Die ermittelten Schichtkalender entsprachen zu 99 Prozent den realen Schichtkalendern. Bei der Bestimmung der Ausbringung pro Produktionslinie konnte bei den Montage- und Vormontagelinien der Auto AG eine Übereinstimmung auf $\pm 0,7$ Prozent mit geplanten Werten der Vergangenheit erreicht werden. Die Experten der Auto AG stuften damit die ermittelten Parameterwerte als valide ein.

Validierung des Simulationsmodells

Mit den Ergebnissen der automatisierten Modellbildung und Parametrierung wurde manuell ein ausführbares Simulationsmodell in der Software Plant Simulation generiert. Dabei wurden auch die individuellen Planungslogiken der Auto AG in den Simulationsbausteinen nachgebildet. Die Integration der Logiken in die allgemeinen SimGPN-Bausteine verlief effizient und wurde durch den Aufbau der Bausteine unterstützt.

Nach Integration der Planungslogiken wurde das Simulationsmodell zunächst verifiziert. Die Ausführung der Simulation verlief erwartungsgemäß, sämtliche Material- und Informationsfluss- sowie Planungsprozesse wurden den Simulationszeitraum über ausgeführt. Ergebnisdaten wurden erzeugt und konnten ausgegeben sowie analysiert werden. Die Anzahl produzierter Teile während des Simulationslaufs entsprach den Erwartungen.

Neben der technischen Ausführbarkeit wurde die Validität des Simulationsmodells untersucht. Hierfür wurden fünf Simulationsläufe mit gleichen Eingangsdaten mit einem Simulationszeitraum von Februar 2018 bis Oktober 2018 durchgeführt. Lediglich die Initialisierung der Zufallsgeneratoren unterschieden sich in den Simulationsläufen, um unterschiedliche stochastische Schwankungen in den Läufen zu simulieren. Dabei wurden fünf Simulationsläufe durchgeführt, um mögliche unwahrscheinliche Ausreißer zu vermeiden und um eine größere Stichprobe zu erhalten. Die Simulationen wurden auf einem handelsüblichen Laptop (ThinkPad P50, Intel Quad-Core i7 Prozessor 2,7GHz, 8GB Arbeitsspeicher) durchgeführt, wobei ein Simulationslauf eine Rechenzeit von circa vier Stunden beanspruchte.

Für die Validierung des Simulationsmodells wurden aus den Ergebnissen der Simulationsläufe zentrale Kennzahlen berechnet, über die fünf Läufe gemittelt und mit den Kennzahlen des realen Systems im gleichen Zeitraum verglichen. Gemeinsam mit den Fachexperten der Auto AG wurden hierfür die Kennzahl der Liefertreue über alle Produktionsstufen sowie der Verlauf der Lagerliegezeiten und Bestände ausgewählt. Da die Motorenproduktion der Auto AG als Zulieferer für die Fahrzeugmontage höchste Ansprüche an die Liefertreue zu erfüllen hat, lag diese laut Experten der Auto AG im betrachteten Zeitraum bei nahezu 100 Prozent. Der Mittelwert über die Simulationsläufe lag bei 99,95 Prozent und ist damit vergleichbar mit dem realen Wert. Der Unterschied ist darüber zu erklären, dass in der Realität bei drohender Lieferunfähigkeit manuell in Planung und Produktion eingegriffen wird, um in jedem Fall liefern zu können. In dieser Tiefe ist dies in der Simulation nicht abbildbar. In Rücksprache mit den Experten der Auto AG kann diese kleine Unschärfe in der Simulation aber als vertretbar angesehen werden. Da lange Lagerliegezeiten und hohe Bestände als zentrale Herausforderungen der Auto AG definiert wurden, welchen mit Hilfe der Simulation verschiedenster Alternativszenarien begegnet werden soll, wurden die Liegezeiten als weitere Kennzahl zur Validierung des Simulationsmodells herangezogen. In Abbildung 6.2 werden die Verläufe der Zylinderkopf-Lagerliegezeiten des realen Systems mit den gemittelten Werten aus den fünf Validierungsläufen verglichen. Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung in Höhe und Verlauf der Liegezeiten über den betrachteten Zeitraum. Gemeinsam mit Fachexperten der Auto AG wurden die Verläufe diskutiert und als vergleichbar eingestuft. Abweichungen zwischen den Kurven können mit Störungen im realen System erklärt werden. Insbesondere kam es im betrachteten Zeitraum in Woche 27 zu mehreren größeren Störungen, die die Lagerbestände und damit auch die Lagerliegezeiten reduzierten. In den gemittelten Simulationsergebnissen treten diese Störungen nicht zu diesen Zeitpunkten und auch nicht mit der gleichen Intensität auf. Dies entspricht jedoch einer realistischen Abbildung, da die Situation des realen Systems in den Wochen 27 bis 31 laut Expertenaussagen nur sehr selten auftritt.

Da Lagerliegezeiten durch eine Vielzahl an Prozessen der Auftragsabwicklung beeinflusst werden, bilden die vergleichbaren Verläufe zwischen Realität und Simulation einen verlässlichen Indikator dafür, dass in der Simulation die Cha-

rakteristika der Auftragsabwicklung und das Systemverhalten des realen GPN valide abgebildet wurden.

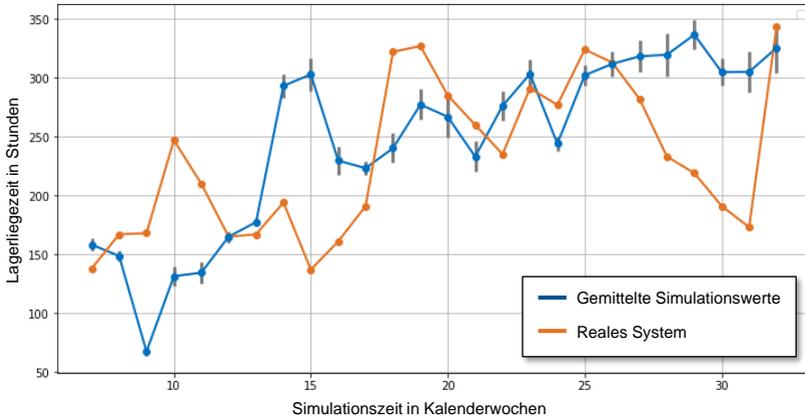


Abbildung 6.2: Vergleich der Lagerliegezeiten von Zylinderköpfen zwischen realem System und dem Mittelwert über fünf Simulationsläufe. Die dargestellten Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Simulationsdaten.

6.2 Evaluation des Ansatzes

Im Folgenden wird der Ansatz zunächst entsprechend der Erfüllung der Anforderungen evaluiert, anschließend auftretende Limitationen erörtert und dessen betriebswirtschaftliches Potenzial bewertet. Abschließend wird auf die in Kapitel 4.2 aufgestellte spezifische Hypothese eingegangen.

6.2.1 Erfüllung der Anforderungen

Domänenspezifische Anforderungen

- A1. *Abbildung der Charakteristika der Auftragsabwicklung in GPN.* Die Grundlage für den Ansatz stellt die entwickelte Ontologie *OntoGPN* zur Modellierung der Auftragsabwicklung in GPN dar. Diese bildet alle Elemente der Auftragsabwicklung in Form von Materialfluss-, Informationsfluss- sowie Planungs- und Steuerungsprozessen strukturiert mit deren Beziehungen untereinander ab. Gleichzeitig sind alle Elemente in die Struktur von Produktionsnetzwerken entsprechend dem Ebenen-Modell der Produktion eingebettet modelliert. Die aus *OntoGPN* abgeleiteten allgemeinen Simulationsbausteine weisen diese Elemente ebenfalls auf und

ermöglichen die Zusammenstellung eines ausführbaren Simulationsmodells. Die verschiedenen Ebenen der Planung, von Programmplanung bis Produktionssteuerung und Transportsteuerung, ebenso wie interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen, modelliert über die Erzeugung und Bestellung von Sekundärbedarfen sowie die Weitergabe von Bedarfen zwischen Werken im Netzwerk, sind in den Bausteinen abgebildet. Im Anwendungsfall konnten die Ontologie und die Simulationsbausteine erfolgreich eingesetzt werden. Die aus den Ergebnissen der Algorithmen zur Datenverarbeitung, Modellbildung und Parametrierung hervorgegangene ausführbare Simulation im Anwendungsfall zeigte eine valide Abbildung des realen Systemverhaltens. Die Anforderung kann als erfüllt angesehen werden.

- A2. *Taktisch operative Simulation der Auftragsabwicklung in GPN.* Die entwickelten allgemeinen Simulationsbausteine bilden alle Prozessschritte der taktisch operativen Auftragsabwicklung in GPN ab. Taktische Planungsaufgaben, wie die Programmplanung und die Weitergabe von Sekundärbedarfen an vorgelagerte Lieferanten, sind integriert und im Anwendungsfall validiert worden. Operative Prozesse wie die Steuerung von Produktionslinien und Transporten sowie Produktion, Lagerung und Transport von Bauteilen verschiedener Bauteilarten und Varianten sind abgebildet. Ein aus den Bausteinen zusammengestelltes Simulationsmodell ermöglicht die sekundengenaue Simulation der Prozesse mit einer Betrachtung jedes einzelnen Bauteils. Gleichzeitig können taktische Zeiträume von mehreren Monaten simuliert werden, wie im Anwendungsfall gezeigt werden konnte.
- A3. *Schaffung eines strukturierten Verständnisses der Auftragsabwicklung in GPN.* Die entwickelte Ontologie OntoGPN stellt ein strukturiertes Modell der Auftragsabwicklung in GPN dar, mit deren Hilfe sich die Beziehungen zwischen den Elementen der Auftragsabwicklung, ausgetauschte Informationen und Schnittstellen nachvollziehen lassen. Im industriellen Anwendungsfall wurde die Ontologie erfolgreich eingesetzt, um ein gemeinsames Verständnis des zu untersuchenden Produktionsnetzwerks zu schaffen. Gleichzeitig zeigte die Anwendung auch auf, dass Ontologien den Experten im betrachteten Unternehmen weitgehend unbekannt sind. Dies erforderte zunächst eine grundlegende Erklärung über den Einsatz und Gebrauch von Ontologien, bevor die entwickelte Ontologie genutzt werden konnte. Die entwickelte Ontologie kann folglich zwar die Anforderung erfüllen, erfordert im Anwendungsfall aber eventuell vorgelagerte Schulungen.

Anforderungen an das Datenmanagement

- A4. *Unterstützung bei der Datenidentifikation durch strukturierte Beschreibung von Daten und Quellsystemen.* Die Datenidentifikation stellt in Simulationsprojekten einen der größten Aufwände dar. Diese Aufwände zu

reduzieren, ist von der Literatur als Forschungspotenzial identifiziert worden. Zentraler Gedanke des entwickelten Ansatzes ist die Fokussierung auf Tracking- und Tracing-Daten, die als aufgezeichnete Daten aus dem realen System weitverbreitet, einfach beschreibbar und implizit detaillierte Informationen über das reale Systemverhalten beinhalten. Durch diese Einschränkung wird die Vielfalt an möglichen Datenquellen begrenzt. Weiterhin enthält die Ontologie eine tiefgreifende Modellierung der Entstehung dieser Daten und deren Verknüpfung mit den Produktionsprozessen. Hierdurch wird ein gemeinsames Verständnis über notwendige Daten zwischen den Fachexperten der IT, Produktion, Logistik und Simulation geschaffen, sodass gemeinsam die richtigen Datenquellen schnell identifiziert und mit dem produktionstechnischen Verständnis verknüpft werden können. Die Ontologie wird über die Möglichkeit der Instanziierung weitergehend als Wissensmodell genutzt, um bereits identifizierte Daten und Systeme zu dokumentieren.

- A5. *Nutzung standardisierter Systemdaten.* Um zum einen eine breite Anwendbarkeit über viele Unternehmen und zum anderen einen geringen Aufwand in der manuellen (Vor-)Verarbeitung der Daten sicherzustellen, sollen die Anforderungen an die Eingangsdaten möglichst gering ausfallen. Die Fokussierung auf Tracking- und Tracing-Daten erfüllt diese Anforderungen, da diese als Rückmeldungen aus dem Produktionssystem an die Steuerungssysteme für eine funktionsfähige IT-Unterstützung der Auftragsabwicklung unerlässlich sind. Die Daten sind folglich in den weitverbreiteten IT-Systemen, wie SAP oder Microsoft Dynamics, standardmäßig vorhanden.

Gleichzeitig ist der notwendige Informationsgehalt klar definiert und lässt sich für Tracing-Daten auf eine Bauteilidentifikationskennzeichnung, einen passierten Zählpunkt und einen Zeitstempel, bei Tracking-Daten auf zwei Bauteilidentifikationskennzeichnungen eingrenzen. Ergänzt werden diese Daten um Informationen zum Bauteil, welche sich jedoch auf die Bezeichnung der Varianten begrenzen lässt. Im Anwendungsfall waren Möglichkeiten zum Datenexport standardmäßig in die IT-Systeme integriert und konnten ohne Beteiligung von IT-Experten exportiert werden. Dabei waren nur geringe manuelle Vorarbeiten notwendig, um die exportierten Daten in die benötigte Form für die automatisierte Weiterverarbeitung im Ansatz zu überführen.

- A6. *Bereitstellung einer standardisierten Schnittstelle zur effizienten Anbindung der Rohdaten.* Mit den Eingangsdatentabellen stellt der entwickelte Ansatz eine klar definierte Datenstruktur bereit, in die die benötigten Rohdaten zu überführen sind. Die Struktur orientiert sich dabei an Form und Format der Tracking- und Tracing-Rohdaten. Im Anwendungsfall wurde gezeigt, dass die notwendigen Daten mit nur geringem Aufwand in der Vorverarbeitung in die Form der Eingangsdatentabellen überführt werden konnten. Ebenso konnten Daten aus verschiedenen Systemen verschiedener Werke einfach in den Eingangsdatentabellen zusammen-

geführt werden. Durch die Bereitstellung einer Eingangsdatentabelle zur Definition von Prozessen wird ebenfalls die Standardisierung von Materialflussaktivitäten über Produktionsstufen, Bauteilarten und Werke sichergestellt. Die Eingangsdatentabellen entkoppeln die manuellen Schritte der Datenidentifikation und des Datenexports von den restlichen Schritten des Ansatzes. Hierdurch können die nachfolgenden Schritte ohne Adaptionen im Anwendungsfall automatisiert ausgeführt werden.

- A7. *Bereitstellung eines strukturierten Datenmodells.* Mit dem datenbasierten Abbild des GPNs wurde eine Datenstruktur geschaffen, in der für jedes einzelne Bauteil im Betrachtungszeitraum alle Materialflussaktivitäten mit zugehörigen Operatoren, Bauteilinformationen und Beziehungen zu anderen Bauteilen strukturiert gespeichert und effizient abgefragt werden können. Die Aktivitäten sind dabei über alle Werke und Ressourcen standardisiert.
- A8. *Bereitstellung von Algorithmen zur Datenverarbeitung.* Die Überführung der Rohdaten aus den Eingangsdatentabellen in das datenbasierte Abbild erfolgt im Ansatz automatisiert über entwickelte Algorithmen. Die Algorithmen identifizieren die Zusammenhänge zwischen einzelnen Bauteilen über Verbaubeziehungen und standardisieren die technischen Beziehungen der IT-Systeme für Aktivitäten. Der Aufwand für die Datenverarbeitung kann hierdurch gegenüber klassischen Simulationsprojekten stark reduziert werden. Gleichzeitig ermöglicht die Automatisierung eine regelmäßige Aktualisierung der Datenbasis ohne manuelle Aufwände.

Anforderungen an Modellbildung und Parametrierung

- A9. *Bereitstellung von Algorithmen zur Modellbildung.* Nur wenige Ansätze in der Literatur stellen Lösungen für die Modellbildung bereit. Diese verbleibt in klassischen Simulationsprojekten in der Hand des ausführenden Simulationsexperten. Im vorgestellten Ansatz wurden Algorithmen entwickelt, die mit den Daten des datenbasierten Abbilds sowie den allgemeinen Simulationsbausteinen die Struktur und Vernetzung von Material- und Informationsflüssen identifizieren können. Das Ergebnis ist eine Auflistung aller zur Abbildung des Anwendungsfalls notwendigen Simulationsbausteine und deren relative Platzierung im Simulationsmodell sowie die Ausgabe sämtlicher Beziehungen zwischen den Bausteinen. Die Topologie des Simulationsmodells kann somit vollständig abgebildet werden. Lediglich individuelle Planungs- und Steuerungslogiken können von den entwickelten Algorithmen nicht erkannt werden. Diese Limitation wird in Kapitel 6.2.2 diskutiert. Die Anforderung konnte somit nicht vollständig, jedoch zu großen Teilen erfüllt werden.
- A10. *Bereitstellung von Algorithmen zur Parametrierung.* Neben der Modellbildung integriert der Ansatz Algorithmen zur Parametrierung des Simulationsmodells. Dabei werden die Parameter der im Anwendungsfall identifizierten Simulationsbausteine anhand der Daten aus dem datenbasierten

Abbild rekonstruiert. Dies beinhaltet Parameter für Produktionslinien (wie Schichtkalender, Ausbringungen, Befähigungen und Durchlaufzeitenverteilungen), Transporte im GPN (wie Transportkapazitäten) und Planungsparameter (wie Quoten zur Aufteilung von Bedarfen zwischen Werken). Die Algorithmen brauchen neben den beschriebenen Eingangsdaten keine weiteren Informationen oder Adaptionen und können automatisiert ablaufen. Initiale Aufwände fallen somit nicht an.

- A11. *Automatisierung von Modellbildung und Parametrierung.* Die entwickelten Algorithmen zur Modellbildung und Parametrierung sind in einem übergeordneten Prozess implementiert, sodass eine automatisierte Ausführung dieser Schritte möglich ist. Nach Ausleitung der Rohdaten in die Eingangsdatentabellen erfolgt die Durchführung des Ansatzes komplett automatisiert. Dies reduziert den manuellen Aufwand in Simulationsprojekten und ermöglicht dem Anwender, die wertschöpfende Zeit im Simulationsprojekt, die Durchführung und Analyse von Simulationsstudien, zu erhöhen.
- A12. *Sicherstellung der Übertragbarkeit.* Um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen, sollen die entwickelten Methoden so unabhängig wie möglich vom Anwendungsfall gestaltet sein. Dies gilt insbesondere für die entwickelten Algorithmen, welche ohne Adaptionen und initiale Konfigurationsaufwände eingesetzt werden sollen. Hierdurch wird der hohe Grad der Automatisierung unabhängig vom Anwendungsfall sichergestellt. Im entwickelten Ansatz wird diese Anforderung durch die entwickelte Entkopplung zwischen Datenidentifikation und -ausleitung zu den anderen Prozessschritten der Anwendermethodik erreicht. Diese Entkopplung erfolgt über die Eingangsdatentabellen als Schnittstelle. Die entwickelten Algorithmen zur Datentransformation, Modellbildung und Parametrierung sowie die allgemeinen Simulationsbausteine sind anwendungsfallunabhängig direkt einsetzbar und ausführbar, ohne dass diese durch einen Anwender angepasst werden müssen.

Durch die Erfüllung der Anforderungen A4 und A5 sind auch die benötigten Daten so ausgelegt, dass diese in den gängigen IT-Systemen zu finden und ohne große Aufwände ausgeleitet werden können.

Im untersuchten Anwendungsfall konnten nach manueller Identifikation und Ausleitung der Daten die restlichen Prozessschritte ohne Adaptionen automatisiert ausgeführt werden. Lediglich die Parameter zu Transporten mussten aufgrund fehlender Transport-Aktivitäten manuell angepasst werden. Dieser Umstand ist dabei auf fehlende Datenaufzeichnung im Unternehmen zurückzuführen. Insgesamt kann die Anforderung A12 jedoch als in großen Teilen erfüllt angesehen werden.

6.2.2 Limitationen

Trotz der grundlegenden Erfüllung der gestellten Anforderungen unterliegt der entwickelte Ansatz Limitationen, welche im Folgenden kritisch diskutiert werden sollen.

- L1. *Datenverfügbarkeit.* Der entwickelte Ansatz ist in seiner Vollständigkeit nur einsetzbar, wenn im untersuchten Produktionsnetzwerk die notwendigen Rückmeldedaten aufgezeichnet werden. Gleichzeitig kann aber davon ausgegangen werden, dass wenn IT-Systeme zur Unterstützung der Auftragsabwicklung eingesetzt werden, auch die benötigten Daten vorhanden sein müssen, da ansonsten eine ausreichende Funktionsfähigkeit der IT-Systeme nicht gewährleistet werden kann. Produktionsstart- und -ende-Aktivitäten sowie Ein- und Auslagerungen von Bauteilen müssen den IT-Systemen bekannt sein, da sonst Funktionen wie Bestandsführung oder Produktionsplanung nicht möglich sind. Werden im zu untersuchenden Netzwerk keine oder nur punktuell IT-Systeme verwendet und die Auftragsabwicklung manuell gesteuert, so kann im Umkehrschluss darauf geschlossen werden, dass die Komplexität im System gering ist. In diesem Fall ist auch die Notwendigkeit einer detaillierten Simulation zu bezweifeln, was den Einsatz des Ansatzes nicht erforderlich macht.
- L2. *Datenvalidität.* Neben der Datenverfügbarkeit nimmt auch die Qualität Einfluss auf die Funktionsweise und Ergebnisse des Ansatzes. Folglich müssen alle relevanten Aktivitäten im Netzwerk lückenlos und vertrauenswürdig aufgezeichnet werden. Vorselektierte oder bereits bereinigte Daten, wie beispielsweise der Ausschluss von verschrotteten Bauteilen, können zu abweichenden Ergebnissen führen. Dies gilt es in der Phase der Datenidentifikation vom Anwender zu berücksichtigen.
- L3. *Abhängigkeit von realem Auftreten bestimmter Ereignisse.* Der entwickelte Ansatz basiert auf in der Realität aufgezeichneten Daten. Dies bringt den Vorteil gegenüber der Verwendung von Planungsdaten mit sich, dass aus diesen das reale auftretende Systemverhalten mit einer höheren Genauigkeit ermittelt werden kann. Weiterhin besteht die Einschränkung, dass nur Ereignisse, die im betrachteten Zeitraum wirklich aufgetreten sind, auch in die automatisierte Parametrierung und Modellbildung aufgenommen werden können. Ein Beispiel stellt die Befähigung von Produktionslinien dar. Der entwickelte Ansatz identifiziert die Befähigungen anhand der produzierten Bauteilvarianten auf dieser Linie. Wurden im betrachteten Zeitraum jedoch nicht alle real befähigten Varianten produziert, so ergibt sich gegenüber der realen Befähigung eine Abweichung. Diese Einschränkung kann mit den vorgestellten Eingangsdaten zwar nie vollständig behoben werden, durch die Wahl eines ausreichend großen Zeitraums steigt jedoch die Chance, auch selten produzierte Varianten in den Daten zu identifizieren.

- L4. *Vergangenheitsorientierte Parametrierung.* Das reine Aufsetzen auf in der Vergangenheit aufgezeichneten Daten schränkt die automatisierte Modellbildung und Parametrierung auf eine vergangenheitsorientierte Sicht ein. Mögliche bereits eingeplante Veränderungen von Parametern, wie Schichtkalender oder Befähigungen, können durch den Ansatz nicht identifiziert werden. Betrachtungen in die Zukunft müssen vom Anwender manuell parametrisiert werden. Dennoch bietet der Ansatz auch für diese Anwendungsfälle Potenzial zur Aufwandsreduzierung, da der aktuelle Zustand des GPNs automatisiert erzeugt und dann als Ausgangspunkt für eine Zukunftsbetrachtung verwendet werden kann. Gleichzeitig können Parametrierungen von Ressourcen, bei denen keine Änderungen geplant sind, weiterhin verwendet werden.
- L5. *Reduzierung des Automatisierungsgrades durch individuelle Planungslogiken.* Die automatisierte Identifikation und Modellierung von Planungslogiken ist im bestehenden Ansatz nicht möglich. Dies schränkt den Grad der erreichbaren Automatisierung des Modellbildungsprozesses ein. Dennoch unterstützen die allgemeinen Simulationsbausteine den Anwender bei der manuellen Integration dieser Algorithmen. In den Planungsbausteinen sind bereits Schnittstellen zu vielen notwendigen Informationen, welche für die Produktionsplanung im Allgemeinen benötigt werden, implementiert. Ebenso sind in den Bausteinen bereits Funktionen ausgewiesen, in die die Planungsalgorithmen eingefügt werden können. Weiterhin ist das Format der Planungsergebnisse vorgegeben, um den Anwender in diesem manuellen Schritt zu unterstützen.

6.2.3 Betriebswirtschaftliche Betrachtung

Die Betrachtung des betriebswirtschaftlichen Nutzens von AutoGPN erfolgt in zwei Bereichen: (1) Der initialen Simulationsmodellerstellung und (2) der regelmäßigen Aktualisierung. Bei der initialen Simulationsmodellerstellung wird davon ausgegangen, dass noch kein Simulationsmodell der Auftragsabwicklung im GPN existiert und dieses mit AutoGPN im Vergleich zu einer konventionellen Vorgehensweise mit geringem Aufwand erstellt werden kann. Bei der regelmäßigen Aktualisierung eines bestehenden Modells können Effizienzgewinne erzielt werden, indem die wiederkehrende Aufgabe der Aktualisierung aller Parameterwerte in der Simulation automatisiert wird. Die entstehenden Effizienzgewinne können somit kontinuierlich gesteigert werden. Hierfür wird die konservative Annahme getroffen, dass eine Modellaktualisierung einmal pro Monat ausgeführt wird.

Die Bestimmung der Einsparung bei Einsatz des Ansatzes soll gegenüber dem konventionellen Vorgehen in Simulationsprojekten erfolgen. Ein direkter Vergleich im Anwendungsfall war aus organisatorischen Gründen und aufgrund des hohen entstehenden Aufwands nicht möglich, da hierfür zwei eigenständige Teams aus Anwendern getrennt voneinander, einmal mit AutoGPN und

einmal auf konventionelle Weise, ein Simulationsmodell hätten aufbauen müssen. Daher wurden mit Hilfe von Experten die Einsparpotenziale des Ansatzes abgeschätzt. Einer der Experten war dabei in die direkte Anwendung von AutoGPN eingebunden. Zwei weitere Experten bewerteten den Ansatz anhand der Projektvorstellung und den vorgelegten Ergebnissen.

Zunächst sollen die relativen Einsparungen für Datenidentifikation und Datenaufbereitung sowie Modellbildung und Parametrierung, für die initiale Modellerstellung und für die regelmäßige Aktualisierung abgeschätzt werden.

Die Datenidentifikation wird durch den Ansatz unterstützt, erfordert jedoch noch manuelle Schritte. Dem gegenüber steht das konventionelle Vorgehen in Simulationsprojekten, bei dem der Anwender lediglich auf seinen Erfahrungen aufbauen kann. Durch die Eingrenzung der notwendigen Daten sowie deren Beschreibung in der Ontologie kann der Aufwand für den Anwender stark reduziert werden. Die Einsparungen für die Identifikation der Daten wird damit auf 75 Prozent gegenüber eines konventionellen Vorgehens abgeschätzt. Die Datenaufbereitung erfolgt nach Ausleitung der Daten in die Eingangsdatentabellen vollkommen automatisiert, weshalb die Einsparungen hier mit 95 Prozent angenommen werden. Die verbleibenden 5 Prozent beinhalten die stichprobenartige Validierung der aufbereiteten Daten, um auch die Eingangsdatenqualität noch einmal abzusichern.

Durch OntoGPN und die allgemeinen Simulationsbausteine SimGPN wird der Aufwand im Schritt der Systemanalyse reduziert. Dennoch muss durch den Simulationsexperten bzw. das Projektteam dieser Schritt manuell erfolgen. Die Einsparungen durch den Ansatz werden daher mit 70 Prozent angenommen. Modellbildung und Parametrierung erfolgen aufgrund der diskutierten Limitationen, beispielsweise im Bereich der Planungs- und Steuerungslogiken, nicht vollkommen, dennoch aber zu einem Großteil automatisiert. Die manuelle Identifikation und Implementierung von Planungs- und Steuerungslogiken wäre bei einem konventionellen Vorgehen ebenfalls notwendig geworden. In den Schritten der Modellbildung und Parametrierung kommt ebenfalls der Vorteil der Entkopplung von den Spezifika des Anwendungsfalles zur Geltung, da keine Adaption der Algorithmen vorgenommen werden muss. Diese können direkt, ohne initiale Konfiguration, verwendet werden. Die Einsparpotenziale durch den Ansatz werden folglich jeweils mit 80 Prozent bewertet.

Insgesamt ist festzuhalten, dass durch die Verwendung des Ansatzes keine zusätzlichen Aufwände entstehen, die nicht auch in konventionellen Simulationsprojekten auftreten.

Um die Potenziale des Ansatzes auch absolut bewerten zu können, werden im nächsten Schritt die Aufwände ohne Einsatz des Ansatzes für die betrachteten Phasen im Simulationsprojekt abgeschätzt. Die Aufwände beinhalten dabei nicht nur die Arbeit des Projektteams für die Simulation, sondern auch notwendige Zeitaufwände bei Stakeholdern aus Logistik, Produktion und IT, die bei Systemanalyse, Datenidentifikation und -ausleitung stark eingebunden werden müssen. Weiterhin korrelieren die Aufwände für Datenidentifikation, Datenaufbereitung

und Parametrierung mit der Größe des GPN. Systemanalyse und Modellbildung werden als unabhängig von der Größe betrachtet, da in beiden Schritten stark modularisiert werden kann. Die Aufwände treten folglich einmalig auf und können auf mehrere Bestandteile des GPN einfach übertragen werden.

Weiterhin unterscheiden sich die Aufwände je Projektphase, ob diese initial oder für eine Modellaktualisierung ausgeführt werden. Da nach initialer Modellerstellung bereits Wissen über das System aufgebaut, Bausteine modelliert und Daten identifiziert sind, erzeugen diese Phasen bei einer Aktualisierung keine Aufwände mehr. Alle Aufwände sind in Tabelle 6.1 und Tabelle 6.2 dargestellt.

Tabelle 6.1: Konventioneller Aufwand in den Phasen Datenidentifikation, -aufbereitung und Parametrierung in Personentagen.

	Datenidentifikation		Datenaufbereitung		Parametrierung	
	Initial	Laufend	Initial	Laufend	Initial	Laufend
je Linie	1	0	2	0,25	1	0,25
je Lager	1	0	0,5	0,1	0,5	0,1
je Versand	1	0	1	0,25	1	0,25
je Stufe	1	0	2	0,25	1	0,1
je Werk	1	0	0,5	0,1	0,5	0,1

Um die Einsparpotenziale vollständig zu quantifizieren, wird das untersuchte GPN der Auto AG als Anwendungsfall herangezogen. Das GPN der Auto AG kann als mittleres bis großes Netzwerk angenommen werden. Vergleichbare Netzwerke sind auch bei anderen Automobilherstellern, deren größten Zulieferern, aber auch in der Luftfahrtindustrie zu erwarten. Insgesamt setzt sich das GPN der Auto AG aus 30 Linien an 3 Standorten und 6 verschiedenen Gewerken zusammen. Da Letztere an allen Standorten vertreten sind, ergeben sich dadurch 18 Lager, 18 Produktionsstufen und 18 Versandmöglichkeiten. Mit diesen Werten lassen sich zunächst die konventionellen Aufwände bestimmen und dann die Einsparungen durch den Einsatz Ansatzes errechnen. Alle Werte werden in Tabelle 6.3 aufgezeigt.

Entsprechend der Tabelle 6.3 können durch den Einsatz des vorgestellten Ansatzes in einem mittleren bis großen GPN 290,9 Personentage in der initialen Modellerstellung eingespart werden. Dies entspricht bei 220 Arbeitstagen im Jahr 1,3 Mitarbeiter-Vollzeitäquivalenten. Gleichzeitig kann die Entwicklungszeit durch den reduzierten Aufwand verringert werden, was zu schnelleren Untersuchungsergebnissen in Simulationsstudien führt.

Auch die laufende Aktualisierung profitiert mit hohen Einsparungen beim Aufwand. Wird eine monatliche Aktualisierung des Simulationsmodells angestrebt, so belaufen sich die Einsparungen auf 364,7 Personentage bzw. 1,7 Vollzeitäquivalente im Jahr. Gerade bei der Betrachtung der laufenden Aufwände ohne Einsatz des Ansatzes zeigen sich die aktuell bestehenden Herausforderungen beim Ein-

Tabelle 6.2: Konventioneller Aufwand in den Phasen Systemanalyse und Modellbildung in Personentagen.

	Systemanalyse		Modellbildung	
	Initial	Laufend	Initial	Laufend
Linie	4	0	10	0
Lager	2	0	5	0
Versand	4	0	10	0
Werk	2	0	3	0
PPS	4	0	10	0
Output	2	0	4	0

Tabelle 6.3: Konventioneller Aufwand und Einsparungspotenziale in einem mittleren bis großen Anwendungsfall in Personentagen.

	Potenzial	Aufwand		Einsparung	
		Initial	Laufend	Initial	Laufend
Datenidentifikation	75%	87,0	0	65,3	0
Aufbereitung	95%	124,5	18,6	118,3	17,7
Systemanalyse	70%	18,0	0,0	12,6	0,0
Modellbildung	80%	42,0	0,0	33,6	0,0
Parametrierung	80%	76,5	15,9	61,2	12,7
		348	34,5	290,9	30,4

satz von Simulationen. Alleine die stetige Aktualisierung des Modells würde ohne entwickelte Automatisierungen die Arbeitsleistung mehrerer Mitarbeiter komplett binden, ohne direkten Mehrwert zu erzeugen. AutoGPN ermöglicht eine regelmäßige Aktualisierung im wirtschaftlichen Bereich.

Eine Übertragung der Einsparpotenziale auf einen anderen Anwendungsfall setzt voraus, dass gleiche Bedingungen vorliegen, insbesondere bei den zur Verfügung stehenden Daten. Andernfalls muss die Wirtschaftlichkeit neu bestimmt werden.

6.2.4 Evaluation der spezifischen Hypothese

Durch den erfolgreichen Einsatz von AutoGPN im realen Anwendungsfall konnte gezeigt werden, dass aus historisierten Tracking- und Tracing-Daten und unter Verwendung von OntoGPN sowie den SimGPN-Bausteinen ein valides Simulationsmodell automatisiert erzeugt werden kann. Damit kann die aufgestellte Hypothese als bestätigt angesehen werden. Daraus lässt sich die Erkenntnis ableiten, dass mit den richtigen Algorithmen bereits mit einer reduzierten Anzahl

von Datenquellen ein Großteil des Aufwands in Simulationsprojekten vermieden werden kann. Damit überwiegen die Vorteile der Simulation und eröffnen das Potenzial für einen verstärkten Einsatz in der industriellen Praxis.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Produzierende Unternehmen agieren heutzutage in einem volatilen, unsicheren, komplexen und mehrdeutigen Umfeld. Sie setzen auf die Produktion in globalen Produktionsnetzwerken, um Kostenvorteile zu erzielen, die Flexibilität zu steigern und die Nähe zu Kunden und Lieferanten zu erhöhen.

Mit der Produktion in GPN steigt jedoch auch die Komplexität in der Auftragsabwicklung. Verkettete Produktionslinien über Werksgrenzen hinweg sowie historisch gewachsene Strukturen und heterogene Prozesse erschweren die optimale Ausführung der Auftragsabwicklung.

Ein Werkzeug zur Beherrschung dieser Komplexität ist die Simulation der Auftragsabwicklung im GPN. Durch eine detaillierte Untersuchung des Zusammenspiels der verschiedenen Ressourcen im Netzwerk und der Berücksichtigung stochastischer Einflussfaktoren können Unternehmen bessere Entscheidungen treffen und alternative, effizientere Betriebsszenarien identifizieren. Allerdings ist die detaillierte Abbildung der Auftragsabwicklung in einem validen Simulationsmodell mit Herausforderungen verbunden, weshalb Simulationen oft nicht genutzt werden. Die hohe Komplexität, die Identifikation und Aufbereitung der benötigten Daten sowie die Modellbildung und Parametrierung erfordern einen hohen manuellen Aufwand. Diese Aufgaben können die wertschöpfenden Tätigkeiten in Simulationsprojekten, wie die Durchführung und Analyse von Experimenten zur Entscheidungsunterstützung, deutlich übersteigen.

Ziel dieser Arbeit ist es, diese Herausforderungen zu überwinden, indem ein effizienter und effektiver Ansatz für die Modellbildung und Parametrierung von Simulationen der Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken entwickelt wird. Der Anwender des Ansatzes gewinnt dadurch Zeit, sich auf die wertschöpfende Arbeit in Simulationsprojekten zu fokussieren. Der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz AutoGPN erreicht dieses Ziel und trägt mit folgenden Forschungsbeiträgen (FB) zum Stand der Technik bei. Die Forschungsbeiträge werden auf die jeweiligen Forschungsfragen bezogen.

- FF1. *Wie sieht das Zusammenspiel von Informationsflüssen, Planungs- und Steuerungsprozessen sowie Materialflüssen in der Auftragsabwicklung in GPN aus und wie kann die Auftragsabwicklung als Ganzes allgemein beschrieben werden?*
- FB1. Durch die Entwicklung einer Ontologie für die Auftragsabwicklung in GPN, basierend auf einer strukturierten Literaturrecherche, wurden alle Elemente der Auftragsabwicklung, des Informationsflusses, des Materialflusses sowie der Planungs- und Steuerungsprozesse mit ihren Eigenschaften und Beziehungen zueinander beschrieben und in die Struktur von GPN eingeordnet. Damit folgt diese Arbeit bestehenden Ansätzen, die Ontologien als Wissensmodell einsetzen, um das Systemverständnis in Simulationsprojekten zu erhöhen.
- FF2. *Welche Daten, die in der Auftragsabwicklung entstehen, können für Modellbildung und Parametrierung von Simulationen genutzt werden, in welcher Form liegen sie vor und wie müssen sie für die weitere Nutzung verarbeitet werden?*
- FB2. Der Kerngedanke des Ansatzes ist die Eingrenzung der benötigten Daten auf Tracking- und Tracing-Daten. Als aufgezeichnete Rückmeldedaten aus dem Materialfluss enthalten diese implizit Informationen über das reale Systemverhalten. Weiterhin stellen diese Daten unabdingbare Rückmeldungen aus dem Materialfluss für IT-Systeme der Planung und Steuerung dar, wodurch eine hohe Verbreitung in verschiedenen Unternehmen gegeben ist. Die Eingrenzung reduziert die Anzahl an notwendigen zu identifizierenden Daten und IT-Systemen, was den Aufwand in dieser Phase des Simulationsprojekts reduziert. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Tracking- und Tracing-Daten ausreichend Informationen beinhalten, um ein valides Simulationsmodell zu erzeugen.
- FB3. Die Prozesse zur Entstehung von Tracking- und Tracing-Daten sowie deren Verknüpfung zu Materialfluss, Prozessen und Ressourcen sind detailliert in der entwickelten Ontologie modelliert. Als strukturierte Wissensbasis schafft die Ontologie ein gemeinsames Verständnis über Fachbereiche hinweg und reduziert damit den manuellen Aufwand bei der Suche und Standardisierung von relevanten Rückmeldedaten.
- FB4. Mit der Entwicklung von standardisierten Eingangsdatentabellen wird eine fest definierte Schnittstelle zwischen Rohdaten und dem Ansatz zur automatisierten Datenaufbereitung, Modellbildung und Parametrierung geschaffen. Das Datenformat ist dabei an das Rohdatenformat in den IT-Systemen angelehnt, um den Aufwand des Export und der manuellen Vorverarbeitung der Daten im Anwendungsfall gering zu halten.
- FB5. Durch die Entwicklung eines datenbasierten Abbilds des GPNs sowie von Algorithmen zur Überführung der Rohdaten aus den Ein-

gangsdatentabellen in dieses, wurde ein strukturiertes Datenmodell zur Schaffung von Transparenz über die Materialflussprozesse des gesamten GPNs entwickelt. Im datenbasierten Abbild sind für jedes Bauteil dessen Aktivitäten, dessen Aufenthaltsort zu jeder Zeit und über Verbaubeziehungen verbundene Bauteile hinterlegt.

FF3. *Wie kann die Auftragsabwicklung in GPN in einem Simulationsmodell abgebildet werden?*

FB6. Gemäß der Literatur können durch die Verwendung von allgemeinen Simulationsbausteinen Effizienzgewinne in Simulationsprojekten erzielt werden. Basierend auf der Ontologie OntoGPN wurden allgemeine Bausteine für das Modul SimGPN zur Simulation der Auftragsabwicklung in GPN entwickelt. Die SimGPN-Bausteine wurden erfolgreich in der industriellen Praxis zum Aufbau eines validen Simulationsmodells eingesetzt.

FF4. *Wie können aus den identifizierten Daten Informationen gewonnen werden und damit automatisiert ein Simulationsmodell aufgebaut und parametrisiert werden?*

FB7. Zur Automatisierung der Modellbildung wurden Algorithmen entwickelt, die anhand des datenbasierten Abbilds die Modellstruktur und -verbindungen identifizieren. Aus den Daten werden die zur Modellierung des abzubildenden Systems benötigten Simulationsbausteine erkannt und miteinander in Beziehung gesetzt.

FB8. Durch die Bereitstellung weiterer Algorithmen konnten anhand des datenbasierten Abbilds die zuvor identifizierten Simulationsbausteine automatisiert mit Parameterwerten belegt werden.

Der entwickelte Ansatz wurde in der Industrie evaluiert. Dazu wurde AutoGPN im GPN eines Automobilherstellers eingesetzt. Die mit AutoGPN identifizierten Daten ermöglichten die automatisierte Erstellung des Simulationsmodells der Auftragsabwicklung in diesem GPN. Dieses Simulationsmodell wurde durch das Ausführen von Simulationsläufen mit historischen Daten zum Systemverhalten verglichen und als valide eingestuft. In Konsequenz kann auch AutoGPN als valides Instrument zur Erstellung eines Simulationsmodells betrachtet werden.

Zusätzlich wurde das betriebswirtschaftliche Potenzial des Ansatzes untersucht und ein klarer Kostenvorteil gegenüber dem herkömmlichen Vorgehen in Simulationsprojekten festgestellt. Die Erfahrungen aus der Anwendung wurden genutzt, um die Anforderungserfüllung, Stärken und Limitationen zu diskutieren und zu bewerten.

Neben den aufgezählten Forschungsbeiträgen konnte durch den Einsatz von AutoGPN in der industriellen Praxis daher auch die spezifizierte Hypothese dieser Arbeit (siehe Kapitel 4.2) bestätigt werden. Basierend auf historisierten Tracking- und Tracing-Daten und einem allgemeinen Modell der Auftragsabwicklung in GPN kann automatisiert ein valides Simulationsmodell erzeugt werden.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Abschließend sollen mögliche weitere Forschungsrichtungen aufgezeigt werden, die sich aus der Entwicklung und Evaluation des Ansatzes ergeben haben.

Als mögliches Potenzial für neue Erkenntnisse bietet sich die Anwendung des Ansatzes in anderen Branchen, wie beispielsweise dem Maschinenbau, an. Mit Erfahrungen in anderen Anwendungsfällen können die Simulationsbausteine um neue Detaillierungen ergänzt und so die Breite der Anwendbarkeit erhöht werden. Insbesondere eine Weiterentwicklung der Bausteine hin zur Abbildung von auftragsbezogener Planung und Steuerung erscheint an dieser Stelle sinnvoll.

Eine weitere Forschungsmöglichkeit ist die Erhöhung des Detaillierungsgrades der Modellierung von Produktionslinien in der Simulation und die Integration der hierfür erforderlichen Parameter in die Algorithmen zur Parametrierung und Datenaufbereitung. Aktuell werden Störungen, Nacharbeiten und schwankende Durchlaufzeiten zusammengefasst und über eine Verteilung der Durchlaufzeit modelliert. Die drei Ausprägungen könnten getrennt voneinander im Modell abgebildet werden, beispielsweise durch eine Wahrscheinlichkeits- und Durchlaufzeitenverteilung für Nacharbeitsprozesse. Hierfür könnten Rückmeldedaten zum Start und Ende der Nacharbeit integriert werden. Anhand dieser Daten können die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens von Nacharbeit und deren Dauer automatisiert bestimmt werden.

Um weitere Effizienzgewinne in Simulationsprojekten über AutoGPN hinaus zu erzielen, eröffnen sich zwei Forschungspotenziale: Einerseits kann die Implementierung von Planungs- und Steuerungslogiken durch eine Erweiterung der Simulationsbausteine um vordefinierte Planungslogiken besser unterstützt werden. Hierbei kann es eine Option sein, mithilfe von künstlicher Intelligenz die Steuerungslogik anhand des aufgezeichneten Systemverhaltens zu identifizieren oder nachzubilden. Zum anderen können bestehende Konzepte und Ansätze der automatisierten Modellgenerierung auf die Auftragsabwicklung in GPN adaptiert und angewendet werden.

Eine mögliche Zukunftsvision besteht in der Weiterentwicklung der bestehenden Methoden zu einem umfassenden digitalen Zwilling der Auftragsabwicklung. Dieser bietet volle Transparenz über das Systemverhalten, eine instanziierte Wissensbasis für den Anwendungsfall und eine effiziente Möglichkeit für Experimente und Prognosen durch eine stets aktuelle Simulation. Dabei sollte auch eine Erweiterung des datenbasierten Abbilds um Planungsdaten in den Fokus rücken. Ein digitaler Zwilling kann Unternehmen neue Möglichkeiten eröffnen, um erfolgreich, vorausschauend und nachhaltig in einem VUCA-Umfeld zu agieren.

Literaturverzeichnis

- ABELE, E. und REINHART, G. (2011). *Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Hanser.
- AMERI, F., URBANOVSKY, C. und MCARTHUR, C. (2012). “A Systematic Approach to Developing Ontologies for Manufacturing Service Modeling”. In: *Proceedings of the Workshop on Ontology and Semantic Web for Manufacturing*. Hrsg. von ANASTASIOU, D., RAMOS, L., KRIMA, S. und CHEN- YUHJEN, S. 1–14.
- AUFENANGER, M., BLECKEN, A. und LAROQUE, C. (2010). “Design and implementation of an MDA interface for flexible data capturing”. In: *Journal of Simulation* 4.4, S. 232–241.
- BAGCHI, S., CHEN-RITZO, C.-H., SHIKALGAR, S. T. und TONER, M. (2008). “A full-factory simulator as a daily decision-support tool for 300mm wafer fabrication productivity”. In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*, S. 2021–2029.
- BALAKIRSKY, S. und KOOTBALLY, Z. (2014). “An Ontology Based Approach to Action Verification for Agile Manufacturing”. In: *Robot Intelligence Technology and Applications 2*, S. 201–217.
- BARLAS, P. und HEAVEY, C. (2016). “Automation of input data to discrete event simulation for manufacturing: A review”. In: *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing* 07.01, S. 1630001.
- BARLAS, P., HEAVEY, C. und DAGKAKIS, G. (2015). “An Open Source Tool for Automated Input Data in Simulation”. In: *International Journal of Simulation Modelling* 14.4, S. 596–608.
- BATARSEH, O. und MCGINNIS, L. F. (2012). “SysML to discrete-event simulation to analyze electronic assembly systems”. In: *Proceedings of the 2012 Symposium on Theory of Modeling and Simulation-DEVS Integrative M&S Symposium*, S. 1–8.
- BAUER, K. P. (2019). “Standortwahl für die Distribution mittels Luftfracht”. Diss. Technische Universität München.
- BECKER, T., LÜTJEN, M. und PORZEL, R. (2017). “Process maintenance of heterogeneous logistic systems—a process mining approach”. In: *Dynamics in Logistics*, S. 77–86.
- BENABEN, F., TRUPTIL, S., MU, W., PINGAUD, H., TOUZI, J., RAJSIRI, V. und LORRE, J.-P. (2018). “Model-driven engineering of mediation information

- system for enterprise interoperability". In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 31.1, S. 27–48.
- BENNETT, N. und LEMOINE, G. J. (2014). "What a difference a word makes: Understanding threats to performance in a VUCA world". In: *Business Horizons* 57.3, S. 311–317.
- BERGMANN, S. (2013). "Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen". Diss. Technische Universität Ilmenau.
- BIESINGER, F., MEIKE, D., KRASS, B. und WEYRICH, M. (2019). "A digital twin for production planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical System-Based Creation of a Digital Twin". In: *Procedia CIRP* 79, S. 355–360.
- BLESING, C., LUENSCH, D., STENZEL, J. und KORTH, B. (2017). "Concept of a multi-agent based decentralized production system for the automotive industry". In: *Advances in Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems: The PAAMS Collection*. Hrsg. von DEMAZEAU, Y., DAVIDSSON, P., BAJO, J. und VALE, Z. Cham: Springer, S. 19–31.
- BLESSING, L. T. und CHAKRABARTI, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology*. London: Springer.
- BLOCK, C. (2020). "Methodik zur teilautonomen Modellierung und ereignisdiskreten Simulation in CPPS: Entscheidungsunterstützung in der Planung mit dem Digitalen Zwilling". Diss. Ruhr-Universität Bochum.
- BLOCK, C., LINS, D. und KUHNENKÖTTER, B. (2018). "Approach for a simulation-based and event-driven production planning and control in decentralized manufacturing execution systems". In: *Procedia CIRP* 72, S. 1351–1356.
- BOCK, C. und GRUNINGER, M. (2005). "PSL: A semantic domain for flow models". In: *Software & Systems Modeling* 4.2, S. 209–231.
- BORGO, S., CESTA, A., ORLANDINI, A. und UMBRICO, A. (2019). "Knowledge-based adaptive agents for manufacturing domains". In: *Engineering with Computers* 35, S. 755–779.
- BROY, M. (2019). "Grundlagen der Objektorientierung". In: *Logische und Methodische Grundlagen der Programm- und Systementwicklung*. Wiesbaden: Springer, S. 381–433.
- BRUNO, G., ANTONELLI, D. und VILLA, A. (2015). "A Reference Ontology to Support Product Lifecycle Management". In: *Procedia CIRP* 33, S. 41–46.
- BÜSCHER, C., VOET, H., KRUNKE, M., BURGGRÄF, P., MEISEN, T. und JESCHKE, S. (2016). "Semantic Information Modelling for Factory Planning Projects". In: *Procedia CIRP* 41, S. 478–483.
- CALVANESE, D., MONTALI, M., SYAMSIYAH, A. und VAN DER AALST, W. (2015). "Ontology-driven extraction of event logs from relational databases". In: *Business Process Management Workshops*. Hrsg. von REICHERT, M. und REIJERS, H. A. Cham: Springer, S. 140–153.
- CAO, Q., ZANNI-MERK, C. und REICH, C. (2019). "Towards a Core Ontology for Condition Monitoring". In: *Procedia Manufacturing* 28, S. 177–182.
- CHARPENTIER, P. und VÉJAR, A. (2014). "From Spatio-Temporal Data to Manufacturing System Model". In: *Journal of Control, Automation and Electrical Systems* 25.5, S. 557–565.

- COE, N. M., DICKEN, P. und HESS, M. (2008). "Global production networks: realizing the potential". In: *Journal of Economic Geography* 8.3, S. 271–295.
- COPE, D. (2008). "Automatic Generation Of Supply Chain Simulation Models From Scor Based Ontologies". Diss. University of Central Florida.
- ELEY, M. (2012). *Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignis-diskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges Plant Simulation*. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- ELMARAGHY, W., ELMARAGHY, H., TOMIYAMA, T. und MONOSTORI, L. (2012). "Complexity in engineering design and manufacturing". In: *CIRP annals* 61.2, S. 793–814.
- FAYEZ, M., RABELO, L. und MOLLAGHASEMI, M. (2005). "Ontologies for Supply Chain Simulation Modeling". In: *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, S. 2364–2370.
- FENG, S., HELAAKOSKI, H., HAAPASALO, H. und KIPINÄ, J. (2007). "Software Agents-Enabled Systems Coalition For Integrated Manufacturing Processes and Supply Chain Management". In: *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 11.2, S. 157–173.
- FERDOWS, K. (1997). "Making the most of foreign factories". In: *Harvard business review* 75, S. 73–91.
- FRAZZON, E. M., KÜCK, M. und FREITAG, M. (2018). "Data-driven production control for complex and dynamic manufacturing systems". In: *CIRP annals* 67.1, S. 515–518.
- FREEDMAN, D. und DIACONIS, P. (1981). "On the histogram as a density estimator:L2 theory". In: *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete* 57.4, S. 453–476.
- FRIEDLI, T., LANZA, G., SCHUH, G., TREBER, S., WIECH, M. und GÜTZLAFF, A. (2017). "Aktive Gestaltung globaler Produktionsnetzwerke". In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112.5, S. 279–283.
- FUMAGALLI, L., PALA, S., GARETTI, M. und NEGRI, E. (2014). "Ontology-Based Modeling of Manufacturing and Logistics Systems for a New MES Architecture". In: *Advances in Production Management Systems. Innovative and Knowledge-Based Production Management in a Global-Local World*. Hrsg. von GRABOT, B., VALLESPIR, B., SAMUEL, G., BOURAS, A. und KIRITSIS, D. Bd. 8827. Cham: Springer, S. 192–200.
- GANGEMI, A., GUARINO, N., MASOLO, C., OLTRAMARI, A. und SCHNEIDER, L. (2002). "Sweetening Ontologies with DOLCE". In: *Knowledge Engineering and Knowledge Management: Ontologies and the Semantic Web*. Hrsg. von GOOS, G., HARTMANIS, J., VAN LEEUWEN, J., GÓMEZ-PÉREZ, A. und BENJAMINS, V. R. Bd. 2473. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 166–181.
- GARETTI, M. und FUMAGALLI, L. (2012). "P-PSO ontology for manufacturing systems". In: *14th IFAC Symposium on Information Control problems in Manufacturing Volume 45, Issue 6*. Hrsg. von IFAC. Bd. 45. 6, S. 449–456.
- GOLDSTEIN, B. (1999). "Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung". Diss. Technische Universität München.

- GOODALL, P., SHARPE, R. und WEST, A. (2019). "A data-driven simulation to support remanufacturing operations". In: *Computers in Industry* 105, S. 48–60.
- GRUBER, T. R. (1993). "Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing". In: *International Journal Human-Computer Studies* 43, S. 907–928.
- GRUBIC, T., VEZA, I. und BILIC, B. (2011). "Integrating process and ontology to support supply chain modelling". In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 24.9, S. 847–863.
- HARASZKÓ, C. und NÉMETH, I. (2015). "DES Configurators for Rapid Virtual Prototyping and Optimisation of Manufacturing Systems". In: *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* 59.3, S. 143–152.
- HEITMANN, K. (1999). "Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle". Diss. Technische Universität München.
- HELLINGRATH, B. und KÜPPERS, P. (2011). "Model-Driven Development of Multi-Agent Based Collaborative Planning Concepts for Heterarchical Supply Chains". In: *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*. Hrsg. von MAŘÍK, V., VRBA, P. und LEITÃO, P. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 153–164.
- HELLINGRATH, B., WITTHAUT, M., BÖHLE, C. und BRÜGGER, S. (2009). "An Organizational Knowledge Ontology for Automotive Supply Chains". In: *Holonic and multi-agent systems for manufacturing*. Hrsg. von MAŘÍK, V., STRASSER, T. und ZOITL, A. Berlin: Springer, S. 37–46.
- HERDING, R. und MÖNCH, L. (2017). "Designing an ontology for agent-based planning and control tasks in semiconductor supply chains". In: *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2016 Workshops*. Hrsg. von CIUCIU, I., DEBRUYNE, C., PANETTO, H., WEICHHART, G., BOLLEN, P., FENSEL, A. und VIDAL, M.-E. Cham: Springer, S. 65–75.
- HIMOFF, J., RZEWSKI, G. und SKOBELEV, P. (2006). "Magenta technology multi-agent logistics i-Scheduler for road transportation". In: *Proceedings of the fifth international joint conference on autonomous agents and multiagent systems*. Hrsg. von NAKASHIMA, H., WELLMAN, M., WEISS, G. und STONE, P. New York: ACM Press, S. 1514–1521.
- HOCHDÖRFFER, J., ARNDT, T., BÜRGIN, J., MOSER, E., SCHERB, M. und LANZA, G. (2015). "Evaluation of global manufacturing networks-a matter of perspective". In: *19th Cambridge International Manufacturing Symposium, Cambridge (UK)*, S. 2015–2025.
- HOFBAUER, P., WITHALM, J. und WÖLFEL, W. (2007). "Superposition of Supply Chains Classification by Ontological Properties". In: *IFAC Proceedings Volumes* 40.19, S. 220–224.
- HOFER, A., BRANDL, F., BAUER, H., HAGHI, S. und REINHART, G. (2020). "A framework for managing innovation cycles in manufacturing systems". In: *Procedia CIRP* 93, S. 771–776.
- HOMPEL, M. ten, SCHMIDT, T. und DREGGER, J. (2018). *Materialflusssysteme*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- HOXHA, J., SCHEUERMANN, A. und BLOEHDORN, S. (2010). "An Approach to Formal and Semantic Representation of Logistics Services". In: *Proceedings*

- of the Workshop on Artificial Intelligence and Logistics. Hrsg. von SCHILL, K. und SCHOLZ-REITER, B., S. 73–78.
- HUANG, C.-C. (2011). “Discrete event system modeling using SYSML and model transformations”. Diss. School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology.
- INGEMANSSON, A., YLIPÄÄ, T. und BOLMSJÖ, G. S. (2005). “Reducing bottle-necks in a manufacturing system with automatic data collection and discrete-event simulation”. In: *Journal of Manufacturing Technology Management* 16.6, S. 615–628.
- JACOB, F. (2006). “Quantitative Optimierung dynamischer Produktionsnetzwerke”. Diss. Technische Universität Darmstadt.
- JANJUA, N. K., HUSSAIN, O. K., CHANG, E. und ISLAM, S. M. S. (2017). “Conjoint utilization of structured and unstructured information for planning inter-leaving deliberation in supply chains”. In: *Proceedings of the International Conference on Web Intelligence*. Hrsg. von NGONGA, A., SHETH, A., WANG, Y., CHANG, E., SLEZAK, D., FRANCZYK, B., ALT, R. und TAO, X. New York: ACM Press, S. 411–418.
- JÄRVENPÄÄ, E., SILTALA, N., HYLLI, O. und LANZ, M. (2019). “The development of an ontology for describing the capabilities of manufacturing resources”. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 30.2, S. 959–978.
- JENSEN, S. (2007). “Eine Methodik zur teilautomatisierten Generierung von Simulationsmodellen aus Produktionsdatensystemen am Beispiel einer Job-shop-Fertigung”. Diss. Universität Kassel.
- JOHANSSON, M., JOHANSSON, B., SKOOGH, A., LEONG, S., RIDDICK, F., LEE, Y. T., SHAO, G. und KLINGSTAM, P. (2007). “A test implementation of the core manufacturing simulation data specification”. In: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, S. 1673–1681.
- JULES, G. D., SAADAT, M. und SAEIDLLOU, S. (2013). “Ontological Extension of PROSA for Manufacturing Network Formation”. In: *Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Hrsg. von MAŘÍK, V., LASTRA, J. L. M. und SKOBELEV, P. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 140–152.
- (2015). “Holonic Ontology and Interaction Protocol for Manufacturing Network Organization”. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems* 45.5, S. 819–830.
- KÁDÁR, B., LENGYEL, A., MONOSTORI, L., SUGINISHI, Y., PFEIFFER, A. und NONAKA, Y. (2010). “Enhanced control of complex production structures by tight coupling of the digital and the physical worlds”. In: *CIRP annals* 59.1, S. 437–440.
- KHILWANI, N., HARDING, J. A. und TIWARI, M. K. (2008). “Ontology Mining for Platform Extraction in Product Development”. In: *International IEEE Conference Intelligent Systems*, S. 1–9.
- KIRCHHOF, P. (2016). “Automatically generating flow shop simulation models from SAP data”. In: *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, S. 3588–3589.
- KLAUS, P., KRIEGER, W. und KRUPP, M. (2009). *Gabler Lexikon Logistik*. 4. Aufl. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.

- KNOLL, D. (2021). "Value Stream Mapping for Internal Logistics using Process Mining". Diss. TUM School of Engineering und Design.
- KNOLL, D., REINHART, G. und PRÜGLMEIER, M. (2019). "Enabling value stream mapping for internal logistics using multidimensional process mining". In: *Expert Systems with Applications* 124, S. 130–142.
- KNÖSSL, T. (2013). "Logistikorientierte Wertstromanalyse". In: *Lean Logistics: Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie*, S. 135–145.
- KOCH, J. (2017). "Manufacturing Change Management – a Process-Based Approach for the Management of Manufacturing Changes". Diss. Technische Universität München.
- KOWALSKI, M. und QUINK, N. (2013). *Erstellung einer Ontologie zum Themenkomplex Verpackung in der Logistik mithilfe des Ontologie-Editors Protege*. Duisburg, Essen: Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement.
- KUMAR, H. und PARK, P. S. (2010). "Know-Ont: Engineering a Knowledge Ontology for an Enterprise". In: *International Journal of Database Theory and Application* 3, S. 23–30.
- KUNATH, M. und WINKLER, H. (2018). "Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process". In: *Procedia CIRP* 72, S. 225–231.
- LANZA, G., FERDOWS, K., KARA, S., MOURTZIS, D., SCHUH, G., VÁNCZA, J., WANG, L. und WIENDAHL, H.-P. (2019). "Global production networks: Design and operation". In: *CIRP annals* 68.2, S. 823–841.
- LANZA, G. und TREBER, S. (2019). "Transparency increase in global production networks based on multi-method simulation and metamodeling techniques". In: *CIRP annals* 68.1, S. 439–442.
- LEMAIGNAN, S., SIADAT, A., DANTAN, J.-Y. und SEMENENKO, A. (2006). "MASON: A Proposal For An Ontology Of Manufacturing Domain". In: *IEEE Workshop on Distributed Intelligent Systems: Collective Intelligence and Its Applications (DIS'06)*, S. 195–200.
- LEUKEL, J. und KIRN, S. (2008). "A Supply Chain Management Approach to Logistics Ontologies in Information Systems". In: *Business Information Systems*. Hrsg. von VAN DER AALST, W., MYLOPOULOS, J., SADEH, N. M., SHAW, M. J., SZYPERSKI, C., ABRAMOWICZ, W. und FENSEL, D. Bd. 7. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 95–105.
- LIAN, P., PARK, D.-W. und KWON, H.-C. (2008). "Design of Logistics Ontology for Semantic Representing of Situation in Logistics". In: *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritage - TOC: Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages (DMAMH 2007)*, S. 432–437.
- LIBERT, S., CHISU, R. und KEUTNER, K. (2010). "Eine Ontologie für das Internet der Dinge". In: *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Hrsg. von GÜNTNER, W. und HOMPEL, M. ten. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 79–120.
- LIEBLER, K., BEISSERT, U., MOTTA, M. und WAGENITZ, A. (2013). "Introduction OTD-NET and LAS: Order-to-delivery network simulation and decision sup-

- port systems in complex production and logistics networks". In: *Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference*, S. 439–451.
- LIN, H. K. und HARDING, J. A. (2007). "A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration". In: *Computers in Industry* 58.5, S. 428–437.
- LIN, H. K., HARDING, J. A. und SHAHBAZ, M. (2004). "Manufacturing system engineering ontology for semantic interoperability across extended project teams". In: *International Journal of Production Research* 42.24, S. 5099–5118.
- LINDWORSKY, A. (2011). "Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest". Diss. Technische Universität München.
- LU, Y., PANETTO, H., NI, Y. und GU, X. (2013). "Ontology alignment for networked enterprise information system interoperability in supply chain environment". In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 26.1-2, S. 140–151.
- LUGARESI, G. und MATTA, A. (2018). "Real-time simulation in manufacturing systems: Challenges and research directions". In: *Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference*, S. 3319–3330.
- (2020). "Generation and Tuning of Discrete Event Simulation Models for Manufacturing Applications". In: *Proceedings of the 2020 Winter Simulation Conference*, S. 2707–2718.
- LÜTJEN, M. (2014). "Modellierungskonzept zur integrierten Planung und Simulation von Produktionsszenarien entwickelt am Beispiel der CFK-Serienfertigung". Diss. Universität Bremen.
- LÜTJEN, M., RIPPEL, D. und FREITAG, M. (2015). "Automatic simulation model generation in the context of micro manufacturing (WIP)". In: *SpringSim (TMS-DEVS)*, S. 257–262.
- MACIA-PEREZ, F., GILART-IGLESIAS, V., FERRANDIZ-COLMEIRO, A., BERNAMARTINEZ, J. V. und GEA-MARTINEZ, J. (2009). "New models of agile manufacturing assisted by semantic". In: *2009 13th Enterprise Distributed Object Computing Conference Workshops*. Hrsg. von TOSIC, V., S. 336–343.
- MANUPATI, V. K., PUTNIK, G. D., TIWARI, M. K., ÁVILA, P. und CRUZ-CUNHA, M. M. (2016). "Integration of process planning and scheduling using mobile-agent based approach in a networked manufacturing environment". In: *Computers & Industrial Engineering* 94, S. 63–73.
- MARTIN, H. (2009). *Transport- und Lagerlogistik: Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. 7. Aufl. Wiesbaden: Springer.
- MAYER, G. und MIESCHNER, M. (2017). "Industrie 4.0–Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation". In: *Simulation in Produktion und Logistik 2017*, S. 1–8.
- MAYER, G. und PÖGE, C. (2010). "Auf dem Weg zum Standard–Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens". In: *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*, S. 29–36.
- MCGINNIS, L., HUANG, E., KWON, K. S. und USTUN, V. (2011). "Ontologies and simulation: a practical approach". In: *Journal of Simulation* 5.3, S. 190–201.

- MCLEAN, C. und LEONG, S. (2002). "A framework for standard modular simulation". In: *Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference*, S. 1613–1620.
- MILLER, J. A. und BARAMIDZE, G. (2005). "Simulation and the Semantic Web". In: *Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference*, S. 2371–2377.
- MINHAS, S., JUZEK, C. und BERGER, U. (2012). "Ontology Based Intelligent Assistance System to Support Manufacturing Activities in a Distributed Manufacturing Environment". In: *Procedia CIRP* 3, S. 215–220.
- MÖNCH, L. und STEHLI, M. (2003). "An Ontology for Production Control of Semiconductor Manufacturing Processes". In: *Multiagent System Technologies*. Hrsg. von SCHILLO, M., KLUSCH, M., MÜLLER, J. und TIANFIELD, H. Bd. 2003, S. 156–167.
- MOURTZIS, D., DOUKAS, M. und BERNIDAKI, D. (2014). "Simulation in Manufacturing: Review and Challenges". In: *Procedia CIRP* 25.10, S. 213–229.
- MOURTZIS, D. (2019). "Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends". In: *International Journal of Production Research* 58.7, S. 1927–1949.
- MUELLER, R., ALEXOPOULOS, C. und MCGINNIS, L. F. (2007). "Automatic generation of simulation models for semiconductor manufacturing". In: *Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference*, S. 648–657.
- MUKKAMALA, P. S., SMITH, J. S. und VALENZUELA, J. F. (2003). "Designing reusable simulation modules for electronics manufacturing systems". In: *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, S. 1281–1289.
- MÜLLER-SOMMER, H. (2013). "Wirtschaftliche Generierung von Belieferungssimulationen unter Verwendung rechnerunterstützter Plausibilisierungsmethoden für die Bewertung der Eingangsdaten". Diss. Technische Universität Ilmenau.
- MUNOZ, E., CAPÓN, E., LAÍNEZ, J., ESPUÑA, A. und PUIGJANER, L. (2011). "Ontological Framework for the Enterprise from a Process Perspective: Operational, Tactical and Strategic Integration for Improved Decision-making". In: *Proceedings of the International Conference on Knowledge Engineering and Ontology Development 2011*. Hrsg. von FILIPE, J. und DIETZ, J. L. G., S. 538–546.
- NEGRI, E., FUMAGALLI, L., MACCHI, M. und GARETTI, M. (2015). "Ontology for Service-Based Control of Production Systems". In: *Advances in Production Management Systems*. Hrsg. von UMEDA, S., NAKANO, M., MIZUYAMA, H., HIBINO, H., KIRITSIS, D. und CIEMINSKI, G. von. Bd. 460. Cham: Springer, S. 484–492.
- NELSON, A., NYABUTI, D., COLLINS, J., KETTER, W. und GINI, M. (2009). "Ontology-Driven Decision Support in Dynamic Supply-Chains". In: *2009 IEEE Conference on Commerce and Enterprise Computing*. Hrsg. von IEEE, S. 129–136.
- NEUGEBAUER, R., KREPPENHOFER, D. und LANGER, T. (2008). "A model for product data tracking and tracing in production networks". In: *Proceedings of the 9th Cairo University International Conference on Mechanical Design and Production (MDP-9)*.

- NOY, N. F. und MCGUINNESS, D. L. (2001). "Ontology Development 101: A Guide to Creating Your First Ontology". In: *Stanford Knowledge Systems Laboratory Technical Report* 05.
- OBITKO, M., VRBA, P., MAŘÍK, V., RADA KOVIC, M. und KADERA, P. (2010). "Applications of semantics in agent-based manufacturing systems". In: *informatica* 34, S. 315–332.
- OVERBECK, L., BRÜTZEL, O., STRICKER, N. und LANZA, G. (2020). "Digitaler Zwilling des Produktionssystems". In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115, S. 62–65.
- PALMER, C., URWIN, E. N. und YOUNG, R. (2017). "A reference ontology approach to support global product-service production". In: *International Journal of Product Lifecycle Management* 10.1, S. 86–106.
- PANETTO, H., DASSISTI, M. und TURSI, A. (2012). "ONTO-PDM: Product-driven ONTOlogy for Product Data Management interoperability within manufacturing process environment". In: *Advanced Engineering Informatics* 26.2, S. 334–348.
- PARK, H.-T., KWAK, J.-G., WANG, G.-N. und PARK, S. C. (2010). *Plant model generation for PLC simulation*. Bd. 48. 5, S. 1517–1529.
- PETERSEN, N., GRANGEL-GONZALEZ, I., COSKUN, G., AUER, S., FROMMHOLD, M., TRAMP, S., LEFRANCOIS, M. und ZIMMERMANN, A. (2016). "SCORVoc: Vocabulary-Based Information Integration and Exchange in Supply Networks". In: *2016 IEEE Tenth International Conference on Semantic Computing (ICSC)*, S. 132–139.
- PETERSEN, N., HALILAJ, L., GRANGEL-GONZÁLEZ, I., LOHMANN, S., LANGE, C. und AUER, S. (2017). "Realizing an RDF-based information model for a manufacturing company – A case study". In: *The Semantic Web – ISWC 2017*. Hrsg. von D'AMATO, C., FERNANDEZ, M., TAMMA, V., LECUE, F., CUDRÉ-MAUROUX, P., SEQUEDA, J., LANGE, C. und HEFLIN, J. Cham: Springer, S. 350–367.
- PFOHL, H.-C. (2010). *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Aufl. Wiesbaden: Springer.
- PIELMEIER, J. (2019). "System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung". Diss. Technische Universität München.
- POMBERGER, G. und PREE, W. (2004). *Software-Engineering: Architektur-Design und Prozessorientierung*. München: Hanser Verlag.
- POPOVICS, G., PFEIFFER, A., KÁDÁR, B., VÉN, Z., KEMÉNY, L. und MONOSTORI, L. (2012). "Automatic simulation model generation based on PLC codes and MES stored data". In: *Procedia CIRP* 3, S. 67–72.
- QIAO, L., KAO, S. und ZHANG, Y. (2011). "Manufacturing process modelling using process specification language". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55.5-8, S. 549–563.
- RABE, M. und GOCEV, P. (2008). "Semantic Web framework for modelling and simulation of manufacturing systems". In: *Advances in Simulation for Production and Logistics Applications*, S. 177–186.

- RABE, M. und GOCEV, P. (2012). "Applying Semantic Web technologies for efficient preparation of simulation studies in manufacturing". In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, S. 1–12.
- REINHARDT, H., WEBER, M. und PUTZ, M. (2019). "A survey on automatic model generation for material flow simulation in discrete manufacturing". In: *Procedia CIRP* 81, S. 121–126.
- ROBERTSON, N. und PERERA, T. (2001). "Automated data collection for simulation?" In: *Simulation Practice and Theory* 9, S. 349–364.
- RODRIGUEZ, C. (2015). "An Integrated Framework for Automated Data Collection and Processing for Discrete Event Simulation Models". Diss. University of Central Florida.
- RUDBERG, M. und OLHAGER, J. (2003). "Manufacturing networks and supply chains: an operations strategy perspective". In: *Omega* 31.1, S. 29–39.
- RUDTSCH, V., BAUER, F. und GAUSEMEIER, J. (2013). "Approach for the Conceptual Design Validation of Production Systems using Automated Simulation-Model Generation". In: *Procedia Computer Science* 16, S. 69–78.
- AL-SAFI, Y. und VYATKIN, V. (2007). "Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing". In: *Holonic and multi-agent systems for manufacturing*. Hrsg. von MAŘÍK, V., VYATKIN, V. und COLOMBO, A. W. Berlin: Springer, S. 114–127.
- SAGER, B. (2018). "Konfiguration globaler Produktionsnetzwerke". Diss. Technische Universität München.
- SANFILIPPO, E., BENAVENT, S., BORGIO, S., GUARINO, N., TROQUARD, N., ROMERO, F., ROSADO, P., SOLANO, L., BELKADI, F. und BERNARD, A. (2018). "Modeling Manufacturing Resources: An Ontological Approach". In: *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Hrsg. von CHIABERT, P., BOURAS, A., NOEL, F. und RIOS, J., S. 304–313.
- SCHENK, M., SCHÜRMEYER, M. und BAUHOFF, F. (2012). "Koordination interner Produktionsnetzwerke". In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von SCHUH, G. und STICH, V. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 425–472.
- SCHEURMANN, A. und LEUKEL, J. (2014). "Task ontology for supply chain planning – a literature review". In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 27.8, S. 719–732.
- SCHLENOFF, C., GRUNINGER, M., TISSOT, F., VALOIS, J., LUBELL, J. und LEE, J. (2000). *The Process Specification Language (PSL) Overview and Version 1.0 Specification: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR)*.
- SCHMIDT, B. C. (2011). "Gestaltung Globaler Produktionsstrategien". In: *Wertschöpfung und Beschäftigung in Deutschland*. Hrsg. von GAUSEMEIER, J. und WIENDAHL, H.-P. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 71–84.
- SCHMIDT, M. und SCHÄFERS, P. (2017). "The Hanoverian Supply Chain Model: modelling the impact of production planning and control on a supply chain's logistic objectives". In: *Production Engineering* 11.4-5, S. 487–493.
- SCHUH, G., BRANDENBURG, U. und CUBER, S. (2012). "Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aufgaben". In: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Hrsg. von SCHUH, G. und STICH, V. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 29–79.

- SCHUH, G. und STICH, V. (2012). *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- SELKE, C. (2005). “Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung”. Diss. Technische Universität München.
- SHEN, W. und NORRIE, D. (1999). “Agent-Based Systems for Intelligent Manufacturing: A State-of-the-Art Survey”. In: *Knowledge and Information Systems* 1999.1, S. 129–157.
- SILVER, G. A., MILLER, J. A., HYBINETTE, M., BARAMIDZE, G. und YORK, W. S. (2011). “An ontology for discrete-event modeling and simulation”. In: *Simulation* 87.9, S. 747–773.
- SKOOGH, A., PERERA, T. und JOHANSSON, B. (2012). “Input data management in simulation – Industrial practices and future trends”. In: *Simulation Modelling Practice and Theory* 29.8, S. 181–192.
- SKOOGH, A. und JOHANSSON, B. (2007). “Time-consumption analysis of input data activities in discrete event simulation projects”. In: *Proceedings of the 2007 Swedish Production Symposium*, S. 349–364.
- SKOOGH, A., JOHANSSON, B. und STAHR, J. (2012). “Automated input data management: evaluation of a concept for reduced time consumption in discrete event simulation”. In: *Simulation* 88.11, S. 1279–1293.
- SMIRNOV, A., LEVASHOVA, T. und SHILOV, N. (2006). “Ontology-based Information Integration in Automotive Supply Chains”. In: *IFAC Proceedings Volumes* 39.3, S. 709–714.
- SMIRNOV, A., LEVASHOVA, T., SHILOV, N. und KASHEVNIK, A. (2010). “Knowledge sharing in flexible supply networks: a context-based approach”. In: *Control and Cybernetics* 39, S. 177–196.
- SMIRNOV, A., SANDKUHL, K., SHILOV, N. und KASHEVNIK, A. (2013). “Product-Process-Machine System Modeling: Approach and Industrial Case Studies”. In: *Conference on the Practice of Enterprise Modeling*. Hrsg. von GRABIS, J., KIRIKOVA, M. und ZDRAVKOVIC, J., S. 251–265.
- SMITH, C. R. (2015). “The Programmatic Generation of Discrete-Event Simulation Models from Production Tracking Data”. Diss. Brigham Young University.
- SOARES, A., AZEVEDO, A. und SOUSA, J. de (2000). “Distributed planning and control systems for the virtual enterprise: organizational requirements and development life-cycle”. In: *Journal of Intelligent Manufacturing* 2000.11, S. 253–270.
- SOLANO, L., ROSADO, P. und ROMERO, F. (2014). “Knowledge representation for product and processes development planning in collaborative environments”. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 27.8, S. 787–801.
- SOMMER, M., STJEPANDIĆ, J., STOBRAWA, S. und SODEN, M. von (2020). “Automated generation of a digital twin of a manufacturing system by using scan and convolutional neural networks”. In: *Advances in Transdisciplinary Engineering* 12, S. 363–372.
- STEINHAEUER, D. und SOYKA, M. (2012). “Development and applications of simulation tools for one-of-a-kind production processes”. In: *Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference*, S. 1–11.

- STRZELCZAK, S., BALDA, P., GARETTI, M. und LOBOV, A. (2015). *Open Knowledge-driven Manufacturing & Logistics: The ESCOP approach*. Warsaw: Warsaw University of Technology Publishing House.
- TANNOCK, J., CAO, B., FARR, R. und BYRNE, M. (2007). "Data-driven simulation of the supply-chain—Insights from the aerospace sector". In: *International journal of production economics*, S. 70–84.
- TEMPELMEIER, H. (2018). *Modellierung logistischer Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- TERKAJ, W., TOLIO, T. und URGO, M. (2015). "A virtual factory approach for in situ simulation to support production and maintenance planning". In: *CIRP annals* 64.1, S. 451–454.
- THIERS, G. und MCGINNIS, L. (2011). "Logistics systems modeling and simulation". In: *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference*, S. 1531–1541.
- THOMAS, S. (2013). "Produktionsnetzwerksysteme – Ein Weg zu effizienten Produktionsnetzwerken". Diss. Universität St. Gallen.
- UDDIN, M. K., DVORYANCHIKOVA, A., LOBOV, A. und LASTRA, J. M. (2011). "An ontology-based semantic foundation for flexible manufacturing systems". In: *37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, S. 340–345.
- UDE, J. (2010). "Entscheidungsunterstützung für die Konfiguration globaler Wertschöpfungsnetzwerke: Ein Bewertungsansatz unter Berücksichtigung multikriterieller Zielsysteme, Dynamik und Unsicherheit". Diss. Karlsruhe, Institut für Technologie.
- UHMANN, T. H.-J., LEHMANN, C. und STEINHILPER, R. (2017). "The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for industry 4.0". In: *Procedia CIRP* 61, S. 335–340.
- ULIERU, M. und COBZARU, M. (2005). "Building Holonic Supply Chain Management Systems: An e-Logistics Application for the Telephone Manufacturing Industry". In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 1.1, S. 18–30.
- URWIN, E. N., PALMER, C., CUTTING-DECELE, A.-F., SÁNCHEZ CID, F., MIGUEL PINAZO-SÁNCHEZ, J., PAJKOVSKA-GOCEVA, S. und YOUNG, R. (2014). "Reference Ontologies for Global Production Networks". In: *Proceedings of the International Conference on Knowledge Management and Information Sharing*, S. 133–139.
- USCHOLD, M. und GRUNINGER, M. (1996). "Ontologies: Principles, methods and applications". In: *The knowledge engineering review* 11.2, S. 93–136.
- USCHOLD, M., KING, M., MORALEE, S. und ZORGIO, Y. (1998). "The Enterprise Ontology". In: *Knowledge Engineering Review* 1998.13, S. 31–89.
- USMAN, Z., YOUNG, R. I. M., CHUNGOORA, N., PALMER, C., CASE, K. und HARDING, J. (2011). "A Manufacturing Core Concepts Ontology for Product Lifecycle Interoperability". In: *Enterprise Interoperability*. Hrsg. von VAN DER AALST, W., MYLOPOULOS, J., SADEH, N. M., SHAW, M. J., SZYPERSKI, C., VAN SINDEREN, M. und JOHNSON, P. Bd. 76. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 5–18.
- VAN DER AALST, W. (2016). *Process Mining*. Berlin, Heidelberg: Springer.

- VEGETTI, M., LEONE, H. und HENNING, G. (2005). "Product ONTOlogy. Definition of an Ontology for the complex Product Modelling Domain". In: *Mercosur Congress on Process Systems Engineering 4*, S. 1–11.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2014). *Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen: Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VYMETAL, D., HUCKA, M., HUNKA, F. und KASIK, J. (2008). "Production Planning Model Using REA Ontology". In: *Ekonomika A Management 2008.4*, S. 93–103.
- WAGENITZ, A. (2007). "Modellierungsmethode zur Auftragsabwicklung in der Automobilindustrie". Diss. Universität Dortmund.
- WANG, J., CHANG, Q., XIAO, G., WANG, N. und LI, S. (2011). "Data driven production modeling and simulation of complex automobile general assembly plant". In: *Computers in Industry 62.7*, S. 765–775.
- WENZEL, S., COLLISI-BÖHMER, S., PITSCH, H., ROSE, O. und WEISS, M. (2008). *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WERNER, M. (2001). "Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen". Diss. Technische Universität München.
- WESTKÄMPER, E., SPATH, D., CONSTANTINESCU, C. und LENTES, J., Hrsg. (2013). *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- WEYRICH, I. M. und STEDEN, F. (2013). "Methodische Identifikation wiederverwendbarer Module für die Simulation von Automatisierungssystemen". In: *VDI/VDE-Gesellschaft Mess und Automatisierungstechnik. VDI-Berichte 2209*, S. 135–139.
- WIENDAHL, H.-P., ELMARAGHY, H. A., NYHUIS, P., ZÄH, M. F., WIENDAHL, H.-H., DUFFIE, N. und BRIEKE, M. (2007). "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation". In: *CIRP annals 56.2*, S. 783–809.
- WU, J., ZHANG, W. Y., ZHANG, S., LIU, Y. N. und MENG, X. H. (2013). "A matrix-based Bayesian approach for manufacturing resource allocation planning in supply chain management". In: *International Journal of Production Research 51.5*, S. 1451–1463.
- YE, Y., YANG, D., JIANG, Z. und TONG, L. (2006). "A knowledge- and workflow-based system for supporting order fulfillment process in the build-to-order supply chains". In: *The Semantic Web-ASWC 2006: First Asian Semantic Web Conference*. Hrsg. von MIZOGUCHI, R., SHI, Z. und GIUNCHIGLIA, F. Berlin, New York: Springer, S. 711–724.
- (2008). "Ontology-based semantic models for supply chain management". In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 37.11-12*, S. 1250–1260.
- YOUNG, R. I. M., GUNENDRAN, A. G., CUTTING-DECELLE, A. F. und GRUNINGER, M. (2007). "Manufacturing knowledge sharing in PLM: a progression towards the use of heavy weight ontologies". In: *International Journal of Production Research 45.7*, S. 1505–1519.
- ZAYATI, A., SIDHOM, L., BADR, Y., BIENNIER, F. und MOALLA, M. (2010). "Towards Business Ontologies Matching for Inter-Enterprise Collaboration Platform in a Lean Manufacturing Strategy". In: *Collaborative Networks for a Sustainable*

World. Hrsg. von CAMARINHA-MATOS, L., BOUCHER, X., AFSARMANESH und HAMIDEH, S. 746–753.

Anhang A

Anhang

A.1 Eine Ontologie für die Auftragsabwicklung in GPN

A.1.1 Bewertung der Literatur

Insgesamt wurden 119 Veröffentlichungen detaillierter untersucht und bewertet. Die einzelnen Veröffentlichungen sind mitsamt der vergebenen Bewertung in den untersuchten Kriterien in den nachfolgenden Tabellen dargestellt. Übergreifende Ontologien sind in Tabelle A.2 aufgelistet. Ontologien mit Fokus auf Produktion in Tabelle A.3, Logistik in Tabelle A.1, Informationsfluss in Tabelle A.4, Planung und Steuerung in Tabelle A.5, Auftragsabwicklung in Tabelle A.6 und Produktionsnetzwerke in Tabelle A.7. Die dargestellten Veröffentlichungen stehen für den relevanten Anteil der 119 detailliert untersuchten Ontologien. Die weiteren Veröffentlichungen sind aufgrund der als gering bewerteten Bedeutung für die entwickelte Ontologie der Auftragsabwicklung in GPN nicht mit aufgeführt.

Tabelle A.1: Bewertung Ontologien mit Fokus auf Logistik.

ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
THIERS und MCGINNIS 2011	●	○	●	●	○	○	●	○	●
FAYEZ et al. 2005	●	○	●	○	●	●	●	●	○
LIBERT et al. 2010	●	○	○	●	●	○	○	○	○
BLESING et al. 2017	●	○	●	●	○	○	○	○	○
GRUBIC et al. 2011	●	○	○	○	○	○	○	○	●
LIAN et al. 2008	●	○	○	○	○	○	○	○	○
KOWALSKI und QUINK 2013	●	○	○	○	○	○	○	○	○
TERKAJ et al. 2015	●	○	○	○	○	○	○	○	○

Bewertung: ● = 4, ● = 3, ○ = 2, ○ = 1, ○ = 0

Tabelle A.2: Bewertung der übergreifenden Ontologien.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
LIN und HARDING 2007	MSE	●	●	●	●	●	○	●	●	●
LEUKEL und KIRN 2008	SCOR	●	●	●	●	●	●	○	●	○
PALMER et al. 2017	Flexinet	●	●	○	●	●	●	●	○	●
URWIN et al. 2014	Flexinet	●	●	●	●	○	●	●	○	●
USCHOLD et al. 1998	Enterprise Ont.	○	○	●	●	●	○	●	●	●
GANGEMI et al. 2002	DOLCE	○	○	●	●	●	●	●	○	●
BOCK und GRUNINGER 2005	PSL	○	○	●	●	●	●	●	○	○
PANETTO et al. 2012	Onto-PDM	○	●	○	●	●	●	●	○	○
KUMAR und PARK 2010	Knwo-Ont	○	○	○	○	●	●	●	○	○
VEGETTI et al. 2005	PRONTO	○	●	●	○	●	●	●	○	○
SCHLENOFF et al. 2000	PSL	○	○	○	○	●	●	●	○	○

Bewertung: ● = 4, ● = 3, ● = 2, ● = 1, ○ = 0

Tabelle A.3: Bewertung Ontologien mit Fokus auf Produktion.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
MÖNCH und STEHLI 2003	PROSA	●	●	●	○	●	●	●	●	○
QIAO et al. 2011	PSL	○	●	○	○	●	●	●	○	○
USMAN et al. 2011	MCCO	○	●	○	○	●	●	●	○	○
BORGO et al. 2019	DOLCE	●	●	●	○	●	○	●	○	○
YOUNG et al. 2007	PSL	○	●	●	○	●	●	●	○	○
UDDIN et al. 2011		○	●	○	○	●	●	○	●	○
LEMAIGNAN et al. 2006	MASON	○	●	○	○	●	●	●	○	●
LIN et al. 2004	MSE	●	●	○	●	●	●	●	●	●
JÄRVENPÄÄ et al. 2019	MASON	●	●	○	○	●	○	●	○	○
PETERSEN et al. 2016		○	●	●	●	●	○	●	●	○
KHILWANI et al. 2008	SCOR	●	●	○	○	●	○	●	●	●
MACIA-PEREZ et al. 2009		●	●	○	○	●	○	●	○	○
AL-SAFI und VYATKIN 2007		○	●	○	○	●	○	●	○	○
PETERSEN et al. 2017		○	●	○	○	●	●	●	●	○
SMIRNOV et al. 2013		○	●	●	○	●	○	●	●	○
CAO et al. 2019		○	●	○	○	●	○	●	○	○

Bewertung: ● = 4, ● = 3, ● = 2, ● = 1, ○ = 0

Tabelle A.4: Bewertung Ontologien mit Fokus auf den Informationsfluss.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
NEGRI et al. 2015	MSO, eScop	●	●	●	●	●	●	●	○	○
SANFILIPPO et al. 2018		○	●	●	○	●	●	●	○	○
ZAYATI et al. 2010		○	○	●	●	●	○	●	●	○
JANJUA et al. 2017		○	●	●	●	●	○	○	●	○
SMIRNOV et al. 2010		○	○	●	●	○	○	○	●	●
BRUNO et al. 2015	PLM	○	○	●	○	●	●	●	●	○

Bewertung: ● = 4, ● = 3, ● = 2, ● = 1, ○ = 0

Tabelle A.5: Bewertung Ontologien mit Fokus auf den Planung und Steuerung.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
STRZELCZAK et al. 2015	eScop	●	●	●	●	●	●	●	●	●
HERDING und MÖNCH 2017		●	●	●	●	●	●	●	●	●
SOARES et al. 2000	VEO	○	○	●	●	○	○	○	●	●
SOLANO et al. 2014	PSL	○	●	○	●	●	●	○	○	○
HOFBAUER et al. 2007		●	●	●	●	●	○	○	●	●
AMERI et al. 2012		●	●	○	●	●	○	●	○	○
SMIRNOV et al. 2006		●	○	●	●	○	○	○	●	●
HOXHA et al. 2010		●	○	●	●	○	○	○	○	●
SHEN und NORRIE 1999		○	○	●	●	●	○	●	○	●
FENG et al. 2007		○	○	●	●	○	○	○	○	●
LIN und HARDING 2007	MSE	○	○	○	●	●	○	○	●	○
SCHEUERMANN und LEUKEL 2014		○	○	●	●	○	○	○	○	●
BALAKIRSKY und KOOT-BALLY 2014		○	○	●	●	●	○	○	○	○
MANUPATI et al. 2016		○	●	●	●	○	○	○	○	○
WU et al. 2013		○	○	●	●	○	○	○	○	○
NELSON et al. 2009		○	○	○	●	●	○	○	○	●
MINHAS et al. 2012		○	●	○	●	○	○	○	○	○
BLOCK et al. 2018		○	○	○	●	○	○	○	○	○

Bewertung: ● = 4, ● = 3, ● = 2, ● = 1, ○ = 0

Tabelle A.6: Bewertung Ontologien mit Fokus auf die Auftragsabwicklung.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
	REA									
	PROSA									
	SCOR, Onto- PDM									
	P-PSO									
	eScop									
	FRISCO									

Bewertung: ● = 4, ◐ = 3, ◑ = 2, ◒ = 1, ○ = 0

Tabelle A.7: Bewertung Ontologien mit Fokus auf GPN.

	ULO	Logistik	Produktion	Info.-fluss	PPS	Prozess	Objekt	Operator	Auftragsab.	GPN
	OntoSCM									
	PROSA									

Bewertung: ● = 4, ◐ = 3, ◑ = 2, ◒ = 1, ○ = 0

A.1.2 Aufzählung relevanter Begriffe

Tabelle A.8: Liste relevanter Begriffe

Relevanter Begriff	Zugehörig zu	Einordnung in ULO	Abbildung
Produktionsverbund	Netzwerk	Structure	Klasse
Standort	Netzwerk	Structure	Klasse
Produkt/Gut	Materialfluss	Object	Klasse
Segment	Netzwerk	Operator	Klasse
Linie	Netzwerk	Operator	Klasse
Make-to-Stock	Planungsebene		
Engineer-to-Order	Planungsebene		
Make-to-Order	Planungsebene		
Assemble-to-Order	Planungsebene		
Kundenänderungseinfluss	Planungsebene		Relation
Netzwerkstruktur	Netzwerk	Structure	Relation
Standortbeziehungen	Netzwerk	Structure	Relation
Zulieferer	Netzwerk	Structure	Klasse
Produktion	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Distribution	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Kundenentkopplung	Informationsfluss		Relation
Input	Materialfluss	MaterialActivity	Relation
Output	Materialfluss	MaterialActivity	Relation
Input	Informationsfluss	Information-Activity	Relation
Output	Informationsfluss	Information-Activity	Relation
Ressourcen	Materialfluss	Operator	Klasse
Strukturen	Materialfluss	Structure	Relation
Prozesse	Materialfluss	Activity	Klasse
Infrastruktur	Materialfluss	Operator	Klasse
Layout	Materialfluss	Operator	Relation
Bestand	Materialfluss	Operator/Activity	Attribut

Tabelle A.8: Liste relevanter Begriffe (Fortsetzung)

Logistikfläche	Materialfluss	Operator	Klasse
Arbeitsmittel / Produktions- mittel	Materialfluss	Operator	Klasse
Arbeitshilfs- mittel	Materialfluss	Operator	Klasse
Organisations- mittel	Materialfluss	Operator	Klasse
Informationen	Informationsfluss	InformationObject	Klasse
Zeit	Informationsfluss	DateTimePoint	Klasse
Ort	Netzwerk	Structure	Klasse
Menge	Materialfluss	MaterialObject	Attribut
Zusammen- setzung	Materialfluss	MaterialObject	Relation
Qualität	Materialfluss	MaterialObject	Attribut
Plangröße	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Materialfluss- mittel	Materialfluss	Operator	Klasse
Informations- mittel	Informationsfluss	Operator	Klasse
Zielgrößen	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Messgrößen	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Netzwerkabsatz- planung	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Netzwerkbedarfs-Planungsebene planung		InformationObject	Klasse
Produktions- programm	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Bruttoprimär- bedarf	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Nettoprimär- bedarf	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Netzwerkka- pazitätsdeckung	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Netzwerkbedarfs-Planungsebene allokation		InformationObject	Klasse
Transport- aufwand	Planungsebene	MaterialActivity	Attribut
Eigenfertigungs- bedarf	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Netzwerkbrutto- sekundärbedarf	Planungsebene	InformationObject	Klasse

Tabelle A.8: Liste relevanter Begriffe (Fortsetzung)

Netzwerknetto- sekundärbedarf	Planungsebene	InformationObject	Klasse
Logistik	Materialfluss	Operator	Klasse
Lager	Materialfluss	Operator	Klasse
Kunde	Materialfluss	Structure/Operator	Klasse
Ladeeinheit	Materialfluss	MaterialObject	Klasse
Produktverbund	Materialfluss	MaterialObject	Klasse
Zugang	Materialfluss	MaterialActivity	Attribut
Bestand	Materialfluss	InformationObject	Attribut
Abgang	Materialfluss	MaterialActivity	Attribut
räumliche Transformati- on	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
zeitliche Transformati- on	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
qualitative Transformati- on	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
mengen- mäßige Transformati- on	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
sorten- mäßige Transformati- on	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Fertigung	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Montage	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Qualitäts- sicherung	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Nacharbeit	Materialfluss	MaterialActivity	Klasse
Planungsobjekt	Informationsfluss	InformationObject	Klasse
Informations- quelle	Informationsfluss	Operator	Klasse
Primärquelle	Informationsfluss	Operator	Klasse
Sekundärquelle	Informationsfluss	Operator	Klasse
Materialfluss- begleitende Informations- träger	Informationsfluss	MaterialObject	Klasse

A.1.3 Klassen und Relationen

Tabelle A.9: Liste aller Relationen

Domäne	Relation	Range
ActivityClass	consistsOf	ActivityClass
ActivityClass	isPartOf	ActivityClass
ActivityOccurence	OccursAt	DateTimePoint
ActivityOccurence	hasConsecutive	ActivityOccurence
ActivityOccurence	hasPrevious	ActivityOccurence
Activity	hasConsecutive	Activity
Activity	hasPrevious	Activity
BillOfMaterials	consistsOf	MaterialObjectClass
BillOfMaterials	isConnectedTo	MaterialObjectClass
ChainClass	isConnectedTo	Organization
ChainClass	isOutputOf	NetworkConfiguration- Planning
Chain	consistsOf	Location
Chain	supplies	Location
Chain	supplies	MaterialObjectClass
Chain	supplies	MaterialOperator
CustomerOrderClass	isInputOf	SalesPlanning
CustomerOrder	isConnectedTo	Demand
CustomerOrder	isConnectedTo	Program
CustomerOrder	isConnectedTo	WorkOrder
CustomerOrder	isForCustomer	Customer
CustomerOrder	isForCustomer	Structure
CustomerOrder	isFor	MaterialObjectClass
Customer	hasConnected	CustomerOrder
DateTimePoint	hasConsecutive	DateTimePoint
DateTimePoint	hasPrevious	DateTimePoint
Demand	hasConnected	CustomerOrder
Demand	isForCustomer	Structure
Demand	isFor	MaterialObjectClass
InformationActivity- Occurence	hasOutput	InformationObject
InformationActivity- Occurence	hasParticipant	InformationObject
InformationGathering- ActivityClass	canBePerformedBy	InformationGathering- Operator
InformationGathering- ActivityClass	hasKind	InformationGathering- Activity

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
InformationGathering- ActivityClass	hasParticipant	MaterialObjectClass
InformationGathering- ActivityOccurence	hasParticipant	Part
InformationGathering- ActivityOccurence	hasParticipant	WorkOrder
InformationGathering- ActivityOccurence	isOccurenceOf	InformationGathering- Activity
InformationGathering- ActivityOccurence	isPartOf	MaterialActivity- Occurence
InformationGathering- Activity	hasOccurenceAt	InformationGathering- ActivityOccurence
InformationGathering- Activity	hasParticipant	InformationObject- Class
InformationGathering- Activity	isAKindOf	InformationGathering- ActivityClass
InformationGathering- Activity	isEndOf	MaterialFlowActivity
InformationGathering- Activity	isPartOf	MaterialFlowActivity
InformationGathering- Activity	isPerformedBy	InformationGathering- Operator
InformationGathering- Activity	isStartOf	MaterialFlowActivity
InformationGathering- Operator	hasPossible	InformationGathering- Activity
InformationObject- Class	consistsOf	InformationObject- Class
InformationObject- Class	hasKind	InformationObject
InformationObject- Class	isConnectedTo	Organization
InformationObject- Class	isInput	OfInformation- ProcessingActivity
InformationObject- Class	isOutputOf	Information- ProcessingActivity
InformationObject- Class	isPartOf	InformationObject- Class
InformationObject- Class	isParticipantIn	InformationGathering- Activity
InformationObject- Class	isParticipantIn	PlanningActivity

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
InformationObject	consistsOf	InformationObject
InformationObject	endsAt	DateTimePoint
InformationObject	insInputOf	InformationProcessing- ActivityOccurence
InformationObject	isAKindOf	InformationObject- Class
InformationObject	isOutputOf	InformationActivity- Occurence
InformationObject	isPartOf	InformationObject
InformationObject	isParticipantn	InformationActivity- Occurence
InformationObject	startsAt	DateTimePoint
InformationProcessing- ActivityOccurence	hasInput	InformationObject
InformationProcessing-isOccurenceOf ActivityOccurence		InformationProcessing- Activity
InformationProcessing-hasInput Activity		InformationObject- Class
InformationProcessing-hasOccurenceAt Activity		InformationProcess- ingActivityOccurence
InformationProcessing-hasOutput Activity		InformationObject- Class
InformationProcessing-isPerformedBy Activity		InformationPro- cessingOperator
InformationProcessing-hasCapability Operator		InformationPro- cessingActivityClass
InformationProcessing-hasPossible Operator		InformationPro- cessingActivity
InternalLocation	consistsOf	Operator
InternalLocation	isEndOf	MaterialOperator
InternalLocation	isPartOf	Location
InternalLocation	isStartOf	MaterialOperator
LocalDemandClass	isConnectedTo	Location
LocalDemandClass	isInputOf	LocalLogistic- Planning
LocalDemandClass	isInputOf	LocalProduction- Planning
LocalDemandClass	isOutputOf	NetworkDemand- Planning
LocalDemand	isPartOf	NetworkProgram
LocalLogisticPlanning	hasInput	LocalDemandClass

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
LocalLogisticPlanning	hasOutput	LocalLogistic- ProgramClass
LocalLogisticPlanning	hasParticipant	LogisticChainClass
LocalLogisticPlanning	hasParticipant	SupplyChainClass
LocalLogisticPlanning	isConnectedTo	LocalProduction- Planning
LocalLogisticPlanning	isPlanningFor	Location
LocalLogistic- ProgramClass	isConnectedTo	LogisticOperator
LocalLogistic- ProgramClass	isInputOf	LogisticControl
LocalLogistic- ProgramClass	isOutputOf	LocalLogistic- Planning
LocalProduction- Planning	hasInput	LocalDemandClass
LocalProduction- Planning	hasOutput	LocalProduction- ProgramClass
LocalProduction- Planning	hasOutput	NetworkDemandClass
LocalProduction- Planning	hasParticipant	LogisticChainClass
LocalProduction- Planning	hasParticipant	SupplyChainClass
LocalProduction- Planning	isConnectedTo	LocalLogistic- Planning
LocalProduction- Planning	isPlanningFor	Location
LocalProduction- ProgramClass	isConnectedTo	ProductionOperator
LocalProduction- ProgramClass	isInputOf	ProductionControl
LocalProduction- ProgramClass	isOutputOf	LocalProduction- Planning
Location	consistsOf	InternalLocation
Location	consistsOf	Operator
Location	hasConnected	LocalDemandClass
Location	hasPlanning	LocalLogisticPlanning
Location	hasPlanning	LocalProduction- Planning
Location	hasSupplier	Chain
Location	isPartOf	Chain
Location	isPartOf	Organization

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
LogisticActivity	isPartOf	LogisticOrder
LogisticActivity	isPerformedBy	LogisticOperator
LogisticChainClass	isParticipantIn	LocalLogisticPlanning
LogisticChainClass	isParticipantIn	LocalProduction- Planning
LogisticChainClass	isParticipantIn	NetworkDemand- Planning
LogisticChain	consistsOf	LogisticOperator
LogisticControl	hasInput	LocalLogistic- ProgramClass
LogisticControl	hasOutput	LogisticOrderClass
LogisticControl	isPlanningFor	LogisticOperator
LogisticOperator	hasConnected	LocalLogistic- ProgramClass
LogisticOperator	hasConnected	LogisticOrderClass
LogisticOperator	hasPlanning	LogisticControl
LogisticOperator	hasPossible	LogisticActivity
LogisticOperator	isConnectedTo	LocalLogistic- ProgramClass
LogisticOperator	isPartOf	LogisticChain
LogisticOrderClass	isConnectedTo	LogisticOperator
LogisticOrderClass	isOutputOf	LogisticControl
LogisticOrder	consistsOf	LogisticActivity
MaterialActivity- Occurence	consistsOf	InformationGathering- ActivityOccurence
MaterialActivity- Occurence	endsAt	DateTimePoint
MaterialActivity- Occurence	hasInput	MaterialObject
MaterialActivity- Occurence	hasOutput	MaterialObject
MaterialActivity- Occurence	isConnectedTo	WorkOrder
MaterialActivity- Occurence	isOccurenceOf	MaterialFlowActivity
MaterialActivity- Occurence	startsAt	DateTimePoint
MaterialFlow- ActivityClass	canBePerformedBy	MaterialOperator
MaterialFlow- ActivityClass	hasInput	MaterialObjectClass

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
MaterialFlow-ActivityClass	hasKind	MaterialFlowActivity
MaterialFlow-ActivityClass	hasOutput	MaterialObjectClass
MaterialFlowActivity	IsPerformedBy	MaterialOperator
MaterialFlowActivity	consistsOf	InformationGatheringActivity
MaterialFlowActivity	hasConnected	Parameter
MaterialFlowActivity	hasConnected	ParameterClass
MaterialFlowActivity	hasEndAt	InformationGatheringActivity
MaterialFlowActivity	hasOccurenceAt	MaterialActivity-Occurence
MaterialFlowActivity	hasStartAt	InformationGatheringActivity
MaterialFlowActivity	isAKindOf	MaterialFlow-ActivityClass
MaterialObjectClass	consistsOf	MaterialObjectClass
MaterialObjectClass	hasConnected	BillOfMaterials
MaterialObjectClass	hasKind	MaterialObject
MaterialObjectClass	hasSupplier	Chain
MaterialObjectClass	isInputOf	MaterialFlow-ActivityClass
MaterialObjectClass	isOutputOf	MaterialFlow-ActivityClass
MaterialObjectClass	isPartOf	BillOfMaterials
MaterialObjectClass	isPartOf	MaterialObjectClass
MaterialObjectClass	isPartOf	PartCluster
MaterialObjectClass	isParticipantIn	InformationGathering-ActivityClass
MaterialObject	consistsOf	MaterialObject
MaterialObject	endsAt	DateTimePoint
MaterialObject	isAKindOf	MaterialObjectClass
MaterialObject	isInputOf	MaterialActivity-Occurence
MaterialObject	isOutputOf	MaterialActivity-Occurence
MaterialObject	isPartOf	MaterialObject
MaterialObject	startsAt	DateTimePoint
MaterialOperator	hasCapability	MaterialFlow-ActivityClass

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
MaterialOperator	hasConnected	Parameter
MaterialOperator	hasConnected	ParameterClass
MaterialOperator	hasEndAt	InternalLocation
MaterialOperator	hasPossible	MaterialFlowActivity
MaterialOperator	hasStartAt	InternalLocation
MaterialOperator	hasSupplier	Chain
NetworkConfiguration- Planning	hasOutput	ChainClass
NetworkConfiguration- Planning	isPlanningFor	Organization
NetworkDemandClass	inInputOf	NetworkDemand- Planning
NetworkDemandClass	isConnectedTo	Organization
NetworkDemandClass	isOutputOf	LocalProduction- Planning
NetworkDemandClass	isOutputOf	ProductionControl
NetworkDemandClass	isOutputOf	SalesPlanning
NetworkDemandPlanning	hasInput	NetworkDemandClass
NetworkDemandPlanning	hasOutput	LocalDemandClass
NetworkDemandPlanning	hasOutput	NetworkProgramClass
NetworkDemandPlanning	hasParticipant	LogisticChainClass
NetworkDemandPlanning	hasParticipant	SupplyChainClass
NetworkDemandPlanning	isPlanningFor	Organization
NetworkLogistic- Program	isForCustomer	Structure
NetworkProcurement- Planning	hasInput	NetworkProgramClass
NetworkProcurement- Planning	hasOutput	ProcurementProgram- Class
NetworkProgramClass	isConnectedTo	Organization
NetworkProgramClass	isInputOf	NetworkProcurement- Planning
NetworkProgramClass	isOutputOf	NetworkDemandPlanning
NetworkProgram	consistsOf	LocalDemand
Operator	consistsOf	Operator
Operator	isPartOf	InternalLocation
Operator	isPartOf	Location
Operator	isPartOf	Operator
Organization	consistsOf	Location
Organization	hasConnected	InformationObject- Class

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
Organization	hasConnected	NetworkProgramClass
Organization	hasPlanning	NetworkConfigurationPlanning
Organization	hasPlanning	NetworkDemandPlanning
Organization	hasPlanning	SalesPlanning
ParameterClass	isConnectedTo	MaterialFlowActivity
ParameterClass	isConnectedTo	MaterialOperator
Parameter	isConnectedTo	MaterialFlowActivity
Parameter	isConnectedTo	MaterialOperator
PartCluster	consistsOf	MaterialObjectClass
PartCluster	consistsOf	Part
Part	isPartOf	PartCluster
Part	isParticipantIn	InformationGathering-ActivityOccurence
PlannedParameter	isPartOf	Program
PlanningActivity	hasParticipant	InformationObjectClass
PlanningActivity	hasParticipant	StrategyClass
ProcurementProgramClass	isOutputOf	NetworkProcurementClass
ProductionActivity	isPartOf	ProductionOrder
ProductionActivity	isPerformedBy	ProductionOperator
ProductionControl	hasInput	LocalProductionProgramClass
ProductionControl	hasOutput	NetworkDemandClass
ProductionControl	hasOutput	ProductionOrderClass
ProductionControl	isPlanningFor	ProductionOperator
ProductionOperator	hasConnected	LocalProductionProgramClass
ProductionOperator	hasConnected	ProductionOrderClass
ProductionOperator	hasPlanning	ProductionControl
ProductionOperator	hasPossible	ProductionActivity
ProductionOperator	isPartOf	SupplyChain
ProductionOrderClass	isConnectedTo	ProductionOperator
ProductionOrder	consistsOf	ProductionActivity
Program	consistsOf	PlannedParameter
Program	hasConnected	CustomerOrder
Program	isFor	MaterialObjectClass
SalesPlanning	hasInput	CustomerOrderClass
SalesPlanning	hasOutput	NetworkDemandClass
SalesPlanning	isPlanningFor	Organization
StrategyClass	isParticipantIn	PlanningActivity

Tabelle A.9: Liste aller Relationen (Fortsetzung)

Domäne	Relation	Range
Structure	consistsOf	Structure
Structure	isPartOf	Structure
SupplyChainClass	isParticipantIn	LocalLogistic- Planning
SupplyChainClass	isParticipantIn	LocalProduction- Planning
SupplyChainClass	isParticipantIn	NetworkDemand- Planning
SupplyChain	consistsOf	ProductionOperator
WorkOrderClass	isOutputOf	ProductionControl
WorkOrder	consistsOf	WorkOrder
WorkOrder	hasConnected	CustomerOrder
WorkOrder	hasConnected	MaterialActivity- Occurence
WorkOrder	hasConnected	WorkOrder
WorkOrder	hasConsecutive	WorkOrder
WorkOrder	hasPrevious	WorkOrder
WorkOrder	isPartOf	WorkOrder
WorkOrder	isParticipantIn	InformationGathering- ActivityOccurence

A.2 Ableitung und Entwicklung allgemeiner Simulationsbausteine

A.2.1 Auflistung aller Simulationsbausteine

Im Folgenden sind die SimGPN-Bausteine dokumentiert. Fokus liegt auf der Beschreibung der Funktionalitäten der Bausteine. Diese wird ergänzt durch Angaben zur hierarchischen Struktur, zu Schnittstellen un Parametern. Weiterhin ist für jeden Baustein der Bezug zu OntoGPN hinterlegt. Dabei werden die korrespondierenden Klassen aus der Ontologie aufgelistet.

Tabelle A.10: Eigenschaften des GPN-Bausteins

Name	GPN
Beschreibung	Der GPN-Baustein beinhaltet die Simulation als Ganzes und stellt damit das ausführbare Simulationsmodell dar. Globale Produktionsnetzwerke (GPN) können mit diesem Baustein modelliert werden. Im GPN-Baustein sind zudem globale Parameter, welche von verschiedenen Bausteinen verwendet werden definiert. Transportzeiten zwischen den Werken im Netzwerk und zwischen Werken und Kunden sind im globalen Parameter Transportzeitenmatrix hinterlegt. Der Planungshorizont definiert auf globaler Ebene, wie weit Planungsalgorithmen und Bedarfe in Simulationszeit in die Zukunft reichen. Dadurch, dass den einzelnen Prozessschritten der Auftragsabwicklung immer nur Informationen für einen beschränkten Zeitraum zur Verfügung stehen, welche rollierend aktualisiert werden, wird die grundlegende Dynamik und Unsicherheit der realen Auftragsabwicklung in die Simulation übertragen. Neben dem Planungshorizont stellt der FixierterPlanungshorizont einen weiteren globalen Parameter dar, welcher angibt, in welchem Zeitraum keine Änderungen an eingeplanten Produktionsaufträgen durch Planungsprozesse mehr vorgenommen werden können.
Enthaltene Bausteine	Kunden, Werk, Simulationsergebnisse
Schnittstellen	Werk
Parameter	Transportzeitenmatrix, Zufallszahlenstrom, Planungshorizont, FixierterPlanungshorizont
Ontologie-Klassen	GPN

Tabelle A.11: Eigenschaften des Simulationsergebnisse-Bausteins

Name	Simulationsergebnisse
Beschreibung	<p>Innerhalb des Simulationsmodells übernimmt der Baustein Simulationsergebnisse die Aufgabe der Zusammenführung und Ausgabe von Daten, die während des Simulationslaufs entstehen. Der Baustein nimmt damit nicht aktiv an der Simulation teil, sondern führt in anderen Bausteinen aufgezeichnete Daten erst nach Abschluss eines Simulationslaufs zusammen. Die zentralen Daten, die während des Simulationslaufes entstehen, sind simulierte Tracking- und Tracing-Daten. Der Simulationsergebnisse-Baustein iteriert durch alle Werk-Bausteine, greift auf deren Produktionsdatenbanken zu und extrahiert die aufgezeichneten Daten in der Form der entwickelten standardisierten Eingangsdatentabellen (siehe Kapitel 5.2.3). Damit kann für jeden Simulationslauf ebenfalls ein datenbasiertes Abbild in gleicher Form wie für das reale System erstellt werden. Bei der Analyse verschiedener Simulationsszenarien können deren Ergebnisse direkt mit dem realen Netzwerkverhalten verglichen werden. Ergänzt werden die Rückmeldedaten durch Daten zu simulierten Transportaufträgen und deren termingerechte Erfüllung. Der Simulationsergebnisse-Bausteins ist dabei derart gestaltet, dass er durch den Anwender um anwendungsspezifische Ausgaben ergänzt werden kann.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	-
Parameter	Simulationslauf, SzenarioBeschreibung, AusgabePfad
Ontologie-Klassen	-

Tabelle A.12: Eigenschaften des Kunden-Bausteins

Name	Kunden
Beschreibung	Der Kunden-Baustein dient als übergreifender Rahmen für die Modellierung der einzelnen Kunden (Kunde-Baustein) und damit als Trennung der Marktseite von der unternehmensinternen Produktionsnetzwerkseite innerhalb der Simulation.
Enthaltene Bausteine	Kunde
Schnittstellen	-
Parameter	-
Ontologie-Klassen	Customer

Tabelle A.13: Eigenschaften des Kunde-Bausteins

Name	Kunde
Beschreibung	Der Kunde-Baustein stellt einen einzelnen Kunden, in Form eines Markts, Distributionsstandorts oder ähnlichem, mit Bedarfen an das Produktionsnetzwerk dar. Der Baustein dient als Empfänger für den Versand von Fertigprodukten aus dem Netzwerk heraus. Für jedes Werk des Produktionsnetzwerks, bei dem der Kunde im Simulationsverlauf Bauteile bestellt, enthält der Kunde-Baustein jeweils einen Zulieferwerk-Baustein.
Enthaltene Bausteine	Zulieferwerk
Schnittstellen	-
Parameter	Bauteilart, Kundenbezeichner, Bedarfsschwankung
Ontologie-Klassen	SupplyChainClass, DemandClass, CustomerLocation

Tabelle A.14: Eigenschaften des Zulieferwerk-Bausteins

Name	Zulieferwerk
Beschreibung	<p>Der Zulieferwerk-Baustein ist verantwortlich für die regelmäßige Aktualisierung von Lieferabrufen und deren Versenden an die Empfängerwerke im Produktionsnetzwerk über die Simulationszeit hinweg. Der LA wird in regelmäßigen Abständen aktualisiert und erneut an den Empfänger (Bedarf-Baustein in den einzelnen Werken) versendet. In der Simulation werden die LA von den Zulieferwerk-Bausteinen verwaltet. Jeder Kunde-Baustein enthält für jedes Werk im Produktionsnetzwerk, bei dem bestellt werden soll, einen Zulieferwerk-Bausteinen. Innerhalb des Zulieferwerk-Baustein wird als Parameter initial zu Simulationsbeginn für jede Bauteilvariante alle benötigten Mengen über einen festgelegten Zeitraum hinterlegt. Im Laufe der Simulationsausführung erzeugt der Zulieferwerk-Baustein einmal pro Tag in Simulationszeit den aktualisierten LA, der vom aktuellen Datum der Simulationszeit H Tage in die Zukunft reicht und versendet den LA über eine Bausteinschnittstelle an den zugehörigen Bedarf-Baustein des Empfängerwerks. H steht hierbei für den festgelegten Planungshorizont, der als Parameter im GPN angegeben wird. Um Änderungen in den Bedarfen zu modellieren, können stochastische Bedarfsschwankungen in der Simulation aktiviert werden. Bei Aktivierung der Schwankungen (über Parameter BedarfsschwankungenEin) wird bei jeder Aktualisierung des LA jede Menge über eine Normalverteilung mit Mittelwert der zu liefernden Menge und der Varianz, einstellbar durch den Parameter Schwankungsbreite, errechnet und der modifizierte LA an das Empfängerwerk versandt. Wie in der Realität entsteht durch dieses Vorgehen eine dynamische Situation, in der dem Produktionsnetzwerk immer nur ein Teil der Bedarfe zur Planung zu Verfügung steht, sich diese täglich aktualisieren und im Falle von aktivierten Bedarfsschwankungen auch stetig ändern.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Bedarf
Parameter	Lieferabruf, BedarfsschwankungenEin, Schwankungsbreite
Ontologie-Klassen	SupplyChainClass, LogisticChainClass, CustomerOrder, LocalDemandClass

Tabelle A.15: Eigenschaften des Werk-Bausteins

Name	Werk
Beschreibung	Der Werk-Baustein modelliert einzelne Produktionsstandorte im GPN und sorgt damit für die Abbildung der geographischen Struktur des Netzwerks. Der Baustein stellt damit den Rahmen für die Modellierung einzelner Produktionsstufen innerhalb des Produktionsstandortes. Weiterhin enthält jedes Werk einen Produktionsdatenbank-Baustein, welcher die werksinternen IT-Systeme in der Simulation abbildet.
Enthaltene Bausteine	Produktionsstufe, Produktionsdatenbank
Schnittstellen	-
Parameter	Bezeichnung
Ontologie-Klassen	Location

Tabelle A.16: Eigenschaften des Produktionsdatenbank-Bausteins

Name	Produktionsdatenbank
Beschreibung	Der Baustein übernimmt in der Simulation die Aufgabe der werksinternen IT-Systeme. Die im Zuge der Simulation erfüllten Aufgaben sind dabei zum einen die Aufzeichnung von Rückmeldedaten, welche wiederum für die Auswertung des Simulationsexperiments genutzt werden können, und zum anderen die Bereitstellung von Daten zur Systemfüllung an die während der Simulation auszuführenden Planungsprozesse. Die Systemfüllung gibt dabei die Anzahl und Art der sich zum aktuellen Simulationszeitpunkt in Produktion befindlichen Bauteile an und kann bei Bedarf zu Planungszwecken verwendet werden. Zugriffsfunktionen für ein einfaches Verwenden in vom Anwender selbst erstellten Planungsalgorithmen sind implementiert.
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	-
Parameter	-
Ontologie-Klassen	InformationGatheringActivity, InformationGatheringActivityOccurance, WorkOrder

Tabelle A.17: Eigenschaften des Produktionsstufe-Bausteins

Name	Produktionsstufe
Beschreibung	Zentraler Rahmen-Baustein für die Kapselung der zentralen Prozesse der Auftragsabwicklung. Innerhalb einer Produktionsstufe laufen alle eingehenden Bedarfe im Bedarfskonsolidierung-Baustein zentral zusammen und werden dort verwaltet. Weitere Planungs- und Steuerungsprozesse sind entsprechend der Idee der Materialflussorientierung den zugehörigen Materialflussbausteinen zugeordnet und als Unterbausteine in diesen enthalten. Die Produktionsstufe selbst besteht genau aus einem Lager- und einem Versand-Baustein. Die Anzahl an Produktionslinien kann flexibel zwischen 0 und jeder natürlichen Zahl entsprechend der Linien im Anwendungsfall betragen. Ist keine Linie modelliert, dann wenn in einem Werk eine Bauteilart zwar nicht produziert, aber von nachfolgenden Produktionsstufen als Eingangsmaterial verwendet wird.
Enthaltene Bausteine	Versand, Lager, Produktionslinie, Bedarfskonsolidierung
Schnittstellen	-
Parameter	-
Ontologie-Klassen	Location, MaterialObjectClass, MaterialFlowActivityClass

Tabelle A.18: Eigenschaften des Bedarfskonsolidierung-Bausteins

Name	Bedarfskonsolidierung
Beschreibung	<p>Aufgabe des Bausteins ist der Empfang, die Rückterminierung, die Konsolidierung und die Verwaltung aller bei einer Produktionsstufe eingehenden Bedarfe. Gleichzeitig besteht die Möglichkeit Bedarfe an andere Produktionsstufen gleicher Bauteilart weiterzureichen. Hierdurch wird das Konzept der parallelen Produktion in Netzwerken abgebildet, bei der bei Kapazitätsengpässen Bedarfe auf mehrere Werke verteilt werden. Die Aufteilung wird dabei durch eine Quoten-Tabelle gelöst, die für jede Bauteilvariante und jeden zu simulierenden Tag eine prozentuale Aufteilung der Bedarfe auf die eigene Produktion oder entsprechende Lieferanten angibt. Eingangspunkt für die Bedarfe einzelner Kunden stellt der Bedarf-Baustein dar.</p> <p>Weiterhin übernimmt der Bedarfskonsolidierung-Baustein die Rückterminierung von Bedarfen auf SWAT-, Produktionsende- und Produktionsbeginn-Basis und stellt anderen Bausteinen die Bedarfe über Funktionen zur Verfügung.</p>
Enthaltene Bausteine	Bedarf
Schnittstellen	Produktionslinie, Bedarf
Parameter	PlanLagerliegezeit, Quotierung, VarianteZu-Lieferant
Ontologie-Klassen	LocalDemandClass

Tabelle A.19: Eigenschaften des Bedarf-Bausteins

Name	Bedarf
Beschreibung	<p>Der Baustein dient als Empfänger von Kundenbedarfen in Form von Lieferabrufen. Der Baustein speichert die eingehenden Bedarfe auf Soll-Wareneingangstermin (SWET)-Basis und führt den ersten Schritt der Rückterminierung auf SWAT-Basis aus. Beide Bedarfsstände werden gespeichert und über Funktionen zur Verfügung gestellt.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Kunde, Lager
Parameter	ExternerVersand
Ontologie-Klassen	LocalDemand

Tabelle A.20: Eigenschaften des Produktionslinie-Bausteins

Name	Produktionslinie
Beschreibung	Der Baustein stellt das Rahmenwerk für die Abbildung einer Produktionslinie dar. Entsprechend des Gedanken der Materialflussorientierung sind der Linie auch die entsprechenden Planungs- und Steuerungsprozesse zugeordnet, die im enthaltenen Baustein Planung eingegliedert sind. Die Simulation des Materialflusses, der Produktion an sich, ist im Produktionslinie angesiedelt.
Enthaltene Bausteine	Produktion, Planung
Schnittstellen	-
Parameter	-
Ontologie-Klassen	MaterialOperator, InternalLocation

Tabelle A.21: Eigenschaften des Planung-Bausteins

Name	Planung
Beschreibung	Aufgabe des Bausteins ist lediglich die Abgrenzung der Planungs- und Steuerungsprozesse von denen des Materialflusses. Der Baustein enthält die Funktionen der Programmplanung und der Steuerung. Da beide Planungsprozesse auf eine Vielzahl von Schnittstellen zu anderen Bausteinen benötigen, sind die Verlinkungen zu diesen bereits auf Ebene dieses Bausteins hinterlegt. Dies hat reine Implementierungsvorteile und erleichtert die Handhabung der Bausteine. Die Schnittstellen bestehen dennoch von den untergeordneten Bausteinen zu den jeweiligen benötigten Bausteinen.
Enthaltene Bausteine	Programmplanung, Steuerung
Schnittstellen	-
Parameter	-
Ontologie-Klassen	PlanMake

Tabelle A.22: Eigenschaften des Programmplanung-Bausteins

Name	Programmplanung
Beschreibung	<p>Zentrale Aufgabe des Bausteins ist die Erstellung eines Produktionsprogramms für die zugehörige Linie. Aufgrund der hohen Individualisierung der Planungsmethoden in der Industrie, erfordert die Abbildung der Logiken die manuelle Implementierung durch den Anwender. Der Baustein stellt jedoch ein definiertes Ergebnisformat für das Programm sowie Zugriffe zu wichtigen Größen aus dem Netzwerk, wie Bedarfe, Bestände, etc. bereit, um den Anwender bestmöglich zu unterstützen.</p> <p>Das Produktionsprogramm als Ergebnis des Bausteins ist als Tabelle definiert, deren Zeilen die befähigten Bauteilvarianten und jede Spalte ein Datum im Planungshorizont darstellt. Die Tabellenwerte entsprechen der zu produzierenden Menge je Bauteilvariante je Datum. Im Baustein sind Funktionen für einfache Befüllung und Aktualisierung sowie den Zugriff auf die befüllten Informationen implementiert. Eine Ausführung und damit dynamische Aktualisierung der Programmplanung erfolgt einmal pro Simulationstag. Nach Abschluss der Programmplanung wird das erzeugte Programm über eine Schnittstelle an die Bausteine des Sekundärbedarfs weitergeleitet, welche eine Stücklistenauflösung durchführen, um die notwendigen Mengen an Eingangsbauteile zu bestimmen und bei vorgelegerten Produktionsstufen mittels Lieferabruf zu bestellen.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Lager, Produktionslinie, Bedarfskonsolidierung, Produktionsdatenbank, Sekundärbedarfe
Parameter	-
Ontologie-Klassen	LocalProductionPlanning, LocalProduction-Programm

Tabelle A.23: Eigenschaften des Steuerung-Bausteins

Name	Steuerung
Beschreibung	<p>Aufgabe des Bausteins ist die Produktionssteuerung. Dies entspricht der Erstellung von Arbeitsaufträgen zur Produktion spezifischer Bauteile und damit dem Übergang von der mengen-basierten Planung des Produktionsprogramms hin zu einzelnen Aufträgen. Hierfür wird aus dem aktuellen Produktionsprogramm das erste Tagespaket nach dem fixierten Planungshorizont verwendet und in Produktionsaufträge entsprechend der zu produzierenden Menge pro Bauteilvariante zerlegt. Standardmäßig ist im Baustein <i>Steuerung</i> eine Gleichverteilung der Aufträge nach Bauteilvariante über den Produktionstag zur Bestimmung der Reihenfolge implementiert. Diese kann im Anwendungsfall jedoch durch individuelle Logiken zur Reihenfolgebildung ersetzt werden. Ergebnis ist das Einfügen der Produktionsaufträge in den Auftragspuffer der Linie in der geplanten Reihenfolge.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Programmplanung, Produktionslinie, Bedarfskonsolidierung
Parameter	-
Ontologie-Klassen	ProductionControl, ProductionOrder

Tabelle A.24: Eigenschaften des Produktion-Bausteins

Name	Produktion
Beschreibung	Der Produktion-Baustein modelliert den Materialflussteil der Produktionslinie. Zu Schichtzeiten überprüft der Baustein den Auftragspuffer und produziert nach Ablauf der Taktzeit jeweils den obersten Auftrag im Puffer, sofern die notwendigen Eingangsmaterialien in den Lagern vorhanden sind. Nach Auslagerung eben dieser, wird anhand der Durchlaufzeitenverteilung durch zufälliges Ziehen die Durchlaufzeit des Auftrages auf der Linie bestimmt. Nach Ablauf dieser Zeit übergibt der Produktion-Baustein das gefertigte Bauteil an das nachgelagerte Lager.
Enthaltene Bausteine	Sekundärbedarf
Schnittstellen	-
Parameter	Befähigung, Schichtkalender, Ausschussquote, Durchlaufzeiten, Plan-Durchlaufzeit, Ausbringung
Ontologie-Klassen	ProductionActivityOccurance, InformationGatheringOperator, InformationGatheringActivityOccurance

Tabelle A.25: Eigenschaften des Sekundärbedarf-Bausteins

Name	Sekundärbedarf
Beschreibung	<p>Der Sekundärbedarf-Baustein ist verantwortlich für die Modellierung von Stücklisteninformationen, die Ermittlung von Sekundärbedarfen sowie die Zuteilung von und die Bestellung bei Lieferanten. Für jede Bauteilvariante ist die Bauteilvariante, die als Eingangsmaterial benötigt wird im Baustein hinterlegt. Auch werden die Lieferanten für die zu verbauenden Bauteilvarianten angegeben. Der Baustein stellt diese Informationen für die Verwendung in anderen Bausteinen, wie den Produktion- oder Programmplanung-Baustein bereit.</p> <p>Zentrale Parameter dieses Bausteins sind die Verknüpfung von Bauteilvariante und Bauteilvariante des Vorprodukts in Tabellenform (Parameter StücklistenAuflösung), die Lieferanten, wobei diese auch im gleichen Werk beheimatet sein können, pro Vorproduktvariante (Parameter LieferantProBauteilvariante) und die Schnittstelle zum Lager-Baustein, aus denen die Vorprodukte ausgelagert werden können. Weiterhin übernimmt der Baustein die Aufgabe des Versenden von Bestellung in Form von Lieferabrufen beim jeweiligen Lieferanten. Hierzu existieren Schnittstellen zum Baustein Programmplanung, aus dem das Programm übernommen, mittels Stücklistenauflösung in Bedarfe pro Vorproduktvariante übersetzt und über eine Schnittstelle zum Bedarf-Baustein des Lieferanten mit entsprechendem Datum auf SWET-Basis gesendet wird.</p>
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Lager, Bedarf, Programmplanung
Parameter	StücklistenAuflösung, LieferantProBauteilvariante
Ontologie-Klassen	PlanDeliver, LogisticChain, SupplyChain, BillOfMaterials, LocalDemand

Tabelle A.26: Eigenschaften des Lager-Bausteins

Name	Lager
Beschreibung	Der Lager-Baustein stellt Funktionen für Ein- und Auslagerung von Bauteilen sowie Informationen zu aktuellen Bestandszahlen bereit. Ein- und Auslagerungen erfolgen dabei nach dem First-In-First-Out-Prinzip. Der Baustein weist eine Schnittstelle zur Produktionsdatenbank auf, über die Ein- und Auslagerungsvorgänge mit Zeitstempel in den simulierten IT-Systemen des Produktionsstandortes geschrieben werden. Insgesamt sind Lager in der Simulation passiv modelliert. Ein- und Auslagervorgänge werden über die Produktionslinie- oder Versand-Bausteine angestoßen. Der initiale Lagerbestand zu Simulationsbeginn wird als Parameter im Baustein hinterlegt. .
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Bedarfskonsolidierung, Produktionsdatenbank
Parameter	Bezeichnung, Bauteilart, Kalender, Initialbestand, BefähigteVarianten, Schichtkalender
Ontologie-Klassen	LogisticActivityOccurance, LogisticOperator, InternalLocation, InformationGatheringOperator, InformationGatheringActivityOccurance, LogisticOrder

Tabelle A.27: Eigenschaften des Transport-Bausteins

Name	Versand
Beschreibung	Aufgabe des Transport-Bausteins ist die Erstellung und Bearbeitung von Transportaufträgen. Die Aufträge werden anhand der eingegangene Bedarfe bestimmt. Zum Soll-Warenausgangstermin des Transportauftrags werden die enthaltene Teile aus dem vorgelagerten Lager ausgelagert und nach Ablauf der Transportzeit im Lager des Kunden, intern oder extern, eingelagert.
Enthaltene Bausteine	-
Schnittstellen	Lager, Produktionsdatenbank, Bedarfskonsolidierung, Bedarf
Parameter	Bezeichnung, Bauteilart, Transportkalender, KapazitätProLieferung
Ontologie-Klassen	LogisticActivityOccurance, LogisticOperator, PlantLocation, InformationGatheringOperator, InformationGatheringActivityOccurance, LogisticOrder, LocalLogisticsPlanning, LogisticsControl, LocalLogisticProgramm, PlanDeliver, SupplyChainClass, LogisticsChainClass

A.2.2 Detaillierte Implementierung der Rückterminierung

Kunden terminieren ihre Bedarfe auf den Zeitpunkt, an dem sie die Ware benötigen. Die Bedarfe sind folglich aus Kundensicht auf Basis des SWET ausgelegt. Um Produktions- und Versandprozesse rechtzeitig einleiten zu können, führt die produzierende Produktionsstufe eine Rückterminierung durch, um auf Basis des SWET, den spätesten SWAT, also den Versandtermin, den spätesten Fertigstellungstermin und den spätestens Produktionsbeginn zu bestimmen. Entsprechend der Prozessabfolge in Abbildung A.1 bestimmt sich der SWAT mit Hilfe der Transportzeit, der Fertigstellungstermin durch Abzug einer Plan-Lagerliegezeit vom SWAT und der Produktionsbeginn durch Abzug der Plan-Liniendurchlaufzeit vom Fertigstellungstermin. Bei allen Terminierungen werden dabei nur Arbeitszeiten entsprechend den hinterlegten Transport-, Lager- und Produktionsschichtkalender beachtet.

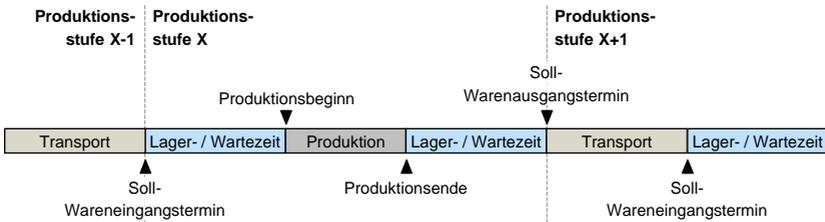


Abbildung A.1: Rückterminierung von Bedarfs- und Produktionsterminen.

A.3 Automatisierten Modellbildung und Parametrierung

In folgenden Abschnitten werden Details zur Implementierung, zu Algorithmen und Datenstrukturen der automatisierten Modellbildung und Parametrierung aufgeführt. Dabei wird zunächst die Struktur der zusätzlichen Eingangsdaten (siehe Abschnitt A.3.1) vorgestellt. Anschließend wird die Pseudo-Code-Implementierung des Algorithmus zur Identifikation von aktiven Kunde-Lieferanten-Beziehungen gezeigt (siehe Abschnitt A.3.2). Abschließend erfolgen vertiefende Erklärungen zu den Ausgabedaten der automatisierten Modellbildung und Parametrierung mitsamt Details zur Implementierung (siehe Abschnitt A.3.3).

A.3.1 Zusätzliche Eingangsdaten

Für eine vollständige Parametrierung des zu erzeugenden Simulationsmodells sind allgemeinen Informationen zum Simulationsmodell und zum Simulationslauf selbst, welche nicht aus den aufgezeichneten Daten gewonnen werden können, erforderlich. Diese werden über eine Datei eingespielt, welche vom

Anwender manuell zu befüllen ist. Die Datei enthält eine Bezeichnung für das zu simulierende Szenario, ein Simulationsstartdatum, die Simulationslaufzeit in zu simulierenden Tagen, den Planungshorizont, den fixierten Horizont, die Liste bestellender Kunden und die geschätzte minimale Lager-Liegezeit. Die Struktur dieser Datei ist in Tabelle A.28 verdeutlicht.

Tabelle A.28: Tabelle für allgemeine Informationen zum Simulationsmodell.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Netzwerkbezeichnung	<i>string</i>	GPN-Szenario-1
2	Simulationsstartdatum	<i>date</i>	2021-10-15
3	Simulationslaufzeit in Tagen	<i>integer</i>	365
4	Planungshorizont in Tagen	<i>integer</i>	60
5	Fixierter Horizont in Tagen	<i>integer</i>	2
6	Kunden	<i>string</i>	Markt DE, Markt GB, Markt USA, Markt AT
7	Plan-Lager-Liegezeit	<i>time</i>	02:00:00

A.3.2 Algorithmus zur Identifikation aktiver Kunden-Lieferanten-Beziehungen

Die Implementierung des in Kapitel 5.4.2 vorgestellten Algorithmus zur Identifikation aktiver Kunden-Lieferanten-Beziehungen ist in Algorithmus 4 in Pseudo-Code dargestellt.

Algorithmus 4 Identifikation der Lieferanten für Bauteilvarianten im Sekundärbedarf-Baustein.

Input: Übergeordnete Bauteilart A_{PARENT}

Input: Verbaute Bauteilart A_{CHILD}

Input: CASES_PART_ A_{PARENT} -Tabelle als CC

Input: CASES_PART_ A_{CHILD} -Tabelle als CC_{sub}

Output: Bausteinvariante-zu-Lieferant-Tabelle T

- 1: ▶ Erstelle Tabelle B mit allen Kunde-Lieferanten-Beziehungen.
 - 2: Verbinde CC mit CC_{sub} über $CC(\text{CaseID}) = CC_{\text{sub}}(\text{CaseID}) \rightarrow$ Tabelle B
 - 3: ▶ Spalten aus CC_{sub} erhalten in B den Index s .
 - 4: Reduziere Spalten von B auf Plant, Line, Name, Plant_s, Line_s, Name_s
 - 5: Lösche Duplikate aus B
 - 6: ▶ Identifiziere Stücklisten S pro Linie und Bauteilvariante.
 - 7: Reduziere Spalten von S auf Line, Name, Name_s.
 - 8: Lösche Duplikate aus S .
 - 9: ▶ Identifiziere Lieferanten zu jeder Bauteilvariante S_L pro Linie L .
 - 10: **for each** Linie l aus Spalte Line in Tabelle B **do**
 - 11: **for each** Stücklistenposition P in S mit $S(\text{Line}) = l$ **do**
 - 12: Finde Einträge in B mit $B(\text{Line}) = l$ und $B(\text{Name}_s) = S(\text{Name}_s) \rightarrow B_S$.
 - 13: **if** Anzahl Eintrag in B_S gleich 1 **then**
 - 14: Setze Lieferantenwerk $w \leftarrow B_S(\text{Plant}_s)$.
 - 15: **else**
 - 16: **if** Für einen Eintrag $B_S(\text{Plant}) = B_S(\text{Plant}_s)$ **then**
 - 17: Setze Lieferantenwerk $w \leftarrow B_S(\text{Plant}_s)$ dieses Eintrags.
 - 18: **else**
 - 19: Setze Lieferantenwerk $w \leftarrow B_S(\text{Plant}_s)$ eines bel. Eintrags.
 - 20: Füge neuen Eintrag in Bausteinvariante-zu-Lieferant-Tabelle T ein.
 - 21: Finde Pfad p_S des Sekundärbedarf der Art A_{PARENT} für Linie l
 - 22: Finde Pfad p_B für Bedarf-Baustein in Bedarfskonsolidierung der Linie
 - 23: l der Art A_{CHILD} in Werk w
 - 24: $T(\text{Linie}) \leftarrow l$
 - 25: $T(\text{Sekundärbedarf Pfad}) \leftarrow p_S$
 - 26: $T(\text{Bauteilvariante}) \leftarrow S(\text{Name}_s)$
 - 27: $T(\text{Lieferant}) \leftarrow w$
 - 28: $T(\text{Pfad}) \leftarrow p_B$
-

A.3.3 Ergebnisdaten

Die Ausgabe der Ergebnisse der einzelnen Prozessschritte der automatisierten Modellbildung und Parametrierung erfolgt in Form von Microsoft-Excel-Dateien mit definierten Tabellenstrukturen. Die Wahl des Excel-Formats begründet sich mit der hohen Verbreitung und der Nutzerfreundlichkeit. Die Dateien sind von Mensch und Maschine lesbar. Die gängigen Simulationsanwendungen, wie Siemens Plant Simulation oder AnyLogic, unterstützen den Import von Excel-Dateien. In Kombination mit den allgemeinen Simulationsbausteinen enthalten die Ausgabedateien alle Informationen, die für die Modellgenerierung benötigt werden und entsprechen damit einem parametrierten formalen Simulationsmodell. In den folgenden Abschnitten werden die Ausgaben in Tabellenform für die Identifikation der Modellstruktur, die Identifikation von Beziehungen und die Parameteridentifikation vorgestellt.

Ergebnisdaten der Struktur-Identifikation

Ergebnis des ersten Prozessschritts ist eine Tabelle in der alle benötigten Elemente des Simulationsmodells mit entsprechender Art des Simulationsbausteins, Bezeichnung und Positionierung in der Baumstruktur des Simulationsmodells aufgelistet sind. Tabelle A.29 definiert die Struktur des Ergebnisses.

Tabelle A.29: Ausgabeformat der Struktur-Identifikation.

Spalte	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Bezeichnung	<i>string</i>	Zylinderkopfmontage-1
2	Bausteinart	<i>string</i>	Produktionslinie
3	Pfad	<i>string</i>	<i>Szenario1.München.ZKM. Zylinderkopfmontage-1</i>

Ergebnisdaten der identifizierten Bausteinbeziehungen

Ergebnis des zweiten Prozessschritts stellen drei Tabellen dar. In Tabelle eins sind alle Schnittstellen aufgelistet und für eine einfach Übertragbarkeit ins Simulationsmodell definiert (siehe Definition in Tabelle A.30). Tabelle zwei und drei legen die Zuweisung von Bauteilvarianten zu jeweiligen Lieferanten für alle Sekundärbedarf- (siehe Definition in Tabelle A.31) und Bedarfskonsolidierungs-Bausteine fest (siehe Definition in Tabelle A.32).

Tabelle A.30: Ausgabeformat für identifizierte Bausteinbeziehungen.

Spalte	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Bausteinart	<i>string</i>	Zulieferwerk
2	Pfad Baustein	<i>string</i>	<i>Szenario1. Kunden. Markt DE. Werk München</i>
3	Schnittstelle	<i>string</i>	EmpfängerBedarf
4	Bausteinart Schnittstelle	<i>string</i>	Bedarf
5	Zugriffspfad	<i>string</i>	<i>Szenario1. München. Motor- montage. Bedarfskonsolidie- rung. Bedarf Markt DE</i>

Tabelle A.31: Sekundärbedarf: Ausgabe der Beziehung von Bauteilvariante zu Lieferant.

Spalte	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Linie	<i>string</i>	Motormontageline E (ME)
2	Sekundärbedarf Pfad	<i>string</i>	<i>S1. MUC. Motormontage. ME. Pro- duktion. Sekundärbedarf. ZKM</i>
3	Bauteilvariante	<i>string</i>	9759755-1
4	Lieferant	<i>string</i>	ZKM Werk MUC
5	Pfad	<i>string</i>	<i>S1. MUC. ZKM. Bedarfskonsolidie- rung. Bedarf ME</i>

Tabelle A.32: Bedarfskonsolidierung: Ausgabeder Beziehung von Bauteilvariante zu Lieferant

Spalte	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Pfad Bedarfskon- solidierung	<i>string</i>	<i>S1. PRG. Kurbelwellenfertigung. Bedarfskonsolidierung</i>
2	Bauteilvariante	<i>string</i>	1024023-1
3	Linie	<i>string</i>	Kurbelwellenfertigung MUC K1
4	Lieferant	<i>string</i>	Kurbelwellenfertigung Werk München
5	Pfad	<i>string</i>	<i>S1. MUC. Kurbelwellenfertigung. Bedarfskonsolidierung. Bedarf PRG</i>

Ergebnisdaten der Parameteridentifikation

Die Ausgabe der ermittelten Parameterwerte erfolgt in mehreren Excel-Dateien, die wiederum verschiedene Tabellenblätter mit Parametern enthalten können. Je Produktionslinie-Baustein wird eine eigene Datei erstellt. Diese enthält jeweils ein Tabellenblatt, mit einer Auflistung der Befähigungen (siehe Tabelle A.34), dem Schichtkalender der Linie (siehe Tabelle A.35), dem Histogramm der Durchlaufzeit (siehe Tabelle A.36), der Ausbringung pro Tag (siehe Tabelle A.37), den Stücklisten (siehe Tabelle A.38) sowie der Plan-Durchlaufzeit (siehe Tabelle A.39). Ebenfalls wird für jeden Lager-Baustein eine Datei mit einem Tabellenblatt für befähigte Varianten (siehe Tabelle A.40) und einem Tabellenblatt mit dem initialen Bestand pro Variante erzeugt (siehe Tabelle A.41).

Die Parameter der einzelnen Transport-Bausteine werden in einer gemeinsamen Datei ausgegeben. Die Transportzeitmatrix (siehe Tabelle A.42) und eine Auflistung der Lieferkapazitäten pro Baustein (siehe Tabelle A.43) stellen jeweils ein eigenes Tabellenblatt dar. Für jeden Baustein wird zudem ein eigenes Tabellenblatt mit dem identifizierten Schichtkalender angelegt (siehe Tabelle A.44).

Tabelle A.33: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Befähigung.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Befähigung	<i>string</i>	7845944-3

Die Informationen zur Bedarfsaufteilung in Form der Quoten-Tabellen wird je Bedarfskonsolidierung-Baustein als Tabellenblatt in einer weiteren Excel-Datei ausgegeben (siehe Tabelle A.45).

Tabelle A.34: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Befähigung.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Befähigung	<i>string</i>	7845944-3

Tabelle A.35: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Schichtkalender.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Datum	<i>date</i>	2021-10-15
2	Startzeit	<i>date</i>	06:45:00
3	Endzeit	<i>date</i>	23:15:00
4	Dauer	<i>time</i>	16:30:00

Tabelle A.36: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Durchlaufzeiten Histogramm.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Untere Grenze	<i>time</i>	01:30:00
2	Obere Grenze	<i>time</i>	01:45:00
3	Wahrscheinlichkeit	<i>float</i>	0,12

Tabelle A.37: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Ausbringung.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Datum	<i>date</i>	2021-10-15
2	Ausbringung	<i>integer</i>	1245

Tabelle A.38: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Stückliste.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Pfad	<i>string</i>	<i>Szenario1. Werk München. Motormontage. Montagelinie M1. Produktion. Sekundärbedarf Kurbelwelle</i>
1	Bauteilvariante	<i>string</i>	M653871
2	Bauteilvariante verbaut	<i>string</i>	7845944-3

Tabelle A.39: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Plan-Durchlaufzeiten.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Durchlaufzeit	<i>time</i>	01:45:00

Tabelle A.40: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte eines Lagers - Tabellenblatt Befähigung.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Befähigung	<i>string</i>	7845944-3

Tabelle A.41: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte eines Lagers - Tabellenblatt initialer Bestand.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Bauteilvariante	<i>string</i>	7845944-3
2	Bestand	<i>integer</i>	124

Tabelle A.42: Beispielhafte Transportzeitmatrix im Baustein Transport.

	Werk München	Werk Pilzen	Werk Warschau
Werk München	0	3	8
Werk Pilzen	3	0	8
Werk Warschau	8	3	0

Tabelle A.43: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte der Transport-Bausteine - Tabellenblatt Lieferkapazität.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Pfad	<i>string</i>	<i>Szenario1. Werk München. Kurbelwellenfertigung. Transport</i>
2	Kapazität	<i>integer</i>	60

Tabelle A.44: Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte der Transport-Baustein - Tabellenblatt Schichtkalender für einen Baustein.

Zeile	Bezeichnung	Datentyp	Beispiel
1	Datum	<i>date</i>	2021-10-15
2	Startzeit	<i>date</i>	06:45:00
3	Endzeit	<i>date</i>	23:15:00
4	Dauer	<i>time</i>	16:30:00

Tabelle A.45: Beispielhafte Tabelle für die Bedarfsweitergabe innerhalb einer Produktionsstufen - Tabellenblatt für einen Bedarfskonsolidierung-Baustein.

Variante	Linie	Werk	2021-10-15	2021-10-16	2021-10-17	...
KW98	K1	W1	0,75	0,80	0,80	...
KW98	K4	W2	0,25	0,20	0,20	...
KW98	K1	W1	1,00	1,00	1,00	...
KW98	K2	W1	0,60	0,60	0,60	...
KW98	K5	W3	0,40	0,40	0,40	...

A.4 Betreute Studienarbeiten

Im Zeitraum zwischen 2017 und 2021 betreute der Autor 20 Studierende am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München. Die Diskussion und ausgewählte Teile der Ergebnisse leisteten einen Beitrag zu dieser Arbeit.

Tabelle A.46: Auflistung der betreuten Studienarbeiten.

Name	Titel	Jahr
Kiener, Manuel	Taktische Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Strategiephase	2017
Nentwich, Corbinian	Entwicklung eines Assistenzsystems zur effizienten Validierung von Produktionsnetzwerksimulationen	2018
Neu, Ruben	Datenmanagement für die Konfiguration von globalen Produktionsnetzwerken	2018
Berger, Daniel	Konzeptionierung eines automatisierten Input-Daten-Managements für ereignisdiskrete Simulationen	2018
Burger, Florian	Prognose einer arbeitsplatzbezogenen Sequenz in der Variantenfließfertigung eines Automobilherstellers	2018
Bitsch, Daniel	Studie zum Datenmanagement und –Bedarf in der Konfiguration von globalen Produktionsnetzwerken	2018
Fischer, Bill	Simulation von globalen Produktionsnetzwerken	2019
Kreiling, Martin	Digitaler Zwilling in globalen Produktionsnetzwerken	2019
Pischinger, Johannes	Automatic Parametrisation of Manufacturing Network Simulations	2019
Bitsch, Daniel	Transparenz in globalen Produktionsnetzwerken mittels des digitalen Schattens	2019
Hillebrand, Simon	Entwicklung von Bausteinen für die Simulation komplexer Produktionsnetzwerke	2019
Llorens Garduño, Hector	Integrated Production-Distribution Planning on the Tactical Level in Production Networks	2019
Stulgies, Malte	Entwicklung einer Ontologie für globale Produktionsnetzwerke	2019
Schlegl, Stefan	A method for evaluating the suitability of multivariate time series data for classification and anomaly detection	2019
Wünnenberg, Maximilian	Analyse von Produktionsnetzwerken mit Methoden des Process Mining	2020
Carrillo de Albornoz	Development of modules for the simulation of manufacturing networks	2020
Loriente, Pablo	Analyse der Anforderungen an einen Digitalen Zwilling in der Auftragsabwicklung	2020
Wagner, Sarah	Automatisierte Modellerstellung und Parametrierung für Produktionsnetzwerk-Simulationen	2020
Hillebrand, Simon	Wissen in Mehrwert wandeln: Ontologiegestützte Simulationen für die Fertigung und Lieferkette der Halbleiterindustrie	2021

Tabelle A.46: Auflistung der betreuten Studienarbeiten. (Fortsetzung)

Name	Titel	Jahr
Schneider, Robin	Prädiktive dynamische Engpassanalyse von Intralogistikprozessen für variantenreiche Montagesysteme	2021

A.5 Publikationsliste

- HORSTHOFER-RAUCH, J., SCHUMANN, M., MILDE, M., VERNIM, S. und REINHART, G. (2022). “Digitalized value stream mapping: review and outlook”. In: *Procedia CIRP* 112, S. 244–249.
- JURASKY, W., MODER, P., MILDE, M., EHM, H. und REINHART, G. (2021). “Transformation of semantic knowledge into simulation-based decision support”. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 71, S. 102174.
- MILDE, M., HORSTHOFER-RAUCH, J., KROEGER, S. und REINHART, G. (2023). “Enabling Process Mining In Global Production Networks”. In: *Procedia CIRP* 120, S. 451–456.
- MILDE, M. und REINHART, G. (2019). “Automated Model Development And Parametrization of Material Flow Simulations”. In: *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference*, S. 2166–2177.
- (2021). “Automated Model Development for the Simulation of Global Production Networks”. In: *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021)*, S. 467–474.
- MILDE, M., SIPPL, F. und REINHART, G. (2021). “Simulation of order processing in global production networks”. In: *Procedia CIRP* 104, S. 8–13.
- PISCHINGER, J., MILDE, M., HOFER, A., KROEGER, S. und ZAEH, M. F. (2023). “Remanufacturing Process Optimization-Introducing Dynamic New Part Infill to Increase the Utilization Rate of Remanufactured Components for Multi-Variant Cores”. In: *Procedia CIRP* 120, S. 356–361.
- WAGNER, S., MILDE, M., BARHEBWA-MUSHAMUKA, F. und REINHART, G. (2021). “Digital Twin Design in Production”. In: *Towards Sustainable Customization: Bridging Smart Products and Manufacturing Systems: Proceedings of the 8th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference (CARV2021) and the 10th World Mass Customization & Personalization Conference (MCPC2021)*, S. 339–346.
- WAGNER, S. B., MILDE, M. und REINHART, G. (2021). “The digital twin in order processing”. In: *Procedia CIRP* 104, S. 863–868.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Allgemeine Herausforderungen und verstärkende Charakteristika von GPN.	4
1.2	Adaption der Design Reseach Methodology.	7
1.3	Schematische Darstellung des Motoren-Produktionsprozesses bei der Auto AG.	9
1.4	Aufbau der Arbeit.	11
2.1	Funktionsbereiche der Auftragsabwicklung und ihre Wechselwirkungen.	15
2.2	Zusammenspiel von Planung und Steuerung, Informationsfluss und Materialfluss.	17
2.3	Auftragsabwicklung in Produktionsnetzwerken.	19
2.4	Vorgehensmodell in Simulationsprojekten (in Anlehnung an VER-EIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. (2014)).	22
3.1	Architektur des Generic Data Management Tools (SKOOGH, JOHANSSON und STAHR 2012).	35
4.1	Zusammenhang zwischen realem System, Simulation und AutoGPN.	62
4.2	AutoGPN kombiniert spezielle Daten aus der Auftragsabwicklung mit produktionstechnischem Wissen, um ein ausführbares Simulationsmodell des realen Systems zu erzeugen.	62
4.3	Entstehung und beispielhafte Darstellung von Tracking- und Tracing-Daten.	63
4.4	Detaillierte Darstellung von AutoGPN mit Prozessschritten und Modellkomponenten.	64
4.5	Zusammenhang von Forschungsmodulen und Modellkomponenten sowie Prozessschritten von AutoGPN.	65

4.6	Detaillierung des Prozessschritts Datenidentifikation und -aufbereitung.	67
4.7	Beispielhafte Darstellung eines Produktionsprozesses mit resultierendem Eventlog.	68
4.8	Automatisierter Prozess zur Parametrierung basierend auf den allgemeinen Simulationsbauteilen (A), dem datenbasierten Abbild (B) und allgemeinen Simulationsdaten (C).	71
4.9	Detaillierter Überblick über den Ansatz AutoGPN	73
5.1	Forschungsmodul mit zugehörigen Teilziel und Forschungsfrage	76
5.2	Vorgehen bei der Entwicklung der Ontologie (in Anlehnung an NOY und MCGUINESS (2001)).	77
5.3	Aufbau von OntoGPN.	81
5.4	Allgemeine Darstellung von Prozessen mit korrespondierenden FLO-Klassen in OntoGPN.	82
5.5	Exemplarische Instanziierung eines einfachen Materialflusses in OntoGPN.	82
5.6	Klassenhierarchie der FLO.	83
5.7	Modellierung von Prozessen auf verschiedenen Ebenen: FLO-Klassen mit Beziehungen und exemplarischen Instanzen.	84
5.8	Detaillierung des Materialflusses mit Relationen und Bezug zu Klassen des Informationsflusses.	85
5.9	Klassen des rückmeldenden und begleitenden Informationsflusses.	87
5.10	Zusammenhang zwischen Materialfluss und Informationsfluss. .	87
5.11	Prozessuale Darstellung der PPS-Aufgaben mit Ein- und Ausgangsinformationen.	89
5.12	Ontologieklassen der PPS mit Relationen.	89
5.13	Forschungsmodul mit zugehörigem Teilziel und Forschungsfrage	90
5.14	Aufgliederung des Kapitels zur Beschreibung der Entwicklung des Prozessschritts Datenidentifikation und -aufbereitung.	91
5.15	Beispielhafte Darstellung der variierenden Zuordnung zur übergeordneten Prozessinstanz über den Produktionsfortschritt.	92
5.16	Prozessdatenmodell mit einzelnen Tabellen, Attributen und Relationen.	93
5.17	Schritte der Methode zur Datenidentifikation mit den jeweiligen Ergebnissen der einzelnen Schritte.	96
5.18	Übersicht über die Eingangsdatentabellen.	98

5.19 Datenflussdiagramm für die Datenverarbeitung von den standardisierten Eingangsdatentabellen bis zum datenbasierten Abbild.	102
5.20 Exemplarische Darstellung für die datentechnische Änderung der Prozessinstanz bei Teilverbau.	104
5.21 Forschungsmodul mit zugehörigen Teilziel und Forschungsfrage	106
5.22 Schematische Darstellung der Auftragsabwicklung pro Produktionsstufe.	108
5.23 UML-Diagramm der Simulationsbausteine.	109
5.24 Beispielhafte Verwendung der Bausteine zur Abbildung eines GPN mit eingezeichneten Schnittstellen zwischen den Bausteinen. . .	110
5.25 Forschungsmodul mit zugehörigem Teilziel und Forschungsfrage	113
5.26 Prozessualer Ablauf der automatisierten Modellbildung und Parametrierung mit exemplarischer Darstellung der identifizierten Simulationsmodellbestandteile.	114
5.27 Beispielhafte Darstellung eines Simulationsmodells mit resultierender Baumstruktur und Pfaden.	115
5.28 Vorgehen der Strukturidentifikation für (1) Werke, (2) Produktionsstufen und Sekundärbedarfe sowie (3) Produktionslinien. . .	116
5.29 Beispielhafte Darstellung von Bestellungen bei internen Lieferanten und der Bedarfswertübergabe zwischen Werken.	119
5.30 Beispielhafte Darstellung der Rekonstruktion von Verbaubeziehungen zwischen Produktionslinien nach Bauteilvarianten.	120
5.31 Beispielhafte Darstellung zur Identifikation der Lieferanten pro Bauteilvariante in der Bedarfswertübergabe.	121
5.32 Identifikation von Schichtzeiten.	123
5.33 Real auftretende Schwankungen bei Zeitpunkten zum Schichtstart.	124
5.34 Bestimmung von Durchlaufzeiten und deren Bereinigung um Schichtzeiten.	127
5.35 Ein- und Auslagerungsaktivitäten in Bezug auf den Erfassungszeitraum und deren Relevanz für die Bestimmung des initialen Bestands.	128
5.36 Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Quotierung der Bedarfsaufteilung im Werk W1 zu einem definierten Datum.	129
6.1 Darstellung des betrachteten GPN der Motorenproduktion der Auto AG.	132

6.2	Vergleich der Lagerliegezeiten von Zylinderköpfen zwischen realem System und dem Mittelwert über fünf Simulationsläufe. Die dargestellten Fehlerbalken repräsentieren die Standardabweichung der Simulationsdaten.	136
A.1	Rückterminierung von Bedarfs- und Produktionsterminen.	196

Tabellenverzeichnis

3.1	Evaluation von ausgewählten Publikationen zu strukturbasierten und wissensbasierten Ansätzen sowie zu Extraktionswerkzeugen.	53
3.2	Evaluation von ausgewählten Publikationen der datenbasierten Ansätze und der Modellgenerierung.	54
5.1	Suchstrategie für die strukturierte Literaturrecherche.	78
5.2	Eingangsdatentabelle PARTS.	98
5.3	Eingangsdatentabelle INSTALLATION.	99
5.4	Eingangsdatentabelle EVENTS.	99
5.5	Eingangsdatentabelle ACTIVITY_DEFINITION.	100
5.6	Eingangsdatentabelle GENERAL_BOM	101
6.1	Konventioneller Aufwand in den Phasen Datenidentifikation, -aufbereitung und Parametrierung in Personentagen.	144
6.2	Konventioneller Aufwand in den Phasen Systemanalyse und Modellbildung in Personentagen.	145
6.3	Konventioneller Aufwand und Einsparungspotenziale in einem mittleren bis großen Anwendungsfall in Personentagen.	145
A.1	Bewertung Ontologien mit Fokus auf Logistik.	165
A.2	Bewertung der übergreifenden Ontologien.	166
A.3	Bewertung Ontologien mit Fokus auf Produktion.	167
A.4	Bewertung Ontologien mit Fokus auf den Informationsfluss.	167
A.5	Bewertung Ontologien mit Fokus auf den Planung und Steuerung.	168
A.6	Bewertung Ontologien mit Fokus auf die Auftragsabwicklung.	169
A.7	Bewertung Ontologien mit Fokus auf GPN.	169
A.8	Liste relevanter Begriffe	170

A.8	Liste relevanter Begriffe (Fortsetzung)	171
A.8	Liste relevanter Begriffe (Fortsetzung)	172
A.9	Liste aller Relationen	173
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	174
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	175
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	176
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	177
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	178
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	179
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	180
A.9	Liste aller Relationen (Fortsetzung)	181
A.10	Eigenschaften des GPN-Bausteins	182
A.11	Eigenschaften des Simulationsergebnisse-Bausteins	183
A.12	Eigenschaften des Kunden-Bausteins	184
A.13	Eigenschaften des Kunde-Bausteins	184
A.14	Eigenschaften des Zulieferwerk-Bausteins	185
A.15	Eigenschaften des Werk-Bausteins	186
A.16	Eigenschaften des Produktionsdatenbank-Bausteins	186
A.17	Eigenschaften des Produktionsstufe-Bausteins	187
A.18	Eigenschaften des Bedarfskonsolidierung-Bausteins	188
A.19	Eigenschaften des Bedarf-Bausteins	188
A.20	Eigenschaften des Produktionslinie-Bausteins	189
A.21	Eigenschaften des Planung-Bausteins	189
A.22	Eigenschaften des Programmplanung-Bausteins	190
A.23	Eigenschaften des Steuerung-Bausteins	191
A.24	Eigenschaften des Produktion-Bausteins	192
A.25	Eigenschaften des Sekundärbedarf-Bausteins	193
A.26	Eigenschaften des Lager-Bausteins	194
A.27	Eigenschaften des Transport-Bausteins	195
A.28	Tabelle für allgemeine Informationen zum Simulationsmodell.	197
A.29	Ausgabeformat der Struktur-Identifikation.	199
A.30	Ausgabeformat für identifizierte Bausteinbeziehungen.	200

A.31 Sekundärbedarf: Ausgabe der Beziehung von Bauteilvariante zu Lieferant.	200
A.32 Bedarfskonsolidierung: Ausgabeder Beziehung von Bauteilvariante zu Lieferant	200
A.33 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Befähigung.	201
A.34 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Befähigung.	201
A.35 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Schichtkalender.	202
A.36 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Durchlaufzeiten Histogramm.	202
A.37 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Ausbringung.	202
A.38 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Stückliste.	202
A.39 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte einer Produktionslinie - Tabellenblatt Plan-Durchlaufzeiten.	203
A.40 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte eines Lagers - Tabellenblatt Befähigung.	203
A.41 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte eines Lagers - Tabellenblatt initialer Bestand.	203
A.42 Beispielhafte Transportzeitmatrix im Baustein Transport.	203
A.43 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte der Transport-Bausteine - Tabellenblatt Lieferkapazität.	204
A.44 Tabelle für Ausgabe der Parameterwerte der Transport-Baustein - Tabellenblatt Schichtkalender für einen Baustein.	204
A.45 Beispielhafte Tabelle für die Bedarfsweitergabe innerhalb einer Produktionsstufen - Tabellenblatt für einen Bedarfskonsolidierung-Baustein.	204
A.46 Auflistung der betreuten Studienarbeiten.	205
A.46 Auflistung der betreuten Studienarbeiten. (Fortsetzung)	206