

Universität Kassel

Fachgebiet Produktionsorganisation und Fabrikplanung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel

Bachelorarbeit

Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings einer
LEGO®-Lernfabrik auf Basis eines ereignisdiskreten
Simulationsmodells in Tecnomatix Plant Simulation

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

Vorgelegt von: Daniel Daude
Geburtsort: Fritzlar
Matrikelnummer: 33319506

Fachbereich: Wirtschaftswissenschaften
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen
Fachrichtung: Maschinenbau

Bei: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sigrid Wenzel
Jana Stolipin, M.Sc.

Kassel, 13.02.2019

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungen.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	4
1.3 Aufbau der Arbeit.....	5
2 Grundlagen.....	8
2.1 Simulation.....	8
2.1.1 Begriffsdefinitionen und Klassifizierungen.....	9
2.1.2 Ereignisdiskrete Simulation.....	14
2.1.3 Werkzeuge zur ereignisdiskreten Simulation.....	16
2.1.4 Überblick zu Tecnomatix Plant Simulation.....	19
2.1.5 Simulationsvorgehensmodell.....	24
2.2 Industrie 4.0.....	30
2.2.1 Historische Entwicklung.....	31
2.2.2 Definition.....	34
2.2.3 Bestandteile und Paradigmen.....	36
2.2.4 Treiber.....	42
2.2.5 Potenziale.....	44
2.2.6 Zusammenfassende Darstellung.....	45
2.3 Der Digitale Zwilling.....	48
2.3.1 Das Konzept der Zwillinge.....	48
2.3.2 Definitionen, Prinzip und Sichtweisen.....	52
2.3.3 Weitere Begrifflichkeiten im Kontext des Digitalen Zwillings.....	57
2.3.4 Nutzen und Potenziale.....	59
2.3.5 Herausforderungen.....	62
2.3.6 Zusammenfassende Darstellung.....	63
3 Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation.....	66
3.1 Anforderungen an die ereignisdiskrete Simulation durch Industrie 4.0 und den Digitalen Zwilling.....	67

3.2	Konkrete Anforderungen bei Erstellung eines als Digitaler Zwilling zu nutenden Simulationsmodells	73
3.3	Konzeptentwicklung	82
4	Konzeptanwendung an der LEGO®-Fabrik.....	88
4.1	Beschreibung der LEGO®-Fabrik	88
4.1.1	Die Hardware	88
4.1.2	Szenario, Aufbau und Abläufe der LEGO®-Fabrik	91
4.1.3	Steuerung der LEGO®-Fabrik.....	94
4.2	Konzeptanwendung	97
4.2.1	Zielbeschreibung.....	98
4.2.2	Aufgabendefinition und -spezifikation	103
4.2.3	Systemanalyse und Konzeptmodell.....	110
4.2.4	Datenbeschaffung und Rohdaten.....	124
4.2.5	Datenaufbereitung und aufbereitete Daten.....	127
4.2.6	Modellformalisierung und formales Modell	131
4.2.7	Implementierung	143
4.2.8	Als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell.....	146
4.2.9	Verifikation und Validierung.....	151
4.3	Weitere Schritte in Bezug auf das erstellte Modell	159
4.4	Zusammenfassung der Konzeptanwendung	160
5	Kritische Würdigung	163
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	167
7	Anhang I – Dokumentenstrukturen	7-1
8	Anhang II – Datentypen.....	8-1
9	Anhang III – Daten	9-1
10	Anhang IV – Dateien	10-1
11	Anhang V – Programmcodes und Methoden.....	11-1
12	Anhang VI – Abbildungen aus dem erstellten Modell	12-1
	Literatur	L
	Eidesstattliche Erklärung	E

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Ziele der Arbeit	4
Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit.....	6
Abbildung 2.1: Vergleich von Zuständen, Ereignissen und Zustandswechseln.....	15
Abbildung 2.2: Klassifizierung von Simulationswerkzeugen für Produktion und Logistik.	18
Abbildung 2.3: Bedienoberfläche von Plant Simulation	20
Abbildung 2.4: Socket in Plant Simulation	23
Abbildung 2.5: Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al.	25
Abbildung 2.6: Der Industrialisierungsprozess.....	33
Abbildung 2.7: Auflösung der Automatisierungspyramide	41
Abbildung 2.8: Eigenschaften von Produktions- und Logistiksystemen in Industrie 4.0 ..	46
Abbildung 2.9: Hype Cycle for Emerging Technologies 2018	51
Abbildung 2.10: Das Konzept des Digitalen Zwillinges - Merkmale und Anforderungen ...	65
Abbildung 3.1: Handlungsfelder für die ereignisdiskrete Simulation	69
Abbildung 3.2: Generelle Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling zu nutzendes ereignisdiskretes Simulationsmodell im Kontext von Industrie 4.0.....	72
Abbildung 3.3: Konkrete Anforderungen und Zusammenhänge	81
Abbildung 3.4: Konzept zur Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells.....	87
Abbildung 4.1: Verwendete LEGO® MINDSTORMS® EV3 Sets	89
Abbildung 4.2: EV3-Stein, Sensoren und Motoren	89
Abbildung 4.3: Verschiedenfarbige Holzkugeln zur Darstellung der Golfbälle	90
Abbildung 4.4: LEGO®-Modellfabrik am pfp.....	91
Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau und Materialfluss der LEGO®-Modellfabrik	92
Abbildung 4.6: Anlegen eines Objekts vom Typ RemoteEV3 und der zugehörigen Aktoren	96
Abbildung 4.7: Methode "startCleaner" der Klasse "Cleaning"	96
Abbildung 4.8: Systemstruktur der LEGO®-Fabrik.....	111
Abbildung 4.9: Baustein Lager	112
Abbildung 4.10: Baustein Einzelstation	113
Abbildung 4.11: Baustein Förderstrecke	113
Abbildung 4.12: Baustein Drehtisch	114
Abbildung 4.13: Baustein Bearbeitungsstation	114
Abbildung 4.14: Baustein Sammelbecken / Puffer.....	115
Abbildung 4.15: Baustein Kommissionierroboter	115

Abbildung 4.16: Baustein Bandabweiser	116
Abbildung 4.17: BE Container	117
Abbildung 4.18: BE Golfball	117
Abbildung 4.19: BE Verkaufsbehälter.....	118
Abbildung 4.20: Auswertung DataFit	130
Abbildung 4.21: Ausschnitt Arbeitsblatt "Daten_FS" des Informationssystems.....	132
Abbildung 4.22: Elemente der modellierten EPK.....	135
Abbildung 4.23: Formalisierung Prozess 1 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)	136
Abbildung 4.24: Prozessformalisierung Prozess 2.1 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)	139
Abbildung 4.25: Prozessformalisierung Prozess 2.2 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)	139
Abbildung 4.26: Implementiertes als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell.....	147
Abbildung 4.27: Teilsystem Qualitätskontrolle 1	148
Abbildung 4.28: Erfolgreiche Übermittlung der Akkustände.....	153
Abbildung 4.29: Aufzeichnung der empfangenen Nachrichten aus dem Test (Ausschnitt)	154
Abbildung 6.1: Zusammenfassende Darstellung der Zusammenhänge.....	168
Abbildung 8.1: Elementare Datentypen in SimTalk.....	8-1
Abbildung 9.1: Exemplarische Darstellung Rohdaten in Excel (Ausschnitt)	9-1
Abbildung 9.2: Berechnung der Schätzer für Mittelwert und Standardabweichung in Excel	9-4
Abbildung 11.1: Ausschnitt des Programcodes zum Senden einer Nachricht aus der Fabriksteuerung.....	11-1
Abbildung 11.2: Programmcode der Methode Datenimport_aus_Informationssystem	11-2
Abbildung 11.3: Programmcode der Methode Datenexport_Excel	11-2
Abbildung 11.4: Ausschnitt des Programmcodes der Methode Parameterzuweisung	11-2
Abbildung 11.5: Programmcode der Methode Datenexport_Excel	11-2
Abbildung 11.6: Ausschnitt des Programmcodes der Nachrichteninterpretation.....	11-3
Abbildung 12.1: Einträge im Baustein Socket im erstellten Modell	12-1
Abbildung 12.2: Parametrisierungsmöglichkeiten der Quelle	12-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Treiber für Industrie 4.0 - Überblick.....	44
Tabelle 4.1: Zielbeschreibung (Zusammenfassung)	102
Tabelle 4.2: Notwendige Daten, Datenverwendung & -quellen.....	105
Tabelle 4.3: Schritte und Meilensteine im weiteren Vorgehen	107
Tabelle 4.4: Aufgabenspezifikation (Zusammenfassung)	108
Tabelle 4.5: Datentabelle Eingabedaten.....	122
Tabelle 4.6: Datentabelle Ausgabedaten.....	123
Tabelle 4.7: Bausteine, die zur Implementierung ohne Anpassung genutzt werden	143
Tabelle 9.1: Nachrichten von der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell	9-2

Abkürzungen

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
ASIM	Arbeitsgemeinschaft Simulation
BEs	Bewegliche Elemente
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
bspw.	bspw.
bzgl.	bezüglich
CPS	Cyber-physische Systeme
CPPS	Cyber-physisches Produktionssystem
DES	Discrete Event Simulation (ereignisdiskrete Simulation)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLZ	Durchlaufzeit
ebd.	ebenda
EPK	Ereignisgesteuerte Prozesskette
FIFO	First In – First Out (was zuerst eingelagert wurde, wird zuerst ausgelagert)
ggf.	gegebenenfalls
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
IoT	Internet of Things / Internet der Dinge
IoS	Internet of Services / Internet der Dienste
IP	Internet Protocol
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KR	Kommissionierroboter
LKW	Lastkraftwagen
NASA	National Aeronautics and Space Administration
pfp	Fachgebiet für Produktionsorganisation und Fabrikplanung (Universität Kassel)

PLM	Product Lifecycle Management
QK	Qualitätskontrolle
RFID	Radio Frequency Identification
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TCP	Transmission Control Protocol
u. a.	unter anderem
USAF	United States Air Force
V&V	Verifikation und Validierung
VB	Verkaufsbehälter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
WGP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e. V.

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein ereignisdiskretes Simulationsmodell der am Fachgebiet für Produktionsorganisation und Fabrikplanung (pfp) der Universität Kassel aufgebauten LEGO®-Modellfabrik erstellt und die Forschungsfrage beantwortet, ob ein ablauffähiges Simulationsmodell zu einem Digitalen Zwilling im Kontext der Industrie 4.0 befähigt werden kann und welche zusätzlichen Eigenschaften eines Simulationsmodells dafür notwendig sind. Die Machbarkeit wird exemplarisch anhand eines Beispiels innerhalb des erstellten Simulationsmodells diskutiert.

In diesem Kapitel wird zunächst ein Einblick in die Themengebiete der Simulation und der Industrie 4.0 mit dem Handlungsfeld des Digitalen Zwillings gegeben sowie dargelegt, aus welchen Gründen diese Themen relevant für die aktuellen und zukünftigen Entwicklungen sind. Daraufhin wird aufgezeigt, welche Ziele mit dieser Arbeit angestrebt werden und wie zur Zielerreichung vorgegangen wird.

1.1 Motivation und Problemstellung

Die aktuellen Entwicklungen in der Wirtschaft stellen Unternehmen immer wieder vor neue Herausforderungen. Diese gilt es zu bewältigen, um im nationalen und internationalen Kontext wettbewerbsfähig zu bleiben, sich behaupten oder gar bestehen zu können. Die wesentlichen dieser Herausforderungen lassen sich insbesondere durch die Punkte Komplexitätssteigerung, höhere Anforderungen bezüglich Qualität und Flexibilität, kürzere Produktlebenszyklen, zunehmende Produktindividualisierung und Variantenvielfalt bei gleichzeitig steigendem Kostendruck zusammenfassen (vgl. Bracht et al. 2018, S. 1; Obermaier 2017b, S. 11; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 5).

Der Käufermarkt verlangt nach möglichst einzigartigen, auf die Bedürfnisse des individuellen Konsumenten angepasste Produkte bei gleichzeitig steigender Qualität (vgl. Bracht et al. 2018, S. 1), was in einer immensen Zunahme der Variantenvielfalt, unter Umständen bis hin zum Extremfall der „Losgröße 1“, also „einer Losgröße von einem einzelnen Kundenauftrag“ (März und Weigert 2011, S. 3), mündet (vgl. Obermaier 2017b, S. 11). Schlick et al. (2014, S. 77) bezeichnen diese Entwicklungen als „Megatrends“. Gleichzeitig darf das Produkt aber nicht mehr kosten als das Massenprodukt aus der Fertigung in Großserie (Dais 2017, S. 267). Durch die Globalisierung, Digitalisierung und Vernetzung über die gesamte Welt steigen der Wettbewerbs- und Kostendruck stetig an, die Komplexität nimmt zu, Märkte werden dynamischer und unbeständiger, Produktlebenszyklen kürzer.

Durch schneller veraltende Produkte und Technologien wächst auch der Innovationsdruck in Unternehmen (vgl. Bracht et al. 2018, S. 1; Dais 2017, S. 267; Soder 2014, S. 85).

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, sind Unternehmen in einem noch nie dagewesenen Ausmaß gezwungen, insbesondere bei der Planung aber auch während des laufenden Betriebs von Produktionssystemen, kontinuierlich rechnergestützte Werkzeuge und Methoden einzusetzen (vgl. Bracht et al. 2018). Um eine hohe Effizienz der Planung zu erreichen, ist es erforderlich, das dynamische Verhalten des zu untersuchenden Systems bereits vor der Realisierung zu analysieren. Aber auch nach der Realisierung gilt es, die richtigen Entscheidungen zur Anpassung, Verbesserung und Erweiterung der Systeme zu treffen und Lösungsalternativen vor dem physischen Eingriff in den laufenden Betrieb bewerten zu können (vgl. März et al. 2011, S. 4). Da die zuvor beschriebenen Entwicklungen zu „komplexeren technischen Systemen und intelligenten Strategien zur Erfüllung dieser Anforderungen führen“ (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 5) und analytische Verfahren zur Bewertung solcher Produktionssysteme nicht ausreichen werden, hat sich die Simulation als eine Methode zur Planung, Analyse und Bewertung komplexer Produktions- und Logistikprozesse bewährt (März et al. 2011, S. 10; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 5). Mit ihr kann ein System mit dessen dynamischen Prozessen modelliert und nachempfunden werden. Mit Hilfe von Experimenten innerhalb dieses Modells wird eine bessere Nachvollziehbarkeit und Bewertung des realen Systems erreicht (vgl. VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 28). Förderlich sind zudem die verbesserten Voraussetzungen durch leistungsstärkere Hard- und Software, die zu erweiterten Einsatzmöglichkeiten von Simulationswerkzeugen führen (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 4 f.).

Darüber hinaus schaffen die voranschreitenden technischen Möglichkeiten, insbesondere in den Bereichen „Sensorik, Aktorik, Eingebettete Systeme, Internet- und Kommunikationstechnologie, Software und Systemtechnik sowie Mensch-Maschine-Schnittstellen“ (Obermaier 2017a, VIII) und die Potenziale bei deren Kombination und Nutzung in der industriellen Produktion die Grundlage für eine seit einigen Jahren weitgehend als „revolutionär“ bezeichnete Entwicklung, von der sich, gerade auch mit Blick auf die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen, viel versprochen wird: Am 25. Januar 2011 wurde das „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ von der Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft-Wissenschaft der Bundesregierung vorgeschlagen und kurze Zeit später verabschiedet. Hiermit gilt es, den Standort Deutschland im internationalen Wettbewerb zu stärken. Nach den ersten drei Industriellen Revolutionen soll Industrie 4.0 nun die vierte industrielle Revolution darstellen, in der Deutschland das Potenzial einer Vorreiterrolle habe (vgl. Kagermann et al., 2011; Kaufmann 2015, S. 4). Erstmals wird eine industrielle Revolution im Vorhinein vorausgesagt, deren Einfluss auf die Wirtschaft zudem

als sehr wesentlich prognostiziert wird. Dies impliziert die Möglichkeit zur Mitgestaltung (vgl. Hermann et al. 2016, S. 3928). Durch die Nutzung der technologischen Innovationen der letzten Jahre, des Internets der Dinge und cyber-physischer Systeme (CPS) im industriellen Umfeld wird mit Industrie 4.0 eine Echtzeitvernetzung der an der Produktion beteiligten Akteure, also Maschinen, Menschen, Produkte und auch Unternehmen, angestrebt, wodurch neue Potenziale für Effizienz und Wirtschaftlichkeit entstehen (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 6 f.; Obermaier 2017b, S. 8). Genannte Herausforderungen wie die zunehmende Produktindividualisierung, verkürzte Produktlebenszyklen, höhere Qualitätsanforderungen und Kostendruck können durch die Erreichung eines hohen Grades an Flexibilität, Wandlungsfähigkeit und Effizienz aller Unternehmensprozesse bewältigbar werden (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 7 f.).

Die Vernetzung der realen mit der digitalen Welt im Rahmen von Industrie 4.0 wird die Industrie zukünftig weiterhin stark beeinflussen. Demnach ist es unumgänglich, sich mit den Thematiken und Handlungsfeldern von Industrie 4.0 auseinanderzusetzen, um wirtschaftliche Lösungen für die derzeitigen und zukünftigen Herausforderungen zu finden. Von besonderem Interesse für diese Arbeit ist ein Handlungsfeld von Industrie 4.0, das Realität und Virtualität noch intensiver zusammen bringen soll: der sogenannte „Digitale Zwilling“ (vgl. Huber, D. und Kaiser 2017, S. 19). Als virtuelles Abbild eines Objektes¹ der realen Welt mit allen verfügbaren Betriebsdaten beinhaltet der *Digitale Zwilling* alle Informationen, die bezüglich der Lebenszyklusphasen nützlich sein könnten (vgl. Boschert et al. 2018, S. 209). So liefert er „ein möglichst identisches Abbild der Realität“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23) und ermöglicht relevante Informationen über den aktuellen Zustand des realen Objektes (vgl. Huber, D. und Kaiser 2017, S. 20). Durch die Vernetzung mit seinem realen Pendant auf Basis der Industrie 4.0-Technologien werden auf der Grundlage von Echtzeitdaten durch Simulation wichtige Erkenntnisse für die Produktion gewonnen. Der eingangs beschriebene Nutzen, der durch die Anwendung von Simulation entsteht, wird demnach ebenfalls als wichtiger Part innerhalb des Digitalen Zwillings, also auch in Industrie 4.0, gesehen (vgl. Kuhn, T. 2017; vgl. auch Bauernhansl et al. 2016, S. 23).

Da die Simulation bereits seit mehreren Jahren zur Planung und Erkenntnisgewinnung von Produktions- und Logistiksystemen genutzt wird und demnach in vielen Betrieben bereits Simulationsmodelle vorhanden sind, stellt sich die Frage, *wie diese Simulationsmodelle auch als Bestandteil des Digitalen Zwillings im Kontext der Industrie 4.0 eingesetzt werden können und welche zusätzlichen Eigenschaften diese Modelle hierfür mitbringen müssen.*

Im Rahmen der Arbeit wird dieser Forschungsfrage nachgegangen, wobei zunächst ein Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation

¹ Ein Objekt kann eine einzelne Komponente, ein Produkt oder ein ganzes System repräsentieren

erarbeitet und daraufhin an der LEGO®-Lernfabrik des pfp angewandt wird. Hierbei wird untersucht, inwiefern wichtige Eigenschaften des Digitalen Zwillings bei der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells der Fabrik berücksichtigt werden können, so dass dieses schließlich als solcher genutzt werden kann. Diese LEGO®-Lernfabrik berücksichtigt als ein Modell einer realen Fabrik die Modularität und Wandlungsfähigkeit der Produktionsprozesse und bildet die Abläufe einer Golfballaufbereitungsanlage ab (vgl. Chada et al. 2017). Auf der Grundlage des erstellten digitalen Modells der LEGO®-Lernfabrik wird der Einsatz der ereignisdiskreten Simulation als Bestandteil des Digitalen Zwillings diskutiert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das Primärziel der Arbeit, *ein Konzept zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings im Kontext der Industrie 4.0 zu erarbeiten und dessen Machbarkeit auf Basis der LEGO®-Modellfabrik des pfp zu beurteilen* (s. Primärziel in *Abbildung 1.1*), impliziert mehrere Unterziele. Diese Ziele sind in *Abbildung 1.1* visuell dargestellt und werden im Folgenden kurz beschrieben. Die Pfeile zeigen die Beziehungen zwischen den einzelnen Teilzielen und ihre Hierarchie auf.

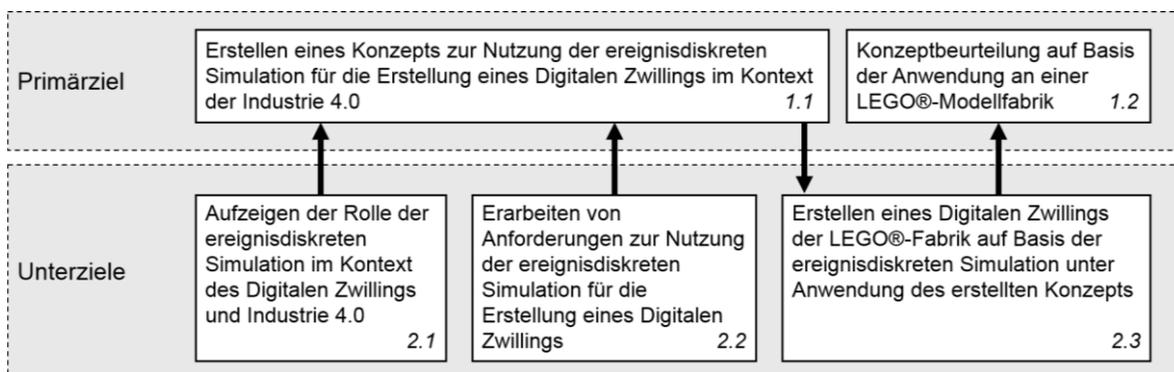


Abbildung 1.1: Ziele der Arbeit

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf Basis der erarbeiteten Grundlagen zunächst die Rolle der ereignisdiskreten Simulation als ein Bestandteil des Digitalen Zwillings und der Industrie 4.0 aufgezeigt (*Unterziel 2.1*) und herausgestellt, welche zusätzlichen Anforderungen und Eigenschaften notwendig sind, um die ereignisdiskrete Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings nutzen zu können (*Unterziel 2.2*). Aufgrund dessen wird unter Erweiterung des Simulationsvorgehensmodells nach Rabe et al. (2008) um diese Anforderungen ein Konzept zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings im Kontext der Industrie 4.0 erstellt (*Primärziel 1.1*). Dieses Konzept wird an der LEGO®-Fabrik des pfp der Universität Kassel angewendet (*Unterziel 2.3*), um daraufhin die Machbarkeit beurteilen zu können (*Primärziel 1.2*).

Da sich die Nutzung von Simulation bereits seit mehreren Jahren zur Planung, Analyse und Verbesserung komplexer Abläufe etabliert hat und daher bereits in zahlreichen Unternehmen Simulationsmodelle vorliegen, kann es nicht nur für das Fachgebiet pfp, sondern auch für die Industrie von Interesse sein, ein solches Konzept und die Diskussion der Umsetzungsmöglichkeiten für weitere Schritte in Richtung der Industrie 4.0 mit einzubeziehen. Ein virtuelles Abbild eines realen Objekts oder Systems mit allen relevanten Betriebsdaten, also einen Digitalen Zwilling, unter der Verwendung der ereignisdiskreten Simulation erstellen zu können, bietet im Rahmen der Planungs- und Analysemöglichkeiten viele Vorteile, die sich Unternehmen zu Nutze machen können. Planung und Analyse aufgrund realer Daten, virtuelle Inbetriebnahme und prädiktive Wartung sind beispielhafte Möglichkeiten hierfür. Somit wird mit dieser Arbeit ein Einblick gegeben, in welchen Bereichen Nutzungsmöglichkeiten der Simulation und vorhandener Simulationsmodelle in Industrie 4.0, insbesondere für den Digitalen Zwilling, liegen. Das Aufzeigen dieser Möglichkeiten soll interessierte Leser sowohl informieren als auch motivieren, sich mit der Thematik des Digitalen Zwillings in Verbindung mit der ereignisdiskreten Simulation auseinander zu setzen. Diese Arbeit soll damit einen Beitrag zur Etablierung der ereignisdiskreten Simulation als wichtiges Werkzeug im Kontext der Industrie 4.0 und des Digitalen Zwillings und somit zum Fortschritt bezüglich der Entwicklungen im Umfeld von Produktion und Logistik leisten.

Basierend auf den genannten Zielen der Arbeit wird im folgenden Abschnitt 1.3 die Vorgehensweise zur Erreichung dieser Ziele detaillierter dargestellt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit ergibt sich aus der Abarbeitung der in Abschnitt 1.2 dargestellten Ziele und ist in Abbildung 1.2 grafisch dargestellt. Die Arbeit teilt sich in den *Grundlagenteil*, den *Hauptteil* und den *Schlussenteil*. Der Pfeil am rechten Rand zeigt den Verlauf der Arbeit.

Die Vorgehensweise zur Erreichung der Ziele orientiert sich an der Abbildung 1.2 und wird im Folgenden vorgestellt. Nach der Einleitung werden die notwendigen theoretischen Grundlagen auf Basis der Fachliteratur für die folgenden Kapitel gelegt. Zum einen widmet sich dieser Teil zunächst der Simulation und dem Modellbegriff im Allgemeinen, bevor der Schwerpunkt auf die ereignisdiskrete Simulation gelegt wird. Es folgt zunächst ein Überblick über die Klassifizierung von Simulationswerkzeugen und anschließend die Einordnung des Werkzeugs Tecnomatix Plant Simulation der Firma Siemens, mit dem die Modellerstellung erfolgen wird. Außerdem werden die Bedienoberfläche und wichtigsten Funktionen des Werkzeugs kurz beschrieben. Darüber hinaus wird das Simulationsvorgehensmodell der

Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ innerhalb der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM) (Rabe et al. 2008, S. 4 ff.) vorgestellt, da es als Grundlage für die Konzepterstellung dient. Zum anderen wird die Thematik der Industrie 4.0 beleuchtet. Zunächst werden die historischen Entwicklungen bis hin zur vierten industriellen Revolution sowie dazugehörige Grundlagen dargestellt, bevor die wesentlichen Bestandteile beziehungsweise (bzw.) Handlungsfelder, wie beispielsweise (bspw.) CPS, das Internet der Dinge und die Smart Factory, skizziert werden. Es werden weitere Themen der Industrie 4.0 angeschnitten sowie Treiber und Potenziale aufgeführt. Dies dient als Basis, um wichtige Anforderungen und Merkmale zukünftiger Produktions- und Logistiksysteme herauszustellen und daraufhin den Digitalen Zwilling als ein Handlungsfeld der Industrie 4.0 einzuordnen, zu analysieren und die wesentlichen Eigenschaften zu benennen.

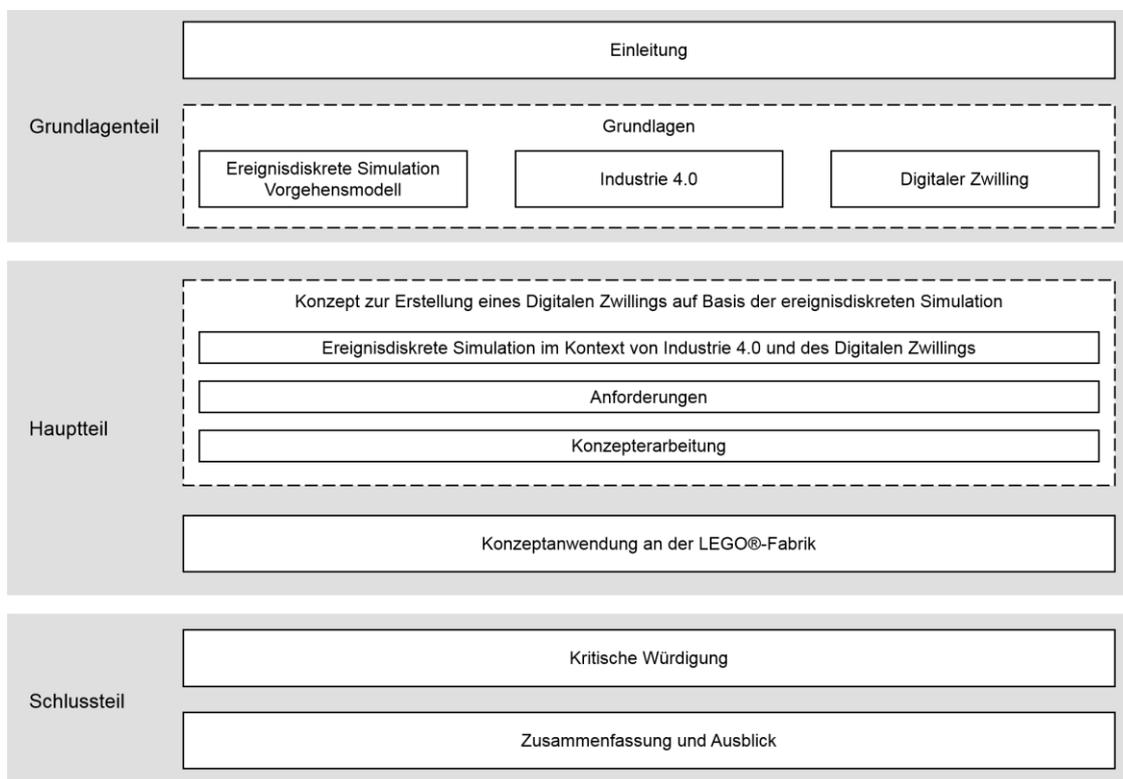


Abbildung 1.2: Aufbau der Arbeit

Nach dem Grundlagenteil folgt der Hauptteil der Bachelorarbeit. Hier wird zunächst herausgearbeitet, welche Rolle die ereignisdiskrete Simulation im Kontext der Industrie 4.0 und des Digitalen Zwillings einnimmt und in Zukunft einnehmen wird. Dies soll sowohl unter Hinzunahme weiterer Fachliteratur als auch auf Basis der erarbeiteten Grundlagen erfolgen, um auszuarbeiten, welche zusätzlichen Anforderungen Simulationsmodelle mitbringen müssen, um als ein Bestandteil des Digitalen Zwillings genutzt werden zu können. Aufgrund dessen wird auf Basis des Simulationsvorgehensmodells ein theoretisches Konzept erarbeitet, wie die ereignisdiskrete Simulation für die Erstellung

eines Digitalen Zwillings genutzt werden kann. Anschließend folgt die praktische Anwendung des erstellten Konzepts an der LEGO®-Fabrik des pfp. Hierfür wird diese zunächst beschrieben und die zu Beginn der Arbeit vorliegenden Voraussetzungen bezüglich des Aufbaus, der Steuerung und der Programmierumgebung aufgezeigt. Daraufhin wird ein digitales Modell der Fabrik in Tecnomatix Plant Simulation auf Grundlage der ereignisdiskreten Simulation und unter Anwendung des entwickelten Konzepts erstellt und versucht, die in dem erarbeiteten Konzept formulierten Anforderungen exemplarisch umzusetzen, um das ereignisdiskrete Simulationsmodell als Digitaler Zwilling nutzen zu können.

Abschließend werden in dem Schlussteil die Ergebnisse der Arbeit kritisch gewürdigt. Eine Zusammenfassung der gesamten Arbeit und ein Ausblick bezüglich weiterer Möglichkeiten in Bezug auf das erstellte Modell und die Industrie schließen diese Bachelorarbeit ab.

2 Grundlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept zur Nutzung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells für die Erstellung eines Digitalen Zwillings im Kontext der Industrie 4.0 erarbeitet. Zu diesem Zweck liegen die theoretischen Schwerpunkte auf den Themen der Simulation, der Industrie 4.0 und des Digitalen Zwillings. Um die notwendigen Grundlagen für diese Themengebiete zu erarbeiten und ein Grundverständnis zu schaffen, wird in diesem Kapitel der Stand der Fachliteratur zur Simulation, zu Industrie 4.0 und zum Digitalen Zwilling dargestellt, der Bewandnis für die folgenden Kapitel hat. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die theoretischen Grundlagen genutzt, um die in Abbildung 1.1 dargestellten Ziele zu erarbeiten und Zusammenhänge zwischen den Themen herzustellen.

2.1 Simulation

Aufgrund der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Entwicklungen werden Produktionssysteme immer komplexer. Um wettbewerbsfähig zu sein, sind Unternehmen gezwungen, sich kontinuierlich zu verbessern und Potenziale zur Effizienzsteigerung auszuschöpfen. Demnach ist es notwendig, Systeme genau zu analysieren (vgl. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014). Wo analytische Lösungen aufgrund von Zeit- und Zufallsabhängigkeiten und stark vernetzter Wirkzusammenhänge an ihre Grenzen stoßen, hat sich die Simulation zur Untersuchung und Beurteilung komplexer Systeme sowie zur Entscheidungsunterstützung, besonders bei Entscheidungen mit erheblicher Tragweite etabliert. Ursprünglich lag der Fokus auf der Planungsabsicherung. Aus den aufgeführten Gründen findet sie jedoch heute in allen Phasen des Planungs- und Realisierungsprozesses und auch in der Prozesssteuerung während des Betriebs Anwendung (vgl. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 4 f.). Da in dieser Arbeit nur die digitale Simulation bzw. Computersimulation von Bedeutung ist, bei der ein System durch die Nutzung von Software in einem Computermodell abgebildet wird (vgl. Hedtstück 2013, S. 3), wird der Zusatz „digital“ im Folgenden nicht mehr erwähnt. Baron et al. (2001) sehen viele Vorteile in der Anwendung der Computersimulation: So steht unabhängig von der Art des zu betrachtenden Systems eine Vielzahl universeller Simulationsprogramme zur Verfügung. Zusätzlich stellen die Kosten der Modellerstellung und Simulation nur einen geringen Anteil des Aufwands dar, den die Untersuchung mittels realer Systeme oder physikalischer Modelle mit sich bringen würde. Es werden Beobachtungen möglich, die sich in realen Systemen der menschlichen Wahrnehmung entziehen würden. Gleichzeitig ist kein Eingriff in das reale System notwendig, womit diesbezügliche Risiken ausgeschlossen werden können (vgl. Baron et al. 2001, S. 118). Dies sind nur einige Gründe, die für die Simulation im betrieblichen Umfeld sprechen.

Als ein Unterziel dieser Arbeit wird Digitaler Zwilling einer LEGO®-Fabrik auf Grundlage der ereignisdiskreten Simulation erstellt. Zu diesem Zweck werden zunächst wesentliche Begriffe im Kontext der Simulation definiert, um daraufhin besonders auf die ereignisdiskrete Simulation einzugehen. Es folgt eine Klassifizierung von Simulationswerkzeugen, wo schließlich Tecnomatix Plant Simulation eingeordnet und im Anschluss beschrieben wird. Abschließend wird das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008), das als Basis für die Konzepterstellung in Abschnitt 3.3 dient, mit den einzelnen Phasen und Phasenergebnissen beschrieben. Da aufgrund der vorgestellten Ziele der Arbeit (vgl. Abbildung 1.1) der Fokus nicht auf der Untersuchung und Verbesserung des zu modellierenden Systems liegt, sondern darauf, wie ein ereignisdiskretes Simulationsmodell zum Digitalen Zwilling befähigt werden kann, beschränken sich die folgenden Darstellungen auf das Vermitteln von Informationen, die zur Erstellung und zum Verständnis eines ereignisdiskreten Simulationsmodells dienen. Es sei an dieser Stelle außerdem darauf hingewiesen, dass der Begriff der Ablaufsimulation ebenfalls geläufig ist. In dieser Arbeit werden die Begriffe der ereignisdiskreten Simulation und Ablaufsimulation als synonym betrachtet und im Folgenden nur der Begriff der ereignisdiskreten Simulation verwendet.

2.1.1 Begriffsdefinitionen und Klassifizierungen

Simulationsmethoden werden als eine Methodenklasse innerhalb des Konzepts der Digitalen Fabrik eingeordnet (vgl. Bracht et al. 2018, S. 87 f.), das deshalb an dieser Stelle einleitend definiert wird. Vom Verein Deutscher Ingenieure e. V. (kurz: VDI) wird in der VDI-Richtlinie 4499 wie folgt beschrieben: *„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und dreidimensionalen Visualisierung – die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“* (VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 2008, S. 3). Dem Begriff der Simulation definiert die VDI im Kontext Logistik, Materialfluss und Produktion als ein *„Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“* (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 28). Weitere Anmerkungen lauten: *„Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden“* sowie *„Mithilfe der Simulation kann das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden [...]“* (VDI-Richtlinie 3633 2018). Demnach werden bei der Simulation mittels Experimenten an einem erstellten Modell Rückschlüsse auf das Verhalten eines durch das Simulationsmodell abgebildeten

Systems gezogen (vgl. auch Gutenschwager et al. 2017, S. 22). Es wird deutlich, dass die Begriffe System, Modell, Simulationsmodell und Simulationsexperiment in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind. Eine kurze Erläuterung ist daher sinnvoll.

Schmidt und Taylor (1970) definieren ein *System* als eine Sammlung von Einheiten (bspw. Maschinen, Menschen), die zur Erreichung logischer Ziele handeln und zusammenwirken. Vom Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN) wird ein System als „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“ (DIN IEC 60050-351 2014, S. 21) beschrieben. Es wird hinsichtlich seiner Zielsetzung definiert, ist durch Systemgrenzen von der Umwelt, der Systemumgebung, abgegrenzt und kann über Schnittstellen mit dieser interagieren. Bestandteile eines Systems sind Systemelemente, die bei näherer Betrachtung entweder selbst Systeme darstellen oder nicht weiter zerlegbar sind. Somit kann bspw. eine Maschine als Bestandteil eines Produktionssystems selbst wiederum ein System darstellen. Die Systemstruktur resultiert aus den Beziehungen zwischen den Systemelementen. Die Zustände dieser Elemente werden über konstante und variable Attribute (Zustandsgrößen) dargestellt, wobei der Systemzustand über die Zustände der Elemente zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert wird. Zustandsübergänge erfolgen aufgrund eines Prozesses, der in dem System abläuft (vgl. DIN IEC 60050-351 2014; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 4; Gutenschwager et al. 2017, S. 11). In diesem Kontext wird ein Prozess als die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird“ (DIN IEC 60050-351 2014, S. 32) definiert. Die Ablaufstruktur in den Elementen wird über „spezifische Regeln hinsichtlich der Zustandsgrößen und der Zustandsübergänge charakterisiert“ (Gutenschwager et al. 2017, S. 11).

Der Begriff des *Modells* ist wesentlich für diese Arbeit, da zum einen eine LEGO®-Fabrik vorliegt, die als Modell für eine reale Fabrik dient. Zum anderen soll ein digitales Modell dieser Modellfabrik erstellt werden. Nach VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014) ist ein Modell eine „Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ und „unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 3). Hieraus wird deutlich, dass ein Modell auch selbst als ein System aufgefasst werden kann (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 15). Somit können sowohl eine Modellfabrik als auch das digitale Modell dieser Modellfabrik wiederum als Systeme verstanden werden. Stachowiak (1973) beschreibt die folgenden drei Hauptmerkmale des

Modellbegriffs. Das Abbildungsmerkmal besagt, dass Modelle Abbildungen bzw. Repräsentationen von natürlichen oder künstlichen Originalen sind, die selbst Modelle sein können. Mit dem Verkürzungsmerkmal weist er darauf hin, dass das Original im Modell nicht vollständig erfasst wird, sondern lediglich für den Erschaffer oder Nutzer des Modells relevante Aspekte enthält. Es ist demnach eine vereinfachte Abbildung in Abhängigkeit von dem zugrundeliegenden Zweck und hat einen geringeren Detaillierungsgrad als das Original. Das pragmatische Merkmal beschreibt, dass Modelle nicht per se ihren Originalen eindeutig zugeordnet sind. Es ist auch zu betrachten, für wen, wann und wozu sie ihre Ersetzungsfunktion erfüllen, um Subjekt-, Zeit- und Zweckgebundenheit mit einzubeziehen (Stachowiak 1973, S. 131 ff.).

Nach Kuhn, A. und Wenzel (2008) stellen *Simulationsmodelle* „vereinfachte Abbilder einer Realität dar und verhalten sich bezüglich der untersuchungsrelevanten Aspekte weitgehend analog dem realen oder geplanten System. Sie sind experimentierbar, symbolisch, digital, dynamisch [...]; sie können je nach Zufalls- und Zeitverhalten deterministisch oder stochastisch sowie kontinuierlich oder diskret sein“ (Kuhn, A. und Wenzel 2008, S. 77). Gutenschwager et al. (2017) beschreiben außerdem, dass es sich bei Simulationsmodellen um „ablauffähige Modelle zur experimentellen Analyse der dynamischen Zusammenhänge in Systemen“ (Gutenschwager et al. 2017, S. 22) handelt. Auch Law und Kelton (2000) klassifizieren Simulationsmodelle in statistische vs. dynamische, deterministische vs. stochastische und kontinuierliche vs. diskrete Simulationsmodelle. Bei statischen Simulationsmodellen erfolgt die Systembetrachtung zu einem bestimmten Zeitpunkt oder die Zeit ist irrelevant. Dynamische Simulationsmodelle bilden ein sich über die Zeit veränderndes System ab, wie bspw. eine Förderanlage. Im Rahmen dieser Arbeit wird nur das dynamische Simulationsmodell behandelt. Ein deterministisches Simulationsmodell enthält keine Komponenten die zufallsabhängig sind wohingegen in einem stochastischen Simulationsmodell das Systemverhalten durch zufallsabhängige Ereignisse² beeinflusst wird (bspw. bei der Simulation einer Warteschlange). Bei kontinuierlichen Simulationsmodellen ändern sich Systemzustände permanent. In diskreten Simulationsmodellen hingegen verändert sich der Zustand der Variablen nur zu bestimmten, diskreten Zeitpunkten (vgl. Law und Kelton 2000, S. 3 ff.). Da für diese Arbeit die diskrete Simulation von Bedeutung ist, werden kontinuierliche Simulationsmodelle nicht weiter erläutert. Eine weitere Einteilung innerhalb der diskreten Simulation kann über das Fortschreiten der Zeit erfolgen, das ereignisorientiert oder zeitgesteuert erfolgen kann. Bei der ereignisorientierten Simulation werden Zustandsänderungen im Simulationsmodell durch das Eintreten von Ereignissen ausgelöst. Bei der zeitgesteuerten Simulation dagegen

² Ein Ereignis ist eine „atomare Begebenheit, die eine Zustandsänderung bewirkt und keine Zeit verbraucht“ VDI-Richtlinie 3633 (2018, S. 11).

erfolgt eine Zustandsänderung nach Voranschreiten der Zeit um ein konstantes, vorher festgelegtes Zeitintervall. Demnach werden Zustandsänderungen, die innerhalb des letzten Zeitintervalls aufgetreten sind, erst nach dieser Zeiterhöhung ausgeführt (vgl. Kuhn, A. und Wenzel 2008, S. 78 f.). Eine detaillierte Betrachtung der ereignisdiskreten Simulation, die für diese Arbeit relevant ist, erfolgt in Abschnitt 2.1.2. Es sei an dieser Stelle außerdem darauf hingewiesen, dass die Betrachtungsebene von wesentlicher Bedeutung für die Gestaltung des Simulationsmodells ist. Auf Komponentenebene ist bspw. ein wesentlich höherer Detaillierungsgrad erforderlich als auf Werks- oder Konzernebene. Dieser Detaillierungsgrad kann wiederum die Sicht auf die Realität und damit die Modellerstellung beeinflussen (vgl. Bracht et al. 2018, S. 123 f.; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014).

In der VDI-Richtlinie 3633 (2018) wird das *Simulationsexperiment* als Teil einer *Simulationsstudie* beschrieben, die ein „Projekt zur simulationsgestützten Untersuchung eines Systems“ (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 30) darstellt. Das Simulationsexperiment ist eine „gezielte empirische Untersuchung des Modellverhaltens über einen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte *Simulationsläufe* mit systematischen Parametervariationen“ (VDI-Richtlinie 3633 2018). Innerhalb eines Simulationslaufs wird das Verhalten eines Systems mittels des Simulationsmodells über einen bestimmten Zeitraum, die Simulationszeit, nachgebildet. Gleichzeitig erfolgt die Erfassung der Werte untersuchungsrelevanter Zustandsgrößen und gegebenenfalls (ggf.) deren statistische Auswertung (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 4). Demnach wird das Modell bei einem Simulationslauf genau einmal über einen definierten Zeitraum ausgeführt (vgl. Rabe et al. 2008, S. 12). Resultat eines Simulationslaufs ist das Simulationsergebnis, also „Höhe und zeitlicher Verlauf der Änderungen der Zustandsgrößen eines Modells zwischen Anfang und Ende eines Simulationslaufs“ (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 29). Hierbei können die Daten entweder nach Abschluss des Laufs oder während der Läufe an festgelegten Punkten innerhalb des Modells erhoben werden (VDI-Richtlinie 3633 2018). Um eine Aussage zur statistischen Sicherheit von Simulationsergebnissen treffen zu können, ist es nach Rabe et al. (2008, S. 12 f.) zusätzlich notwendig, mehrere Replikationen durchzuführen. Der Begriff Replikation bezeichnet Simulationsläufe ohne Parametervariation, aber mit unterschiedlichen Startwerten zur Generierung von Zufallszahlen. Es kann festgehalten werden, dass eine Simulationsstudie mehrere Simulationsexperimente enthält, die wiederum mehrere Simulationsläufe umfassen können (vgl. VDI-Richtlinie 3633 2018).

Um ein ablauffähiges Simulationsmodell implementieren und für Experimente und Analysen nutzen zu können, bedarf es eines *Simulationswerkzeuges*. In der VDI-Richtlinie 3633 (2018) wird das Simulationswerkzeug (auch: Simulator, Simulationssystem, Simulationsinstrument, Simulationsprogramm) als „Softwareprogramm, mit dem ein Modell mithilfe

einer Programmiersprache (Simulationssprache) zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems und seiner Prozesse erstellt und ausführbar gemacht werden kann“ beschrieben (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 30). Eine weitere Beschreibung von Werkzeugen zur ereignisdiskreten Simulation erfolgt in Abschnitt 2.1.3.

Da die Simulation zur Unterstützung bei sehr bedeutsamen Entscheidungen eingesetzt wird, sind richtige und übertragbare Simulationsergebnisse von wesentlicher Bedeutung, um die richtigen Schlüsse ziehen zu können. Fehlentscheidung aufgrund fehlerhafter Simulationsergebnisse können erhebliche Kosten nach sich ziehen. Somit sind Verifikation und Validierung (V&V) in einer Simulationsstudie unverzichtbar (vgl. Rabe et al. 2008, S. 1). Die VDI-Richtlinie 3633 (2018) definiert die *Verifikation* (auch: Verifizierung) als die „Durchführung von formalen Prüfungen zur Korrektheit des Simulationsmodells“ (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 36). Rabe et al. (2008) beschreiben sie als „die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart in eine andere Beschreibungsart korrekt transformiert wurde“ (Rabe et al. 2008, S. 14). Nach diesem Verständnis wird also die Korrektheit der Transformation z. B. aus dem Konzeptmodell in das formale Modell überprüft. Vereinfacht kann die Definition in die Frage „Ist das Modell richtig?“ gefasst werden. Allerdings ist es unmöglich, die vollständige Fehlerfreiheit von Simulationsmodellen nachzuweisen. Werden allerdings keine Fehler aufgedeckt, erhöht dies die Glaubwürdigkeit (Rabe et al. 2008). Die *Validierung* wird in der VDI-Richtlinie 3633 (2018) als die „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System“ beschrieben, „die sicherstellen soll, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“ (VDI-Richtlinie 3633 2018, S. 35). Rabe et al. (2008) fassen auch hier die Definition in eine vereinfachte Frage: „Ist es das richtige Modell?“. Sie weisen auf die kontinuierliche Überprüfung hin, da bei einer Simulationsstudie mehrere Modelle erstellt werden, die jeweils im Sinne der Validierung überprüft werden. Dazu können alle Modelle und Dokumente herangezogen werden, die zuvor erstellt wurden (Rabe et al. 2008, S. 15 f.).

Einen weiteren wichtigen Aspekt in Bezug auf Simulationsmodelle stellt die sogenannte Nachnutzung dar, also die erneute Nutzung von Simulationsmodellen nach Ende eines Projekts (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 153 ff.). Hier unterscheiden Wenzel et al. (2008, S. 154) zwischen der Wiederverwendung, die „einen anderen Betrachtungsgegenstand bei gleichen Untersuchungszielen“ (ebd.) hat und der Weiterverwendung, die „den gleichen Betrachtungsgegenstand bei anderen Untersuchungszielen hat“ (ebd.). Die Wiederverwendung bezieht sich demnach auf die Nutzung eines erstellten Modells zur Analyse ähnlicher Sachverhalte bei anderen Systemen, wobei die Weiterverwendung eines Modells auf die Nutzung für das gleiche System in einem neuen Kontext (bspw. einer

späteren Lebenszyklusphase) abzielt (ebd.). Weitere Informationen zur Nachnutzung können Wenzel et al. (2008, S. 154 ff.) entnommen werden.

Nach der Beschreibung der im Rahmen der Simulation für diese Arbeit wichtigen Begriffe wird im folgenden Abschnitt näher auf die ereignisdiskrete Simulation eingegangen.

2.1.2 Ereignisdiskrete Simulation

Um die bereits angesprochene ereignisdiskrete Simulation besser verstehen zu können, wird sie in diesem Abschnitt detaillierter beschrieben und von der zeitgesteuerten Simulation abgegrenzt, bevor das Prinzip der ereignisdiskreten Simulation, das in Simulationssoftware implementiert ist, erläutert wird.

Da sich der Zustand eines Systems im Rahmen der diskreten Simulation nicht kontinuierlich, sondern lediglich zu bestimmten, diskreten Zeitpunkten ändert, müssen geeignete Zeitpunkte gewählt werden, in denen der Systemzustand neu berechnet wird (vgl. Hedtstück 2013, S. 21 f.). Es ist die Simulationsmethode, die definiert, in welcher Art und Weise das Zeitverhalten in der Simulation berücksichtigt wird (Kuhn, A. und Wenzel 2008, S. 78). Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 erwähnt, gibt es dazu für die diskrete Simulation zwei Möglichkeiten. Entweder kann ein Zeitraster mit äquidistanten Zeitabständen verwendet werden oder es werden die Eintrittszeitpunkte der Ereignisse gewählt (vgl. Hedtstück 2013, S. 21 f.).

Bei dem ersten Prinzip handelt es sich um die zeitgesteuerte Simulationsmethode. Dabei erfolgt der Zeitfortschritt in definierten, konstanten Zeitschritten. Zustandsänderungen, die innerhalb eines Intervalls erfolgen, werden erst am Ende des Zeitintervalls gesammelt verarbeitet. Wesentlich für die Rechenzeit ist die Wahl des Zeitintervalls. Wird es zu klein gewählt, kommt es zu einem hohen Rechenaufwand, da die Zustände nach jedem Zeitschritt neu geprüft werden, auch wenn keine Änderungen erfolgt sind. Ein zu großes Intervall erhöht hingegen das Risiko von Fehlern, da alle Zustandsänderungen, die während des Intervalls aufgetreten sind, erst am Ende des Zeitschritts berechnet werden (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 53). Dies weist auf Nachteile hin.

Das zweite Prinzip ist die diskrete ereignisgesteuerte Simulationsmethode, die auch als ereignisorientierte oder ereignisdiskrete Simulation, englisch: „Discrete Event Simulation“ (DES) oder Ablaufsimulation, bezeichnet wird. Hierbei wird jede Zustandsänderung erfasst, da die Zeit jeweils auf den Zeitpunkt des nächsten Ereignisses gesetzt wird (wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben bewirkt ein Ereignis eine Zustandsänderung). Die Problematik eines zu klein oder zu groß gewählten Zeitintervalls entsteht dadurch nicht. Es ist allerdings zu beachten, dass die Rechenzeit mit der Anzahl der eintretenden Ereignisse zunimmt. Ereignisse lösen wiederum Aktivitäten aus oder beenden diese. Mehrere Aktivitäten werden

zu Prozessen zusammengefasst. Die unmittelbare Verknüpfung der Zustandsänderungen mit dem Eintreten eines Ereignisses führt dazu, dass diese ebenfalls diskret sind (vgl. Gutenschwager et al. 2017, S. 54; Eley 2012, S. 8). Beispiele für Ereignisse sind die Ankunft eines Auftrags an einer Maschine oder das Ende eines Prozessschrittes (Rose und März 2011, S. 14). Abbildung 2.1 verdeutlicht den Unterschied zwischen der ereignisgesteuerten (a) und der zeitgesteuerten Simulation (b) anhand der Betrachtung von Zuständen, Ereignissen und Zustandswechseln im Zeitverlauf.

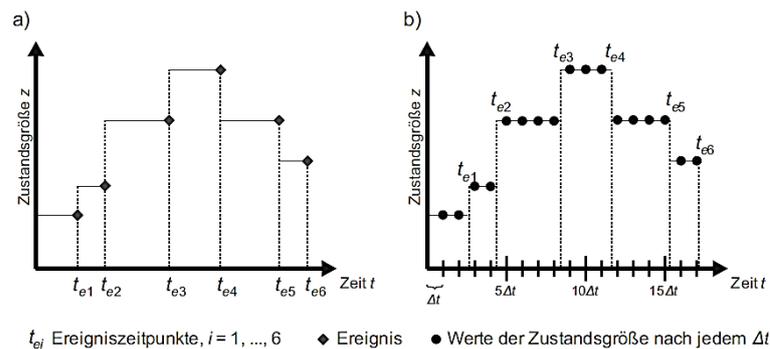


Abbildung 2.1: Vergleich von Zuständen, Ereignissen und Zustandswechseln

a) ereignisgesteuerte Simulation: Zustandsänderungen erfolgen jeweils zu den tatsächlichen Ereigniszeitpunkten b) zeitgesteuerte Simulation: Zustandsänderungen erfolgen jeweils zu den Zeitpunkten 3, 5, 9, 12 und 16 (Gutenschwager et al. 2017, S. 54)

Die ereignisorientierte Simulation wird heute in vielen Simulationsprogrammen zugrunde gelegt. Von Vorteil ist, dass das dynamische Systemverhalten und alle Ereignisse, die während eines diskreten Prozesses eintreten, durch eine Software mit hoher Genauigkeit nachgespielt werden (vgl. Hedtstück 2013, S. 22). Für die Nachbildung logistischer Systeme sind ereignisdiskrete Modelle prädestiniert (vgl. Eley 2012, S. 8). Da auch in dieser Arbeit ein logistisches System digital modelliert werden soll, ist im Folgenden ausschließlich die ereignisdiskrete Simulation von Bedeutung. Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit Werkzeugen zur ereignisdiskreten Simulation.

2.1.3 Werkzeuge zur ereignisdiskreten Simulation

Nach Abgrenzung der zeitgesteuerten von der ereignisdiskreten Simulation und der Begründung der Auswahl der ereignisdiskreten Simulation für diese Arbeit werden in diesem Abschnitt Grundsätze zu Werkzeugen für die ereignisdiskrete Simulation behandelt. Zunächst wird das Prinzip der ereignisdiskreten Simulation erklärt, das in DES-Software genutzt wird. Daraufhin erfolgt die Erläuterung weiterer Elemente, bevor Tecnomatix Plant Simulation als das in dieser Arbeit zu nutzende Simulationswerkzeug in eine Klassifikation der Simulationswerkzeuge eingeordnet wird.

Das Prinzip, das DES-Software zur ereignisdiskreten Simulation zugrunde liegt, ist im Folgenden auf Grundlage der Beschreibungen von Gutenschwager et al. (2017, S. 55 ff.) und Hedtstück (2013, S. 22 ff.) dargestellt. Es besteht darin, dass eine Folge von *Ereignissen mit Zeitstempeln* vorliegt, die in chronologischer Reihenfolge abgearbeitet werden müssen. Die auszuführenden Ereignisse werden in einer *Zeitliste* (als *Ereignisliste*, *Event List* oder *Ereigniskalender* bezeichnet) verwaltet, die aufsteigend nach der zu den Ereignissen gehörenden Zeitpunkten sortiert ist. Sie enthält wesentliche Informationen für das Ereignis, insbesondere den Ereignistyp (z. B. Ankunft, Ende Bedienung, Ausfall) und den Eintrittszeitpunkt. Die *Simulationszeit*, also der aktuelle Zeitpunkt, wird über die *Simulationsuhr* dargestellt, die jeweils auf den Zeitpunkt des nächsten Ereignisses gesetzt wird, das zu betrachten ist. Die Ereignisliste enthält dabei zum jeweils aktuellen Zeitpunkt nur solche künftigen Ereignisse, die zu diesem Zeitpunkt bereits bekannt sind. Durch die *Ablaufsteuerung* wird das jeweils erste Ereignis aus der Liste entfernt, die Simulationsuhr auf den Eintrittszeitpunkt dieses Ereignisses gesetzt und über sogenannte *Ereignisroutinen* die mit dem Ereignis in Verbindung stehenden Zustandsänderungen durchgeführt. Innerhalb einer Ereignisroutine (Programmcode als Teil einer Simulationssoftware) erfolgt die Berechnung des neuen Zustandes, die Planung neuer Ereignisse (*Folgeereignisse*) – falls möglich – und die Durchführung statistischer Auswertungen.

Der Grundablauf der Ablaufsteuerung in einer ereignisdiskreten Simulation ist dabei wie folgt. Zunächst erfolgt eine Initialisierung der Zustandsvariablen des Modells, der Statistikvariablen, der Simulationsuhr und der Ereignisliste. Im Wesentlichen besteht der Algorithmus aus einer Schleife, bei der das zeitlich nächste Ereignis aus der Liste geholt und gelöscht wird, die Simulationsuhr auf den Zeitpunkt des Eintritts dieses Ereignisses gesetzt und die zugehörige Ereignisroutine ausgeführt wird. Nach jedem Durchlauf erfolgt eine Überprüfung, ob die Simulation weitergeführt oder beendet wird. Abbruchkriterien der Schleife können eine leere Ereignisliste, das Erreichen des vorgegebenen Endzeitpunktes der Simulation oder eine von dem Anwender angegebene Endbedingung sein (vgl.

Gutenschwager et al. 2017, S. 56; Rose und März 2011, S. 15 f.). Dieser Algorithmus liegt jeglicher DES-Software zu Grunde (vgl. Rose und März 2011, S. 16).

Weitere Elemente, die neben der Zeitliste in Simulationswerkzeugen zur Modellierung Verwendung finden, können in *materielle Elemente* und *immaterielle Elemente* unterschieden werden. Materielle Elemente können bspw. Abbildungen von Maschinen, Anlagen und anderen physischen Elementen des realen Systems sein. Immaterielle Elemente sind nicht physische Elemente, die ebenfalls in einem Modell abgebildet werden müssen, insbesondere Informationselemente (vgl. Eley 2012, S. 9). Die Elemente Entity, Ressourcen, Attribute, Methoden, Variablen und Zufallszahlen werden nachfolgend in Anlehnung an Eley (2012, S. 9 f.) vorgestellt.

Entities sind Objekte, die sich und ihren Standort während eines Simulationslaufs ändern können und deshalb auch als *bewegliche Elemente (BEs)* bezeichnet werden. Erzeugt vom Simulationsprogramm wandern sie durch das System und können auch wieder durch das Programm vernichtet werden. Daher werden sie zur Darstellung von Kundenaufträgen oder physischen Objekten (bspw. Werkstücke, Fahrzeuge, Transportbehälter) genutzt. Individuelle Identifizierbarkeit ermöglicht das Anlegen einer Statistik für jedes Entity. *Ressourcen* sind Elemente, die von Entities in Anspruch genommen werden. Sie sind während eines Simulationslaufs permanent vorhanden, auch wenn sie ggf. nicht während der gesamten Zeit zur Verfügung stehen. Deshalb werden sie auch *unbewegliche Elemente* genannt und bilden bspw. Bearbeitungsstationen, Werker oder Montagestationen ab. Bearbeitungsstationen nehmen Entities für eine bestimmte Zeit auf und Montagestationen erzeugen aus einer definierten Menge an Entities neue Entities. *Warteschlangen* sind eine besondere Art von Ressourcen, die Warteräume darstellen. Ein Beispiel sind Lagerplätze, in denen Entities zwischengespeichert werden können, um auf die Verfügbarkeit von derzeit belegten Ressourcen zu warten. Es können Regeln für die Abarbeitung der Warteschlange vorgegeben werden, zum Beispiel „First In – First Out“ (FIFO), wodurch mittels Warteschlangen auch eine Änderung der Bearbeitungsreihenfolge der Entities ermöglicht wird. Attribute sind Eigenschaften von Entities und Ressourcen, die ihre Darstellung und ihr Verhalten bestimmen. Die Attribute können bestimmte Werte zur Beschreibung des Zustandes annehmen. Bspw. kann eine Anlage das Attribut „gestört“ besitzen, das die Werte „true“ (nicht verfügbar) oder „false“ (verfügbar) annehmen kann. *Methoden* sind Prozeduren, durch die ein Eingriff in den Ablauf eines Simulationslaufs ermöglicht wird. Sie erlauben bspw. Attributwertänderungen oder das Erzeugen neuer Entities. Durch Methoden können demnach auch durch Ereignisse ausgelöste Zustandsänderungen gesteuert werden. Da sie programmiert werden müssen, werden für Methoden Programmiersprachen benötigt. *Variablen* erlauben das Abspeichern von Informationen und Werten, während

eines Simulationslaufs. Einfache Variablen erlauben bspw. das Speichern ganzzahliger Werte. Für komplexere Datenstrukturen werden Informationen meist in Tabellen oder Listen gespeichert. *Zufallszahlen* werden benötigt, um Zufallsprozesse (bspw. den Ausfall einer Maschine) abzubilden. Sie werden anhand vorgegebener statistischer Verteilungen erzeugt. Mit Simulationswerkzeugen können die einzelnen Elemente außerdem durch Symbole oder Icons visuell dargestellt und animiert werden.

Es steht eine Vielzahl kommerzieller Simulationswerkzeuge zur Verfügung, die sich nach ihrem Spezialisierungsgrad, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, klassifizieren lassen.

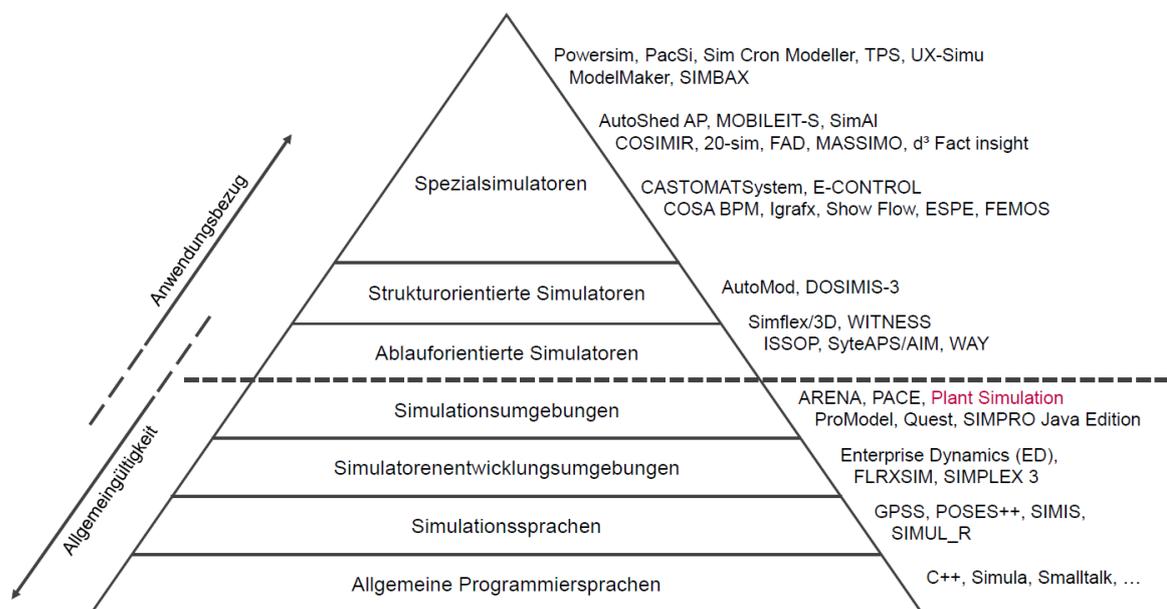


Abbildung 2.2: Klassifizierung von Simulationswerkzeugen für Produktion und Logistik

(vgl. Wenzel und Noche 2000, S. 426; Eley 2012, S. 10)

Die dargestellte Pyramide reicht von allgemeinen Programmiersprachen (unterer Bereich in Abbildung 2.2), die universell einsetzbar sind, bis zu Spezialsimulatoren, die einen stark begrenzten Aufgabenbereich abdecken (vgl. Wenzel und Noche 2000, S. 425; Eley 2012, S. 10). Am rechten Rand sind einige Beispiele zu den jeweiligen Ebenen aufgelistet. *Allgemeine Programmier- und Simulationssprachen* sind grundsätzlich beliebig anwendbar, bedürfen jedoch meist aufgrund ihrer Komplexität langer Einarbeitungszeiten und der Einbeziehung von Spezialisten. *Simulatorenentwicklungsumgebungen* stellen eine Entwicklungsbasis dar, die das Entwickeln oder Konfigurieren von Simulatoren ermöglicht. *Simulationsumgebungen* sind offene Simulatoren, durch die neue Bausteine und bis zu einem gewissen Grad auch Funktionen anwendungsbezogen beschrieben und innerhalb des Werkzeugs ergänzt werden können. Vorgefertigte Bausteine ermöglichen dabei eine kurzfristige Modellimplementierung. *Ablauf- und strukturorientierte Simulatoren* sind Simulatoren mit Anwendungsbezug auf Produktion und Logistik und sind entsprechend auf diesen

Anwendungsbereich zugeschnitten. Eine Spezialisierung innerhalb des Produktions- und Logistikbereichs weisen *Spezialsimulatoren* auf, die sich nur auf bestimmte Teilbereiche beschränken und somit in ihrer Flexibilität sehr begrenzt sind (vgl. Wenzel und Noche 2000, S. 425 f.; Kuhn, A. und Wenzel 2008, S. 83).

Das für diese Arbeit zu verwendende Simulationswerkzeug Tecnomatix Plant Simulation ist in der Ebene der Simulationsumgebungen und damit im mittleren Bereich der Abbildung 2.2 eingeordnet. Damit stellt es einen guten Kompromiss zwischen Einsatzflexibilität und der Möglichkeit einer kurzfristigeren Modellimplementierung dar (vgl. Eley 2012, S. 11). In dem folgenden Abschnitt erfolgt eine Übersicht über das Programm.

2.1.4 Überblick zu Tecnomatix Plant Simulation

Das in dieser Arbeit zu verwendende ereignisdiskrete Simulationswerkzeug *Plant Simulation* wird von Siemens Industry Software GmbH angeboten und gehört zu dem Portfolio Tecnomatix. Im Folgenden wird das Programm als „Plant Simulation“ bezeichnet. Mit Plant Simulation können Produktionssysteme und deren Prozesse modelliert sowie simuliert werden. Außerdem ermöglicht es die Optimierung des Materialflusses, der Ressourcennutzung und der Logistik auf allen Stufen der Anlagenplanung von der Ebene globaler Produktionsstätten bis zu einzelnen Produktionslinien (vgl. Siemens PLM Software 2014). In Abschnitt 2.1.3 ist das Programm in die Ebene der Simulationsumgebungen eingeordnet, in denen vorgefertigte Bausteine zur Verfügung stehen und gleichzeitig individuelle Funktionen und Bausteine beschrieben und ergänzt werden können (vgl. Kuhn, A. und Wenzel 2008, S. 83). Auch Plant Simulation bietet vorgefertigte Bausteine, die in einem gewissen Rahmen durch das Anpassen von Eingabewerten auf die jeweiligen Nutzungsbedürfnisse angepasst werden können. Zusätzlich ermöglicht die in Plant Simulation verwendete Skriptsprache „SimTalk“, Funktionen und Prozeduren (Methoden) zu erstellen und somit Verhaltensweisen der Simulationsmodelle genauer zu steuern (vgl. Eley 2012, S. 33). Das allgemeine Prinzip bei ereignisdiskreten Simulationswerkzeugen sowie wesentliche Elemente sind in Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Daher widmet sich dieser Abschnitt den programmspezifischen Elementen und der Bedienoberfläche von Plant Simulation (s. Abbildung 2.3). Dabei werden die Beschreibungen von Eley (2012, S. 33 ff.) und Bangsow (2008, S. 16 ff.) zu Grunde gelegt.

Die Bedien- oder Arbeitsoberfläche von Plant Simulation, auch TUNE-Fenster genannt, ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Für diese Arbeit wird Version 14 verwendet. Die wesentlichen Bereiche sind mit Kästchen markiert. Die *Klassenbibliothek* im linken Bereich enthält alle zur Erstellung eines Simulationsmodells wichtigen Bausteine und unterteilt sich in die

Gruppen Materialfluss, Flüssigkeiten, Ressourcen, Informationsfluss, Oberfläche, bewegliche Elemente (BEs), Benutzerobjekte, Tools und Modelle. In der *Toolbox* sind Bausteine aus den verschiedenen Klassen für einen Schnellzugriff enthalten. In dem *Netzwerkfenster* wird das Simulationsmodell erstellt und die *Konsole* dient zur Ausgabe von Informationen während der Simulation (vgl. Eley 2012, S. 33 f.).

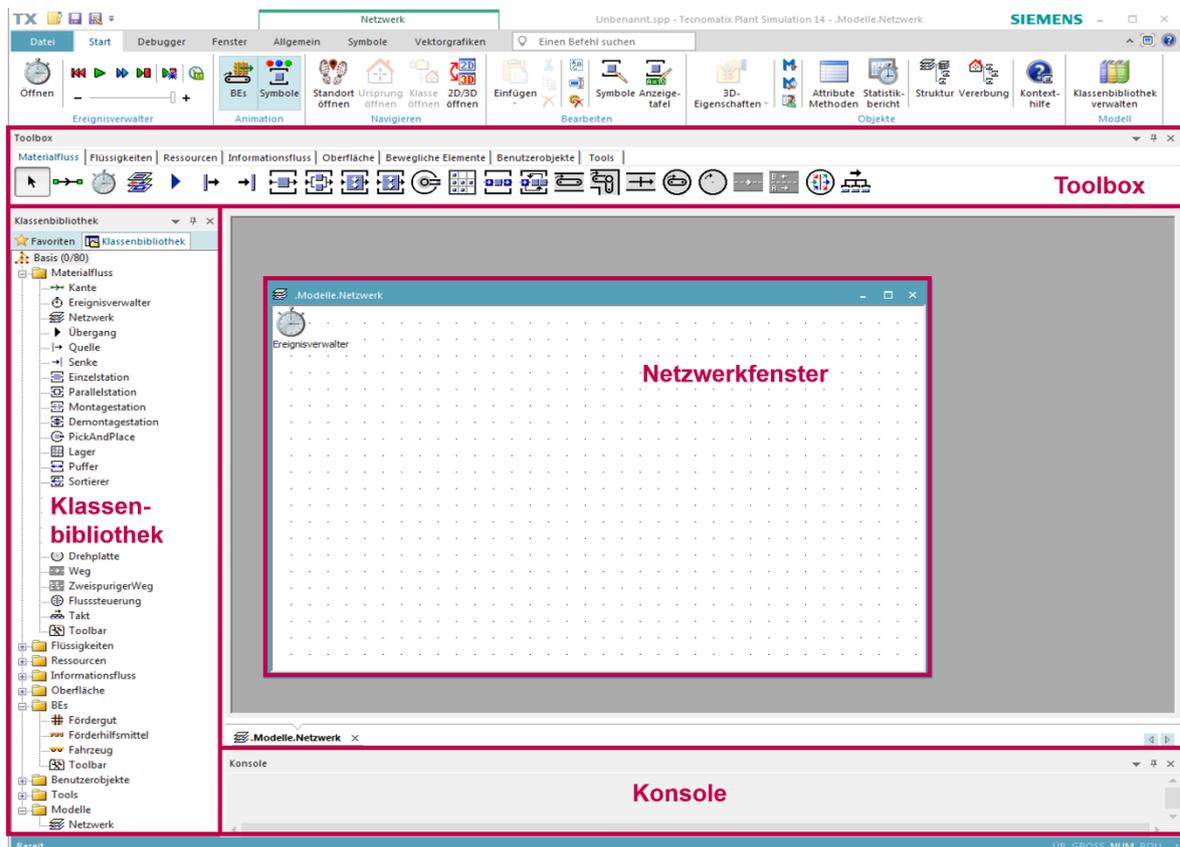


Abbildung 2.3: Bedienoberfläche von Plant Simulation

(Siemens Industry Software GmbH; vgl. Bangsow 2008, S. 16)

Die in Abschnitt 2.1.3 dargestellten Elemente ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge können den folgenden Bausteinen aus der Klassenbibliothek von Plant Simulation zugeordnet werden (vgl. Eley 2012, S. 34 f.). Die Zeitliste lässt sich dem Baustein *Ereignisverwalter* aus dem Ordner *Materialfluss* zuordnen, der die Steuerung der Simulationszeit und der Animationsgeschwindigkeit übernimmt. Für Entities sind im Ordner *BEs* die Bausteine *Fördergut*, *Förderhilfsmittel* und *Fahrzeug* zu finden. Ressourcen können über Bausteine aus den Ordnern *Ressourcen* und *Materialfluss* dargestellt werden (bspw. Einzelstation, Montagestation). Warteschlangen können unter anderem (u. a.) mittels des Bausteins *Sortierer* aus dem Ordner *Materialfluss* modelliert werden. Für Methoden wird der gleichnamige Baustein aus dem Ordner *Informationsfluss* verwendet, wo sich auch Bausteine zum Abspeichern von Informationen befinden (bspw. *Variable*, *Tabelle*, *Stapel*, *Karte*). Plant Simulation verfügt außerdem über Attribute, die einzelnen Bausteinen

zugeordnet sind. Zufallszahlen können mittels spezieller Verteilungsfunktionen, die das Programm zur Verfügung stellt, erzeugt werden. Diesbezüglich sei auf Eley (2012, S. 18 ff. 63 ff.) verwiesen.

Im Folgenden wird kurz beschrieben, welche Bausteine (auch Objekte genannt) in den einzelnen Ordnern der Klassenbibliothek enthalten sind (vgl. Eley 2012, S. 35 ff.).

- *Modelle*: Hier ist als einziger Baustein das *Netzwerk* enthalten, in dem das Simulationsmodell erstellt wird und die Materialfluss- und Informationsflussbausteine, Ressourcen oder Oberflächenbausteine abgelegt werden. Netzwerke können in bestehende Netzwerke integriert und miteinander verknüpft werden, um so bspw. bei großen Modellen mit Unternetzwerkern zu arbeiten.
- *BEs*: Mittels dieser Bausteine können Aufträge oder physische Objekte (Werkstücke, Transportbehälter, Fahrzeuge etc.) abgebildet werden, die innerhalb des Simulationsmodells bearbeitet werden. Durch den Baustein *Quelle* werden die BEs in der Regel erzeugt und von dem Baustein *Senke* vernichtet. Eine Unterscheidung erfolgt zwischen *aktiven* (Fortbewegung aus eigener Kraft, Beispiel: *Fahrzeug*) und *passiven* (Fortbewegung nur mithilfe anderer Bausteine, z. B. der *Förderstrecke* oder aktiver BEs, z. B. dem *Fahrzeug*) BEs.
- *Materialfluss*: Hier sind Bausteine enthalten, mit denen Maschinen, Lager- und Förder-technik abgebildet werden können (Beispiele: *Einzelstation*, *Parallelstation*, *Lager*). Außerdem gehören Bausteine zum Abbilden des physischen Transports (Beispiele: *Weg*, *Förderstrecke*) sowie logische Verknüpfungen (Beispiele: *Kante*, *Flusssteuerung*) dazu. In diesem Ordner sind auch *Quelle*, *Senke* und der *Ereignisverwalter* enthalten. Wie bei den BEs wird hier ebenfalls zwischen aktiven (Aufnahme von BEs und Abgabe nach einer bestimmten Zeit, Beispiel: *Einzelstation*, *Förderstrecke*) und passiven (keine automatische Weitergabe der BEs, Beispiel: *Lager*) Bausteinen unterschieden. Darüber hinaus ist zu beachten, dass Abmessungen von BEs für *längenbezogene* Bausteine (bspw. *Förderstrecke*, *Weg*) von Bedeutung sind, da die Maße bestimmen, wie viele BEs durch diese Bausteine aufgenommen werden können. Für *platz- und punktbezogene* Bausteine (Beispiel: *Einzelstation*) sind die Abmessungen nicht von Bedeutung.
- *Informationsfluss*: Hier steht der Baustein *Variable* zur Verfügung. Eine Variable ist ein benannter Ort im Speicher, an dem das Programm Informationen speichert. Dazu muss festgelegt werden, was gespeichert werden soll, wobei das Betriebssystem über Datentypen Informationen über die Speichergröße erhält. Der Datentyp regelt zulässige Operationen und legt den maximalen Wertebereich der Variable fest (Bangsow 2011,

S. 18 f.). Zum Speichern einer Zahl wird bspw. der Datentyp *Integer* verwendet, für eine Gleitkommazahl der Datentyp *Real* und für eine Zeichenkette der Datentyp *String*. Eine Übersicht über die elementaren Datentypen in Plant Simulation gibt Abbildung 8.1 in Anhang II. Komplexe Datenstrukturen können in Bausteinen wie *Tabelle*, *Liste* oder *Warteschlangen* verwaltet werden. Mittels des Bausteins *Methode* können Prozeduren und Funktionen programmiert werden, die zur Steuerung des Simulationsmodells dienen. Dazu nutzt Plant Simulation die Programmiersprache *SimTalk*, mit der Funktionen und Prozesse für den Aufbau, die Steuerung und die Analyse von Simulationsmodellen erstellt werden können. Nähere Informationen zur Programmierung mit SimTalk können Eley (2012) und Bangsow (2011) entnommen werden. Bausteine, die das Aufbauen von Schnittstellen zu anderen Programmen erlauben, sind hier außerdem enthalten (*Dateischnittstelle*, *Dateiverknüpfung*, *XMLSchnittstelle*, *Socket*).

- *Ressourcen*: Dieser Ordner enthält Bausteine wie den *Schichtkalender*, den *Arbeitsplatz* oder den *Werkerpool*.
- *Oberfläche*: Die Bausteine dieses Ordners dienen der Visualisierung von Informationen über den Modellzustand (Beispiele: *Diagramm*, *Display*) oder erlauben dem Anwender, Eingaben vorzunehmen (*Dialog*).
- *Flüssigkeiten*: In diesem Ordner stehen Bausteine zur Simulation von fließenden Materialien und Flüssigkeiten zur Verfügung (Beispiel: *Rohr*, *Tank*).
- *Tools*: Anhand der Werkzeuge in diesem Ordner können bspw. Analysen getätigt werden (Beispiele: *Energieanalyse*, *EngpassAnalyse*)

Da im weiteren Verlauf der Arbeit die Schnittstellen von Plant Simulation eine wesentliche Rolle spielen, wird an dieser Stelle kurz auf den Datenimport aus Excel und den Datenexport nach Excel eingegangen sowie auf den Baustein *Socket*. Diese Schnittstellen stellen nur einen kleinen Bereich der von Plant Simulation zur Verfügung gestellten Schnittstellen dar. Weitere Informationen zu diesem Thema, die an dieser Stelle aufgrund des Umfangs nicht darstellbar sind, können Bangsow (2011) und der Hilfe von Plant Simulation (Siemens Industry Software GmbH) entnommen werden.

Dynamic Data Exchange ermöglicht den Zugriff aus einem Programm auf ein anderes Programm. Somit können mit Plant Simulation u. a. Daten aus anderen Programmen eingelesen werden, Daten in andere Programme exportiert werden und sogar Methoden in anderen Programmen gestartet werden (s. dazu Bangsow 2011, S. 367 ff.). Als eine von vielen Möglichkeiten stellt SimTalk die Methode *leseExcelDatei* zur Verfügung, womit Daten

aus einer Excel-Datei in eine Tabelle oder Liste in Plant Simulation eingelesen werden können. Wichtig ist, dass Excel dafür auf dem Computer installiert ist. Ebenso kann mit der Methode *schreibeExcelDatei* der Inhalt einer Liste oder Tabelle in Plant Simulation in einer Excel-Datei gespeichert werden (Siemens Industry Software GmbH).

Der Baustein *Socket* ist erst in der Research-Lizenz in Plant Simulation nutzbar. Er stellt eine TCP/IP-Schnittstelle³ zur Verfügung, womit Plant Simulation mit anderen Anwendungen kommunizieren kann, die ebenfalls eine Socket-Schnittstelle besitzen. Sockets beschreiben in Rechnernetzwerken eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung, die es erlaubt, online Informationen auszutauschen. Aufbauend auf dem TCP/IP-Protokoll ist somit eine schnelle Datenübertragung möglich. Dabei stellt ein Prozess den Server dar, bei dem sich weitere Prozesse als Client anmelden können, wobei Plant Simulation sowohl als Client als auch als Server fungieren kann (Siemens Industry Software GmbH). Weitere Informationen zu Sockets und zur Kommunikation auf Basis von TCP/IP können Zahn (2006, S. 179 ff.) entnommen werden. Durch Sockets wird ebenfalls die Kommunikation per User Datagram Protocol (UDP) ermöglicht, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Die Parametrisierbarkeit des Socket-Bausteins ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

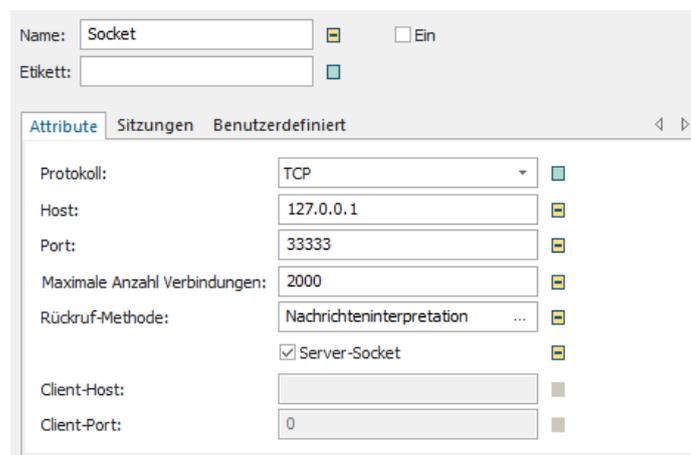


Abbildung 2.4: Socket in Plant Simulation (Siemens Industry Software GmbH)

Unter Protokoll kann zwischen TCP und UDP gewählt werden. In das Feld Host wird die IP-Adresse des gewünschten Kommunikationspartners eingetragen. Unter Port wird der zu nutzende Port eingetragen, womit die Zuordnung der (in diesem Fall) TCP-Verbindungen zu den Server- und Client-Programmen erfolgt. Es kann ausgewählt werden, ob der Socket als Client oder Server fungieren soll. Ist der Socket eingeschaltet, wartet er auf Nachrichten von Clients. Diese Nachrichten können als String (Zeichenkette) übermittelt werden (s.

³IP steht für Internet Protocol, womit Netzwerkteilnehmer über IP-Adressen adressiert werden können und damit eine Datenübertragung stattfinden kann.

TCP steht für Transmission Control Protocol und ist ein Transportprotokoll, das je zwei Kommunikationspartnern eine Ende-zu-Ende-Verbindung zur Verfügung stellt. Für diese und weiterführende Informationen vgl. Zahn (2006, S. 2 ff.).

Datentypen, Abbildung 8.1 in Anhang II) und in einer sogenannten Rückruf-Methode, die immer aufgerufen wird, sobald eine Nachricht empfangen wird, verarbeitet werden. So ist es möglich, in Plant Simulation auf bestimmte Nachrichten individuell zu reagieren (vgl. Siemens Industry Software GmbH). Eine nähere Spezifizierung der umfangreichen Schnittstellen von Plant Simulation und der Informationstechnik, die dabei genutzt wird, ist innerhalb dieser Arbeit nicht möglich. Für weitere Informationen wird daher auf die genannte Literatur verwiesen.

Nach der Darstellung der wichtigsten Grundlagen bezüglich ereignisdiskreter Simulationswerkzeuge und der zu nutzenden Software Plant Simulation wird im nächsten Abschnitt dargestellt, welche Schritte das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) beinhaltet, die letztendlich zu einem implementierten Simulationsmodell und Simulationsergebnissen führen.

2.1.5 Simulationsvorgehensmodell

Um Simulationsergebnisse in erforderlicher Qualität zu ermöglichen, liegt die Schwierigkeit bei der Simulation nach Rose und März (2011) u. a. in der Erstellung eines für die Lösung der Problemstellung geeigneten Simulationsmodells. Darum ist es besonders empfehlenswert, sich bei der Modellierung eines realen oder geplanten Systems und der Durchführung einer Simulationsstudie an etablierten Vorgehensmodellen zu orientieren, um gewünschte Ergebnisse zu erzielen. Die Erstellung des Konzepts zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillinges im Rahmen dieser Arbeit basiert daher auf dem Simulationsvorgehensmodell der Arbeitsgruppe „Validierung“ innerhalb der ASIM-Fachgruppe „Simulation in Produktion und Logistik“ (Rabe et al. 2008), das in Abbildung 2.5 dargestellt ist. Dieses Vorgehensmodell wurde seinerzeit in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 3633 von den genannten Autoren entwickelt und wird im Folgenden basierend auf der Beschreibung von Rabe et al. (2008, S. 4-8) vorgestellt.

Ausgangsbasis für die Simulationsstudie bildet hierbei eine gegebene Zielbeschreibung. Im weiteren Verlauf folgen fünf *Projektphasen*, in Abbildung 2.5 als Ellipsen dargestellt: Aufgabendefinition, Systemanalyse, Modellformalisierung, Implementierung und Experiment und Analyse. Jeder der Phasen wird ein *Phaseergebnis* in Form von Dokumenten, eines Modells oder einer Kombination aus beidem, zugeordnet (Rechtecke in Abbildung 2.5). Mittels einer Aufgabenspezifikation wird die Aufgabendefinition konkretisiert. Darauf folgt die Modellbildung: durch die Systemanalyse entsteht das Konzeptmodell, die Modellformalisierung ermöglicht die Erzeugung eines formalen Modells und die Implementierung führt zu einem ausführbaren Modell. Schließlich kommen mit der Phase Experimente und Analyse

die Simulationsergebnisse zustande. Wenzel et al. (2008) weisen darauf hin, dass das ausführbare Modell als das Primärziel der Modellerstellung gilt. Konzeptmodell und formales Modell sind damit eher als Zwischenergebnisse im Rahmen der Modellbildung zu betrachten (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 7). Die Zielbeschreibung ist kein Phasenergebnis, sondern als Ausgangsbasis einer Simulationsstudie zu verstehen.

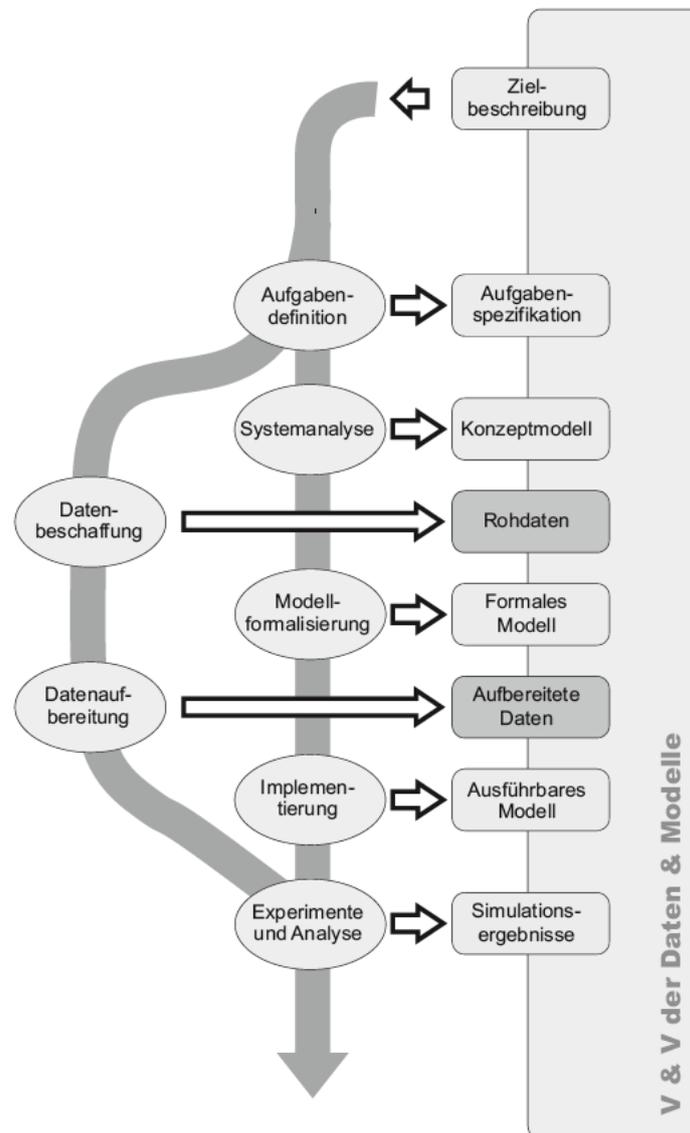


Abbildung 2.5: Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008, S. 5)

Bei der Betrachtung des Vorgehensmodells fällt auf, dass die Phasen der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung mit den zugeordneten Ergebnissen der Rohdaten und aufbereiteten Daten in einem parallelen Strang außerhalb der Reihenfolge der Modellierungsschritte abgebildet werden. Dies bedeutet nicht, dass erst nach dem Konzeptmodell Rohdaten entstehen oder diese vollständig zur Erstellung des formalen Modells vorliegen müssen. Entsprechend verhält es sich mit den aufbereiteten Daten. Vielmehr soll verdeutlicht

werden, dass für die Phase der Datenaufbereitung Rohdaten notwendig sind, die Datenbeschaffung auf den Ergebnissen der Aufgabenspezifikation basiert und die Nutzung des ausführbaren Modells für Experimente und Analysen nur mit aufbereiteten Daten möglich ist (vgl. Rabe et al. 2008, S. 6).

Begleitend zu jeder Phase, in Abbildung 2.5 als grauer Kasten auf der rechten Seite dargestellt, finden V&V der Daten und Modelle statt (s. auch Abschnitt 2.1.1). Würde die V&V lediglich mit Abschluss der Modellbildung erfolgen, können Fehler nicht frühzeitig erkannt und behoben werden. Dies kann zu hohen Kosten führen und wäre wirtschaftlich nicht zu rechtfertigen. Deshalb wird die V&V an allen Phasenergebnissen durchgeführt (nicht an den Phasen selbst, da V&V einen Gegenstand der Prüfung – also hier das jeweilige Phasenergebnis – erfordern). Die Ergebnisüberprüfung kann Rücksprünge und das erneute Durchlaufen vorheriger Phasen notwendig machen, wodurch es zu Iterationen innerhalb des Vorgehensmodells kommen kann. Auch wenn die Darstellung in Abbildung 2.5 aus Vereinfachungsgründen den Eindruck erwecken mag, dass das Vorgehen sequenziell ist, weisen Rabe et al. (2008) ausdrücklich darauf hin, dass es nicht als solches zu interpretieren ist, sondern hier lediglich die Richtung des grundsätzlichen Vorgehens dargestellt ist. Es ist daher grundsätzlich als iterativ zu betrachten. Voraussetzung für eine konsequente V&V bildet eine sorgfältige Dokumentation (vgl. Rabe et al. 2008, S. 7, 51; Wenzel et al. 2008, S. 8). Für die V&V stehen unterschiedlichste Techniken zur Verfügung, deren Anwendbarkeit von dem Gegenstand der Prüfung, also dem Phasenergebnis abhängig ist. Auf ein Ergebnis können somit nicht alle Techniken angewendet werden, es sind vielmehr geeignete Techniken auszuwählen. Welche Techniken in welcher Phase angewendet werden können, ist in Abbildung 11 von Rabe et al. (2008, S. 113) dargestellt. Weiterführende Informationen zu V&V Techniken bezogen auf das Simulationsvorgehensmodell können Rabe et al. (2008, S. 93 ff.) oder Gutenschwager et al. (2017, S. 202 ff.) entnommen werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Phasen des Simulationsvorgehensmodells mit den jeweiligen Phasenergebnissen kurz beschrieben. Die Beschreibungen werden dabei aus den Angaben von Rabe et al. (2008, S. 45 ff.) und Gutenschwager et al. (2017, S. 144 f.) entnommen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass für jede Phase eine Dokumentenstruktur von Rabe et al. (2008, S. 55-92; S. 207-215) entworfen wurde. Diese ist in „Anhang I – Dokumentenstrukturen“ zu finden und bildet die Orientierung für die spätere Modellerstellung

In der *Zielbeschreibung* als Ausgangsbasis des Vorgehensmodells wird das mittels der Simulation zu lösende Problem strukturiert beschrieben. Auch der Einsatz von Simulation als die Methode zur Problemlösung sollte hier begründet sein.

Mittels der *Aufgabendefinition* als erste Phase wird die Zielbeschreibung des Auftraggebers konkretisiert und vervollständigt. Sie dient dazu, ein gemeinsames Grundverständnis bei Auftragnehmer und -geber zu erzeugen und zu klären, ob und wie die Aufgabe gelöst werden soll. Neben der Zielbeschreibung werden hierfür auch Lasten- und Pflichtenhefte sowie Angebote herangezogen. Das Ergebnis der Phase stellt die *Aufgabenspezifikation* dar. Sie ist durch das Vorliegen einer detaillierten Aufgabenbeschreibung charakterisiert, die von Auftragnehmer und -geber einheitlich verstanden und getragen wird. Gleichzeitig soll unter allen Beteiligten die Meinung herrschen, dass die Umsetzbarkeit durch die vorgesehenen Mittel und im angedachten Zeit- und Kostenrahmen möglich ist. Demnach wird hier ein gemeinsames Grundverständnis der Beteiligten geschaffen.

Durch die *Systemanalyse* wird von Auftragnehmer und -geber gemeinsam aus dem realen oder geplanten System das Konzeptmodell abgeleitet. In dieser Phase werden wesentliche Voraussetzungen für ein zielkonformes und effizientes Simulationsmodell geschaffen. Ziel ist die Festlegung, welche Elemente des abzubildenden Systems mit welchen Mechanismen und in welchem Detaillierungsgrad innerhalb welcher Systemgrenzen zu modellieren sind. Wichtig ist hierbei, dass irrelevante oder nebensächliche Aspekte nicht zu detailliert abgebildet, gleichzeitig aber wesentliche Aspekte nicht vernachlässigt werden. Es erfolgt die Erarbeitung einer „Dokumentation des zu entwickelnden Simulationsmodells mit seinen Zielsetzungen, Eingaben, Ausgaben, Elementen und Beziehungen, Annahmen und Vereinfachungen“ (Rabe et al. 2008, S. 48). Damit entsteht ein *Konzeptmodell*, das (bspw. anhand von Graphiken, Ablaufdiagrammen, Beschreibungen) konkretisiert, wie die beschriebene Aufgabe zu lösen ist und den Modellumfang sowie den erforderlichen Detaillierungsgrad festlegt. Es muss für alle Beteiligten verständlich sein.

Bei der *Modellformalisierung* wird das Konzeptmodell in das formale Modell überführt, das zum einen eine Implementierung durch Simulations- oder Softwareexperten ohne weitere fachliche Analyse oder Abstimmung erlauben und außerdem unabhängig von den zu verwendenden Simulationswerkzeugen sein soll. Auch wenn ein ausnahmslos formales Modell, das beiden Kriterien gerecht wird, in der Praxis aufgrund von Formalisierungen im Konzeptmodell oder einer Orientierung an der zur verwendenden Software selten entstehen wird und die Abgrenzung zwischen Konzeptmodell, formalem und ausführbarem Modell dadurch nicht immer eindeutig ist, ist diese Phase nach Rabe et al. trotzdem erforderlich. Besonders für die V&V ist sie von Bedeutung, da ein gewisser Formalisierungsgrad gefordert und demnach auch überprüfbar ist.

Aus der *Implementierung* resultiert das *ausführbare Modell*, auch Simulationsmodell oder Computermodell, als Ergebnis der Phase. Hierbei entsteht zunächst vorbereitend eine auf

das Simulationswerkzeug zugeschnittene Modellbeschreibung, bevor schließlich die tatsächliche Umsetzung bzw. Implementierung in das gewählte Simulationswerkzeug durch Simulationsfachleute oder Softwareexperten vorgenommen wird.

Parallel zu den Phasen der Modellbildung (Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung) stellt die Behandlung von Daten ein wichtiges Element innerhalb des Vorgehensmodells dar. Es erfolgt eine Unterteilung in die Datenbeschaffung und die Datenaufbereitung. Grund dafür sind Zuständigkeiten, da die Datenbeschaffung hauptsächlich durch die IT-Verantwortlichen und Fachexperten und die Datenaufbereitung durch die Simulationsfachleute vorgenommen wird (vgl. Rabe et al. 2008, S. 51).

Innerhalb der *Datenbeschaffung* werden Daten für das reale oder geplante System bereitgestellt, die bspw. aus Aufzeichnungen von Produktionsdaten stammen oder Planungsdaten des Unternehmens sein können. Hierbei bestimmen die Aufgabenspezifikation und das Konzeptmodell die Art und den Umfang der erforderlichen Daten. Wie die Daten für das Simulationsmodell genutzt werden, ist hierbei nicht zwangsweise relevant für die IT-Verantwortlichen und Fachexperten, die die Daten operativ zur Verfügung stellen. So kann es bspw. notwendig sein, aus Vergangenheitsdaten statistische Verteilungen abzuleiten um Zufälligkeiten im Modell bezüglich Störungen generieren zu können. Operativ erfolgt hierfür in diesem Schritt die Erfassung der Stördaten. Die Beschaffbarkeit der Daten beeinflusst umgekehrt auch wieder das Konzeptmodell. Das Phasenergebnis stellen *Rohdaten* dar, die bezüglich Struktur und Formate unmittelbar aus den Datenquellen hervorgehen sollten (vgl. Rabe et al. 2008, S. 51 f.).

Die *Datenaufbereitung* stellt anschließend eine Aufbereitung der Rohdaten durch Simulationsfachleute dar, damit diese *aufbereiteten Daten* als Phasenergebnis für das ausführbare Modell und dadurch für die Experimente und Analysen genutzt werden können. Dies umfasst bspw. Datenfilterung, Transformation in eine andere Struktur oder, wie soeben angesprochen, die Ableitung statistischer Verteilungen aus den erfassten Rohdaten, die dann als Eingabedaten verwendbar sind (vgl. Rabe et al. 2008, S. 52). Auf die verschiedenen Verteilungsfunktionen kann in dieser Arbeit nicht eingegangen werden. Es sei deshalb auf Eley (2012, S. 20) verwiesen, wo einige für die ereignisdiskrete Simulation bedeutsame Verteilungsfunktionen dargestellt werden. Außerdem müssen die Daten hinsichtlich ihrer Eignung für die Aufgabenstellung validiert werden

Als Voraussetzung für die Durchführung der Phase *Experiment und Analyse* werden das ausführbare Modell und die aufbereiteten Daten zusammengeführt. In dieser Phase werden mittels der Durchführung vorher festgelegter Experimente Schlussfolgerungen für das zu untersuchende System abgeleitet, was die *Simulationsergebnisse* darstellt. Da die Durchführung von Experimenten nicht im Rahmen dieser Arbeit stattfinden kann, wird für

weitere Informationen zu dieser Phase auf Rabe et al. (2008, S. 50 f.) verwiesen. Simulationsexperimente sind außerdem in Abschnitt 2.1.1 erläutert.

Durch das systematische Vorgehen werden Fehlerrisiken gemindert und die zu erwartende Qualität erhöht. Um trotzdem falsche, unvollständige oder für das Problem ungeeignete Ergebnisse auszuschließen, ist, wie oben beschrieben, eine begleitende V&V der Phasenergebnisse durchzuführen.

Mit den Beschreibungen in diesem Abschnitt sind die für diese Arbeit wesentlichen Grundlagen in Bezug auf die Simulation thematisiert. Im Folgenden wird der Stand der Fachliteratur in Bezug auf die Industrie 4.0 und den Digitalen Zwillen dargestellt, bevor das hier dargestellte Simulationsvorgehensmodell in Kapitel 3 auf die Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation ausgerichtet wird.

2.2 Industrie 4.0

„Industrie 4.0“, so lautet der Name des Zukunftsprojekts der deutschen Bundesregierung, das im Rahmen des Aktionsplans „Hightech-Strategie 2020“ verabschiedet wurde (Plattform Industrie 4.0 2018b). Ziel ist es, hiermit die internationale Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu stärken und das Potenzial zur Vorreiterrolle zu nutzen (acatech und Forschungsunion 2013, S. 5 ff.; Kagermann et al., 2011). Der von dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) eingesetzte Arbeitskreis Industrie 4.0 publizierte im April 2013 den Bericht „Umsatzempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“ (acatech und Forschungsunion 2013), in dem „die Voraussetzungen für den erfolgreichen Aufbruch ins vierte industrielle Zeitalter“ (Plattform Industrie 4.0 2018b) beleuchtet werden. Anhand dieser Formulierung wird der Umfang deutlich, der diesem Zukunftsprojekt zugesprochen wird. Auch bereits in einem Artikel in VDI nachrichten vom 1. April 2011 (Kagermann et al., 2011) fällt der Begriff „Industrie 4.0“ im Zusammenhang mit einer vierten industriellen Revolution. Auf Basis des sogenannten Internets der Dinge und Dienste, innerhalb dessen eine Vernetzung aller an der Produktion beteiligten Akteure, also Maschinen, Menschen, Produkte und auch Unternehmen, ermöglicht wird, und weiterer technologischer Entwicklungen, wie CPS, soll die Industrie also ein viertes Mal revolutioniert werden (vgl. acatech und Forschungsunion 2013, S. 17). Auch wenn es Gegenstimmen bezüglich dieses Standpunktes gibt, die hier bspw. eher eine „Evolution“ anstelle einer „Revolution“ sehen (vgl. bspw. Mertens et al. 2017, S. 102; Obermaier 2017b, S. 4) und den Ausruf zu einer vierten industriellen Revolution ex ante, also im Voraus, kritisieren, ist die Brisanz der Thematik Motivation genug, sich mit ihr und ihren Bestandteilen zu befassen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit erfolgt eine Betrachtung des Digitalen Zwillinges als ein Konzept, das im Kontext von Industrie 4.0 große Bedeutung erlangt. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein kurzer Überblick zur historischen Entwicklung, zu Definitionen aus der Fachliteratur sowie zu Bestandteilen, Grundsätzen, Treibern und Potenzialen von Industrie 4.0 gegeben, um ein Grundverständnis zu schaffen. Dies ist bedeutend, um Merkmale und Anforderungen an zukünftige Produktions- und Logistiksysteme darzustellen, bei denen der Digitale Zwilling gewinnbringend genutzt werden kann und daraus neue Anforderungen an die ereignisdiskrete Simulation und an Simulationsmodelle ableiten zu können, die im Rahmen des Digitalen Zwillinges zum Einsatz kommen sollen.

2.2.1 Historische Entwicklung

Die Tatsache, dass mit der Bezeichnung „Industrie 4.0“ bereits bei der Verabschiedung als Zukunftsprojekt eine vierte industrielle Revolution angekündigt wird (vgl. acatech und Forschungsunion 2013, S. 17), lässt es sinnvoll erscheinen, den Industrialisierungsprozess von der ersten bis zur vierten industriellen Revolution zu betrachten, um das Thema besser erfassen zu können.

Die Mechanisierung Ende des 18. Jahrhunderts durch die Nutzung von Wasser- und Dampfkraft als Ersatz für Muskelkraft in der Produktion kennzeichnet die **erste industrielle Revolution** (Obermaier 2017b, S. 3). Sie begründet den Wandel zur industriellen Fertigung und beeinflusst mit der Dampfmaschine als eine bahnbrechende Erfindung nahezu alle Bereiche, wie bspw. die Textilindustrie, die der mechanische Webstuhl von 1784 revolutionierte (Huber, D. und Kaiser 2017, S. 18; acatech und Forschungsunion 2013, S. 17).

Die Einführung arbeitsteiliger Massenproduktion unter Verwendung von Fließbändern und elektrischer Energie sowie die Entwicklung von Verbrennungsmotoren stellen die zentralen Bestandteile der **zweiten industriellen Revolution** Ende des 19. Jahrhunderts bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts dar. Die Transportbänder in den Schlachthöfen von Cincinnati (1870) und die Ford T-Model-Fertigung (1914) sind bekannte Meilensteine dieser Stufe. Eine erhebliche Beschleunigung und Kostensenkung der Produktion sind die Folgen (Artischewski 2014, S. 7). Antriebe mittels elektrischer Energie ermöglichen eine Dezentralisierung (im Gegensatz zu zentralem Antrieb), der Ausbeutung der Fabrikarbeiter wird entgegengewirkt, Gewerkschaften gewinnen an Bedeutung und es wird „die Basis für unsere heutige konsumorientierte Wohlstandsgesellschaft gelegt“ (Bauernhansl 2014, S. 7).

Die heute noch andauernde **dritte industrielle Revolution** beginnt Anfang der 1960er Jahre, basiert auf dem Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien und treibt die „Automatisierung und Standardisierung weiterer Bereiche der Fertigung, aber auch vieler administrativer Prozesse“ (Obermaier 2017b, S. 3) weiter voran⁴. Wesentlich ist hier die Erfindung der ersten speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) im Jahr 1969 (vgl. auch acatech und Forschungsunion 2013, S. 18). Rationalisierung ist die Folge, gleichzeitig wird auch eine variantenreiche Serienproduktion unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich. Durch die Entwicklung vom Verkäufer- zum Käufermarkt, getrieben durch die Sättigung vieler Märkte, wird es notwendig, individueller werdenden Käuferwünschen nachzukommen (vgl. Bauernhansl 2014, S. 7). Durch das Ende des Kalten Krieges kann die Globalisierung weiter voranschreiten, viele Länder entwickeln sich zu Dienstleistungsgesellschaften, wobei Deutschland eine, von anderen europäischen Ländern als den Wandel verpassendes Land

⁴ Es sei an dieser Stelle außerdem darauf hingewiesen, dass manche Autoren das Thema Industrie 4.0 noch als Teil der andauernden dritten industriellen Revolution sehen (vgl. Obermaier 2017b, S. 3 f.).

kritisierte, Ausnahme bildet. Primär auf Grund des anhaltend relativ hohen Industrieanteils von 20 bis 25 Prozent an der Bruttowertschöpfung schafft es Deutschland jedoch, sich vergleichsweise schnell von der Finanzmarktkrise in 2007/2008 zu erholen (vgl. Bauernhansl 2014, S. 7 f.). Als Lehre aus der Krise nehmen sich andere Länder ein Beispiel an Deutschland und sind heute dabei, die produktive Wertschöpfung im eigenen Land wieder stark auszubauen (Bauernhansl 2014, S. 9 f.).

Die ersten drei industriellen Revolutionen wurden demnach mittels technologischer Neuerungen getrieben durch die sich entsprechend ändernden gesellschaftlichen Bedürfnisse initiiert und hatten wiederum erheblichen Einfluss auf die Evolution der Gesellschaft. Nach „*Mechanisierung, Automatisierung und Digitalisierung*“ (Obermaier 2017b, S. 3) folgt nun **in der vierten Stufe** die „*Vernetzung von industrieller Infrastruktur*“ (Obermaier 2017b, S. 3) in Echtzeit innerhalb des Internets der Dinge auf der Basis cyber-physischer Systeme (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 6). Definitionen sind im folgenden Abschnitt aufgeführt. Die beschriebene Tatsache, dass sich Deutschland über die Zeit eine solide industrielle Basis erhalten hat und dadurch wertvolle Expertise entwickeln konnte, prädestiniert das europäische Land zu einer Vorreiterrolle bei der Gestaltung der vierten industriellen Revolution (vgl. Kagermann et al., 2011). Die Notwendigkeit, neue Wege auf Grundlage junger technologischer Entwicklungen einzuschlagen, wird auch heute durch gesellschaftliche Bedürfnisse veranlasst: stark zunehmende Nachfrage nach individualisierten Produkten, die Betriebe innerhalb absehbarer Zeit bis hin zur wirtschaftlichen Fertigung der „Losgröße 1“ zwingt und ein gleichzeitig hoher Qualitätsanspruch sowie sinkende Bereitschaft, mehr Geld für solche Produkte zu zahlen, sind wesentliche Trends (vgl. Hofmann 2017, S. 255; Obermaier 2017b; Bracht et al. 2011, S. 1; VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 5).

Abbildung 2.6 visualisiert den Industrialisierungsprozess von der ersten bis zur vierten industriellen Revolution mit den wesentlichen Entwicklungen. Außerdem verdeutlicht sie, dass die vierte Stufe erst begonnen hat und sich noch in der Konzeptionsphase befindet. Es ist daher noch weitestgehend unklar, welche weiteren Veränderungen die industriellen Prozesse tatsächlich in den kommenden Jahren erfahren werden. Eine industrielle Revolution im Voraus anzukündigen, wie es in diesem vierten Fall zum ersten Mal erfolgt, ist umstritten und wird teils stark kritisiert, da eine fundierte Beurteilung erst im Nachgang, also ex post, möglich ist (vgl. Obermaier 2017b, S. 4; Mosler 2017, S. 494; Hermann et al. 2016, S. 3928). Ein großer Spielraum an Interpretationen und sich unterscheidender Visionen bzw. Zukunftsszenarien bezüglich Industrie 4.0 ist die Folge.

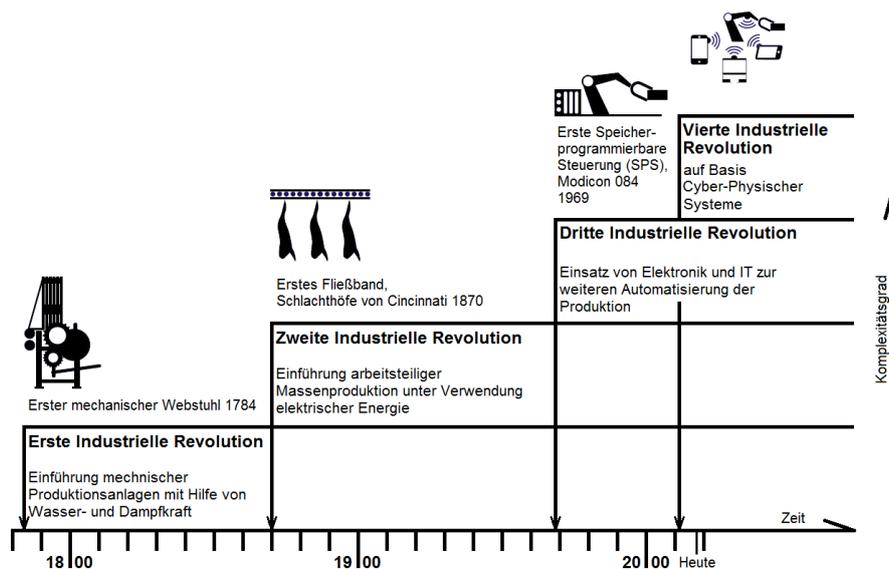


Abbildung 2.6: Der Industrialisierungsprozess von der ersten bis zur vierten industriellen Revolution (eigene Darstellung in Anlehnung an acatech und Forschungsunion 2013, S. 17)

Auf der vertikalen Achse der Abbildung 2.6 ist verdeutlicht, dass der Komplexitätsgrad im Zeitverlauf deutlich angestiegen ist bzw. weiterhin kontinuierlich ansteigt. Durch die zunehmende Vernetzung in der vierten Stufe und eine Bewegung von der Zentralisierung zur Dezentralisierung wird auch hier die Komplexität in besonderem Maße weiterhin ansteigen (vgl. Obermaier 2017b, S. 20 f.). Innovationen und Entwicklungen auf Basis von Industrie 4.0 sollen jedoch gleichzeitig eine Antwort auf die steigende Komplexität liefern, zu höherer Transparenz und damit zur besseren Bewirtschaftung und Bewältigung dieser steigenden Komplexität beitragen (vgl. Bauernhansl 2014, S. 18; Bauernhansl et al. 2016). Der Paradigmenwechsel, in dem wir uns derzeit mit Industrie 4.0 befinden, wird laut Bauernhansl (2014) „viele Branchen aufgrund neuer Geschäftsmodelle stark verändern“ (Bauernhansl 2014, S. 33). Dank des hohen Industrieanteils und der daraus resultierenden Expertise, stelle diese Entwicklung für Deutschland „eine große Chance dar, die industrielle Produktion in Deutschland zu halten bzw. auszubauen“ (Bauernhansl 2014, S. 33).

Im folgenden Abschnitt 2.2.2 werden Definitionen von Industrie 4.0 für den weiteren Verlauf dieser Arbeit herausgearbeitet bevor die angesprochenen Innovationen und Entwicklung innerhalb dieser vierten industriellen Epoche näher beschrieben werden und deren Konsequenzen für zukünftige Produktions- und Logistiksysteme herausgestellt werden.

2.2.2 Definition

Durch die Betrachtung des Industrialisierungsprozesses von der ersten bis zur vierten industriellen Revolution in Abschnitt 2.2.1 wird u. a. deutlich, dass der Beginn der vierten Stufe mit Industrie 4.0 als Zukunftsprojekt im Rahmen der Hightech-Strategie 2020 der deutschen Bundesregierung (Plattform Industrie 4.0 2018b; BMBF-Internetredaktion 2017) erst in diesem Jahrzehnt angestoßen wurde und sich somit noch in der Konzeptionsphase befindet. Sucht man nach Fachliteratur zu dem Thema, stößt man auf eine sehr große Anzahl an Artikeln, Büchern und Publikationen, die sich mit der Thematik an sich, Teilthemen, Konzepten, Auswirkungen, Zukunftsszenarien oder sonstigem auseinandersetzen. Kurz gesagt: Industrie 4.0 ist „in fast aller Munde“ (Dais 2017, S. 259) und somit ein Thema mit hoher Brisanz, nicht nur in Deutschland. Unter Begriffen wie „Advanced Manufacturing“, „Smart Manufacturing“, „Smart Production“ oder „Industrial Internet“ setzen sich auch andere Nationen mit Themen der digitalen Vernetzung und intelligenten Systemen in Bezug auf die Produktion auseinander (acatech und Forschungsunion 2013, S. 71).

Hermann et al. (2016, S. 3928) sehen die Faszination für Industrie 4.0 in zwei Punkten begründet: Einerseits wird eine industrielle Revolution erstmals im Vorhinein vorausgesagt, wodurch eine aktive Mitgestaltung möglich ist. Zum anderen wird der Einfluss auf die Wirtschaft als sehr wesentlich prognostiziert, da Industrie 4.0 eine erhebliche betriebliche Effizienzsteigerung und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, Services und Produkte verspreche. Die Tatsache, dass noch weitestgehend offen ist, wohin die Entwicklungen führen werden, ist sicherlich ein Grund, warum in der Literatur viele unterschiedliche Betrachtungsweisen der Thematik zu finden sind und keine Einstimmigkeit bezüglich des Potenzials herrscht, das Industrie 4.0 mit sich bringt. Eine einheitliche, allumfassende Definition für Industrie 4.0 zu finden, gestaltet sich daher zum jetzigen Zeitpunkt als äußerst schwierig oder gar unmöglich. Aus diesen Gründen werden an dieser Stelle einige Beschreibungen und Betrachtungsweisen aus ausgewählten Quellen aufgeführt, um die für den weiteren Verlauf der Arbeit wichtigen Merkmale zukünftiger Produktions- und Logistiksysteme im Kontext von Industrie 4.0 herausarbeiten zu können. Außerdem werden in Abschnitt 2.2.3 wesentliche Bestandteile erläutert, die in Begriffsbestimmungen oder vermehrt in der Fachliteratur genannt werden. Sie sollen sowohl zum Verständnis der Definitionen als auch zur Erfassung der Thematik Industrie 4.0 beitragen.

Die erste Definition (Definition 1), die an dieser Stelle aufgeführt wird, stammt aus den „Umsatzempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0“. Diese wurden von dem Arbeitskreis Industrie 4.0 (eingesetzt von dem BMBF) erarbeitet und sind im April 2013 erschienen (vgl. Plattform Industrie 4.0 2018b): „*Industrie 4.0 meint im Kern die technische Integration*

von CPS in die Produktion und die Logistik sowie die Anwendung des Internets der Dinge und Dienste in industriellen Prozessen – einschließlich der sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Wertschöpfung, die Geschäftsmodelle sowie die nachgelagerten Dienstleistungen und die Arbeitsorganisation“ (acatech und Forschungsunion 2013, S. 18).

Die zweite Definition (Definition 2), die hier betrachtet wird, stammt von der Internetseite der „Plattform Industrie 4.0“⁵: *„Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie“⁶ (Plattform Industrie 4.0 2018c).*

Eine weitere Begriffsbestimmung (Definition 3) aus Sicht der Produktionswissenschaften liefert der „WGP-Standpunkt Industrie 4.0“⁷ aus dem Jahr 2016 von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, der unter anderem das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) leitet: *„Der Kern der vierten industriellen Revolution ist das Internet der Dinge und die neuen Möglichkeiten, Ressourcen, Dienste und Menschen in der Produktion auf Basis Cyber-physischer Systeme in Echtzeit zu vernetzen. Nicht die Digitalisierung ist also das Revolutionäre, sondern die Möglichkeiten der Vernetzung technischer Systeme in Echtzeit sowie das, was uns die IT heute und zukünftig bietet, nämlich die Kommunikation und Datenhaltung per Internettechnologien sowie die exponentielle Steigerung der Rechenleistung“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 6).*

In der unter Beauftragung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) durchgeführten Studie „Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand“ wurde die folgende Definition herausgearbeitet (Definition 4):

„Industrie 4.0 ist ein Metabegriff für die Weiterentwicklung der Produktions- und Wertschöpfungssysteme durch die Verknüpfung der realen und der digitalen Welt. Diese Verknüpfung entsteht durch sich selbststeuernde CPS, die mit eingebetteten Systemen ausgestattet sind. Industrie 4.0 beschreibt die vertikale (innerhalb eines Unternehmens) und die horizontale Verknüpfung dieser CPS (sowohl über mehrere Unternehmensbereiche als auch über mehrere Unternehmen entlang der Supply Chain hinweg) zur effizienten, dezentral organisierten und flexiblen Produktion von Erzeugnissen oder Durchführung von Dienstleistungen.“ (Bischoff et al. 2015, S. 12)

⁵ Plattform Industrie 4.0: Gemeinschaftsprojekt mehrerer deutscher Industrieverbände unter Leitung des Bundeswirtschafts- und Bundesforschungsministeriums zur Fortführung und Weiterentwicklung des Zukunftsprojekts Industrie 4.0 der deutschen Bundesregierung, gegründet in 2013 (vgl. Obermaier 2017b, S. 7; Plattform Industrie 4.0 2018b).

⁶ Nach dem Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2013) sind unter dem Begriff IKT alle technischen Geräte und Einrichtungen zusammengefasst, die „Informationen aller Art digital umsetzen, verarbeiten, speichern und übertragen können“ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung 2013, S. 6).

⁷ WGP: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e. V.

Grund für die Auswahl dieser vier Definitionen ist, dass sie zum einen aus Quellen stammen, die als richtungsweisend bezüglich der Thematik Industrie 4.0 angesehen werden können und zum anderen, weil sie in Summe wesentliche Begriffe enthalten, die in der Fachliteratur vermehrt im Kontext von Industrie 4.0 genannt werden. Somit können sie als ein repräsentativer Querschnitt der in der Fachliteratur zu findenden Beschreibungen betrachtet werden und vermitteln ein Verständnis für den Terminus Industrie 4.0. Die Konsequenzen der in den Definitionen genannten Entwicklungen und Voraussetzungen werden teilweise in den Definitionen 1 und 4 aufgeführt: Neue Geschäftsmodelle, dezentrale Organisation sowie eine effizientere und flexiblere Produktion sind einige dieser Folgen. Sie sind wesentlich, um aktuelle Herausforderungen, wie die kundenindividuelle Produktion, zu ermöglichen und den Kundennutzen zu erhöhen (vgl. acatech und Forschungsunion 2013, S. 19 f.).

Im folgenden Abschnitt 2.2.3 werden wichtige Begrifflichkeiten und Paradigmen in Industrie 4.0 erläutert werden, die zum einem besseren Verständnis der Definitionen verhelfen.

2.2.3 Bestandteile und Paradigmen

Neue technologische Entwicklungen bergen Potenziale, um gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen begegnen zu können (s. Treiber in Abschnitt 2.2.4). Indem diese neuen Möglichkeiten in der Industrie Anwendung finden, erfahren Wertschöpfungs-systeme einen Paradigmenwechsel. In diesem Abschnitt werden neue Bestandteile und Paradigmen von Industrie 4.0 erläutert, um in Abschnitt 2.2.6 den Einfluss auf zukünftige Produktions- und Logistiksysteme zusammenfassend darstellen zu können.

2.2.3.1 Bestandteile von Industrie 4.0

Im Kontext zu Industrie 4.0 fällt sehr häufig der Begriff der **Cyber-physischen Systeme** (CPS). Diese nutzen als weiterentwickelte mechatronische Systeme „Elemente der Mechanik, Elektronik und Informatik“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 6), um Objekte der realen Welt mit Sensorik, eingebetteten Systemen und Aktorik auszustatten und diese zu vernetzen. Zudem verfügen sie über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen (vgl. acatech 2011, S. 13; Bischoff et al. 2015, S. 9; Bauernhansl 2014, S. 15 f.). **Sensoren** werden grundsätzlich zur „quantitativen und qualitativen Messung von physikalischen, chemischen, klimatischen, biologischen und medizinischen Größen“ (Hering und Schönfelder 2012, S. 1) genutzt. Innerhalb des CPS dienen sie somit zur unmittelbaren Aufnahme der Daten und ermöglichen die genaue Erfassung des Ist-Zustandes des Objekts und seiner Umgebung. **Eingebettete Systeme** sind nach Marwedel (2008) „informationsverarbeitende Systeme, die in ein größeres Produkt integriert sind“ (Marwedel

2008, S. 1). Bekannte Beispiele in Fahrzeugen sind Airbags oder Tempomaten. Das Besondere an CPS ist, dass die dort eingebetteten Systeme über digitale Kommunikationseinrichtungen untereinander vernetzt sind, also in Echtzeit kommunizieren können und in Verbindung mit Internettechnologien in lokale oder globale Netzwerke integriert sind (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 6 f.; acatech 2011, S. 13). Somit können sie zusätzlich zu den erfassten Sensordaten öffentlich verfügbare Daten und Dienste, auch solche von anderen CPS, nutzen. **Aktoren** wandeln numerische Werte in physikalische Größen um (Marwedel 2008, S. 2) und erlauben CPS eine Einwirkung auf deren Umwelt. Ein Beispiel für Aktoren sind Motoren. Demnach führen CPS die reale mit der virtuellen Welt zusammen, indem sie relevante Größen durch Sensoren aufnehmen, diese und zusätzlich verfügbare Daten und Dienste mittels vernetzter, in lokalen und globalen Netzwerken integrierter, eingebetteter Systeme nutzen, auswerten, verarbeiten, speichern und kommunizieren. Sie können sich selbst steuern und anhand von Aktoren auf physikalische Prozesse einwirken. So interagieren CPS aktiv oder reaktiv mit und zwischen der physikalischen und digitalen Welt (vgl. acatech 2011, S. 13; Huber, W. 2018, S. 30; Bauernhansl et al. 2016, S. 6 f.).

Die Infrastruktur zur Vernetzung und Kommunikation von CPS stellt das Internet der Dinge (englisch: Internet of Things) bereit, das ebenso wie das Internet der Dienste (englisch: Internet of Services) als ein wichtiger Baustein von CPS verstanden werden kann, um Identifikation und Vernetzung zu ermöglichen (vgl. Bischoff et al. 2015, S. 10; Siepmann 2016b, S. 25 f.). Das **Internet der Dinge** ist damit ein weiterer wesentlicher Begriff im Kontext von Industrie 4.0 und beschreibt eine Repräsentation und Vernetzung physikalischer Objekte innerhalb des Internets oder einer ähnlichen Netzwerkinfrastruktur (Kaufmann 2015, S. 6; acatech und Forschungsunion 2013, S. 85). Es baut auf der Vision des „Ubiquitous Computing“ (englisch: „ubiquity“, deutsch „Allgegenwart“) von Weiser (1991) auf, was eine Allgegenwärtigkeit von rechnergestützter Informationsverarbeitung sowie deren Integration in die Umgebung ohne direkte Wahrnehmung durch den Nutzer beschreibt. Objekte (bspw. Materialien, Produkte, Maschinen) werden so mit Intelligenz ausgestattet (Smart Products), haben mittels einer eigenen IP-Adresse⁸ eine eindeutige Identität im Internet der Dinge und können bspw. durch RFID-Tags⁹ identifiziert werden. Zentral ist, dass sie außerdem mit Hilfe von Internettechnologien zur Kommunikation und Interaktion befähigt werden (vgl. Scheer 2017, S. 36; acatech und Forschungsunion 2013, S. 85; Siepmann 2016b, S. 23). Diese intelligenten, vernetzten Objekte können als Teil des Internets der Dinge Informationen über sich selbst, ihren Zustand und ihre Umwelt (in

⁸ IP ist die Abkürzung für „Internet Protocol“. Die IP-Adresse erlaubt eine eindeutige Identifizierung zur direkten Ansprache und Steuerung eines Geräts innerhalb des Internets (vgl. Siepmann 2016b, S. 26).

⁹ RFID ist die Abkürzung für „Radio Frequency Identification“. RFID-Tags stellen intelligente Etiketten dar (Hompele 2007, XXXI).

Echtzeit) an das Netzwerk weitergeben und selbständig Steuerungsentscheidungen vor Ort treffen. Das Internet der Dinge trägt damit bedeutend zur Fusion der virtuellen und physischen Welt bei (vgl. Schlick et al. 2014, S. 57 ff.; Hompel 2007, XXXII). Es stellt neben der technologische Plattform offene Standards zur Verfügung, wodurch es ermöglicht wird, die in der Fertigung anfallenden Daten leichter zu erfassen, zu integrieren und systematisch auszuwerten, um hilfreiche Erkenntnisse zu erlangen (Hänisch 2017, S. 14).

Das **Internet der Dienste** ermöglicht Dienstleistungsanbietern, fachliche oder auch infrastrukturelle Dienste ortsunabhängig, ggf. weltweit, mit Hilfe des Internets anzubieten und darüber zu erbringen (Heuser und Wahlster 2011, S. 15; Buxmann et al. 2009, S. 393). Dort können diese Dienste und Dienstleistungen bspw. über virtuelle Marktplätze wie physische Produkte auf elektronischer Basis gehandelt werden (vgl. Raabe et al. 2012, S. 4, 33). Unternehmen und auch IT-Anbieter können sich so auf ihre Kernkompetenzen fokussieren, da es für nahezu jede Aufgabe entsprechend spezialisierte Dienstleister gibt, die Infrastrukturressourcen, Plattformangebote oder Softwareanwendungen über das Internet zur Verfügung stellen (Weiner et al. 2010, S. 11 ff.). Diese Bereitstellung erfolgt im Rahmen des **Cloud Computings**, das die Nutzung von IT-Ressourcen aus der **Cloud** (deutsch: Wolke) beschreibt und damit die Basis für die Dienstleistungsbereitstellung und -nutzung über das Internet darstellt (Heuser und Wahlster 2011, S. 12 f.).

Durch die Integration von CPS in die Produktion entstehen **cyber-physische Produktionssysteme** (kurz: CPPS), die aus Produktionsressourcen bestehen, die flexibel und autonom agieren, sich selbst konfigurieren und untereinander sowie mit smarten Produkten kommunizieren können. Zudem besitzen sie die Fähigkeit, selbstständig Entscheidungen zu treffen und situationsbedingt zu reagieren (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 11). Dadurch wird eine „durchgängige Betrachtung im Fertigungsprozess vom Produkt über die Produktionsmittel hin zum Produktionsprozess“ (Bauernhansl et al. 2016) möglich. Der Mensch wird durch geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen eingebunden. Voraussetzung für ein CPPS ist eine vertikale und horizontale Integration (s. Abschnitt 2.2.3.2), um die dezentral organisierten Bestandteile des CPPS zu autonomen Entscheidungen und zur Kooperation zu befähigen (vgl. Siepmann 2016a, S. 42 f.). CPPS sind somit als ein „kooperierendes Gesamtsystem im Kontext von Industrie 4.0“ (Siepmann 2016a) zu verstehen. Die Daten und Informationen werden dort gespeichert und genutzt, wo sie benötigt werden. Das Gleiche gilt für Entscheidungen innerhalb des Produktionsprozesses, die aufgrund der Kommunikation der CPPS-Elemente nicht mehr zentral, sondern dezentral getroffen werden können (vgl. Bauernhansl et al. 2016).

Ziel ist letztendlich die **Smart Factory** – die für die Zukunft angestrebte, vollständig vernetzte, intelligente Fabrik. Dort interagieren Menschen, intelligente Produkte,

Ressourcen und Maschinen, Systeme und Unternehmen (in übergreifenden Wertschöpfungsnetzen) in einer neuen Intensität miteinander. Mit diesem Ansatz wird eine hohe Effizienz bei geringer Störanfälligkeit und die Beherrschung der zunehmenden Komplexität erreicht (vgl. Bracht et al. 2018, S. 429; acatech und Forschungsunion 2013). Auch die hochgradige Individualisierung der Produktion zu wettbewerbsfähigen Kosten soll damit durch den Einsatz wandlungsfähiger CPPS ermöglicht werden (vgl. Scheer 2017, S. 38 f.). Die Rolle der Menschen wird sich im Umfeld der Smart Factory ändern. Steigende Komplexität, eine zunehmende Technisierung und Automatisierung werden dazu führen, dass der Mensch immer mehr strategische Entscheidungen treffen muss und in die Lage zu versetzen ist, flexibel komplexe Probleme zu lösen. Aus diesen Gründen ist eine Unterstützung der Beschäftigten durch geeignete **Assistenzsysteme** wesentlich, damit diese sich auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren können. Entscheidungsunterstützung durch die kurzfristige Bereitstellung und Visualisierung wesentlicher Informationen (z. B. durch Smartphones, Tablets, Datenbrillen) oder das Durchführen von Berechnungen ist erfolgskritisch, um fundiert handeln und Probleme lösen zu können. Darüber hinaus können Menschen physische Unterstützung erfahren, bspw. durch die Zusammenarbeit mit Robotern (Hermann et al. 2016, S. 3933; Bischoff et al. 2015, S. 90).

2.2.3.2 Paradigmen in Industrie 4.0

Die Anwendung der aufgeführten Bestandteile im Rahmen von Industrie 4.0 bringt einen Paradigmenwechsel mit sich. Es wird deutlich, dass **Vernetzung, Kommunikation und Integration** innerhalb des Unternehmens und darüber hinaus ein zentraler Bestandteil von Industrie 4.0 ist (vgl. Obermaier 2017b, S. 3 ff.). Acatech und Forschungsunion (2013) unterscheiden dabei zwischen der **vertikalen** und der **horizontalen Integration**: Die horizontale Integration meint „die Integration der verschiedenen IT-Systeme“ entlang der Wertschöpfungskette, sowohl innerbetrieblich als auch überbetrieblich (Wertschöpfungsnetzwerke), „zu einer durchgängigen Lösung“ (ebd., S. 24). Die vertikale Integration impliziert „die Integration der verschiedenen IT-Systeme auf den unterschiedlichen Hierarchieebenen [...] zu einer durchgängigen Lösung“ (ebd.). Darüber hinaus wird die „Durchgängigkeit des Engineerings über die gesamte Wertschöpfungskette“ (ebd., S. 35 f.) angestrebt, also eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus von der Entwicklung bis zum Service. Durch lückenlose, durchgängige Vernetzung von Ressourcen, Menschen, Maschinen, Systemen, Produkten und Unternehmen wird die Kommunikation untereinander ermöglicht. Die daraus resultierende Verfügbarkeit von Informationen in allen Phasen schafft die Basis für fundierte und optimierte Entscheidungen und hilft, die zunehmende Komplexität zu beherrschen. Dadurch entstehen enorme Potenziale (vgl. Bischoff et al. 2015, S. 102; Bauernhansl et al.

2016, S. 34). Ermöglicht wird die Vernetzung durch Internettechnologien, die eine Integration der genannten Ressourcen und Akteure in das Internet der Dinge und Dienste ermöglichen (vgl. acatech und Forschungsunion 2013, S. 17).

Aus der zunehmenden Digitalisierung, Vernetzung und Datenaufnahme folgt ein Aufkommen unvorstellbarer Datenmengen. Unverarbeitet haben diese Daten kaum Nutzen. Können sie jedoch analysiert und ausgewertet werden, bergen sie große Potenziale für wichtige Entscheidungen und Wettbewerbsvorteile (vgl. Klein et al. 2013, S. 319). Unter dem Begriff **Big Data** wird das Zusammenspiel mehrerer Technologien zur kurzfristigen analytischen Verarbeitung enormer Mengen strukturierter und auch unstrukturierter Daten verstanden (Huber, W. 2018, S. 22 f.). Durch Industrie 4.0 fallen auch im Produktionsumfeld immer größere Mengen an Daten an, die es zu analysieren, auszuwerten und zu interpretieren gilt, um fundierte Entscheidungen treffen zu können (bspw. für die prädiktive Instandhaltung) (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 16). Hierbei spielen Methoden im Kontext von Big Data eine wichtige Rolle.

Von zunehmender Bedeutung ist auch die **Echtzeitfähigkeit** bei der Datenkommunikation, -verarbeitung und -auswertung. Echtzeitfähigkeit wird häufig als nicht-funktionale Qualitätseigenschaft klassifiziert und beschreibt eine Eigenschaft reaktiver Systeme, Rückmeldungen, also bspw. Daten und Informationen, ohne zeitliche Verzögerung zur Verfügung zu stellen (vgl. Liggesmeyer 2009, S. 443; Mosler 2017, S. 501 ff.). In den Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist in diesem Zusammenhang von einer „zeitsynchrone[n] Datenverarbeitung“ (acatech und Forschungsunion 2013, S. 30) die Rede. Eine Differenzierung kann zwischen harter und weicher Echtzeitfähigkeit erfolgen, wobei bei der harten Echtzeitfähigkeit zu späte Reaktionen als nicht korrekt gelten und unmittelbar kritische Zustände zur Folge haben. Bei der weichen Echtzeitfähigkeit sind Zeitrahmenüberschreitungen lediglich störend, aber nicht unmittelbar kritisch (Liggesmeyer 2009, S. 443). Im Kontext der Industrie 4.0 wird die Echtzeitfähigkeit vermehrt als ein Erfolgsfaktor genannt um anhand der Vernetzung und Datenverfügbarkeit in Echtzeit die reale und virtuelle Welt miteinander zu verbinden und fundierte Optimierungsentscheidungen auf der Basis aktueller Informationen treffen zu können (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 3; Bauernhansl 2014, S. 16; Mosler 2017, S. 501 ff.). In diesem Zusammenhang liegen meist harte Echtzeitanforderungen vor, da Zeitverzögerungen (time-lags) unter Umständen zu falschen Entscheidungen führen können, die negative Konsequenzen für das Erreichen des Soll-Zustands nach sich ziehen (Mosler 2017). Die Datenverfügbarkeit in Echtzeit unterscheidet die bisherige Produktion von der zukünftigen. Ein virtuelles, lückenloses Abbild der Realität mit Zustandsinformationen in Echtzeit ist das Ziel (vgl. Spath et al. 2013, S. 118).

Dabei ist das Konzept des Digitalen Zwillings von zentraler Bedeutung, das in Abschnitt 2.3 detailliert behandelt wird.

Die Migration von CPS zu CPPS führen zu zwei weiteren Paradigmen im Rahmen von Industrie 4.0: **Dezentralisierung** und **Selbstorganisation** bzw. **Autonomie**. Bauernhansl (2014, S. 15) beschreibt die Dezentralisierung und Bildung autonomer Einheiten als wesentlichen Erfolgsfaktor im Kontext zunehmender Komplexität. Durch den Einsatz von CPS und eingebetteten Systemen sowie die Vernetzung von Ressourcen, Produkten, Menschen und gesamten Unternehmen wird die dezentrale Verfügbarkeit und Verarbeitung lokaler und globaler Informationen ermöglicht. Diese Dezentralisierung lässt schnellere Entscheidungswege durch den Abbau von Hierarchien zu, so dass die dezentral organisierten Elemente in einem CPPS anhand von Zielvorgaben autonom auf Zustände reagieren und Entscheidungen treffen, sich selbst organisieren und optimieren können (vgl. Hermann et al. 2016, S. 3933; Lasi et al. 2014, S. 261; Bischoff et al. 2015, S. 116, 131).

Verschiedene Autoren teilen die Auffassung, dass aus zunehmender Dezentralisierung und Selbstorganisation die **Auflösung der klassischen Automatisierungspyramide** resultiert, da die Daten nicht mehr auf den verschiedenen Ebenen der Pyramide abgelegt, genutzt und verarbeitet werden müssen. Dies kann dezentral erfolgen – dort, wo es gerade nötig ist (Bettenhausen und Kowalewski 2013; Bauernhansl et al. 2016, S. 11 f.).

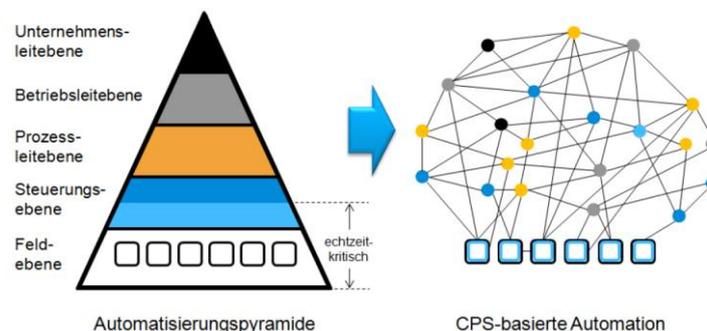


Abbildung 2.7: Auflösung der Automatisierungspyramide durch CPS mit verteilten Diensten (Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 4)

Mittels CPS erfolgt eine Übertragung der Intelligenz von der Leitrechnerebene in die Objekte innerhalb des CPPS, wo Entscheidungen dezentral getroffen werden können (vgl. Büttner und Brück 2014, S. 123 f.). Über Plattformen, die Teil der CPS sind, wird die Bereitstellung dezentraler Dienste und Anwendungen sowie die Vernetzung von Menschen und Systemen möglich (Bauernhansl et al. 2016, S. 12). Ein „Netz aus verschiedenen Elementen, die Funktionalitäten bereitstellen und als Gesamtheit das Automatisierungssystem darstellen“ (Bauernhansl et al. 2016), wie in Abbildung 2.7 skizziert, ist eine zukünftig denkbare Struktur. In den Knoten innerhalb des entstehenden

Netzwerks werden dezentrale Dienste (auch Hardwarekomponenten) bereitgestellt und genutzt (vgl. Bettenhausen und Kowalewski 2013, S. 4).

Aufgrund dynamischer, volatiler Märkte, kürzer werdender Produktlebenszyklen und dem Trend zur Individualisierung wird die **Wandlungsfähigkeit** häufig als ein wesentlicher Erfolgsfaktor für Produktionssysteme genannt. Mit den aufgeführten Bestandteilen und Paradigmen soll Industrie 4.0 diese Wandlungsfähigkeit ermöglichen (vgl. Steegmüller und Zürn 2014, S. 103; acatech 2018). Um Wandlungsfähigkeit zu erläutern, ist eine Abgrenzung zur Flexibilität sinnvoll, die ebenfalls als eine wichtige Eigenschaft innerhalb Industrie 4.0 darstellt. Wobei Flexibilität eine Anpassungsmöglichkeit innerhalb bei der Planung vorgedachter Grenzen beschreibt (bspw. die kurzfristige Reaktion auf zu erwartende saisonale Schwankungen) (vgl. Heinen et al. 2008, S. 24), meint Wandlungsfähigkeit die Befähigung zur Reaktion auf zukünftige Anforderungen über einen vorhersehbaren Korridor hinaus (vgl. Berkholz 2008, S. 14) und kommt „ohne einzuplanenden Ressourcenvorhalt aus“ (Steegmüller und Zürn 2014, S. 104). Damit geht die Wandlungsfähigkeit über die Flexibilität hinaus und ist für die Bedienung kundenindividueller Nachfragen und der Produktion von Varianten, die bei der Konzeption des Produktionssystems noch nicht vorhergesagt werden können, entscheidend. Als sogenannte Wandlungsbefähiger nennen Heinen et al. (2008, S. 26 ff.) die Universalität, Mobilität, Skalierbarkeit, Modularität und Kompatibilität. Durch die Grundsätze und Bestandteile der Industrie 4.0 können Verbesserungen in Bezug auf diese Wandlungsbefähiger erzielt werden um somit Wandlungsfähigkeit zu ermöglichen und zu steigern (vgl. acatech 2018, S. 9 ff.). Weitere Informationen zur Wandlungsfähigkeit können Heinen et al. (2008) entnommen werden.

2.2.4 Treiber

Dieser Abschnitt widmet sich Treibern in Bezug auf Industrie 4.0, die zu neuen Anforderungen und Möglichkeiten in Bezug auf die Gestaltung und den Betrieb von Produktions- und Logistiksystemen führen. Hierbei können gesellschaftliche, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen identifiziert werden.

Entwicklungen, die während der letzten Jahre starken Einfluss auf die Industrie haben und/oder in Zukunft verstärkt haben werden, sind von Obermaier (2017b, S. 9 ff.) aufgeführt. Neben der Digitalisierung sieht er in diesem Zusammenhang im wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereich die Globalisierung, die Verringerung der Fertigungstiefe, höhere Anforderungen an die Produktion hinsichtlich Zeit und Qualität, sowie zunehmendem Druck nach Innovationen, Individualisierung und Variantenvielfalt als Treiber für Industrie 4.0. Die Globalisierung bzw. Internationalisierung der Märkte bringt für Unternehmen neben vielen Vorteilen auch erhöhten Wettbewerbs- und Kostendruck sowie geringere Gewinnmargen.

Aufgrund dessen haben sich Unternehmen vielfach zu Zukäufen und Auslagerungen entschieden, um sich auf ihre Kernkompetenzen zu konzentrieren. Es bilden sich Wertschöpfungsnetzwerke und auch der Kunde wird in die Wertschöpfung eingebunden (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 8). Neben Potenzialen sind auch erhöhte Komplexität, Störanfälligkeit und eine Verringerung der Fertigungstiefe Folgen. Darüber hinaus verlangt der Markt nach stark individualisierten Produkten zum Preis von Massenartikeln. Produktlebenszyklen verkürzen sich zunehmend, wodurch ein hoher Zeit- und Innovationsdruck entsteht. Marktvolatilität und -komplexität steigen kontinuierlich an. Industrie 4.0 soll zur Bewältigung dieser Herausforderungen führen (vgl. Obermaier 2017b; Bauernhansl 2014, S. 13). Außer diesen Entwicklungen sehen Lasi et al. (2014, S. 261 f.) einen erhöhten Bedarf an Flexibilität und Ressourceneffizienz als Treiber. Ressourcen werden zunehmend knapper und in Konsequenz teurer, was eine gesteigerte ökonomische und ökologische Effizienz notwendig macht. Auch Bauernhansl (2014, S. 10 f.) sieht auf der Nachfrageseite stetig ansteigenden Konsum mit starkem Trend zu individualisierten Produkten. Er zeigt ebenfalls die Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels im Umgang mit Ressourcen auf, da sonst deren Erschöpfung bevorsteht. Gleichzeitig weist er auf die alternde Gesellschaft hin, die einige Veränderungen mit sich bringt. Huber, W. (2018, S. 5 f.) sieht in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit, Arbeitsbedingungen an ältere Mitarbeiter anzupassen. Außerdem werden qualifizierte Mitarbeiter (Fachkräfte, Akademiker) zukünftig stark von Unternehmen nachgefragt und die Arbeitsmarktstruktur wird sich ändern.

Damit den genannten Herausforderungen durch Industrie 4.0 begegnet werden kann, ein Paradigmenwechsel, gesteigerte Effizienz, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ermöglicht werden können, sind die Fortschritte im technologischen Bereich von enormer Wichtigkeit. Hier sieht Obermaier (2017b) solche Entwicklungen als Befähiger für Industrie 4.0, die wesentlich zur Ermöglichung und Weiterentwicklung von CPS und des Internets der Dinge sind. Das beinhaltet die folgenden fünf Technologiefelder: „1) Internet- und Kommunikationstechnologie, 2) Automatisierung, Fertigungstechnologie und Robotik, 3) Sensorik und Aktorik, 4) Eingebettete Systeme, Analytik und Systemtechnik sowie 5) Mensch-Maschine Schnittstellen“ (Obermaier 2017b, S. 13). Bischoff et al. (2015, S. 18) nennen zusätzlich „Standards und Normung“ als Querschnitts-Technologiefeld.

Eine zusammenfassende Aufzählung der wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und technologischen Treiber auf Grundlage der aufgeführten Literatur gibt Tabelle 2.1.

Tabelle 2.1: Treiber für Industrie 4.0 - Überblick

Gesellschaftliche Treiber	Wirtschaftliche Treiber	Technologische Treiber
<ul style="list-style-type: none"> - Globalisierung - Demografischer Wandel - Mangel an Fachkräften - Nachfrage nach individuellen Produkten 	<ul style="list-style-type: none"> - kürzere Produktlebenszyklen - Höhere Marktkomplexität und -volatilität - Zunehmender Druck bzgl. Zeit, Kosten, Innovationen, Qualität - Bedeutung von Wertschöpfungsnetzwerken - Steigende Variantenvielfalt / Produktindividualisierung - Ressourcenknappheit - Bedarf an Effizienz und Wandlungsfähigkeit 	<p>Entwicklungen in</p> <ul style="list-style-type: none"> - Internet- und Kommunikationstechnologie - Automatisierung, Fertigungstechnologie und Robotik - Sensorik und Aktorik - Eingebettete Systeme, Analytik und Systemtechnik - Mensch-Maschine-Schnittstellen - Standards und Normung

2.2.5 Potenziale

In der Fachliteratur werden immense Möglichkeiten durch Industrie 4.0 gesehen. Die Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 skizzieren die folgenden Potenziale. Eine Berücksichtigung individueller Kundenwünsche und die rentable Produktion der Losgröße 1 wird durch Industrie 4.0 möglich. Geschäftsprozesse können hinsichtlich unterschiedlicher Kriterien dynamisch gestaltet werden, agile Engineering-Prozesse und kurzfristige Veränderungs- und Anpassungsfähigkeiten führen zu einer Flexibilisierung. Die Transparenz aufgrund von Echtzeitinformationen ermöglicht optimale Entscheidungen. CPS lassen eine situationsspezifische Optimierung der Prozesse innerhalb des umfassenden Wertschöpfungsnetzwerks zu, was zu einer verbesserten Ressourcenproduktivität und -effizienz führt. Die umfangreichen Daten, die bspw. durch die intelligenten Objekte gewonnen werden (Big Data), bieten einen Nährboden für neue Dienstleistungen und daraus resultierende Wertschöpfungspotenziale. Auch eine demografiesensible Arbeitsgestaltung wird mit Industrie 4.0 möglich. Den Bedürfnissen von Mitarbeitern kann in Unternehmen, die CPS nutzen, aufgrund höherer Flexibilität Rechnung getragen werden (bspw. durch Assistenzsysteme). Damit entstehen für Angestellte Vorteile bezüglich der Work-Life-Balance und die Unternehmen sind konkurrenzfähiger im Wettbewerb um wertvolle Mitarbeiter. Auch die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands als Standort mit hohem Lohnniveau kann durch Industrie 4.0-Lösungen ausgebaut werden (acatech und Forschungsunion 2013, S. 19 f.).

Bauernhansl et al. (2016) sehen den Nutzen von Industrie 4.0 in „hochflexiblen, wandlungsfähigen Wertschöpfungssystemen, die es erlauben, Wertschöpfung dorthin zu transferieren, wo sie am besten erbracht werden kann“ (ebd., S. 7). Alle Partner und Kunden werden

mittels flacher Hierarchien in ein Wertschöpfungsnetzwerk integriert, Komplexitätskosten können gesenkt werden, neue Potenziale für die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit entstehen und die wandlungsfähige, individualisierte Produktion wird ermöglicht. Prognosen können auf Basis einer hohen Datenverfügbarkeit getroffen werden, wodurch komplexe Wertschöpfungssysteme hochproduktiv, robust und agil werden. Durch die Einbindung des Kunden in den Wertschöpfungsprozess und die Verwendung des Produkts als Informationsträger über die Lebenszyklusphasen hinweg kann die Wertschöpfung neugestaltet und optimiert werden. Darüber hinaus sehen sie große Potenziale zur Einsparung in vielen Gebieten der Wertschöpfung durch die neuen Technologien mit Echtzeitfähigkeit sowie dienstleistungsorientierte Geschäftsmodelle (ebd., S. 8). Zusätzlich erfolgt eine Aufwertung der Arbeit, da sich Mitarbeiter auf Aufgaben der Entscheidung und Gestaltung konzentrieren können. Als Zentrum des Arbeitsumfelds werden sie dabei durch intelligente Assistenzsysteme unterstützt, die außerdem eine längere Lebensarbeitszeit ermöglichen und somit Möglichkeiten schaffen, um mit dem demografischen Wandel umgehen zu können (vgl. Kagermann 2014, S. 607 f.). Ausschuss und Verluste werden durch Vernetzung und Möglichkeiten der frühzeitigeren Fehlererkennung stark reduziert. Qualität und Verfügbarkeit können bspw. durch prädiktive Wartung erhöht werden (Bauernhansl et al. 2016, S. 7 ff.).

Mit den hier genannten Potenzialen, die mit der Umsetzung von Industrie 4.0 gesehen werden, wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben. Vielmehr soll verdeutlicht werden, welche möglichen grundlegenden Veränderungen und Entwicklungen mit Industrie 4.0 einhergehen. Um die Merkmale zukünftiger Produktions- und Logistiksystemen und die Anforderungen an diese zusammenzufassen, womit im weiteren Verlauf der Arbeit Anforderungen an die Simulation abgeleitet werden können, dient der folgende Abschnitt.

2.2.6 Zusammenfassende Darstellung

Abschließend für dieses Kapitel, das ein Verständnis für die Entwicklungen und Paradigmen im Rahmen von Industrie 4.0 sowie eine Vorstellung dafür schaffen soll, wie sich die Industrie in den kommenden Jahren verändern kann, fasst Abbildung 2.8 die Merkmale zukünftiger Produktions- und Logistiksystemen auf Basis der Darstellungen und Literaturverweise in diesem Kapitel zusammen. Im oberen Bereich sind die Treiber aufgeführt (vgl. Abschnitt 2.2.4), die Industrie 4.0 zum einen ermöglichen (technologische Entwicklungen), und die zum anderen mit Industrie 4.0 bewältigt werden müssen (wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen). Im unteren Bereich sind daraus resultierende Anforderungen und Eigenschaften in Bezug auf Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 aufgeführt, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben wird.

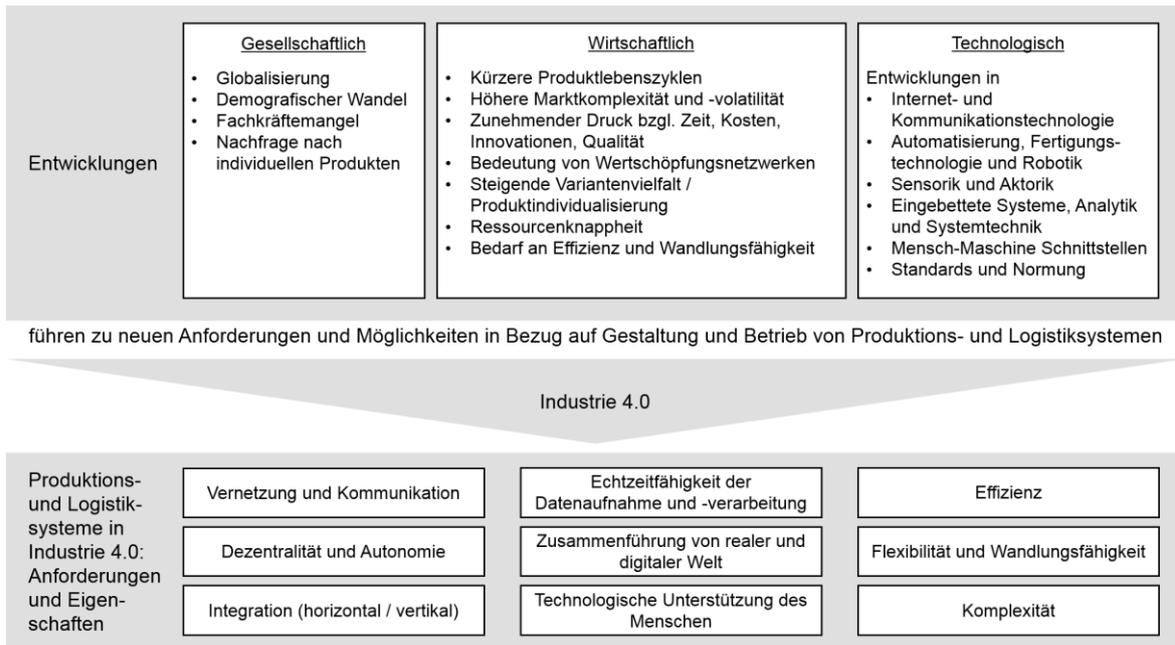


Abbildung 2.8: Eigenschaften von Produktions- und Logistiksystemen in Industrie 4.0 (eigene Darstellung in Anlehnung an die aufgeführte Literatur)

Die Darstellung der Bestandteile und Paradigmen, die in Verbindung mit Industrie 4.0 genannt werden (s. Abschnitt 2.2.3) verdeutlicht, dass diese sich gegenseitig beeinflussen und bedingen. Nur ihr Zusammenspiel ermöglicht diese neue Stufe in der industriellen Fertigung, die von vielen Autoren als die vierte industrielle Revolution beschrieben wird und bisher existierende Paradigmen auflöst. Da sich diese noch in der Konzeptionsphase befindet, ist die Vision Industrie 4.0 noch nicht in Gänze greifbar und bislang nicht absehbar, wohin und wie weit die Entwicklungen tatsächlich führen werden (vgl. Obermaier 2017b, S. 4 ff.). Das Verschmelzen der realen und physischen Welt und die zunehmende Vernetzung als Themen, die in den kommenden Jahren in Verbindung mit dem Begriff Industrie 4.0 weiter vorangetrieben werden, bieten erhebliche Potenziale für Wirtschaft, Umwelt und den Menschen als Arbeitskraft (vgl. Abschnitt 2.2.4). Wie schnell und in welchem Umfang bleibt jedoch abzuwarten. Trotzdem ist abzusehen, dass Produktions- und Logistiksysteme durch die aufgeführten Treiber neuen Anforderungen genügen müssen und dadurch von den in Abbildung 2.8 dargestellten Merkmalen geprägt werden, die einen Entwicklungsbedarf bisheriger digitaler Methoden und Werkzeuge auslösen.

Ein wichtiges Instrument, das zur Zusammenführung der realen und digitalen Welt beiträgt und den Mensch bei der Bewältigung der steigenden Komplexität und dem Treffen bedeutender Entscheidungen unterstützt, ist der Digitale Zwilling, der einen Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt. Um zur Umsetzung der dargestellten Anforderungen beizutragen, die im Kontext von Industrie 4.0 an Produktions- und Logistiksysteme gestellt werden, muss er

über gewisse Eigenschaften und Fähigkeiten verfügen, die wiederum eine Weiterentwicklung bisheriger Werkzeuge und Methoden, so auch der ereignisdiskreten Simulation, erfordern. In dem folgenden Kapitel wird zunächst der Stand der Fachliteratur in Bezug auf den Digitalen Zwilling dargestellt bevor in Kapitel 3 auf die Rolle der ereignisdiskreten Simulation für den Digitalen Zwilling und im Rahmen von Industrie 4.0 eingegangen wird.

2.3 Der Digitale Zwilling

Mit dieser Arbeit soll untersucht werden, wie ein Digitaler Zwilling (englisch: Digital Twin) auf Basis der ereignisdiskreten Simulation erstellt werden kann. Im Digitalen Zwilling werden viele Potenziale gesehen, einen Beitrag zur Bewältigung der Komplexität von Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 zu leisten, da er, grob betrachtet, als virtuelles Abbild eines realen Objektes, das eine einzelne Komponente, ein Produkt oder ein ganzes System sein kann, und der Vernetzung zwischen dem digitalen Abbild mit seinem realen Pendant auf Basis von Industrie 4.0-Technologien, einen wesentlichen Beitrag zur Zusammenführung und Vernetzung der physischen und digitalen Welt leistet (vgl. Huber, D. und Kaiser 2017, S. 19 f.; Bauernhansl et al. 2016, S. 23). Aufgrund seiner Bedeutung für diese Arbeit wird er in diesem Abschnitt separat behandelt.

Hierfür erfolgt zunächst die Betrachtung wesentlicher Meilensteine bezüglich des Zwillingskonzepts, bevor verschiedene Sichtweisen und Definitionen aus der Fachliteratur dargestellt werden. Auch Begriffe, die in Verbindung mit dem Digitalen Zwilling zu finden sind, werden kurz erläutert, bevor Potenziale und Herausforderungen dargestellt werden. Schließlich erfolgt das Ableiten einer Definition mit wesentlichen Merkmalen für den weiteren Verlauf der Arbeit. Da ein Teil der Literatur zum Digitalen Zwilling auf Englisch ist, wird im Folgenden auch der Begriff „Digital Twin“ synonym gebraucht. Zudem werden die Adjektive „digital“ und „virtuell“ sowie die Nomen „Zwilling“ und „Abbild“ in diesem Kontext gleichbedeutend genutzt.

2.3.1 Das Konzept der Zwillinge

In den vergangenen Jahrzehnten wurden bereits mehrere Konzepte entwickelt und angewandt, aus denen sich im Kontext zunehmender Digitalisierung und Vernetzung der Terminus des Digitalen Zwillings etabliert hat, dessen Verständnis auch heute noch nicht einheitlich ist und von der Perspektive abhängt. Dieser Abschnitt dient der Darstellung wesentlicher Meilensteine.

Das Konzept, Abbilder von einem zu untersuchenden Objekt zur Durchführung von Tests und zur Gewinnung von Erkenntnissen zu nutzen, ist bereits auf das Apollo Programm der National Aeronautics and Space Administration (NASA) in den sechziger Jahren zurückzuführen (vgl. Rosen et al. 2015, S. 568). Innerhalb dieses Projekts hat die NASA zwei identische Raumstationen gebaut, wobei eines auf der Erde verblieb und „the twin“ (deutsch: „der Zwilling“) genannt wurde. In der Vorbereitungsphase wurde dieser Zwilling umfassend für Flugtrainings genutzt und während der Mission konnten die Bedingungen der im Weltall

befindlichen Raumstation nachgebildet und nachempfunden werden. Er diene für Simulationen und Tests von Alternativen, wobei die verfügbaren Real-Flugdaten genutzt wurden, um die Flugbedingungen so realistisch und präzise wie möglich nachzubilden und damit die Astronauten im All von der Erde aus unterstützen zu können. In diesem Sinn kann jede Art von Prototyp, der zur Nachbildung realer Nutzungsbedingungen für die Simulation von Echtzeitverhalten genutzt wird, als Zwilling bzw. Twin gesehen werden (ebd.).

Ein anderes Beispiel eines physischen Zwillings ist der sogenannte „Iron Bird“, ein Engineering-Werkzeug, das in der Luftfahrtindustrie genutzt wird, um Flugzeugsysteme zu entwickeln, zu testen, zu optimieren und zu validieren. Dadurch können bereits in frühen Entwicklungsphasen Erfahrungen über das zu entwickelnde System gesammelt werden, aber auch in späteren Phasen können Tests und Trainings durchgeführt sowie Alternativlösungen untersucht werden (vgl. Airbus S.A.S. 2017). Aufgrund der wachsenden Möglichkeiten der Simulationstechnologie lassen sich Umgebungsbedingungen simulieren und physische Komponenten durch virtuelle Modelle ersetzen. Auch wenn einige Komponenten in frühen Entwicklungsphasen noch nicht verfügbar sind, können sie so bereits abgebildet werden. Wird diese Idee über alle Phasen des Lebenszyklus erweitert, entsteht ein durchgängiges digitales Modell des physischen Systems, der Digitale Zwilling (vgl. Rosen et al. 2015, S. 568; Boschert und Rosen 2016, S. 64).

Im Jahr 2002 stellte Grieves das Konzept einer virtuellen, digitalen Repräsentation eines physischen Produkts an der University of Michigan in einer Präsentation für die Industrie zur Errichtung eines Product Lifecycle Management (PLM) Centers vor. Auch wenn das Konzept zu dieser Zeit noch nicht als Digital Twin, sondern als „Mirrored Spaces Model“ (2003 – 2005) und nachfolgend als „Information Mirroring Model“ (2006 – 2010) bezeichnet wurde, enthielt es alle relevanten Grundfunktionen eines Digitalen Zwillings: das physische System, das virtuelle System, das alle Informationen über das physische System beinhaltet, und die Verbindung zwischen beiden über den gesamten Lebenszyklus. Ab 2011 wurde hierfür schließlich der Begriff des Digital Twins verwendet, wodurch das Konzept von Grieves als ein erster Ansatz für den Digitalen Zwilling gesehen werden kann (vgl. Grieves und Vickers 2017, S. 93 f.; Zhuang et al. 2018, S. 1152).

An die breite Öffentlichkeit getragen wurde der Begriff des Digital Twins zum ersten Mal durch die NASA in der Technology & Processing Roadmap (Technology Area 11) im Jahr 2012 (Shafto et al. 2012). In diesem Bericht wurden die zukünftigen Entwicklungsbestrebungen dargelegt und der Digital Twin als das virtuelle Abbild seines fliegenden Zwillings definiert, der nicht für Inspektionen oder Untersuchungen zur Verfügung steht, sobald er in das Weltall befördert wurde. Auch für Zertifizierungszwecke sollten reale Tests zum

Teil durch Tests mit einer Kombination von Simulationsmodellen und realen Daten innerhalb des Digitalen Zwillings realisiert werden. Vor allem Untersuchungen hinsichtlich der Belastbarkeit neuer Materialien an kritischen Stellen wurden hier in den Fokus gestellt. Die dort aufgeführte Definition (s. Abschnitt 2.3.2) wird bis heute in vielen Publikationen zitiert (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 64; Tao et al. 2017, S. 3566; Kuhn, T. 2017, S. 442). Auch die United States Air Force (USAF) veröffentlichte im Jahr 2011 ähnliche Visionen, wobei die generelle Idee darin besteht, mit jedem Flugzeug ein für diese einzigartige Variante spezifisches digitales Modell zu liefern, das alle Abweichungen von der Grundkonstruktion enthält. Dabei wird das digitale Modell virtuell durch dieselben Flugprofile „geflogen“, die für das physische Flugzeug anhand von Sensorik aufgezeichnet wurden. Der Vergleich der Sensordaten mit den Simulationsergebnissen in kritischen Phasen ermöglicht das Updaten, Kalibrieren und Validieren des Modells, so dass dieser Digitale Zwilling jederzeit den aktuellen Status des physischen Objekts repräsentiert. Prognosen können anhand von Simulationen mit dem digitalen Modell erstellt werden, wodurch kritische Stellen, an denen Beschädigungen auftreten könnten, lokalisierbar und analysierbar werden, um nötige Wartungsarbeiten voraussagen zu können (vgl. Kobryn und Tuegel 2011; Boschert und Rosen 2016, S. 65). Zwei Jahre später, Mitte 2013, stellte die USAF zusätzlich zu ihrem Verständnis des Digital Twins das Konzept des Digital Threads (digitaler roter Faden) vor, der dem Konzept des Digitalen Zwillings sehr ähnlich ist, aber hauptsächlich die Entwicklungsphase betrifft. Zusammen mit dem Digital Twin wird die Nutzung und Verknüpfung verschiedener virtueller Modelle, Daten und Analysewerkzeugen zur Erstellung einer durchgehenden digitalen Repräsentation eines Systems über den gesamten Lebenszyklus angestrebt (vgl. United States Air Force 2013, S. 24; Boschert und Rosen 2016, S. 65).

Im Zusammenhang mit der zunehmenden Vernetzung und Digitalisierung im industriellen Kontext wurden in den letzten Jahren neben den Konzepten in der Luft- und Raumfahrt eine Reihe von Papern für die Anwendung des Digitalen Zwillings im Bereich der industriellen Produktion veröffentlicht. Auch viele Softwareanbieter wie Siemens setzen sich mit dem Phänomen des Digitalen Zwillings auseinander. In Fachbüchern sind hingegen wenige ausführliche Darstellungen, sondern vielmehr kurze Beiträge oder Beschreibungen bezüglich des Digitalen Zwillings zu finden, der dort im Kontext von Industrie 4.0, Digitalisierung oder ähnlichem kurz angesprochen wird. In dem Hype Cycle for Emerging Technologies von Gartner (s. Abbildung 2.9) wurde der Digital Twin im Juli 2018 in die zweite Phase, knapp vor dem Höhepunkt zu hoch gesetzter Erwartungen, eingeordnet. Folgt man dieser Kurve weiter, steht die Desillusion bevor. Höchstwahrscheinlich liegt hier eine Ursache für sich unterscheidende Beschreibungen und Meinungen zu Potenzialen, da, wie bei der Thematik der Industrie 4.0, ein Hype um noch nicht in Gänze erfassbare Entwicklungen entsteht,

deren Potenzial als immens prognostiziert werden aber zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht gänzlich voraussagbar sind. So etwa schätzt Gartner, dass mit 21 Milliarden vernetzten Sensoren und Endpunkten bis 2020 für Milliarden von Dingen Digitale Zwillinge existieren werden (Gartner 2017).

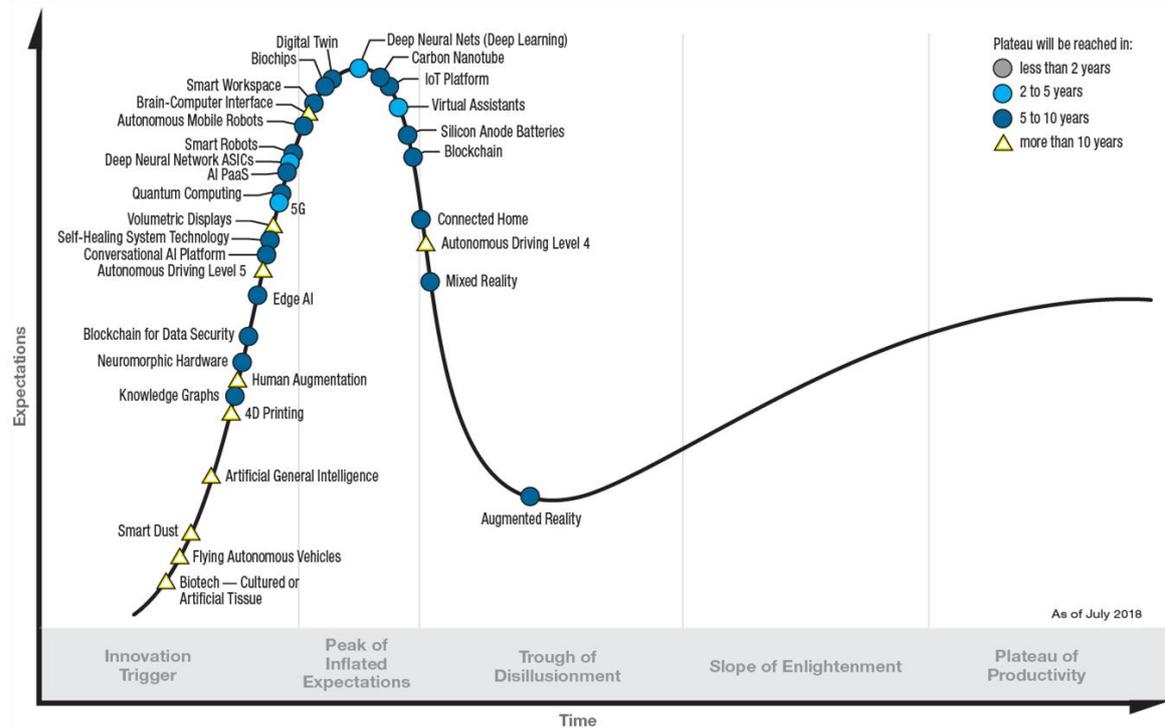


Abbildung 2.9: Hype Cycle for Emerging Technologies 2018 (Gartner 2018)

Aufgrund der zahlreichen Betrachtungen einer noch nicht vollständig erfassbaren Thematik aus unterschiedlichen Perspektiven und Bereichen, mit verschiedenen Motivationen und Zielsetzungen unterscheidet sich das Detailverständnis des Digitalen Zwillings (vgl. Cadet et al. 2017, S. 52), auch wenn weitestgehend Einigkeit bezüglich der Grundeigenschaften herrscht. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Definitionen, Begrifflichkeiten, Perspektiven und Sichtweisen vorgestellt, aus denen schließlich Gemeinsamkeiten herausgearbeitet werden, um eine Basis für den weiteren Verlauf der Arbeit zu schaffen.

2.3.2 Definitionen, Prinzip und Sichtweisen

Aufgrund des Themas Industrie 4.0 und der damit verbundenen Vernetzung und Zusammenführung der virtuellen und physischen Welt erlebt auch das zum Teil schon seit Jahren angewandte Zwillingskonzept einen massiven Aufschwung. Die kontinuierlich steigende Rechenleistung, vertikale und horizontale Integration, die Entwicklung und Anwendung von CPS, in denen Sensorik, eingebettete Systeme, Aktorik und Vernetzung von immer größer werdender Bedeutung sind, und weitere Themen innerhalb Industrie 4.0 (s. Abschnitt 2.2.3), bieten eine nie da gewesene Grundlage für Datenerhebung, -auswertung, -nutzung und -kommunikation, wodurch die Anwendung des Digitalen Zwillings von zunehmendem Interesse ist (vgl. Kühn und Schele 2017). Denn ihm wird das Potenzial zugesprochen, einen wesentlichen Beitrag zur Erfüllung der Anforderungen an Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 zu leisten. Nachdem wichtige Zwillingskonzepte der letzten Jahrzehnte aufgezeigt wurden, werden in diesem Abschnitt wesentliche Definitionen und Perspektiven bezüglich des Digitalen Zwillings dargestellt.

Die erste Definition, die an dieser Stelle aufgeführt wird, ist von Grieves, dessen Konzept aus dem Jahr 2002 als ein erster Ansatz für den Digitalen Zwilling gesehen werden kann. In einem Beitrag aus 2017 beschreiben er und Vickers, dass der Begriff des Digital Twins anfangs noch nicht für das Konzept verwendet wurde, aber bereits alle kennzeichnenden Elemente enthalten waren: *„real space, virtual space, the link for data flow from real space to virtual space, the link for information flow from virtual space to real space and virtual sub-spaces“* (Grieves und Vickers 2017, S. 93). Weiter wird erklärt:

„The premise driving the model was that each system consisted of two systems, the physical system that has always existed and a new virtual system that contained all of the information about the physical system. This meant that there was a mirroring or twinning of systems between what existed in real space to what existed in virtual space and vice versa. The [...] Product Lifecycle Management [...] meant that this was not a static representation, but that the two systems would be linked throughout the entire lifecycle of the system. The virtual and real systems would be connected as the system went through the four phases of creation, production (manufacture), operation (sustainment/support), and disposal“ (ebd.).

Herauszustellen ist also die Existenz zweier Systeme: eines realen Systems und eines virtuellen Systems – dem Abbild des realen Systems – sowie die Verbindung zwischen beiden Systemen, so dass eine permanente Repräsentation des jeweils anderen über den gesamten Lebenszyklus (Entwicklung, Herstellung, Betrieb/Nutzung und Entsorgung) mit Daten- und Informationsaustausch besteht. Damit wird bereits eine Vorstellung für die Idee des Digitalen Zwillings vermittelt. Im selben Beitrag wird die ursprüngliche Idee konkretisiert:

„Digital Twin (DT)—the Digital Twin is a set of virtual information constructs that fully describes a potential or actual physical manufactured product from the micro atomic level to the macro geometrical level. At its optimum, any information that could be obtained from inspecting a physical manufactured product can be obtained from its Digital Twin. Digital Twins are of two types: Digital Twin Prototype (DTP) and Digital Twin Instance (DTI). DT's are operated on in a Digital Twin Environment (DTE).” (Grieves und Vickers 2017, S. 94)

Mit dem DTP ist die Erstellung eines virtuellen Modells zur Beschreibung und Definition eines physischen Systems gemeint, das noch nicht existiert. Somit kann der Digitale Zwilling auch vor seinem physischen Pendant bestehen und bereits großen Nutzen für die Entwicklung haben. Die DTI umfasst ein spezifisches physisches Produkt, dem ein individueller Digitaler Zwilling während des gesamten Lebenszyklus zugeordnet bleibt. Abhängig von der Nutzung enthält der Digitale Zwilling bestimmte Informationen, wie bspw. ein virtuelles Modell, das geometrische Dimensionen und Komponenten beschreibt, sowie möglichst alle Nutzungs-, Prozess- und Servicedaten dieses spezifischen Produkts, um als Informationsquelle zu dienen und Prognosen zu ermöglichen. Dabei wird der Digitale Zwilling in verschiedenen Detaillierungsgraden betrachtet. DTE meint einen Anwendungsraum, in dem der Digitale Zwilling betrieben wird, um verschiedene Ziele zu verfolgen. Hierbei stellen Grieves und Vickers die Möglichkeit heraus, Voraussagen über das zukünftige Verhalten des physischen Produkts unter der Nutzung historischer Daten und Zustandsaufzeichnungen treffen zu können. Der Digitale Zwilling kann daher als zuverlässige Informationsquelle über aktuelle und historische Daten (bspw. Tankfüllung, Aufenthaltsort, Materialzustand) dienen, unabhängig davon, wo sich sein physisches Gegenstück aktuell befindet. So können Daten über verschiedene Systemzustände für Voraussagen über zukünftige Zustände genutzt werden (vgl. Grieves und Vickers 2017, S. 94 f.).

Wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben, kam das Konzept des Digital Twins vor allem durch die NASA Technology & Processing Roadmap an die Öffentlichkeit. Da die NASA eine Behörde für Raumfahrt und Flugwissenschaft ist, sind die Einflüsse dieses Kontexts zu beachten. Dort wird wie folgt definiert:

„A digital twin is an integrated multiphysics, multiscale simulation of a vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The digital twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems [...]. Manufacturing anomalies that may affect the vehicle may also be explicitly considered. In addition to the backbone of high-fidelity physical models, the digital twin integrates sensor data [...], maintenance history and all available historical/fleet data obtained using data mining and text mining. By combining all of this information, the digital twin continuously forecasts the health of the vehicle/

system, the remaining useful life and the probability of mission success. [...]” (Shafto et al. 2012, S. 18)

Zunächst müssen einige Begriffe aus der Definition geklärt werden. Bei der *multiphysikalischen Simulation* werden mehrere physikalische Phänomene und deren Wechselwirkungen einbezogen, um zu realistischen Ergebnissen zu kommen (vgl. Sternel und Schäfer, S. 22). *Multiskalensimulation* bezieht sich auf die simultane Nutzung mehrerer Simulationsmodelle mit unterschiedlicher Auflösung (E und Lu 2011). Nach der Definition der NASA wird also mit dem Digitalen Zwilling eine realistische virtuelle Abbildung eines fliegenden Systems über dessen gesamte Lebensdauer durch das Zusammenspiel mehrerer verschiedener Simulationsmodelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad angestrebt. Dabei werden unter anderem Sensor-, System-, Wartungsdaten und aufgezeichnete historische Daten genutzt, um den Systemzustand so genau wie möglich darzustellen und zuverlässige Prognosen treffen zu können. Ein wesentlicher Aspekt dieser Definition, der in den zitierten Beschreibungen von Grieves und Vickers nicht explizit genannt wird, ist die Nutzung von Simulation, die den Digitalen Zwilling ablauffähig macht und simulative Tests ermöglicht.

Auch Rosen et al. (2015) sowie Boschert und Rosen (2016) sehen die Simulation nicht nur als wichtiges Element innerhalb des Digitalen Zwillings, sondern beschreiben den Digitalen Zwilling sogar als die nächste Stufe bzw. den nächsten Trend in der Simulationstechnologieentwicklung. War die Simulation früher noch Experten vorbehalten und fand hauptsächlich in der Entwicklung Anwendung, ist sie heute ein wichtiges Instrument in allen Lebenszyklusphasen für Komponenten und ganze Systeme. Besonders durch die Entwicklung immer komplexer werdender cyber-mechatronischer Systeme im Rahmen von Industrie 4.0, in denen Sensorik, Software, Aktorik und Vernetzung von zunehmender Bedeutung sind, ist ihrer Auffassung nach die Simulation immer mehr gefragt, um Komplexität beherrschbar zu machen und Brücken zwischen verschiedenen Disziplinen und Lebenszyklusphasen schlagen zu können (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 60 ff.). In ihrem Beitrag definieren Boschert und Rosen zunächst sehr allgemein:

„The general vision of the Digital Twin refers to a comprehensive physical and functional description of a component, product or system, which includes more or less all information, which could be useful in later lifecycle phases.” (Boschert und Rosen 2016, S. 66),

Im weiteren Verlauf beschreiben sie den Digitalen Zwilling aus der Simulationsperspektive. Nach ihrem Verständnis erfolgt die Beschreibung einer Komponente, eines Produkts oder Systems anhand einer Reihe abgestimmter ausführbarer Modelle mit den folgenden Eigenschaften (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 66; auch Cadet et al. 2017, S. 52 f.):

- Der Digitale Zwilling bildet die verknüpfte Sammlung relevanter digitaler Artefakte einschließlich Konstruktionsdaten, Betriebsdaten und Verhaltensbeschreibungen (physikalische und funktionale Beschreibungen) anhand verschiedener Simulationsmodelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Die Simulationsmodelle, aus denen sich der Digitale Zwilling zusammensetzt, sind an dem beabsichtigten Nutzen ausgerichtet und haben die geeignete Genauigkeit für die Aufgabenerfüllung.
- Er entwickelt sich mit dem realen System entlang des gesamten Lebenszyklus und integriert den aktuellen Wissenstand.
- Der Digitale Zwilling wird nicht nur zur Verhaltensbeschreibung, sondern auch zum Ableiten von Lösungen genutzt, die für das reale System von Bedeutung sind (bspw. über Funktionalitäten wie Assistenzsysteme zur Optimierung von Betrieb und Service).

Nach Boschert und Rosen (2016) ist zu empfehlen, dass der gewünschte Zweck des Digital Twins von Entwicklungsbeginn an festgelegt wird, um in späteren Lebenszyklusphasen die gewünschten Ziele erreichen zu können. Auch die dafür notwendigen Daten und Simulationsmodelle sind zu spezifizieren, damit der Digitale Zwilling nicht zu einem „Datenmonster“ wird, sondern auf seinen Zweck hin ausgerichtet ist. Gleichzeitig ist er aber ein abstraktes Konzept, das auch noch nicht absehbare Anwendungen zu späteren Zeitpunkten zulässt. Von besonderer Bedeutung ist nach diesem Verständnis also der lebenszyklusphasenübergreifende Nutzen des Digitalen Zwillings. Auch einen geschlossenen Kreislauf bezüglich der Lebenszyklusphasen stellen Boschert und Rosen als positive Konsequenz der Anwendung des Digitalen Zwillings heraus, da dieser mit den enthaltenen Daten und Informationen für Weiter- und Neuentwicklungen von großem Nutzen ist. Wie auch in der NASA Technology & Processing Roadmap beschrieben, wird hier das Zusammenspiel verschiedener Simulationsmodelle unterschiedlicher Granularität als Eigenschaft des Digitalen Zwillings beschrieben (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 67 f.; Cadet et al. 2017, S. 52 f.).

Die letzte Sichtweise, die innerhalb dieses Abschnitts dargestellt wird, stammt von Kuhn, Hauptabteilungsleiter Embedded Systems am Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering. Aufgrund seiner Position bezieht er sich in seinem Beitrag schwerpunktmäßig auf Softwareschnittstellen und Integration. Er definiert Digitale Zwillinge wie folgt:

„Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht physische Dinge wie z. B. Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mithilfe einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird.“ (Kuhn, T. 2017, S. 440)

Mit dieser Definition wird auch darauf eingegangen, dass zum Datenaustausch und zur Bereitstellung von Informationen und Diensten eine einheitliche Schnittstelle erforderlich ist. Diesen Punkt bezieht Kuhn insbesondere auf die Interaktion verschiedener Digitaler Zwillinge, bspw. dem eines Werkstücks und dem einer Fertigungslinie. Um virtuelle Tests durchführen zu können, die mehrere Digitale Zwillinge beinhalten, müssen diese über kompatible Schnittstellen verfügen und darüber kommunizieren können. Als zentralen Aspekt Digitaler Zwillinge sieht Kuhn die Fähigkeit, verschiedene Informationen in einem einheitlichen Format repräsentieren zu können und so einen übergreifenden Informationsaustausch auch über Unternehmensgrenzen hinweg zu ermöglichen (vgl. Kuhn, T. 2017, S. 440). Wie auch Shafto et al. (2012) und Boschert und Rosen (2016) sieht er die Verwendung von Simulationsmodellen als Bestandteil des Digitalen Zwillinges, die zur Simulation von, unter anderem, funktionalen oder physischen Eigenschaften dienen. Die Ausführung dieser virtuellen Modelle mit realen Daten führe idealerweise zum gleichen Verhalten wie dem des realen Gegenstücks. So werden virtuelle Erprobungen und Planungen von Fertigungslinien mit dem Digitalen Zwilling möglich, auf deren Basis Optimierungen durchgeführt werden können, auch vor der tatsächlichen Produktion. Die Erforschung von aufgetretenen Fehlern wird ermöglicht, indem historische Daten analysiert werden. Ein zusammengesetztes System, wie bspw. ein Flugzeug, wird über einen Digitalen Zwilling repräsentiert, der die Digitalen Zwillinge von Teilkomponenten und deren Simulationsmodelle integriert und nutzt. Um eine hohe Simulationsgenauigkeit erreichen zu können, bedarf es der Integration verschiedener spezialisierter Simulationsmodelle innerhalb des Digitalen Zwillinges. Diesem werden reale Daten über definierte Schnittstellen bereitgestellt und simulierte Reaktionen zurückgeliefert (vgl. Kuhn, T. 2017, S. 440 ff.).

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Definitionen und Sichtweisen aus teils unterschiedlichen Gebieten zeigen, dass der Digitale Zwilling in seiner Grundfunktion ähnlich verstanden wird, die Ausgestaltung aber von der Anwendung und dem Nutzen, den er stiften soll, abhängt. Im folgenden Abschnitt werden Begrifflichkeiten aufgegriffen, die in der Fachliteratur im Kontext des Digitalen Zwillinges anzutreffen sind.

2.3.3 Weitere Begrifflichkeiten im Kontext des Digitalen Zwillings

Der Digitale Zwilling ist ein Thema, dem in der Fachliteratur und vielen Zeitschriften, in fast allen Fällen mit Bezug zu Industrie 4.0, beträchtliche Aufmerksamkeit zukommt. Da teilweise auch die Begriffe des *Digitalen Schattens* und der *Verwaltungsschale* im Kontext des Digitalen Zwillings gebraucht werden, erfolgt in diesem Abschnitt eine kurze Beschreibung, um die Zusammenhänge besser verstehen zu können.

2.3.3.1 Digitaler Schatten

In dem Standpunkt Industrie 4.0 der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik wird im Zusammenhang mit dem Digitalen Zwilling der Begriff des Digitalen Schattens als ein Handlungsfeld von Industrie 4.0 kategorisiert. Dieser wird dort als „das hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen“ (Bauernhansl et al. 2016, S. 23) definiert. Dazu gehört „die Beschreibung der notwendigen Datenformate, der Datenauswahl und der Datengranularitätsstufe“ (Bauernhansl et al. 2016). Weiter heißt es dort:

„Neben dem Begriff des Digitalen Schattens ist der Begriff des Digitalen Zwillings verbreitet. Der Digitale Schatten überführt zunächst den realen Produktionsprozess in die virtuelle Welt. Der Digitale Zwilling kann darauf aufbauend durch ein Prozessmodell und Simulation ein möglichst identisches Abbild der Realität liefern.“ (Bauernhansl et al. 2016)

Auch vom Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK werden beide Begriffe, Digitaler Schatten und Digitaler Zwilling, in einem Themenblatt aufgegriffen:

„Der digitale Zwilling ist ein digitales Abbild eines spezifischen Produkts (reales Objekt, Service oder immaterielles Gut), das dessen Eigenschaften, Zustand und Verhalten durch Modelle, Informationen und Daten erfasst. Jedes Produkt produziert einen digitalen Schatten durch Betriebs- und Zustandsdaten, Prozessdaten etc. Daher besteht ein digitaler Zwilling aus einer intelligenten Verbindung (Algorithmus, Simulationsmodell, Wechselbeziehung etc.) einer einzigartigen Instanz eines universalen digitalen Vorlagemodells und dessen individuellem digitalem Schatten.“ (Fraunhofer IPK 2017)

Der Digitale Schatten ist demnach die virtuelle Repräsentanz der durch ein Objekt oder System der realen Welt erzeugten Daten. Er kann nach diesen Definitionen als Teil des Digitalen Zwillings verstanden werden, wobei letzterer den Digitalen Schatten zur Abbildung der Realität nutzt und erweitert. Eine gesonderte Betrachtung des Digitalen Schattens im Rahmen dieser Arbeit wird als nicht notwendig betrachtet, da er durch den Digitalen Zwilling abgedeckt wird (für weitere Informationen siehe Bauernhansl et al. (2016, S. 23 ff.)).

Von Bedeutung in der Definition des Digitalen Schattens von Bauernhansl et al. (2016) und für das Verständnis des Digitalen Zwillings ist der Aspekt der Echtzeitfähigkeit. Hier wird abermals deutlich, dass die Daten, die in der physischen Welt generiert werden, unmittelbar in der digitalen Welt zur Verfügung stehen sollen. Das erweitert bzw. konkretisiert die Beschreibungen von Boschert und Rosen, die nicht direkt von Echtzeitfähigkeit, sondern einer parallelen Entwicklung der Zwillinge sprechen. Auch die Definitionen von Grieves und Vickers, Shafto et al. und Kuhn beschreiben eine Verbindung des realen und digitalen Zwillings bzw. eine Realdatennutzung. Aber auch hier geht die Echtzeitfähigkeit nicht unmittelbar aus den zitierten Definitionen hervor. Im Rahmen dieser Arbeit wird sie daher als erstrebenswert betrachtet.

2.3.3.2 *Verwaltungsschale (Asset Administration Shell)*

Die Verwaltungsschale (englisch: Asset Administration Shell) ist ein Begriff innerhalb von Industrie 4.0 und wird in mehreren Beiträgen des Magazins visIT des Fraunhofer-Instituts für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung als äquivalent zum Digitalen Zwilling betrachtet (bspw. Drath 2018; Sauer 2018). Da hierdurch die Verknüpfung des Themas Digitaler Zwilling mit der Industrie 4.0 deutlich wird, soll an dieser Stelle kurz die Betrachtung des Digitalen Zwillings aus einer Industrie 4.0-Perspektive dargestellt werden.

Drath (2018) beschreibt, dass der Digitale Zwilling in drei verschiedenen Arten interpretiert wird, wobei eine Entwicklung zugrunde liege. Als erste Interpretation benennt er das Verständnis der NASA (vgl. Abschnitt 2.3.2), also die Simulation eines realen Systems durch die Nutzung verschiedener Modelle, um das Verhalten des fliegenden Zwillings so genau wie möglich in der virtuellen Welt abzubilden. Die zweite Interpretation sei stark durch Siemens beeinflusst worden, bei der ein dynamisches 3D-Modell eines realen Objekts im Mittelpunkt stehe, das Simulation nutzt. Seinem Verständnis nach handelt es sich hierbei allerdings noch nicht um Industrie 4.0-Technologie. Derzeit erfahre die Bedeutung des Begriffs des Digitalen Zwillings eine erneute Entwicklung zu der dritten Interpretation. In Zukunft werde für jedes physische Gut ein Digitaler Zwilling, also ein umfassendes physikalisches und funktionales Modell benötigt, das die wesentlichen Informationen aller Lebenszyklusphasen enthalte (Eigenschaften, historische Daten, Handbücher etc.). Durch dessen Integration in die Industrie 4.0-Infrastruktur wird er vernetzbar, untersuchbar und mit seinem physischen Gegenstück verbindbar – die Kommunikation erfolgt durch definierte Industrie 4.0-Schnittstellen. Diese Definition setzt er mit der Verwaltungsschale gleich, deren Begriff zukünftig synonym zu dem des Digital Twins verwendet werde. Drath deutet auch darauf hin, dass in dieser Interpretation Simulationsmodelle nicht zwingend Bestandteil des Digitalen Zwillings sein müssen.

In Industrie 4.0 wird jeder physische Gegenstand (englisch: Asset: alles, was für eine Industrie 4.0-Lösung vernetzt werden muss, also Maschinen, Komponenten, Material, Unterlagen, Verträge etc.) um seine individuelle Verwaltungsschale erweitert. Dieses Konstrukt bildet eine Industrie 4.0-Komponente (vgl. Plattform Industrie 4.0 2018a; Drath 2018). Von der Plattform Industrie 4.0 (2018a) wird die Verwaltungsschale als der „Internet-Auftritt“ einer Industrie 4.0-Komponente beschrieben. Durch sie erfolgt eine Einbindung des Gegenstands in die Industrie 4.0-Kommunikation und der kontrollierbare Zugriff auf alle Informationen des Objekts wird ermöglicht. Sie stellt außerdem eine sichere und standardisierte Kommunikationsschnittstelle dar, identifiziert den Gegenstand eindeutig und ist damit im Netz adressierbar (vgl. Plattform Industrie 4.0 2018a, S. 7 f.). Wird die Verwaltungsschale mit dem Digitalen Zwilling gleichgesetzt, erfolgt demnach eine Betrachtung aus einer Industrie 4.0-Perspektive, bei der auch Eigenschaften wie die Selbstbeschreibungsfähigkeit von Bedeutung sind (vgl. Sauer 2018).

2.3.4 Nutzen und Potenziale

Die vorherigen Abschnitte stellen Definitionen und Sichtweisen unterschiedlicher Autoren bezüglich des Digitalen Zwillings dar, was bereits auf dessen Nutzen und Potenziale hindeutet. In diesem Abschnitt werden diese näher betrachtet. Da der Digitale Zwilling nach den aufgeführten Definitionen ein Konzept ist, das in allen Lebenszyklusphasen eines Objektes oder Systems Anwendung findet (Entwicklung, Produktion, Betrieb/Nutzung, Entsorgung), können für jede Phase Potenziale identifiziert werden.

Bereits in der Entwicklungsphase kann der Digitale Zwilling entscheidend zu einer effizienten Lösungsfindung beitragen. Da er virtuelle Modelle und Simulation beinhaltet, sind es die Potenziale dieser beiden Disziplinen, die hier Nutzen stiften: um Design- und Entwicklungsfehler im Vorfeld auszuschließen und bereits vor der Herstellung eines physischen Prototyps Optimierungen vornehmen zu können, können insbesondere für komplexe Komponenten, Produkte oder Systeme virtuelle Prototypen, also der digitale Part des Zwillings, erstellt werden, mit denen virtuelle Tests und V&V durchgeführt sowie Zusammenhänge analysiert werden können. Wichtige Daten und Informationen, die in späteren Phasen von Bedeutung sein werden, gilt es in den Digitalen Zwilling zu integrieren, womit dieser von Beginn an stetig „wächst“ (vgl. Grieves und Vickers 2017, S. 96; Kuhn, T. 2017, S. 440 f.; Boschert und Rosen 2016, S. 70 f.). Auch Anforderungs-, Kompatibilitäts-, Integrationstests über Unternehmensgrenzen hinaus (bspw. ob das Produkt/System allen Anforderungen des Kunden genügt, für dessen Verwendungszweck kompatibel ist bzw. sich in dessen Produkt/Produktion integrieren lässt), lassen sich anhand des Digitalen Zwillings durchführen, auch wenn das physische Objekt noch nicht hergestellt wurde. Damit wird dem Kunden

außerdem ermöglicht, Optimierungen im Vorfeld vorzunehmen (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 69; Kuhn, T. 2017, S. 440 ff.). Für Weiterentwicklungen oder die Entwicklung neuer System- oder Produktgenerationen können Digitale Zwillinge bereits genutzter Systeme oder Produkte herangezogen werden, um die Erfahrungen, Modelle und Betriebsdaten zu nutzen. Dadurch wird der Kreis der Lebenszyklusphasen geschlossen (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 67 ff.; Cadet et al. 2017, S. 52 f.). Auch die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen wird als ein wichtiges Potenzial des Digitalen Zwillings gesehen, woraus Einsparpotenziale bezüglich Zeit und Kosten entstehen und Optimierungen bereits vor der tatsächlichen Inbetriebnahme vorgenommen werden können (vgl. Kuhn, T. 2017, S. 440). Die virtuelle Inbetriebnahme wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Weitere Informationen können der Literatur, wie bspw. der VDI/VDE Richtlinie 3693 Blatt 1 und 2, entnommen werden. Aufgrund dieser Potenziale wird der Digitale Zwilling auch als wichtiges Werkzeug für die Entwicklung von CPS und die Bewältigung von Herausforderungen in Industrie 4.0 gesehen (Fraunhofer IPK 2017, S. 1).

Während den Phasen der Herstellung bzw. Produktion und des Betriebs bzw. der Nutzung des physischen Objekts kann der Digitale Zwilling zur effizienteren Produktion, weniger Ausfällen, einer gesteigerten Qualität, besserer Leistungsfähigkeit und höherer Zuverlässigkeit beitragen (vgl. Kuhn, T. 2017, S. 441 f.; Boschert und Rosen 2016, S. 72 f.). Boschert und Rosen (2016) betonen besonders die Wiederverwendbarkeit von Modellen, um Aufwand zu sparen und wertvolle Informationen weiter nutzen und entwickeln zu können. Bislang seien Entwicklung und Betrieb häufig getrennt, was die Datennutzung betrifft. Durch den Digitalen Zwilling kann ein nahtloser Nutzen über alle Lebenszyklusphasen entstehen, indem in der Entwicklungsphase erstellte Modelle wiederverwendet, weiterentwickelt und angereichert werden. Damit entsteht ein großer Nutzen des Konzepts vor allem für Herstellung, Betrieb und Service. Dort können betriebsparallele Simulationen und Zustandsinformationen durch die Darstellung und Auswertung von Sensordaten in Assistenzsystemen sowie die Nutzung historischer Daten eine wichtige Entscheidungsunterstützung bieten. Was-wäre-wenn-Analysen in der virtuellen Welt werden möglich, die zu Optimierungen führen können, ohne in das reale System eingreifen zu müssen. Der Informationsaustausch muss nicht mehr auf Basis von Dokumenten erfolgen, sondern kann über Modelle realisiert werden (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 68 ff.; Kuhn, T. 2017, S. 444). Auch die prädiktive bzw. vorausschauende Wartung wird ermöglicht, indem die zustandswiderspiegelnden Sensordaten innerhalb des Digitalen Zwillings analysiert und mit historischen Daten in Relation gesetzt werden (vgl. Weise 2018; Kuhn, T. 2017, S. 441). Dies kann bspw. über das Vergleichen von Mustern aus Sensordaten erfolgen: ist kurz nach einem bestimmten Datenmuster ein Fehler aufgetreten, kann dieser zukünftig durch vorbeugende Maßnahmen verhindert werden, sobald dieses Muster erneut erkannt wird (vgl. Grieves und

Vickers 2017, S. 94 f.). Auch können Abweichung zwischen der Simulation im virtuellen Raum, die den normalen Betriebszustand wiedergibt, und dem tatsächlichen Betrieb zur Fehleridentifikation und frühzeitigen Abstellung dienen (vgl. Boschert et al. 2018, S. 214). Dadurch können die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit erheblich gesteigert werden bei gleichzeitiger Kostenreduktion, da Stillstandzeiten und der präventive Austausch noch funktionierender Komponenten minimiert werden. Sollte trotzdem ein Fehler aufgetreten sein, können historische Daten herangezogen werden, um Vergleiche und Analysen durchzuführen sowie Ursachen festzustellen. Auch Teile, die nicht den Anforderungen entsprechen, könnten so durch ihren Digitalen Zwilling frühzeitig identifiziert werden, um entsprechende Maßnahmen zu ergreifen (vgl. Kuhn, T. 2017, S. 441). Ein weiterer Punkt, der von Rosen et al. (2015) behandelt wird, ist, dass Digitale Zwillinge erheblich die Autonomie in der Produktion steigern könnten. Indem Produkte ihren Zustand, bereits durchgeführte und noch notwendige Bearbeitungsschritte mittels ihres individuellen Digitalen Zwillings kennen und Anlagen über die Fähigkeit verfügen, sich und ihre Fähigkeiten selbst zu beschreiben, untereinander und mit den Produkten zu kommunizieren (aufgrund der Informationen und Schnittstellen innerhalb des Digitalen Zwillings), wäre zukünftig die Möglichkeit denkbar, dass sich Produkte autonom durch die Fertigung bewegen und Anfragen an die entsprechenden Maschinen senden. Mittels Simulationen innerhalb der Digitalen Zwillinge könnte über den optimalen Weg entschieden werden, so dass die Effizienz erheblich gesteigert würde und auch die Fertigung besonders kleiner Mengen und Spezialaufträge lukrativ würde. Ein solches Szenario ist ein Ziel, das mit Industrie 4.0 erreicht werden soll: zunehmende Autonomie durch dezentrale Entscheidungen (s. Abschnitt 2.2.3). Damit wird der mögliche Beitrag des Digitalen Zwillings deutlich.

Um auch die Phase der Entsorgung bzw. Wiederverwertung kurz aufzugreifen, können Digitale Zwillinge bspw. zur Ersatzplanung eingesetzt werden. Auch hier sind die Informationen von großer Bedeutung, die sich innerhalb des Digitalen Zwillings über die Lebenszeit angesammelt haben und können entsprechend genutzt werden. Ein weiteres Beispiel ist die Eruierung von Upcycling-Potenzialen (vgl. Grösser).

Es wird deutlich, dass dem Konzept des Digitalen Zwillings erhebliche Potenziale zugesprochen werden. Auch wenn das Konzept durch Industrie 4.0 einen neuen Grad der Beachtung erfahren hat, stammen die meisten der genannten Potenziale aus der Grundidee. Erst die heutige Technik, bspw. die dezentrale Speicher- und Verarbeitungsmöglichkeit enormer Datenmengen mit hoher Geschwindigkeit und Vernetzungsmöglichkeiten, machen den Digitalen Zwilling noch leistungsfähiger und lassen ihn zu einem wichtigen Instrument innerhalb von Industrie 4.0 werden, das erheblich zur Bewältigung von Herausforderungen

und Komplexität beiträgt. Er bringt die virtuelle und physische Welt zusammen und kann die Integration physischer Gegenstände in das Internet der Dinge ermöglichen. Gleichzeitig gilt es, eine Vielzahl an Herausforderungen zu überwinden, um das volle Potenzial des Konzepts ausschöpfen zu können. Diese werden im folgenden Abschnitt kurz genannt.

2.3.5 Herausforderungen

Um den Digitalen Zwilling realisieren und die im vorherigen Abschnitt dargestellten Potenziale ausschöpfen zu können, müssen zahlreiche Herausforderungen überwunden werden. Einige werden im Folgenden kurz genannt, um einen Überblick zu bieten. Es wird kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben.

Zum einen betrifft dies die Datenmengen, die generiert, gespeichert und verarbeitet werden müssen, um den Digitalen Zwilling als Lieferant für sämtliche Informationen nutzen zu können. Zunächst bedarf es geeigneter Sensorik, die sich zur zuverlässigen Erfassung der Daten eignet. Sollen wirklich alle Daten und Informationen, die sich in den Lebenszyklusphasen ansammeln sowie generierte Sensordaten gespeichert werden, muss enorme Speicherkapazität zur Verfügung stehen. Um die Daten auswerten zu können und rechtzeitig für Entscheidungen zur Verfügung zu stellen, sind eine hohe Rechenleistung sowie komplexe Analyse- und Auswertungsmethoden notwendig. Hier steht das Konzept demnach vor technischen Hürden (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 66; Kühn und Schele 2017).

Eine weitere Herausforderung besteht hinsichtlich Schnittstellen, Interaktion und Integration. Sollen mehrere verschiedene Simulationsmodelle integriert werden, um sie innerhalb eines Digitalen Zwillings nutzen zu können, muss eine Kommunikation und Interaktion zwischen diesen möglich sein. Häufig werden verschiedene Modelle allerdings in unterschiedlichen Werkzeugen erstellt, wodurch das Ermöglichen dieser Interaktion zu einer großen technischen Herausforderung wird. Soll zudem die Vision vom übergreifenden Datenaustausch zwischen Digitalen Zwillingen realisierbar werden, müssten auch hier unterschiedliche Plattformen und Werkzeuge zur Interaktion befähigt werden. Dies stellt eine große Herausforderung dar (vgl. Kuhn, T. 2017).

Sollen Simulationsmodelle innerhalb des Digitalen Zwillings nicht nur für die Durchführung von Simulationsstudien, sondern auch für betriebsparallele Simulationen dienen, ist ein vielfach größerer Aufwand bei deren Erstellung und Pflege notwendig. Die Nachnutzungsfähigkeit von Modellen ist dabei von wesentlicher Bedeutung (s. Abschnitt 2.1.1). Diese muss unter anderem durch ausreichend Personal mit genügend Kenntnissen und eine umfangreiche Dokumentation abgedeckt werden (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 153 ff.)

Rechts- und Sicherheitsaspekte sind ein weiterer Punkt. Überall, wo Daten und Informationen in digitaler Form zur Verfügung gestellt und kommuniziert werden, stellen Rechte und Datensicherheit eine Herausforderung dar (vgl. Bauernhansl et al. 2016, S. 38). Auch mit dem Konzept des Digitalen Zwillings gilt es bspw., Informationen oder gar virtuelle Steuerungsmöglichkeiten vor unbefugtem Zugriff zu schützen und Eigentumsrechte einzuhalten.

Anhand dieses kurzen Einblicks in einen Teil der Herausforderungen, die die Realisierung des Digitalen Zwillings mit sich bringt, soll dafür sensibilisiert werden, dass die Potenziale und Visionen zwar sehr vielversprechend sind, gleichzeitig aber großer Aufwand und die Entwicklung von neuen Lösungen notwendig sind, um sie tatsächlich realisieren zu können.

2.3.6 Zusammenfassende Darstellung

Die vorherigen Abschnitte geben einen Überblick zu Definitionen und Sichtweisen hinsichtlich des Digitalen Zwillings. Diese sind in der Grundidee sehr ähnlich, unterscheiden sich aber teilweise leicht bezüglich der Perspektive. Demnach werden unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt, wodurch die Ausgestaltung des Digitalen Zwillings stets einzigartig und abhängig vom Anwendungsfall sein wird (vgl. Sauer 2018). Deshalb sollte zu Beginn festgelegt werden, welche Informationen und Modelle er enthalten soll und welchem Zweck er dienen soll, um später den spezifischen Nutzen erfüllen zu können (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 68 ff.). Gleichzeitig gibt es einige Mindestanforderungen, die für das Konzept des Digitalen Zwillings von Bedeutung sind. Diese werden in diesem Abschnitt zusammengestellt, wodurch das Verständnis für den weiteren Verlauf der Arbeit festgelegt wird. Die im Folgenden genannten Punkte basieren auf den Beiträgen, die in den vorherigen Abschnitten dargestellt und zitiert wurden.

In allen Definitionen ist enthalten, mindestens umschrieben, dass das Konzept des Digitalen Zwillings aus einem Objekt der realen Welt, das je nach Definition eine einzelne Komponente, ein Produkt, ein System oder auch ein ganzes Produktionssystem sein kann, und dessen individuellem digitalen Abbild – die virtuelle Repräsentation dieses Objekts – besteht. Es herrscht Einigkeit darüber, dass der Digitale Zwilling wesentliche Informationen über sein physisches Gegenstück im virtuellen Raum bereitstellt und mit realen Nutzungsdaten angereichert wird, um so Informationen über den aktuellen Zustand zu ermöglichen. Dabei entwickelt er sich mit seinem physischen Zwilling und kann auch bereits vor diesem bestehen. Ebenso ist die Einbindung von Informationen und Daten aus allen Lebenszyklusphasen sowie der phasenübergreifende Einsatz und Nutzen ein gemeinsamer Punkt der zitierten Autoren.

Hingegen wird das Intervall, in dem der Digitale Zwilling aktualisiert wird, nicht einheitlich definiert. Die Zustandsdarstellung in Echtzeit, wie von Bauernhansl et al. (2016) beschrieben, kann dabei als erstrebenswert betrachtet werden. Die Nutzung von Simulation und Modellen innerhalb des Digitalen Zwillings wird von dem Großteil der Autoren als wichtige Eigenschaft gesehen. Unter den zitierten konstatiert lediglich Drath (2018), dass Simulationsmodelle nicht zwingend Bestandteil sein müssen, bspw. für statische Objekte. Da im Rahmen dieser Arbeit schwerpunktmäßig die Betrachtung und Abbildung eines gesamten Systems erfolgt, wird hier der Einsatz von Simulation als Eigenschaft des Digitalen Zwillings betrachtet. Je nach Einsatzzweck kommen dabei multiphysikalische Simulationen unterschiedlicher Granularität zur Anwendung, wie Shafto et al., Boschert und Rosen sowie Kuhn beschreiben. In Verbindung mit den realen Daten können so Rückschlüsse über das Verhalten des realen Pendants gezogen werden, womit virtuelle Erprobungen möglich werden. Damit dient der Digitale Zwilling als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung bzw. als Assistenzsystem, da mit seiner Hilfe in anschaulicher Weise Erkenntnisse über das physische Objekt gewonnen werden können, primär durch Informationen über den aktuellen Zustand und historische Daten, aber auch durch die Simulationsfähigkeit mit Echtdateien. Der primäre Zweck des Digitalen Zwillings wird daher im Rahmen dieser Arbeit in der Gewinnung aktueller Informationen und Erkenntnisse über seinen physischen Gegenpart gesehen.

Die Vernetzung und Interaktion verschiedener Digitaler Zwillinge, wie von Kuhn und Drath beschrieben und von Rosen et al. (2015) als zentraler Aspekt für Autonomie dargestellt, ist bedeutend für die Visionen von Industrie 4.0.

Zudem wird anhand der aufgeführten Herausforderungen deutlich, dass der Digitale Zwilling stets mit Fokus auf den gewünschten Zweck zu gestalten ist, da er ansonsten aufgrund von Machbarkeitsgrenzen nicht realisierbar ist. Damit wird die Art und Menge der Informationen, die er bereitstellt sowie die Genauigkeit und Bandbreite der Simulationsmodelle, die er nutzt, anwendungsspezifisch sein (vgl. Boschert und Rosen 2016, S. 68 ff.; Cadet et al. 2017, S. 52 f.; Sauer 2018). Verschiedene Digitale Zwillinge können sich somit aufgrund ihrer Genauigkeit und Komplexität stark unterscheiden.

Zusammenfassend wird für den weiteren Verlauf der Arbeit die folgende Definition auf Basis der von den aufgeführten Autoren dargestellten Sichtweisen festgelegt:

Das Konzept des Digitalen Zwillings umfasst ein physisches Objekt, dessen individuelle virtuelle Repräsentation und die Verbindung zwischen beiden. Das physische Objekt kann dabei eine einzelne Komponente, ein Produkt, bis hin zu einem komplexen System sein. Die virtuelle Repräsentation dieses Objekts, die zu Entwicklungs- und Designzwecken auch bereits vor diesem bestehen kann, wird als dessen Digitaler Zwilling bezeichnet und vereint

wesentliche Informationen aus allen Lebenszyklusphasen seines realen Gegenparts, stellt diese im virtuellen Raum zur Verfügung und wird mit realen Daten angereichert, wodurch er stets den aktuellen Zustand des Objekts in Echtzeit widerspiegelt und regelmäßig aktualisiert wird. Somit entwickelt er sich mit seinem physischen Pendant und ist in allen Lebenszyklusphasen von Nutzen. Durch die Verwendung von Simulation wird der Digitale Zwilling für virtuelle Erprobungen und betriebsparallele Simulationen nutzbar. Sein primärer Zweck ist daher die Möglichkeit, kurzfristig Erkenntnisse über sein reales Gegenstück gewinnen zu können. Je nach Anwendungsfall kommen multiphysikalische Simulationsmodelle unterschiedlicher Granularität zum Einsatz. Im Rahmen von Industrie 4.0 wird die Vernetzung und Interaktion mehrerer Digitaler Zwillinge und deren Integration in ein Internet der Dinge angestrebt.

Die hier aufgeführten Anforderungen, die sich im Laufe der Zeit für den Digitalen Zwilling entwickelt haben, sind wesentlich durch die angestrebten Merkmale von Produktions- und Logistiksystemen in Industrie 4.0 geprägt, da der Digitale Zwilling in diesem Kontext zum Einsatz kommen und einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung von Herausforderungen und zur Unterstützung des Menschen leisten soll.

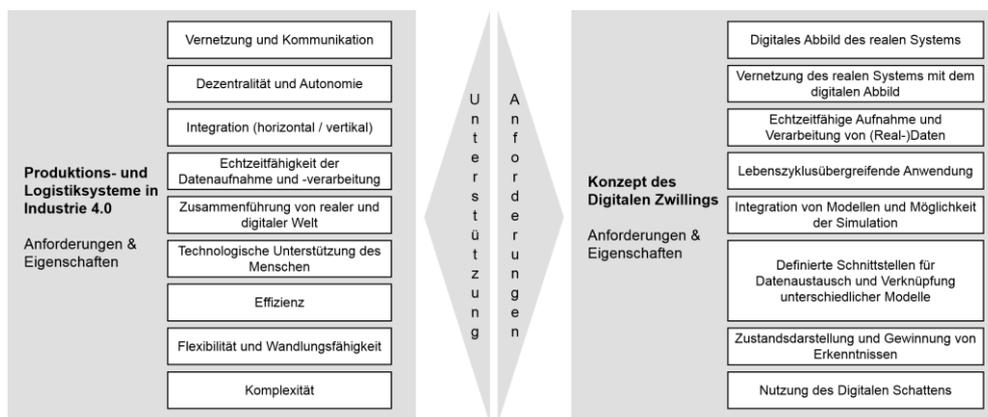


Abbildung 2.10: Das Konzept des Digitalen Zwillings - Merkmale und Anforderungen (eigene Darstellung)

In Abbildung 2.10 wird zusammenfassend dargestellt, welche Paradigmen in Industrie 4.0 von Bedeutung sind (linker Bereich) und welche Eigenschaften und Anforderungen daraus für das Konzept des Digitalen Zwillings resultieren (rechter Bereich). Diese Punkte basieren auf den Beschreibungen und den Literaturverweisen der Abschnitte 2.2 und 2.3.

Diese Anforderungen haben wiederum Auswirkungen auf die für den Digitalen Zwilling zu nutzenden Werkzeuge, wie die Simulation. Im folgenden Kapitel werden diese Anforderungen betrachtet und konkretisiert, um schließlich ein Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation zu entwickeln.

3 Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation

Die vorherigen Abschnitte beschreiben die Themengebiete der Simulation, der Industrie 4.0 und das Konzept des Digitalen Zwillings. Dabei ist ersichtlich, dass gesellschaftliche, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen zu neuen Anforderungen und Möglichkeiten in Bezug auf die Gestaltung und den Betrieb von Produktions- und Logistiksystemen führen. Mit Industrie 4.0 sollen neue technologische Möglichkeiten genutzt werden, um gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen zu bewältigen, womit ein Paradigmenwechsel in der Industrie einhergeht. Das Konzept des Digitalen Zwillings ist dabei von wesentlicher Bedeutung, um die reale und digitale Welt zu vernetzen und den Menschen in einem komplexen Umfeld zu unterstützen. Resultierende Anforderungen an den Digitalen Zwillings haben wiederum Anforderungen an Werkzeuge und Methoden der Digitalen Fabrik (s. Abschnitt 2.1.1) zur Folge, die innerhalb des Digitalen Zwillings genutzt werden, so auch an die ereignisdiskrete Simulation.

Mit dieser Bachelorarbeit wird untersucht, was bei der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells zur Abbildung eines technischen Systems (Produktions- und Logistiksystem) beachtet werden muss, um dieses als Digitalen Zwillings im Kontext von Industrie 4.0 nutzen zu können. Dazu wird in diesem Kapitel zunächst betrachtet, welche Rolle der ereignisdiskreten Simulation in Industrie 4.0 beigemessen wird und welche Anforderungen daraus generell für die ereignisdiskrete Simulation resultieren (Abschnitt 3.1). Diese Anforderungen werden anschließend konkretisiert, um sie bei der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells zu beachten, wenn dieses als Digitaler Zwillings im Kontext von Industrie 4.0 genutzt werden soll (Abschnitt 3.2). Diese Anforderungen werden schließlich in das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) integriert, womit ein Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis eines ereignisdiskreten Simulationsmodells entsteht (Abschnitt 3.3), das an der LEGO®-Modellfabrik des pfp angewendet und reflektiert wird (Kapitel 4).

3.1 Anforderungen an die ereignisdiskrete Simulation durch Industrie 4.0 und den Digitalen Zwilling

Mit der Betrachtung der Simulation in Abschnitt 2.1 wird deutlich, dass diese bereits seit geraumer Zeit für Planungs- und Analysezwecke sowie zur Entscheidungsfindung und -absicherung genutzt wird. Im Rahmen von Industrie 4.0 werden Handlungsfelder wie die Autonomie und die Vernetzung von Objekten, Maschinen und Systemen zu einer neuen Stufe der Komplexität führen. Nicht nur bei großen, sondern auch bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) wird eine steigende Komplexität in den Prozessen und Interaktionen zukünftig unumgänglich sein, um die Bedarfe eines nach Individualisierung und kurzfristiger Reaktionsfähigkeit verlangenden Marktes decken zu können, womit neben großen Unternehmen auch eben diese KMU vermehrt auf die ereignisdiskrete Simulation zur Analyse und Absicherung angewiesen sind (vgl. Bauernhansl et al. 2016; Wenzel et al. 2017, S. 177 f.). Dabei stellt sich die Frage, welche Rolle der klassischen ereignisdiskreten Simulation in diesem neuen Kontext zukommt und welchen neuen Anforderungen sie genügen muss, um sich auch in Industrie 4.0 als ein wesentliches Werkzeug zu etablieren.

Wenzel et al. (2017) schlussfolgern nach einer umfangreichen Analyse von Publikationen in Verbindung mit Industrie 4.0 und der Ablaufsimulation (im Folgenden: ereignisdiskrete Simulation) innerhalb der Jahre 2011 bis 2017, dass die ereignisdiskrete Simulation als ein Werkzeug der Digitalen Fabrik auch im Rahmen der vierten industriellen Revolution von wesentlicher Relevanz für die Planung und den Betrieb von Produktions- und Logistiksystemen sowie für den Einsatz im Rahmen des Digitaler Zwillings der realen Produktion ist und sein wird. Besonders die angesprochene Komplexitätssteigerung, unter anderem aufgrund von zunehmender Vernetzung, Dezentralisierung und autonomen Systemen (vgl. Abschnitt 2.2.3), gibt ihr entscheidenden Aufwind. Der wachsende Informationsumfang erschwert das Treffen von Entscheidungen und die Auswirkungen der Entscheidungen sind wiederum aufgrund der steigenden Komplexität immer schwieriger nachvollziehbar (vgl. Wenzel et al. 2017, S. 177). Aufgrund dessen wird das Einbeziehen der Simulationstechnik in die Entwicklungen zu Industrie 4.0 gefordert, um Entscheidungsprozesse anhand anschaulicher Modelle zu vereinfachen und komplexe Systeme beherrschbar zu machen (vgl. bspw. Bauernhansl et al. 2016; Abele und Reinhart 2011; Wenzel et al. 2017). So kann die Simulation vor der Realisierung aber auch während des Betriebs für Systemverbesserungen und zur Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden (vgl. DIN/DKE 2018, S. 57). Anwendungen für Assistenzsysteme oder Erklärungsmodelle werden als sinnvoll betrachtet (vgl. Bischoff et al. 2015, S. 90 ff.; acatech und Forschungsunion 2013, S. 46) und sogar der klassischen Anwendung der Simulation in Form von Simulationsstudien für Neu- und Veränderungsplanungen wird in Industrie 4.0

weiterhin Bedeutung beigemessen, um neben Materialflüssen auch Informationsflüsse und neue Prozesse frühzeitig absichern und optimieren zu können (vgl. Horler und Müller 2017, S. 58; Schlick et al. 2014). Gleichzeitig sind mit den Veränderungen, die Industrie 4.0 mit sich bringt auch Herausforderungen für die ereignisdiskrete Simulation verbunden, an denen es anzusetzen gilt, um sie als wesentliche Disziplin in dem sich stetig weiterentwickelnden Umfeld zu etablieren. Grundsätzlich ist dafür eine Neupositionierung notwendig, um der möglichen neuen Rolle im Umfeld von Industrie 4.0 gerecht werden zu können.

Diese Positionierungsnotwendigkeit bringen auch Mayer und Mieschner (2017) mit der Darstellung von Chancen und Risiken, die mit Industrie 4.0 für die Ablaufsimulation einhergehen, zum Ausdruck (vgl. auch Wenzel et al. 2018, S. 29). Eine wesentliche Chance sehen sie in der Informationstransparenz, die mit Industrie 4.0 und der Digitalisierung einhergehen soll. Da Daten eine immense Bedeutung für die Simulation haben, können genauere Daten und bessere Möglichkeiten zur Datenerfassung, -auswertung und -bereitstellung zu genaueren Modellen führen und die Simulationsergebnisse deutlich aufwerten. Die Komplexitätssteigerung wird auch hier als Argument für die ereignisdiskrete Simulation gesehen, um bei resultierenden Verständnisproblemen durch Veranschaulichung Abhilfe schaffen zu können. Eine weitere wesentliche Chance sehen die Autoren in der Etablierung als Baustein des Digitalen Zwillings, wofür eine gesteigerte Interoperabilität¹⁰ mit anderen Methoden jedoch unumgänglich ist (vgl. Mayer und Mieschner 2017).

Risiken sehen Mayer und Mieschner (2017) unter anderem in der langen Zeitdauer, die Simulationsstudien beanspruchen. Um neue, agile Ziele, wie in Industrie 4.0 gefordert, kurzfristig erreichen zu können, genügt eine gesteigerte Datentransparenz nicht. Es bedarf zusätzlich der Möglichkeit zur automatisierten Modellerstellung und V&V, damit sich die ereignisdiskrete Simulation weiterhin behaupten kann. Auch die gesteigerte Komplexität ist nicht uneingeschränkt als Chance zu sehen, denn sie führt gleichzeitig zu Eingangswerten mit nahezu unendlicher Variantenvielfalt, womit Systeme mit intelligenten Elementen und dezentraler Kommunikation mit der ereignisdiskreten Simulation nur schwer abgesichert werden können. Darüber hinaus verlangt der erforderliche Informationsbedarf in bestimmten Fällen neben einem Gesamtüberblick einen höheren Detaillierungsgrad als dieser mit der ereignisdiskreten Simulation vorgesehen ist. Fehlende Offenheit der Simulationswerkzeuge ist grundsätzlich eine Problematik, die es zu überwinden gilt. Zum

¹⁰ „Interoperabilität kann differenziert werden nach syntaktischer Interoperabilität (Sicherstellung der technischen Voraussetzungen zur Zusammenarbeit auf Zeichen- und Datenebene), semantischer Interoperabilität (Sicherstellung der richtigen Information für die jeweils zu integrierende Anwendung) und pragmatischer Interoperabilität (Sicherstellung der richtigen Interpretation und Verwendung der Information seitens des Empfängers)“ (Bracht et al. (2018, S. 184), Wenzel et al. (2005)).

einen können die Softwarehersteller zum Teil nicht so schnell reagieren, wie Entwicklungen im Rahmen von Industrie 4.0 voranschreiten, was das Risiko birgt, dass neue Produktionsprozesse nicht mehr abgebildet werden können und die ereignisdiskrete Simulation obsolet wird. Zum anderen schränkt die mangelnde Interoperabilität mit anderen Simulationswerkzeugen wichtige Möglichkeiten ein, bspw. die Integration von Modellen unterschiedlicher Detaillierung oder multiphysikalische Simulationen. Für die Etablierung als Baustein des Digitalen Zwillings ist diese Operabilität jedoch entscheidend, um die Anbindung an neue Methoden, wie bspw. Big Data, und die Interoperabilität zwischen verschiedenen Simulationswerkzeugen und Modellen zu gewährleisten (vgl. Mayer und Mieschner 2017). In diesem Zusammenspiel dient die ereignisdiskrete Simulation hauptsächlich der Abbildung der Prozesse (vgl. Wenzel et al. 2017, S. 186).

Wenzel et al. (2017) verwenden in diesem Zusammenhang nicht den Begriff des Risikos. Basierend auf ihrer umfangreichen Analyse gehen sie auf Herausforderungen ein und zeigen mit der Formulierung von sieben Handlungsfeldern für die ereignisdiskrete Simulation die zukünftigen Entwicklungsfelder auf, um die Simulation als Begleiter der gesamten, durchgängigen digitalen Engineering-Kette, von Planung bis Betrieb, und als Baustein des Digitalen Zwillings zu etablieren (vgl. Wenzel et al. 2017, S. 187 ff.). Diese Handlungsfelder sind in Abbildung 3.1 dargestellt und werden im Folgenden basierend auf den Beschreibungen von Wenzel et al. (2018, S. 29 ff.) zusammengefasst.

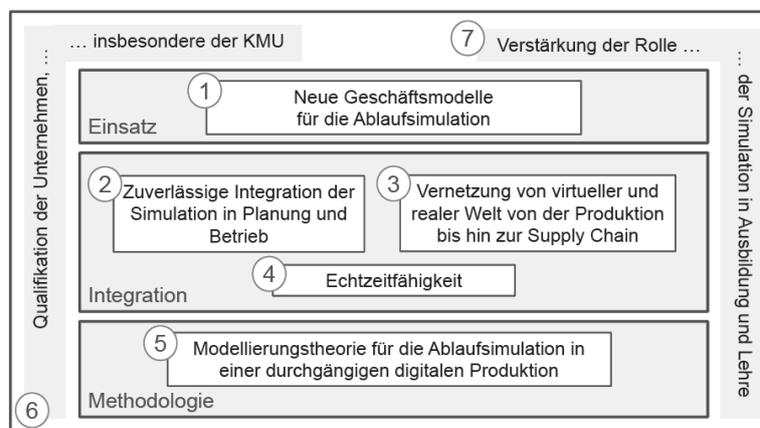


Abbildung 3.1: Handlungsfelder für die ereignisdiskrete Simulation (Wenzel et al. 2018, S. 30)

Für Simulationswerkzeughersteller, -dienstleister und Lieferanten von Anlagen wird ein Überdenken bisheriger Geschäftsmodelle notwendig (Handlungsfeld 1 in Abbildung 3.1), da sich neue Anwendungen für die Simulation ergeben. Der Einsatz als Bestandteil des Digitalen Zwillings fordert zuverlässige, robuste Simulationsmodelle, deren uneingeschränkte Verfügbarkeit gewährleistet werden muss. Zudem gilt es, die Simulationswerkzeuge an neue Bedingungen in Industrie 4.0 und an die Nutzergruppen anzupassen. Wesentliche Punkte sind bspw. eine neue Lizenzpolitik, das Bereitstellen von

Simulationsmodellen bei Anlagenauslieferung mit entsprechenden Schnittstellen oder das Einbeziehen von Cloudlösungen.

Neue Prozesse und teamorientierte, interdisziplinäre Arbeitsweisen bedingt durch Industrie 4.0 fordern zudem eine zuverlässige Einbindung der Simulation in Planung und Betrieb (Handlungsfeld 2 in Abbildung 3.1), um Produktionssysteme belastbar abbilden zu können. Es gilt, Analysen von Systemen in unterschiedlicher Skalierung und aus verschiedenen Perspektiven durch die Interaktion unterschiedlicher Simulationsmodelle und -methoden auf einer Multi-Simulationsplattform zu ermöglichen. Auch wenn eine wesentliche Aufgabe der ereignisdiskreten Simulation weiterhin in der Planungsabsicherung besteht, ist zudem die Integration in ein umfassendes Planungsassistenzsystem und die dafür notwendige Kopplungsmöglichkeit verschiedener Simulationswerkzeuge bedeutend. Für diese auch von Mayer und Mieschner (2017) geforderte Interoperabilität sind geeignete Schnittstellen unumgänglich.

Um nicht nur die Kopplung der digitalen Modelle untereinander, sondern auch die mit Industrie 4.0 geforderte Vernetzung mit der realen Welt zu gewährleisten (Handlungsfeld 3 in Abbildung 3.1), müssen die Modelle mittels der Anbindung an Enterprise Resource Planning Systeme eine permanent aktuelle und gemeinsame Datenbasis aufweisen. Aber auch die Vernetzung über Informationssysteme der gesamten Lieferkette ist wesentlich zur Erreichung der Ziele von Industrie 4.0. Auch dieser Punkt verlangt den Simulationswerkzeugen Offenheit, Anpassungs- und Kopplungsfähigkeit ab. Zusätzlich müssen die Daten in entsprechender Qualität und den jeweils richtigen Formaten vorliegen, damit ein zuverlässiges, stets aktuelles digitales Abbild entstehen kann. Fehlerfreiheit in Technik und Kommunikation ist dafür Voraussetzung. Zudem sind rechtliche Fragen zu klären.

Die Datenaufnahme und -verarbeitung sowie die Aktualisierung des Digitalen Zwillings sind in Echtzeit zu gewährleisten (Handlungsfeld 4 in Abbildung 3.1), um kurzfristige Analysen zur Entscheidungsunterstützung auch während des Betriebs zu ermöglichen. Hier gehen Wenzel et al. (2018) außerdem darauf ein, dass Simulationsmodelle dazu über die Fähigkeit verfügen müssen, sich automatisch an neue Umstände anpassen zu können und die Anbindung an neue Methoden zur Identifizierung der besten Lösung notwendig ist (bspw. Big Data Analytics).

Neue Modellanforderungen gehen mit der Nutzung der ereignisdiskreten Simulation innerhalb des Digitalen Zwillings einher, da die Integration, horizontal wie vertikal, und die Verbindung mit der Realität zu berücksichtigen sind (Handlungsfeld 5 in Abbildung 3.1). Da Produktionssysteme in Zukunft anpassungsfähig, skalierbar und wiederverwendbar sein müssen, bedarf es ebenso adaptierbarer, integrierbarer, erweiterbarer und

wiederverwendbarer Modelle. Ein modularer Aufbau und einfache Parametrisierbarkeit sind dafür wichtige Voraussetzungen. Simulationsmodelle müssen zukünftig über den gesamten Lebenszyklus ihres realen Pendanten einsetzbar sein, wodurch Simulationswerkzeuge eine konzeptionelle Offenheit aufweisen müssen. Auch das Management der Modelle ist eine entscheidende Aufgabe, da diese nun in verschiedenen Zusammenhängen eingesetzt werden können und somit eine einfache Auffindbarkeit der richtigen Modelle sowie deren Pflege gewährleistet werden müssen.

Mit den Handlungsfelder 5 und 6 in Abbildung 3.1 weisen Wenzel et al. (2018) außerdem auf die Notwendigkeit hin, Unternehmen, besonders KMU, in Bezug auf die zukünftige Bedeutung der Simulation und Modellierung aufmerksam zu machen und für diese zu qualifizieren sowie die Rolle der Simulation in Ausbildung und Lehre zu stärken (vgl. Wenzel et al. 2018, S. 29 ff.).

Nach Betrachtung der beschriebenen Sichtweisen herrscht Konsens darüber, dass die ereignisdiskrete Simulation auch in Industrie 4.0 eine wichtige Rolle spielt. Wenn auch sicherlich weiterhin klassische Anwendungen im Rahmen von Simulationsstudien von Bedeutung sind, ist jedoch abzusehen, dass die ereignisdiskrete Simulation neuen Anforderungen genügen muss. Schwerpunktmäßig ist dabei die Anwendung als Baustein des Digitalen Zwillings zu sehen, der, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, je nach Anwendungsfall mehrere Simulationsmethoden und -werkzeuge vereint und zusätzlich mit der Bereitstellung aller wesentlichen Daten seines realen Gegenstücks sowie dessen Repräsentation in Echtzeit besonders dafür geeignet ist, die reale Welt virtuell abzubilden und mit seinen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von großem Nutzen im Umfeld von Industrie 4.0 ist. Soll ein ereignisdiskretes Simulationsmodell selbst als Digitaler Zwilling im Kontext von Industrie 4.0 genutzt werden, sind demnach bei dessen Erstellung zum einen Eigenschaften und Anforderungen in Bezug auf Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 sowie zum anderen Eigenschaften und Anforderungen in Bezug auf den Digitalen Zwilling zu berücksichtigen. Die Anforderungen, die sich daraus wiederum für die Erstellung eines solchen Simulationsmodells ergeben, werden in Abbildung 3.2 (als Erweiterung von Abbildung 2.10) unter Einbeziehung der Beschreibungen von Wenzel et al. (2018) zusammenfassend dargestellt – zunächst in genereller Formulierung.

Im oberen linken Bereich sind die Merkmale und Anforderungen aufgeführt, die sich für Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 ergeben (s. Abschnitt 2.2). Diese Merkmale und Anforderungen beeinflussen das Konzept des Digitalen Zwillings, das in Industrie 4.0 einen wertvollen Beitrag leisten und unterstützen soll (s. Abschnitt 2.3). Dessen Eigenschaften sind im rechten Bereich dargestellt. Die aus beiden resultierenden Anforderungen für das als Digitaler Zwilling zu nutzende ereignisdiskrete Simulationsmodell

werden im unteren Bereich aufgelistet. Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass die von Mayer und Mieschner (2017) sowie Wenzel et al. (2018) genannte automatisierte Modellerstellung und V&V ebenfalls wichtige Anforderungen für die weitere Entwicklung der Simulation sind. Innerhalb dieser Bachelorarbeit werden diese Punkte allerdings nicht weiter behandelt, da die manuelle Modellerstellung im Fokus ist. Bezüglich der automatisierten Modellerstellung kann bspw. auf Bergmann et al. (2014) verwiesen werden.

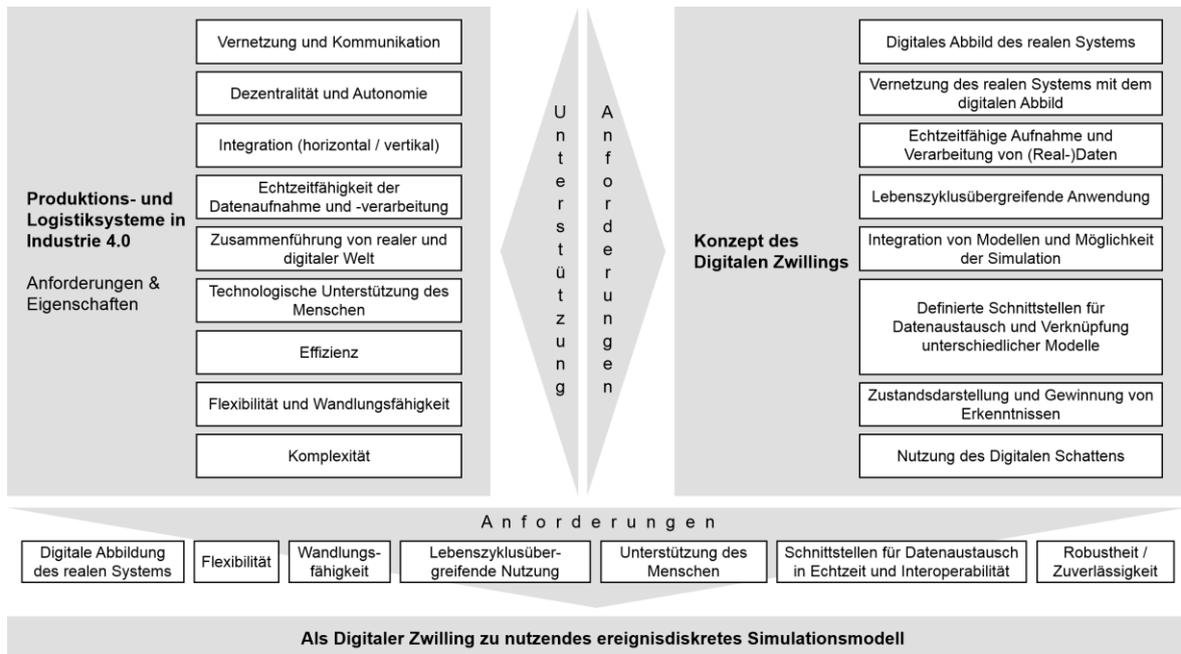


Abbildung 3.2: Generelle Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling zu nutzendes ereignisdiskretes Simulationsmodell im Kontext von Industrie 4.0 (eigene Darstellung)

Im folgenden Abschnitt werden die Zusammenhänge der Abbildung 3.2 kurz beschrieben und ausgearbeitet, was die dort dargestellten Anforderungen konkret für die Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells bedeuten, das als Digitaler Zwilling genutzt werden soll.

3.2 Konkrete Anforderungen bei Erstellung eines als Digitaler Zwilling zu nutzenden Simulationsmodells

Die vorherigen Betrachtungen verdeutlichen, dass ereignisdiskrete Simulationsmodelle neuen Anforderungen genügen müssen, um als Bestandteil des Digitalen Zwillings oder als solcher selbst im Rahmen von Industrie 4.0 genutzt werden zu können. In diesem Abschnitt werden die in Abbildung 3.2 dargestellten Anforderungen konkretisiert, um spezifische Anforderungen abzuleiten, die bei der Erstellung eines als Digitalen Zwilling zu nutzenden ereignisdiskreten Simulationsmodells berücksichtigt werden müssen. Ein Digitaler Zwilling kann als digitale Abbildung eines realen Objekts verschieden ausgestaltet sein, je nachdem, ob es sich um den Digitalen Zwilling einer einzelnen Komponente, einer Maschine oder eines gesamten Produktionssystems handelt (vgl. Boschert und Rosen 2016). Bei Abbildung einer einzelnen Komponente liegen demnach andere Ziele zu Grunde als bei der Abbildung eines umfangreichen technischen Systems (bspw. einer Produktionslinie), besonders was den Detaillierungsgrad betrifft. In dieser Bachelorarbeit wird der Fokus auf die Erstellung eines Digitalen Zwillings für ein gesamtes technisches System (Produktionssystem, Logistiksystem) mit seinen Abläufen und Prozessen gelegt und darum auf andere Gestaltungsarten des Digitalen Zwillings nicht weiter eingegangen.

Für das Gesamtverständnis werden die Zusammenhänge in Abbildung 3.2 hier noch einmal kurz beschrieben. Zur Bewältigung heutiger und zukünftiger Herausforderungen nutzt Industrie 4.0 aktuelle technologische Entwicklungen und zielt auf Basis der Nutzung von CPS auf flexible, wandlungsfähige Produktions- und Logistiksysteme ab, die durch Vernetzung und Kommunikation der einzelnen Systembestandteile geprägt sind (vgl. bspw. acatech 2018, S. 13 f.). Letztere haben häufig die Fähigkeit, Daten dezentral in Echtzeit aufzunehmen und zu verarbeiten, wodurch sie zur Autonomie befähigt werden. Das hat eine Anpassungs- und Wandlungsfähigkeit der Produktions- und Logistiksysteme zur Folge und steigert die Effizienz. Die Integration der Systeme entlang der Supply Chain und über die unterschiedlichen Ebenen im Unternehmen führt zu einer durchgängigen Digitalisierung und durch Cloudlösungen können auch IT-Ressourcen flexibel angepasst und von fast überall genutzt werden. So wachsen digitale und reale Welt zusammen, gleichzeitig wird aber auch die Komplexität erheblich gesteigert, was Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu einer großen Herausforderung macht (vgl. Abschnitt 2.2, Abbildung 2.8 und linker Bereich der Abbildung 3.2).

Dies erfordert die technologische Unterstützung des Menschen, wobei das Konzept des Digitalen Zwillings einen wesentlichen Beitrag leisten kann: Mit der stets aktuellen digitalen Abbildung des realen technischen Systems über dessen gesamten Lebenszyklus in unterschiedlichen Detaillierungsgraden, der Vernetzung und Kommunikation zwischen realem

System und Digitalem Zwilling in Echtzeit, der Nutzung von Daten aus Datenbanken und Informationssystemen, der Möglichkeit zur Erkenntnisgewinnung durch simulative Erprobungen sowie durch die Analyse der aufgezeichneten Nutzungsdaten (Digitaler Schatten) bekommt der Mensch technologischen Beistand, um fundierte Entscheidungen treffen, Entscheidungskonsequenzen nachvollziehen oder sich über den aktuellen Systemzustand informieren zu können (vgl. Abschnitt 2.3 und rechter Bereich in Abbildung 2.10). Ein ereignisdiskretes Simulationsmodell, das als Digitaler Zwilling genutzt werden soll, muss diese Anforderungen erfüllen, um die gewünschte Unterstützung für Produktions- und Logistiksysteme in Industrie 4.0 leisten zu können. Die in Abschnitt 3.1 dargestellten Anforderungen (s. Abbildung 3.2) werden im Folgenden aufgegriffen und jeweils konkrete Anforderungen für den Erstellungsprozess des als Digitalen Zwilling zu nutzenden Simulationsmodells¹¹ abgeleitet. Zur zusammenfassenden Darstellung der konkretisierten Anforderungen und sämtlicher Zusammenhänge wird Abbildung 3.2 zu Abbildung 3.3 (s. unten) erweitert. Kursiv Gedrucktes ist sinngemäß in Abbildung 3.3 wiederzufinden.

Zunächst resultiert aus der Eigenschaft des Digitalen Zwillinges, das digitale Abbild eines realen Systems zu sein auch für das als zu erstellende Modell, dass es die wesentlichen Merkmale des realen Systems digital wiedergibt. Alle Eigenschaften, Merkmale und Details des realen Systems können in einem Modell (vgl. Abschnitt 2.1.1), das der Digitale Zwilling letztendlich ist, nicht abgedeckt werden. Es muss daher eine Beschränkung auf die wesentlichen und zu definierenden Betrachtungsgegenstände erfolgen. Da hier die ereignisdiskrete Simulation als Erstellungsgrundlage dienen soll, die besonders zur Darstellung und Untersuchung von Prozessen geeignet ist (vgl. Beer 2008, S. 73), sind es eben diese Prozesse, die Ablauflogik und Zusammenhänge zwischen den einzelnen Systembestandteilen, die möglichst genau im Digitalen Zwilling abzubilden sind. Je nachdem, was konkret untersucht werden soll, müssen bei der Erstellung gewisse Schwerpunkte bspw. hinsichtlich der Detaillierung gelegt werden. Da es eine wichtige Eigenschaft des Digitalen Zwilling ist, durch ihn Informationen über den aktuellen Zustand des realen Systems gewinnen zu können (vgl. Boschert und Rosen 2016), wird aus den genannten Punkten die folgende Anforderung formuliert: *Möglichst genaue Abbildung des Systems mit seinen Bestandteilen im digitalen Modell zur Nachvollziehbarkeit des aktuellen Zustands.*

Mit Industrie 4.0 wird angestrebt Produktions- und Logistiksysteme flexibel und wandlungsfähig zu gestalten, um heutigen und zukünftigen Herausforderungen (s. Abbildung 2.8) wie schwankender Nachfrage, kundenindividueller Fertigung oder Produktion vorher nicht angedachter Varianten genügen zu können (vgl. acatech 2018; Bauernhansl et al. 2016). Auch das zu erstellende Modell muss daher diesen Anforderungen genügen (vgl. Wenzel

¹¹ Im Folgenden wird das zu erstellende, als Digitaler Zwilling zu nutzende Simulationsmodell der besseren Lesbarkeit halber als „das zu erstellende Modell“ bezeichnet

et al. 2018, S. 32), um das reale System abbilden zu können. Flexibilität bezieht sich auf die Fähigkeit, innerhalb eines vorgedachten Korridors Anpassungen und Veränderungen vornehmen zu können (vgl. Heinen et al. 2008, S. 24). Das heißt, dass auf sich ändernde Einflussfaktoren, wie bspw. Stückzahlenschwankungen oder veränderte Transportgeschwindigkeiten kurzfristig und mit geringem Aufwand reagiert werden kann. Um diese Änderungsfähigkeit in vorgedachten Korridoren innerhalb des zu erstellenden Modells gewährleisten zu können, muss dieses *einfach parametrisierbar* sein (vgl. auch Wenzel et al. 2018, S. 32), wobei Modelle „als parametrisierbar bezeichnet [werden], wenn sie nicht nur für einen ausgewählten Parametersatz gelten, sondern für einen zulässigen Wertebereich definiert sind“ (Wenzel et al. 2008, S. 160). Nur so ist zu gewährleisten, dass auf Änderungen im realen technischen System direkt im digitalen Modell reagiert werden kann, indem bspw. Bearbeitungsgeschwindigkeiten, Stückzahlen oder Pufferkapazitäten kurzfristig und unkompliziert angepasst werden können.

Wandlungsfähigkeit geht über die Anpassungsfähigkeit innerhalb vorgedachter Korridore hinaus (vgl. Berkholz 2008, S. 14, Abschnitt 2.2.3.2). Heutige und zukünftige Herausforderungen führen dazu, dass Produktionssysteme auch die Fähigkeit zur Reaktion auf solche Änderungen aufweisen müssen, die bei der Planung noch nicht vorhersehbar sind (vgl. acatech und Forschungsunion 2013, S. 19 f.; acatech 2018). So müssen bspw. Umstellungen und Veränderungen des Systems, die Integration neuer Bearbeitungsstationen, Technologien und Maschinen oder die Fertigung neuer Produktionsvarianten kurzfristig und mit möglichst geringem Aufwand umsetzbar sein (vgl. Heinen et al. 2008, S. 23 ff.). Um die Veränderungen des realen Systems digital abbilden zu können, ist diese Wandlungsfähigkeit daher auch eine wesentliche Anforderung für das zu erstellende Modell. Besonders die geforderten Eigenschaften, den Digitalen Zwilling über den gesamten Lebenszyklus des realen technischen Systems nutzen zu können und permanent dessen aktuellen Stand digital abzubilden (vgl. Abschnitt 2.3), fordern Anpassungs- und Wandlungsfähigkeit vom digitalen Modell. Das Simulationsmodell wird nicht mehr nur zur Analyse einer bestimmten Fragestellung oder in der Planungsphase verwendet und verliert danach seine Relevanz. Es begleitet hingegen das reale technische System von der Planung bis zum Betrieb und soll ggf. noch nach einer möglichen Abschaltung zur Gewinnung von Erkenntnissen für neue Systeme genutzt werden können (vgl. Boschert und Rosen 2016; Grieves und Vickers 2017). Damit muss es sich mit dem realen System entwickeln und verändern können, womit auch die Wieder- und Weiterverwendung des Modells im Kontext der Nachnutzung große Bedeutung erlangen.

Um zunächst auf die Wandlungsfähigkeit einzugehen, erscheint es sinnvoll, die von Heinen et al. (2008, S. 26 ff.) für (reale) Produktionssysteme formulierten Wandlungsbefähiger zu

betrachten: Universalität, Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit, und Kompatibilität. Universalität bezieht sich auf die Einsetzbarkeit für verschiedene Anforderungen, bspw. die Fähigkeit einer Maschine, verschiedene Produktvarianten produzieren zu können. Durch die Berücksichtigung der Mobilität sollen technische Systeme unter geringem Aufwand veränderbar sein, um bspw. durch leicht zu bewegende Maschinen das Fabriklayout kurzfristig ändern zu können. Unter Modularität ist der Einsatz standardisierter Einheiten oder Elemente innerhalb eines Systems zu verstehen, um diese für unterschiedliche Zwecke einfach anpassen oder austauschen zu können und die Skalierbarkeit zielt auf einfache Erweiterungs- und Reduzierungsmöglichkeiten des technischen Systems ab (vgl. Heinen et al. 2008, S. 26 f.).

Um diese Fähigkeiten eines Produktionssystems im als Digitaler Zwilling zu nutzenden Simulationsmodell abbilden zu können, soll hier besonders die *Definition und Nutzung von Modulen im Simulationsmodell* als wichtige Anforderung hervorgehoben werden. Unter der Verwendung universell einsetzbarer Module im digitalen Modell, die sich für den bestimmten Anwendungsfall einfach anpassen lassen, können Universalität, Mobilität, Modularität und Skalierbarkeit des realen Systems abgebildet werden. Universalität aus dem Grund, dass vorgefertigte Module auch zur Abbildung von universell nutzbaren Anlagen dienen können. Auch die Mobilität im Sinne der einfachen Veränderbarkeit des Fabriklayouts lässt sich mithilfe von Modulen im Digitalen Zwilling einfach abbilden, da sich diese einfach neu anordnen, verschieben oder austauschen lassen und Anpassungen unter geringem Aufwand erfolgen können. Können einzelne Module bei Bedarf einfach ab- oder angekoppelt werden, wird auch der Skalierbarkeit Rechnung getragen. Um die einfache Anpassungsfähigkeit der möglichst universellen Module zu gewährleisten, ist auch hier die Anforderung der *einfachen Parametrisierbarkeit* wesentlich. Mit der Variierung eines oder weniger Parameter können somit unterschiedliche Systembestandteile abgebildet oder Veränderungen des realen Systems kurzfristig umgesetzt werden (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 160 f.).

Die Forderung nach universellen, einfach parametrisierbaren Modulen ist zum einen an das zu nutzende Simulationswerkzeug gerichtet, das solche universell anwendbaren Bausteine unter einfacher Anpassbarkeit zur Verfügung stellen und außerdem die Möglichkeit bieten muss, eigene Bausteine zu definieren. Deshalb wird als Anforderung an das Simulationswerkzeug gestellt, eine *anpassungsfähige Bausteinbibliothek zur Verfügung zu stellen*. Zum anderen fordert dieser Punkt, dass auch bei der Modellerstellung Module zur Nutzbarkeit für verschiedene mögliche Anwendungszecke definiert werden. Dies muss durch den/die Modellersteller erzeugen. Zusätzlich müssen diese Module verwaltet werden, damit sie für Wiederverwendungen zur Verfügung stehen und in diesem Fall tatsächlich gefunden und auch genutzt werden können. Um von ihnen zu profitieren und anderen Anwendern

deren Verständnis zu ermöglichen, ist eine *umfangreiche Dokumentation* für die erstellten Module bedeutend. Diese Module sind nach Erstellung innerhalb ihrer Parametrisierbarkeit zu testen und können somit bei zukünftiger Nutzung erheblichen Aufwand sparen (vgl. Wenzel et al. 2018, S. 32; Wenzel et al. 2008, S. 158 ff.).

Das Konzept des Digitalen Zwillings sieht eine lebenszyklusphasenübergreifende Nutzung vor. Der Digitale Zwilling entwickelt sich also mit dem realen System über dessen gesamten Lebenszyklus, um stets dessen aktuellen Zustand abbilden zu können (vgl. Abschnitt 2.3) und auch während des Betriebs zur Visualisierung und Entscheidungsunterstützung genutzt werden zu können. Um dieser Anforderung mit dem zu erstellenden Modell zu genügen, muss es zum einen kurzfristig und einfach an den aktuellen Zustand *adaptierbar* sein und zum anderen auf die *Modellnachnutzung* ausgerichtet sein (s. Abschnitt 2.1.1). Bei der Nachnutzung wird zwischen *Wiederverwendung* (anderer Betrachtungsgegenstand bei gleichen Untersuchungszielen) und *Weiterverwendung* (gleicher Betrachtungsgegenstand bei anderen Untersuchungszielen) unterschieden (s. Abschnitt 2.1.1). Bezogen auf das Modell als Ganzes steht besonders die Weiterverwendung im Fokus. Denn Untersuchungsziele des zu erstellenden Modells können sich mit Entwicklungen des realen Systems ändern, bspw. in einer späteren Lebenszyklusphase. Der Digitale Zwilling muss zu einem gewissen Grad universell sein, um damit verschiedene Untersuchungsziele durchführen zu können, die bei Erstellung noch nicht definiert werden können. Damit handelt es sich noch immer um den gleichen Betrachtungsgegenstand, aber die Untersuchungsziele sind verändert. Für die Verwendung universeller, leicht anzupassender Teilmodelle bzw. Module, wie für das zu erstellende Modell gefordert, ist sowohl die Wieder- als auch die Weiterverwendung wichtig. Denn diese Module werden ggf. zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb eines anderen Systems verwendet, um dort ähnliche Fragestellungen untersuchen zu können (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 164 f.). Gleichzeitig sind die Module aber auch in dem zu erstellenden Modell integriert, das weiterverwendet werden soll. Weiter wird zwischen der geplanten und ungeplanten Nachnutzung unterschieden (ebd., S. 162 ff.) Für die Machbarkeit der Nachnutzung beschreiben Wenzel et al. (2008) die Verfügbarkeit und Eignung der Modelle, Dokumente, Werkzeuge und Bearbeiter als Voraussetzungen (ebd., S. 155 ff.). Besonders bei ungeplanter Nachnutzung ist die Verfügbarkeit von Modellen, Dokumenten, Werkzeugen oder Bearbeitern nicht immer gewährleistet. Im Falle des als Digitaler Zwilling zu nutzenden ereignisdiskreten Simulationsmodells ist sowohl die geplante Nachnutzung (in Form von Standardmodulen und Weiterverwendung in späteren Phasen) als auch die ungeplante Nachnutzung bspw. in Form von der Produktion nicht vorhergesehener Produktionsvarianten oder einer nicht geplanten Systemerweiterung von Bedeutung. Daher ist zu gewährleisten, dass Modelle und Module sowie die zugehörige, umfangreiche Dokumentation so verwaltet werden, dass deren spätere Verfügbarkeit gewährleistet

werden kann. Sind Bearbeiter nicht mehr verfügbar, muss Ersatz gefunden werden. Auch hier hilft die umfangreiche Dokumentation, Modelle und Module bei Wieder- oder Weiterverwendung nachvollziehen und daraus alle wichtigen Eigenschaften erkennen zu können. Die spätere Verfügbarkeit des Simulationswerkzeugs kann nicht ohne weiteres gewährleistet werden, da dieser Punkt in fremder Hand liegt. Bei dessen Auswahl ist zu beachten, dass die Weiterführung und -entwicklung des Werkzeugs sehr wahrscheinlich ist, z. B. da es sehr etabliert ist und viele Nutzer hat. Die Eignung für die Nachnutzung kann insbesondere bei ungeplanter Nachnutzung nicht immer gewährleistet werden. Ein Modell oder einzelne Module, auch Dokumente und das Simulationswerkzeug können nicht für jedes erdenkliche Nachnutzungsszenario vorbereitet werden. Teilweise kann es deshalb sein, dass einzelne Module oder das gesamte Modell und die zugehörige Dokumentation ggf. in einem anderen Werkzeug neu erstellt werden müssen (für weitere Informationen vgl. Wenzel et al. 2008, S. 155 ff.: Machbarkeit und Zweckmäßigkeit der Nachnutzung). Dies gilt es im Fall des Digitalen Zwillings zu vermeiden, da ein erheblicher Aufwand mit dessen Erstellung und Weiterführung einhergeht. Dafür sind Anforderungen für das zu erstellende Modell zu beachten, die Machbarkeit und Zweckmäßigkeit der Nachnutzung unterstützen und begünstigen (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 158 ff.). Bereits genannt wurde die Anforderung der *umfangreichen Dokumentation*, die auch hier einen Beitrag leistet. Dies schließt ebenfalls eine geeignete Archivierung von Dokumenten und auch Modellen ein, damit diese zum gewünschten Zeitpunkt zur Verfügung stehen. Da der Digitale Zwilling permanent weiterzuführen ist und damit ein sehr hoher Aufwand einhergeht, ist für ausreichend Personal mit entsprechender Qualifikation zu sorgen, um diesen Aufwand leisten zu können. Im Falle von Personalwechseln hilft die Dokumentation. Auch im Kontext der Nachnutzung ist die bereits genannte *einfache Parametrisierbarkeit* und die *Definition und Nutzung einfach anzupassender Module* wichtig. Wenzel et al. (2008) empfehlen dabei die Arbeit mit branchenüblichen Einheiten (vgl. ebd., S. 160). Die einzelnen Module können getrennt voneinander getestet werden, um sie auch in einem anderen Kontext wiederzuverwenden (vgl. ebd., S. 161). Die Definition und Nutzung einfach anzupassender Module setzt die Parametrisierbarkeit voraus. Mit der Verwendung einfach parametrisierbarer Module wird auch die notwendige Adaptierbarkeit des zu erstellenden Modells stark vereinfacht. Module können neu angeordnet, ausgetauscht, hinzugefügt oder entfernt und bei Bedarf (gesammelt) angepasst werden.

Der bislang noch nicht thematisierte Wandlungsbefähiger Kompatibilität ermöglicht eine Vernetzung verschiedener Systembestandteile untereinander oder mit Informationssystemen anhand von definierten Schnittstellen zum Austausch von Informationen, Medien oder Energie (Heinen et al. 2008). Die Vernetzung, also der Daten- und Informationsaustausch zwischen verschiedenen Objekten und Systemen, steht im Fokus von Industrie 4.0. So

müssen bspw. einzelne Systembestandteile wie Maschinen oder Produkte untereinander kommunizieren und Daten von anderen Objekten oder aus Informationssystemen verarbeiten und nutzen können. Dafür ist die Kompatibilität zwischen den einzelnen Instanzen in Form von *einheitlichen Schnittstellen* zur Kommunikation in Echtzeit zwingend erforderlich. Dies ist daher ebenso eine wichtige Anforderung für das als Digitaler Zwilling zu nutzende ereignisdiskrete Simulationsmodell. Erstens ist dafür die *Vernetzung des Digitalen Zwillinges mit dem realen technischen System in Echtzeit* eine zwingende Anforderung, da nur so der geforderten Eigenschaft Rechnung getragen werden kann, dass der Digitale Zwilling stets den aktuellen Zustand des realen Systems abbildet und auch als Assistenzsystem nutzbar ist. Wichtige Daten wie Sensordaten oder Maschinendaten müssen aus diesem Grund direkt und in Echtzeit im Digitalen Zwilling einsehbar und auch nutzbar sein – das reale und digitale System müssen dafür in Echtzeit kommunizieren können. Zweitens muss die *Kompatibilität* auch *zwischen verschiedenen Simulationswerkzeugen* ermöglicht werden, damit verschiedene Modelle und Module miteinander gekoppelt werden können und eine *Interoperation* zur Berücksichtigung unterschiedlicher Betrachtungsgegenstände in unterschiedlichen Detaillierungsgraden ermöglicht wird (vgl. Kuhn, T. 2017; Wenzel et al. 2018, S. 31). Auch bei der Nachnutzung von Modellen ist es unter Umständen erforderlich, ein Modell in ein anderes Werkzeug integrieren zu müssen, um eine andere Fragestellung untersuchen zu können. Hierfür ist die *Offenheit und Kopplungsfähigkeit der Werkzeuge* ebenfalls bedeutend. Drittens ist die *Möglichkeit der Anbindung des zu erstellenden Modells an Datenbanken und Informationssysteme* eine wichtige Anforderung, um dort hinterlegte Daten im zu erstellenden Modell in Echtzeit nutzen zu können und ggf. eine automatische Parametrisierung zu erlauben. Dies ist außerdem erforderlich, um reale Nutzungsdaten im Sinne eines Digitalen Schattens (s. Abschnitt 2.3.3) zu speichern. Diese können dann zu Analysezwecken und auch im Digitalen Zwilling selbst genutzt werden können. Um diese drei Vernetzungen (Digitaler Zwilling – reales System, Vernetzung unterschiedlicher Simulationswerkzeuge, Digitaler Zwilling – Datenbanken / Informationssystemen) und die Interoperabilität zwischen diesen Systemen in Echtzeit zu ermöglichen, werden die folgenden beiden Anforderungen an Simulationswerkzeug gestellt, in dem das als Digitaler Zwilling zu nutzende ereignisdiskrete Simulationsmodell erzeugt werden soll: *Bereitstellung von geeigneten Schnittstellen* sowie *Offenheit und Kopplungsfähigkeit*. Die Interoperabilität und Vernetzungsfähigkeit verschiedener Werkzeuge und Methoden ist ein Handlungsfeld von enormer Wichtigkeit für die Etablierung der Simulation in Industrie 4.0. Hier ist allerdings noch Entwicklungsbedarf notwendig (vgl. Kuhn, T. 2017).

Damit der Digitale Zwilling in der steigenden Komplexität im Rahmen von Industrie 4.0 den Menschen effektiv unterstützen kann, muss er zur Visualisierung, als Erklärungsmodell und für die Entscheidungsunterstützung, also als *Assistenzsystem* nutzbar sein. Dies impliziert

die Verwendbarkeit zur *Erkenntnisgewinnung* zum einen durch die *Darstellung des aktuellen Zustands des technischen Systems in Echtzeit* und zum anderen durch die Möglichkeit, *neue Erkenntnisse gewinnen zu können*. Diese Möglichkeiten muss daher auch das zu erstellende Modell bieten und damit mehreren Zwecken genügen. Die Darstellung des aktuellen Zustands in Echtzeit wird mit den bereits formulierten Anforderungen abgedeckt, dass *das reale System mit seinen Bestandteilen möglichst genau im digitalen Modell zur Nachvollziehbarkeit des aktuellen Zustands abgebildet wird* und eine *Schnittstelle zur Kommunikation zwischen realem und digitalem System in Echtzeit* besteht. Sollen neue Erkenntnisse aus dem Digitalen Zwilling gewonnen werden können, um den Menschen bei der operativen und strategischen Planung auch in der Phase der Nutzung zu unterstützen, muss dieser die *Möglichkeit zur Durchführung von Experimenten und Erprobungen* bieten. Dies gilt damit auch für das zu erstellende Modell und stellt eine weitere Anforderung dar. Um auch nicht versierten Anwendern als Assistenzsystem dienen zu können, muss der Digitale Zwilling, somit auch das zu erstellende Modell, benutzerfreundlich aufgebaut sein. Dies gilt auch für die Parametrisierung: eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche, das automatische Einlesen von Eingangsdaten durch die Anbindung an Datenbanken und Informationssysteme des Unternehmens (s. o.) und eine hilfreiche Dokumentation sind unterstützende Faktoren (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 85).

Schließlich impliziert die Anforderung der Robustheit und Zuverlässigkeit an das digitale Modell vor allem Anforderungen an das zu wählende Simulationswerkzeug. Damit der Digitale Zwilling zu *jeder Zeit verfügbar* und *ausfallsicher* ist, werden diese Anforderungen an das Simulationswerkzeug gestellt, auf dessen Basis die Erstellung erfolgt. Die Verfügbarkeit sollte damit bei nahezu 100 % liegen. Auch die Modellbereitsteller und Dienstleister sollten für diesen Zweck möglichst rund um die Uhr verfügbar sein (vgl. Wenzel et al. 2017, S. 189).

Abbildung 3.3 stellt abschließend die thematisierten Anforderungen zusammenfassend dar und zeigt die beschriebenen Zusammenhänge. Im mittleren Bereich der Abbildung sind die auch in Abbildung 3.2 zunächst generell formulierten Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling zu nutzendes ereignisdiskretes Simulationsmodell aufgeführt, die sich zum einen aus den angestrebten Merkmalen von Produktions- und Logistiksystemen in Industrie 4.0 und zum anderen aus den geforderten Eigenschaften des Digitalen Zwillinges ergeben. Daraus leiten sich die in diesem Abschnitt erläuterten konkreten Anforderungen ab, die bei der Erstellung des als Digitaler Zwilling zu nutzenden Simulationsmodells zu beachten sind. Diese sind in der unteren Box als Kästchen dargestellt.

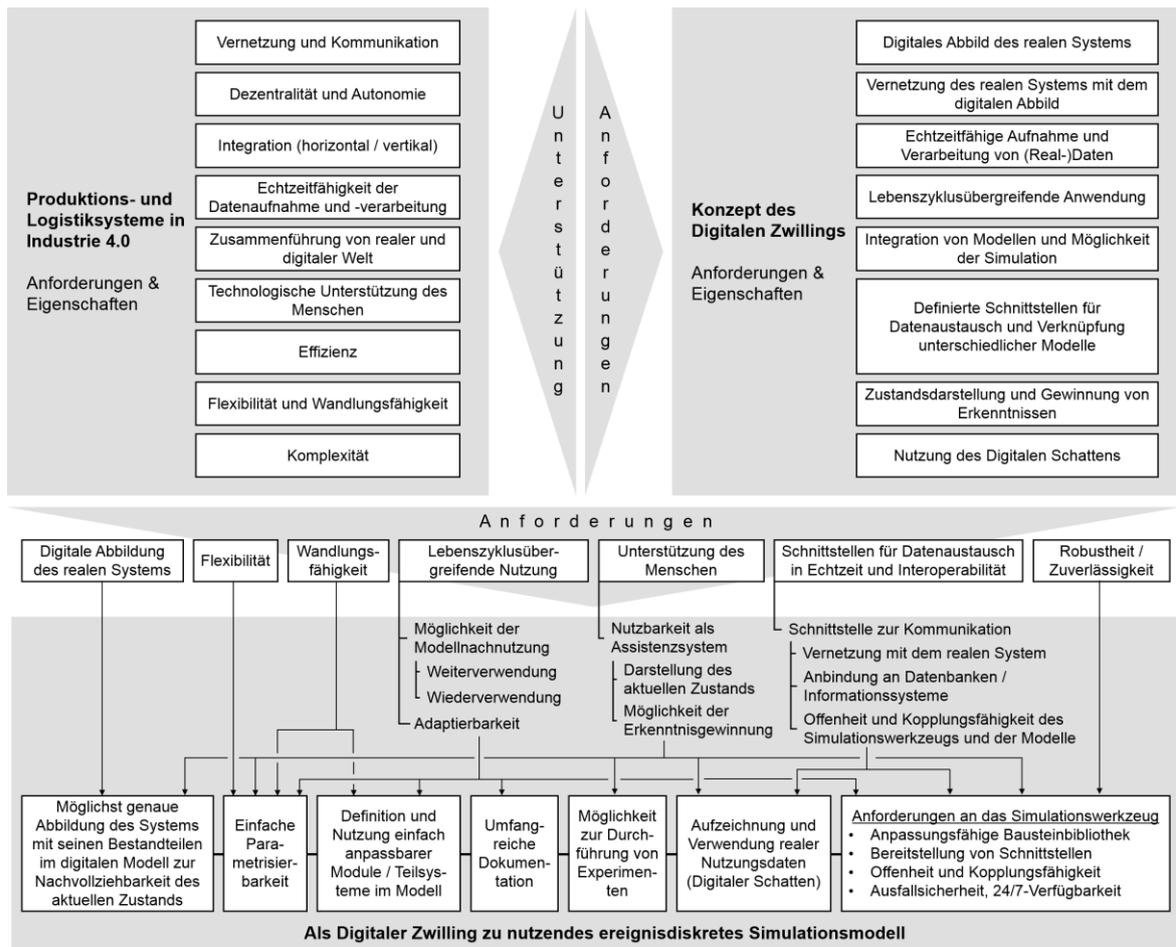


Abbildung 3.3: Konkrete Anforderungen und Zusammenhänge (eigene Darstellung)

Mit den Verbindungen der Kästchen soll verdeutlicht werden, dass sich auch die konkreten Anforderungen untereinander beeinflussen und bedingen. So können bspw. Module nur definiert und genutzt werden, wenn dies mit dem gewählten Simulationswerkzeug möglich ist oder die Verbindung mit Datenbanken zur Nutzbarkeit realer Daten nur erfolgen, wenn das Simulationswerkzeug entsprechende Schnittstellen bereitstellt (individuelle Programmierungen außen vorgelassen). Im folgenden Abschnitt wird durch Integration der erarbeiteten Anforderungen in das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) ein Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation erstellt.

3.3 Konzeptentwicklung

Mit dem in Abschnitt 2.1.5 vorgestellten Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) liegt ein etabliertes Vorgehen vor, das bei einer Simulationsstudie und bei der Erstellung eines für eine bestimmte Problemstellung geeigneten Modells unterstützt, die gewünschten Ziele zu erreichen. Da in diesem Abschnitt ein Konzept zur Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells erarbeitet wird, das als Digitaler Zwilling eines realen technischen Systems genutzt werden soll, stellt dieses Simulationsvorgehensmodell u. a. aufgrund seiner klaren Struktur und dem Bezug zur Simulationsmodellerstellung eine geeignete Grundlage dar, um daran anzuknüpfen und dieses auf diesen Zweck hin zu konkretisieren und teilweise zu ergänzen. Mit den Inhalten in den Dokumentenstrukturen nach Rabe et al. (2008) (s. Anhang I – Dokumentenstrukturen) werden wichtige Punkte dargestellt, die in den einzelnen Phasen zu spezifizieren und zu erarbeiten sind, um ein Modell für den gewünschten Zweck zu erstellen und dabei alles Wesentliche zu beachten sowie zu dokumentieren. Diese gelten auch für das Konzept, das hier entwickelt wird. Der Übersichtlichkeit und des Umfangs halber werden die einzelnen Punkte an dieser Stelle nicht noch einmal explizit genannt, sondern sind Anhang I zu entnehmen (für Erläuterungen zu den einzelnen Punkten aus den Dokumentenstrukturen sei auf Rabe et al. (2008, S. 55 ff.) verwiesen). Um mit dem zu erarbeitenden Konzept konkret dem Zweck der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells für die Nutzung als Digitaler Zwilling gerecht zu werden, werden den einzelnen Phasen und Phaseninhalten des Simulationsvorgehensmodells die diesbezüglich speziell zu beachtenden Anforderungen zugeordnet, die in den Abschnitten 3.1 und 3.2 erarbeitet wurden (s. Abbildung 3.3). Diese sind als Ergänzung und Konkretisierung zu den von Rabe et al. (2008) formulierten Inhalten zu sehen. Damit wird dem Konzeptanwender aufgezeigt, was er konkret in welchen Phasen zu beachten, zu berücksichtigen und zu erarbeiten hat um ihn damit bei der Erstellung eines Digitalen Zwillings auf Basis der ereignisdiskreten Simulation zu unterstützen. Phaseninhalte des Simulationsvorgehensmodells, die hier aufgegriffen werden, basieren auf den Beschreibungen von Rabe et al. (2008) und Gutenschwager et al. (2017, S. 147 ff.) (vgl. auch Abschnitt 2.1.5).

Die *Zielbeschreibung* stellt die Ausgangsbasis innerhalb des Simulationsvorgehensmodells dar. Hier werden die Ausgangssituation, der Projektumfang sowie die Randbedingungen beschrieben. Damit sind zunächst grob die gewünschten Funktionsweisen des Systems, der Zweck und das Ziel zu definieren. Neben projektspezifischen Anforderungen muss demnach bereits in die Zielbeschreibung eingehen, dass das Ziel des zu erstellenden Modells die Nutzung als Digitaler Zwilling ist. Die damit verbundenen Anforderungen gehen hier also bereits mit ein (zunächst generell formuliert). Da sich die Ziele bei der Erstellung eines als Digitaler Zwilling zu nutzenden Modells von denen bei der Durchführung einer

Simulationsstudie unterscheiden, ist hier klar zu nennen welche Eigenschaften der Digitale Zwillings fordert. Im Groben ist dies, dass das zu erstellende Modell als Assistenzsystem zur Darstellung des aktuellen Zustands des realen Systems und auch zur Durchführung von Experimenten fähig sein muss. Damit ist die Anforderung der möglichst genauen Abbildung des Systems mit seinen Bestandteilen im zu erstellenden Modell zur Nachvollziehbarkeit des aktuellen Zustands als Ziel zu formulieren. Außerdem sind hier, wie auch in der klassischen Anwendung des Simulationsvorgehensmodells, zum Erstellungszeitpunkt ange-dachte Experimente zu nennen. Zusätzlich dazu muss das zu erstellende Modell die Offenheit bieten, im Nachgang für andere Experimente qualifiziert werden zu können. Da auch die einzusetzende Software in der Aufgabenspezifikation zu nennen ist, sind bei der Auswahl des Simulationswerkzeugs die in Abbildung 3.3 genannten Anforderungen an dieses zu berücksichtigen: Bereitstellung einer anpassungsfähigen Bausteinbibliothek, Bereitstellung von Schnittstellen für den Datenaustausch in Echtzeit, Offenheit und Kopplungsfähigkeit sowie Ausfallsicherheit und 24/7-Verfügbarkeit.

Zur Konkretisierung der Zielbeschreibung wird in der Phase der *Aufgabendefinition* die *Aufgabenspezifikation* erstellt. Damit ist auch zu konkretisieren, was die Ziele des als Digitaler Zwillings zu nutzenden Simulationsmodells sind und welche Eigenschaften dieses besitzen muss. Demnach ist weiter zu beschreiben, wie das zu erstellende Modell als Assistenzsystem zu nutzen ist, also welche Eigenschaften und Zustände des realen Systems genau darzustellen sind und welche Experimente möglich sein müssen. Die Ausrichtung auf die Nutzung über den gesamten Lebenszyklus des realen Systems mit der Möglichkeit der Wieder- und Weiterverwendung ist hier außerdem zu verankern. Zusätzlich zu den Inhalten, die Rabe et al. (2008) nennen, sind folgende Schnittstellen zu spezifizieren, die das Modell für den Datenaustausch bieten muss: erstens Schnittstellen zum realen System, zweitens Schnittstellen zu anderen Werkzeugen (Interoperabilität, s. Abschnitt 3.1) und drittens Schnittstellen zu Datenbanken und Informationssystemen. Da die Echtzeitfähigkeit des Datenaustauschs eine besondere Anforderung darstellt, die für den Digitalen Zwillings erforderlich ist, ist diese ebenfalls in die Aufgabenspezifikation mit aufzunehmen. Das Konzept des Digitalen Zwillings fordert außerdem, dass relevante reale Systemdaten nicht nur in Echtzeit im digitalen Modell abgebildet werden, sondern, dass diese auch im Sinne eines Digitalen Schattens (vgl. Abschnitt 2.3.3) aufgezeichnet werden und ggf. wieder im Digitalen Zwillings genutzt werden. Wie diese Aufzeichnung und Nutzung erfolgt, die auch in Datenbanken vorgenommen werden kann, an die das zu erstellende Modell angebunden wird, ist in der Aufgabenspezifikation zu definieren. Die Anforderung der einfachen Parametrisierbarkeit ist zu diesem Zeitpunkt insofern zu berücksichtigen, dass festgelegt wird, welche Parameter in welchem Umfang variierbar zu gestalten sind und wie die Parametrisierung

erfolgen kann, um sie dem Benutzer zu erleichtern, bspw. mit unkomplizierten Eingabemöglichkeiten oder automatischer Datenübernahme aus Informationssystemen.

Als erste Phase der Modellbildung werden mit der *Systemanalyse* Grenzen, Elemente und deren Beziehungen, Umfang, und Detaillierung des zu erstellenden Modells definiert. Das Phasenergebnis stellt das *Konzeptmodell* dar. Besonders hervorzuheben für die Erstellung eines als Digitaler Zwilling zu nutzendes Simulationsmodell ist in dieser Phase die (hier zunächst theoretische, in der Implementierung dann praktische) Definition von leicht anpassbaren und integrierbaren Teilsystemen bzw. Modulen, die sowohl im Modell zur Abbildung mehrerer Systemkomponenten genutzt werden können, als auch später wieder- und weiterverwendet werden können (in weiteren Lebenszyklusphasen des Systems und für andere Modelle). Das ist erforderlich, um die in diesem Kontext wesentliche Ziele wie die Abbildung von Wandlungsfähigkeit oder die Adaptierbarkeit des Modells zur lebensphasenübergreifenden Nutzung erreichen zu können. Da der Datenaustausch und die Datenaktualisierung für das zu erstellende Modell besonders wichtig sind, ist hier zu spezifizieren, welche Daten zu welchem Zeitpunkt auf welche Art mit welchem System und über welche Schnittstellen auszutauschen sind.

Parallel zur Modellierung findet die *Datenbeschaffung* statt, wobei die *Rohdaten* das Phasenergebnis darstellen. Art und Umfang der erforderlichen Daten werden durch die Aufgabenspezifikation und das Konzeptmodell bestimmt. Zu dieser Phase werden keine Punkte zu den von Rabe et al. (2008) genannten ergänzt.

Basierend auf dem Konzeptmodell wird in der *Modellformalisierung* eine möglichst eindeutige Modellbeschreibung erarbeitet, so dass die nächsten Schritte des Konzepts darauf aufbauend ohne zusätzliche Beschreibungen durchgeführt werden können. Die Beschreibungen im Konzeptmodell sind dafür weiter zu präzisieren und zu spezifizieren, ggf. zu quantifizieren. Bspw. sind konkrete Zahlen für Parametergrenzen zu nennen und der Datenaustausch ist weiter zu spezifizieren (Datentypen, Zeitpunkte von Zustandsmeldungen etc.). Phasenziel ist das *formale Modell*. Hier sind keine Ergänzungen zu den Angaben von Rabe et al. (2008) notwendig.

In der *Datenaufbereitung*, die wie die Datenbeschaffung zeitlich parallel zur Modellbildung stattfindet, werden die Rohdaten so aufbereitet, dass sie für das zu erstellende Modell genutzt werden können. Ergebnis stellen *aufbereitete Daten* dar, die den im formalen Modell geforderten Ansprüchen gerecht werden. Hier ist ebenfalls wieder besonders der Datenaustausch zu berücksichtigen, für den ggf. besondere Datenformate oder -typen notwendig werden.

In der Phase der *Implementierung* wird das formale Modell in ein *ausführbares Modell* unter der Nutzung eines Simulationswerkzeugs umgesetzt. Das Phasenergebnis wird in diesem Fall in das *als Digitaler Zwilling nutzbare ereignisdiskrete Simulationsmodell* umbenannt. Dieses muss alle zuvor formulierten Anforderungen und Ziele erfüllen, um auch tatsächlich als Digitaler Zwilling genutzt werden zu können. Da das Ergebnis stark abhängig vom genutzten Werkzeug ist, muss hier genauestens dokumentiert werden, was, wie und mittels welcher vom Werkzeug bereitgestellten Möglichkeiten umgesetzt ist, da auch nicht versierte Anwender die Möglichkeit haben müssen, den Digitalen Zwilling zu nutzen. Das in diesem Kontext erstellte Modell dient nicht wie bei einer „herkömmlichen“ Simulationsstudie hauptsächlich der Durchführung von Experimenten, um daraus Erkenntnisse zu gewinnen, die durch Simulationsexperten und einem an der Erstellung beteiligten Personenkreis durchgeführt und analysiert werden. Das Ziel ist hierbei zusätzlich die Darstellung des aktuellen Zustands des Systems. Diese Visualisierung und Darstellung muss auch Anwendern möglich gemacht werden, die sich nicht oder nur kaum mit dem Werkzeug auskennen. Aus der Dokumentation muss daher nicht nur hervorgehen, welche Inhalte aus dem formalen Modell wie im Simulationswerkzeug umgesetzt worden sind, sondern auch, wie der Digitale Zwilling genutzt werden kann. Dafür bietet sich die Erstellung eines Benutzerhandbuchs an. Da aber auch Experimente mit dem Digitalen Zwilling möglich sein müssen, ist ebenfalls zu dokumentieren, wie zu deren Durchführung vorzugehen ist. Um die Arbeit mit dem Digitalen Zwilling zu erleichtern ist es generell sehr sinnvoll, die Bedienoberfläche bspw. durch Buttons und kurze Erklärungen benutzerfreundlich zu gestalten. Änderungen im realen System führen immer wieder dazu, dass der Digitale Zwilling angepasst werden muss. Dafür ist außerdem zu dokumentieren, wie solche Anpassungen vorzunehmen sind und was dabei zu beachten ist. Ändert sich das reale System, sind ggf. vorherige Phasen erneut zu durchlaufen und zusätzlich erforderliche Daten zu beschaffen sowie aufzubereiten. Ändern sich einzelne Parameter, wie bspw. Bearbeitungszeiten, ist der Digitale Zwilling möglichst automatisiert zu aktualisieren. Dies muss nicht zwingend das Durchlaufen vorheriger Phasen erfordern.

Mit diesen Anforderungen ist es erforderlich, dass für das Konzept zur Erstellung eines Digitalen Zwillinges auf Basis der ereignisdiskreten Simulation die letzten beiden Phasen des Simulationsvorgehensmodells modifiziert werden. Rabe et al. (2008) sehen zwar bereits eine Iteration vor, diese soll hier aber konkret visualisiert werden, da sie als Regelfall zu verstehen ist. Das erstellte, implementierte Modell muss immer wieder an Änderungen im realen System angepasst werden. Dadurch ergibt sich ein Kreislauf zur Aufgabenstellung, die in solchen Fällen überarbeitet werden muss und das erneute Durchlaufen aller folgenden Phasen mit erforderlichen Änderungen oder Ergänzungen notwendig macht. Auch die Rohdaten und aufbereiteten Daten sind je nach Bedarf zu ergänzen oder anzupassen. Das

als *Digitaler Zwilling nutzbare Simulationsmodell* stellt damit grundsätzlich erst einmal die letzte Phase des Konzepts dar. Dieses wird daraufhin zur Visualisierung, Zustandsdarstellung und ebenfalls zur Experimentdurchführung genutzt, die hier allerdings nicht direkt als Phasen zu verstehen sind, sondern als die Anwendung des erstellten Modells. Werden mit der Zeit neuartige Experimente oder die Abbildung vorher nicht berücksichtigter Eigenschaften oder Zustände des realen Systems erforderlich, die das erstellte Modell in der vorliegenden Form nicht abbilden kann, wird ebenfalls die Wiederholung der Phasen beginnend mit der Anpassung der Aufgabendefinition erforderlich. Es wird deutlich, dass eine umfangreiche Dokumentation aller Phasenergebnisse dafür unumgänglich ist. Sind im Sinne der Flexibilität Anpassungen von Parametern vorzunehmen, ist der Digitale Zwilling zu aktualisieren, möglichst automatisiert. Indem er an Datenbanken angebunden ist, können die Parameter im Modell automatisch angepasst werden, falls Änderungen in der Datenbank vorgenommen werden.

Das damit erstellte Konzept zur Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells, basierend auf dem Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008, S. 5), ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Ein ebenfalls übernommener Bestandteil des Simulationsvorgehensmodells nach Rabe et al. (2008) ist die konsequente Durchführung von V&V bezüglich der Phasenergebnisse. Diese ist auch innerhalb dieses Konzepts relevant, um schließlich einen Digitalen Zwilling zur Verfügung zu haben, der den formulierten Anforderungen genügt und für die Zustandsdarstellung des realen Systems sowie für die Durchführung bestimmter Experimente tatsächlich geeignet ist. Für phasenspezifische V&V-Techniken vgl. Rabe et al (2008, S. 93 ff.) oder Gutenschwager et al. (2017, S. 202 ff.). Das Ergebnis „*Als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell*“ ist nicht nur einmalig einer V&V zu unterziehen, sondern auch bei Änderungen und Aktualisierungen. Auch die Zustandsdarstellung in Echtzeit muss verifiziert und validiert werden, sowie Ergebnisse und Erkenntnisse, die aus dem Digitalen Zwilling gewonnen werden. Diese beeinflussen möglicherweise wieder das reale System und den Digitalen Zwilling, indem sie bspw. zu Überarbeitungen, Umstrukturierungen oder Parameteränderungen führen.

Im linken Bereich des visualisierten Konzepts ist das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) zu finden. Die erforderliche Iteration bei erforderlichen Änderungen ist dabei durch einen Pfeil ergänzt. In dem Bereich Anwendung / Nutzung sind die beschriebenen Anwendungs- und Nutzungsmöglichkeiten enthalten. Auf der rechten Seite sind die in Abschnitt 3.2 erarbeiteten Anforderungen den jeweiligen Phasen zugeordnet, in denen sie besonders zu beachten sind, um die Modellerstellung von Beginn an auf die Nutzbarkeit als Digitaler Zwilling auszurichten. Die Aktualisierung des Digitalen Zwillings,

die bspw. durch Änderung von Parametern notwendig wird, ist mit kreisförmigen Pfeil dargestellt.

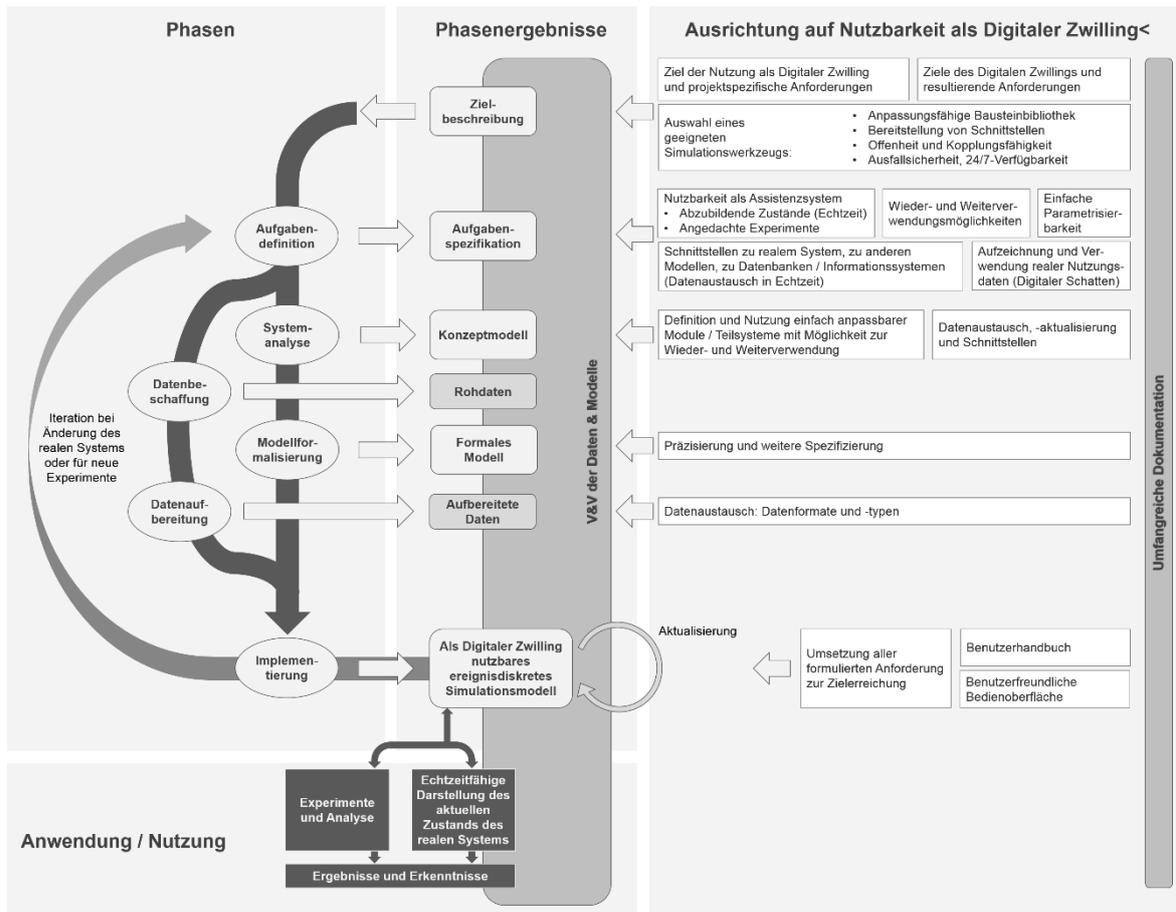


Abbildung 3.4: Konzept zur Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells (Eigene Darstellung basierend auf Rabe et al. (2008))

Im Folgenden Kapitel wird das erstellte Konzept an der LEGO®-Modellfabrik des pfp angewendet.

4 Konzeptanwendung an der LEGO®-Fabrik

Das in Kapitel 3 erstellte Konzept wird in diesem Kapitel zur Erstellung eines Digitalen Zwillings der LEGO®-Fabrik des pfp auf Grundlage der ereignisdiskreten Simulation angewendet. Dafür wird zunächst die Ausgangssituation bei Arbeitsaufnahme dargestellt, indem die LEGO®-Modellfabrik mit ihren Bestandteilen, Abläufen und der Steuerung erläutert wird (Abschnitt 4.1). In Abschnitt 4.2 erfolgt anschließend die Konzeptanwendung, indem die einzelnen Phasen beschrieben werden. In Abschnitt 4.3 erfolgt ein Ausblick in Bezug auf das erstellte Modell, wobei weitere mögliche Schritte genannt werden. Abschließend für dieses Kapitel erfolgt in Abschnitt 4.4 eine zusammenfassende Darstellung der Konzeptanwendung, indem darauf eingegangen wird, inwiefern die einzelnen Anforderungen aus dem Konzept bei der Modellerstellung berücksichtigt werden konnten.

4.1 Beschreibung der LEGO®-Fabrik

Um ein greifbares Objekt zum Aufzeigen von Produktions- und Logistikprozessen am pfp zur Verfügung zu haben, wurde im Wintersemester 2016/2017 der Aufbau einer Lernfabrik initiiert (vgl. Chada et al. 2017). Diese Fabrik sollte mittels der bereits beschafften Bauteile aus der LEGO® MINDSTORMS® Education EV3 Serie erstellt werden (vgl. LEGO® Group 2017a) und die Möglichkeit bieten, von diversen Studierenden kontinuierlich weiterentwickelt und verbessert zu werden. In diesem Abschnitt wird zunächst ein Überblick über die Hardware gegeben, bevor das der Fabrik zugrundeliegende Szenario, der Aufbau, die Abläufe und schließlich die Steuerung vorgestellt werden.

4.1.1 Die Hardware

Die für den Aufbau der LEGO®-Fabrik verwendete Hardware stammt hauptsächlich aus dem LEGO® MINDSTORMS® Education EV3 Set sowie dem EV3 Ergänzungsset. Grundsätzlich sind diese für den Bau von programmierbaren Robotern im Lernumfeld vorgesehen (vgl. LEGO® Group 2017a), was die Eignung für den Aufbau einer Modellfabrik einschränkt (vgl. Chada et al. 2017, S. 20 ff.). Der Bauteilumfang des Education EV3 Sets ist auf der linken Seite in Abbildung 4.1 dargestellt und enthält neben typischen LEGO® Technic Bauteilen den sogenannten *EV3-Stein* (Mikrokontroller, auch *Brick* genannt), mehrere *Sensoren* und *Motoren*. Mit dem EV3 Ergänzungsset (Abbildung 4.1, rechts) kommen mehrere Bauteile für die Konstruktion hinzu.



Abbildung 4.1: Verwendete LEGO® MINDSTORMS® EV3 Sets (Bilder: LEGO® Group 2017a)

Der Brick, die Sensoren und Motoren sind in Abbildung 4.2 genauer dargestellt. Der *EV3-Stein* auf der linken Seite bildet als programmierbarer Microcontroller das Hauptelement. Er verfügt über einen 300 MHz ARM9 Prozessor, ist mit dem Betriebssystem LINUX ausgestattet und hat 64 MB RAM. Der Flash-Speicher von 16 MB ist mittels einer SD-Karte um bis zu 32 GB erweiterbar. Außerdem verfügt er über jeweils vier Anschlüsse für Sensoren (1-4) und Motoren (A-D), einen USB-Anschluss, in den ein WIFI-Dongle für die Drahtlosübertragung angeschlossen werden kann oder die kabelbasierte Reihenschaltung mehrerer Bricks erfolgen kann sowie einen MINI-USB Port für den Anschluss an einen PC. Die Stromversorgung kann entweder über Batterien, ein Akkumodul oder ein Netzteil erfolgen (LEGO® Group 2015, 2017b).



Abbildung 4.2: EV3-Stein, Sensoren und Motoren (Bilder: LEGO® Group 2015, S. 6 ff., 2017b)

Für die *Sensorik* stehen Berührungs-, Farb-, Ultraschall- und Gyrosensoren zur Verfügung (mittlerer Bereich in Abbildung 4.2). Der analoge *Berührungssensor* erkennt anhand der roten Taste drei Zustände: gedrückt, losgelassen und angestoßen. Der digitale *Farbsensor* (Erfassungsrate: 1 kHz) kann in folgenden drei Modi verwendet werden: Farbmodus, Stärke des reflektierten Lichts und Stärke des Umgebungslichts. Im Farbmodus kann er zwischen

sieben verschiedenen Farben und „keiner Farbe“ unterscheiden. In den anderen beiden Modi arbeitet der Sensor mit einer Skala von 0 bis 100 (sehr dunkel bis sehr hell). Der *Ultraschallsensor* kann Schallwellen aussenden und empfangen, um Entfernungen zu messen oder das Auslösen von Programmen beim Schallwellenempfang zu ermöglichen. Der digitale *Gyrosensor* (Lagesensor) ist zum Messen von Drehbewegungen und Richtungsänderungen geeignet (vgl. LEGO® Group 2015, 2017b).

Als *Aktoren* stehen der sogenannte mittlere Motor und der große Motor zur Verfügung (rechter Bereich in Abbildung 4.2). Beide Motoren enthalten einen Drehsensor mit einer Messgenauigkeit von 1 Grad. Der Drehwinkel ist auslesbar. Bei dem *großen Motor* findet sich die Drehachse quer zur Längsachse des Motors. Ein Laufmoment von 20 Ncm, ein Kippmoment von 40 Ncm sowie eine Drehzahl von 170 U/min sind mit ihm realisierbar. Der *mittlere Motor* ist deutlich kompakter, weist mit bis zu 250 U/min eine höhere Drehzahl auf, ist allerdings mit einem Laufmoment von 8 Ncm und einem Kippmoment von 12 Ncm leistungsschwächer. Hier erfolgt der Antrieb um die Längsachse (vgl. LEGO® Group 2015).

Zusätzlich wurden LEGO® Grundplatten beschafft, die als Boden für die Fabrik dienen. Die Produkte (Golfbälle), die sich durch die Fabrik bewegen, werden über in Abbildung 4.3 dargestellte Holzkugeln mit einem Durchmesser von 14 mm und einer zentralen Bohrung in den Farben Weiß, Schwarz und Rot abgebildet.



Abbildung 4.3: *Verschiedenfarbige Holzkugeln zur Darstellung der Golfbälle (eigene Fotografie)*

Gründe für diese Wahl sind, dass die Kugeln einen optimalen Durchmesser für den Transport mit LEGO®-Bauteilen haben, einen Bruchteil von LEGO®-Bällen kosten und mittels der verschiedenen Farben Qualitätsunterschiede abgebildet werden können.

Nachdem dem Überblick über die verwendete Hardware werden im Folgenden Szenario, Aufbau und Abläufe der LEGO®-Fabrik beschrieben.

4.1.2 Szenario, Aufbau und Abläufe der LEGO®-Fabrik

Um eine Fabrik aus der vorliegenden Hardware zu erstellen, die in Abschnitt 4.1.1 vorgestellt wurde, galt es zunächst ein Szenario zu entwickeln, das die Anwendung, den Aufbau und die Prozesse in der Fabrik bestimmt. Die vorliegenden LEGO® Bauteile eignen sich gut, um runde Güter zu fördern, da bei der Förderung mit Schwerkraft (bspw. Rutschen) oder Gabelaufnehmern gearbeitet werden kann. Daher kam die Idee auf, Golfbälle als Produkte zu verwenden. Denn auf dem Golfplatz gehen eine Vielzahl von Bällen im hohen Gras, im Gebüsch oder in Wassergräben verloren. Da der Anschaffungspreis für einen neuen Ball im hohen einstelligen Bereich liegen kann, gibt es den Beruf des Golfballtauchers, der die Bälle aufsucht, einsammelt, aufbereitet und wieder veräußert. Dabei kommen für einen Taucher bspw. um die 80.000 Bälle pro Jahr zusammen. Die Aufbereitung ist allerdings sehr aufwändig und kostet viel Zeit (vgl. Schleufe, 26. Juli 2010). Darum bestand die Intention darin, mit der LEGO®-Fabrik eine vollautomatische Golfballaufbereitung aufzubauen (vgl. Chada et al. 2017). Dabei können die Golfballtaucher ihre Bälle in Abgabestationen in Form von Standardcontainern deponieren, erhalten dafür eine entsprechende Vergütung, sparen sich die mühsame Aufbereitung und können sich auf das Aufsuchen konzentrieren. Als Sammelaufbereitungsstelle für eine große Golfballanzahl kann in der Golfballaufbereitungsfabrik ein hoher Mehrwert generiert werden. Volle Container an den Abgabestationen werden von Lastkraftwagen (LKWs) abgeholt und zur Fabrik transportiert, wobei direkt wieder ein leerer Container auf den LKW aufgeladen wird.

Die LEGO®-Modellfabrik, wie sie momentan im Labor des pfp steht, ist in Abbildung 4.4 abgebildet (Stand 14.12.2018). Dabei wurde der ursprüngliche Grundaufbau von Chada et al. (2017) von weiteren Studierenden weiterentwickelt. LEGO® Grundplatten bilden den Untergrund der Fabrik, die insgesamt eine Fläche von 2,64 m² einnimmt (2,2 m x 1,2 m).

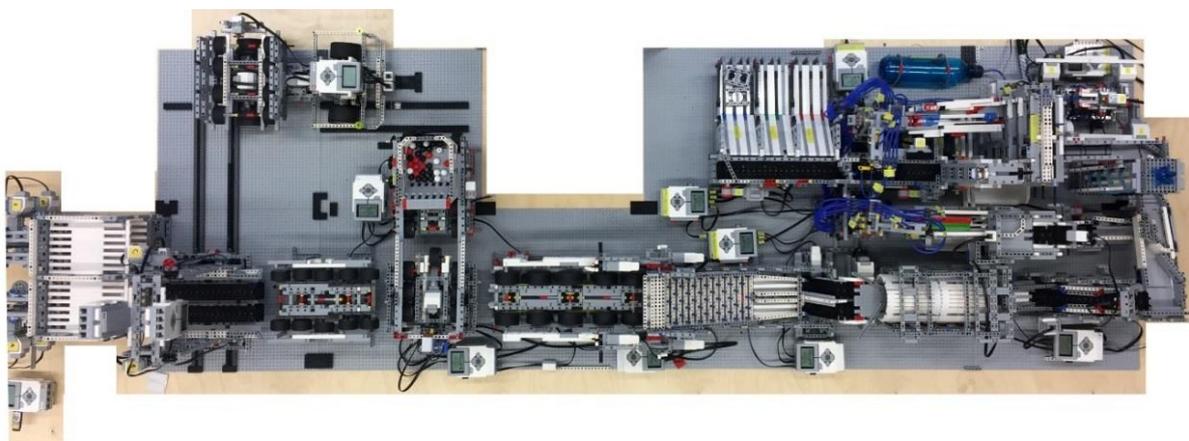


Abbildung 4.4: LEGO®-Modellfabrik am pfp (Stand: 19.12.2018, eigene Fotografie)

Die schematische Darstellung mit Beschriftungen in Abbildung 4.5 soll das Verständnis des Aufbaus und der Abläufe der Fabrik unterstützen. Rechtecke und Kreise dienen zur Darstellung von Produktions- und Logistikanlagen sowie Lagern (s. Umrandungen in der Abbildungslegende). Förderanlagen werden durch Pfeile dargestellt, wobei die Pfeilrichtungen die jeweils möglichen Transportrichtungen anzeigen (s. Pfeilbedeutungen in der Abbildungslegende). Auf den Fördereinrichtungen mit Transportmöglichkeiten in zwei Richtungen kann jeweils nur ein Container zur gleichen Zeit befördert werden.

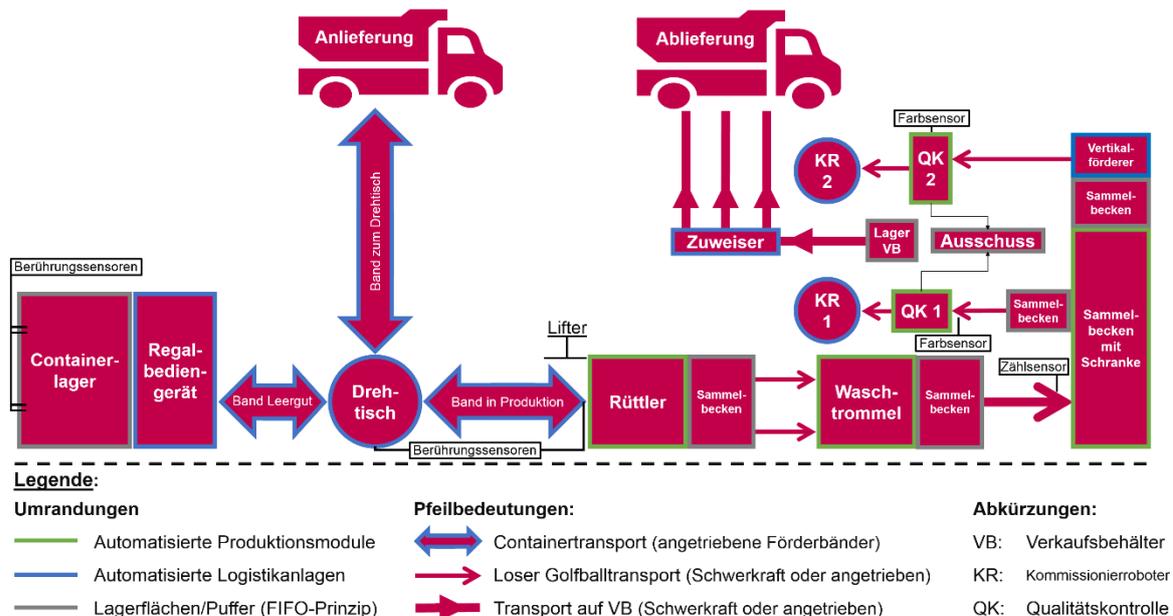


Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau und Materialfluss der LEGO®-Modellfabrik (eigene Darstellung)

Trifft ein mit einem vollen Golfballcontainer beladener LKW an dem *Anlieferungspunkt* ein, wird der abgeladene Container mittels eines angetriebenen Förderbandes zu dem *Drehtisch* befördert. Die Ankunft des Containers wird anhand eines Berührungssensors festgestellt, woraufhin sich der Drehtisch durch Motorantrieb um 90 Grad in Richtung der Aufbereitungsanlagen dreht, wo der Container durch ein weiteres angetriebenes Förderband (*Band in Produktion*) weitergefördert wird. Die Ankunft am *Lifter* wird ebenfalls durch einen Berührungssensor registriert, der einen Impuls zum Auskippen des Containers und zum Einschalten des *Rüttlers* gibt. Dieser dient dem Entfernen von grobem Schmutz, indem die winkelig angebrachte Gitterplatte, auf der die Bälle in Materialflussrichtung weiterrollen, vertikal oszilliert. Während des Kippvorgangs fallen die Bälle in den Rüttler und passieren die weiteren Module ab diesem Punkt vereinzelt. Sobald der Container wieder abgelassen wurde, wird der Rüttler ausgeschaltet und das Förderband in die Produktion rückwärts gestartet, um den leeren Container zurück zum Drehtisch und von dort aus in das Containerlager zu befördern (Drehtisch dreht sich um 180 Grad). Bei Containereinlagerung wird außerdem ein im Lager befindlicher Container ausgegeben, der über den Drehtisch und die

Förderbänder auf den LKW geladen wird, durch den die Anlieferung erfolgt ist. Der LKW kann den Container daraufhin wieder an einer Sammelstation abstellen. Gleichzeitig (sobald der Container abgelassen wurde) werden die Förderbänder und Module gestartet, die auf den Rüttler folgen. Aus dem nachfolgenden *Sammelbecken* werden die Bälle so durch zwei paralleler Förderbänder mittels Mitnehmern (Stifte, die jeweils einen Ball „aufgabeln“) in die *Waschtrommel*, einer Anlage zur Nassreinigung, befördert. Sie befreit die Bälle von verbliebenen Verunreinigungen und fördert sie während des Reinigungsvorgangs über einen spiralförmig angebrachten Schlauch, der die Bälle durch die Trommelrotation mitnimmt, weiter. Außerdem ist die Trommel in Flussrichtung leicht nach unten geneigt. Aus dem *Sammelbecken* nach der Waschtrommel werden die Bälle wieder von einem Förderband mit Mitnehmern aufgenommen, mit einem darauf angebrachten *Berührungssensor* gezählt und gelangen in das *Sammelbecken mit Schranke* (s. rechter Rand der Abbildung 4.5). Die ermittelte Ballanzahl bestimmt, wie die Golfbälle in diesem Sammelbecken durch die schwenkbare Schranke auf die beiden *Qualitätskontrollen* (QKs) verteilt werden. Je nach Auslastung wird somit entweder nur QK 1 genutzt oder es erfolgt eine Parallelnutzung (QK 1 und QK 2), indem die Schranke in gewissen Abständen umschwenkt. Letzteres ist bei einer hohen Golfballanzahl erforderlich, da die QK sonst einen Engpass darstellt. Auch wenn sie sich baulich unterscheiden, funktionieren diese beiden Anlagen nach dem gleichen Prinzip: Über ein motorgetriebene Förderung (bei QK 1 ein Förderband mit Mitnehmern, bei QK 2 ein Vertikalförderer, in dem die Bälle spiralförmig nach oben gefördert werden) gelangen die Bälle aus einem *Sammelbecken* zu einem *Sensor*, durch den die Qualität eines jeden Balls festgestellt wird. Diese Prüfung wird in der LEGO®-Fabrik mit einem Farbsensor durchgeführt, der die verschiedenen Ballfarben erkennt, durch die unterschiedliche Qualitätsniveaus abgebildet werden. Erfüllt ein Golfball durch Beschädigungen oder Abnutzungen die Mindestanforderungen nicht, wird er als „*nicht in Ordnung*“ erkannt, aussortiert und in einen Ausschussbehälter geleitet. Bälle, die als „*in Ordnung*“ erkannt werden, gelangen auf eine Schiene, wo immer zwei Golfbälle von einem der beiden rotierbaren *Kommissionierroboter* (KR) aufgenommen und in einen Verkaufsbehälter (VB) gelegt werden. Die beiden Roboter arbeiten dabei exakt versetzt zueinander, um sich nicht gegenseitig zu behindern und aufgrund ihrer Steuerung mittels Pneumatik, wobei die Öffnung eines Ventils immer eine gleichzeitige Bewegung bei beiden Robotern bewirkt. Die Druckluftversorgung erfolgt über einen Kompressor aus LEGO®-Bauteilen. Die VB, die sich aufgrund ihrer Kapazität von genau zwei Golfbällen perfekt für den Weiterverkauf eignen, werden automatisch aus einem Lagerturm ausgegeben („Lager VB“ in Abbildung 4.5), der bis zu 17 dieser Behälter fasst. Die gefüllten VB werden je nach Destination über den *Zuweiser* zu einer der drei Sammelstellen geleitet. Der Zuweiser arbeitet mit Bandabweisern, die den jeweiligen VB vom Förderband auf eine entsprechende Rutsche

schieben. Die drei Sammelstellen nach den Rutschen sind für unterschiedliche Kunden (Großhändler) vorgesehen. An diesem Punkt, dargestellt durch den LKW mit der Aufschrift „Ablieferung“ in Abbildung 4.5, besteht außerdem die Möglichkeit, dass der selbe LKW, der die verschmutzten Bälle geliefert hat, aufbereitete Bälle nach dem Durchlauf aufladen und zu ihrem Verkaufsort bringen kann, wodurch Leerfahrten vermieden werden. Die An- und Ablieferung selbst sind bislang noch nicht physisch realisiert. Zudem liegt zum Ausgangszeitpunkt aufgrund von baulichen Komplikationen noch keine funktionierende Steuerung für die QK2, die Kommissionierung in VB sowie die Kundenzuweisung vor. Auch das Regalbediengerät und das Containerlager sind zwar physisch bereits vorhanden, aber noch nicht in der Steuerung abgebildet. Diese sollen in Zukunft realisiert werden.

Ab dem Punkt, wo der volle Container auf das Förderband an der Anlieferungsstelle geladen wird bis zur Ablage der VB in den drei Sammelstellen findet der Materialfluss vollautomatisiert statt. Somit handelt es sich um eine menschenleere Fabrik. Die verschiedenen Arbeitsschritte werden mittels Sensorik und Aktorik gesteuert. Lediglich Überwachungsaufgaben sowie das Nachfüllen der VB erfolgen durch die Fabrikbetreiber. Nach der Darstellung des Aufbaus und des Materialflusses wird im Folgenden beschrieben, wie die Steuerung der LEGO®-Fabrik funktioniert.

4.1.3 Steuerung der LEGO®-Fabrik

Für die Programmierung des EV3-Steins und somit die Steuerung der Hardware stellt LEGO® eine kostenlose Software zur grafischen Programmierung zur Verfügung, die auf LabVIEW basiert. Dabei können verschiedene Programmierblöcke miteinander zu einer Art Ablaufdiagramm verbunden werden und auf den EV3-Stein geladen werden, der die Blöcke in der angegebenen Reihenfolge abarbeitet. Dabei lassen sich verschiedene Einstellungen tätigen und auch Konstrukte aus der klassischen Programmierung (Schleifen, if-Anweisungen etc.) anwenden (vgl. Löwenstein 2017). Auf unkomplizierte Weise können so Programme zur Steuerung gebauter LEGO®-Roboter, -Fahrzeuge oder ähnlichem erstellt werden. Fokus dieses Pakets von LEGO® sind insbesondere Kinder und Jugendliche, die auf diese Art spielerisch an die Programmierung von Robotern herangeführt werden können (vgl. Löwenstein 2017). Auch die anfängliche Steuerung der LEGO®-Fabrik wurde mittels dieser grafischen Programmieroberfläche entwickelt. Aufgrund der Anzahl der eingesetzten EV3-Steine, Sensoren und Aktoren in der Fabrik erreichten die Möglichkeiten hier aber schnell eine Grenze. Um bis zu zehn EV3-Steine gleichzeitig und zentral steuern zu können, wurde die Nutzung einer anderen Programmierumgebung notwendig, die den Umgang mit einem höheren Komplexitätsgrad zulässt.

Eine Möglichkeit zur Programmierung der LEGO® EV3-Bricks basierend auf Java bietet das Softwarepaket leJOS EV3, das für Windows, Linux und Mac OS X zur Verfügung steht. Es ist kostenlos verfügbar und wurde eigens für LEGO® MINDSTORMS® entwickelt. Die Software wird kontinuierlich in Zusammenarbeit mehrerer Programmierer weiterentwickelt und Quellcodes werden öffentlich zur Verfügung gestellt. Austausch und Support finden innerhalb des Forums statt (s. „leJOS FORUMS“). Mittels einer SD-Karte, die vorher bootfähig gemacht werden muss und in den Slot des jeweiligen Bricks einlegt wird, kann leJOS darauf verwendet werden. Für die Programmierung auf dem Rechner werden Eclipse IDE for Java Developers, für das ein passendes leJOS-EV3-Plug-in zur Verfügung steht, und das Java Development Kit 7 genutzt (vgl. Löwenstein 2017).

Zu Beginn des Programmierens steht das Anlegen eines Projekts des Typs LeJOS EV3 Project in Eclipse. Dabei wird automatisch die erforderliche Klassenbibliothek mit diversen Möglichkeiten zur Steuerung, Kommunikation und Datenauswertung hinzugefügt. Innerhalb des Projekts können diverse Klassen angelegt werden. Im Fall der LEGO®-Fabrik existiert jeweils eine Klasse für jede Station (Rüttler, Waschtrommel, Qualitätskontrolle, Lager etc.) und zusätzlich übergeordnete Klassen, u. a. für die Steuerung der kompletten Fabrik und die permanente Abfrage der Sensorwerte. Klassen mit Main-Methode können als LeJOS EV3 Program ausgeführt, auf den EV3-Brick geladen und dort gestartet werden. Die Klasse RMIRemote EV3 ermöglicht außerdem eine Vernetzung der EV3-Steine untereinander und mit einem Rechner über W-LAN, was einen Remote-Zugriff erlaubt. Die zu vernetzenden Steine und der Rechner müssen dafür im selben Netzwerk oder mittels USB-Kabel verbunden sein. Die EV3-Steine werden über eine individuelle IP-Adresse angesprochen und so kann die übergeordnete Steuerung über Eclipse auf dem Rechner stattfinden. Die Programmierung erfolgt dabei auf Grundlage der Objektorientierung: Für die verschiedenen Aktoren und Sensoren gibt es jeweils eine entsprechende Java-Klasse. Damit können einzelne Objekte für die einzelnen Aktoren und Sensoren instanziiert werden, was eine individuelle Steuerung bzw. Abfrage ermöglicht (vgl. Löwenstein 2017).

In der Steuerung der LEGO®-Fabrik wird die Initialisierung eines jeden Bricks in einer individuellen Methode vorgenommen, um mittels eines catch-Blocks mögliche Fehler abzufangen (z. B. wenn ein Brick nicht angesprochen werden kann, da er sich aufgrund niedriger Akkuleistung ausgeschaltet hat) und zu kommunizieren. Abbildung 4.6 dient als Beispiel für das Anlegen eines Objekts vom Typ RemoteEV3 (EV3-Stein) und der an dem Stein angeschlossenen Aktoren (RMIRegulatedMotor). Es wird ein neues Objekt, „b101“, vom Typ RemoteEV3 angelegt. Die Ansprache erfolgt mittels dessen individueller IP-Adresse im Netzwerk. Die an den Ports des Bricks angeschlossenen Motoren, in diesem Fall vier mittlere Motoren („M“), werden ebenfalls angelegt („b102a“, „b102b“, „b102c“ und

„b101d“). Im weiteren Programmverlauf können so die einzelnen Aktoren mittels Methoden wie bspw. *forward()* oder *stop()* gesteuert werden.

```
public void initBrick1() {
    // Brick 101
    try {
        b101 = new RemoteEV3("192.168.0.103"); // hier muessen alle Brick Ips eingetragen werden
        getPowerLevel(b101);
    } catch (RemoteException | MalformedURLException | NotBoundException e) {
        // TODO Auto-generated catch block
        e.printStackTrace();
        System.out.println("B1 not Found");
    }
    b101a = b101.createRegulatedMotor("A", 'M');
    b101b = b101.createRegulatedMotor("B", 'M');
    b101c = b101.createRegulatedMotor("C", 'M');
    b101d = b101.createRegulatedMotor("D", 'M');

    openMotorPorts.add(b101a);
    openMotorPorts.add(b101b);
    openMotorPorts.add(b101c);
    openMotorPorts.add(b101d);

    bricks.add(b101);
}
```

Abbildung 4.6: Anlegen eines Objekts vom Typ *RemoteEV3* und der zugehörigen Aktoren (pfp Universität Kassel 2018)

Auf dieser Grundlage ist die Steuerung der LEGO®-Modellfabrik aufgebaut. In den Klassen für die einzelnen Stationen finden sich dabei die Methoden zur entsprechenden Ansprache der Aktoren und Sensoren. Die übergeordnete Steuerung der Fabrik, in der die Methoden der einzelnen Klassen ausgeführt werden, erfolgt über die Klasse „Steuerung“.

```
public void startCleaner(boolean direction) throws RemoteException {

    cleaner.setSpeed(cleanerSpeed);

    if(direction) {
        cleaner.forward();
    }else {
        cleaner.backward();
    }

    s.sendMessage("WS");
}
```

Abbildung 4.7: Methode "startCleaner" der Klasse "Cleaning" (pfp Universität Kassel 2018)

Abbildung 4.7 zeigt als Beispiel für eine Methode einer Station (in diesem Fall der Waschtrommel) die Methode „startCleaner“ der Klasse „Cleaning“, mit der der Motor, mit dem die Waschtrommel in Drehung versetzt wird, gestartet wird. Mit der übergebenen

Variable „direction“ vom Typ boolean kann dabei bestimmt werden, in welche Richtung sich der Motor und somit die Waschtrommel drehen soll. Das Objekt „cleaner“ ist ein Objekt der Klasse RMIRegulatedMotor, das im Konstruktor der Klasse „Cleaning“ instanziiert wird. Es dient also der Ansprache des an der Waschtrommel angebrachten Motors. Zuerst wird die Motorengeschwindigkeit gesetzt („cleaner.setSpeed(cleanerSpeed);“) und daraufhin der Motor entweder vorwärts (.forward()) oder rückwärts (.backward()) gedreht, je nachdem, ob die Variable „direction“ *true* oder *false* ist.

Die Beschreibungen und Beispiele in diesem Abschnitt sollen ein Grundverständnis für die der LEGO®-Fabrik zu Grunde liegenden Steuerung vermitteln. Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Erstellung des Digitalen Zwillings der LEGO®-Fabrik, bei der die Steuerung um eine zusätzliche Funktion zum Informationsaustausch erweitert wird.

4.2 Konzeptanwendung

In Abschnitt 4.1 wird die LEGO®-Fabrik mit der verwendeten Hardware, den Prozessen und der Steuerung beschrieben. Unter Verwendung dieser Information erfolgt in diesem Abschnitt die Entwicklung eines Digitalen Zwillings der Modellfabrik auf Basis der ereignisdiskreten Simulation unter Anwendung des in Abschnitt 3.3 beschriebenen Konzepts, das eine Konkretisierung und Ergänzung des Simulationsvorgehensmodells nach Rabe et al. (2008) (s. Abschnitt 2.1.5) darstellt und die in Abschnitt 3.2 erarbeiteten Anforderungen mit einbezieht.

Die Gliederung des Abschnitts orientiert sich an den einzelnen Projektphasen und Phasenergebnissen des Konzepts. Dabei werden die einzelnen Schritte auf dem Weg zum digitalen Modell der LEGO®-Fabrik beschrieben und dabei von Beginn an versucht, die in Abschnitt 3.2 genannten Anforderungen umzusetzen, um das in einem Werkzeug für die ereignisdiskrete Simulation (Tecnomatix Plant Simulation) zu erstellende digitale Modell als Digitaler Zwilling nutzen zu können. Im Nachgang dient das erstellte digitale Modell der kritischen Würdigung inwiefern das Konzept mit den Anforderungen tatsächlich umgesetzt werden kann und welche kritisch zu sehenden Punkte dabei auftreten. Es ist aufgrund des Umfangs nicht möglich, auf alle Einzelheiten einzugehen, die in dem Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) vorgesehen sind und an das mit dem erstellten Konzept angeknüpft wird. Aus diesem Grund werden nur die Zielbeschreibung und Aufgabenspezifikation ausführlich anhand der Dokumentenstrukturen von Rabe et al. (2008) (s. Anhang I – Dokumentenstrukturen) beschrieben. Ab den Phasen der Modellbildung werden zwei wesentliche Prozesse innerhalb der LEGO®-Fabrik dargestellt, anhand denen exemplarisch geprüft werden kann, ob die in dem Konzept formulierten Anforderungen umgesetzt werden

können, da dies den Fokus dieser Arbeit darstellt. Dabei wird besonders auf die Schnittstellen und die Kommunikation in Echtzeit eingegangen, da dies den Fokus der Arbeit darstellt. Die Möglichkeit der Simulation wird dabei nur am Rand betrachtet, da deren Möglichkeit in einem ereignisdiskreten Simulationsmodell keiner Prüfung bedarf. Grundsätzlich ist jedes Phasenergebnis zu verifizieren und zu validieren. Im Folgenden kann die V&V allerdings aufgrund des Umfangs nur exemplarisch für die aufbereiteten Daten und das implementierte Modell beschrieben werden.

4.2.1 Zielbeschreibung

Die Zielbeschreibung dient als Ausgangsbasis. Dafür werden an dieser Stelle die *Ausgangssituation*, der *Projektumfang* und die *Randbedingungen* beschrieben.

Ausgangssituation und Projektumfang

Das Ziel ist die Erstellung eines Digitalen Zwillings der am pfp bestehenden LEGO®-Modellfabrik auf Basis der ereignisdiskreten Simulation. Der aktuell vorliegende Stand ist in Abschnitt 4.1 dargestellt. Daher steht nicht die Planung eines neuen Systems als Zweck im Fokus, sondern die Nachbildung eines vorhandenen Systems mit seinen Prozessen und Zusammenhängen, um das zu erstellende digitale Modell als Digitalen Zwilling nutzen zu können. Um den Anforderungen an einen Digitalen Zwilling gerecht zu werden, muss das zu erstellende Modell als Assistenzsystem nutzbar sein. Das beinhaltet zum einen, dass es die Fähigkeit besitzt, den Zustand des realen Systems (LEGO®-Modellfabrik) digital und in Echtzeit abzubilden und zum anderen die Möglichkeit der Simulation gewährleistet, um Erkenntnisse über das Echtssystem erlangen zu können. Dabei muss das zu erstellende Modell die Möglichkeit bieten, einfach an neue Gegebenheiten (neue Module in der Fabrik etc.) angepasst werden zu können.

Die Abbildung des Zustands in Echtzeit bezieht sich darauf, wo im Modell momentan Container, Bälle oder VB zu finden sind, wie die derzeitige Lagerbelegung (Containerlager und Lager VB) ist, welchen Zustand die drehbaren Elemente (KR 1 und KR 2, Drehtisch und Schranke zu den Qualitätskontrollen) haben, wie die Akkustände der einzelnen EV3-Bricks lauten, wie viele Bälle bislang gezählt wurden und wie viele als „*in Ordnung*“ oder „*nicht in Ordnung*“ erkannt wurden. Außerdem sollen die Anordnung und der Platzbedarf der einzelnen Systembestandteile (Förderbänder, Gesamtsystem) aus dem Modell ersichtlich sein, da eine begrenzte Fläche zur Verfügung steht und ein Umbau der LEGO®-Fabrik damit vorher digital geplant werden kann. Um die Zustandsdarstellung in Echtzeit zu gewährleisten, muss eine Verbindung zwischen dem zu erstellenden Modell und der Steuerung der LEGO®-Fabrik implementiert werden. Die Abbildung des aktuellen Zustands bezüglich der Parameter der Systembestandteile soll darüber ermöglicht werden, dass das zu erstellende

Modell mit dem Informationssystem verbunden wird, um daraus die aktuellen Daten importieren zu können.

Innerhalb dieser Arbeit sind keine Experimente vorgesehen, da der Fokus auf der Erstellung eines Digitalen Zwilling auf Basis der ereignisdiskreten Simulation liegt und mit der praktischen Anwendung des in Abschnitt 3.3 dargestellten Konzepts die Realisierbarkeit der damit verbundenen Anforderungen untersucht werden soll. Trotzdem ist eine wichtige Anforderung eines Digitalen Zwillings, dass er die Möglichkeit zur Simulation bereitstellt. Dafür müssen entsprechende Daten erhoben werden. Die Fabrik ist weitestgehend modular aufgebaut, um einzelne Module austauschen, hinzufügen oder herausnehmen zu können und somit eine leichte Veränderungsfähigkeit zu gewährleisten (vgl. Chada et al. 2017). Um solche Änderungen zunächst virtuell testen zu können, bevor physische Maßnahmen und Umprogrammierungen vorgenommen werden, soll das zu erstellende Modell dazu dienen, das Verhalten der LEGO®-Fabrik und ihrer einzelnen Module in Bezug auf die Durchlaufzeit¹² (DLZ) mit Hilfe der Simulation nachvollziehen zu können. So kann es bei der Systemoptimierung unterstützen. Die DLZ bezieht sich darauf, wie lange Bälle, Container oder VB benötigen, um einzelne Systembestandteile und das Gesamtsystem zu durchlaufen. Hierbei wird die Darstellung in 2D als ausreichend gesehen, da eine 3D-Darstellung den Aufwand nicht rechtfertigen würde und sich die 2D-Darstellung eignet, um die gewünschten Prozesse und Abläufe hinreichend abzubilden. Im Sinne des Verkürzungsmerkmals des Modellbegriffs (s. Abschnitt 2.1.1) wird der Fokus auf die Abbildung der Prozesse und Zusammenhänge der Systembestandteile gelegt und nicht auf das innere Verhalten der Systembestandteile.

Betrachtungsgegenstand stellt die gesamte LEGO®-Fabrik mit ihren Prozessen von der Anlieferung bis zur Ablieferung dar (s. Abbildung 4.5). Die Systemgrenzen des zu erstellenden Modells sind dabei auf der einen Seite die Schnittstelle des Förderbandes zum Anlieferungsfahrzeug, wobei das Fahrzeug nicht dargestellt wird, sondern das Förderband zum Drehtisch als erster Systembestandteil modelliert wird. Auf der anderen Seite stellen die Endpunkte der drei Rutschen die Systemgrenze dar. Somit sollen Containerankünfte für die Simulation innerhalb des Digitalen Zwillings beliebig eingestellt werden und das Verlassen der VB über die drei Rutschen nachvollzogen werden können.

Zum Durchführen von Experimenten und zur Anpassbarkeit des digitalen Modells an den aktuellen Stand des Realsystems müssen sich einzelne Parameter leicht ändern lassen. Das betrifft DLZ bzw. Durchlaufgeschwindigkeiten, Abmaße und Kapazitäten der einzelnen Systembestandteile sowie die Ankünfte von mit Golfbällen befüllten Containern. Außerdem

¹² Definition Durchlaufzeit: „Gesamtdauer für die Erledigung einer Aufgabe, für die Start und Ende der Durchführung gemessen werden können.“ (Gutenschwager et al. 2017, S. 40)

muss unkompliziert zwischen der Nutzung der Qualitätskontrollen (QK) umgeschaltet werden können, da eine Schranke im Realsystem die Bälle entweder zu QK1 oder QK2 weiterleitet. Damit die Parameteränderungen auch von Nutzern durchgeführt werden können, die im Umgang mit dem Simulationswerkzeug kaum oder nicht geübt im sind, soll eine leicht zu verstehende Bedienoberfläche helfen, Parametrisierungen und Änderungen vornehmen zu können. Welche genau das betrifft, wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

An der LEGO®-Modellfabrik werden permanent Anpassungen und Veränderungen durch Studenten vorgenommen. Um dafür auch das zu erstellende Modell einfach anpassen zu können, sollen Systembestandteile bzw. Module wieder- und weiterverwendet werden können. Es muss daher möglich sein, die DLZ, Kapazitäten und Ausmaße einzelner Module (in Abhängigkeit von der Art des jeweiligen Moduls) für die Weiterverwendung anpassen zu können sowie definierte Module wiederverwenden zu können. So zum Beispiel sind zwei QKs in der LEGO®-Fabrik vorhanden, die zwar unterschiedlich aufgebaut, in der Funktionsweise aber sehr ähnlich sind. Es macht daher Sinn, ein Modul anzulegen, das grundsätzlich eine QK abbildet und dann für QK1 und QK2 spezifisch abzuleiten und anzupassen. Auch zwischen den anderen Bearbeitungsstationen (Rüttler, Waschtrommel) soll Aufwand durch eine möglichst ähnliche Abbildung mit spezifischer Parametrisierung gespart werden.

Randbedingungen

Wesentliche Meilensteine innerhalb des Vorgehens stellen das Vorliegen des Konzeptmodells, des formalen Modells, der aufbereiteten Daten und schließlich des als Digitaler Zwilling nutzbaren ereignisdiskreten Simulationsmodells dar. Die V&V des entstandenen digitalen Modells ist ebenfalls als Meilenstein zu sehen und muss ergeben, dass es sich bzgl. der Prozesse und DLZ verhält wie die LEGO®-Fabrik und gleichzeitig die genannten und in den folgenden Phasen konkretisierten Anforderungen erfüllt. Diese leiten sich neben projektspezifischen Anforderungen aus den in Abschnitt 3.2 erarbeiteten und in dem Konzept (vgl. Abschnitt 3.3) verankerten Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell ab. Diese Punkte sind als Abnahmekriterien zu sehen. Als Projekttenddatum gilt das Abgabedatum dieser Bachelorarbeit – der 13. Februar 2019.

Die Dokumentation der Phasen des Konzepts muss umfangreich genug sein, dass auch unerfahrene Leser den Erstellungsprozess nachvollziehen können. Die Phasenbeschreibungen in diesem Kapitel stellen die Dokumentation dar, wobei besonderer Wert wird auf die Dokumentation der Funktionsweise des als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells gelegt wird. Da es auch für Studenten nutzbar sein soll, die im Anschluss an diese Arbeit an der LEGO®-Fabrik arbeiten, ist eine gute Verständlichkeit zu gewährleisten.

Als letzter Punkt wird in der Zielbeschreibung die zu nutzende Hard- und Software festgelegt. Für die Hardware gibt es keine speziellen Festlegungen. Die Erstellung erfolgt auf einem MacBook Pro (Ende 2011) mit 16 Gigabyte RAM unter Windows 7. Das zu verwendende Simulationswerkzeug ist Tecnomatix Plant Simulation in der Version 14, da es am Fachgebiet pfp für die Lehre genutzt wird und daher Lizenzen vorliegen (Siemens Industry Software GmbH). Das Konzept sieht gewisse Anforderungen an die Auswahl des Simulationswerkzeugs vor: eine anpassungsfähige Bausteinbibliothek, Bereitstellung von Schnittstellen, Offenheit und Kopplungsfähigkeit sowie Ausfallsicherheit und 24/7-Verfügbarkeit. Eine anpassungsfähige Bausteinbibliothek liegt in Tecnomatix Plant Simulation vor und diverse Schnittstellen zur Kopplungsfähigkeit werden ebenfalls zur Verfügung gestellt (ActiveX, CAD, Oracle SQL, ODBC, XML, Socket, OPC etc.), womit das Werkzeug die geeignete Offenheit mitbringt (Siemens PLM Software 2014). Wie die Ausfallsicherheit zu bewerten ist und ob ein Service rund um die Uhr verfügbar ist, ist allerdings in einer Online-recherche auf Anhieb nicht herauszufinden. Auf eine Nachfrage per E-Mail fand keine Rückmeldung statt. Trotzdem wird das Werkzeug für die Erstellung verwendet. In Tabelle 4.1 werden die wesentlichen Punkte der Zielbeschreibung stichwortartig dargestellt.

Tabelle 4.1: Zielbeschreibung (Zusammenfassung)

Ausgangssituation	
Betrachtungsgegenstand und Gegebenheiten	Am pfp aktuell vorliegende LEGO®-Modellfabrik (s. Abschnitt 4.1)
Problemstellung	Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren ereignisdiskreten Simulationsmodells der LEGO®-Modellfabrik des pfp
Anwendungsziele und Untersuchungszweck	<ul style="list-style-type: none"> - Echtzeitfähige Zustandsdarstellung - Virtuelle Tests zur Planung und Optimierung mittels Simulation
Projektumfang	
Benennung und grobe Funktionsweise des zu betrachtenden Systems	LEGO®-Modellfabrik zur Darstellung einer Golfballaufbereitungsanlage. Details sind Abschnitt 4.1 zu entnehmen.
Zweck und wesentliche Ziele	<ul style="list-style-type: none"> - Digitale Abbildung in Echtzeit zur Nachvollziehbarkeit des aktuellen Zustands des realen Systems (LEGO®-Fabrik) - Simulation zum Testen der Auswirkungen von Systemänderungen auf die DLZ
Geplante Modellnutzung	Nutzung des Modells so lange auch die LEGO®-Fabrik existiert <ul style="list-style-type: none"> ➤ Weiterverwendung des Modells und einzelner Module ➤ Wiederverwendung einzelner Module
Randbedingungen	
Projektende	13.02.2019
Wesentliche Meilensteine	<ul style="list-style-type: none"> - Vorliegen des Konzeptmodells - Vorliegen des formalen Modells - Vorliegen der aufbereiteten Daten - Vorliegen des als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells - Erfolgreiche V&V des implementierten Modells
Erste Kriterien für Abnahme	<ul style="list-style-type: none"> - Das erstellte Modell verhält sich in seinen Abläufen und bzgl. der Durchlaufzeiten wie die LEGO®-Fabrik - Das erstellte Modell erfüllt die Anforderungen an einen Digitalen Zwilling (s. Abschnitte 3.2 und 3.3)
Dokumentationsanforderung	Verständlichkeit auch für ungeübte Anwender
Einzusetzende Software	Tecnomatix Plant Simulation (Version 14)

4.2.2 Aufgabendefinition und -spezifikation

Mit der Zielbeschreibung sind bereits die groben Ziele und Rahmenbedingungen des Vorgehens abgesteckt. Als erste Phase des Konzepts dient die Aufgabendefinition der Vervollständigung und Konkretisierung der Ziele sowie des Vorgehens. Das Ergebnis dieser Phase stellt die Aufgabenspezifikation dar, mit der die Aufgaben für die folgenden Phasen festgelegt werden.

Zielbeschreibung und Aufgabenstellung

Die in der Zielbeschreibung formulierten Bedingungen und Anforderungen gelten ebenfalls in der Aufgabenstellung. Hier erfolgt eine weitere Konkretisierung für erforderliche Punkte. Als Abnahmekriterien ist genannt, dass sich das erstellte Modell in seinen Abläufen und bzgl. DLZ und Kapazität verhält wie die LEGO®-Fabrik sowie dass es (neben projektspezifischen Anforderungen) die Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell (s. Abschnitte 3.2 und 3.3) erfüllt. Die V&V ist dabei grundsätzlich für jedes Phasenergebnis durchzuführen, kann aber in dieser Arbeit aufgrund des Umfangs nur exemplarisch für die aufbereiteten Daten und das implementierte digitale Modell beschrieben werden. Ob das digitale Modell den gesetzten Anforderungen genügt wird überprüft, indem die Anforderungen im Nachgang einzeln betrachtet werden und beschrieben wird, ob sie erfüllt sind oder ob weiterer Handlungsbedarf besteht. Ob sich das erstellte Modell verhält wie die LEGO®-Fabrik soll mit Hilfe von Durchläufen getestet werden. Das als Digitaler Zwilling nutzbare Modell soll in zwei Modi betrieben werden können: Zustandsdarstellung und Simulation. Im Modus der Zustandsdarstellung empfängt das digitale Modell Daten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik in Echtzeit und stellt anhand dessen den aktuellen Systemzustand dar. Mittels eines Tests soll verifiziert und validiert werden, ob der Zustand und die Abläufe korrekt dargestellt werden. Im Modus der Simulation empfängt das Modell keine Daten von der LEGO®-Fabrik, sondern simuliert die Ankunft eines Containers mit Bällen, der anschließend durch die Fabrik läuft und die einzelnen Systembestandteile passiert. Die Möglichkeit der Simulation muss gewährleistet werden, allerdings wird der Simulationsmodus nur am Rande betrachtet, da er nicht im Fokus steht.

Beschreibung des zu untersuchenden Systems

Der Untersuchungsgegenstand ist die LEGO®-Modellfabrik des pfp wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt. Da ein Digitaler Zwilling das reale System über dessen gesamten Lebenszyklus begleitet und demnach immer wieder an neue Gegebenheiten angepasst werden muss, ist es erforderlich, dass auch die zum Ausgangspunkt dieser Arbeit noch nicht funktionierenden Module (Containerlager, QK2, Kommissionierung und die Zuweisung der

VB zu den Kunden) im Modell Berücksichtigung finden. Diese sind dabei so einzufügen, wie sie zukünftig funktionieren sollen. Nach Implementierung müssen ihre Kapazitätsdaten und DLZ ermittelt und im Modell angepasst werden. Bis eine Erhebung dieser Daten möglich ist, werden Annahmen getroffen.

Der Detaillierungsgrad ist dabei auf Ebene der einzelnen Module und Förderbänder vorgesehen. Prozesse innerhalb der einzelnen Module (Rüttler, Waschtrommel, Regalbediengerät, Lager, Puffer) sind für den Untersuchungszweck nicht relevant. Daher genügt es, deren Ein- und Ausgänge sowie die Anzahl und die Verweildauern der sich in ihnen befindlichen Elemente (Bälle, Container, VBs) abzubilden, damit die Modellbestandteile sich hinsichtlich DLZ so verhalten wie die realen Komponenten. Förderbänder, der Drehtisch und die KR sollen als solche dargestellt werden, damit die Bewegung der Container und Bälle für die Zustandsdarstellung nachvollziehbar ist. Eine Abbildung der Bewegungen der Schranke vor den QKs oder der Bandabweiser sind nicht erforderlich. Für erstere soll lediglich nachvollziehbar sein, welche Richtung derzeit passierbar ist. Bei der Modellierung wird grundsätzlich das Top-Down-Vorgehen gewählt, bei dem zunächst aus genereller Sicht begonnen wird und im weiteren Vorgehen oder nach der Erstellung je nach Bedarf einzelne Teilsysteme und Komponenten detaillierter dargestellt werden (vgl. VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 23; Wenzel et al. 2008, S. 126).

Um zum einen die Anpassungsfähigkeit des zu erstellenden Modells an neue Gegebenheiten in der LEGO®-Fabrik und zum anderen die Durchführung von Tests mittels der Simulation zu gewährleisten, müssen Parametervariationen unkompliziert möglich sein. Konkret sollen für die Förderstrecken (angetriebene und nicht angetriebene) die Geschwindigkeit, die Abmaße (Länge und Breite), der Fördergutabstand und die Kapazität anpassbar sein. Für Puffer (Sammelbecken nach Rüttler, Waschtrommel, Zählung und vor den QKs) sollen die DLZ, Kapazität und Zykluszeit (in welchem Abstand ein neues Element aufgenommen werden kann) variierbar sein. Für Lager (Containerlager und Lager VB) ist die Kapazität anpassbar zu gestalten. Für die Module (Regalbediengerät, Rüttler, Waschtrommel, QK 1 und 2) müssen DLZ und Aufnahmekapazität anpassbar sein. Darüber hinaus muss einstellbar sein, wann und wie häufig Container ankommen und wie viele Bälle welcher Art (rot, weiß, schwarz und „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“) darin enthalten sind.

Generell ist die Möglichkeit der Strukturvariation vorzusehen, da sich die Anordnung der Module der LEGO®-Fabrik ändern kann, einzelne ausgetauscht, entfernt werden oder neue hinzukommen. Dafür sollen auch in dem zu erstellenden Modell Module für die einzelnen Systembestandteile zum Einsatz kommen um diese Anpassungsfähigkeit zu gewährleisten.

Innerhalb dieser Arbeit ist allerdings keine Untersuchung von Systemvarianten vorgesehen, sondern die Nachbildung der LEGO®-Fabrik wie sie am 19.12.2018 am pfp vorzufinden ist.

Notwendige Informationen und Daten

Tabelle 4.2: Notwendige Daten, Datenverwendung & -quellen

Notwendige Daten	Datenverwendung	Informations- und Datenquelle
Physische Abmessungen (Länge x Breite) der Systembestandteile	- Parametrisierung der Förderstrecken und BEs	LEGO®-Fabrik (Längen und Breiten messen)
DLZ der Module, Förderstrecken und Sammelbecken	- DLZ der Module (Bearbeitungszeiten) - Berechnung der Fördergeschwindigkeiten	LEGO®-Fabrik (Zeiten stoppen)
Kapazitäten der Sammelbecken, Bearbeitungsstationen, Lager und Förderstrecken	- Parametrisierung der Sammelbecken, Bearbeitungsstationen, Lager und Förderstrecken	LEGO®-Fabrik (Ball- / Containerfassungsvermögen)
Dauer des Containerauskippvorgangs	- Einstellung der zu wartenden Zeit, bis der Auskippvorgang beendet ist	LEGO®-Fabrik (Zeit stoppen)
Realisierte Abläufe in der Fabrik	- Aufbau des Modells und Festlegung der Prozesse	- LEGO®-Fabrik - Programmcode Steuerung
Geplante Abläufe	- Abbildung geplanter Abläufe	Programmierer / Mitarbeiter des pfp
Sensor-/Realdaten	- Containerankunft - Ein- und Auslagerungen Containerlager - Einschalten des Förderbandes zwischen Regalbediengerät und Drehtisch - Start der Förderbänder in die Waschtrommel - Ball erkannt (Zählung) - Zustandsänderung Schranke QKs - Art des erkannten Balls QKs - Zielkunde VB - Akkustände der EV3-Bricks	Datenkommunikation zwischen Steuerung der LEGO®-Fabrik (leJOS) und zu erstellendem Modell in Echtzeit

Notwendige Daten, deren Verwendung sowie Informations- und Datenquellen sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Die aufgeführten Sensor-/Realdaten müssen für den Modus der Zustandsdarstellung an das Modell kommuniziert werden. Neben der Verwendung für die Parametrisierung der Modellbestandteile sollen die Daten zu physischen Abmessungen,

Zeiten, DLZ, Geschwindigkeiten und Kapazitäten außerdem in Datenbanken (Microsoft Excel) festgehalten werden, die in dieser Bachelorarbeit als das Informationssystem der LEGO®-Fabrik betrachtet werden. Da ein solches bisher noch nicht vorhanden ist, müssen diese Datenbanken mit den in der Phase *Datenbeschaffung* zu erhebenden Daten gefüllt werden. Außerdem sollen die Daten auch im zu erstellenden Modell selbst über Tabellen einsehbar und änderbar sein, um so einfacher Parametrisierungen vornehmen zu können. Zudem soll die Parametrisierung nach Wunsch automatisch aus den Daten des Informationssystems erfolgen können. Damit wird eine Schnittstelle des Modells zu den Datenbanken (Plant Simulation – Microsoft Excel) notwendig. Für Daten, die aufgrund der noch nicht erfolgten Implementierung in der LEGO®-Fabrik nicht erhoben werden können (DLZ), müssen Annahmen getroffen werden.

Die zur Modellerstellung verwendeten Daten stellend den Stand der LEGO®-Fabrik am 19.12.2018 dar. Damit das zu erstellende Modell als Digitaler Zwilling der LEGO®-Fabrik über deren gesamte Existenzzeit genutzt werden kann, ist das Modell bei Änderungen der Struktur, der Daten oder der Steuerung sowie nach Umbaumaßnahmen zu aktualisieren. Es muss stets den aktuellen Stand des realen Systems darstellen, um den Anforderungen an einen Digitalen Zwilling gerecht werden zu können. Da permanent an der LEGO®-Fabrik gearbeitet wird, ist es möglich, dass zu Projektende (Abgabedatum dieser Bachelorarbeit) bereits Aktualisierungen und Anpassungen notwendig sind. Diese sind im Nachgang vorzunehmen und können aufgrund der begrenzten Zeit nicht bereits während des Erstellungsprozesses berücksichtigt werden.

Wie in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, funktionieren einige Systembestandteile noch nicht (Regalbediengerät, Containerlager, QK 2, KR, Kundenzuweisung), da sie entweder bauliche Maßnahmen erfordern oder die Steuerung noch nicht programmiert ist. Damit der Anpassungsaufwand des zu erstellenden Modells nach deren Realisierung so gering wie möglich ist und die Nutzbarkeit des digitalen Modells über den gesamten Existenzzeitraum der LEGO®-Fabrik vereinfacht wird, sind auch diese Systembestandteile in dem Modell abzubilden. Geplante Abläufe werden in Gesprächen mit dem Programmierer der Steuerung und mit an der Fabrik arbeitenden Studenten aufgenommen. Für Daten, die aufgrund dessen nicht erhoben werden können (DLZ, Geschwindigkeiten etc.), werden zunächst Annahmen getroffen, um sie später einfach durch die tatsächlichen Daten ersetzen zu können.

Geplante Modellnutzung

Die Art der geplanten Modellnutzung ist zum einen die Darstellung des Zustands der LEGO®-Fabrik in Echtzeit und zum anderen die Planung von Systemveränderungen bzw. -optimierungen und die Gewinnung von Informationen über das reale System durch

die ereignisdiskrete Simulation. Der Anwenderkreis werden hauptsächlich Mitarbeiter des pfp sein (Studenten technischer Studiengänge und wissenschaftliche Mitarbeiter), deren Kenntnisse in Bezug auf die Simulation sehr unterschiedlich ist. Aus diesem Grund muss das digitale Modell eine verständliche und benutzerfreundliche Bedienoberfläche aufweisen. Zudem müssen wesentliche Informationen aus der Dokumentation, also dieser Arbeit entnommen werden können.

Lösungsweg und -methode

Weitere Schritte und Meilensteine bei der Erstellung des als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells richten sich nach den Phasen und Phasenergebnissen des erstellten Konzepts (s. Abbildung 3.4) und sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Aufgrund des Umfangs können allerdings nur zwei wesentliche Prozesse exemplarisch beschrieben werden, die die Überprüfung ermöglichen, ob die im Konzept formulierten Anforderungen erfüllt werden können.

Tabelle 4.3: Schritte und Meilensteine im weiteren Vorgehen

Schritt	Ergebnis	Abschnitt
Systemanalyse	Konzeptmodell	4.2.3
Datenbeschaffung	Rohdaten	4.2.4
Datenaufbereitung	Aufbereitete Daten	4.2.5
Modellformalisierung	Formales Modell	4.2.6
Implementierung	Als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell	4.2.7 und 4.2.8
V&V	Verifiziertes und validiertes digitales Modell	4.2.9

Wie in der Zielbeschreibung genannt, ist die einzusetzende Software Tecnomatix Plant Simulation in der Version 14. Da eine Echtzeitkommunikation zwischen der Steuerung der LEGO®-Fabrik und dem in Plant Simulation zu erstellendem Modell aufgebaut werden muss, wird eine Research-Lizenz verwendet, die im Gegensatz zur Studentenlizenz mehr Schnittstellenmodule bereitstellt, wie den Baustein *Socket* zur Datenübertragung auf Basis von TCP/IP (s. Abschnitt 2.1.4).

Anforderungen an Modell und Modellbildung

Allgemeine Anforderungen an das Modell sind zusätzlich zu den anzustrebenden Nutzungsmöglichkeiten zum einen, dass reale Nutzungsdaten im Modus der Zustandsdarstellung in einer Tabelle aufgezeichnet werden (Zeiten und empfangene Daten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik) und nach Excel zur weiteren Analyse exportiert

werden können. Diese Daten stellen den Digitalen Schatten der LEGO®-Fabrik dar und können so ausgewertet und aufbereitet werden, dass sie wieder als Eingangsdaten für das Modell verwendet werden können. Diese Auswertung und Aufbereitung ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die Aufzeichnungs- und Exportfunktionen sollen allerdings implementiert werden. Ebenso sollen für den Simulationsmodus als Vorbereitung für die Auswertung der Simulationsdaten auch die Eintrittszeiten einzelner BEs (Bälle, Container, VB) in einzelne Systembestandteile in einer Tabelle aufgezeichnet werden und nach Excel exportierbar sein, um dort analysiert und ausgewertet werden zu können.

Generell ist es erforderlich, dass ein Datenimport der realen Systemdaten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik (Exceldatenbanken) in das zu erstellende Modell ermöglicht wird sowie ein Datenexport der aufgezeichneten Daten nach Excel und eine Datenkommunikation zwischen dem Digitalen Zwilling und der LEGO®-Fabrik bzw. deren Steuerung, um reale Zustandsdaten im digitalen Modell in Echtzeit empfangen und darstellen zu können. Für letztere ist eine Kommunikation per TCP/IP vorstellbar, da die Kommunikation somit über Wireless-Lan (W-Lan) erfolgen kann (drahtlose Kommunikation) und die Anforderung der Echtzeitfähigkeit erfüllt werden kann. Eine Verbindung zu anderen digitalen Modell ist darüber ebenfalls denkbar, falls dies zu einem späteren Zeitpunkt notwendig werden sollte.

In der Zielbeschreibung ist bereits festgehalten, dass das zu erstellende Modell als Begleiter der LEGO®-Fabrik über deren gesamten Existenzzeitraum ständig angepasst werden muss und somit im Sinne der Nachnutzung weiterverwendet wird. Dies impliziert ebenfalls die Weiterverwendung einzelner Module. Einige dieser Module können ebenfalls wiederverwendet werden, um ähnlich abzubildende Systembestandteile darzustellen. Eine Konkretisierung erfolgt in der Systemanalyse und der Modellformalisierung.

In Tabelle 4.4 werden die Punkte der Aufgabenspezifikation auf Grundlage der Dokumentenstruktur nach Rabe et al. (2008, S. 209) dargestellt.

Tabelle 4.4: Aufgabenspezifikation (Zusammenfassung)

Zielbeschreibung und Aufgabenspezifikation	
Vorgaben zu V&V	<ul style="list-style-type: none"> - Das digitale Modell genügt den gesetzten Anforderungen aus Abbildung 3.3 und aus den einzelnen Phasenbeschreibungen - Das digitale Modell verhält sich hinsichtlich der Prozesse und Durchlaufzeiten wie die LEGO®-Fabrik
Nutzung	Als Assistenzsystem in zwei Modi nutzbar: <ul style="list-style-type: none"> - Zustandsdarstellung in Echtzeit - Simulation zur Durchführung von Experimenten

Fortsetzung **Tabelle 4.4: Aufgabenspezifikation (Zusammenfassung)**

Beschreibung des zu untersuchenden Systems

Untersuchungsgegenstand	LEGO®-Modellfabrik (s. Abschnitt 4.1, besonders Abschnitt 4.1.2)
Detaillierungsgrad	Abbildung auf Modulebene (keine Abbildung des Modulinneren)
Parametervariierbarkeit	Variierbarkeit von Fördergeschwindigkeiten, DLZ, Kapazitäten, Abmessungen (Länge, Breite), Fördergutabständen, Zykluszeiten, Containerankünften und -inhalten; automatische Parametrisierung
Strukturvariierbarkeit	Möglichkeit, die Anordnung von Modulen und Förderbändern ändern zu können vorsehen

Notwendige Informationen und Daten

Notwendige Daten, Datenverwendung sowie Quellen	s. Tabelle 4.2
Datenaktualität und Datenaktualisierung	Datenerhebung an der LEGO®-Fabrik am 19.12.2018 Aktualisierung des Modells bei Änderungen der Struktur, Daten, Steuerung oder nach Umbaumaßnahmen
Fehlende Informationen	Zeitdaten bisher nicht funktionierender Module
Schnittstellen für Daten	Schnittstelle zu Datenbanken (Microsoft Excel) und zur Steuerung

Geplante Modellnutzung

Zeitraum der Nutzung	Nutzung über Existenzzeitraum der LEGO®-Fabrik
Anwenderkreis	Studenten technischer Studiengänge
Art der Modellnutzung	<ul style="list-style-type: none"> - Zustandsdarstellung in Echtzeit - Planung von Systemveränderungen bzw. -optimierungen und Informationsgewinnung durch Simulation

Lösungsweg und -methode

Vorgehensbeschreibung	s. Tabelle 4.3
Einzusetzende Software	Tecnomatix Plant Simulation (Version 14, Research-Lizenz)
Vorgehensweise	Top-Down Modellierung

Anforderungen an Modell und Modellbildung

Allgemeine Vorgaben an das Modell	<ul style="list-style-type: none"> - Aufzeichnung der realen Nutzungsdaten (Digitaler Schatten) sowie der Simulationsdaten mit Exportfunktion nach Excel - Importfunktion der Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik (Excel-Datenbank) - Weiterverwendung des Modells sowie Wieder- und Weiterverwendung einzelner Module
Ein- und Ausgabeschnittstellen	<ul style="list-style-type: none"> - Microsoft Excel - Datenkommunikation zwischen dem Digitalen Modell und der Steuerung der LEGO®-Fabrik über Sockets (TCP/IP)
Ergebnisdarstellung	Tabellen mit Exportmöglichkeit nach Excel zur Analyse, Auswertung und Aufbereitung

4.2.3 Systemanalyse und Konzeptmodell

Nachdem die Aufgabenspezifikation vorliegt, folgen nun die Phasen der Modellbildung und der Datenbeschaffung sowie -aufbereitung deren Ergebnis schließlich das als Digitaler Zwilling nutzbare ereignisdiskrete Simulationsmodell der LEGO®-Fabrik darstellt. Zwischenschritte stellen die Systemanalyse mit dem Konzeptmodell als Phasenergebnis und die Modellformalisierung mit dem formalen Modell als Phasenergebnis dar. Parallel zu den Modellierungsphasen erfolgen die Datenbeschaffung sowie -aufbereitung, die im Nachgang beschrieben werden. Zur Visualisierung des Konzepts sei auf Abbildung 3.4 verwiesen. Im Folgenden wird zunächst die Systemanalyse beschrieben. In dieser Phase werden wesentliche Voraussetzungen für ein zielkonformes und effizientes digitales Modell geschaffen. Es ist festzulegen bzw. zu konkretisieren, welche Elemente der LEGO®-Fabrik auf welche Weise und in welchem Detaillierungsgrad abzubilden sind. Das Ziel ist die Dokumentation der Funktionsweisen, der Eingabe- und Ausgabegrößen, der wesentlichen Elemente einschließlich deren Beziehungen zueinander sowie die Beschreibung von Annahmen und Vereinfachungen. Das dadurch entstehende Konzeptmodell konkretisiert demnach, wie die die Aufgabe zu lösen ist, den Umfang des Modells und den erforderlichen Detaillierungsgrad (vgl. Rabe et al. 2008, S. 47 f.). Da im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht das gesamte zu erstellende Modell mit seinen Detailabläufen beschrieben werden kann, wird sich nach der Beschreibung, wie einzelne Systembestandteile im digitalen Modell abgebildet werden sollen, auf zwei exemplarische Prozesse beschränkt. Die folgenden Beschreibungen basieren auf Abbildung 4.8, die auf Abbildung 4.5 aufbaut und Module bzw. Teilsysteme darstellt, die im Modell aufgrund ähnlicher Eigenschaften auf die gleiche Weise abgebildet werden sollen. Damit soll der wichtigen Anforderung nachgekommen werden, anpassbare Module / Teilsysteme innerhalb des Modells zu nutzen, um Wandlungsfähigkeit, Adaptierbarkeit sowie Wieder- und Weiterverwendung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 3.4). Aufgrund des Umfangs der Beschreibungen können die Darstellungen in den folgenden Phasen nicht mehr anhand eines jeden Punktes in der Dokumentenstruktur nach Rabe et al. (2008) (s. Anhang I) erfolgen. Trotzdem werden die notwendigen Punkte beachtet und die Beschreibungen aus der Aufgabenspezifikation aufgegriffen.

Grundsätzlich wird in Abbildung 4.8 dargestellt, welche Bausteine das zu erstellende Modell enthalten soll. Systembestandteile, die gleichfarbig dargestellt sind, sollen im zu erstellenden Modell durch gleiche Bausteine abgebildet werden, um den Anforderungen der Verwendung von einfach anpassbaren Modulen gerecht zu werden, die zudem weiter- und wiederverwendbar sind. Die Sensoren sind lediglich zur Information dargestellt und sollen nicht als Baustein im Modell abgebildet werden. Auch der sogenannte Lifter, der in

der LEGO®-Fabrik auf dem Förderband (Band in Produktion) installiert ist und den Container auskippt, soll im Modell nicht konkret dargestellt werden.

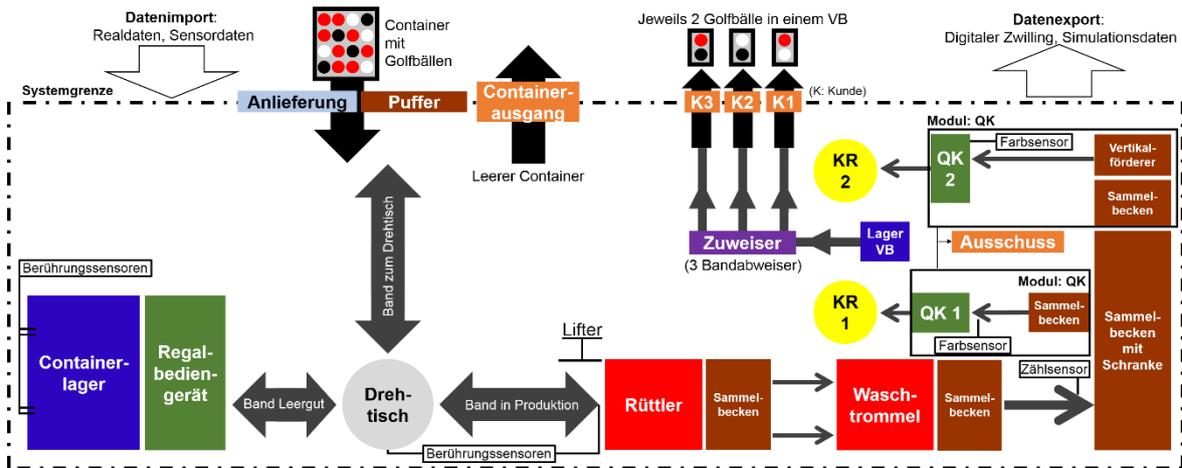


Abbildung 4.8: Systemstruktur der LEGO®-Fabrik (eigene Darstellung)

Zunächst werden im Folgenden gleichartig zu modellierende Module bzw. Systembestandteile mit ihren Attributen unter Verwendung von Elementen aus der Entity-Relationship-Modellierung (vgl. bspw. Chen 1977) dargestellt und beschrieben. Dabei werden einer Entität (Einheit; in dem Fall der gewünschte Modellbaustein für die entsprechenden Systembestandteile) die Attribute zugeordnet, die als Daten eingegeben werden müssen und parametrisierbar sein müssen, um das jeweilige Systembestandteil im Modell mit den zu interessierenden Größen abbilden zu können (bzgl. des Begriffs „Attribut“ s. Abschnitt 2.1.3). Dabei ist wichtig zu beachten, dass sich die hier dargestellten Attribute nur auf solche Daten beziehen, die zu parametrisieren sind. Weitere abfragbare Attribute (wie bspw. die Anzahl an enthaltenen BEs) sind zwar wichtig für die Funktionalität des Modells, werden hier aber nicht dargestellt. Diese Darstellung verdeutlicht außerdem den Detaillierungsgrad, in denen die jeweiligen Systembestandteile abgebildet werden sollen. Da in der Aufgabenspezifikation eine automatische Parametrisierung aus dem Informationssystem und eine Aufzeichnung der BE-Eintritte in die Module gefordert wurde, wird im Folgenden außerdem dargestellt, welche Daten automatisch parametrisiert werden sollen und welche zwecks Aufzeichnung, Darstellung im Modell oder für die Steuerung ausgegeben oder abgefragt werden sollen. Dazu wird der jeweilige Datentyp genannt.

4.2.3.1 Abbildung der einzelnen Systembestandteile im zu erstellenden Modell

Lager

Die Lager in der LEGO®-Fabrik (Containerlager, Lager VB) sollen im Modell auf die gleiche Weise abgebildet werden, da sie BEs (Container, VB) auf definierten, adressierbaren Plätzen lagern und über das Attribut *Kapazität* verfügen sollen. Die Kapazität muss dabei mindestens zweidimensional definierbar sein. Darüber hinaus muss der Baustein über eine eindeutige *Objektbezeichnung* identifizierbar und adressierbar sein (s. Abbildung 4.9). Dies gilt auch für alle anderen Bausteine und wird deshalb im Folgenden nicht mehr zusätzlich genannt. Prozesse innerhalb des Lagers sind nicht weiter von Interesse, außer, dass die Möglichkeit bestehen muss, abzufragen, welcher Platz belegt ist und welcher nicht. Neben der Platzbelegung sollen die Eintrittszeiten der BEs in das Containerlager aufgezeichnet werden. Letzteres ist für das Lager VB nicht notwendig. Aus dem Informationssystem automatisch parametrisiert werden sollen die Kapazität in x-, y- und z-Richtung.

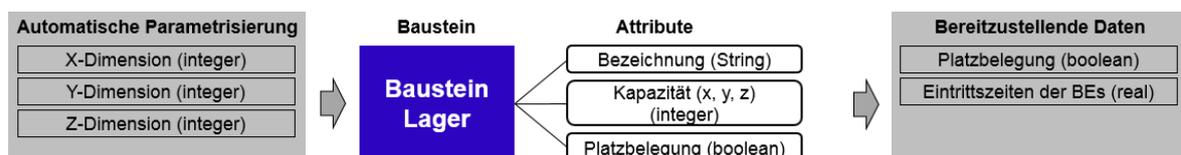


Abbildung 4.9: Baustein Lager

Einzelstationen

Ein Regalbediengerät und eine QK ähneln sich auf den ersten Blick nicht besonders. In diesem Fall können diese Systembestandteile jedoch gleich modelliert werden, da sie zum einen einzelne BEs handhaben (einen einzelnen Container oder einen einzelnen Ball) und zum anderen die Möglichkeit bieten müssen, für verschiedene BEs *individuelle Bearbeitungszeiten* abzubilden (s. Abbildung 4.10). Bei dem Regalbediengerät hängt die Durchlaufzeit eines Containers davon ab, in welchen Platz des Containerlagers eingelagert bzw. aus welchem ausgelagert wird. Bei QK 2 hängt die Zeit für die Weitergabe eines Balles davon ab, ob der Ball als „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“ geprüft wurde. Bei QK 1 gibt es dafür keinen Unterschied. Was in diesem Baustein passiert, ist für das zu erstellende Modell nicht von Interesse. Es muss lediglich ein einzelnes BE über eine gewisse, spezifische Zeit auf dem Baustein verweilen und dann an den richtigen von zwei Nachfolgern weitergegeben werden. Beim Regalbediengerät ist der Nachfolger beim Einlagern das Containerlager, beim Auslagern das Band Leergut. Bei der QK wird das BE entweder an die Rutsche zwischen QK und KR weitergegeben (Fall „in Ordnung“) oder an Ausschuss (Fall „nicht in Ordnung“).

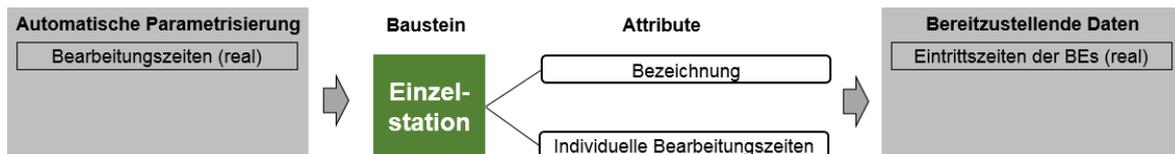


Abbildung 4.10: Baustein Einzelstation

Förderstrecken

In der LEGO®-Fabrik finden sich eine Reihe unterschiedlicher Förderstrecken. Teilweise sind diese angetrieben und fördern Container, VB oder einzelne Bälle, teilweise arbeiten sie mithilfe von Schwerkraft (Rutschen). In dem Modell sollen alle Förderstrecken mit dem gleichen Baustein dargestellt werden, um auch hier der Anforderung der Nutzung genereller Module mit spezifischer Parametrisierung gerecht zu werden. Dabei soll die Förderstrecke folgende Attribute besitzen, die parametrisierbar sein müssen und aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik automatisch parametrisiert werden können: Geschwindigkeit, Länge, Breite, Fördergutabstand und Kapazität. Bei den Förderstrecken ist es wesentlich, dass im zu erstellenden Modell abgebildet wird, an welcher Position sich die BEs auf der Förderstrecke befinden. Nur so kann der aktuelle Zustand nachvollzogen werden. Ein höherer Detaillierungsgrad ist nicht erforderlich. Auch der Baustein Förderstrecke soll im Modell die Möglichkeit bieten, Eintrittszeiten der BEs ausgeben zu können (s. Abbildung 4.11).

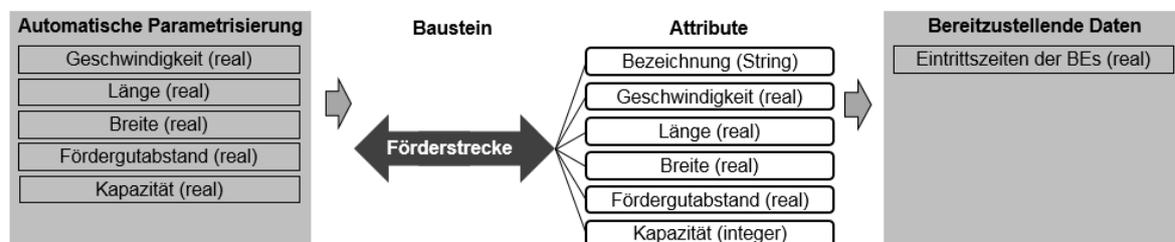


Abbildung 4.11: Baustein Förderstrecke

Drehtisch

Der Drehtisch soll im Modell über einen gesonderten Baustein dargestellt werden, da die Zustandsdarstellung hier wichtig ist, um nachvollziehen zu können, wie die Drehung und Weiterförderung eines Containers erfolgt. Dabei muss der Baustein Drehtisch über die Attribute Geschwindigkeit, Länge, Breite und Zeit für 90°-Drehung verfügen. Diese Attribute sollen außerdem automatisch aus dem Informationssystem parametrisiert werden können. Auch in diesem Fall sollen die Eintrittszeiten der BEs (hier nur Container) aufgezeichnet werden (s. Abbildung 4.12)

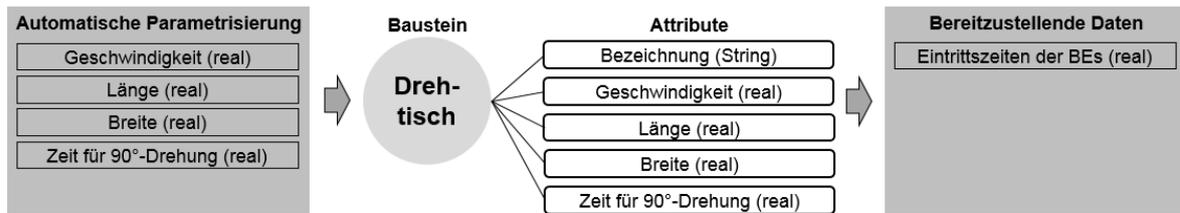


Abbildung 4.12: Baustein Drehtisch

Bearbeitungsstationen

In dem Rüttler und der Waschtrommel werden die Bälle gesammelt bearbeitet. Hier erfolgt keine Einzelförderung, sondern eine Parallelbearbeitung. Die Bälle treten in die Station ein, werden dort für eine gewisse Zeit bearbeitet und treten dann wieder aus. Was genau innerhalb der Stationen geschieht ist nicht von Interesse. Bei der Bearbeitungszeit ist hier zu beachten, dass die Bälle unterschiedlich lang brauchen, um die Stationen zu passieren. Dies liegt daran, dass sie nicht geführt gefördert werden, sondern unterschiedliche Wege durch die Module nehmen können und sich dabei gegenseitig anstoßen. Es wird deshalb unterstellt, dass für die Verweildauer eine Normalverteilung zugrunde liegt, weshalb der Mittelwert der Bearbeitungszeit sowie die Standardabweichung parametrisierbar sein müssen und die Bearbeitungszeit in Form einer Normalverteilung ein notwendiges Attribut dieses Bausteins darstellt. Da in dem Rüttler sowie in der Waschtrommel mehrere Bälle gleichzeitig bearbeitet werden, ist die Kapazität ein weiteres Attribut, das notwendig ist um diese Systembestandteile abzubilden. Dabei sind die mögliche Anzahl an Bällen in horizontaler Richtung (X-Dimension) sowie in vertikaler Richtung (Y-Dimension) als Parameter für diesen Baustein einzulesen. Auch hier sollen die Eintrittszeiten der Golfbälle aufgezeichnet werden (s. Abbildung 4.13).

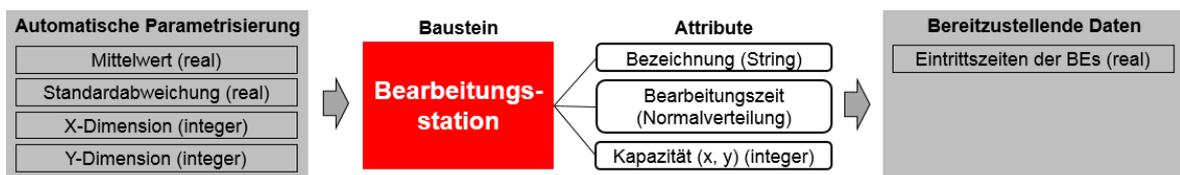


Abbildung 4.13: Baustein Bearbeitungsstation

Sammelbecken / Puffer

Die in der LEGO®-Fabrik enthaltenen Sammelbecken bzw. Puffer sollen im zu erstellenden Modell auf die gleiche Weise dargestellt werden. Sie sollen eine zu definierende Anzahl an BEs für eine bestimmte Zeit aufnehmen können und somit als Puffer dienen, bevor die BEs in die nächste Station übergehen. Der Baustein muss dafür über eine bestimmte Kapazität verfügen und seinen Füllstand anzeigen können. Auch der Vertikalförderer vor der QK 2 soll mit diesem Baustein dargestellt werden. Dieser kann in bestimmten Abständen Bälle

aufnehmen und fördert diese nach oben, wo er sie schließlich an eine Förderstrecke weitergibt. Dabei kann er mehrere Bälle auf einmal aufnehmen, die aber alle die gleiche Zeit für das Durchlaufen des Vertikalförderers benötigen. Die Aufnahme in bestimmten Abständen soll über das Attribut Zykluszeit abgebildet werden, die diesen Baustein nur zu bestimmten Zeitpunkten für den Eintritt von BEs öffnet. Bei den anderen Sammelbecken ist diese Zykluszeit entsprechend 0, da immer Bälle eintreten können. Was genau innerhalb des Sammelbeckens passiert, ist nicht von Bedeutung, außer, dass die Belegung, also der Füllstand angezeigt werden kann. Auch hier sollen die Eintrittszeiten der BEs ausgegeben werden (s. Abbildung 4.14).

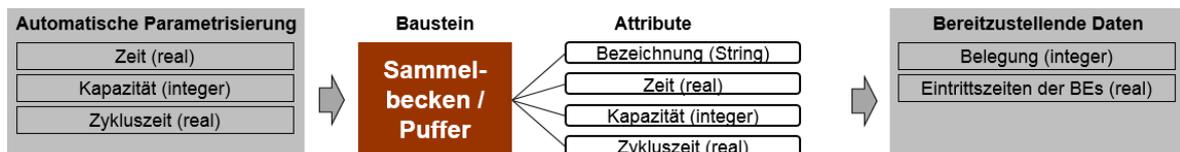


Abbildung 4.14: Baustein Sammelbecken / Puffer

Kommissionierroboter (KR)

Die beiden KR stellen besondere Systembestandteile innerhalb der LEGO®-Fabrik dar, da sie in der geforderten Anschaulichkeit (Abbildung der Drehung sowie Abgabe und Aufnahme von BEs) kaum über die bisher dargestellten Bausteine darstellbar wären. Sie müssen eine bestimmte Anzahl an Bällen aufnehmen können (2 Bälle auf einmal) und diese nach einer Drehung in einen Verkaufsbehälter ablegen. Dieser Vorgang soll insofern sichtbar sein, als dass die aufgenommenen Bälle angezeigt werden, die Drehung und die Abgabe der Bälle. Aus diesen Gründen wird für die Abbildung ein extra Baustein verwendet. Eine automatische Parametrisierung der Zeit für die 90°-Drehung (inklusive Aufnahme und Abgabe der Bälle) ist wünschenswert. Auch hier sollen die Eintrittszeiten der BEs bereitgestellt werden sowie die Belegung sichtbar sein (s. Abbildung 4.15).



Abbildung 4.15: Baustein Kommissionierroboter

Bandabweiser

Um die gefüllten VB den richtigen Plätzen zur Lieferung an die Kunden 1 bis 3 zuzuordnen, wird eine Zuweisung benötigt, in Abbildung 4.8 „Zuweiser“ genannt. Dieser soll im Modell über drei Bandabweiser dargestellt werden, die den VB auf die jeweilige Rutsche weiterleiten. Soll der VB bspw. zu Kunde 3 gelangen, passiert der VB die Bandabweiser 1 und 2 und wird von Bandabweiser 3 auf die entsprechende Rutsche gelenkt. Für die

Bandabweiser sollen Länge und Breite bestimmbar sein sowie die Fördergeschwindigkeit. Mittels einer Liste soll parametrisiert werden können, in welche Richtung das spezifische BE weitergegeben wird, abhängig von dessen Eigenschaft (Weitergabeliste). Hier müssen keine Daten zur Verfügung gestellt werden, da die Erfassung der BE-Eintrittszeit an den jeweils nachfolgenden Bausteinen für Analysen genügt (s. Abbildung 4.16)

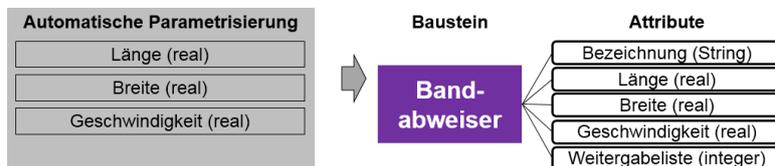


Abbildung 4.16: Baustein Bandabweiser

Systemgrenze, Quelle und Senken

Die Systemgrenze stellt den Übergang zur Umwelt des Modells dar und ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Wie in der Aufgabenspezifikation festgelegt, soll kein An- oder Ablieferungsfahrzeug dargestellt werden. Über die Systemgrenzen tritt daher ein mit Golfbällen gefüllter Container ein, der auf das Band zum Drehtisch gelangt. Austritte über die Systemgrenze sind leere Container, die das Band zum Drehtisch in umgekehrter Richtung nach Auslagerung verlassen und die gefüllten VB. Die Schnittstellen nach außen sollen über eine *Quelle* (für den Eingang im Simulationsmodus) und *Senken* (für den Ausgang) dargestellt werden. Die Quelle („Anlieferung“ in Abbildung 4.8) soll, falls der Simulationsmodus ausgewählt ist, in durch den Nutzer festlegbaren Abständen Container mit Bällen erzeugen, was die Ankunft eines LKWs simuliert. Im Modus der Zustandsdarstellung soll diese Quelle nicht genutzt werden, da wirklich nur in der realen Fabrik registrierte Ankünfte dargestellt werden sollen. Senken sind in Abbildung 4.8 orange dargestellt. Sie nehmen BEs auf, die aus dem System austreten. In dem Modell sollen fünf Senken abgebildet werden: Für den Austritt eines leeren Containers (Containerausgang), drei Senken für den Austritt von VBs an den jeweiligen Kunden (K1, K2, K3) und für als „nicht in Ordnung“ identifizierte Bälle (Ausschuss). Bei letzterem wird davon ausgegangen, dass diese Bälle das System verlassen, um vernichtet oder recycelt zu werden und daher nicht weiter betrachtet werden müssen

BEs

Für das zu erstellende Modell sind drei Arten von BEs erforderlich, um die zu bearbeitenden und zu fördernden Systembestandteile der LEGO®-Fabrik darzustellen: Container, VB und Golfball. Der Container muss in seiner Länge, Breite und Höhe sowie in der X-, Y- und Z-Dimension (für die Kapazität an Bällen) parametrisierbar sein. Wichtige Daten, die er bereitstellen muss sind drei Attribute vom Datentyp boolean, die den Wert true oder false

annehmen können: „einlagern“, „rückwärtsausfahren“ und „leer“ (s. Abbildung 4.17). Diese Attribute sind für die Steuerung des Drehtisches (in welche Richtung der Container befördert werden soll) und die Förderrichtung der Förderbänder wesentlich.

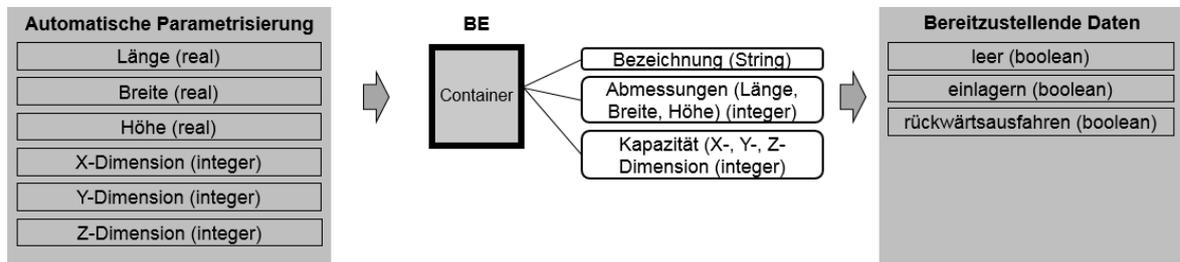


Abbildung 4.17: BE Container

Ein Golfball soll über ein zu definierendes BE Golfball im Modell generell abgebildet werden und in seiner Größe (Länge, Breite, Höhe) parametrisierbar sein. Darüber hinaus soll der Golfball über die Attribute „iO“ und „QK2“ vom Datentyp boolean verfügen, die er für die Steuerung in der LEGO®-Fabrik zur Verfügung stellen muss. Ist iO=true, so ist der Golfball in Ordnung und kein Ausschuss und wird in den QKs entsprechend identifiziert. Das Attribut QK2 ist notwendig, um dem Sammelbecken mit Schranke mitzuteilen, ob der Golfball zu QK1 (QK2=false) oder zu QK2 (QK2=true) weiterzuleiten ist. Eine Prozessbeschreibung erfolgt weiter unten. Der generelle Golfball soll seine Attribute an die BEs Golfball_weiß, Golfball_rot und Golfball_schwarz vererben (s. Abbildung 4.18), die im Modell zu definieren sind, da in der LEGO®-Modellfabrik weiße, rote und schwarze Golfbälle zum Einsatz kommen und diese mit ihren Farben im zu erstellenden Modell abgebildet werden sollen. Eine Änderung der Abmaße des generellen Golfballs soll somit auch eine Änderung in den spezifischen Golfbällen zur Folge haben.

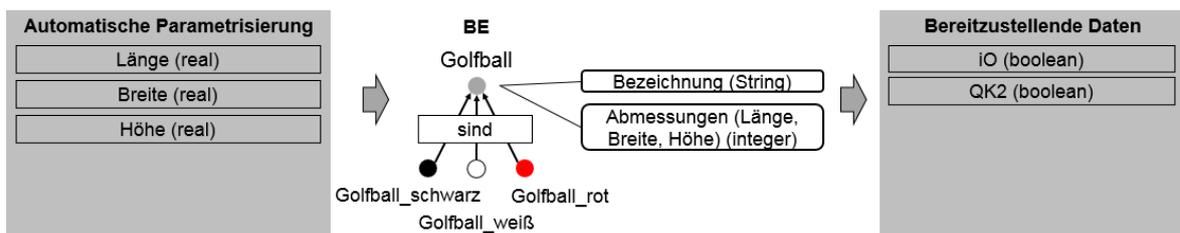


Abbildung 4.18: BE Golfball

Ein VB soll über ein zu definierendes BE im Modell dargestellt werden, das dem des Containers sehr ähnelt. Auch hier müssen die Abmaße (Länge, Breite, Höhe) sowie die Kapazität (X-, Y- und Z-Dimension) parametrisierbar sein. Lediglich durch das Attribut, das das BE VB für die Steuerung bereitstellen soll, unterscheidet es sich vom BE Container. Für den VB ist nur das Attribut „Kunde“ (Datentyp Integer) anzulegen, damit die

Bandabweiser den jeweiligen VB entsprechend des Zielkunden (1-3) weiterleiten können (s. Abbildung 4.19).

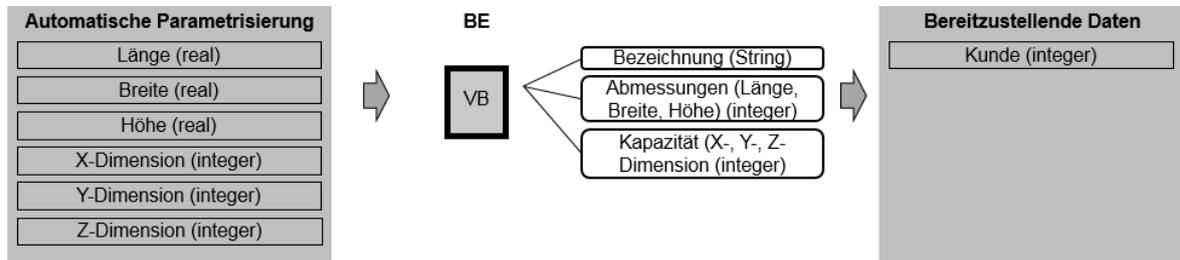


Abbildung 4.19: BE Verkaufsbehälter

Teilsystem QK

Mit den beschriebenen Bausteinen soll das zu erstellende Modell der im Konzept formulierten Anforderung gerecht werden, dass anpassbare Module definiert werden, die für die Darstellung mehrerer Systembestandteile genutzt werden können. Durch die einfache Parametrisierung können diese Module weiterverwendet werden, falls sich Änderungen des realen Systems ergeben (bspw. Geschwindigkeiten etc.). Auch können die Bausteine wiederverwendet werden, falls neue Module hinzukommen. Um dies noch zu erweitern, kann nach der Analyse weiterer Gemeinsamkeiten festgestellt werden, dass die beiden QKs jeweils aus den Bausteinen Sammelbecken / Puffer, Einzelstation und Förderstrecken bestehen. Sie unterscheiden sich dabei leicht, da in QK 2 ein Vertikalförderer enthalten ist, der in QK 1 nicht vorhanden ist. Trotz dieser Unterscheidung ist es sinnvoll, für das zu erstellende Modell ein Teilsystem „Qualitätskontrolle“ zu definieren, das dann für QK1 und QK2 lediglich angepasst werden muss (s. schwarze Rahmen in Abbildung 4.8 mit der Bezeichnung „Modul: QK“). Dieses Teilsystem kann die bereits aufgeführten Bausteine verwenden und soll demnach ein Sammelbecken als Puffer für die ankommenden Bälle, ein Sammelbecken zur Darstellung des Vertikalförderers (das für QK 1 dann entsprechend gelöscht werden kann), eine Förderstrecke und eine Einzelstation enthalten. Sollte in Zukunft eine weitere QK hinzukommen, kann dieses Teilsystem zur schnelleren Implementierung wiederverwendet werden.

4.2.3.2 Ein- und Ausgabedaten im Modell, Informationssystem der LEGO®-Fabrik und automatische Parametrisierung

Um eine automatische Parametrisierung im Modell gewährleisten zu können, indem den oben genannten Bausteine automatisch die realen Parameter aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik zugewiesen werden, müssen die Daten im Modell zur Verfügung stehen. Die dafür notwendige Schnittstelle zum Übernehmen dieser Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik wird weiter unten erklärt. Um die Daten auch im

Modell einsehen zu können und die Parametrisierung zu erlauben, sollen sechs verschiedene Tabellen definiert werden. Diese sechs Tabellen richten sich nach den Arbeitsmappen des Excel-Informationssystems der LEGO®-Fabrik. Dieses ist wie folgt definiert und in Anhang IV – Dateien zu finden. Systembestandteile mit ähnlichen Daten bzw. Attributen sind gemeinsam in einer Arbeitsmappe definiert: Daten_Module (Regalbediengerät, Rüttler, Waschtrommel, QK 1, QK 2), Daten_FB (alle Förderstrecken), Daten Puffer (alle Sammelbecken / Puffer), Daten BEs (alle BEs), Daten_Läger (Containerlager und Lager VB) sowie Daten_Sonstige (Bandabweiser, Drehtisch, KR und außerdem die Zeitdaten des Lifters, der den Container mit den Bällen auskippt). Die Erhebung und Aufbereitung dieser Daten wird in Abschnitt 4.2.4 beschrieben. Um die Daten aus dem Informationssystem in das Modell übernehmen zu können, muss der Aufbau der Tabellen im Modell mit dem der Arbeitsmappen des Informationssystems übereinstimmen (für den Aufbau s. Abschnitt 4.2.4). Auch die Tabellenbezeichnung soll gleich sein wie die der jeweiligen Arbeitsmappe. Mithilfe einer Steuerung im Modell soll es ermöglicht werden, dass die Daten zum einen aus dem Informationssystem in die Tabellen im Modell übernommen werden und aus den Tabellen schließlich die spezifischen Bausteine automatisch, Zeile für Zeile (also Baustein für Baustein) und Attribut für Attribut, parametrisiert werden können. Werden also Daten im Informationssystem aktualisiert, können diese in das Modell importiert werden und dort den Systembestandteilen zugewiesen werden. Damit soll die einfache Parametrisierbarkeit gewährleistet werden.

Um nach einem Modelldurchlauf im Simulationsmodus Daten zur Analyse und Auswertung zur Verfügung zu haben, sollen die einzelnen Systembestandteile die Eintritte der BEs in einer Tabelle aufzeichnen, die zur Bearbeitung nach Excel exportiert werden kann. Dabei sollen in den Zeilen die spezifischen BEs und in den Spalten die Systembestandteile aufgeführt werden. In einer Zeile stehen so schließlich die Zeiten des Eintritts eines individuellen BEs in die einzelnen Systembestandteile. Damit können in einer späteren Auswertung alle möglichen Zeiten und Wege der BEs analysiert werden. Die Bereitstellung dieser Daten wird mit dieser Arbeit gewährleistet. Die Auswertung und Analyse wird damit ermöglicht, wird aber hier nicht weiter behandelt, da es nicht Fokus der Arbeit ist.

Um auch Daten im Sinne des Digitalen Schattens aufzeichnen und zur Verfügung stellen zu können, soll bei Nutzung im Modus der Zustandsdarstellung eine Tabelle mit Daten gefüllt werden (Tabellenbezeichnung: Digitaler Schatten). Dabei soll immer eine neue Zeile angelegt werden, wenn eine Nachricht aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik empfangen wird (die Datenkommunikation wird weiter unten beschrieben). In dieser Zeile wird die entsprechende Nachricht dargestellt sowie der Zeitpunkt des Eintreffens. So kann in einer späteren Auswertung analysiert werden, wie sich die Dauer zwischen einzelnen

Nachrichten, also Zuständen im realen System verhält um daher bspw. auf verschiedene Datenmuster schließen zu können, die bei bestimmten Zuständen auftreten. Sind bspw. größere Zeitlücken zwischen den erkannten Bällen als üblich, kann davon ausgegangen werden, dass die Bälle nicht richtig vom Förderband aufgegebelt werden. Für eine einfachere Auswertungsmöglichkeit (wird in dieser Arbeit nicht behandelt) soll auch diese Tabelle nach Excel exportiert werden können.

Schnittstellen und Kommunikation

Für den Datenaustausch und die Kommunikation zwischen der LEGO®-Fabrik und dem digitalen Modell müssen gewisse Schnittstellen zur Verfügung stehen. Zum einen eine Schnittstelle zum Einlesen von Daten aus Excel-Dateien und zum Datenexport nach Excel, zum anderen eine Möglichkeit der Kommunikation mit der Steuerung der LEGO®-Fabrik (leJOS, basierend auf Java). Über die Excel-Schnittstelle soll eine Datenübernahme und damit -aktualisierung aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik sowie ein Export aufgezeichneter Daten zur Auswertung und Analyse erfolgen. Zum Empfangen von Nachrichten aus der Fabriksteuerung ist eine Kommunikation auf Basis eines Sockets (s. Abschnitt 2.1.4) vorgesehen. Auf diese Weise können bei definierten Zuständen Strings (Zeichenketten) an das digitale Modell gesendet werden, die dort anhand einer Methode verarbeitet und interpretiert werden. Welche Nachrichten empfangen werden sollen, soll anhand des implementierten Teils der LEGO®-Fabrik dargestellt werden.

4.2.3.3 Exemplarische Prozessbeschreibung

Aufgrund des Umfangs der Arbeit kann ab dieser Stelle die Dokumentation nicht im Detail erfolgen und für alle Prozesse der Fabrik erfolgen. Es wird daher nicht weiter auf den Simulationsmodus eingegangen, da dieser zwar möglich sein soll, aber für diese Arbeit nicht weiter von Bedeutung ist. Die Datenkommunikation und Zustandsdarstellung in Echtzeit stehen im Fokus. Daher werden exemplarisch zwei Teilprozess dargestellt, die bisher auch in der realen Fabrik implementiert sind. **Prozess 1** ist dabei die Containerankunft bis zur Förderung der Bälle in die Waschtrommel (s. Abbildung 4.8). Da das Containerlager noch nicht funktioniert, kann die Containereinlagerung und -auslagerung hier nicht berücksichtigt werden. **Prozess 2** bezieht sich auf das Teilsystem QK 1 und stellt den Ablauf ab Eintritt eines Balls in das Teilsystem (also in das Sammelbecken vor QK 1) bis zum Austritt der sortierten Bälle aus QK 1 dar. Der Grund für die Darstellung dieser Prozesse ist, dass sie bereits im Echtssystem implementiert sind und somit das Modell daraufhin verifiziert und validiert werden kann. Außerdem kann anhand dieser Prozesse exemplarisch verdeutlicht werden, wie die Abbildung von Abläufen im

digitalen Modell erfolgt und wie Nachrichten aus dem realen System zur Abbildung des Zustands verarbeitet werden sollen.

Prozess 1

Empfängt das Modell die Nachricht, dass im realen System ein Container eintrifft, muss im Modell ein Container erzeugt und mit Golfbällen befüllt werden. Mit wie vielen und welcher Art von Bällen der Container befüllt werden soll, soll anhand einer Tabelle festgelegt werden können. Nach Erzeugung und Befüllung wird der Container direkt zum Drehtisch befördert, wo er auf die Nachricht wartet, dass der Sensor am Drehtisch gedrückt wurde. Erst wenn diese Nachricht empfangen wurde, dreht sich der Drehtisch und befördert den Container auf das Band in die Produktion, an dessen Ende der Lifter angebracht ist. Dort wartet der Container im Modell und wartet auf die Nachricht, dass der Sensor am Lifter betätigt wurde. Sobald dies der Fall ist, beginnt der Auskippvorgang und die Bälle werden in den Rüttler befördert und von dort aus weiter zu den Förderbändern in die Waschtrommel, die zunächst stillstehen. Im realen System werden das Förderband zur Rückförderung des Containers zum Drehtisch, die Förderbänder in die Waschtrommel, die Waschtrommel und die nachfolgenden Systembestandteile erst eingeschaltet, wenn der Container sobald abgelassen wurde. Daher wartet das Modell auf die Nachricht, dass der Auskippvorgang beendet ist und fördert daraufhin zum einen den Container wieder zum Drehtisch und zum anderen die Bälle weiter zu den nachfolgenden Systembestandteilen.

Prozess 2

Durch Eintreten in das Sammelbecken vor QK 1 treten die Bälle in das Teilsystem QK 1 ein. Dort werden sie einzeln von einem Förderband aufgegabelt. Dieses Förderband enthält ein Farbsensor, der die Ballfarbe erkennt. Wie auch bei dem Zählsensor werden ankommende Bälle bei diesem Sensor im Modell gelöscht, da zuvor im Modell nicht festgestellt werden kann, welche Ballfarbe vorliegt. Die erkannte Farbe und der Zustand des Balls (also zum Beispiel „weiß“ und „in Ordnung“ oder „schwarz“ und „nicht in Ordnung“) soll als Nachricht aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell gesendet werden. Entsprechend der empfangenen Nachricht wird auch hier am Sensor der entsprechende Ball erzeugt, wobei dessen Attribut „iO“ (s. Abbildung 4.18) entweder auf *true* oder *false* gesetzt wird. Im realen Modell wird der Ball je nach erkanntem Zustand zum Ausschuss (Fall: „nicht in Ordnung“) oder weiter auf eine Rutsche zum KR (Fall: „in Ordnung“) befördert. Im digitalen Modell wird im Baustein QK 1 das Ballattribut iO ausgelesen, aufgrund dessen die Weitergabe bestimmt wird. Ist $iO=false$, wird der Ball in den Ausschuss weitergeleitet. Ist $iO=true$, wird er auf die Rutsche zum KR weitergeleitet.

4.2.3.4 Modelldaten

Ebenfalls Teil der Phase Systemanalyse sind Datentabellen, die erforderliche Attribute, den zugehörigen Datentyp (s. Anhang II – Datentypen), Einheiten und die Verwendung darstellen. Diese Daten ergeben sich aus den in diesem Abschnitt beschriebenen Baueintributen (s. Abbildung 4.9 bis Abbildung 4.19), der Kommunikation zwischen digitalem Modell und der LEGO®-Fabrik und dem Datenimport sowie -export. Die Daten werden nach Eingabedaten (s. Tabelle 4.5) und Ausgabedaten (s. Tabelle 4.6) dargestellt. Die jeweiligen Einheiten orientieren sich an branchenüblichen Einheiten, damit keine Umrechnung erfolgen muss und die Parametrisierung vereinfacht wird.

Tabelle 4.5: Datentabelle Eingabedaten

Attribut	Datentyp	Einheit	Verwendung
Empfangene Nachricht	String		Interpretation und Verarbeitung der Nachricht, um den Zustand des realen Systems darzustellen
Durchlaufzeit	real	Sekunden (s)	Parametrisierung der Bausteine Sammelbecken, Einzelstation
Länge	real	Meter (m)	Parametrisierung der Bausteine Förderstrecke, Bandabweiser, Drehtisch, BEs
Breite	real	Meter (m)	Parametrisierung der Bausteine Förderstrecke, Bandabweiser, Drehtisch, BEs
Höhe	real	Meter (m)	Parametrisierung der BE-Bausteine
Fördergutabstand	real	Meter (m)	Parametrisierung des Bausteins Förderstrecke
Kapazität	integer	Stück (Stk)	Parametrisierung der Bausteine Förderstrecke und Sammelbecken/Puffer
X-Dimension	integer	Stück (Stk)	Parametrisierung der Bausteine Bearbeitungsstation, Lager und der BEs Container und VB
Y-Dimension	integer	Stück (Stk)	Parametrisierung der Bausteine Bearbeitungsstation, Lager und der BEs Container und VB
Z-Dimension	integer	Stück (Stk)	Parametrisierung des Bausteins Lager und der BEs Container, VB
Geschwindigkeit	real	Meter pro Sekunde (m/s)	Parametrisierung der Bausteine Förderstrecke, Drehtisch und Bandabweiser

Fortsetzung **Tabelle 4.5:** Datentabelle Eingabedaten

Attribut	Datentyp	Einheit	Verwendung
Mittelwert DLZ	real	Sekunden (s)	Parametrisierung des Bausteins Bearbeitungsstation
Standardabweichung	real	Sekunden (s)	Parametrisierung des Bausteins Bearbeitungsstation
Zeit für 90°-Drehung	real	Sekunden (s)	Parametrisierung der Bausteine Drehtisch und KR
Zykluszeit	real	Sekunden (s)	Parametrisierung des Bausteins Sammelbecken / Puffer
Datentabelle (Datenimport)	table		Excel-Datenimport aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik mit den enthaltenen Daten für die Parametrisierungen

Tabelle 4.6: Datentabelle Ausgabedaten

Attribut	Datentyp	Einheit	Verwendung
Datenexport Simulationszeiten	table	Sekunden (s)	Aufzeichnung der Eintrittszeiten der BEs in die einzelnen Systembestandteile (Zeilen: BEs, Spalten: Systembestandteile)
Datenexport Digitaler Schatten	table	Sekunden (s)	Aufzeichnung der Nachrichten von der Steuerung der LEGO®-Fabrik in einer Tabelle mit den Zeiten
Erkannte Bälle	integer	Menge (Stk)	Aufzeichnung der Ballanzahl, die am Zählsensor erkannt wurden
Tabelle Ballprüfung	table	Menge (Stk)	Aufzeichnung der Ballanzahl, die an den Farbsensoren als iO oder niO erkannt wurden

Mit Vorliegen der Aufgabenspezifikation und des Konzeptmodells steht konkret fest, welche Daten aufgenommen werden müssen (Rohdaten) und wie diese aufzuarbeiten sind, um in dem zu erstellenden Modell genutzt werden zu können (Datenaufbereitung). Mit der exemplarischen Darstellung zweier wesentlicher, aufeinanderfolgender Prozesse in der Systemanalyse kann das Konzeptmodell formalisiert und schließlich implementiert werden.

4.2.4 Datenbeschaffung und Rohdaten

Die Phasen der Datenbeschaffung und der Datenaufbereitung mit den Phasenergebnissen Rohdaten und aufbereitete Daten stellen zwei getrennte Phasen und Phasenergebnisse im Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) und demnach auch in dem erstellten Konzept dar. In diesem Abschnitt wird zunächst die Phase der Datenbeschaffung beschrieben.

In der Aufgabenspezifikation ist dokumentiert, welche Daten aus welchen Quellen zu erheben sind (Tabelle 4.2). Das Konzeptmodell stellt eine Konkretisierung der zu erhebenden Daten dar, deren Aufnahme im Folgenden auf Grundlage der Tabelle 4.5 beschreiben wird. Da das Informationssystem der LEGO®-Fabrik, das mit dem digitalen Modell verbunden werden soll, noch nicht mit Daten gefüllt ist, werden die aufgenommenen und aufbereiteten Daten dort eingefügt. Wie in Abschnitt 4.2.3 beschrieben, sollen die Daten im Informationssystem in Arbeitsmappen mit gleichartigen Systembestandteilen zusammengefasst werden. Aus diesem Grund müssen die Daten für die Darstellung in diesen Arbeitsmappen aufbereitet werden (s. Abschnitt 4.2.5).

Aufnahme der Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) und des Fördergutabstands

Zunächst müssen die Abmessungen der einzelnen Systembestandteile aufgenommen werden. Dies erfolgt, indem die einzelnen Systembestandteile der LEGO®-Fabrik mit einem Lineal gemessen werden und die Länge und Breite in Metern dokumentiert werden. Mithilfe der Länge und Breite soll der Platzbedarf der LEGO®-Fabrik digital dargestellt werden. Dabei spielt die Höhe keine Rolle, da das Labor, in dem die Fabrik steht, hoch genug ist, dass davon ausgegangen werden kann, dass kein Bauteil die Decke erreichen wird. Lediglich für die BEs soll auch die Höhe mit aufgenommen werden. Auch der Fördergutabstand, der für manche Förderstrecken erforderlich ist, wird durch Messen ermittelt und in Metern dokumentiert. Sollte kein Mindestabstand notwendig sein, wird 0 eingetragen.

Aufnahme der Geschwindigkeiten und DLZ

Die Geschwindigkeiten für die Parametrisierung der Bausteine Förderstrecke, Drehtisch und Bandabweiser werden nicht direkt aufgenommen, sondern durch Division der Länge (in Metern) durch die Durchlaufzeit (in Sekunden) errechnet. Dies erfolgt in der Datenaufbereitung. Deshalb sind neben den durch die Bausteine Sammelbecken und Einzelstation abzubildenden Systembestandteile ebenfalls für solche die DLZ in Sekunden zu ermitteln, die über die Bausteine Förderstrecke, Drehtisch und Bandabweiser dargestellt werden sollen. Die Ermittlung dieser DLZ erfolgt durch Stoppen der Zeit. Für die genannten Bausteine genügt einmaliges Stoppen der Zeit, da hier immer die gleichen DLZ zu Grunde

liegen. Für die Einzelstation ist in dem Konzeptmodell festgelegt, dass je nach BE verschiedene DLZ angesetzt werden. Im Fall des Regalbediengeräts ist die Bearbeitungszeit davon abhängig, in welchen Platz des Lagers ein- und ausgelagert wird. Bei QK 2 ist die DLZ abhängig davon, ob der Ball als „in Ordnung“ oder als „nicht in Ordnung“ erkannt wurde. Diese Zeiten sind außerdem zu stoppen. Für den Simulationsmodus ist zudem zu stoppen, wie lange der Vorgang des Ballauskippens benötigt und wie lange der Container abgelassen wird.

Mittelwert DLZ und Standardabweichung

Für den Baustein Bearbeitungsstation (Rüttler und Waschtrommel) ist einmaliges Stoppen nicht ausreichend, da die Bälle hier gesammelt und ungeordnet gefördert werden. Es kann also die Vermutung aufgestellt werden, dass eine Normalverteilung zu Grunde liegt, wobei die DLZ der Bälle mit einer gewissen Standardabweichung σ um einen Mittelwert μ schwankt. Um eine Normalverteilung ermitteln zu können, sollen 40 Zeiten gestoppt werden, die eine Stichprobe der Größe n darstellen. Als Faustformel wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass n bei einer Stichprobe für eine Normalverteilung größer als 30 sein soll, was mit der Aufnahme von 40 Zeiten gewährleistet ist (vgl. Eley 2012, S. 26). Die Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung erfolgt in der Datenaufbereitung.

Aufnahme der Kapazitäten

Die Kapazität der Systembestandteile, die über mit dem Baustein Sammelbecken / Puffer dargestellt werden sollen, wird ermittelt, indem an der LEGO®-Fabrik getestet wird, wie viele Bälle in das jeweils abzubildende Systembestandteil passen, ohne dass Bälle aus dem System austreten. Die Kapazität der über den Baustein Förderstrecke abzubildenden Systembestandteile wird ermittelt, indem aufgenommen wird, wie viele Bälle gleichzeitig darauf enthalten sein können. Für Förderbänder, auf denen ein Container gefördert wird, wird eine Kapazität von 1 angenommen, da dort aufgrund des Ablaufs nur ein Container gleichzeitig gefördert werden kann, auch wenn theoretisch mehrere Container auf diese Förderbänder passen würden.

Aufnahme der X-, Y-, und Z-Dimensionen

Die Anzahl der Bälle oder Container, die in die Bausteine Bearbeitungsstation und Lager sowie die Anzahl der Bälle, die in die BEs Container und VB passen sollen, soll im Modell über die X-, Y- und Z-Dimension (in Stück) dargestellt werden. In ihrer Multiplikation erhält man die Kapazität des jeweiligen Systembestandteils oder BEs. Für die Bearbeitungsstationen sind nur X-, und Y-Dimension erforderlich, da hier keine Bälle übereinander gefördert werden. Für die Lager und die BEs VB sowie Container soll zusätzlich die Z-Dimension ermittelt werden, da eine Stapelung der Bälle in den Containern

und VB bzw. von Containern und VB in den Lagern möglich ist. Zur Aufnahme dieser Mengen wird an der LEGO®-Fabrik getestet, wie viele Bälle, VB oder Container das jeweilige Systembestandteil oder BE aufnehmen kann bzw. wie viele Plätze in den Lagern zur Verfügung stehen.

Aufnahme der Zeit für 90°-Drehung

Die Zeit, die der Drehtisch oder ein KR zur Drehung um 90° benötigt, wird gestoppt und in Sekunden dokumentiert.

Zykluszeit

Die Zykluszeit (Zeit, bis das Systembestandteil das nächste BE aufnehmen kann), wird ebenfalls gestoppt und in Sekunden dokumentiert. Diese Zeit wird nur für den Vertikalförderer benötigt, da dieser die Bälle drehend nach oben befördert. Dabei kann er Bälle nur in bestimmten Abständen aufnehmen. Die Zeit zwischen der Aufnahme von zwei Bällen ist dafür zu stoppen. Dies kann allerdings noch nicht geschehen, da der Vertikalförderer noch nicht implementiert ist. Deshalb ist diese Zeit zu schätzen.

Nachrichten von der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell

In Aufgabenspezifikation und Konzeptmodell ist festgelegt, dass das zu erstellende Modell Nachrichten aus der LEGO®-Fabrik empfangen soll (vgl. Tabelle 4.2, Tabelle 4.5). Die zu empfangenden Nachrichten sind bereits ausschnittsweise und verbal in dem Konzeptmodell (Beschreibung der Prozesse 1 und 2) definiert. An dieser Stelle soll der Inhalt dieser Nachrichten und deren Bedeutung festgelegt werden. Da ein Socket zur Datenübertragung genutzt werden soll, können Nachrichten mit dem Datentyp String (Zeichenkette) versendet werden. Gemeinsam mit dem Programmierer der LEGO®-Fabrik werden zu sendende Nachrichten bei Ereignissen in der LEGO®-Fabrik definiert und für jede Nachricht ein Code festgelegt, der daraufhin in dem zu erstellenden Modell interpretiert wird. Die Nachrichten und der zugehörige Code sind in Tabelle 9.1 in Anhang III – Daten aufgeführt.

Phasenergebnis: Rohdaten

Die aufgenommenen Daten (Rohdaten) sind in der Excel-Datei „Rohdaten Lego-Fabrik“ zu finden (s. Anhang IV – Dateien). Diese ist nach der Art der aufgenommenen Daten in die Arbeitsmappen Abmessungen, Durchlaufzeiten, Stichproben Rüttler und WT, Kapazitäten, X-, Y-, Z-Dimensionen, Fördergutabstand, Zeit für 90°-Drehung, Zuykluszeit und Nachrichten aus der LEGO Fabrik gegliedert. Exemplarisch ist ein Ausschnitt der erfassten Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) in Abbildung 9.1 (s. Anhang III – Daten) dargestellt. Für Daten, die in der Excel-Datei rot hinterlegt sind, müssen Annahmen getroffen werden, da sie aufgrund der fehlenden Implementierung noch nicht aufgenommen werden können.

Um aber die Weiterverwendung des zu erstellenden Modells zu gewährleisten, sollen diese Daten leicht durch reale Daten ersetzt werden können, sobald diese verfügbar sind. Wie dies gewährleistet wird, wird in der Phase Modellformalisierung (Abschnitt 4.2.6) beschrieben. Daten, die gelb hinterlegt sind, werden nicht unmittelbar in der LEGO®-Fabrik verwendet, sondern dienen entweder der Information oder der Berechnung anderer Daten (Geschwindigkeit, Standardabweichung, Mittelwert). Im Folgenden wird die Aufbereitung der Daten beschrieben.

4.2.5 Datenaufbereitung und aufbereitete Daten

In dieser Phase müssen die Daten so aufbereitet werden, dass sie im zu erstellenden Modell genutzt werden können. Da vorgesehen ist, dass die Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik (Excel-Datei) in das zu erstellende Modell importiert werden, um dort genutzt werden zu können, besteht die Datenaufbereitung darin, das Informationssystem, das noch nicht existiert, mit Daten zu füllen. Um nicht zu viele Spalten nutzen zu müssen, macht es Sinn, im Informationssystem Arbeitsmappen zu erstellen, in denen Systembestandteile mit ähnlichen Attributen zusammengefasst werden. Aus diesen Gründen werden die sechs Arbeitsmappen Daten_FS, Daten_Module, Daten_Puffer, Daten_BEs, Daten_Läger und Daten_Sonstige erstellt.

Daten_FS enthält dabei die Daten zu den Förderstrecken. Daten_Module enthält die Daten der über die Bausteine Bearbeitungsstation und Einzelstation (für die im Modell zur Abbildung der Systembestandteile zu nutzenden Bausteine s. Abbildung 4.9 bis Abbildung 4.19) abzubildenden Systembestandteile (Regalbediengerät, Rüttler, Waschtrommel, QK 1 und QK 2). Daten_Puffer enthält die Daten zu den Systembestandteilen, die über den Baustein Sammelbecken / Puffer abgebildet werden sollen (Sammelbecken nach Rüttler, nach Waschtrommel, nach Zähler, vor QK 1, vor QK 2 und Vertikalförderer vor QK 2). Daten_BEs enthält die Daten für die BEs Container, Verkaufsbehälter und Golfball. Daten_Läger enthält die Daten für die über den Baustein Lager abzubildenden Systembestandteile (Containerlager und Lager VB). Die Arbeitsmappe Daten_Sonstige enthält schließlich die Daten zu Systemelementen, die sich von den anderen fünf Gruppen unterscheiden und deshalb separat dargestellt werden. Dies umfasst die Daten zu den Bandabweisern, zu Drehtisch, zu KR 1 und KR 2. Außerdem sind hier die Zeiten für den nicht explizit im Modell abgebildeten Lifter enthalten (Zeit, bis beim Kippvorgang Bälle aus dem Container austreten und die Zeit zum Ablassen des Containers).

In dem Informationssystem müssen nun auch die Geschwindigkeiten für die Förderstrecken und die Bandabweiser abgebildet werden. Diese wurden in der Datenaufnahme nicht explizit entnommen und müssen berechnet werden. Diese Berechnung erfolgt durch die

Division der Länge der jeweiligen Förderstrecke bzw. des Bandabweisers in Metern (l) durch die gestoppte DLZ in Sekunden (t) (s. Formel 1).

$$v = \frac{l}{t}$$

Formel 1: Berechnung der Fördergeschwindigkeit

Damit entsteht die Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde (v). In dem Informationssystem ist diese Berechnung als Formel hinterlegt, so dass sich die Geschwindigkeit bei Eingabe einer anderen Länge oder einer anderen Zeit automatisch anpasst.

Für die DLZ des Rüttlers und der Waschtrommel liegen in den Rohdaten jeweils 40 Zeiten vor. Es wird davon ausgegangen, dass hier eine Normalverteilung vorliegt. Da es sich um eine Stichprobe handelt, werden hier Schätzer für den Mittelwert (Formel 2) und die Standardabweichung (Formel 3) verwendet (Eley 2012, S. 21).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Formel 2: Schätzer für den Mittelwert

mit $n =$ Anzahl der genommenen Zeiten und $x_i =$ jeweiliger Zeitwert

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Formel 3: Schätzer für die Standardabweichung mit $n =$ Anzahl der genommenen Zeiten,

$x_i =$ jeweiliger Zeitwert, $\bar{x} =$ Schätzer für den Mittelwert

Die Berechnung wird unter Verwendung dieser Formeln in Excel vorgenommen und ist in Anhang III – Daten (s. Abbildung 9.2) dargestellt.

Somit liegen nun alle notwendigen Daten für das zu erstellende Modell in aufbereiteter Form vor. Die aufbereiteten Daten in dem Informationssystem sind in der Excel-Datei „Informationssystem“ zu finden (s. Anhang IV – Dateien). Auch dort sind Daten rot hinterlegt, für die zunächst Annahmen getroffen werden müssen. Diese können einfach ersetzt werden, sobald die Aufnahme möglich ist. Gelb hinterlegte Daten werden nicht direkt im Modell verwendet. Sie sollen aber im Modell dazu dienen, dass alle Informationen auf einen Blick verfügbar sind.

Exemplarische V&V der aufbereiteten Daten

In Abschnitt 2.1.5 ist die Bedeutung der V&V für die Erstellung eines digitalen Modells kurz beschrieben. Da das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) dem erstellten

Konzept zu Grunde liegt, das hier Anwendung findet und die V&V ebenfalls als Bestandteil in das Konzept übernommen wurde, werden im Folgenden exemplarisch zwei Möglichkeiten der V&V der aufbereiteten Daten dargestellt.

Dafür wird zunächst überprüft, ob die aufbereiteten Daten den Anforderungen aus der Aufgabenspezifikation und dem Konzeptmodell genügen. Dabei werden im Folgenden einzeln die Zeilen der Tabelle 4.2 (Aufgabenspezifikation) und Tabelle 4.5 Konzeptmodell) aufgegriffen. Physische Abmessungen wurden mittels des Messens von Länge, Breite und Höhe sowie des Fördergutabstands aufgenommen. Notwendige Zeiten (DLZ, Auskippen und Ablassen des Containers etc.) wurden mit der Aufnahme von DLZ, der Zeiten für die 90°-Drehungen, der Berechnung des Mittelwerts und der Standardabweichung sowie der Schätzung für die Zykluszeit aufgenommen. Erforderliche Kapazitäten sind mit der Aufnahme von X-, Y- und Z-Dimensionen sowie von reinen Kapazitätswerten erfolgt. Geschwindigkeiten sind aufbereitet, in dem sie aus Zeiten und Längen berechnet wurden. Die Übermittlung von Sensor- und Realdaten wurden in Form von Nachrichten der Steuerung der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell definiert und liegen als Grundlage für die Formalisierung und Implementierung ebenfalls vor. Realisierte Abläufe sind beschrieben und werden im formalen Modell weiter spezifiziert. Auch geplante Abläufe wurden aufgenommen und grob in Abschnitt 4.1.2 beschrieben. Diese können allerdings im Folgenden aufgrund des Umfangs nicht weiter beschrieben werden, auch, wenn sie implementiert werden sollen. Damit kann durch Prüfung der aufbereiteten Daten gegen die Aufgabenspezifikation und das Konzeptmodell gesagt werden, dass alle erforderlichen Daten aufbereitet vorliegen.

Um auch die Datenqualität zu verifizieren und zu validieren, wird außerdem geprüft, ob die Annahme zutrifft, dass aufgrund der gestoppten Zeiten für den Durchlauf des Rüttlers und der Waschtrommel tatsächlich auf eine Normalverteilung geschlossen werden kann. Dies kann mit Hilfe von statistischen Testverfahren erfolgen, mit denen überprüft werden kann, „ob eine bestimmte Hypothese über die unbekannte Grundgesamtheit richtig oder falsch ist“ (Eley 2012, S. 20). In diesem Fall soll der Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest verwendet werden um die Hypothese zu überprüfen, dass die Verteilung der Zeiten einer Normalverteilung folgt. Ein Vorteil dieses Tests ist, dass er auch bei vergleichsweise kleinen Stichprobenumfängen angewendet werden kann, was hier mit $n=40$ der Fall ist (vgl. Eley 2012, S. 22). Der Baustein „DataFit“ in Plant Simulation schätzt die Parameter einer ausgewählten Verteilung und führt einen Anpassungstest mit den Daten durch (vgl. Siemens Industry Software GmbH). Dabei kann eine Irrtumswahrscheinlichkeit angegeben werden, also „die Wahrscheinlichkeit mit der eine Verteilung mit den geschätzten Parametern vom Anpassungstest zurückgewiesen wird, obwohl die Verteilung für die

Stichprobe geeignet ist“ (Siemens Industry Software GmbH). Das Vorgehen und das Ergebnis wird hier exemplarisch für die Waschtrommel dargestellt.

Zunächst werden die gestoppten Zeiten in eine Tabelle in Plant Simulation übernommen. Diese Tabelle wird daraufhin auf den Baustein „DataFit“ gezogen. Als Irrtumswahrscheinlichkeit wird 0,05 eingetragen. und daraufhin die Schaltfläche „FIT“ betätigt. Damit wird die Berechnung durchgeführt. Die Ergebnisse können daraufhin angezeigt werden und sind in Abbildung 4.20 für die Waschtrommel in dargestellt.

	string 0	boolean 1	string 2	string 3
string	Distribution	Result KS	Parameter 1	Parameter 2
1	Normal	true	Mu = 3.62425	Sigma = 0.244580124907954

Abbildung 4.20: Auswertung DataFit (Siemens Industry Software GmbH)

Durch den Eintrag „true“ in der Spalte „Result KS“ wird gezeigt, dass die Hypothese angenommen werden kann und auf eine Normalverteilung geschlossen werden kann. Die vorgeschlagenen Parameter für den Mittelwert und die Standardabweichung stimmen mit den in Excel errechneten bis einschließlich der zweiten Nachkommastelle überein (vgl. Abbildung 9.2). Da auch die Stichprobe des Rüttlers zu einem positiven Ergebnis führt mit nahezu identischen Parametern, werden die aufbereiteten Daten als verwendbar angenommen. Weitere Informationen zum Durchführen des Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstests und welche Berechnungen damit verbunden sind können Eley (2012, S. 21 ff.) entnommen werden. Somit wurde eine exemplarische Verifikation und Validierung der aufbereiteten Daten durchgeführt.

4.2.6 Modellformalisierung und formales Modell

In der Phase der Modellformalisierung wird das Konzeptmodell formalisiert, in dem die in dem Konzeptmodell beschriebenen Angaben um einen formalen Entwurf erweitert werden (Rabe et al. 2008, S. 74). Aufgrund des Umfangs können nicht alle Elemente der Dokumentenstruktur nach Rabe et al. (2008) aufgegriffen und beschrieben werden. Es werden daher exemplarisch Prozess 1 und Prozess 2 aus dem Konzeptmodell formalisiert und beschrieben, wie der Ablauf im zu erstellenden Modell vorzusehen ist. Außerdem werden der Datenimport und Datenexport, die automatische Parametrisierung und die Datenkommunikation mit der Steuerung der LEGO®-Fabrik formalisiert.

4.2.6.1 Datenimport und Parameterzuweisung

Die Daten aus dem Informationssystem sollen in das Modell übernommen werden können. Dazu sind Tabellen zu erstellen, die hinsichtlich der darin abzulegenden Datentypen genau wie die einzelnen Arbeitsmappen des Informationssystems aufgebaut sind. Die erste Spalte muss dabei immer das entsprechende Systembestandteil (Datentyp object, s. Abbildung 8.1) enthalten, damit klar ist, welchem Objekt im Modell die Daten zugeordnet werden sollen. Die anderen Spalten der Tabellen richten sich nach den Bausteinspezifischen Attributen. Durch diesen Aufbau soll der Datenimport ganz einfach gestaltet werden. Dafür soll eine Methode mit der Bezeichnung „Datenimport_aus_Informationssystem“ programmiert werden. Wird diese Methode ausgeführt, soll auch gleichzeitig die automatische Parameterzuweisung erfolgen. Für diese muss ebenfalls eine Methode programmiert werden (Bezeichnung „Parameterzuweisung“). Zunächst wird die Methode für den Datenimport im Pseudocode¹³ dargestellt:

Methode: *Datenimport_aus_Informationssystem*

```
Tabelle Daten_FS leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_FS)
Tabelle Daten_Module leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_Module)
Tabelle Daten_Puffer leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_Puffer)
Tabelle Daten_Läger leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_Läger)
Tabelle Daten_BEs leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_BEs)
Tabelle Daten_Sonstige leseExcelDatei(Informationssystem, Daten_Sonstige)
Aufruf Methode Parameterzuweisung
```

Methodenende

¹³ Pseudocode stellt einen vereinfachten, abstrakten Programmcode dar, mit dem Algorithmen in Anlehnung an Programmiersprachen dargestellt werden können (vgl. Mehlhorn und Sanders (2008, S. 26)). Hier wird der Pseudocode genutzt, um die Algorithmen in dem zu erstellenden Modell für eine Implementierung ohne weitere Beschreibungsnotwendigkeiten zu formalisieren.

Die Methode „Parameterzuweisung“ soll den einzelnen Systembestandteilen im Modell anhand der in die Tabellen eingelesenen Daten Werte für die Attribute zuweisen, sie also parametrisieren. Dies soll für jede Tabelle mithilfe einer Schleife erfolgen. Exemplarisch wird die Parameterzuweisung hier für die Förderstrecken erläutert. Zum leichteren Verständnis ist in Abbildung 4.21 ein Ausschnitt aus dem Arbeitsblatt „Daten_FS“ des Informationssystems dargestellt.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Modul	Bezeichnung	Geschwindigkeit	DLZ	Länge	Breite	Fördergutabstand	Kapazität
2	.LegoFabrik.GesamtFabrik.BandZumDT	Band zum Drehtisch	0,167832168	1,4300000	0,24	0,195	0	1
3	.LegoFabrik.GesamtFabrik.BandzumDTrück	Band zum Drehtisch Rückführung	0,167832168	1,4300000	0,24	0,195	0	1
4	.LegoFabrik.GesamtFabrik.BandProd	Band in die Produktion	0,120274914	2,9100000	0,35	0,255	0	1
5	.LegoFabrik.GesamtFabrik.BandLeergut	Band zum Regalbediengerät	0,12	2,0000000	0,24	0,24	0	1
6	.LegoFabrik.GesamtFabrik.FB_RzuW1	Förderband in Waschtrommel 1	0,077380952	1,6800000	0,13	0,038	0,025	5
7	.LegoFabrik.GesamtFabrik.FB_RzuW2	Förderband in Waschtrommel 2	0,077380952	1,6800000	0,13	0,038	0,025	5

Abbildung 4.21: Ausschnitt Arbeitsblatt "Daten_FS" des Informationssystems

Beim ersten Durchlauf dieser Schleife wird die erste in der Tabelle enthaltene Förderstrecke (Zeile 2) aus der ersten Tabellenspalte ausgelesen und in einer entsprechenden Variable gespeichert. Mit dieser Variable kann nun die jeweilige Förderstrecke angesprochen werden und mit den Werten in den folgenden Spalten, also Geschwindigkeit, Länge, Breite, Fördergutabstand und Kapazität parametrisiert werden (DLZ wird für die Förderstrecken nicht parametrisiert, da die Parametrisierung über die Geschwindigkeit erfolgen soll). Im Pseudocode sieht diese Zuweisung wie folgt aus (exemplarisch für die Förderstrecken).

Methode: Parameterzuweisung

Variable i = integer

Variable Objekt = objekt

Schleife: wiederhole von i=1 bis Zeilenanzahl der Tabelle, i=i+1

Objekt=Tabelle Daten_FS(Spalte 1, Zeile i)

Objekt.geschwindigkeit=Tabelle Daten_FS(Spalte Geschwindigkeit, Zeile i)

Objekt.länge=Tabelle Daten_FS(Spalte Länge, Zeile i)

Objekt.breite=Tabelle Daten_FS(Spalte Breite, Zeile i)

Objekt.BEAbstand=Tabelle Daten_FS(Spalte Fördergutabstand, Zeile i)

Objekt.Kapazität=Tabelle Daten_FS(Spalte Kapazität, Zeile i)

Schleifenende

[Weitere Schleifen zur Parametrisierung der anderen Systembestandteile]

Methodenende

Mittels dieser Darstellung wurde der Datenimport und die Parametrisierung formalisiert.

4.2.6.2 *Nachrichtenempfang aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik*

Die Zustellung des realen Zustands der LEGO®-Fabrik soll erfolgen, indem in der Steuerung der LEGO®-Fabrik Nachrichten an das Modell gesendet werden. Die Nachrichtenübertragung soll mittels Sockets geschehen. In der Steuerung der LEGO®-Fabrik wird dafür ein Socket angelegt, der sich als Client mit dem Socket in dem digitalen Modell verbindet, der dort als Server zu anzulegen ist und damit empfangsbereit für Nachrichten von Clients ist. Im Socket der LEGO®-Fabrik muss die IP-Adresse des Computers eingegeben werden, auf dem das digitale Modell läuft. Außerdem muss sich auf einen Port, sozusagen einen „Kanal“, geeinigt werden, über den die Kommunikation laufen soll. Es ist wichtig, dass ein Port ausgewählt wird, der nicht offiziell für eine spezifische Nutzung registriert ist. Weitere Erläuterung und eine Übersicht kann unter Wikipedia (2019) eingesehen werden. Mit dem Programmierer der LEGO®-Fabriksteuerung wurde sich auf den Port 33333 geeinigt. Dieser ist sowohl im Socket der LEGO®-Fabriksteuerung als auch im Socket im digitalen Modell einzutragen. Entscheidend für die Kommunikation auf diese Weise ist, dass sich der Computer, auf dem das digitale Modell läuft, im gleichen Netzwerk befindet, wie der Computer, über den die Fabriksteuerung läuft. Sollte dies nicht der Fall sein, müsste der Port am Router des Netzwerks freigegeben werden, mit dem der Computer mit dem digitalen Modell registriert ist. Der Programmcode, der zum Senden der Nachrichten in der Fabriksteuerung der LEGO®-Fabrik implementiert wurde, ist ausschnittsweise in Abbildung 11.1 in Anhang V – Programmcodes und Methoden dargestellt.

Im digitalen Modell soll der Socket ein- und ausschaltbar sein. Für den Simulationsmodus ist er ausgeschaltet. Dann wird nicht auf den Empfang von Nachrichten reagiert und es kann eine Simulation aufgrund der aufbereiteten Daten und implementierten Steuerungen erfolgen. Für den Modus der Zustandsdarstellung ist er eingeschaltet und wartet auf Nachrichten von Clients, also dem Socket der LEGO®-Fabrik. In der folgenden Formalisierung steht die Zustandsdarstellung im Fokus, da diese eine besondere Anforderung des digitalen Modells ist, um als Digitaler Zwilling genutzt werden zu können.

Ist der Socket eingeschaltet, soll er empfangsbereit für Nachrichten sein und immer beim Empfang einer Nachricht die zu definierende Methode „Nachrichtenempfang“ aufrufen. In dieser Methode wird zunächst die empfangene Nachricht und die Zeit ausgegeben sowie in der Tabelle „Digitaler Schatten“ im Modell gespeichert, deren Sinn die Aufzeichnung der realen Nutzungsdaten ist (Nachricht und Empfangszeit). Mittels if-Abfragen wird der Nachrichteninhalt abgefragt und je nachdem, was in dieser Nachricht steht, werden entsprechende Aktionen oder Methoden ausgeführt. So soll bspw. für die Nachricht „CA“ die Methode „ContainerArrives“ ausgeführt werden (s. Abbildung 4.23), die einen Container

erzeugt und wiederum eine weitere Methode „Container_befüllen“ ausführen soll, die die vom Nutzer angegebenen Ballarten im Container erzeugt. Ein anderes Beispiel ist der Empfang der Akkustände der in der LEGO®-Fabrik verwendeten Bricks. Es ist wichtig, dass diese im digitalen Modell dargestellt werden, um rechtzeitig reagieren zu können und den Akku zu laden, falls ein Brick droht auszugehen. Für die Darstellung der Akkustände empfängt das digitale Modell in regelmäßigen Abständen entsprechende Nachrichten von der Steuerung der LEGO®-Fabrik.

Auszugsweise wird die Methode „Nachrichteninterpretation“ im Folgenden im Pseudocode dargestellt, um das Beschriebene zu formalisieren. Dabei wird die Interpretation der Nachricht „CA“ erläutert, da die Nachrichteninterpretation mittels if-Abfrage immer gleich abläuft. Außerdem wird die Interpretation der Nachrichten zum Übertragen der Akkustände der Bricks aufgeführt, die eine Besonderheit innerhalb der zu implementierenden Methode „Nachrichteninterpretation“ darstellt, denn die Nachricht für die Akkustände besteht im Gegensatz zu allen anderen Nachrichten aus neun Zeichen, anstatt aus zwei. Dabei wird der Name des Bricks gesendet, ein Bindestrich und dann der Akkustand ([Brickname]-[Akkustand]). Auf der Bedienoberfläche des Modells sollen die Bricks als Variablen dargestellt werden, deren Inhalt der jeweilige Akkustand ist. Ist der Akkustand größer oder gleich 7000, ist alles in Ordnung – dann wird die Variable grün gefärbt. Ist er allerdings kleiner als 7000, muss der Brick bald geladen werden und die Variable auf der Bedienoberfläche wird rot gefärbt. Weitere if-Abfragen der Methode „Nachrichteninterpretation“ werden der Übersicht halber nicht dargestellt.

Methode: *Nachrichteninterpretation*

Übergabeparameter vom Socket: Socketnachricht=String

Variable y = Array mit 2 Plätzen vom Typ String

Variable Akkustand = real

Variable Brick = object

[Deklaration weiterer Variablen]

Globale Variable Empfangenachricht=SocketNachricht

Empfangszeit = aktuelleZeit

Tabelle DigitalerSchatten.schreibeZeile(Empfangene Nachricht, Empfangszeit)

if-Abfrage: Wenn EmpfangeneNachricht=“CA“, dann

Aufruf Methode ContainerArrives

Ende if-Abfrage

if-Abfrage: wenn Anzahl Zeichen EmpfangeneNachricht > 2, dann

y=Teile die Nachricht beim Bindestrich und schreibe sie in y[1] und y[2]

Brick=y[1]

Akkustand=y[2]

Brick.wert=Akkustand

wenn Akkustand >= 7000, dann färbe Variable auf Bedienoberfläche grün

wenn Akkustand <7000, dann färbe Variable auf Bedienoberfläche rot

Ende if-Abfrage

[Weitere if-Abfragen zur Nachrichteninterpretation]

Methodenende

Mittels dieser Methodenprogrammierung wird sichergestellt, dass nur Nachrichten, die im Modell interpretiert werden, die auch vorgesehen sind. Sollte eine andere Nachricht ankommen, wird diese zwar in die Tabelle DigitalerSchatten geschrieben, aber löst sonst keine weiteren Aktionen aus.

4.2.6.3 Prozessformalisierung

Nun sollen die Prozesse 1 und 2 (s. Abschnitt 4.2.3.3) exemplarisch formalisiert werden (nur für den Modus der Zustandsdarstellung). Dazu erfolgt die Darstellung in Anlehnung an eine ereignisgesteuerte Prozesskette (EPK), da sich diese gut zur Prozessformalisierung eignet. Um den Prozess verständlich darstellen zu können, werden zusätzlich Elemente dargestellt, die nicht in einer herkömmlichen EPK vorkommen (s. Abbildung 4.22).



Abbildung 4.22: Elemente der modellierten EPK (eigene Darstellung)

Mit dem Element „Funktion“ werden Aktionen im Modell beschrieben. Mit dem Element „Ereignis“ wird das Eintreten eines bestimmten Ereignisses beschrieben. Durch das Element „Nachricht aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik“ werden die konkreten Strings dargestellt, die an das LEGO®-Modell gesendet werden (s. Tabelle 9.1). Mit dem Element „Auszuführende Methode“ wird dargestellt, welche Methode zu starten ist und mit dem Konnektor können „Und“-Verknüpfungen (AND), „Oder“-Verknüpfungen (OR) sowie „Entweder-Oder“-Verknüpfungen (XOR) dargestellt werden.

Formalisierung Prozess 1

Abbildung 4.23 stellt den Prozess 1 einer EPK-ähnlichen Form unter Verwendung der in Abbildung 4.22 aufgeführten Elemente dar. Dieser Ablauf ist in der Phase der Implementierung im Simulationswerkzeug zu realisieren. Da nicht auf alle Methoden eingegangen werden kann, werden im Folgenden anhand des Ablaufs die wichtigsten erläutert und formalisiert.

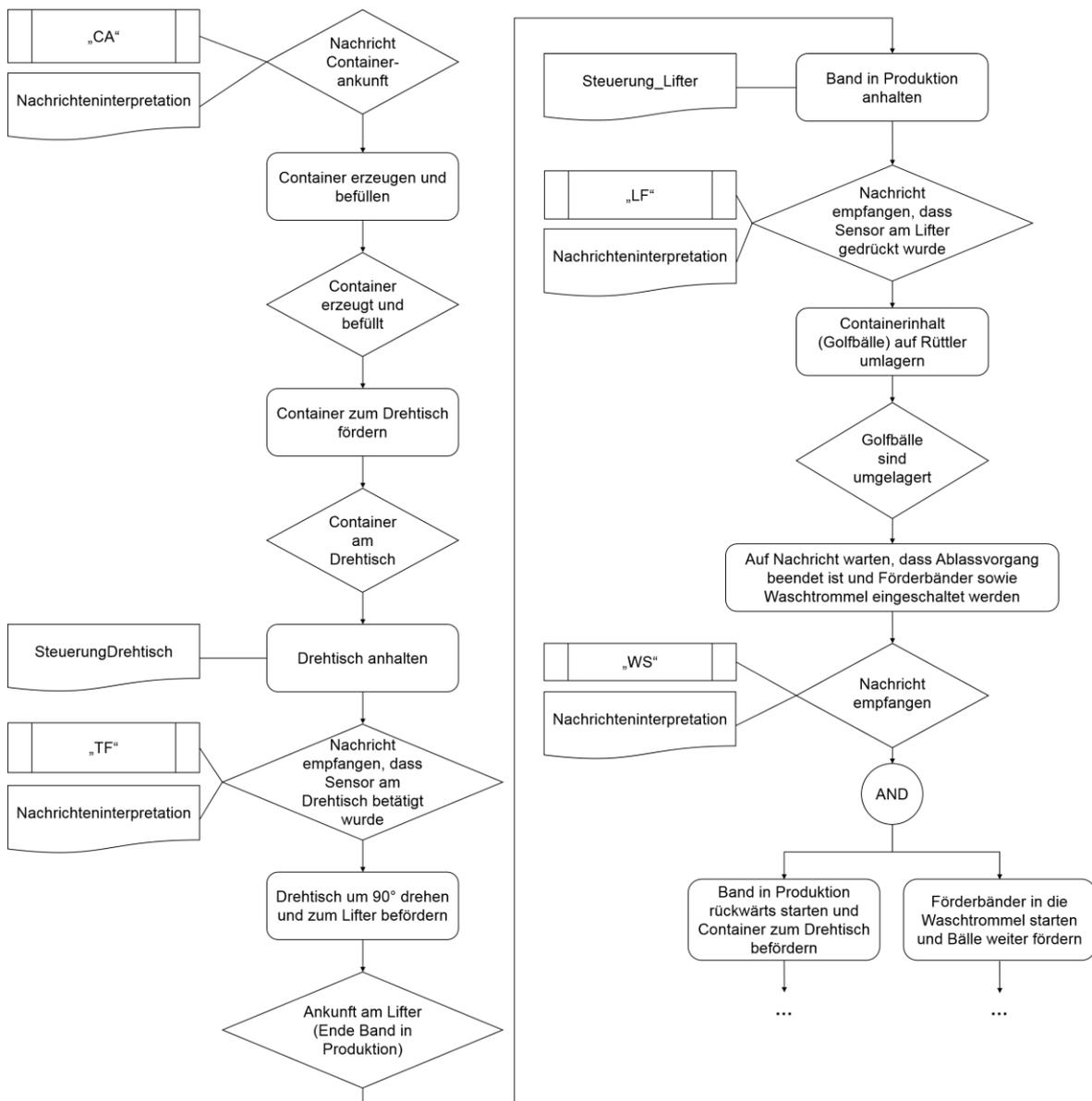


Abbildung 4.23: Formalisierung Prozess 1 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)

Nachricht Containerankunft

Der Prozess beginnt, sobald das digitale Modell die Nachricht „CA“ (Container arrives) von der Steuerung der LEGO®-Fabrik erhält. Immer beim Nachrichtempfang soll die Methode „Nachrichteninterpretation“ aufgerufen werden (s. Abschnitt 4.2.6.2). Empfängt

das digitale Modell die Nachricht „CA“ wird also die Methode „ContainerArrives“ ausgeführt, die für die Erstellung und Befüllung eines Containers sorgt.

Container trifft am Drehtisch ein: Methode „SteuerungDrehtisch“

Sobald der Container im Modell am Drehtisch eintrifft, soll die Methode „SteuerungDrehtisch“ ausgeführt werden. Diese Methode soll zunächst prüfen, ob sich das Modell im Simulationsmodus oder im Modus Zustandsdarstellung befindet. Dies geschieht mittels einer Abfrage, ob der Socket eingeschaltet ist. Ist dies der Fall, wird der Drehtisch angehalten und auf den Empfang der Nachricht „TF“ gewartet. Erst wenn dieser String in der globalen Variable „EmpfangeneNachricht“ gespeichert ist, setzt der Drehtisch die Drehung an und fördert den Container weiter. Im Folgenden ist der Pseudocode ausschnittsweise dargestellt:

Methode: SteuerungDrehtisch

```
if-Abfrage: wenn Socket.eingeschaltet = true, dann
    Drehtisch.angehalten=true
    warten bis EmpfangeneNachricht = „TF“
    Drehtisch.angehalten=false
ende if-Abfrage
```

Methodenende

Unter Berücksichtigung dieser Logik ist die Methode zu implementieren.

Container trifft am Lifter ein: Methode „Steuerung_Lifter“

Die Methode „Steuerung_Lifter“ soll nach dem gleichen Prinzip funktionieren, wie die Methode „SteuerungDrehtisch“, und wird daher nur kurz beschrieben. Trifft der Container am Ende des Förderbandes in die Produktion ein, also am Lifter, wird die Methode „Steuerung_Lifter“ ausgeführt. Diese pausiert die Förderbänder „Band in Produktion“ und die Förderbänder in die Waschtrommel, da diese im realen Prozess auch ausgeschaltet sind. Daraufhin wartet die Methode auf den Empfang der Nachricht „LF“. Wurde diese Nachricht empfangen, werden nach Ablauf der ermittelten Zeit zum Auskippen des Containers (s. Excel-Datei Informationssystem, Arbeitsmappe „Daten_Sonstige“ in Anhang IV – Dateien) die Bälle auf den Rüttler umgelagert und laufen von dort in das Sammelbecken nach dem Rüttler. Die Förderbänder laufen in der realen Fabrik so lange nicht, bis der Containerablassvorgang beendet ist. Deshalb werden sie auch hier nicht eingeschaltet.

Empfang der Nachricht, dass der Container abgelassen wurde

Erst, wenn aus der Fabrik die Nachricht empfangen wurde, dass der Ablassvorgang beendet ist und die Förderbänder gestartet werden sollen („WS“), soll über die Methode

„Nachrichteninterpretation“ die Methode „Förderbänder_einschalten“ ausgeführt werden, die das Band in die Produktion rückwärts startet und auch die Förderbänder in die Waschtrommel in Gang setzt. Somit werden zum einen die Bälle eitergefördert und zum anderen der Container zurück zum Drehtisch gefördert (s. Abbildung 4.23).

Damit wurde Prozess 1 formalisiert. Aufgrund des Umfangs ist nur eine exemplarische Prozessdarstellung. Trotzdem sollen auch alle anderen Prozesse der LEGO®-Fabrik im digitalen Modell implementiert werden, auch wenn sie im Rahmen dieser Arbeit nicht beschrieben werden können. Im Konzeptmodell ist außerdem ein zweiter exemplarischer Prozess beschrieben (s. Prozess 2, Abschnitt 4.2.3.3), der im Folgenden ebenfalls formalisiert wird.

Formalisierung Prozess 2

Prozess 2 (s. Prozess 2, Abschnitt 4.2.3.3) kann wiederum in 2 Prozesse unterteilt werden (Prozess 2.1 und Prozess 2.2). Der erste Teilprozess ist das Eintreten des Balls in das Teilsystem QK 1 (Eintritt des Balls in das Sammelbecken in Teilsystem QK 1) bis zur Ankunft des Balls am Farbsensor, wo er im Modell gelöscht wird (s. Abbildung 4.24). Der Grund für das Löschen ist, dass bis zu diesem Punkt keine Information aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik empfangen werden kann, welche Farbe der Ball hat und ob er in Ordnung ist oder nicht. Bis zu diesem Farbsensor kann also nur ein beliebiger Ball zwecks Visualisierung durch das Modell laufen. Erst, wenn in der realen Fabrik ein Ball mit dem Farbsensor geprüft wurde, kann eine Nachricht an das digitale Modell gesendet werden, welche Ballart vorliegt. Aus diesem Grund wird auch immer erst ein Ball mit der erkannten Farbe und dem erkannten Zustand („in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“, Ballattribut „iO“=true oder false, s. Abbildung 4.18) am Sensor auf dem Förderband erstellt, sobald eine entsprechende Nachricht aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik empfangen wurde. Nachdem der Ball gemäß der empfangenen Nachricht erstellt wurde, wird dieser in dem Modul QK 1 entsprechend seines Zustands entweder an die Senke „Ausschuss“ oder an die „Rutsche zum KR 1“ weitergeleitet. Die Weiterleitung im Modul QK 1 erfolgt im Modell, indem das Ballattribut „iO“ ausgelesen wird. Mit der Weiterleitung tritt der Ball aus dem Teilsystem QK 1 aus. Die Ballerzeugung am Sensor bis zum Austritt aus QK 1 stellt Teilprozess 2 dar (s. Abbildung 4.25).

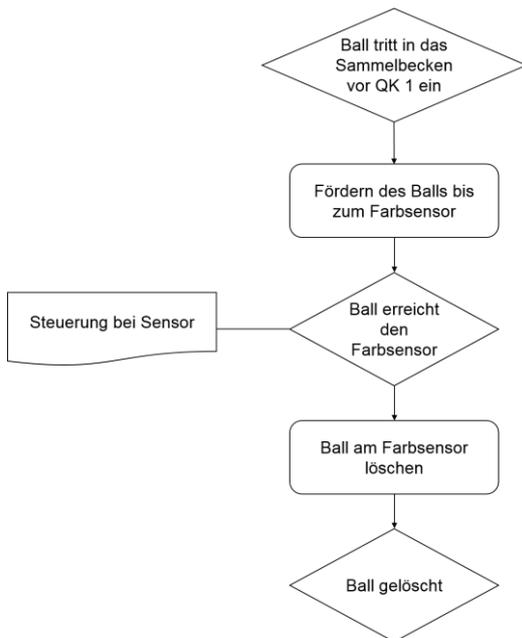


Abbildung 4.24: Prozessformalisierung Prozess 2.1 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)

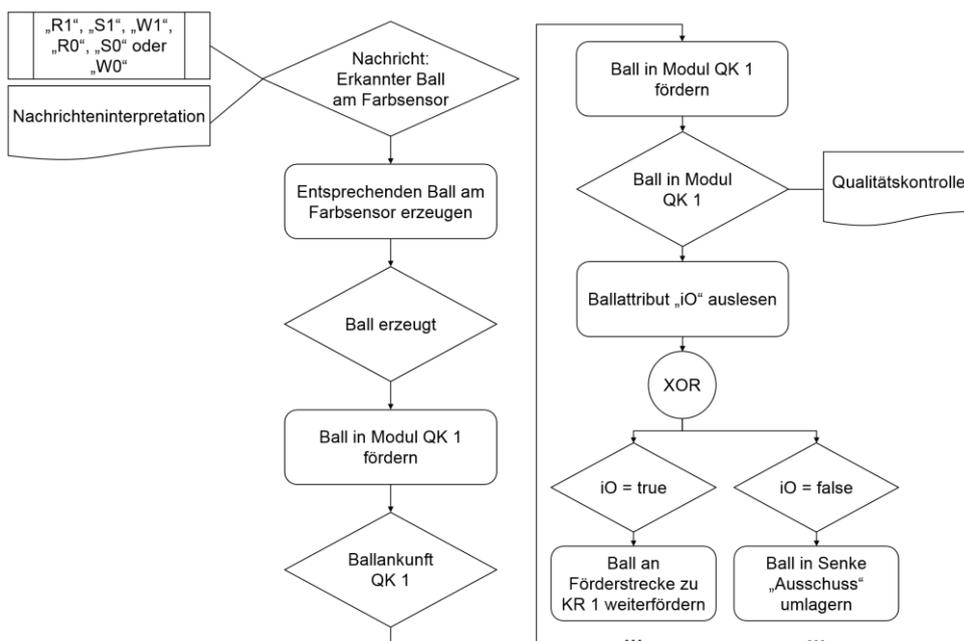


Abbildung 4.25: Prozessformalisierung Prozess 2.2 (Modellmodus: Zustandsdarstellung)

Die Methode „Steuerung bei Sensor“ in Teilprozess 2.1 löscht lediglich den eintreffenden Ball. Aus diesem Grund wird eine weitere Erläuterung als nicht notwendig betrachtet.

Die Bedeutungen der Nachrichten, die in Teilprozess 2.2 bei Erkennen eines Balls bei QK 1 von der Steuerung der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell gesendet werden, können Tabelle 9.1 entnommen werden. Wird eine dieser in Abbildung 4.25 aufgeführten Nachrichten an das digitale Modell gesendet, wird durch die Methode „Nachrichteninterpretation“ die Methode „Ballerkannt_QK“ aufgerufen und bekommt die

empfangene Nachricht übergeben sowie die QK, an der der Ball erkannt wurde. Die Übergabe der entsprechenden QK ist notwendig, da das Teilsystem QK allgemein definiert werden soll und für die Darstellung der Teilsysteme QK 1 und QK 2 im Modell lediglich angepasst werden soll. Somit muss die Methode übergeben bekommen, um welche QK es sich handelt. In der Methode „Ballerkannt_QK“ soll dann die jeweilige Nachricht mittels if-Abfragen aufgefangen und entsprechend des Nachrichteninhalts der Ball der erkannten Art erzeugt werden (also Ball in der erkannten Farbe mit dem Attribut „iO“=true oder false). Ein Ausschnitt dieser Methode für die Erkennung eines roten Balls an QK 1, der „in Ordnung“ ist, wird im Folgenden im Pseudocode dargestellt (entsprechende Nachricht: „R1“).

*Methode: **Ballerkannt_QK***

Übergabeparameter von Methode Nachrichteninterpretation:

Nachricht=string, QK=object)

Variable Golfballerz=object

if-Abfrage: wenn Nachricht = „R1“, dann

Golfballerz=Golfball_rot.erzeugen(in Teilsystem QK, am Sensor auf Förderband)

Golfballerz.iO=true

ende if-Abfrage

[Weitere if-Abfragen für die anderen Nachrichten]

Methodenende

Die Variable „Golfballerz“ soll dazu dienen, dass dem Golfball bei Erzeugung der Attributwert für „iO“ zugewiesen werden kann.

Der Ball wird dann in das Modul QK 1 im Teilsystem QK 1 weitergefördert. Dort soll die Methode „Qualitätskontrolle“ das Attribut „iO“ des Golfballs auslesen und ihn entsprechend an die Senke Ausschuss oder an die Rutsche zu KR 1 weiterleiten. Zusätzlich soll für die Information des Nutzers des digitalen Modells in eine Tabelle (Tabelle_Ballpruefung) geschrieben werden, wie viele Bälle als „in Ordnung“ und wie viele Bälle als „nicht in Ordnung“ erkannt wurden. Dies soll ebenfalls in der Methode „Qualitätskontrolle“ wie folgt geschehen.

*Methode: **Qualitätskontrolle***

if-Abfrage: wenn Ball.iO=false dann

Ball.umlagern(Ausschuss)

Tabelle_Ballpruefung[„Ball niO“,Zeile 1]+=1

ende if-Abfrage

```
if-Abfrage: wenn Ball.iO=true dann
    Ball.umlagern(Rutsche zu KR)
    Tabelle_Ballpruefung[„Ball iO“,1]+=1
```

Methodenende

Damit soll gewährleistet werden, dass der Benutzer sich jederzeit darüber informieren kann, wie viele Bälle welcher Art bislang erkannt wurden. Mit der Umlagerung in dieser Methode treten die Bälle aus dem Teilsystem QK 1 aus und damit ist die Prozessformalisierung der exemplarischen Prozesse abgeschlossen.

4.2.6.4 Simulationsmodus

Der Simulationsmodus, der in dem digitalen Modell ebenfalls möglich sein soll, wird aufgrund des Umfangs in den Phasen nicht weiter beschrieben, soll aber trotzdem implementiert werden. An dieser Stelle soll kurz beschrieben werden, wie dieser zu realisieren ist.

In Abschnitt 4.2.6.2 ist beschrieben, dass der Nachrichtenempfang über ein Socket implementiert werden soll. Dieser kann ein- und ausgeschaltet werden, je nachdem, ob das digitale Modell gerade im Modus Zustandsdarstellung zum Abbilden des realen Zustands der LEGO®-Fabrik genutzt werden soll oder zum Durchführen von Experimenten im Simulationszustand. Dieser Modus soll im zu erstellenden Digitalen Zwilling einfach umschaltbar sein, womit lediglich der Socket ein- oder ausgeschaltet wird. Die einzelnen Methoden sind so zu programmieren, dass sie bei ihrer Ausführung abfragen, ob der Socket eingeschaltet ist oder nicht und dementsprechend entweder auf eine Nachricht warten oder die ermittelten Zeiten zu Grunde legen. So wird bspw. in der Methode „SteuerungDrehtisch“ auf die Nachricht „TF“ gewartet, damit der Drehtisch gedreht wird (s. Abschnitt 4.2.6.3). Im Simulationsmodus soll die Methode nicht auf die Nachricht warten, sondern die Drehung wird entsprechend der ermittelten Zeiten vorgenommen. Im Simulationsmodus werden des Weiteren keine Bälle an dem Zählsensor oder den Farbsensoren der QKs gelöscht, sondern diese laufen dort durch und werden entsprechend ihrer vom Nutzer in einer vorgesehenen Tabelle zur Parametrisierung der ankommenden Bälle (Tabelle „Parameter_Ballankunft“) angegebenen Attributwerte erkannt. Auf diese Weise soll die geforderte Eigenschaft eines Digitalen Zwillings gewährleistet werden, dass das als Digitaler Zwilling zu nutzende Simulationsmodell in einem Modus zur Darstellung des Echtzustandes (Modus: Zustandsdarstellung) und in einem Modus zur Durchführung von Experimenten (Modus: Simulation) betrieben werden kann. Diese Eigenschaft wird ebenfalls in der Aufgabenspezifikation (s. Abschnitt 4.2.2) gefordert.

4.2.6.5 Datenexport

Schließlich wird an dieser Stelle noch kurz formalisiert, wie der Datenexport ermöglicht werden soll. Dabei sollen die im Simulationsmodus in einer Tabelle „SimZeiten“ aufgezeichneten Daten sowie die im Modus der Zustandsdarstellung in einer Tabelle „DigitalerSchatten“ aufzuzeichnenden Daten nach Excel zur weiteren Aufbereitung, Auswertung und Analyse exportiert werden können. Dieser Datenexport soll per Knopfdruck auf der Bedieneroberfläche ermöglicht werden. Wird der Knopf gedrückt, soll die Methode „Datenexport_Excel“ gestartet werden, die die Tabellen wie im Folgenden im Pseudocode dargestellt in einer Excel-Datei „Datenexport_DigitalerZwilling“ in zwei Arbeitsmappen („SimDaten_neu“ und „DigitalerSchatten_neu“ speichert.

Methode: Datenexport_Excel

Tabelle SimZeiten.schreibeExcelDatei(„Datenexport_DigitalerZwilling“,
Arbeitsmappe „SimData_neu“)

Tabelle DigitalerSchatten.schreibeExcelDatei(„Datenexport_DigitalerZwilling“,
Arbeitsmappe „DigitalerSchatten_neu“)

Methodenende

Mit der Möglichkeit dieses Datenexports soll gewährleistet werden, dass die aufgezeichneten Daten aufbereitet und analysiert werden können, um ggf. wieder als Eingabedaten verwendet zu werden. Die Datei „Datenexport_DigitalerZwilling“ ist mit exemplarischen Daten in Anhang IV – Dateien beigefügt.

Abschließend für diese Phase kann gesagt werden, dass alle im Modell zu verwendenden Bausteine, die im Konzeptmodell (Abschnitt 4.2.3) zur Abbildung von Systembestandteilen definiert wurden, wieder- und weiterverwendbar sein sollen. Diese Wieder- und Weiterverwendung soll durch die einfache, automatische Parametrisierung gewährleistet werden (s. Abschnitt 4.2.6.1), die vorgesehen ist. Da nun das formale Modell (exemplarisch für die zwei beschriebenen Prozesse) sowie die aufbereiteten Daten vorliegen, kann im nächsten Schritt die Implementierung beschrieben werden.

4.2.7 Implementierung

Mit Vorliegen des formalen Modells und der aufbereiteten Daten liegen nun alle Voraussetzungen für die Implementierung des Modells vor. Diese erfolgt mit der Software Tecnomatix Plant Simulation in der Version 14 (Siemens Industry Software GmbH). Plant Simulation stellt eine Klassenbibliothek mit vordefinierten Bausteinen bereit, die sich dafür eignen, bestimmte Bestandteile von Produktions- und Logistiksystemen abzubilden (vgl. Abschnitt 2.1.4). Das erleichtert die Umsetzung der in dem Konzept (Abschnitt 3.3) gestellten Anforderung, dass wieder- und weiterverwendbare Module im als Digitaler Zwilling zu nutzenden Simulationsmodell zu verwenden sind, die einfach parametrisiert und angepasst werden können. Mit Vorliegen dieser anpassungsfähigen Bausteinbibliothek können die im Konzeptmodell definierten Bausteine (vgl. Abschnitt 4.2.3.1) weitestgehend umgesetzt werden, ohne individuelle Bausteine erstellen zu müssen.

Table 4.7: Bausteine, die zur Implementierung ohne Anpassung genutzt werden

Im Konzeptmodell definierter Baustein	Baustein in Plant Simulation	Bestandteile der LEGO®-Fabrik
Lager	 Lager	- Containerlager - Lager VB
Einzelstation	 Einzelstation	- Regalbediengerät - QK 1 - QK 2
Förderstrecke	 Förderstrecke	- alle Förderstrecken der LEGO®-Fabrik
Drehtisch	 Drehtisch	- Drehtisch
Bearbeitungsstation	 Parallelstation	- Rüttler - Waschtrommel
Sammelbecken / Puffer	 Puffer	- Sammelbecken nach Rüttler - Sammelbecken nach Waschtrommel - Sammelbecken mit Schranke - Sammelbecken vor QK 1 - Sammelbecken vor QK 2 - Vertikalförderer (vor QK 2)
Kommissionierroboter	 PickAndPlace	- KR 1 - KR 2
Bandabweiser	 Umsetzer	- Bandabweiser 1 - Bandabweiser 2 - Bandabweiser 3

In Tabelle 4.7 wird dargestellt, welche im Konzeptmodell definierten Bausteine mittels welcher Bausteine in Plant Simulation modelliert werden. In der dritten Spalte werden außerdem die damit zu modellierenden Systembestandteile der LEGO®-Fabrik aufgeführt (vgl. dazu Abschnitt 4.1.2). Die Icons für die Bausteine aus Plant Simulation in der zweiten Tabellenspalte sind der Software entnommen (Siemens Industry Software GmbH).

Lediglich für die BEs (Container, VB und Golfbälle) werden Elemente der Klassenbibliothek modifiziert. Für Container und VB wird als Grundlage der Baustein „Förderhilfsmittel“ genutzt, für den eine andere Darstellung gewählt wird und dem die boolean-Attribute „einlagern“ und „rückwärtsausfahren“ ergänzt werden (das Attribut „leer“ ist bereits von Plant Simulation vordefiniert). Außerdem werden dem BE Container in der automatischen Parameterzuweisung (s. Abschnitt 4.2.6.1) die erhobenen Abmessungen (Länge, Breite, Höhe) und Kapazitäten (X-, Y-, Z-Dimension) zugewiesen. Auf die gleiche Weise wird das BE Verkaufsbehälter erzeugt, ebenfalls aufbauend auf dem „Förderhilfsmittel“. Dort wird als benutzerdefiniertes integer-Attribut „Kunde“ hinzugefügt. Um das BE Golfball abzubilden, wird „Fördergut“ aus der Klassenbibliothek kopiert und modifiziert. Dem BE Golfball werden die benutzerdefinierten boolean-Attribute „iO“ und „QK2“ hinzugefügt. Daraufhin werden die drei BEs Golfball_weiß, Golfball_schwarz und Golfball_rot abgeleitet und die spezifischen Farben für die Darstellung in 2D definiert. Dies hat den Vorteil, dass im Fall einer Änderung des übergeordneten BEs Golfball die abgeleiteten BEs automatisch mit geändert werden.

Die in der Modellformalisierung (Abschnitt 4.2.6) exemplarisch im Pseudocode dargestellten Algorithmen können, ebenso wie die anderen, nicht explizit beschriebenen Steuerungsalgorithmen, mittels des Bausteins „Methode“ in Plant Simulation implementiert werden. Für die Programmierung der Methoden steht die Sprache SimTalk zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.1.4). Für weitere Informationen zu SimTalk sei auf Bangsow (2011) und Eley (2012) verwiesen.

Im Konzeptmodell ist gefordert, dass ein generelles Teilsystem Qualitätskontrolle definiert wird, das aus einem Sammelbecken / Puffer, einer Förderstrecke und einer Einzelstation mit den zugehörigen Methoden besteht. In Plant Simulation steht in der Klassenbibliothek das sogenannte „Netzwerk“ zur Verfügung. In einem Netzwerk kann ein Modell angelegt werden. So wird auch das als Digitaler Zwilling zu nutzende Modell der LEGO®-Fabrik in einem Netzwerk angelegt, das „Gesamtfabrik“ genannt wird. Für ein generelles Netzwerk „Qualitätskontrolle“ wird ein neues Netzwerk erstellt und dort die Bausteine Puffer, Förderstrecke und Einzelstation aus der Klassenbibliothek von Plant Simulation eingefügt (s. Tabelle 4.7). Außerdem werden eine Methode zum Erzeugen eines Balles, wenn die entsprechende Nachricht aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik empfangen wird (s. Methode „Ballerkannt_QK“, Abschnitt 4.2.6.3), und eine Methode zum Auslesen des

Attributs „iO“ des jeweiligen Balles und dessen entsprechende Weiterleitung in Ausschuss oder zur Rutsche zum KR (s. Methode „Qualitätskontrolle“, Abschnitt 4.2.6.3) programmiert und in das Netzwerk „Qualitätskontrolle“ eingefügt. Somit können aus diesem Netzwerk die Netzwerke „Qualitätskontrolle 1“ und „Qualitätskontrolle 2“ abgeleitet werden, wo nur noch spezifische Anpassungen vorgenommen werden müssen. Bspw. ist in Letzteres der Baustein Vertikalförderer zwischen Sammelbecken und Förderstrecke einzufügen. Die so erstellten Netzwerke können in das Netzwerk „Gesamtfabrik“ eingefügt werden und mit dem Baustein „Übergang“ mit dem vorgelagerten Systembestandteil (Sammelbecken mit Schranke) und dem nachgelagerten (Rutschen zu KR bzw. Ausschuss) verbunden werden.

Mit der Verwendung und Anpassung der Bausteine aus der Klassenbibliothek von Plant Simulation sowie der Definition eigener BEs und Netzwerke kann die Anforderung aus dem Konzept erfüllt werden, dass anpassbare, generelle Module im digitalen Modell verwendet werden, die wieder- und weiterverwendbar sind.

Um die Tabellen zu realisieren, die im digitalen Modell zur Information über die Parameter und zur einfachen, automatischen Parametrisierung genutzt werden sollen, wird der Baustein „Tabelle“ aus der Klassenbibliothek verwendet. Wichtig ist, dass für die Spalten dieser Tabellen die Datentypen definiert werden, die dort eingetragen werden. Die Reihenfolge der Spalten muss also mit der Reihenfolge der Spalten in den einzelnen Arbeitsmappen aus dem Informationssystem übereinstimmen, damit der Datenimport und die automatische Parametrisierung komplikationslos funktionieren kann. So werden die sechs Tabellen für die Parameter der einzelnen Systembestandteile angelegt, eine Tabelle für die Aufzeichnung der Nachrichten und Zeiten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik und eine Tabelle für die Aufzeichnung der Eintrittszeiten in die einzelnen Module im Simulationsmodus (s. Abschnitte 4.2.6.1 und 4.2.6.5). Außerdem wird eine Tabelle angelegt, in der aufgezeichnet wird, wie viele Bälle als „nicht in Ordnung“ und als „in Ordnung“ geprüft wurden und schließlich eine Tabelle, der die Belegung des Containerlagers entnommen werden kann sowie eine Tabelle, über die der Benutzer über das Eintippen von Prozentanteilen einstellen kann, mit wie vielen und welchen Arten von Bällen der Container im digitalen Modell zu Beginn befüllt wird.

Für die Datenkommunikation mit der Steuerung der LEGO®-Fabrik wird der Baustein Socket in Plant Simulation verwendet. In diesem wird eingestellt, dass die Verwendung als Server-Socket erfolgen soll. Zudem wird der Port 33333 eingetragen, auf den sich mit dem Programmierer der LEGO®-Fabriksteuerung geeinigt wurde. Als Protokoll wird TCP gewählt (s. Abschnitt 2.1.4) und als sogenannte „Rückrufmethode“ wird die Methode „Nachrichteninterpretation“ angegeben, die immer aufgerufen wird, wenn eine Nachricht

empfangen wird. Diese Methode wird gemäß der Definition in Abschnitt 4.2.6.2 implementiert.

Außerdem wird in dem erstellten Konzept gefordert, dass eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche zu erstellen ist (s. Abschnitt 3.3). Diese wird mit Hilfe von Kästchen und Beschriftungen in Plant Simulation gegliedert und beschrieben, damit zu erkennen ist, welche Informationen und Funktionen an welcher Stelle zu finden sind. Informationen über den Fabrikzustand werden über den Baustein „Variable“ aus der Klassenbibliothek dargestellt. Damit können die Akkustände der Bricks, die empfangene Nachricht, die Anzahl gezählter Bälle etc. direkt in der Bedienoberfläche dargestellt werden. Mit dem Baustein „Dropdownliste“ soll zwischen dem Simulationsmodus und dem Modus der Zustandsdarstellung gewählt werden können. Durch Auswahl des jeweiligen Modus aus dieser Liste soll der Socket ein- oder ausgeschaltet werden. Auch die zu implementierende Quelle für den Simulationsmodus soll über eine solche Dropdownliste ein- und ausgeschaltet werden können. Für eine leichte Bedienung soll der beschriebene Datenimport und -export über Knopfdruck erfolgen können. Dafür wird der Baustein „Schaltfläche“ verwendet, der dann die entsprechenden Methoden aufruft, die anhand der Beschreibungen in der Modellformalisierung implementiert werden (s. Abschnitte 4.2.6.1 und 4.2.6.5). Auch zwischen der Nutzung der QK 1 und QK 2 soll mittels einer Schaltfläche ausgewählt werden können. Zur besseren Visualisierung wird außerdem ein Bild der LEGO®-Fabrik in den Hintergrund des Netzwerks „Gesamtfabrik“ gelegt. So kann leicht identifiziert werden, welches Systembestandteil wie dargestellt wird.

Die Prozesse, Methoden und Funktionen, die aufgrund des Umfangs nicht in den Phasen der Modellerstellung beschrieben werden können, werden ebenfalls auf diese Weise und durch die aufgeführten Bausteine implementiert. Auf diese Weise entsteht das als Digitaler Zwilling nutzbare Simulationsmodell der LEGO®-Fabrik, das im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

4.2.8 Als Digitaler Zwilling nutzbares ereignisdiskretes Simulationsmodell

Mit der Implementierung des Konzeptmodells in das Werkzeug Tecnomatix Plant Simulation entsteht das als Digitaler Zwilling nutzbare ereignisdiskrete Simulationsmodell der LEGO®-Fabrik als Phasenergebnis. Eine optische Darstellung gibt Abbildung 4.26. Außerdem ist das erstellte Modell in Anhang IV – Dateien („Digitaler Zwilling Lego-Fabrik“) zu finden. Im Folgenden werden der Modellaufbau, die Umsetzung des formalen Modells und die Nutzungsmöglichkeiten (exemplarisch) erläutert.

Die einzelnen Objekte der LEGO®-Fabrik (s. Abbildung 4.8) sind in dem erstellten Modell durch entsprechende Bausteine, die in Tabelle 4.7 festgelegt und zugeordnet sind, modelliert. Das Bild der LEGO®-Fabrik, das in den Hintergrund gelegt ist, dient der einfachen Identifizierung der einzelnen Systembestandteile und zeigt direkt, wie diese abgebildet sind. Die definierten Teilsysteme Qualitätskontrolle 1 und Qualitätskontrolle 2 sind allerdings nicht sichtbar, da sie nur durch das Symbol des Netzwerks dargestellt werden. Aus diesem Grund wird in Abbildung 4.27 der Inhalt des Teilsystem Qualitätskontrolle 1 gezeigt, um ein Verständnis zu geben, wie es in das Netzwerk „Gesamtfabrik“ eingebunden ist.

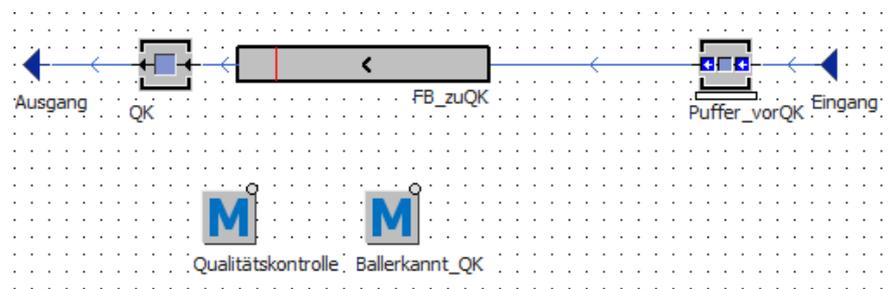


Abbildung 4.27: Teilsystem Qualitätskontrolle 1

Mittels des Bausteins „Übergang“ (Eingang und Ausgang) erfolgt die Verknüpfung mit den Objekten im Netzwerk „Gesamtsystem“, das in Abbildung 4.26 abgebildet ist. Das Objekt „Puffer_vorQK“ stellt das Sammelbecken vor der QK 1 dar. Das Objekt „FB_zuQK“ stellt das Förderband zu QK 1 mit dem darauf installierten Farbsensor zum Erkennen der Bälle dar. „QK“ bildet schließlich das Systembestandteil QK 1 ab, wo die Weiterbeförderung des geprüften Balls entweder zur Rutsche zum KR oder in den Ausschuss vorgenommen wird.

Im Folgenden wird die Oberfläche des erstellten Modells erklärt. Im linken oberen Bereich der Bedienoberfläche in Abbildung 4.26 kann zwischen den Modi „Simulation“ (Socket ausgeschaltet, Modell wartet nicht auf Nachrichten) und „Zustandsdarstellung“ in Echtzeit (Socket eingeschaltet, Modell ist empfangsbereit für Nachrichten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik) gewählt werden.

Im Simulationsmodus können theoretisch Experimente definiert werden und somit Erkenntnisse über das System mit Hinblick auf die DLZ erlangt werden. Das Experimentieren ist nicht Teil dieser Arbeit. Der Simulationsmodus ist zwar implementiert, so dass die Simulation der Prozesse in der Fabrik möglich ist, aber zum Durchführen von Experimenten sind Experimentpläne erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit nicht erstellt werden. Im Simulationsmodus wird digital abgebildet, wie sich ein Container und die darin enthaltenen Bälle in der LEGO®-Fabrik verhalten. Dazu kann in der Tabelle

„Parameter_Ballankunft“ angegeben werden, wie viele Bälle welcher Art (rot, schwarz, weiß und „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung“) in dem angelieferten Container sein sollen. Die Containeranlieferung kann zum einen mittels der Quelle „Ankunft_LKW“ vorgenommen werden, die in diesem Fall in definierten Abständen (wobei unterschiedliche Verteilungen zu Grunde gelegt werden können, s. Abbildung 12.2) Container erzeugt und diese anhand der in die Tabelle eingegebenen Daten füllt. Zum anderen besteht die Möglichkeit, die Containerankunft durch Betätigen der Schaltfläche „Containerankunft“ manuell auszulösen. Dabei wird ein Container erzeugt und ebenfalls aufgrund der in die Tabelle „Parameter_Ballankunft“ eingetragenen Daten gefüllt. Die implementierten Abläufe entsprechen den Abläufen der LEGO®-Fabrik, so dass aus dem Verhalten im digitalen Modell auf das Verhalten in der LEGO®-Fabrik geschlossen werden kann. Es wird deutlich, dass auch die in der realen Modell-Fabrik noch nicht realisierten Prozesse und Systembestandteile abgebildet sind. Diese Abläufe sind im erstellten digitalen Modell so implementiert, wie sie auch für die LEGO®-Fabrik vorgesehen sind. Somit kann das digitale Modell bei der Programmierung und Planung unterstützen. Daten, für die Annahmen getroffen wurden, können nach Realisierung einfach durch die Echtdateien ersetzt werden.

Im Modus der Zustandsdarstellung werden Daten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik empfangen. In diesem Zustand ist der Socket eingeschaltet und empfangsbereit für Nachrichten. Die definierten Nachrichten sind in Tabelle 9.1 aufgeführt. Die Methode „Nachrichteninterpretation“ (s. dazu Abschnitt 4.2.6.2) wird durch den Socket aufgerufen, sobald eine Nachricht empfangen wurde und dient der Interpretation der Nachrichten, um daraufhin bestimmte Aktionen auszuführen. Dafür bekommt die Methode die Nachricht als String vom Socket übergeben. Der parametrisierte Baustein „Socket“ ist in „Anhang VI – Abbildungen aus dem erstellten Modell“ in Abbildung 12.1 gezeigt. Damit die Datenkommunikation funktioniert ist es wichtig, dass der Computer, auf dem das digitale Modell ausgeführt wird und der Computer, auf dem die Steuerung der LEGO®-Fabrik läuft, im selben Netzwerk sind und zur Kommunikation über die Sockets den selben Port nutzen. In der Steuerung der LEGO®-Fabrik muss die IP-Adresse des Rechners eingetragen werden, auf dem das digitale Modell läuft. Es ist zu beachten, dass sich diese IP-Adresse ändern kann, wenn der Rechner sich neu in das Netzwerk einwählt. Sollte die Kommunikation nicht funktionieren, ist dies zu prüfen. Der Programmcode der implementierten Methode „Nachrichteninterpretation“, die in Abschnitt 4.2.6.2 im Pseudocode beschrieben ist, wird in Abbildung 11.6 ausschnittsweise gezeigt. Im Modus Zustandsdarstellung wird im digitalen Modell anhand der empfangenen Nachricht dargestellt, was tatsächlich in der LEGO®-Fabrik passiert. Damit können Prozesse digital überwacht werden und sich über den aktuellen Systemzustand informiert werden. Die

Darstellung im implementierten Modell erfolgt wie in der Prozessformalisierung innerhalb des formalen Modells beschreiben (s. Abschnitt 4.2.6.3).

Der geforderte Datenimport und Datenexport kann per Klick auf die Schaltflächen „Datenimport“ oder „Datenexport“ vorgenommen werden. Mittels der Methode „Datenimport_aus_Informationssystem“ werden die Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik (Excel-Datei) in die sechs Tabellen in dem Bereich „Daten aus Informationssystem“ übernommen und die automatische Parametrisierung vorgenommen. Diese Methode ist wie in Abschnitt 4.2.6.1 beschrieben implementiert und in Abbildung 11.2 in „Anhang V – Programmcodes und Methoden“ dargestellt. Auch die folgenden Methoden sind in diesem Teil des Anhangs zu finden. In der Methode „Datenimport_aus_Informationssystem“ wird die Methode „Parameterzuweisung“ aufgerufen, die zum Teil in Abschnitt 4.2.6.1 formalisiert ist. Aus diesem Grund ist zusätzlich der Programmcode dieser Methode in Abbildung 11.4 ausschnittsweise abgebildet. Bei der automatischen Parameterzuweisung werden die Daten aus den Tabellen entnommen und mittels SimTalk in die Bausteine geschrieben. Dies ermöglicht, dass Änderungen in der LEGO®-Fabrik (bspw. geänderte Abmessungen, Zeiten, Geschwindigkeiten) einfach in das Informationssystem der LEGO®-Fabrik eingetragen werden können. Mit einem Klick auf „Datenimport“ im Modell werden die aktualisierten Daten übernommen und das digitale Modell ist wieder aktuell. Möchte der Benutzer allerdings mittels anderer Parameter testen, kann dies durch das eingeben der gewünschten Parameter in die entsprechende Tabelle im digitalen Modell geschehen. Mit Starten der Simulation werden die Parameter (ebenfalls durch die Methode „Parameterzuweisung“) automatisch für die einzelnen Systembestandteile übernommen. Die Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik werden zu diesem Zweck nur übernommen, wenn explizit die Schaltfläche „Datenimport“ betätigt wird. Dies erlaubt das Experimentieren. Wird die Schaltfläche „Datenexport“ betätigt, wird die Methode „Datenexport_Excel“ ausgeführt, deren Inhalt Abbildung 11.5 entnommen werden kann. Hiermit wird der Inhalt der Tabellen „DigitalerSchatten“ (Empfangene Nachrichten mit Empfangszeit) und „SimZeiten“ (Eintrittszeiten der BEs in die Module) nach Excel exportiert, um dort weiter aufbereitet und analysiert werden zu können. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in dem digitalen Modell auf Basis des Dateipfads auf die Excel-Dateien „Informationssystem“ und „Datenexport_DigitalerZwilling“ zugegriffen wird. Werden die Dateien verschoben, ist der Dateipfad anzupassen, da ansonsten Fehler beim Datenimport und Datenexport auftreten.

Im Rahmen der Beschreibung innerhalb dieser Arbeit können nicht alle im Modell enthaltenen Methoden und Bausteine thematisiert und gezeigt werden, da es sehr viele

sind. Diese sind daher dem beigefügten Modell „Digitaler Zwilling Lego-Fabrik“ (Anhang IV – Dateien) zu entnehmen, wo die Methoden kommentiert sind. Die in der Prozessformalisierung im Pseudocode dargestellten Methoden sind nach der dort aufgeführten Logik im erstellten Modell mit notwendigen Ergänzungen (z. B. Ausgaben in der Konsole oder für den fehlerfreien Ablauf wichtige Befehle) implementiert.

Mit Vorliegen des als Digitaler Zwilling nutzbaren ereignisdiskrete Simulationsmodells wird dessen V&V notwendig. Diese wird in dem nächsten Abschnitt beschrieben.

4.2.9 Verifikation und Validierung

Für die V&V können verschiedenste Methoden anwenden, wobei deren Eignung von dem jeweiligen Phasenergebnis abhängt (vgl. Rabe et al. 2008, S. 113). Auch mit der Durchführung der V&V kann nicht gewährleistet werden, dass das Modell absolut frei von Fehlern ist. Sie dient aber dazu, die Glaubwürdigkeit zu erhöhen, wenn bei der Anwendung keine Fehler aufgezeigt werden (vgl. Abschnitt 2.1.5 und Rabe et al. 2008, S. 93).

Die V&V ist grundsätzlich an jedem Phasenergebnis durchzuführen, was auch in dem in Abschnitt 3.3 entwickelten Konzept verlangt wird, das hier angewendet wird. Aufgrund des Umfangs kann die V&V in dieser Arbeit allerdings nur exemplarisch für die aufbereiteten Daten und das implementierte Modell beschrieben werden. In der Aufgabenspezifikation sind Vorgaben zu V&V enthalten (s. Tabelle 4.4). Dabei soll geprüft werden, ob das digitale Modell den Anforderungen aus Abbildung 3.3 und aus den einzelnen Phasenbeschreibungen genügt. Außerdem soll sichergestellt werden, dass sich das digitale Modell hinsichtlich der Prozesse und DLZ wie die LEGO®-Fabrik verhält. Dazu erfolgen in diesem Abschnitt drei Schritte. Zum einen wird das erstellte Modell mit einer Mitarbeiterin des Fachgebiets pfp durchgegangen um damit zu prüfen, ob die Systembestandteile und Prozesse der LEGO®-Fabrik korrekt abgebildet sind (vgl. Rabe et al. 2008, S. 104 f.: „Strukturiertes Durchgehen“). Zum anderen wird ein Durchlauf des Modells in dem Modus der Zustandsdarstellung durchgeführt, mit dem überprüft wird, ob die Nachrichten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik an das erstellte Modell tatsächlich empfangen werden und auch der gewünschten Qualität entsprechen, das heißt in Echtzeit übermittelt werden und auch als interpretierbare Zeichenkette (String) ankommen. Zudem soll mit dem Durchlauf überprüft werden, ob der aktuelle Zustand der LEGO®-Fabrik auch tatsächlich korrekt im Modell aufgrund der empfangenen Nachrichten abgebildet wird. Dabei wird die Darstellung im Modell mit den Zuständen in der LEGO®-Fabrik visuell abgeglichen. Mit Hilfe der Animation wird zusätzlich geprüft, ob die Voraussetzungen für

die Simulation gegeben sind. Außerdem werden die in Abbildung 3.3 dargestellten Anforderungen durchgegangen und damit ermittelt, ob sie im erstellten Modell erfüllt sind.

Durchgehen des Modells

Mit dem strukturierten Durchgehen mit einer Mitarbeiterin des Fachgebiets pfp, die mit den Prozessen der LEGO®-Fabrik vertraut ist und fachkundig in Bezug auf die Themen der Simulation, Industrie 4.0 und des Digitalen Zwillings ist, wird zum einen geprüft, ob die Prozesse und Bestandteile der LEGO®-Fabrik korrekt abgebildet sind. Dafür werden zunächst die einzelnen Objekte im digitalen Modell betrachtet und mit den Systembestandteilen der LEGO®-Fabrik verglichen. So kann festgestellt werden, dass alle wesentlichen Systembestandteile abgebildet sind. Mithilfe der Animation werden die Prozesse in der Fabrik überprüft und beobachtet, ob die BEs das digitale Modell so durchlaufen, wie es in der LEGO®-Fabrik mit den Containern, VBs und Golfbällen der Fall ist (bzw. für noch nicht implementierte Fabrikteile angedacht ist). Damit kann sichergestellt werden, dass die Prozesse und Abläufe korrekt implementiert und die Methoden korrekt programmiert sind. Die Durchführung dieser Begutachtung ist erfolgreich durchgeführt, da festzustellen ist, dass das erstellte Modell im Sinne der Verifikation richtig ist und im Sinne der Validierung das richtige Modell für die Erfüllung des Nutzungszwecks ist (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Prüfung des Modus Zustandsdarstellung

Die Prüfung, ob der Modus „Zustandsdarstellung“ korrekt funktioniert, also ob der aktuelle Zustand der LEGO®-Fabrik aufgrund von empfangenen Nachrichten korrekt dargestellt wird, kann mittels eines Testdurchlaufs erfolgen. Dazu werden die Computer mit der LEGO®-Steuerung und dem digitalen Modell mit dem selben W-Lan-Netzwerk verbunden und gemeinsam mit dem Programmierer der LEGO®-Fabriksteuerung die erforderlichen Daten für die Nachrichtenübermittlung eingegeben (IP-Adresse des Computers, auf dem das digitale Modell läuft in der Klasse „LegoClient“ der LEGO®-Fabriksteuerung (s. Abbildung 11.1) sowie den zu nutzenden Port 3333 in die Klasse „LegoClient“ und den Socket im digitalen Modell). Anschließend wird im digitalen Modell der Modus „Zustandsdarstellung“ ausgewählt, womit das digitale Modell empfangsbereit für Nachrichten aus der LEGO®-Fabriksteuerung ist. Beim Starten der LEGO®-Fabriksteuerung werden dabei die aktuellen Akkustände an die digitale Fabrik übermittelt. Diese Übermittlung funktioniert erfolgreich, woraufhin auf der Bedienoberfläche des digitalen Modells die aktuellen Akkustände angezeigt werden (s. Abbildung 4.28). Der Akkustand des Bricks 117 wird dabei rot markiert, da er bald geladen werden muss (das ist

unter 7000 der Fall). Somit kann der Nutzer direkt im dem digitalen Modell sehen, wenn ein Eingreifen notwendig ist.

Akkustände der Bricks		
B101=7221	B111=7603	B117=6546
B105=7142	B113=8393	B118=7680
B106=7786	B114=7631	B119=8263
B107=7396	B115=8451	
B108=7688	B116=7281	

Abbildung 4.28: Erfolgreiche Übermittlung der Akkustände

Anschließend wird in der Steuerung der LEGO®-Fabrik der Durchlauf gestartet. Hierbei wird ein Container mit sieben weißen Bällen, die als „in Ordnung“ gelten, auf das Förderband zum Drehtisch gestellt. Sobald das Förderband startet wird die Nachricht „CA“ übermittelt, die für die Ankunft eines Containers steht (für die Bedeutung der Nachrichten s. Tabelle 9.1). Mittels Beobachtung kann festgestellt werden, dass der Container in der LEGO®-Fabrik und der Container im digitalen Modell absolut zeitgleich starten. Auch die Übermittlung der Nachricht „TF“, also die Betätigung des Berührungssensors am Drehtisch, wird erfolgreich zur korrekten Zeit übermittelt. Ebenso werden die folgenden Nachrichten „LF“ (Übermittlung der Nachricht über die Betätigung des Sensors am Lifter), „WS“ (Nachricht zum Starten der Förderbänder und der Waschtrommel) sowie „CF“ (Ball am Berührungssensor am Förderband zum Zählen der Bälle erkannt) und „W1“ (weißen Ball als „in Ordnung“ am Farbsensor bei QK 1 erkannt) erfolgreich zur korrekten Zeit übermittelt. Da die Nachrichtenübermittlung in dem digitalen Modell in der Tabelle „DigitalerSchatten“ aufgezeichnet wird (s. Abschnitte 4.2.6.2 und 4.2.8), kann auch im Nachhinein nachvollzogen werden, welche Nachricht zu welchem Zeitpunkt empfangen wurde. Die Aufzeichnung ist in Abbildung 4.29 ausschnittsweise dargestellt. Es wird angezeigt, dass alle sieben Bälle erkannt wurden (sieben Einträge „CF“). Der erste Ball am Farbsensor nach 53,9288 Sekunden erkannt (die folgenden Lesungen des Farbsensors sind in der Abbildung nicht mehr dargestellt). Die Nachrichten in Bezug auf die QK 2 und die folgenden Systembestandteile (z. B. Kommissionierung) und das Containerlager können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht auf diese Weise getestet werden, da die Abläufe bislang nicht in der LEGO®-Fabrik realisiert sind. Durch manuelles Senden von Nachrichten aus Java kann aber ebenfalls überprüft werden, ob die anderen Nachrichten korrekt interpretiert werden, da nach dem durchgeführten Testdurchlauf gewährleistet ist, dass die Nachrichten korrekt in der gewünschten Qualität (Echtzeit) übermittelt werden. Da auch deren Interpretation in dem digitalen Modell korrekt funktioniert, ist damit der Modus Zustandsdarstellung erfolgreich verifiziert und validiert.

	string 1	time 2
string	Nachricht	Zeitpunkt
1	ST	0.0000
2	B101-7221	0.0000
3	B105-7142	0.0000
4	B106-7786	0.0000
5	B107-7396	0.0000
6	B108-7688	0.0000
7	B111-7603	0.0000
8	B113-8393	0.0000
9	B114-7631	0.0000
10	B115-8451	0.0000
11	B116-7281	0.0000
12	B117-6546	0.0000
13	B118-7680	0.0000
14	B119-8263	0.0000
15	CA	0.0000
16	TF	3.4714
17	LF	10.3095
18	WS	28.1147
19	TF	31.6617
20	CF	39.4333
21	CF	40.8759
22	CF	41.0033
23	CF	41.1125
24	CF	44.4100
25	CF	46.7476
26	CF	46.8555
27	W1	53.9288

Abbildung 4.29: Aufzeichnung der empfangenen Nachrichten aus dem Test (Ausschnitt)

Prüfung des Modus Simulation

Der Simulationsmodus, der ebenfalls im erstellten Modell möglich ist, wird in dieser Arbeit nur am Rand betrachtet, da die Besonderheit die Datenkommunikation, also die Vernetzung des digitalen Modells mit dem realen System, der LEGO®-Fabrik, im Sinne des Digitalen Zwillinges darstellt. Da aber als Anforderung formuliert ist, dass die Simulation ermöglicht werden soll, um darauf aufbauend Experimente durchzuführen, wird mittels der Animation getestet, ob das Verhalten des digitalen Modells im Rahmen der getätigten Parametrisierung plausibel ist. Rabe et al. (2008) weisen darauf hin, dass die Anwendung der Animation als V&V-Technik viele Nachteile mit sich bringt (ebd., S. 95 f.). Deshalb wird an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die V&V des Simulationsmodus im Nachgang an diese Arbeit vertieft werden muss, um Experimente zu ermöglichen, mit denen valide Erkenntnisse erlangt werden können. Für den Simulationsmodus werden drei Testläufe durchgeführt. Einer mit sieben Bällen (sieben weiße Bälle, dabei 100% als „in Ordnung“), einer mit 20 Bällen und einer mit 30 Bällen (50% der Bälle werden als „in Ordnung“ erzeugt, 50% als „nicht in Ordnung“). Bei den ersten beiden Tests wird nur QK 1 genutzt. Bei dem Test mit 30 Bällen wird auf QK 2 umgeschaltet, nachdem 15 Bälle in QK

1 eingetreten sind. Nach Durchführung dieser Tests kann gesagt werden, dass keine Fehler auftreten und der Durchlauf der BEs plausibel ist. Zudem können bei dem ersten Test mit sieben Bällen die Zeiten mit dem Durchlauf im Modus Zustandsdarstellung verglichen werden, da die gleichen Anfangsbedingungen zu Grunde liegen. Dabei kann die Tabelle „SimDaten“ genutzt werden, in der die Eintrittszeiten der BEs in die einzelnen Objekte aufgezeichnet werden. Tatsächlich ist die Abweichung der Zeiten gering (0,2 bis maximal 3 Sekunden). Zur vollständigen V&V des Simulationsmodus sind im Nachgang aber definitiv weitere Testdurchläufe mit unterschiedlichen Parametern notwendig, die nicht Bestandteil dieser Arbeit sind.

Prüfung gegen die Anforderungen aus Abbildung 3.3

Im Folgenden werden die Anforderungen aus Abbildung 3.3 aufgegriffen und deren Umsetzung im Modell erläutert sowie ggf. notwendige weitere Schritte identifiziert. Das Ziel mit der Konzeptanwendung an der LEGO®-Fabrik ist es, zu prüfen, ob die Anforderungen, die an einen Digitalen Zwilling zur Nutzung im Kontext von Industrie 4.0 gestellt werden, mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation erfüllt werden können. Nicht erfüllbare Anforderungen schränken daher die Eignung der ereignisdiskreten Simulation für dieses Vorhaben ein.

Möglichst genaue Abbildung des Systems mit seinen Bestandteilen im digitalen Modell zur Nachvollziehbarkeit des aktuellen Zustands

Mit der digitalen Abbildung aller relevanten Systembestandteile der LEGO®-Fabrik und der korrekten Darstellung der Prozesse und des aktuellen Zustands der LEGO®-Fabrik durch die Datenkommunikation kann dieser Punkt als erfüllt betrachtet werden. Die Abbildung in 2D wird dabei als ausreichend angesehen. Eine Darstellung in 3D würde die Veranschaulichung selbstverständlich wesentlich verbessern. Der damit einhergehende Aufwand ist allerdings sehr groß.

Einfache Parametrisierbarkeit

Die einfache Parametrisierbarkeit ist dadurch gegeben, dass die Daten aus dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik importiert werden können und automatisch den einzelnen Bestandteilen zugewiesen werden können.

Definition und Nutzung einfach anpassbarer Module / Teilsysteme im Modell

Mit der Verwendung der vordefinierten Bausteine aus der Klassenbibliothek von Plant Simulation, ist die Modellierung der Systembestandteile der LEGO®-Fabrik im erstellten Modell mittels Modulen erfolgt, die durch die Eingabe spezifischer Parameter angepasst werden können. Dabei sind die meisten Bausteine der Klassenbibliothek mehrfach

verwendet und entsprechend der realen Systembestandteile spezifisch parametrisiert. Für das Teilsystem Qualitätskontrolle ist ein Unternetzwerk erstellt, das das Einfügen und Anpassen einer weiteren QK, falls dies nötig wird, stark vereinfacht. Somit ist auch diese Anforderung erfüllt, die es ermöglicht, dass einzelne Module im digitalen Modell einfach ausgetauscht, gelöscht oder hinzugefügt werden können.

Umfangreiche Dokumentation

Die Anforderung nach umfangreicher Dokumentation kann für die Zielbeschreibung und Aufgabenspezifikation als weitestgehend erfüllt betrachtet werden, da alle anwendbaren Punkte aus der Dokumentenstruktur nach Rabe et al. (2008) (s. Anhang I – Dokumentenstrukturen) thematisiert sind. Aufgrund des Umfangs dieser Arbeit muss sich bei der Dokumentation der Modellbildung auf exemplarische Beschreibungen beschränkt werden. Auch die umfangreiche Beschreibung des entstandenen Modells ist noch nicht erfüllt. Es wird deutlich, dass auch bei der Erstellung eines digitalen Modells eines im Vergleich zu industriellen Produktions- und Logistiksystemen weniger komplexen Systems die Dokumentation sehr umfangreich sein muss, wenn Anforderungen mit einbezogen werden, die auf die Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells abzielen. Die im erstellten Konzept Abbildung 3.4 geforderte Erstellung eines Benutzerhandbuchs muss dafür noch erfolgen. In Abschnitt 4.2.8 ist zwar eine kurze Beschreibung der Nutzung gewährleistet, diese hat allerdings nicht den erforderlichen Umfang, dass auch unerfahrene Benutzer mit dem Modell umgehen können. Die Erweiterung der Dokumentation kann im Anschluss an diese Arbeit erfüllt werden.

Möglichkeit zur Durchführung von Experimenten

Neben dem Modus der Zustandsdarstellung ist im erstellten Modell ebenfalls der Simulationsmodus möglich. Hier können die Prozesse und Durchläufe im erstellten Modell ohne den Empfang von Nachrichten abgebildet werden. Dies gibt die Möglichkeit zur Durchführung von Experimenten. Diese sind zwar nicht Teil dieser Arbeit, können aber im Nachgang definiert werden. Mit der Aufzeichnung der Simulationsdaten in der Tabelle „SimDaten“ und deren Exportmöglichkeit nach Excel ist bereits ein entscheidender Beitrag zur Auswertbarkeit von Experimenten in Bezug auf die Durchlaufzeiten geleistet. Der Simulationsmodus muss weiter verifiziert und validiert werden.

Aufzeichnung und Verwendung realer Nutzungsdaten (Digitaler Schatten)

Mit der Aufzeichnung der übermittelten Nachrichten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell werden die realen Nutzungsdaten aufgezeichnet. Diese können nach Excel exportiert und ausgewertet werden. Mit der Verwendung weiterer Sensorik und der

Definition weiterer Nachrichten ist es denkbar, dass diese Daten zur Aktualisierung des Informationssystems genutzt werden können, indem bspw. Zeiten aktualisiert werden, die aufgrund der Zustandsdarstellung ermittelt werden und von den gestoppten Zeiten abweichen. Durch den ermöglichten Datenimport aus dem Informationssystem in das digitale Modell kann dieses so permanent verbessert werden, vor allem in Hinblick auf den Simulationsmodus. Somit kann gesagt werden, dass die Aufzeichnung der realen Nutzungsdaten realisiert ist. Die Verwendung dieser Daten ist ebenfalls möglich, geschieht momentan allerdings noch nicht.

Anforderungen an das Simulationswerkzeug

Das erstellte Modell ist in Tecnomatix Plant Simulation Version 14 implementiert. Dieses Simulationswerkzeug stellt eine anpassungsfähige Bausteinbibliothek zur Verfügung, die bei der Erstellung genutzt wurde. Außerdem ist in Tecnomatix Plant Simulation die Nutzung verschiedener Schnittstellen möglich (s. Abschnitt 2.1.4), womit die Möglichkeit zur Interoperabilität und zur Kopplung mit anderen Werkzeugen oder Systemen vorliegt. In dem erstellten Modell ist der Baustein Socket zur Kommunikation mit der Java-basierten Programmierumgebung leJOS genutzt sowie die Möglichkeit des Imports aus Excel und Exports nach Excel gewährleistet. Dies ist nur ein kleiner Teil der bereitgestellten Schnittstellen. Bezüglich der Ausfallsicherheit können aufgrund fehlender Informationen keine Angaben gemacht werden. Während der Modellerstellung und der Tests in Plant Simulation konnte kein Ausfall festgestellt werden. Zu einer Servicebetreuung rund um die Uhr kann ebenfalls keine Aussage getroffen werden, da hierzu keine Informationen vorliegen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Eigenschaften nicht vorliegen. Generell kann gesagt werden, dass Plant Simulation ein Simulationswerkzeug ist, das fast alle Anforderungen erfüllt und daher notwendige Möglichkeiten mitbringt, um ein darin erstelltes Modell als Digitalen Zwilling nutzen zu können.

Nach Durchgehen dieser konkreten Anforderungen kann ebenfalls die Erfüllbarkeit der generellen Anforderungen an ein als Digitaler Zwilling zu nutzendes ereignisdiskretes Simulationsmodell, die in Abbildung 3.2 dargestellt sind, diskutiert werden.

Das reale System (LEGO®-Fabrik) ist im digitalen Modell abgebildet, womit die Anforderung nach der *digitalen Abbildung des realen Systems* erfüllt ist. Die Abbildung der *Flexibilität* ist gewährleistet, da alle Bestandteile des digitalen Modells leicht parametrisierbar sind. Auch die *Wandlungsfähigkeit* kann als erfüllt betrachtet werden, da durch die Definition und Nutzung anpassbarer, austauschbarer Module die einfache Anpassbarkeit des Modells an geänderte Gegebenheiten gewährleistet ist, die bei Erstellung noch nicht vorgedacht werden können. Damit wird die

lebenszyklusübergreifende Nutzung des digitalen Modells über den Existenzzeitraum der LEGO®-Fabrik ermöglicht, da alle Änderungen im realen System einfach im digitalen Modell umgesetzt werden können. Die genutzten und definierten Bausteine sind wieder- und weiterverwendbar, da sie zum einen für neue Systembestandteile genutzt werden können und zum anderen an neue Gegebenheiten angepasst werden können.

Mit dem erstellten Modell erfährt der *Nutzer Unterstützung*. Zum einen kann er sich über den aktuellen Zustand der LEGO®-Fabrik informieren (Darstellung des Zustands in Echtzeit), zum anderen kann er mittels der Simulation die Prozesse und DLZ in der Fabrik nachvollziehen und testen. Somit kann das Modell ebenfalls zur operativen Planung, aber auch für die Erklärung der Abläufe in der LEGO®-Fabrik für Studenten dienen, die ebenfalls an der Fabrik arbeiten möchten und diese noch nicht kennen. Eine *Schnittstelle für den Datenaustausch in Echtzeit* ist mit dem Socket implementiert. Damit ist das erstellte Modell mit dem realen System vernetzt. Ebenso ist exemplarisch eine Anbindung an ein Informationssystem erfolgt. In der Realität ist dieses höchstwahrscheinlich eher in Form eines ERP-Systems realisiert. Die Möglichkeit dieser Kopplung muss geprüft werden, ebenso wie die Interoperabilität mit anderen Simulationswerkzeugen. Ob das erstellte Modell *robust und zuverlässig* ist, kann nur mit Hilfe weiterer Tests und Erfahrungen beurteilt werden.

Erfüllung der Anforderungen aus den anderen Phasenergebnissen

Nach der Implementierung des Modells können alle Anforderungen aus den Phasenergebnissen weitestgehend als erfüllt betrachtet werden, auch wenn teilweise weitere Schritte notwendig sind (V&V des Simulationsmodus und Definition sowie Durchführung von Experimenten). Die in der Aufgabenstellung geforderten Ziele sind erreicht und die benötigten Daten in aufbereiteter Form zur Nutzung vorhanden. Die im Konzeptmodell vorgegebene Modellierung ist realisiert, ebenso wie die vorgesehene Datenkommunikation, und die Prozessimplementierung, die im formalen Modell spezifiziert sind.

Anforderungen an einen Digitalen Zwilling

Abschließend kann gesagt werden, dass das erstellte Modell alle Anforderungen an einen Digitalen Zwilling erfüllt und daher als solcher nutzbar ist. Es bildet das reale System digital ab, ist mit diesem vernetzt, empfängt die realen Daten der LEGO®-Fabrik und verarbeitet diese in Echtzeit, ist aufgrund des modularen Aufbaus und der einfachen Parametrisierung über die gesamte Existenzdauer der LEGO®-Fabrik nutzbar, gibt die Möglichkeit zur Simulation im Simulationsmodus, womit Erkenntnisse gewonnen werden können, enthält

wesentliche Informationen zu Abläufen im realen System, besitzt definierte Schnittstellen für den Datenaustausch und die Verknüpfung unterschiedlicher Modelle, stellt den aktuellen Systemzustand der LEGO®-Fabrik dar und generiert einen Digitalen Schatten, der ausgewertet werden kann. Dessen Nutzung ist allerdings noch nicht implementiert.

Damit liegt das als digitaler Zwilling nutzbare ereignisdiskrete Simulationsmodell in verifizierter und validierter Form (für den Modus Zustandsdarstellung gänzlich, für den Modus der Simulation eingeschränkt) vor.

4.3 Weitere Schritte in Bezug auf das erstellte Modell

Abschließend zur Anwendung des erstellten Konzepts an der LEGO®-Fabrik können weitere Schritte identifiziert werden, die im Nachgang der vorliegenden Arbeit zur Verbesserung und Erweiterung des als Digitaler Zwilling nutzbaren ereignisdiskreten Simulationsmodells denkbar sind.

Dies betrifft zum einen die Dokumentation. In dem erstellten Konzept (s. Abbildung 3.4) ist die Erstellung eines Nutzerhandbuchs gefordert, damit auch nicht versierte Nutzer das als Digitaler Zwilling nutzbare Simulationsmodell verwenden können. Die Erweiterung der Dokumentation der Phasenergebnisse sowie die Erstellung eines solchen Benutzerhandbuchs können Teil weiterer Arbeiten sein.

Außerdem ist der Simulationsmodus auszubauen. Hier sollte eine weiterführende V&V mit Parameter- und Zufallszahlenvariation erfolgen, um sicherzustellen, dass die Durchlaufzeiten der Container und Bälle in der LEGO®-Fabrik auch unter Berücksichtigung von Fehlern (wie von Förderbändern nicht richtig aufgegabelter Bälle) korrekt dargestellt werden. Ist dies gewährleistet, können Experimente definiert werden, die zur Erkenntnisgewinnung an dem digitalen Modell durchgeführt werden. Die entstehenden Ergebnisse können anschließend ausgewertet werden und bei der Planung und Programmierung unterstützen. Das Experimentieren ist auch als Teil des erstellten Konzepts berücksichtigt (s. Abbildung 3.4, Bereich „Anwendung/Nutzung“), ist allerdings in der Konzeptanwendung innerhalb dieser Arbeit nicht vorgesehen.

Der Modus Zustandsdarstellung kann noch genauer und präziser werden, wenn die Anzahl der Nachrichten erweitert wird, die von der LEGO®-Fabriksteuerung an das digitale Modell gesendet werden. Dafür wird es allerdings notwendig, dass weitere Sensorik in der Fabrik verbaut wird, bspw. um Bälle schon früher zu zählen. Eine denkbare Technologie, die dabei Anwendung finden kann, ist RFID. Bei dieser Erweiterung können auch die Erkenntnisse von Herrlich (2018) einbezogen werden.

Ist die Realisierung von weiterer Sensorik und die Definition weiterer Nachrichten zur Interpretation in dem digitalen Modell erfolgt, können ebenfalls die aufgezeichneten Nachrichten mit der entsprechenden Empfangszeit genutzt werden, um Zeiten in der LEGO®-Fabrik besser und genauer ermitteln zu können. Könnte bspw. bei dem Eintreffen von BEs in jedes Modul eine Nachricht empfangen werden, wäre es möglich, die Datenqualität für die Simulation weiter zu erhöhen. Mit der bereits realisierten Exportfunktion nach Excel ist es denkbar, dass dort Auswertungen des sogenannten Digitalen Schattens vorgenommen werden, die mit Hilfe von Algorithmen (z. B. Makros) die Daten aufbereiten und direkt wieder dem digitalen Modell zur Parametrisierung zur Verfügung stellen.

Ein weiterer Punkt, der in Folgeprojekten Berücksichtigung finden kann, ist die Anpassung des digitalen Modells bei Änderungen der LEGO®-Fabrik. Um das digitale Modell wie geplant über den gesamten Existenzzeitraum der LEGO®-Fabrik nutzen zu können, muss es stets deren aktuellen Prozesse und Gegebenheiten abbilden. Mit der Berücksichtigung der Anforderungen aus dem erstellten Konzept ist eine einfache Adaptierbarkeit des erstellten Modells gegeben. Trotzdem fällt die Notwendigkeit der Anpassung bei Änderungen an.

4.4 Zusammenfassung der Konzeptanwendung

In Abschnitt 3.3 ist die Entwicklung des Konzepts beschrieben, das in diesem Kapitel Anwendung an der LEGO®-Fabrik findet (s. Abbildung 3.4). Dieses Konzept beinhaltet das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) und erweitert es um zusätzliche Anforderungen, die in den einzelnen Phasen zu berücksichtigen sind, um das zu erstellende Modell von Beginn an für die Nutzbarkeit als Digitaler Zwilling auszurichten. In diesem Abschnitt wird zusammengefasst, inwiefern die einzelnen Punkte aus dem Konzept in den Phasen berücksichtigt werden können. In Kapitel 5 erfolgt eine kritische Würdigung des erstellten Konzepts auf Grundlage der praktischen Konzeptanwendung.

Da die Zielbeschreibung die Ausgangsbasis für das Simulationsvorgehensmodell und damit auch für das erstellte Konzept darstellt, ist dort bereits das Vorhaben der Nutzbarkeit des zu erstellenden Modells als Digitaler Zwilling zu verankern. In der Zielbeschreibung für das digitale Modell der LEGO®-Fabrik (Abschnitt 4.2.1) ist daher beschrieben, dass es als Digitaler Zwilling genutzt werden soll und deshalb zum einen den Zustand der LEGO®-Fabrik in Echtzeit abbilden und gleichzeitig auch die Möglichkeit zur Simulation geben muss. Damit geht einher, dass von Beginn an die Schnittstellen des Modells zur Vernetzung mit dem

realen technischen System geplant werden müssen. Zudem ist als Abnahmekriterium festgehalten, dass es die Anforderungen an einen Digitalen Zwilling erfüllt. Eine entscheidende Rolle spielt das Simulationswerkzeug, das für dieses Vorhaben Schnittstellen bereitstellen muss, damit die Kommunikation mit anderen Systemen gewährleistet werden kann. Um als Digitaler Zwilling genutzt werden zu können, ist ebenfalls in der Zielbeschreibung enthalten, dass das digitale Model über den gesamten Existenzzeitraum der LEGO®-Fabrik genutzt werden soll und damit aus wieder- und weiterverwendbaren Modulen bestehen soll. Auch hiermit gehen Anforderungen an das Simulationswerkzeug einher, das die Möglichkeit der Definition und Anpassbarkeit von Modulen bieten muss. Zu diesem Zweck ist es erforderlich, dass das Werkzeug bereits eine anpassbare Bausteinbibliothek mitbringt. Mit der geplanten Nutzung von Tecnomatix Plant Simulation ist bereits in der Zielbeschreibung die Modellerstellung in einem Werkzeug definiert, das diesen Anforderungen genügt. Damit sind die in dem erstellten Konzept geforderten Punkte berücksichtigt.

In der Aufgabenspezifikation (Abschnitt 4.2.2) wird zur Konkretisierung der Zielbeschreibung die Forderung gestellt, dass das zu erstellende Modell in einem Modus zur Zustandsdarstellung in Echtzeit und einem Modus zur Simulation nutzbar sein soll, womit der Punkt der Nutzbarkeit als Assistenzsystem (im Sinne des Digitalen Zwillings) aus dem Konzept berücksichtigt wird. Zudem werden die zu definierenden Schnittstellen konkretisiert, indem die Vernetzung mit der LEGO®-Fabrik (bzw. deren Steuerung) auf Basis von Sockets in Echtzeit und die Anbindung an das Informationssystem (Excel-Import) sowie der Datenexport nach Excel zur Auswertung der Nutzungsdaten bzw. Simulationsdaten gefordert wird. Zudem wird die Wieder- und Weiterverwendbarkeit der einzelnen Module, sowie die Weiterverwendung des Modells durch die Nutzung anpassbarer Module, die einfach zu parametrisieren sind, beschrieben. Um diese einfache Parametrisierung zu gewährleisten, soll der Datenimport aus dem Informationssystem ermöglicht werden, wobei die einzelnen Module automatisch mit den aktuellen Daten parametrisiert werden können. Welche Systembestandteile welche Parameteränderungen erlauben sollen, wird ebenfalls beschrieben. Außerdem soll eine von den Daten im Informationssystem abweichende Parametrisierung für die Simulation über die einfache Dateneingabe in Tabellen ermöglicht werden. Die Aufzeichnung der realen Nutzungsdaten im Sinne des Digitalen Schattens ist insofern berücksichtigt, dass empfangene Nachrichten mit deren Empfangszeit aufgezeichnet werden sollen. Deren Nutzung im Modell soll durch Aufbereitung in Excel und Import ermöglicht werden. Damit sind auch in der Aufgabenspezifikation alle Punkte des erstellten Konzepts berücksichtigt.

Im Konzeptmodell sollen nach dem erstellten Konzept einfach anpassbare Module und Teilsysteme definiert werden, was in Abschnitt 4.2.3.1 durch die Definition von Modulen bzw. Bausteinen erfolgt, die für die Modellierung mehrerer Systembestandteile der LEGO®-Fabrik verwendet werden sollen. Auch der Datenaustausch, die Datenaktualisierung sowie die Schnittstellen werden wie im Konzept gefordert beschrieben (Abschnitt 4.2.3.2), so dass die im Konzept formulierten Anforderungen in der Phase der Systemanalyse (Abschnitt 4.2.3) berücksichtigt sind.

In der Phase der Modellformalisierung werden insbesondere die Datenkommunikation und die Schnittstellen, die Vernetzung sowie die beiden Modi (Zustandsdarstellung und Simulation) formalisiert (Abschnitt 4.2.6).

Die Datenbeschaffung bezieht neben der Erfassung der Daten der LEGO®-Fabrik ebenfalls die Definition von Nachrichten zum Datenaustausch mit ein (s. Abschnitt 4.2.4 und Tabelle 9.1), wodurch mit den aufbereiteten Daten auch die Daten für die Kommunikation (Datentyp String) vorliegen, was die Anforderung des Konzepts erfüllt.

In der Phase der Implementierung (Abschnitt 4.2.7, Phasenergebnis: Abschnitt 4.2.8) werden alle definierten Anforderungen umgesetzt, so dass das erstellte Modell das reale System abbildet, mit diesem Daten in Echtzeit austauscht, mit dem Informationssystem der LEGO®-Fabrik verknüpft ist und die Möglichkeiten zum Datenimport und -export bereitstellt, automatisch parametrisierbar ist, aus einfach anpassbaren wieder- und weiterverwendbaren Modulen besteht und damit über den gesamten Lebenszyklus der LEGO®-Fabrik durch einfache Adaptierbarkeit angewendet werden kann, in einem Modus zur Zustandsdarstellung in Echtzeit und einem Modus zur Simulation betrieben werden kann und außerdem über eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche mit Buttons, Dropdownlisten und Beschreibungen, wie in dem Konzept gefordert, verfügt. Lediglich die Erstellung des Benutzerhandbuchs konnte im Rahmen dieser Arbeit noch nicht gewährleistet werden. Werden die in Abschnitt 4.3 genannten weiteren Schritte ausgeführt, ist neben der echtzeitfähigen Darstellung des aktuellen Zustands der LEGO®-Fabrik ebenfalls das Experimentieren durch Simulation möglich (die Möglichkeit besteht bereits, die umfassende V&V für den Simulationsmodus muss allerdings noch erfolgen). Diese beiden Arten der Modellanwendung sind in dem Bereich „Anwendung / Nutzung“ des erstellten Konzepts (s. Abbildung 3.4) integriert.

Es kann festgestellt werden, dass mit Anwendung des erstellten Konzepts an der LEGO®-Fabrik auf Basis der ereignisdiskreten Simulation ein digitales Modell entstanden ist, das die Eigenschaften eines Digitalen Zwillings erfüllt und somit als solcher nutzbar ist (s. dazu auch Abschnitt 4.2.9).

5 Kritische Würdigung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings, der zur Bewältigung der Komplexität im Rahmen von Industrie 4.0 beitragen soll, erstellt und an der LEGO®-Lernfabrik des pfp der Universität Kassel angewendet, um im Nachgang eine Beurteilung zu ermöglichen. Unterziele stellen dabei das Aufzeigen der Rolle der ereignisdiskreten Simulation im Kontext des Digitalen Zwillings und der Industrie 4.0 dar, das Erarbeiten von Anforderungen zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines solchen Digitalen Zwillings und die Konzeptanwendung selbst, auf deren Grundlage die Beurteilung erfolgt (s. Abschnitt 1.2 und Abbildung 1.1).

Abschnitt 3.1 beinhaltet das Aufzeigen der Rolle der ereignisdiskreten Simulation im Kontext des Digitalen Zwillings und der Industrie 4.0, womit das Unterziel 2.1 aus Abbildung 1.1 erreicht wird. Auf dieser Grundlage werden in Abschnitt 3.2 konkrete Anforderungen erarbeitet, die bei der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells berücksichtigt werden müssen, wenn dieses als Digitaler Zwilling genutzt werden soll, was zum Erreichen von Unterziel 2.2 führt. In Abschnitt 3.3 wird daraufhin das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) um die erarbeiteten Anforderungen erweitert und somit auf die Erstellung eines als Digitaler Zwilling nutzbaren Simulationsmodells ausgerichtet, womit das im Primärziel geforderte Konzept entsteht. Kapitel 4 widmet sich der Anwendung des entstandenen Konzepts, indem ein Digitaler Zwilling der LEGO®-Modellfabrik auf Basis der ereignisdiskreten Simulation erstellt wird. Dabei wird das Vorgehen bis zur Implementierung des Modells beschrieben, womit Unterziel 2.3 ebenfalls erreicht ist. In Abschnitt 4.2.9 ist bereits dargestellt, inwiefern geforderte Anforderungen und die Punkte in dem Konzept realisiert werden konnten und wo weiterer Handlungsbedarf in Bezug auf das erstellte digitale Modell besteht. Im Folgenden wird das Konzept auf Grundlage der Anwendung an der LEGO®-Fabrik zusätzlich kritisch gewürdigt, um damit das Primärziel vollständig zu erfüllen.

Da das erstellte Konzept auf einem etablierten Vorgehen aufbaut (Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. 2008), zu welchem umfangreiche Beschreibungen und Dokumentenstrukturen vorliegen, ist sichergestellt, dass mit dessen konsequenter Anwendung ein digitales Modell entsteht, das allen notwendigen Anforderungen genügt, falls diese tatsächlich umsetzbar sind. An dieser Stelle gilt es demnach zu hinterfragen, ob die bei der Konzepterstellung den Phasen des Simulationsvorgehensmodells zugeordneten Anforderungen tatsächlich mittels der ereignisdiskreten Simulation erfüllbar sind und ob auf diese

Weise ein als Digitaler Zwilling nutzbares Modell auf Basis der ereignisdiskreten Simulation entsteht.

Mit der Konzeptanwendung an der LEGO®-Fabrik ist es erfolgreich gelungen, ein digitales Modell auf Basis der ereignisdiskreten Simulation zu erstellen, das den Eigenschaften eines Digitalen Zwillings genügt (vgl. Abschnitte 4.2.9 und 4.3). Gleichzeitig können im Rahmen der Erstellung mögliche Hürden und Herausforderungen, besonders mit Hinblick auf reale Produktions- und Logistiksysteme identifiziert werden, die im Folgenden beschrieben werden.

Mit der LEGO®-Fabrik liegt eine Modellfabrik vor, die im Vergleich zu Produktions- und Logistiksystemen der Realität deutlich weniger komplex ist. Die Durchführung von Simulationsstudien für solche Systeme kann damit sehr aufwändig werden. Soll die ereignisdiskrete Simulation nun zusätzlich genutzt werden, um neben der Simulationsmöglichkeit auch den Zustand des realen technischen Systems in Echtzeit darzustellen, um als Assistenzsystem im Rahmen des Digitalen Zwillings genutzt werden zu können, wird der Aufwand noch einmal um ein Vielfaches erhöht. Hinzu kommt, dass die gesamte Steuerung der LEGO®-Fabrik in einem einzigen Java-basierten System realisiert ist, was die Datenkommunikation deutlich erleichtert. In realen Produktions- und Logistiksystemen sind unterschiedlichste Steuerungsarten und Systeme enthalten, wobei die Schnittstellendefinition mit dem Digitalen Zwilling wesentlich umfangreicher wird. Auch die Anbindung an Informationssysteme, die in der Konzeptanwendung an der LEGO®-Fabrik exemplarisch mit einer Excel-Datei erfolgt ist, ist in der Industrie als deutlich schwieriger und komplexer anzusehen, da dort häufig ERP-Systeme oder mehrere verschiedene und unterschiedliche Informationssysteme eingesetzt sind. Somit müssen spezielle Schnittstellen für jedes einzelne System zu den digitalen Modellen definiert werden. Soll zusätzlich die von Wenzel et al. (2018) geforderte Vernetzung über die Informationssysteme der Supply Chain erfolgen (s. Abschnitt 3.1), sind die Herausforderungen vielfach komplexer.

Die Aktoren und Sensoren der LEGO®-Fabrik sind allesamt durch die Steuerung ansprechbar und auslesbar, da sie auf elektrotechnischer Basis funktionieren. In Systemen der Industrie sind viele mechanische Systeme enthalten, insbesondere bei KMU, die noch nicht so weit automatisiert sind, wie das bei vielen industriellen Großkonzernen der Fall ist. Um auch rein mechanische Systeme zur Vernetzung und Kommunikation zu befähigen, um deren Zustand in einem Digitalen Zwilling darstellen zu können, müssen diese technisch erweitert werden, was unter Umständen sehr teuer werden kann.

Weitere Punkte, die als kritisch angesehen können, wenn die aus dem erstellten Konzept geforderten Punkte umgesetzt werden sollen, betreffen die Wieder- und Weiterverwendung

sowie die V&V von Modellen und Modellbestandteilen. Wieder- und weiterverwendbare Module müssen für die Nutzung in umfangreichen Parameterbereichen befähigt werden. Dies führt zu einer wesentlich aufwändigeren Dokumentation und auch die V&V wird sehr komplex, wenn einzelne Modelle bzw. Module über einen umfangreichen Parameterbereich validiert und verifiziert werden sollen, insbesondere mit Hinblick auf komplexe Systeme, in denen ausgesprochen viele Parameterkombinationen möglich sind (vgl. Wenzel et al. 2008, S. 155 ff.).

Durch die Erstellung des ereignisdiskreten digitalen Modells der LEGO®-Fabrik, das von Beginn der Erstellung an auf die Nutzbarkeit als Digitaler Zwilling ausgerichtet ist, kann festgestellt werden, dass die geforderte Nutzbarkeit zur Darstellung des Zustands des realen Systems in Echtzeit den erforderlichen Detaillierungsgrad stark erhöht. Ist bspw. „lediglich“ vorgesehen, dass das Modell für die Durchführung von Simulationsexperimenten in Bezug auf die DLZ nutzbar ist, wäre ein wesentlich geringerer und abstrakterer Detaillierungsgrad ausreichend. Die Zustandsdarstellung verlangt allerdings, dass direkt ersichtlich ist, um welches Systembestandteil des Echtsystems es sich bei welchem verwendeten Baustein handelt. Somit wird auch hier der Aufwand stark erhöht. Um die Zustände realitätsnah abbilden zu können, ist eine umfangreiche übergeordnete Steuerung notwendig, was die Anzahl der programmierten Methoden im erstellten Modell zeigt. In diesen Methoden werden wiederum Zusammenhänge zwischen verschiedenen Bausteinen programmiert, um das reale Systemverhalten abzubilden (z. B., dass die Förderbänder eingeschaltet werden, wenn der Auskippvorgang des Containers auf einem anderen Baustein beendet ist). Damit wird aber auch die einfache Änderungsfähigkeit des Systems eingeschränkt, da bei Löschen oder Ersetzen einzelner Module ggf. die übergeordneten Steuerungen umprogrammiert werden müssen. Zusätzlich kann am Beispiel der Modellierung des Teilsystems „Qualitätskontrolle“ im Modell der LEGO®-Fabrik ein weiterer Zielkonflikt festgestellt werden. Mit der Definition von Teilsystemen, die damit einfach anpassbar und änderbar sind und bei Hinzukommen eines Systems der gleichen Art wiederverwendet werden können, wird die Visualisierung, die die Zustandsdarstellung fordert, ebenfalls eingeschränkt. Um das Geschehen im Teilsysteminneren verfolgen zu können, muss so im erstellten Modell auf das im Netzwerk „Gesamtfabrik“ eingefügte Netzwerk „Qualitätskontrolle 1“ oder „Qualitätskontrolle 2“ geklickt werden, was wiederum die Beobachtbarkeit des Gesamtsystems einschränkt.

Letztendlich wird außerdem deutlich, dass die Umsetzbarkeit der in das erstellte Konzept integrierten Anforderungen stark von dem verwendeten Simulationswerkzeug abhängt. Ein Werkzeug, das keinerlei Offenheit, Schnittstellen oder eine anpassbare Bausteinbibliothek

anbietet und zudem nicht robust ist, macht die Erstellung eines Modells, das als Digitaler Zwilling genutzt werden soll, fast unmöglich. Damit wird die Notwendigkeit der permanenten Weiterentwicklung von Simulationswerkzeugen deutlich, die wesentlich für das Etablieren der ereignisdiskreten Simulation als ein wichtiges Werkzeug in Industrie 4.0 sind.

Nach dieser kritischen Würdigung ist festzustellen, dass das erstellte Konzept in seiner Anwendung durchaus zu dem gewünschten Ergebnis führt (was die erfolgreiche Anwendung an der LEGO®-Fabrik des pfp verdeutlicht) – zu einem auf Basis der ereignisdiskreten Simulation erstellten Modell, das als Digitaler Zwilling genutzt werden kann und damit einen wichtigen Beitrag zur Unterstützung des Menschen beim Umgang mit Herausforderungen leistet, die im Kontext von Industrie 4.0 entstehen. Mit dieser Arbeit wird demnach ein Beitrag zur Etablierung der ereignisdiskreten Simulation als ein wichtiges Werkzeug zur Planung und zur Erstellung Digitaler Zwillinge in Industrie 4.0 geleistet. Gleichzeitig bringen die damit einhergehenden Anforderungen einen deutlichen Mehraufwand bei der Modellerstellung mit, was die aufgeführten Punkte verdeutlichen. Daher ist es erforderlich, dass genügend Personal für die Erstellung, Aktualisierung und Anpassung von Modellen, die als Digitaler Zwilling genutzt werden sollen, bereitgestellt wird. Gleichzeitig ist es erforderlich, dass Simulationswerkzeuge kontinuierlich weiterentwickelt werden, insbesondere mit Hinblick auf Schnittstellen, Interoperabilität und die Vernetzungsfähigkeit. Auch die Nutzung robuster, verlässlicher Technik ist ein entscheidendes Erfolgskriterium. Die Zustandsdarstellung in einem Digitalen Zwilling kann nur so gut sein kann, wie die verbaute Sensorik und die Kommunikation. Mangelhafte Sensortechnik oder fehlerhafte Datenübermittlung können dazu führen, dass Zustände im digitalen System falsch dargestellt werden und damit Entscheidungen getroffen werden, die negative Konsequenzen haben. Mit den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen können die von Wenzel et al. (2018) formulierten Handlungsfelder für die ereignisdiskrete Simulation bestätigt werden (die Handlungsfelder sind in Abschnitt 3.1 beschrieben).

Schließlich sind alle in Abschnitt 1.2 aufgeführten Ziele erreicht. Mit Abschluss dieser Arbeit liegt zum einen ein Konzept vor, mit dessen Anwendung zu erstellende Simulationsmodelle auf die Nutzbarkeit als Digitaler Zwilling ausgerichtet werden können und damit im Kontext von Industrie 4.0 von großem Nutzen für die Anwender und die operative Planung ist. Zum anderen ist unter Anwendung dieses Konzepts auf die LEGO®-Fabrik ein als Digitaler Zwilling nutzbares Modell auf Grundlage der ereignisdiskreten Simulation entstanden, das die Anwendbarkeit des erstellten Konzepts bestätigt und am Fachgebiet pfp praktisch zur Zustandsdarstellung, als Erklärungsmodell und zur Planung genutzt werden kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit dieser Arbeit wird ein Konzept zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings, der als wichtiges Werkzeug zum Erfolg von Industrie 4.0 beitragen kann, erstellt und an der LEGO®-Fabrik des Fachgebiets pfp der Universität Kassel angewendet.

In Abschnitt 2.1 werden dafür erforderliche Grundlagen in Bezug auf die Simulation gelegt. Dies umfasst zum einen die Definition und Beschreibung wesentlicher Begrifflichkeiten sowie einen Überblick über Werkzeuge zur ereignisdiskreten Simulation im Allgemeinen. Das im Rahmen dieser Arbeit zur Modellerstellung zu nutzende Simulationswerkzeug Plant Simulation wird ebenfalls beschrieben, bevor das Simulationsvorgehensmodell nach Rabe et al. (2008) dargestellt wird, das als Basis für die Konzepterstellung dient.

Abschnitt 2.2 widmet sich der Industrie 4.0, indem zunächst die historische Entwicklung der industriellen Revolutionen aufgezeigt wird, verschiedene repräsentative Definitionen der Fachliteratur aufgeführt und wesentliche Bestandteile sowie Paradigmen erläutert werden. Zudem werden Treiber (gesellschaftliche, wirtschaftliche und technologische Entwicklungen) sowie Potenziale aufgezeigt um abschließend die resultierenden Eigenschaften und Anforderungen in Bezug auf zukünftige Produktions- und Logistiksysteme zusammenfassend darzustellen.

Einen Schwerpunkt dieser Arbeit stellt der Digitale Zwilling dar, der wesentlich zur Realisierung im Rahmen von Industrie 4.0 angestrebter Eigenschaften zukünftiger Produktions- und Logistiksysteme beitragen und den Menschen bei steigender Komplexität unterstützen soll, um Herausforderungen durch gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklungen bewältigen zu können. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem Digitalen Zwilling auf Basis der Fachliteratur findet in Abschnitt 2.3 statt.

Damit ergeben sich auch neue Anforderungen für die ereignisdiskrete Simulation, einem Werkzeug der Digitalen Fabrik, wenn diese in dem neuen Umfeld von Industrie 4.0 und zur Anwendung innerhalb des Digitalen Zwillings etablieren werden soll. Diese Anforderungen werden in Abschnitt 3.1 unter Bezug auf die Fachliteratur zusammengestellt und in Abschnitt 3.2 spezifiziert, womit konkrete Anforderungen abgeleitet werden, die bei der Erstellung eines ereignisdiskreten Simulationsmodells zu berücksichtigen sind, wenn dieses als Digitaler Zwilling genutzt werden soll. Eine zusammenfassende Darstellung der Zusammenhänge der Themen Industrie 4.0, Digitaler Zwilling und ereignisdiskrete Simulation gibt Abbildung 6.1. Unter Einbeziehung der erarbeiteten Anforderungen wird

anschließend in Abschnitt 3.3 auf Basis des Simulationsvorgehensmodells nach Rabe et al. (2008) ein Konzept zur Nutzung der ereignisdiskreten Simulation für die Erstellung eines Digitalen Zwillings entwickelt.

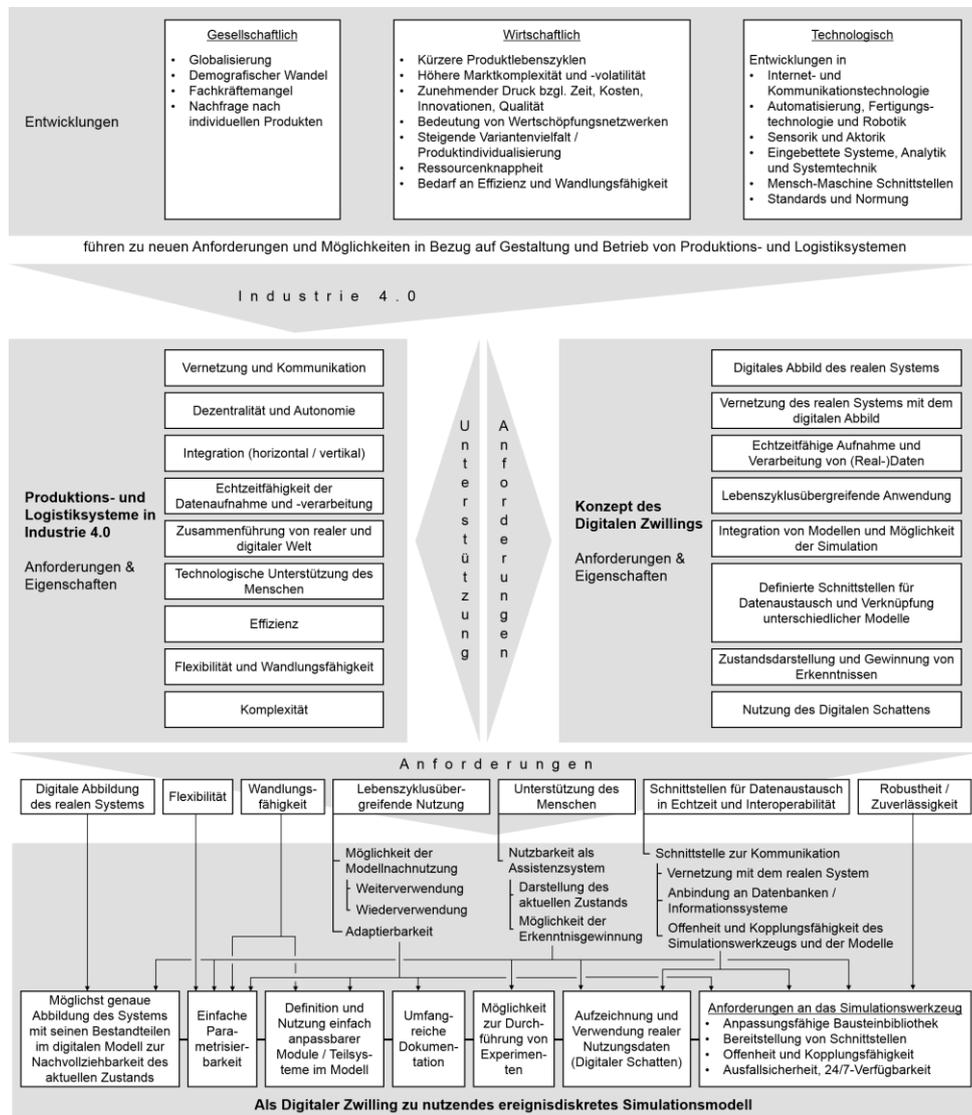


Abbildung 6.1: Zusammenfassende Darstellung der Zusammenhänge (eigene Darstellung)

In Kapitel 4 wird das erstellte Konzept praktisch an der LEGO®-Fabrik des pfp angewendet womit ein als Digitaler Zwilling nutzbares digitales Modell auf Basis der ereignisdiskreten Simulation dieser LEGO®-Fabrik entsteht. Auf Grundlage dessen wird das erstellte Konzept in Kapitel 5 kritisch gewürdigt.

Mögliche weitere Schritte zur Verbesserung und Erweiterung des digitalen Modells sind in Abschnitt 4.3 aufgeführt und können bei Folgeprojekten Berücksichtigung finden, um das volle Potenzial auszuschöpfen, das das erstellte Modell mitbringt.

Das erstellte Konzept sollte in weiteren Praxisprojekten zur Erstellung digitaler Modelle Anwendung finden, die im Umfeld von Industrie 4.0 Nutzen stiften und somit die ereignisdiskrete Simulation als wichtiges Werkzeug in Industrie 4.0 etablieren. Um das Konzept als solches weiter zu prüfen und zu entwickeln, ist diese praktische Anwendung in Folgeprojekten, auch in der Industrie, denkbar und erforderlich, um somit auch außerhalb der Lehre einen Beitrag leisten zu können.

7 Anhang I – Dokumentenstrukturen

Im Folgenden sind die von Rabe et al. (2008, S. 208 ff.) erstellten Dokumentenstrukturen angehängen.

Dokument: Zielbeschreibung
1. Ausgangssituation <ul style="list-style-type: none"> — Gegebenheiten beim Auftraggeber — Problemstellung, Anwendungsziele und Untersuchungszweck
2. Projektumfang <ul style="list-style-type: none"> — Benennung und grobe Funktionsweise des zu betrachtenden Systems — Zweck und wesentliche Ziele der Simulation — Zu untersuchende Systemvarianten — Erwartete Ergebnisaussagen — Geplante Modellnutzung
3. Randbedingungen <ul style="list-style-type: none"> — Zeitpunkt(e) der Ergebnisbereitstellung — Projektplan — Budgetvorgaben — Einbeziehung externer Partner — Einbeziehung des Betriebsrates — Erste Kriterien für Abnahme — Anforderungen an Modelldokumentation und Präsentationen — Hard- und Softwarerestriktionen

Dokument: Aufgabenspezifikation
1. Zielbeschreibung und Aufgabenstellung <ul style="list-style-type: none"> — Vervollständigung und Aktualisierung der Inhalte aus der "Zielbeschreibung" — Vorgaben zu Dokumentation und V&V
2. Beschreibung des zu untersuchenden Systems <ul style="list-style-type: none"> — Beschreibung des Untersuchungsgegenstandes — Beschreibung sonstiger relevanter Systemeigenschaften — Anforderungen an den Detaillierungsgrad des Simulationsmodells — Variierbarkeit von Parametern und Strukturen — Beschreibung von zu untersuchenden Systemvarianten
3. Notwendige Informationen und Daten <ul style="list-style-type: none"> — Benennung der notwendigen Informationen und Daten und ihrer Verwendung — Informations- und Datenquellen sowie Verantwortlichkeiten für die Informations- und Datenbeschaffung — Anforderungen an Datenqualität und Granularität — Umfang, Aktualität und ggf. notwendige Aktualisierungszyklen der Daten — Benennung fehlender Informationen und Hinweis auf Datenapproximation oder -generierung — Berücksichtigung von Schnittstellenstandards
4. Geplante Modellnutzung <ul style="list-style-type: none"> — Zeitraum der Nutzung — Anwenderkreis und -qualifikation — Art der Modellnutzung
5. Lösungsweg und -methode <ul style="list-style-type: none"> — Vorgehensbeschreibung einschließlich Projektschritte und Terminplan — Aufgabenverteilung im Projektteam — Einzusetzende Lösungsmethode(n) — Einzusetzende Hard- und Software
6. Anforderungen an Modell und Modellbildung <ul style="list-style-type: none"> — Allgemeine Anforderungen an das Modell — Modellierungsvorgaben — Anforderungen an Ein- und Ausgabeschnittstellen des Modells — Anforderungen an Experimentdurchführung und Ergebnisdarstellung

Dokument: Konzeptmodell
<p>1. Aufgabenspezifikation und Systembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> — Vervollständigung und Aktualisierung der Inhalte aus der "Aufgabenspezifikation" (insb. Kapitel 1, 2, 4, 6) — Überblick über die Systemstruktur, Identifikation von Teilsystemen und übergeordneten Prozessen — Festlegung der Systemgrenzen — Grundsätzliche Annahmen — Festlegung der Eingabegrößen — Festlegung erforderlicher Ausgabegrößen — Art und Umfang der gewünschten Visualisierung — Beschreibung der Systemvarianten
<p>2. Modellierung der Systemstruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> — Festlegung von Modellstruktur und Teilmodellen — Beschreibung übergeordneter Prozesse im Modell — Detaillierungsgrad der Teilmodelle — Beschreibung organisatorischer Restriktionen — Beschreibung der Schnittstellen nach außen
<p>3. Modellierung der Teilsysteme</p> <ul style="list-style-type: none"> — Teilmodellbeschreibung — Beschreibung der Prozesse in den Teilmodellen — Beschreibung der Schnittstellen — Annahmen und Vereinfachungen
<p>4. Systematische Zusammenstellung der erforderlichen Modelldaten</p> <ul style="list-style-type: none"> — Abgleich mit Kapitel 3 der "Aufgabenspezifikation" — Datentabellen und Kennzeichnung von Eingabe- und Ausgabegrößen — Erforderliche Auswertungen und Messpunkte
<p>5. Wiederverwendbare Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> — Benennung von wiederverwendbaren Modellkomponenten — Benennung von mehrfach verwendbaren Modellkomponenten — Möglicherweise nutzbare existierende (Teil-)modelle

Dokument: Formales Modell
<p>1. Aufgabenspezifikation und Systembeschreibung</p> <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "Konzeptmodell" (Kapitel 1) — Verwendete Beschreibungsmittel zur Spezifikation — Weitere zu verwendende Software
<p>2. Modellierung der Systemstruktur</p> <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Formalisierung der Inhalte aus dem "Konzeptmodell" (Kapitel 2) — Formale Spezifikation übergeordneter Prozesse — Formale Spezifikation der Schnittstellen nach außen
<p>3. Modellierung der Teilsysteme</p> <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Formalisierung der Inhalte aus dem "Konzeptmodell" (Kapitel 3) — Formale Spezifikation der Schnittstellen zwischen den Teilmodellen — Formale Spezifikation weiterer Teilmodellschnittstellen — Definition der zu visualisierenden Elemente und Abläufe — Bei der Formalisierung getroffene zusätzliche Annahmen und Vereinfachungen
<p>4. Systematische Zusammenstellung der erforderlichen Modelldaten</p> <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "Konzeptmodell" (Kapitel 4) — Festlegung von Datenstrukturen und Datentypen
<p>5. Wiederverwendbare Komponenten</p> <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "Konzeptmodell" (Kapitel 5) — Festlegung und Spezifikation der zu verwendenden existierenden (Teil-) Modelle

Quelle: Rabe et al. (2008)

Dokument: Ausführbares Modell
1. Aufgabenspezifikation und Systembeschreibung <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "formalen Modell" (Kapitel 1) — Modellierungs- und Implementierungsvorgaben — Verwendete Hard- und Software
2. Modellierung der Systemstruktur <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "formalen Modell" (Kapitel 2) — Beschreibung der Implementierung der Modellstruktur mit dem ausgewählten Simulationswerkzeug — Beschreibung der Umsetzung der Schnittstellen mit dem ausgewählten Simulationswerkzeug
3. Modellierung der Teilsysteme <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "formalen Modell" (Kapitel 3) — Beschreibung der Implementierung der Teilmodelle mit dem ausgewählten Simulationswerkzeug — Beschreibung der Umsetzung der Schnittstellen mit dem ausgewählten Simulationswerkzeug — Beschreibung der Umsetzung der Visualisierung — Bei der Umsetzung in das Simulationswerkzeug getroffene zusätzliche Annahmen
4. Systematische Zusammenstellung der erforderlichen Modelldaten <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "formalen Modell" (Kapitel 4) — Beschreibung der Implementierung der Datenstrukturen
5. Wiederverwendbare Komponenten <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme und Ergänzung der Inhalte aus dem "formalen Modell" (Kapitel 5) — Verweis auf externe Dokumentationen verwendeter Teilmodelle oder Bibliotheken

Dokument: Simulationsergebnisse
1. Annahmen <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme der Annahmen und Vereinfachungen aus dem "ausführbaren Modell" (Kapitel 1 und 3) — Verwendete Datenbasis und verwendete Modellversion — Anzahl der (unabhängigen) Simulationsläufe pro Parametersatz und Simulationszeitraum der einzelnen Simulationsläufe — Beschreibung des Einschwingverhaltens
2. Experimentpläne <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme der entsprechenden Anforderungen aus der "Aufgabenspezifikation" (Kapitel 6) — Festlegung der zu variierenden Parameter und der zu betrachtenden Wertebereiche — Umfang der Ergebnisaufzeichnung — Durchzuführende Experimente — Erwartete Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Parametern
3. Ergebnisse aus den Experimenten <ul style="list-style-type: none"> — Systematische Ablage der Experimentergebnisse — Beschreibung wesentlicher Erkenntnisse für einzelne Parametersätze — Beschreibung wesentlicher Erkenntnisse aus Experimenten — Ergebnisanalyse und Schlussfolgerungen aus den Experimenten

Quelle: Rabe et al. (2008)

Dokument: Rohdaten
1. Einordnung <ul style="list-style-type: none"> — Übernahme der Informationen aus der "Aufgabenspezifikation" (Kapitel 3) — Ergänzende organisatorische Angaben
2. Datenentitätstyp <name> <ul style="list-style-type: none"> — Benennung des Entitätstyps — Verwendung der Daten — Beschreibung der Datenstruktur — Vorgehen bei der Datenbeschaffung — Konsistenz und Fehlerfreiheit — Replizierbarkeit der Datenbeschaffung — Daten- und Systemverfügbarkeiten — Verantwortlichkeiten — Standards auf Entitätsebene
3. Entitätstypenübergreifende Plausibilitätsprüfungen

Dokument: Aufbereitete Daten
1. Einordnung <ul style="list-style-type: none"> — Verwendungszweck der aufbereiteten Daten im Modell — Bezug zu den Rohdaten — Organisatorischer Rahmen
2. Aufbereitung der Datenentitäten des Typs <name> <ul style="list-style-type: none"> — Benennung des Entitätstyps — Beschreibung der Datenstruktur — Vorgehen bei der Datenaufbereitung — Plausibilitätsprüfungen und qualitätssichernde Maßnahmen
3. Entitätstypenübergreifende Plausibilitätsprüfungen

Quelle: Rabe et al. (2008)

8 Anhang II – Datentypen

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die in Plant Simulation verwendbaren Datentypen und ist aus Eley (2012, S. 51) entnommen.

Datentyp	Verwendung	Definitionsbereich / Bemerkung
Integer	ganzzahlige Werte	$-2147483648 \leq integer \leq 2147483647$
Boolean	boolesche Variablen	true / false
Real	Gleitkommazahlen	$-8.9 * 10307 \leq real \leq 8.9 * 10307$
Length	Entfernungen	Angabe in Metern
Speed	Geschwindigkeiten	Angabe in Meter pro Sekunde
Acceleration	Beschleunigung	Angabe in Meter pro Quadratsekunde
Weight	Gewichte	Angaben in Kilogramm
Money	Währungsbeträge	nur als globale Variable einsetzbar
Time	Zeiten	Angabe in Sekunden bzw. im Zeitformat <hh> : <mm> : <ss.ss>
Date	Datumsangaben	Datum zwischen 1.1.1970 und 31.12.9999
Datetime	Datums- und Zeitangaben	Datum zwischen dem 1.1.1970 0:00:00 Uhr und dem 31.12.9999 23:59:59 Uhr
String	Zeichenketten	Buchstaben {a..z, A..Z}, Ziffern {0..9} und Sonderzeichen
Object	Verweis auf einen Baustein	Existiert der Baustein nicht oder wurde bisher kein Wert der Variable zugewiesen, so hat diese den Wert void.

Abbildung 8.1: Elementare Datentypen in SimTalk (Eley 2012, S. 51)

Zu ergänzen ist der Datentyp Table, der das Verhalten einer Tabelle aufweist. In einer Tabelle können mehrere Datentypen enthalten sein (Bangsow 2011, S. 20).

9 Anhang III – Daten

Exemplarische Darstellung der Rohdaten

Die folgende Abbildung stellt exemplarisch und ausschnittsweise die in der Phase Datenbeschaffung dokumentierten Daten für die Abmessungen der Systembestandteile der LEGO®-Fabrik dar:

	A	B	C	D
1	Systembestandteil	Länge (m)	Breite (m)	Höhe (m)
2	Band zum Drehtisch	0,2400	0,1950	
3	Band zum Drehtisch Rückführung	0,2400	0,1950	
4	Band in die Produktion	0,3500	0,2550	
5	Band zum Regalbediengerät	0,2400	0,2400	
6	Förderband in Waschtrommel 1	0,1300	0,0380	
7	Förderband in Waschtrommel 2	0,1300	0,0380	
8	Band mit Zählsensor	0,2300	0,0380	
9	Band zu QK1	0,2900	0,0380	
10	Rutsche zu KR1	0,1400	0,0700	
11	Rutsche zu QK2	0,2700	0,0400	
12	Rutsche zu KR2	0,1900	0,0800	
13	Band VB	0,1600	0,0600	
14	Band zu Kundenzuordnung	0,1200	0,0600	
15	Rutsche Kunde 1	0,2400	0,0900	
16	Rutsche Kunde 2	0,2400	0,0800	
17	Rutsche Kunde 3	0,2400	0,0900	
18	Regalbediengerät	0,2500	0,2400	
19	Rüttler	0,2500	0,2500	

Abbildung 9.1: Exemplarische Darstellung Rohdaten in Excel (Ausschnitt)

Nachrichten von der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell

In der folgenden Tabelle sind die Nachrichten zu finden, die zu bestimmten Ereignissen in der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell gesendet werden.

Tabelle 9.1: Nachrichten von der LEGO®-Fabrik an das digitale Modell

Bedeutung der Nachricht	Code (String)
START: Anfangszustand herstellen (Wenn Steuerung der LEGO®-Fabrik geöffnet wird)	ST
Nachricht Containereinlagerung Containerlager Platz 1	I1
Nachricht Containereinlagerung Containerlager Platz 2	I2
Nachricht Containereinlagerung Containerlager Platz 3	I3
Nachricht Containereinlagerung Containerlager Platz 4	I4
Nachricht Containerauslagerung Containerlager Platz 1	U1
Nachricht Containerauslagerung Containerlager Platz 2	U2
Nachricht Containerauslagerung Containerlager Platz 3	U3
Nachricht Containerauslagerung Containerlager Platz 4	U4
Berührungssensor am Drehtisch betätigt	TF
Berührungssensor am Lifter betätigt	LF
Zählsensor betätigt	CF
Farbsensor erkennt roten Ball als "in Ordnung" bei QK1	R1
Farbsensor erkennt schwarzen Ball als "in Ordnung" bei QK1	S1
Farbsensor erkennt weißen Ball als "in Ordnung" bei QK1	W1
Farbsensor erkennt roten Ball als "nicht in Ordnung" bei QK1	R0
Farbsensor erkennt schwarzen Ball als "nicht in Ordnung" bei QK1	S0
Farbsensor erkennt weißen Ball als "nicht in Ordnung" bei QK1	W0
Farbsensor erkennt roten Ball als "in Ordnung" bei QK2	R2
Farbsensor erkennt schwarzen Ball als "in Ordnung" bei QK2	S2
Farbsensor erkennt weißen Ball als "in Ordnung" bei QK2	W2
Farbsensor erkennt roten Ball als "nicht in Ordnung" bei QK2	R3
Farbsensor erkennt schwarzen Ball als "nicht in Ordnung" bei QK2	S3
Farbsensor erkennt weißen Ball als "nicht in Ordnung" bei QK2	W3
Beladener VB soll zu Kunde 1 geliefert werden	K1

Fortsetzung Tabelle 9.1

Bedeutung der Nachricht	Code (String)
Beladener VB soll zu Kunde 2 geliefert werden	K2
Beladener VB soll zu Kunde 3 geliefert werden	K3
Band Leergut wurde angeschaltet	BL
Schranke im Sammelbecken mit Schranke wird zu QK 2 geöffnet	Q2
Schranke im Sammelbecken mit Schranke wird zu QK 1 geöffnet	Q1
Container abgelassen, Förderbänder und Waschtrommel werden gestartet	WS
Ankunft eines neuen Containers mit Golfbällen (undefinierte Anzahl)	CA
Akkustände der Bricks	[Brickname]- [Akkustand]

Berechnung der Schätzer für den Mittelwert und die Standardabweichung

In Abbildung 9.2 ist die Stichprobe für die Normalverteilung der DLZ in Rüttler und Waschtrommel dargestellt. In den Zellen B41 und C41 wird dabei der Schätzer für den Mittelwert mit der Excel-Formel $=\text{Mittelwert}(B2:B41)$ bzw. $=\text{Mittelwert}(C2:C41)$ berechnet. Es liegt Formel 2 zu Grunde.

Der Schätzer für die Standardabweichung wird mit der Excel-Formel $=\text{STABW.S}(B2:B41)$ bzw. $=\text{STABW.S}(C2:C41)$ berechnet. Dabei liegt Formel 3 zu Grunde.

	A	B	C
1	Modul	Rüttler	Waschtrommel
2	Zeit 1	1,93	4,06
3	Zeit 2	3,18	3,81
4	Zeit 3	3,37	3,25
5	Zeit 4	2,43	3,52
6	Zeit 5	2,31	3,56
7	Zeit 6	2,68	4,05
8	Zeit 7	2,51	3,48
9	Zeit 8	2,18	3,82
10	Zeit 9	3,75	3,94
11	Zeit 10	2,39	3,51
12	Zeit 11	1,56	3,56
13	Zeit 12	2,25	3,61
14	Zeit 13	2,26	3,55
15	Zeit 14	2,19	4,08
16	Zeit 15	2,42	4,03
17	Zeit 16	2,38	3,87
18	Zeit 17	2,17	3,72
19	Zeit 18	2,09	3,27
20	Zeit 19	2,31	3,31
21	Zeit 20	2,42	3,48
22	Zeit 21	2,01	3,23
23	Zeit 22	2,43	3,47
24	Zeit 23	3,01	3,57
25	Zeit 24	2,98	3,18
26	Zeit 25	2,57	3,24
27	Zeit 26	2,76	3,81
28	Zeit 27	2,83	3,96
29	Zeit 28	1,99	3,56
30	Zeit 29	2,03	3,73
31	Zeit 30	2,41	3,49
32	Zeit 31	3,01	3,51
33	Zeit 32	2,76	3,91
34	Zeit 33	2,15	3,54
35	Zeit 34	2,28	3,63
36	Zeit 35	2,31	3,41
37	Zeit 36	2,34	3,65
38	Zeit 37	2,42	3,64
39	Zeit 38	2,45	3,77
40	Zeit 39	2,51	3,39
41	Zeit 40	2,55	3,80
42	Schätzer Mittelwert	2,46	3,62
43	Schätzer Standardabweichung	0,4133	0,2477

Abbildung 9.2: Berechnung der Schätzer für Mittelwert und Standardabweichung in Excel

10 Anhang IV – Dateien

Anhang III dieser Bachelorarbeit bilden die folgenden Dateien, die neben der Word-Datei und der PDF-Datei dieser Arbeit auf der beigelegten CD-ROM zu finden sind:

- Digitaler Zwilling Lego-Fabrik (in Tecnomatix Plant Simulation erstelltes Modell)
- Informationssystem (Excel-Datei)
- Rohdaten der Lego-Fabrik (Excel-Datei)
- Nachrichten Lego-Fabrik an Plant Simulation (Excel-Datei)
- Datenexport_DigitalerZwilling (Excel-Datei)

11 Anhang V – Programmcodes und Methoden

Senden von Nachrichten aus der Steuerung der LEGO®-Fabrik

```
1 package communication;
2
3 import java.io.BufferedReader;
12
13 public class LegoClient {
14
15     private String targetIP = "192.168.0.117"; //IP des Computers, auf dem das Fabrikmodell läuft
16     private int targetPort = 33333;
17     private static ArrayList<String> receivedMessages = new ArrayList<>();
18     private static ArrayList<String> sentMessages = new ArrayList<>();
19
20     public LegoClient() {
21
22     }
23
24     public LegoClient(String ip) {
25         targetIP = ip;
26     }
27
28     public LegoClient(String ip, int port) {
29         targetIP = ip;
30         targetPort = port;
31     }
32
33     public static void main(String[] args) {}
41
42     void test() throws IOException {}
53
54     public String sendMessage(String message) {
55         String ip = targetIP;
56         int port = targetPort;
57
58         try {
59             java.net.Socket socket = new java.net.Socket(ip, port);
60             schreibeNachricht(socket, message);
61         } catch (UnknownHostException e) {
62             // TODO Auto-generated catch block
63             e.printStackTrace();
64         } catch (IOException e) {
65             // TODO Auto-generated catch block
66             e.printStackTrace();
67         }
68     }
```

Abbildung 11.1: Ausschnitt des Programcodes zum Senden einer Nachricht aus der Fabriksteuerung (pfp Universität Kassel 2018)

Methoden zum Datenimport und Datenexport

In den folgenden Abbildungen sind die in Plant Simulation mittels der Sprache SimTalk realisierten Methoden gezeigt. Diese sind dem Programm als Screenshot entnommen (Siemens Industry Software GmbH).

```

1:  is
2:  do
3:
4:
5:      --Datenimport der einzelnen Arbeitsmappen des Informationssystems in die jeweiligen Tabellen
6:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_Module leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_Module");
7:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_FS leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_FS");
8:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_Sonstige leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_Sonstige");
9:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_Puffer leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_Puffer");
10:     .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_Läger leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_Läger");
11:     .LegoFabrik.GesamtFabrik.Daten_BEs leseExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Informationssystem.xlsx", "Daten_BEs");
12:
13:     -- Aufruf der Methode Parameterzuweisung, um die einzelnen Objekte im Modell zu parametrisieren|
14:     Parameterzuweisung;
15:
16: end;

```

Abbildung 11.2: Programmcode der Methode *Datenimport_aus_Informationssystem*

```

1:  is
2:  do
3:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.SimZeiten.schreibeExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Datenexport_DigitalerZwilling.xlsx", "SimData_neu");
4:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.DigitalerSchatten.schreibeExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Datenexport_DigitalerZwilling.xlsx", "DigitalerSchatten_neu");
5:  end;

```

Abbildung 11.3: Programmcode der Methode *Datenexport_Excel*

```

1:  is
2:      i:integer;
3:      Objekt:object;
4:  do
5:
6:
7:      -- Daten Förderstrecken zuweisen
8:      for i:=1 to Daten_FS.ydim loop
9:          Objekt:=Daten_FS[0,i];
10:         Objekt.geschwindigkeit:=Daten_FS["Geschwindigkeit",Objekt];
11:         Objekt.Länge:=Daten_FS["Länge",Objekt];
12:         Objekt.Breite:=Daten_FS["Breite",Objekt];
13:         Objekt.BEAbstandsart:="Mindestlücke";
14:         Objekt.Kapazität:=Daten_FS["Kapazität",Objekt];
15:         Objekt.BEAbstand:=Daten_FS["Fördergutabstand",Objekt];
16:     next;
17:
18:     -- Daten für Puffer zuweisen
19:     for i:=1 to Daten_Puffer.ydim loop
20:         Objekt:=Daten_Puffer[0,i];
21:         Objekt.BearbeitungsZeit:=Daten_Puffer["Zeit/Mu",Objekt];
22:         Objekt.Kapazität:=Daten_Puffer["Kapazität",Objekt];
23:         Objekt.Zykluszeit:=Daten_Puffer["Zykluszeit",Objekt];
24:     next;

```

Abbildung 11.4: Ausschnitt des Programmcodes der Methode *Parameterzuweisung*

```

1:  is
2:  do
3:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.SimZeiten.schreibeExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Datenexport_DigitalerZwilling.xlsx", "SimData_neu");
4:      .LegoFabrik.GesamtFabrik.DigitalerSchatten.schreibeExcelDatei("C:\Users\Daniel\Desktop\Datenexport_DigitalerZwilling.xlsx", "DigitalerSchatten_neu");
5:  end;

```

Abbildung 11.5: Programmcode der Methode *Datenexport_Excel*

```
1: (SocketKanalNr:integer;SocketNachricht:string)
2: is
3:   y:string[2];
4:   Akkustand:real;
5:   Brick:object;
6:   QK:object;
7: do
8:
9:   EmpfangeneNachricht:=to_str(SocketNachricht);
10:
11:   --Die Zeit des Empfangs in die Variable "Empfangszeit" schreiben
12:   Empfangszeit:=Ereignisverwalter.zeit;
13:   --Ausgabe der empfangenen Nachricht in der Konsole
14:   print "Empfangene Nachricht: "+EmpfangeneNachricht;
15:   --Die Empfangszeit zusammen mit der Nachricht in einer Zeile in der Tabelle "Digitaler Schatten" aufzeichnen
16:   DigitalerSchatten.schreibeZeile(1,DigitalerSchatten.Ydim+1,EmpfangeneNachricht,Ereignisverwalter.Zeit);
17:   --Definition, was bei welcher Nachricht passieren soll:
18:   if EmpfangeneNachricht = "ST" then
19:     SimStart;
20:   end;
21:   if EmpfangeneNachricht = "CA" then
22:     ContainerArrives;
23:   end;
```

Abbildung 11.6: Ausschnitt des Programmcodes der Nachrichteninterpretation

12 Anhang VI – Abbildungen aus dem erstellten Modell

Die folgenden Abbildungen sind dem in Tecnomatix Plant Simulation erstellten Modell entnommen (Siemens Industry Software GmbH).

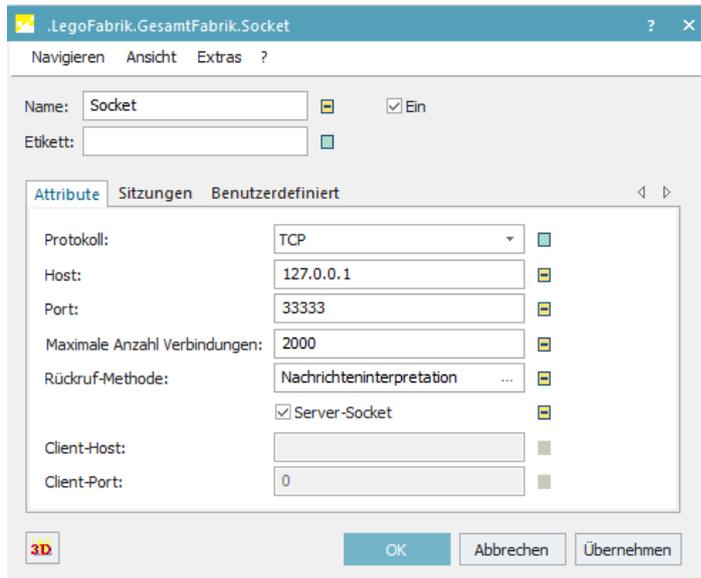


Abbildung 12.1: Einträge im Baustein Socket im erstellten Modell

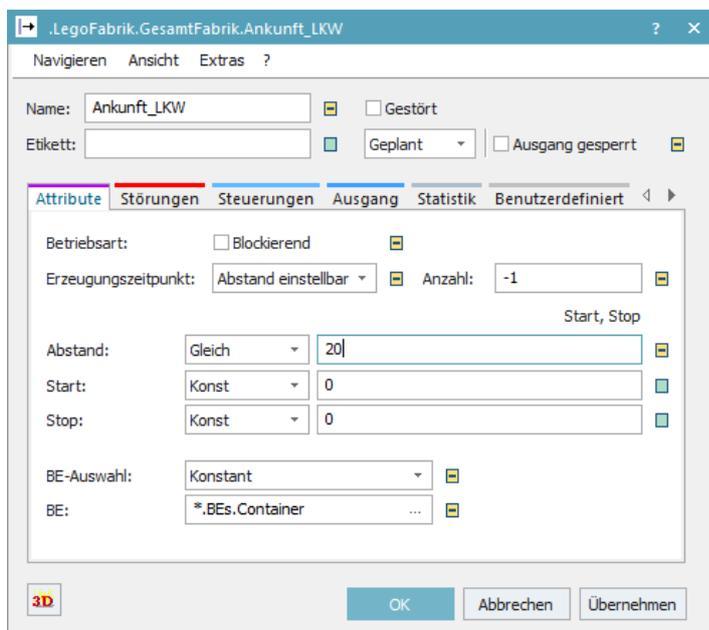


Abbildung 12.2: Parametrisierungsmöglichkeiten der Quelle

Literatur

- Abele, Eberhard und Gunther Reinhart (2011): *Zukunft der Produktion - Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen*. München: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- acatech (2011): „Cyber-Physical Systems: Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion.“ acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/POSITION_CPS_NEU_WEB_120130_final.pdf.
- acatech (2018): „Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0.“ Plattform Industrie 4.0; acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/04/PI40_lang_Forschungsbeirat_Wandlungsfähigkeit_lang_bf_fin.pdf.
- acatech und Forschungsunion (2013): „Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0.“ acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf.
- Airbus S.A.S. (2017): „Taking flight with the Airbus "Iron Bird".“ Zugriff: 13. Januar 2019. <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2017/05/taking-flight-with-the-airbus-iron-bird.html>.
- Artischewski, Felix (2014): *Industrie 4.0 - Die vierte Industrielle Revolution*. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.dgq.de/wp-content/uploads/2014/03/Industrie4_0.pdf.
- Bangsow, Steffen (2008): *Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk - Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen*. München: Hanser.
- Bangsow, Steffen (2011): *Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Baron, Christopher P., Ulrich Dietel, Dietmar Kreppenhofer und Markus Rabe (2001): „Handlungsanleitung Simulation.“ In: *Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik: Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen*, hg. v. Markus Rabe und Bernd Hellingrath, S. 117–90. Erlangen, San Diego, Calif. SCS European Publ. House; SCS International.

- Bauernhansl, Thomas (2014): „Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma.“ In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*, hg. v. Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel und Birgit Vogel-Heuser, S. 5–35. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Bauernhansl, Thomas, Jörg Krüger, Gunther Reinhart und Günther Schuh (2016): *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Darmstadt: WGP, Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik.
- Beer, Christoph d. (2008): *Untersuchung der Dynamik von selbststeuernden Prozessen in produktionslogistischen Systemen anhand ereignisdiskreter Simulationsmodelle*. Schriftenreihe 9. Berlin: GITO mbH Verlag. Zugl. Bremen, Univ., Diss., 2008.
- Bergmann, Sören, Steffen Straßburger und Thomas Schulze (2014): *Automatische Generierung adaptiver Modelle zur Simulation von Produktionssystemen*. Ilmenau: Univ.-Verl. Ilmenau. Zugl. Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2013.
- Berkholz, Daniel (2008): „Wandlungsfähige Produktionssysteme - der Zukunft einen Schritt voraus.“ In: *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten*, hg. v. Peter Nyhuis, S. 13–18. Hannover, Garbsen: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek; PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- Bettenhausen, Kurt D. und Stefan Kowalewski (2013): „Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation.“
- Bischoff, Jürgen (H.), agiplan GmbH, Fraunhofer IML und ZENIT GmbH (2015): „Erschließen der Potenziale der Anwendung von ‚Industrie 4.0‘ im Mittelstand: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi).“ agiplan GmbH. Zugriff: 1. Februar 2019.
https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- BMBF-Internetredaktion (2017): „Industrie 4.0.“ Zugriff: 1. Februar 2019.
<https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html>.
- Boschert, Stefan, Christoph Heinrich und Roland Rosen (2018): „Next Generation Digital Twin.“ In: *Tools and Methods of Competitive Engineering*, hg. v. I. Horváth, J. P. Suárez Rivero und P. M. Hernández Castellano, S. 209–18: Organizing Committee of TMCE 2018.

- Boschert, Stefan und Roland Rosen (2016): „Digital Twin—The Simulation Aspect.“ In: *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, hg. v. Peter Hehenberger und David Bradley, S. 59–74.
- Bracht, Uwe, Dieter Geckler und Sigrid Wenzel (2011): *Digitale Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Bracht, Uwe, Dieter Geckler und Sigrid Wenzel (2018): *Digitale Fabrik - Methoden und Praxisbeispiele- 2.*, aktualisierte und erweiterte Auflage. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg.
- Büttner, Karl-Heinz und Ulrich Brück (2014): „Use Case Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronikwerk Amberg.“ In Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, S. 121–44.
- Buxmann, Peter, Thomas Hess und Rainer Ruggaber (2009): „Internet der Dienste.“ *Wirtschaftsinformatik* 51 (5): 393–95. doi:10.1007/s11576-009-0187-5.
- Cadet, Marcel, Chantal Sinnwell, Jan Fischer, Roland Rosen, Nicole Stephan und Hermann Meissner (2017): „Referenzentwicklungsprozess für cybertronische Produkte und Produktionssysteme.“ In: *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme: Der PLM-unterstützte Referenzentwicklungsprozess für Produkte und Produktionssysteme*, hg. v. Martin Eigner, Walter Koch und Christian Muggeo, S. 45–62. Berlin: Springer Vieweg.
- Chada, Wepan, Daniel Daude und Florian Herrlich (2017): „Lego-Miniaturfabrik.“ Seminararbeit, Fachgebiet für Produktionsorganisation und Fabrikplanung, Universität Kassel.
- Chen, Peter P.-S. (1977): „The Entity-Relationship Model: A Basis for the Enterprise View of Data.“ Sloan WP Sloan-WP-914-77. <http://hdl.handle.net/1721.1/47625>.
- Dais, Siegfried (2017): „Industrie 4.0 – Anstoß, Vision, Vorgehen.“ In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4*, hg. v. Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel, S. 259–68. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- DIN IEC 60050-351 (2014): *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN/DKE (2018): „Deutsche Normungsroadmap: Industrie 4.0.“ Version 3.

- Drath, Rainer (2018): „The Digital Twin: The Evolution of a Key Concept of Industry 4.0.“ *visIT* 19. Year: 6–7. <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81724/>. Zugriff: 1. Februar 2019.
- E, Weinan und Jianfeng Lu (2011): „Multiscale modeling.“ *Scholarpedia*. doi:10.4249/scholarpedia.11527.
- Eley, Michael (2012): *Simulation in der Logistik - Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"*. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-27373-5>.
- Fraunhofer IPK (2017): „Smarte Fabrik 4.0 - Digitaler Zwilling: Themenblatt.“ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.ipk.fraunhofer.de/fileadmin/user_upload/IPK/publikationen/themenblaetter/vpe_digitaler-zwilling.pdf.
- Gartner (2017): „Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>.
- Gartner (2018): „Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018.“ Zugriff: 1. Februar 2019. https://blogs.gartner.com/smarterwithgartner/files/2018/08/PR_490866_5_Trends_in_the_Emerging_Tech_Hype_Cycle_2018_Hype_Cycle.png.
- Grieves, Michael und John Vickers (2017): „Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems.“ In: *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Bd. 89, hg. v. Franz-Josef Kahlen, Shannon Flumerfelt und Anabela Alves, S. 85–113. Cham: Springer International Publishing.
- Grösser, Stefan: „Digitaler Zwilling.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371>.
- Gutenschwager, Kai, Markus Rabe, Sven Spieckermann und Sigrid Wenzel (2017): *Simulation in Produktion und Logistik - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg.
- Hänisch, Till (2017): „Grundlagen Industrie 4.0.“ In: *Industrie 4.0*, hg. v. Volker P. Andelfinger und Till Hänisch, S. 9–31. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Hedtstück, Ulrich (2013): *Simulation diskreter Prozesse*. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Heinen, Tobias, Christoph Rimpau und Arno Wörn (2008): „Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung.“ In Nyhuis, *Wandlungsfähige Produktionssysteme*, S. 19–32.
- Hering, Ekbert und Gert Schönfelder (2012): „Sensorsysteme.“ In: *Sensoren in Wissenschaft und Technik: Funktionsweise und Einsatzgebiete*, hg. v. Ekbert Hering und Gert Schönfelder, S. 1–2. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- Hermann, Mario, Tobias Pentek und Boris Otto (2016): „Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios.“ In: *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, S. 3928–37: IEEE.
- Herrlich, Florian (2018): „Konzeptentwicklung zur Nutzung von Identifikation und Rückverfolgbarkeit für die Verbesserung der Logistikprozesse in Modellfabriken am Beispiel einer LEGO®-Lernfabrik.“ *Produktionsorganisation und Fabrikplanung*, Universität Kassel.
- Heuser, Lutz und Wolfgang Wahlster (2011): *Internet der Dienste*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hofmann, Johann (2017): „Voraussetzungen für den Einsatz von MES schaffen - Erfahrungsbericht aus Sicht einer Fertigung.“ In: *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe*, hg. v. Robert Obermaier, S. 255–69. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Hompel, Michael ten (2007): „Wie das "Internet der Dinge" die Welt der Logistik verändert.“ In: *Internet der Dinge: Www.internet-der-dinge.de*, hg. v. Hans-Jörg Bullinger und Michael ten Hompel, S. XXIX–XXXIV. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Horler, Samuel und Egon Müller (2017): „Strukturplanung zukünftiger Produktionssysteme: Die erforderliche Transformation für die Planung und den Betrieb der Smart Factory.“ *Industrie 4.0 Management* 33 (3): 54–58.
- Huber, Daniel und Thomas Kaiser (2017): „Wie das Internet der Dinge neue Geschäftsmodelle ermöglicht.“ In: *Industrie 4.0: Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele*, hg. v. Stefan Reinheimer, S. 17–27. Edition HMD. Wiesbaden, Cham: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer International Publishing AG.
- Huber, Walter (2018): *Industrie 4.0 kompakt - Wie Technologien unsere Wirtschaft und unsere Unternehmen verändern - Transformation und Veränderung des gesamten*

Unternehmens. SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg.

<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-20799-1>.

Kagermann, Henning (2014): „Chancen von Industrie 4.0 nutzen.“ In Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, S. 603–14.

Kagermann, Henning, Wolf-Dieter Lukas und Wolfgang Wahlster (2011): „Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution.“ *VDI nachrichten*, 2011. Nr. 13. Zugriff: 1. Februar 2019. http://www.wolfgang-wahlster.de/wordpress/wp-content/uploads/Industrie_4_0_Mit_dem_Internet_der_Dinge_auf_dem_Weg_zur_vierten_industriellen_Revolution_2.pdf.

Kaufmann, Timothy (2015): *Geschäftsmodelle in Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Klein, Dominik, Phuoc Tran-Gia und Matthias Hartmann (2013): „Big Data.“ *Informatik-Spektrum* 36 (3): 319–23. doi:10.1007/s00287-013-0702-3.

Kobryn, Pamela A. und Eric J. Tuegel (2011): „Condition-based Maintenance Plus Structural Integrity (CBM+SI) & the Airframe Digital Twin.“ The Air Force Research Laboratory (AFRL). Zugriff: 1. Februar 2019. <https://dokumen.tips/documents/condition-based-maintenance-plus-structural-integrity-cbmsi-the-airframe-56cbf0373f5ed.html>.

Kuhn, Axel und Sigrid Wenzel (2008): „Simulation logistischer Systeme.“ In: *Handbuch Logistik*, hg. v. Dieter Arnold, Heinz Isermann, Axel Kuhn, Horst Tempelmeier und Kai Furmans. 3., neu bearb. Aufl., S. 73–94. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer.

Kuhn, Thomas (2017): „Digitaler Zwilling.“ *Informatik-Spektrum* 40 (5): 440–44. doi:10.1007/s00287-017-1061-2.

Kühn, Markus und Moritz Schele (2017): „Vorsprung durch digitale Zwillinge: Verknüpfung eines realen Produkts mit seinem digitalen Abbild.“ *Smart Engineering* 5/2017. <https://www.unity.de/de/vorsprung-durch-digitale-zwillinge/>. Zugriff: 1. Februar 2019.

Lasi, Heiner, Peter Fettke, Hans-Georg Kemper, Thomas Feld und Michael Hoffmann (2014): „Industrie 4.0.“ *Wirtschaftsinformatik* 56 (4): 261–64. doi:10.1007/s11576-014-0424-4.

Law, Averill M. und W. D. Kelton (2000): *Simulation Modeling and Analysis*- 3. ed. McGraw-Hill series in industrial engineering and management science. Boston: McGraw-Hill.

- LEGO® Group (2015): „Bedienungsanleitung: LEGO MINDSTORMS EV3.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.lego.com/de-de/mindstorms/downloads/user-guide>.
- LEGO® Group (2017a): „LEGO® MINDSTORMS® Education EV3: MINT greifbar machen - mit dem beliebtesten Robotik-System für den Unterricht.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://education.lego.com/de-de/product/mindstorms-ev3?CMP=KAC-EDDE17JulEV3AdwordsAdwordsLME>.
- LEGO® Group (2017b): „LEGO® MINDSTORMS® Education EV3: Zubehör & Ersatzteile.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://education.lego.com/de-de/product/mindstorms-ev3/accessories>.
- „leJOS FORUMS: Java für LEGO Mindstorms.“ Zugriff: 8. Februar 2019. <https://lejos.sourceforge.io/forum/viewforum.php?f=12>.
- Liggesmeyer, Peter (2009): *Software-Qualität - Testen, Analysieren und Verifizieren von Software*- 2. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-8274-2203-3.pdf>.
- Löwenstein, Bernhard (2017): „LEGO Mindstorms EV3 Roboter mit Java programmieren - das Tutorial.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://jaxenter.de/lego-mindstorms-java-54090>.
- Marwedel, Peter (2008): *Eingebettete Systeme*- Korrigierter Nachdruck 2008. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer.
- März, Lothar, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert, Hg. (2011): *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik - Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. VDI-Buch 130. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-14536-0>.
- März, Lothar und Gerald Weigert (2011): „Simulationsgestützte Optimierung.“ In: *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik: Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, hg. v. Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert, S. 3–12. VDI-Buch 130. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Mayer, Gottfried und Marielouise Mieschner (2017): „Industrie 4.0 - Chance oder Risiko für die Ablaufsimulation.“ In: *Simulation in Produktion und Logistik 2017: Kassel, 20.-22. September 2017*, hg. v. Tim Peter und Sigrid Wenzel, S. 1–8. Kassel: kassel university press.
- Mehlhorn, Kurt und Peter Sanders (2008): *Algorithms and Data Structures - The Basic Toolbox*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10284711>.

- Mertens, Peter, Dina Barbian und Stephan Baier (2017): *Digitalisierung Und Industrie 4.0 - Eine Relativierung*. Wiesbaden, Germany: Springer Vieweg.
- Mosler, Andreas (2017): *Integrierte Unternehmensplanung - Anforderungen, Lösungen und Echtzeitsimulation im Rahmen von Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer Gabler.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-08752-4>.
- Obermaier, Robert, Hg. (2017a): *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Obermaier, Robert (2017b): „Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe.“ In Obermaier, *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe*, S. 3–34.
- pfp Universität Kassel (2018): „Programmcode aus der Steuerung der LEGO®-Lernfabrik des pfp.“ Universität Kassel.
- Plattform Industrie 4.0 (2018a): „Die Verwaltungsschale im Detail: von der Idee zum implementierbaren Konzept.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/verwaltungsschale-im-detail-präsentation.html>.
- Plattform Industrie 4.0 (2018b): „Hintergrund zur Plattform Industrie 4.0.“ Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Standardartikel/plattform.html>.
- Plattform Industrie 4.0 (2018c): „Was ist Industrie 4.0?“. Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>.
- Raabe, Oliver, Richard Wacker, Daniel Oberle, Christian Baumann und Christian Funk (2012): *Recht ex machina*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Rabe, Markus, Sven Spiekermann und Sigrid Wenzel (2008): *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg.
- Rose, Oliver und Lothar März (2011): „Simulation.“ In März, Krug, Rose und Weigert, *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, S. 13–19.
- Rosen, Roland, Georg von Wichert, George Lo und Kurt D. Bettenhausen (2015): „About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing.“ *IFAC-PapersOnLine* 48 (3): 567–72. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.141.

- Sauer, Olaf (2018): „The Digital Twin - A Key Technology for Industry 4.0.“ *vis/IT* 19. Year: 8–9. <https://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/81726/>. Zugriff: 1. Februar 2019.
- Scheer, August-Wilhelm (2017): „Industrie 4.0: Von der Vision zur Implementierung.“ In Obermaier, *Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe*, S. 35–52.
- Schleufe, Markus (2010): „Golfballtaucher: Jäger der verlorenen Bälle.“ *Zeit Online*, 26. Juli. Zugriff: 1. Februar 2019. <https://www.zeit.de/karriere/beruf/2010-07/beruf-golfballtaucher>.
- Schlick, Jochen, Peter Stephan, Matthias Loskyll und Dennis Lappe (2014): „Industrie 4.0 in der praktischen Anwendung.“ In Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, S. 57–84.
- Schmidt, J. W. und Robert E. Taylor (1970): *Simulation and Analysis of Industrial Systems*. Irwin series in quantitative analysis for business. Homewood, Ill: Irwin.
- Shafto, Mike, Mike Conroy, Rich Doyle, Ed Glaessgen, Chris Kemp, Jacqueline LeMoigne und Lui Wang (2012): „Modeling, Simulation, Information: Technology & Processing Roadmap.“ National Aeronautics and Space Administration. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.nasa.gov/sites/default/files/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf. Technology Area 11.
- Siemens Industry Software GmbH: *Tecnomatix Plant Simulation 14*.
- Siemens Industry Software GmbH: „Tecnomatix Plant Simulation Hilfe.“
- Siemens PLM Software (2014): „Tecnomatix Plant Simulation: Datenblatt.“ Zugriff: 2. Februar 2019. https://www.plm.automation.siemens.com/media/store/de_de/Tecnomatix%20Plant%20Simulation_7541_tcm38-2062.pdf.
- Siepmann, David (2016a): „Industrie 4.0 - Fünf zentrale Paradigmen.“ In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0: Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*, hg. v. Armin Roth, S. 35–46. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.
- Siepmann, David (2016b): „Industrie 4.0 - Grundlagen und Gesamtzusammenhang.“ In Roth, *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, S. 19–34.
- Soder, Johann (2014): „Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0.“ In Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, S. 85–102.

- Spath, Dieter, Oliver Ganschar, Stefan Gerlach, Moritz Hämmerle, Tobias Krause und Sebastian Schlund (2013): „Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0: [Studie].“ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Zugriff: 1. Februar 2019. https://www.produktionsarbeit.de/content/dam/produktionsarbeit/de/documents/Fraunhofer-IAO-Studie_Produktionsarbeit_der_Zukunft-Industrie_4_0.pdf.
- Stachowiak, Herbert (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer-Verlag.
- Steegmüller, Dieter und Michael Zürn (2014): „Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft.“ In Bauernhansl, Hompel und Vogel-Heuser, *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, S. 103–19.
- Sternel, Dörte C. und Michael Schäfer: „Multiphysik – neue Einsichten durch gekoppelte Simulation.“ *forschen* 2/2011: 22–25. https://www.tu-darmstadt.de/media/illustrationen/referat_kommunikation/publikationen_km/themaforschung/2011_02/Forschen_02_2011_Web.pdf. Zugriff: 1. Februar 2019.
- Tao, Fei, Jiangfeng Cheng, Qinglin Qi, Meng Zhang, He Zhang und Fangyuan Sui (2017): „Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data.“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (9): 3563–76. doi:10.1007/s00170-017-0233-1.
- United States Air Force (2013): „Global Horizons: Final Report - United States Air Force Global Science and Technology Vision.“ - AF/ST TR 13-01.
- VDI-Richtlinie 3633 (2018): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014): *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- VDI-Richtlinie 4499 Blatt 1 (2008): *Digitale Fabrik - Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Weiner, Nico, Thomas Renner und Holger Kett (2010): „Geschäftsmodelle im "Internet der Dienste": Trends und Entwicklungen auf dem deutschen IT-Markt.“ Fraunhofer IAO. Zugriff: 1. Februar 2019. https://wiki.iao.fraunhofer.de/images/studien/geschaeftsmodelle_im_internet_der_dienste_trends.pdf.
- Weise, Claudia (2018): „Der digitale Zwilling in der Prozessindustrie - prädiktive Wartung durch Simulation.“ *Chemie Ingenieur Technik* 90 (1298).

- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cite.201855359>. Zugriff: 1. Februar 2019.
- Weiser, Mark (1991): „The Computer for the 21 st Century.“ *Scientific American* 265 (3): 94–105. <http://www.jstor.org/stable/24938718>.
- Wenzel, Sigrid, Simone Collisi-Böhmer, Holger Pitsch, Oliver Rose und Matthias Weiß (2008): *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik - Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10216550>.
- Wenzel, Sigrid, Ulrich Jessen und Jochen Bernhard (2005): „Classifications and conventions structure the handling of models within the Digital Factory.“ *Computers in Industry* 56 (4): 334–46. doi:10.1016/j.compind.2005.01.006.
- Wenzel, Sigrid, Ulrich Jessen und Jana Stolipin (2017): „Rolle der Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Aufgaben und Integration.“ In: *Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation*, hg. v. Norbert Gronau, S. 177–98. Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. Berlin: GITO Verlag.
- Wenzel, Sigrid und Bernd Noche (2000): „Simulationsinstrumente in Produktion Und Logistik - Eine Marktübersicht.“ In: *The new simulation in production and logistics: prospects, views and attitudes: 9. ASIM-Fachtagung Simulation in Produktion und Logistik ; Berlin, 8. - 9. März 2000*, hg. v. Kai Mertins, S. 423–32. Berlin: IPK Eigenverl.
- Wenzel, Sigrid, Jana Stolipin und Ulrich Jessen (2018): „Ablaufsimulation in Industrie 4.0: Handlungsfelder für die industrielle digitale Transformation.“ *Industrie 4.0 Management* 34 (3): 29–32.
- Wikipedia (2019): „Liste der standardisierten Ports.“ Zugriff: 10. Februar 2019. https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_standardisierten_Ports.
- Zahn, Markus (2006): *Unix-Netzwerkprogrammierung mit Threads, Sockets und SSL* - 1. Aufl. X.systems.press. s.l. Springer-Verlag. <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10145201>.
- Zhuang, Cunbo, Jianhua Liu und Hui Xiong (2018): „Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor.“ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 96 (1): 1149–63. doi:10.1007/s00170-018-1617-6.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die Arbeit ist nicht in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung vorgelegt worden.

Kassel, den 13.02.2019

Ort, Datum

Unterschrift