

MASTERARBEIT

Untersuchung von Materialflusskonzepten mit Hilfe einer Simulationsstudie am Beispiel der Lagerung elektromechanischer Antriebskomponenten

bearbeitet von: Fehmi Akpınar

Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen
Matrikel-Nr.: 151003

Ausgegeben am: 27.03.2017

Eingereicht am: 17.08.2017

Prüfer: Prof. Dr. Markus Rabe

Betreuer: Maik Deininger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	VII
Formelverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Materialflusstechnik	4
2.1 Definitionen der Materialflusstechnik.....	4
2.2 Ziele und Kennzahlen der Materialflussplanung.....	5
2.3 Materialflussebenen	6
2.4 Elemente und Begrifflichkeiten der Produktion und Logistik	8
3 Ereignisdiskrete Simulation.....	11
3.1 Gründe für den Einsatz der ereignisdiskreten Simulation.....	13
3.2 Elemente und Werkzeuge in der ereignisdiskreten Simulation	16
3.2.1 Der Modellbegriff.....	16
3.2.2 Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse	17
3.2.3 Werkzeuge der ereignisdiskreten Simulation.....	18
3.3 Tecnomatix Plant Simulation	22
3.4 Das Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie.....	25
4 Einführung des zu untersuchenden Systems.....	32
4.1 Herausforderungen der Produktions- und Logistikprozesse	32
4.2 Beschreibung der ausgewählten Lösungsmethoden.....	35
4.3 Systembeschreibung.....	36
5 Die Simulationsstudie	39
5.1 Zielbeschreibung	39
5.2 Aufgabendefinition.....	40
5.3 Datenbeschaffung.....	43
5.4 Datenaufbereitung	45

5.5	Systemanalyse	49
5.6	Modellformalisierung	55
5.7	V&V der aufbereiteten Daten und des formalen Modells.....	60
5.8	Implementierung	61
5.8.1	Die Benutzeransicht.....	61
5.8.2	Das Systemmodell	63
5.9	V&V des ausführbaren Modells.....	73
5.10	Experimente und Analyse	75
5.10.1	Beschreibung und Ergebnisse der Experimentenreihen	75
5.10.2	Bewertung der Ergebnisse	83
5.10.3	Anpassung des Routenzuges und der Blocklager.....	85
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	87
7	Literaturverzeichnis	90
Anhang	97
	Anhang A: Quellcodes.....	97
	Anhang B: Sonstiges.....	113

Abkürzungsverzeichnis

AE	Anlageneffektivität
BE	Bewegliche Einheiten
DES	Discrete Event Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung
EHB	Einschienehängbahn
et al.	et alii (lat. „und andere“)
FIFO	First in – first out
GAB	Ganzheitliche Anlagenbetreuung
GAE	Ganzheitliche Anlageneffektivität
GLT	Großladungsträger
JIS	Just in Sequence
JPH	Jobs per Hour
KLТ	Kleinladungsträger
KPI	Key Performance Indicator
LE	Ladeinheit
LKW	Lastkraftwagen
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NIO	Nicht in Ordnung
V&V	Verifikation & Validierung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VLT	Versandladungsträger
WAB	Wechselaufbau, Wechselbrücke
WE-Bereich	Wareneingangsbereich

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Aufteilung der Durchlaufzeit im Materialfluss nach [Arnold 1998].....	6
Abbildung 2-2 Kategorisierung der Materialflussebenen nach [Blessing 1999].....	7
Abbildung 2-3 Berechnung der GAE und AE nach [Gottschalk 2016]	10
Abbildung 3-1 Unterschied DES und kontinuierliche Simulation nach [Banks et al. 2005]	12
Abbildung 3-2 Ziele der Simulation nach [VDI 3633-1 2014]	15
Abbildung 3-3 Black Box Ansatz	17
Abbildung 3-4 Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse nach [Eley 2012].....	18
Abbildung 3-5 Schematische Darstellung zur Erzeugung von Streams	21
Abbildung 3-6 Simulationsdaten nach [März und Weigert 2011].....	22
Abbildung 3-7 Benutzeroberfläche und Ereignisverwalter von Plant Simulation	24
Abbildung 3-8 Vorgehensmodell zur Simulationsstudie nach [Rabe et al. 2008].....	26
Abbildung 3-9 Vorgehen in Experimente und Analyse nach [Hrdliczka 1997].....	30
Abbildung 4-1 Sauberkeitsbereiche und Aufteilung der Halle.....	33
Abbildung 4-2 Anforderungen an das Gesamtsystem	35
Abbildung 4-3 Belieferungs- und Lagerkonzept	38
Abbildung 5-1 Systemgrenzen des Modells	40
Abbildung 5-2 Konzeptdarstellung.....	51
Abbildung 5-3 Formalisierung der Systemkomponenten.....	57
Abbildung 5-4 Materialsteuerung	59
Abbildung 5-5 Dialogfenster VDA Baustein Loading	65
Abbildung 5-6 Dialogfenster des Bausteins LogTrack.....	66
Abbildung 5-7 Prozentuale Auslastung des Fahrzeugpools	78
Abbildung 5-8 Prozentuale Auslastungen des Fahrzeugpools im Zeitverlauf	78
Abbildung 5-9 Durchschnittliche Anzahl von LE im Blocklager	79
Abbildung 5-10 Auslastung der Routenzüge.....	80
Abbildung 5-11 Auslastungen der Bearbeitungsstationen bei der Experimentenreihe 1	81
Abbildung 5-12 Auslastungen der Bearbeitungsstationen bei der Experimentenreihe 2	82
Abbildung 5-13 Entwicklung des wöchentlichen Outputs	83
Abbildung 5-14 Auslastung der Routenzüge nach Anpassungsmaßnahmen	85
Abbildung B-1 Sperrvermerkt der Masterarbeit.....	113
Abbildung B-2 Zielbeschreibung der Masterarbeit	114
Abbildung B-3 Explosionszeichnungen und Funktionen der Triebköpfe	115
Abbildung B-4 Hallenlayout der geplanten Halle	116
Abbildung B-5 EHB Layout	117
Abbildung B-6 Benutzeransicht des Modells	118

Abbildung B-7 Netzwerk zur WE-Steuerung	118
Abbildung B-8 Verknüpfung und Parametrisierung des Linefeed Bausteins.....	119
Abbildung B-9 Übergabe Setkom auf EHB Fahrzeuge	119
Abbildung B-10 Übergabebereich EHB-Montagelinie	119
Abbildung B-11 Teilnetzwerk Versandmodul.....	120
Abbildung B-12 Systemansicht des Simulationsmodells	120
Abbildung B-13 Auslastung der Routenzüge (mit konkreten Werten)	121
Abbildung B-14 Routenzugauslastung nach Anpassungsmaßnahmen (mit konkreten Werten)	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Standardbausteine in Plant Simulation nach [Baydar 2016]	25
Tabelle 5-1 Aufgabenspezifikation.....	42
Tabelle 5-2 Übersicht der beschafften Daten	44
Tabelle 5-3 Grundstruktur des Arbeitsblattes Misc	45
Tabelle 5-4 Grundstruktur des Arbeitsblattes LKW Ankunft	47
Tabelle 5-5 Grundstruktur des Arbeitsblattes Schichtmodell.....	48
Tabelle 5-6 Grundstruktur des Arbeitsblattes Entfernungsmatrix	48
Tabelle 5-7 Vereinfachungen und Prämissen	53
Tabelle 5-8 Konzeptmodell	54
Tabelle 5-9 Verteilfunktionen der Bearbeitungsstationen	56
Tabelle 5-10 Formales Modell.....	60
Tabelle 5-11 Übersicht des Festwerttests	73
Tabelle 5-12 Ergebnisse des Festwerttests	74
Tabelle 5-13 Abweichung der Simulationsergebnisse mit den berechneten Werten	83
Tabelle 5-14 Bewertung der Experimentenreihen	84
Tabelle 5-15 Vorgehen zur Lagerdimensionierung	86
Tabelle B-1 Abweichung der Simulationsergebnisse mit den berechneten Werten (mit konkreten Werten)	121
Tabelle B-2 Bewertung der Experimentenreihen (mit konkreten Werten).....	121
Tabelle B-3 Neudimensionierung der Blocklager mit Flächeneinsparpotenzial	122

Formelverzeichnis

Formel 5-1 Verbrauch pro Stunde	46
Formel 5-2 Anzahl der angestellten KLT pro Montagelinie	46
Formel 5-3 Berechnung der MTBF	56
Formel 5-4 Berechnung des k-Faktors.....	56
Formel 5-5 Berechnung der Rufgrenze in den Blocklagern	58
Formel 5-6 Berechnung der Taktzeit der Setkom.....	75

1 Einleitung

Die Europäische Union hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2020 eine Reduktion von 20% der gesamten Treibhausgasemissionen zu realisieren. Mit einem Anteil von rund zwölf Prozent am CO₂ Gesamtausstoß ist der Bereich PKW-Verkehr einer der Hauptverursacher der gesamten Treibhausgasemissionen in Europa [BMUB 2014]. Die Automobilhersteller haben es sich zur ihrer selbsternannten Aufgabe gemacht, ihren Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu leisten und damit neben dem wirtschaftlichen Anreiz die Corporate Social Responsibility wahrzunehmen [Jung 2014]. Eine Lösung hierfür ist der vermehrte Einsatz von Hybrid- und Elektroantrieben in Fahrzeugen. Mit Hilfe staatlicher Subventionen und Anreizprogrammen sowie steigendem Umweltbewusstsein der PKW-Fahrer ist seit dem Jahr 2008 eine kontinuierliche Steigerung der Neuzulassungen von Hybrid- und Elektrofahrzeugen zu beobachten [Statista 2017a]. Um diesen Trend aufrecht zu erhalten und seinen Einfluss auf diesem neuen Marktsegment auszubauen, plant das Unternehmen, ein global aufgestellter Automobilhersteller, für die Produktion der neuen Generation von Hybrid- und Elektroantrieben eine neue Werkshalle, die die Fahrzeugwerke mit neuen Triebköpfen für die neuen Baureihen beliefern soll. Die Herausforderung liegt dabei in der begrenzten Verfügbarkeit der neuen Hallenfläche. Unter Berücksichtigung der Flächenrestriktion der neuen Halle wurden bereits in Rahmen des Projektes Konzepte und Prämissen für die Produktions- und Logistikprozesse ausgearbeitet, um sämtliche Aktivitäten innerhalb der Halle abbilden zu können. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf die Belieferungskonzepte und auf die Lagerung der Systemkomponenten in der Halle: einerseits soll ein möglichst hohes Volumen an Material in der Halle gelagert werden, um einen Engpass der Produktion zu verhindern, andererseits sollen die Materialflüssen möglichst schlank sein, um die Hallensituation zu entspannen. Als Hilfsmittel zur Validierung der Prämissen und der ausgearbeiteten Konzepte soll die Simulation dienen, welches als Verfahren benutzt wird, um reale oder nicht existierende Systeme in einem Modell darzustellen. Anhand von Experimenten können Schwachstellen identifiziert und neue Erkenntnisse hinsichtlich des abgebildeten Systems erlangt werden [Hedtstück 2013]. Produktions- und Logistikprozesse, die noch nicht real existieren, können so im Vorfeld analysiert werden, sodass ein generelles Verständnis für das System gewonnen werden. In Rahmen der immer weiter fortschreitenden Internationalisierung der Märkte und dem steigendem Wettbewerbs-

druck ist die Simulation ein Werkzeug, um den bestmöglichen Systemzustand zu erreichen [März und Rose 2011].

Ziel dieser Masterarbeit ist die Untersuchung von drei Materialflusskonzepten mit Hilfe der Materialflusssimulation, um gesetzte Planungsprämissen und -konzepte zur Produktion der elektromechanischen Antriebskomponenten und den damit verbundenen Prozessen zu untersuchen und ggf. Schwachstellen im System zu analysieren. Unter Berücksichtigung von Zielparametern sollen Aussagen getroffen werden, um eine Entscheidung treffen zu können, welches Konzept sich am besten für die Produktion der Triebköpfe eignet. Des Weiteren soll eine Lagerstrategie, die unter Berücksichtigung diverser Faktoren konzipiert wurde, hinsichtlich ihrer Funktionalität untersucht werden.

Um eine Materialflussuntersuchung und -bewertung durchzuführen, ist eine methodische Vorgehensweise notwendig. Der Inhalt dieser Arbeit lässt sich in zwei theoretische Themenbereiche unterteilen. So werden zum einen, um das generelle Verständnis der Problemstellung zu gewährleisten, die theoretischen Grundlagen der Materialflusstechnik und wichtige Begrifflichkeiten der Produktion und Logistik eingeführt. Außerdem soll diese Einführung die Relevanz von Materialflüssen in produzierenden Unternehmen veranschaulichen und hervorheben, weshalb Unternehmen bestrebt sind, diese zu verbessern. Zum anderen wird im zweiten theoretischen Themenbereich die Simulation eingeführt. Als verwendete Lösungsmethode werden sowohl die Vorteile als auch die notwendigen Begrifflichkeiten eingeführt und die Elemente der verwendeten Software beschrieben. Zur Gewährleistung einer inhaltlich vollständigen Simulationsstudie und einem lauffähigen Modell, welches die Prozesse hinreichend genau darstellt und aus dem sich praxisrelevante Ergebnisse ableiten lassen, wird ein Vorgehensmodell benötigt. Hier hat sich das Vorgehensmodell nach Rabe et al. [2008] bewährt, welches die einzelnen Phasen einer Simulationsstudie samt den Phasenergebnissen beinhaltet. Dieses Modell wird zunächst beschrieben und im Anschluss als Leitfaden zur Durchführung der Simulationsstudie verwendet. Die Herausforderungen und Problemstellungen des Unternehmens werden in Kapitel 4 soweit formuliert und generalisiert, sodass das methodische Vorgehen dieser Arbeit auch für andere Unternehmen mit derselben Problemstellung verwendet werden kann. In diesem Kapitel werden außerdem die ausgewählten Lösungsmethoden zur Behebung der Probleme beschrieben und anschließend eine Systembeschreibung durchgeführt. Im folgenden Kapitel wird dann die Simulationsstudie durchgeführt. Hier wird das vorgestellte System in ein lauffähiges Modell überführt, sodass im Rahmen der Experimente und Analyse die drei Materialflusskonzepte, die jeweils als Experimentenreihen abgebildet werden, untersucht und bewertet werden können. Außerdem werden Schwachstellen im System identifiziert und mit Hilfe von

Parametervariation Anpassungen durchgeführt, um diese zu beseitigen. Mit Hilfe der Simulationsergebnisse werden außerdem im Anschluss Aussagen über das entworfene Lagerkonzept getätigt, indem eine (Neu)Dimensionierung der Stellplätze getätigt und mögliches Flächeneinsparpotenzial aufgezeigt wird. Das ausgewählte Materialflusskonzept, die Identifizierung und Behebung der Schwachstellen sowie die Evaluierung des Lagerkonzeptes können dann als Ergebnis dieser Arbeit in die Planung der Realprozesse aufgenommen werden.

Hinweis: der Anhang der vorliegenden Arbeit enthält Ergebnisse und Materialien, die nicht öffentlich zugänglich sind und ist daher mit einem Sperrvermerk versehen. Zu diesem Zweck wird in der Arbeit auf die Angabe von qualitativen Ergebnissen referenziert, während die konkreten Werte sich im Anhang befinden.

2 Materialflusstechnik

Die Logistik hat das Ziel, die richtigen Güter in der richtigen Menge und Qualität zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Bedarfsort zu minimalen Kosten zur Verfügung zu stellen [Jünemann 1989]. Als Teildisziplin der Logistik ist die Materialflusslehre zu betrachten, welche im Folgenden vorgestellt wird.

2.1 Definitionen der Materialflusstechnik

Der Begriff Materialfluss bezeichnet die Bewegung von physischen Gütern, die entlang des Flusses verschiedene Arbeitsschritte durchlaufen. In der Richtlinie 2689 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) wird der Begriff des Materialflusses wie folgt definiert:

„Materialfluss ist die Verkettung aller Vorgänge beim Gewinnen, Be- und Verarbeiten sowie bei der Verteilung von Gütern innerhalb festgelegter Bereiche. Zum Materialfluss gehören alle Formen des Durchlaufs von Arbeitsgegenständen (z.B. Stoffe, Teile, Datenträger) durch ein System. Man unterscheidet zwischen: Bearbeitung, Prüfen, Handhaben, Fördern, Aufenthalt und Lagern.“ [VDI 2689 2010, S.2].

Ein Materialfluss ist dementsprechend charakterisiert durch die Veränderung der Zustände von Arbeitsgegenständen. Diese Veränderung kann hinsichtlich Position, Menge, Zusammensetzung als auch Qualität erfolgen [ten Hompel et al. 2011]. Häufig ist im Kontext der Materialflusstechnik der Begriff „Materialflusssystem“ zu finden. Hierfür ist zunächst die Klärung des Systembegriffes von Nöten. Als System wird laut Deutsches Institut für Normung (DIN) eine

„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].

Diese Abgrenzung erfordert, dass die Systemgrenzen klar definiert werden müssen [Kühn 2006]. Dies erfolgt in Abhängigkeit der zu lösenden Problemstellung, wobei stets das Ziel sein sollte, „das System so klein wie möglich zu halten“ [Ortmann 2015, S. 37]. Die aus den Abgrenzungen resultierenden Systemgrenzen bilden den Bereich der Ein- und Ausgangsgrößen [Kahlert 2004]. Des Weiteren wird zwischen offenen und geschlossenen System differenziert. Während offene Systeme über Ein- und Ausgangsgrößen verfügen, sind bei geschlossenen Systemen diese nicht vorhanden [Gordon 1978].

Ein Materialflusssystem ist demnach eine miteinander in Beziehung tretende Menge von Materialflüssen und ihren jeweiligen Elementen wie Transport- Lager-, Handhabungsmittel sowie Maschinen und Anlagen mit einem Systemeingang und -

ausgang. Sie sind ein wichtiger Bestandteil einer Gesamtunternehmung zur Erreichung der Unternehmensziele. Sämtliche Lager-, Handhabungs- und Transportsysteme sind daher im Sinne eines technisch-wirtschaftliches Gesamtsystems so zu gestalten, dass die Anforderungen des Unternehmens erfüllt werden und organisatorische, logistische und vertriebstechnische Abläufe gewährleistet werden [VDI 3629 2005]. Daher müssen Materialflüsse bzw. Materialflusssysteme sorgfältig geplant und abgesichert werden.

Die Materialflussplanung ist als ganzheitliche Unternehmensaufgabe zu sehen und umfasst sowohl Planung als auch Gestaltung von betrieblichen Materialflüssen und Elementen innerhalb fest definierter Systemgrenzen. Sie bezieht deshalb durchgängig alle Betriebsbereiche vom Wareneingang bis zum Warenausgang für innerbetriebliche Materialflüsse und Zulieferer- und Kundenstandorte für außerbetriebliche Materialflüsse [FML 2017]. Die Materialflussplanung nimmt dabei eine wichtige Aufgabe innerhalb der Logistikplanung ein [Allgayer 1999]. Die VDI Richtlinie 2689 beschreibt die Wichtigkeit der Materialflussplanung wie folgt:

„Der wirtschaftliche Erfolg eines Unternehmens wird nicht allein durch rationelle Fertigungsverfahren bestimmt. Er hängt in entscheidendem Maß auch davon ab, wie schnell, reibungslos und kostengünstig das Material insgesamt durch Produktion und Lager fließt“ [VDI 2689 2010, S. 2]

2.2 Ziele und Kennzahlen der Materialflussplanung

Untersuchungen der Materialflüsse sind innerhalb der Fabrikplanung von essentieller Bedeutung und bilden das Kernstück der planerischen Aktivitäten. Zahlreiche Untersuchungen bestätigen diesen Fakt, indem sie belegen, dass Materialflüsse einen hohen Kostenfaktor in einer Unternehmung darstellen [Kettner et al. 1984]. So betrug im Jahr 2008 der Anteil der Logistikkosten im Handel 15,9% an den Gesamtkosten, während in der Industrie ein Anteil von 7% an den Gesamtkosten zu beobachten war [Statista 2017b]. Die Materialflussplanung hat jedoch nicht nur das Ziel, Kosten zu senken, sondern auch einen schnelleren und störungsfreien Produktionsablauf zu gewährleisten. Dies führt wiederum zu einer höheren Auslastung der Kapazitäten, welches sich unmittelbar auf die Anlageneffizienz und die Kapitalbindung auswirkt [Kettner et al. 1984]. Auch wenn der Begriff „Fluss“ suggeriert, dass Güter in produktionslogistischen Systemen störungsfrei fließen, ist dies zumeist nicht der Fall. Wie in Abbildung 2-1 dargestellt ist, ist der höchste Anteil innerhalb der Durchlaufzeit eines Produktes die Wartezeit. Diese Materialflüsse werden auch als „stockende Flüsse“ bezeichnet [Arnold 1998; Wiendahl 1997].

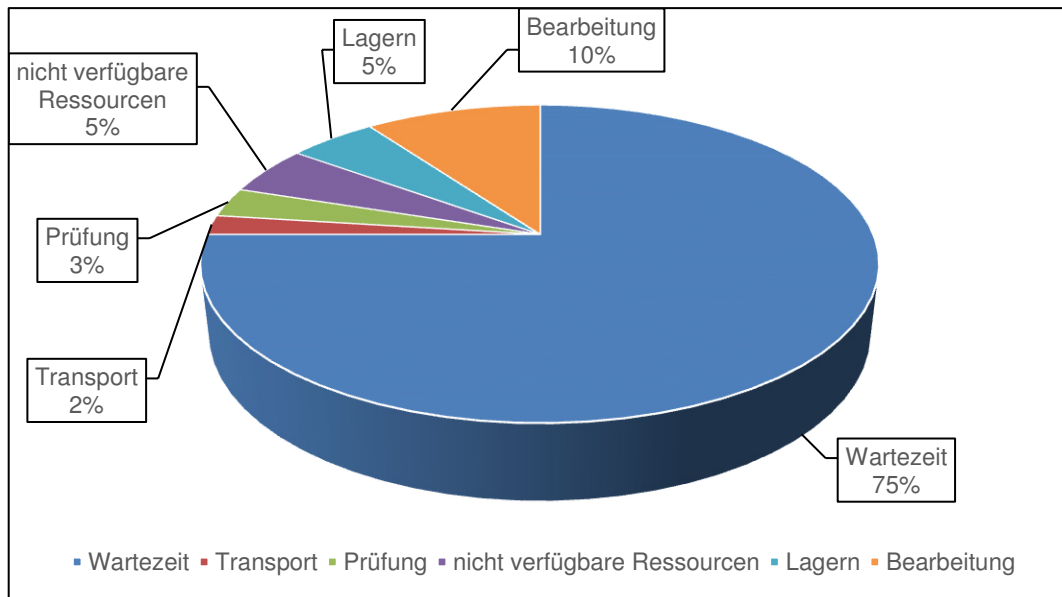


Abbildung 2-1 Aufteilung der Durchlaufzeit im Materialfluss nach [Arnold 1998]

Neben der Reduzierung der Durchlaufzeit existieren zahlreiche weitere Ziele zur Untersuchung von Materialflüssen. Beispielsweise sind als typische Ziele die

- Verlagerung, Erweiterungen und Umstellungen des Betriebs
- Mechanisierung und/oder Automatisierung von Transport- und Lagerbereichen
- Erhöhung der Transportmittelauslastung
- Verringerung der Transport- und Lagerkosten
- Reduzierung der Lager- und Zwischenbestände
- Erweiterung der Produktionsmenge und des Produktionsspektrums
- Verringerung von Engpässen und Unfällen sowie
- Reduzierung hoher Personalkosten

zu nennen [Allgayer 1999; Kettner et al. 1984; Martin 2014].

Zusätzlich zu den oben genannten Zielen sind Kennzahlen zu nennen, die es ermöglichen, Materialflusssysteme miteinander zu vergleichen und zu bewerten. Im Bereich der Materialflusstechnik sind bspw. Höhen-, Raum- und Flächennutzungsgrad, Bestände, Umschlagshäufigkeit, Lagerreichweite, Transportmittel-, Lager- und Maschinenauslastung sowie Verfügbarkeit als einige typische Kennzahlen zu nennen [Martin 2014].

2.3 Materialflussebenen

Die Einteilung von physischen Materialflüssen kann auf vier verschiedenen Ebenen erfolgen und dabei wie folgend hierarchisch kategorisiert werden [Blessing 1999; Bullinger & Lung 1994]:

- **Überbetrieblicher Materialfluss:** diese Ebene umfasst den Materialfluss zwischen verschiedenen Produktionsstandorten eines Unternehmens oder zwischen einem Unternehmen und seinen Zulieferern oder Kunden. Die Koordination des überbetrieblichen Materialflusses ist zudem Bestandteil des Supply Chain Managements und der Standortplanung [vgl. Brumme et al 2010].
- **Betriebsinterner Materialfluss:** der betriebsinterne Materialfluss ist gekennzeichnet durch Flüsse innerhalb eines Werksgeländes zwischen verschiedenen Gebäuden bzw. Bereichen. Dies geschieht über Festlegung von Verkehrswegen auf den vom Werkslayout vorgegeben Transportrouten sowie über die Trennung von Material- und Personalfluss [vgl. Martin 2014].
- **Gebäudeinterner Materialfluss:** auf dieser Ebene werden Flüsse innerhalb eines Werksgebäudes zwischen Abteilungen oder Maschinen- und Arbeitsplatzgruppen sowie Transporte zwischen einzelnen Betriebsmitteln oder Arbeitsplätzen berücksichtigt. Die Analyse des gebäudeinternen Materialflusses hat anschließend Auswirkungen auf das finale Hallenlayout.
- **Materialfluss am Arbeitsplatz:** der Materialfluss am Arbeitsplatz beinhaltet Materialströme, die arbeitsplatzbezogen sind.

Die Kategorisierung der Materialflussebenen wird in Abbildung 2-2 dargestellt.

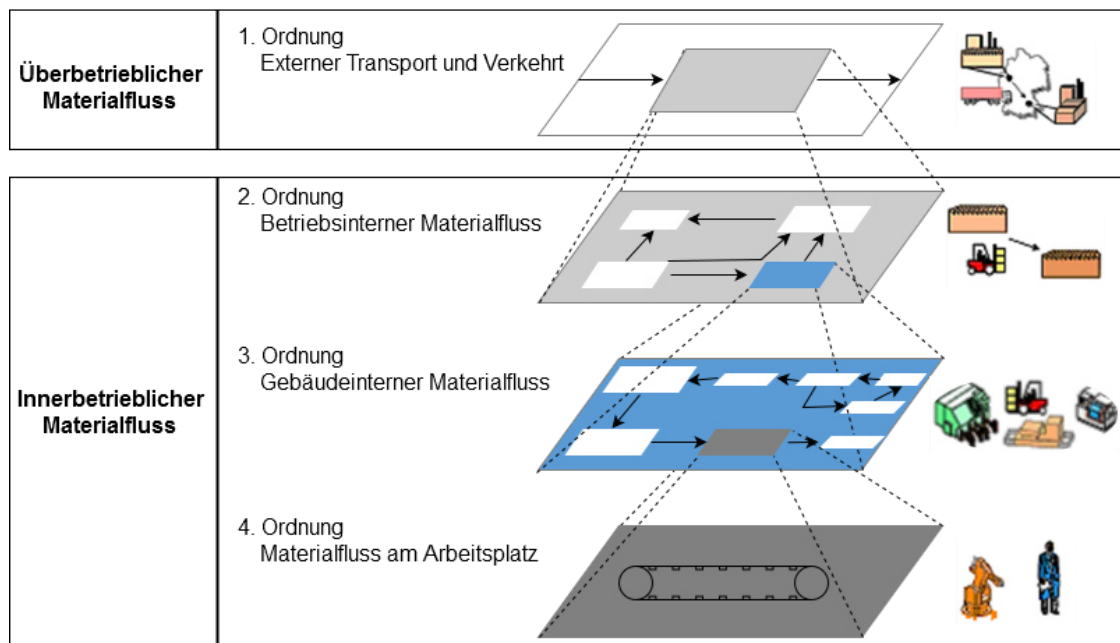


Abbildung 2-2 Kategorisierung der Materialflussebenen nach [Blessing 1999]

Bei dem in dieser Masterarbeit zu untersuchendem Materialflusssystem handelt es sich um einen innenbetrieblichen Materialfluss dritter Ordnung, da die Untersuchung der

Simulationsstudie sich auf den Materialfluss innerhalb eines Werksgebäudes bezieht und das Ziel hat, den Materialfluss vom Wareneingang über die Montage bis hin zur Versandzone zu analysieren.

2.4 Elemente und Begrifflichkeiten der Produktion und Logistik

Um Materialflusskonzepte untersuchen zu können, ist es notwendig, die Funktionen und Wirkungsweise der Materialflusselemente eines vorliegenden Materialflusses zu kennen. In diesem Abschnitt werden die in dieser Arbeit vorkommenden Elemente eingeführt und kurz erläutert.

- **Traileryard:** Abstellbereich für Wechselbrücken. Hier werden mit Komponenten gefüllte Wechselbrücken zur produktionsnahen Versorgung von Fertigungseinheiten angeliefert und abgestellt sowie leere und/oder mit Leergut befüllte Wechselbrücken abtransportiert. Ziel ist die Reduzierung von Wartezeiten von LKW Fahrer(innen) sowie die produktionsnahe Vorlagerung von Komponenten [Hagenlocher et al. 2013].
- **Wechselbrücke (oder auch Wechselaufbau, WAB):** austauschbare Ladeinheit, welche für den Bahn- und Schiffftransport entwickelt wurde und durch An- und Abkoppeln von einem LKW transportiert werden kann. Eine WAB wird des Weiteren als zusätzliche Lagerstufe verwendet [Süßmann et al. 2014].
- **Blocklager:** Lagerfläche, auf der Waren ein- oder mehrlagig gestapelt werden. Dabei werden die Waren möglichst artikelrein gelagert. Diese Lagermethode wird dann eingesetzt, falls nur ein Minimum an Lagereinrichtung und Hallenfläche zur Verfügung steht und wo hohe Durchsatzmengen realisiert werden [Bichler et al. 2013].
- **Just-in-Sequence (JIS):** Technik zur Bereitstellung von Materialien zum richtigen Zeitpunkt am gewünschten Ort in der korrekten Anzahl und in der richtigen Reihenfolge zur auftragsbezogenen Produktion [Gröbner 2015]. Die fest definierte Reihenfolge von Gütern in einem Auftrag wird auch als Perlenkette bezeichnet [Klug 2017].
- **Kommissionierzone:** Ort, an der Kommissioniertätigkeiten durchgeführt werden. Der Begriff des Kommissionieren wird in der VDI Richtlinie 3590-1 wie folgt definiert:

" [...] das Zusammenstellen von bestimmten Teilmengen (Artikel) aus einer bereitgestellten Gesamtmenge (Sortiment) auf Grund von Bedarfsinformationen (Aufträge)." [VDI 3590-1 1994, S. 2].

Die Kommissionierzone stellt damit den Übergang von einer sortenreinen Lagerung von Produkten zu einem bedarfsgerechten Verbrauch dar [Baumeister 2013].

- **Supermarkt:** dezentral organisierte und produktionsnah angeordnete Lagerstufe zur Gewährleistung der Materialversorgung in einer Produktionshalle. In den meisten Fällen wird ein Supermarkt eingesetzt, um einen Produktionsbereich mit kleinen Teilen zu versorgen [Klenk 2013].
- **Einschienehängebahn (EHB):** eine geführte Schienenbahn, die an einer aufgehängten Fahrschiene geführt wird. Durch die Schienenaufhängung wird eine Entgleisung in Senkrecht- und Querlage verhindert. Einschienehängebahnen, die ihren Ursprung im Bergbau haben, dienen zum Transport von Materialien und Bauteilen in Höhenlage [DIN 20629-2 2015].
- **Ganzheitliche Anlageneffektivität (GAE) und Anlageneffektivität (AE):** Kennzahlen zur Bewertung der Effektivität von technischen Systemen. Die GAE vergleicht dabei die Anzahl der Gutteile zur Betriebszeit, während die AE das Verhältnis zwischen Gutteile und Betriebsnutzungszeit beschreibt [Gottschalk 2016]. In Abbildung 2-3 werden die Formeln zur Berechnung der GAE und AE sowie die Zusammensetzung der Zeitanteile dargestellt.
- **Ganzheitliche Anlagenbetreuung (GAB):** Methoden zur stetigen Verbesserung der Produktionsprozesse zur Gewährleistung einer bestmöglichen Produktivität von Maschinen und Anlagen. Zur Erreichung dieses Ziels werden nicht nur die Maschinenbediener, sondern auch Mitarbeiter anderer Bereiche wie Instandhaltung, Management, und Qualitätssicherung in den Prozess eingebunden. GAB Tätigkeiten fokussieren sich dabei auf die Reduzierung der Verlustarten Ausfallzeiten, Rüstzeiten, Kleinstörungen, Geschwindigkeitsverluste, Ausschuss und Nacharbeit [Bock und Reineke 2007].

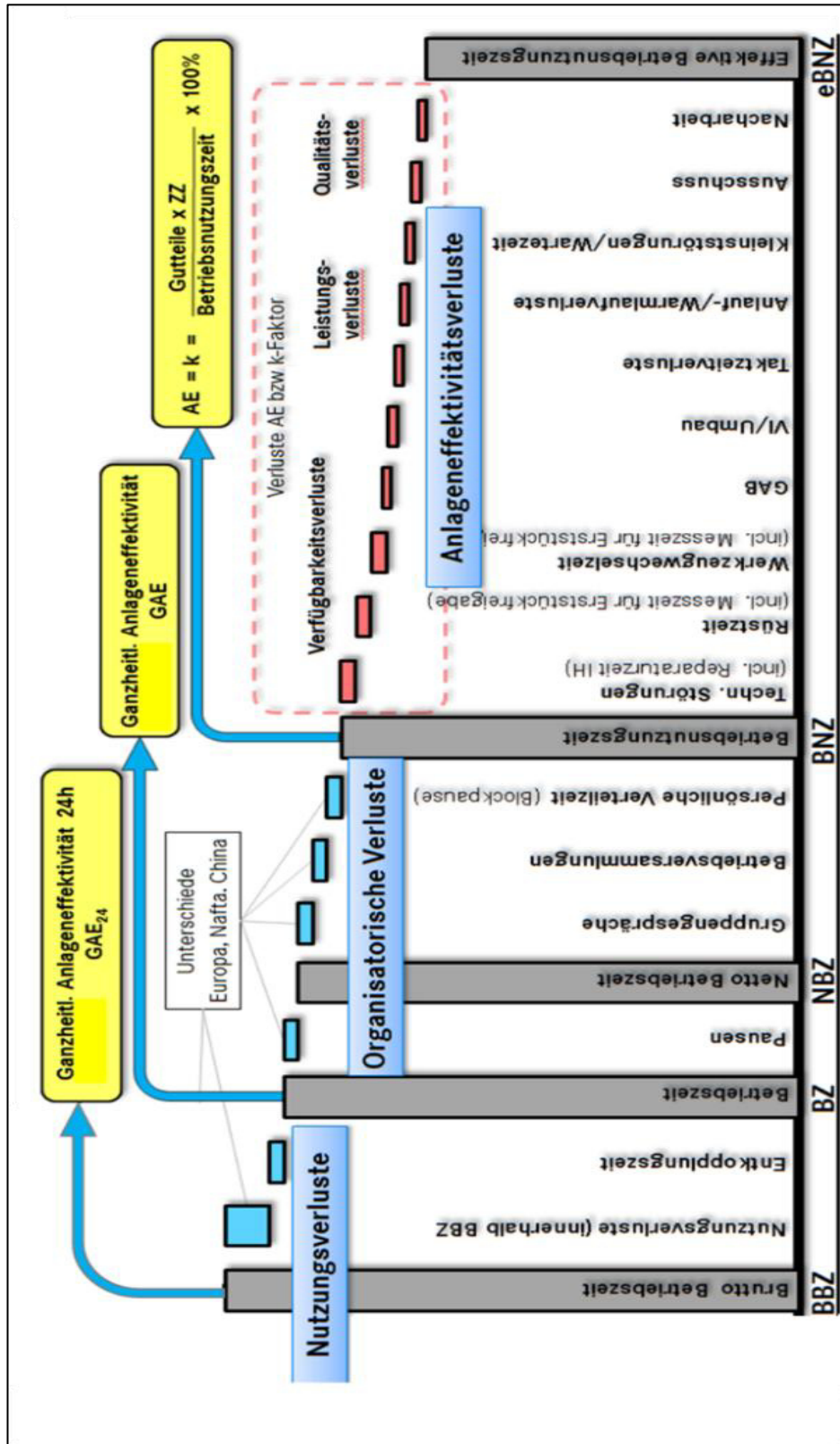


Abbildung 2-3 Berechnung der GAE und AE nach [Gottschalk 2016]

3 Ereignisdiskrete Simulation

Aufgrund des permanenten und immer schneller werdenden Wandels der Industrie erweisen sich Anpassungen hinsichtlich Prozesse in Produktion und Logistik als eine komplexe Herausforderung. Die fehlende Nutzung von Verbesserungspotenzialen hat zur Konsequenz, dass der deutschen Wirtschaft jährlich Summen in Milliardenhöhe verloren gehen. Diese nicht genutzten Milliardenbeträge führen im internationalen Vergleich zu einem Wettbewerbsnachteil gegenüber internationalen Wettbewerbern. Um jedoch die Spitzenposition im Bereich der technischen Entwicklung zu gewährleisten, sind ständige Modernisierungsmaßnahmen und die Suche nach neuem technischem Fortschritt notwendig. Faktoren wie die Nutzungsproduktivität der eingesetzten Ressourcen müssen sich daher für einen langfristigen Bestand des Unternehmens erhöhen. Eine Möglichkeit zur Aufdeckung von Verbesserungspotenzialen bietet dabei die Simulation [Baron et al. 2001, Rabe 2003].

In der VDI Richtlinie 3633-1 [2014] wird der Begriff der Simulation im Bereich der Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme wie folgt definiert:

„Simulation ist das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. Insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt. Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden“ [VDI 3633-1 2014, S. 3].

Unter Simulation versteht man im weitesten Sinne das Durchführen von Experimenten an einer geeigneten Nachbildung, anstatt am Original [Arnold und Furmans 2009]. Anhand einer Software, welches auch als Simulationswerkzeug bezeichnet wird, wird innerhalb der digitalen Simulation ein System in Form eines Computermodells dargestellt [Hedtstück 2013]. Hierfür ist es notwendig, dass das Modell in einer mathematisch-logischen Form vorliegt, sodass es in das Simulationswerkzeug umgesetzt werden kann [Eley 2012].

Je nach Art und Weise, wie das Zeitverhalten eines Simulationsmodells charakterisiert ist, kann zwischen verschiedenen Simulationsmethoden unterschieden werden. Grundsätzlich findet eine Abgrenzung zwischen kontinuierlicher und ereignisdiskreter Simulation statt [Law und Kelton 2000].

Bei einer kontinuierlichen Simulation existieren die Modellvariablen als kontinuierliche Funktionen der Simulationszeit. Dabei ändern sich die Modellvariablen stetig über die Zeit und sind zu jeder Zeit messbar. Eine klare Abgrenzung der Objektzustände ist hierbei nicht möglich. Typische Anwendungsfelder der kontinuierlichen Simulation sind dabei die Untersuchungen von Schwingungen und Strömungen [Bossel 1992].

Bei der ereignisdiskreten Simulation (DES, englisch: Discrete Event Simulation) ändern sich die Modellvariablen „sprunghaft“ zu bestimmten Zeitpunkten, und zwar, wenn Ereignisse eintreten bzw. ausgelöst werden. Dabei sind die Objektzustände klar abgrenzbar. Daher wird das ereignisdiskrete Simulationsmodell nur zu diskreten Zeitpunkten betrachtet, und zwar genau dann, wenn sich der Zustand des Modells ändert [Eley 2012]. Als Beispiele für typische Anwendungsfelder ereignisdiskreter Simulation lassen sich Montage- und Logistiksysteme nennen [Eley 2012]. Abbildung 3-1 stellt die Verläufe von Systemzustandsänderungen der diskreten und kontinuierlichen Simulation schematisch dar.

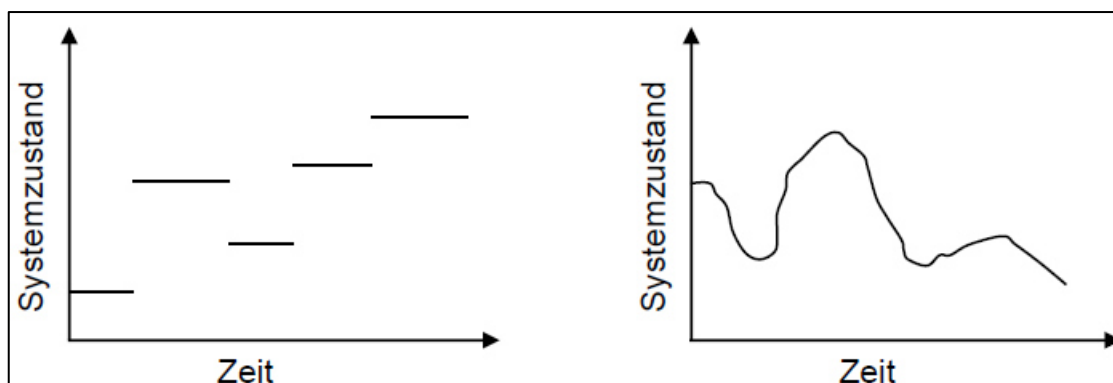


Abbildung 3-1 Unterschied DES und kontinuierliche Simulation nach [Banks et al. 2005]

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Simulationsmethoden nach statischen und dynamischen sowie stochastischen und deterministischen Simulationen zu unterscheiden. Während bei statischen Simulationen wie zum Beispiel der Monte-Carlo-Simulation ein Zustandsverhalten, welches unabhängig von der Zeit ist, berechnet wird, liegen bei dynamischen Simulationen ein existierendes Zeitverhalten vor [Fischer 2014]. Außerdem können Simulationsmodelle deterministisch oder stochastisch sein, abhängig davon, ob ein Zufallsverhalten vorliegt oder nicht [Kuhn und Wenzel 2008].

Mit Hilfe der ereignisdiskreten Simulation lassen sich neben Produktionsprozesse auch Aktivitäten der Logistik wie die Materialflusstechnik und Zuliefernetzwerke analysieren. So ist es bspw. möglich, für unternehmensübergreifende Prozesse ganze Transportnetze mit den jeweiligen Informations- und Materialflüssen darzustellen und

zu bewerten. Für den innerbetrieblichen Bereich können Produktionsprozesse sowie Beschaffungs- und Lagerlogistik abgebildet werden [Bracht et al. 2011]. Da es sich bei dieser Masterarbeit um eine Untersuchung eines Materialflusssystems mit stochastisch eintretenden Ereignissen handelt, wird hierfür der Ansatz der DES gewählt mit stochastischen Elementen gewählt.

3.1 Gründe für den Einsatz der ereignisdiskreten Simulation

Die Gründe für den Einsatz der Simulation sind vielfältig. Die Simulation wird dann eingesetzt, wenn das zu untersuchende reale System eine hohe Komplexität besitzt und es nicht möglich ist, ein Problem mit Hilfe analytischer Mittel zu lösen [Klug 2010; Arnold und Furmans 2009].

Bei der Simulation werden, im Gegensatz zu analytischen Methoden, über die Zeit wirkenden dynamischen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen, welche über stochastische Elemente charakterisiert werden, zwischen den einzelnen Elementen modelliert [Wenzel et al. 2008]. Des Weiteren bietet die Simulation die Möglichkeit, das Systemverhalten über einen längeren Zeitraum zu untersuchen, indem mehrere Szenarien abgebildet werden („was-wenn-Analyse“) und somit neue Erkenntnisse hinsichtlich zukünftiger Prognosen gewonnen werden [Kuhn und Wenzel 2008]. Dabei muss nicht auf das reale System bzw. auf laufende Prozesse eingegriffen werden [Siemens Industry Software GmbH 2017]. Sämtliche Untersuchungen der Szenarien zur Steigerung der Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit erfolgen auf Basis eines Simulationsmodells, in dem die Erkenntnisse aus der Simulation auf das reale System übertragen werden [ten Hompel und Heidenblut 2011]. Die Simulation bietet neben der Analyse von Szenarien und Alternativen eine objektive Grundlage zur Entscheidungsfindung sowie die Möglichkeit zur schnellen Reaktion von Veränderung und Einflüssen [Eley 2012]. Außerdem besteht zum einen die Möglichkeit, aus einer Vielzahl von Simulationssoftware sich die für die eigene Problemstellung die geeignetste auszuwählen [Günthner et al 1997]. Zum anderen ist die Analyse eines Systems mittels Modellerstellung und Simulation um ein vielfaches günstiger als die Untersuchung am realen System. Die Analyse mit Hilfe einer computergestützten Simulation hat außerdem den Vorteil, dass das reale System mit den jeweiligen bereits abgestimmten Prozessen keinem Risiko ausgesetzt wird [Gadatsch 2013].

Im der VDI Richtlinie 3633-1 [2014] werden zusammenfassend folgende Ziele für den Einsatz der Simulation genannt:

Der Einsatz der Simulation wird für den Gewinn von planerischer Sicherheit verwendet. Durch das Nachbilden geplanter Produktion- und Logistiksysteme sollen Planungsprämissen bestätigt werden. Dies hat zur Folge, dass die Funktionalität sensibler Systeme, Anlagen und Steuerungen vorab abgesichert wird und somit eine Risikominimierung erzielt wird. Des Weiteren bietet der Einsatz von Simulation die Möglichkeit, Kostenanalysen durchzuführen und somit die kostengünstigste Lösung eines bestehenden Problems zu identifizieren. Es können Einsparpotenziale erzielt werden, die sich bspw. durch das Vereinfachen von Systemen, die Parametrisierung Lager- und Puffergrößen sowie die Neuplanung von Abläufen ergeben. Außerdem wird mit dem Einsatz der Simulation beabsichtigt, das Systemverständnis von Anwender, Mitarbeitern und Kunden zu verbessern. Es ist beispielsweise mit Hilfe der Modellanimation möglich, dynamische Prozesse zu visualisieren und diese dann in einem Plenum den Mitarbeitern vorzustellen und diese daraufhin zu schulen. Ein fundiertes Wissen über Modellierung und Simulation ist dabei nicht notwendig. Durch die Zunahme des Systemverständnisses werden des Weiteren die Begründungen für die Auswahl von Planungsprämissen vorgelegt und erläutert. Durch das erhöhte Systemverständnis wird die Sensibilität gewählter Parameter auf das Gesamtsystem aufgezeigt und vermittelt. Als letztes Ziel der Simulation nennt die VDI Richtlinie 3633-1 [2014] die günstige Prozessführung. Dieses Ziel beinhaltet die Optimierung von Prozessen nach beliebigen Zielfunktionen wie beispielsweise Durchlaufzeit, Auslastung und Ausbringungsmenge sowie eine Produktivitätssteigerung und Identifikation einer optimalen Anlagensteuerung. Abbildung 3-2 zeigt die Ziele der Simulation nach VDI 3633-1 [2014] nochmals visuell auf.

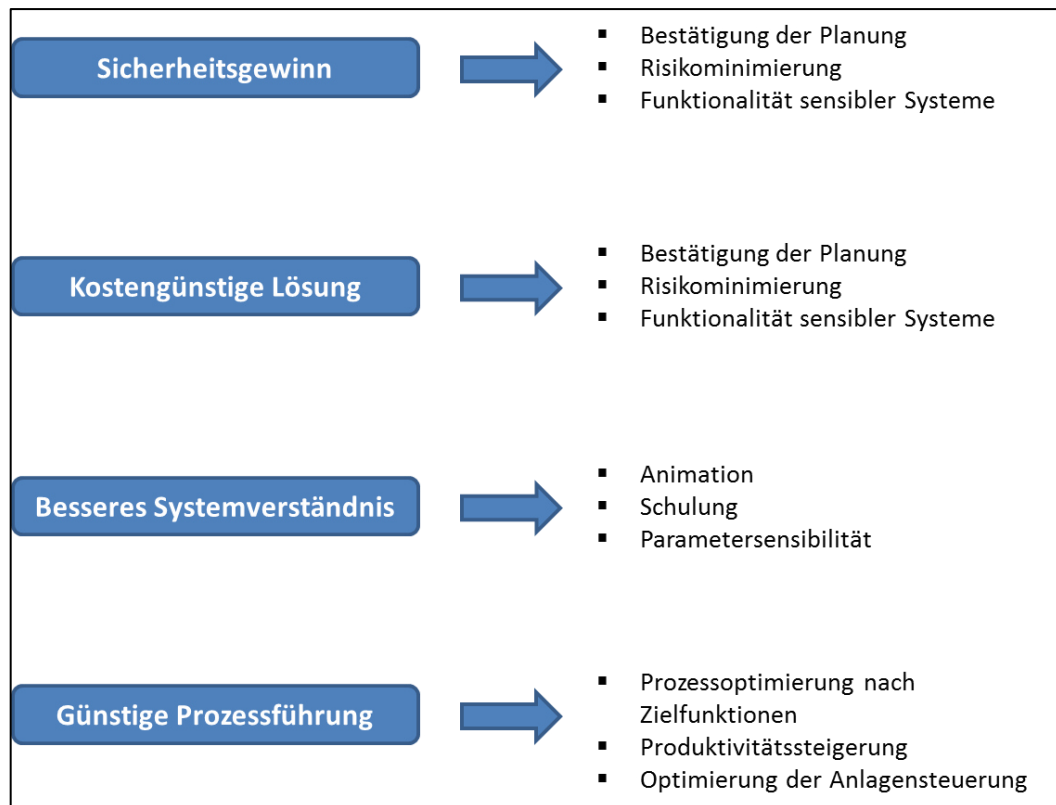


Abbildung 3-2 Ziele der Simulation nach [VDI 3633-1 2014]

Aufgrund des vielseitigen Nutzens hat sich die Simulation zu einem bedeutenden Planungswerkzeug entwickelt, welche zur Unterstützung einer objektiven Untersuchung von ganzheitlichen Systemen und Prozessen kaum noch wegzudenken ist [Baydar 2016, S. 3]. Simulation hat sich darüber hinaus zu einem Synonym zur Lösung geschäftsprozessbezogener Probleme entwickelt und hat sich als wirtschaftlich rentable Methode seit langem bewährt. Dabei steht stets die Übertragung der aus der Simulation gewonnenen Erkenntnisse auf die Realität im Vordergrund [Baron et al. 2001, Rabe 2003].

Jedoch ist zu erwähnen, dass es sich bei der Simulation um keine Optimierung handelt. Während mit dem Begriff der Optimierung ein mathematisches Optimierungsverfahren gemeint ist, wird die Simulation lediglich zur Beurteilung und anschließender Verbesserung des Ist-Zustandes genutzt, um die beste Alternative aus mehreren Szenarien auszuwählen. Sie liefert daher kein Optimum in Form eines Parameters oder eines Key Performance Indicator (KPI), der beste zu erreichende Zustand wird lediglich näherungsweise erreicht. Dies geschieht mit Hilfe der Variation von Parametern bei jedem Simulationslauf. Da hierfür mehrere Schritte zur Annäherung an das „Optimum“ benötigt werden, gehört die Simulation zu den experimentellen Optimierungsverfahren

[Pawellek 2008; Schneider 2008; Eley 2012]. Die Simulation und die Optimierung können ergänzend eingesetzt werden und schließen sich daher nicht aus. Dies geschieht über die Integration von Optimierungsverfahren in das Simulationsmodell [Eley 2012].

3.2 Elemente und Werkzeuge in der ereignisdiskreten Simulation

3.2.1 Der Modellbegriff

Im Kontext der Simulation wird das Modell als das Ergebnis des Nachbildens eines realen Systems bezeichnet [Eley 2012]. Im Folgenden ist mit dem Begriff Modell das Simulationsmodell gemeint. Die VDI Richtlinie 3633-1 [2014] definiert den Begriff des Modells wie folgt:

„Ein Modell ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“ [VDI 3633-1 2014, S. 3].

Ein Modell fungiert daher als eine abstrahierte Darstellung eines realen Systems und bildet sowohl die zeitliche als auch das logisch-strukturelle Verhaltensweise ab. Dies geschieht zumeist über eine vereinfachte Darstellung des zu untersuchenden Systems. Durch die Ausführung von Experimenten am Modell können nicht bekannte Eigenschaften und Abläufe identifiziert werden [Baydar 2016].

Nach Stachowiak [1979] ist ein Modell durch folgende Merkmale charakterisiert:

1. **Abbildung:** Ein Modell versteht sich als eine Darstellung eines physischen oder nichtphysischen Gegenstands (das Original). Dieses Original kann auch ein Modell als solches sein.
2. **Verkürzung:** In einem Modell werden nicht alle Eigenschaften des Originals übernommen. Vielmehr werden nur die Attribute modelliert, die für die Untersuchung der Problemstellung relevant sind.
3. **Pragmatismus:** Modelle sind ihren jeweiligem Original nicht eindeutig zugeordnet, da sie nur für einen speziellen Zeitraum für einen eindeutigen Verwendungszweck erstellt werden. Dabei dienen Sie zum Zweck der Erfüllung für bestimmte Personen bzw. Interessensgruppen in fest definierten Zeiträumen und unter Berücksichtigung gedanklicher und/oder tatsächlich getroffener Operationen.

Insbesondere ist darauf zu achten, dass bei der Modellierung unter Berücksichtigung der relevanten Systemeigenschaften ein sinnvoller Abstraktionsgrad zu wählen ist. Hierbei gilt: *„Die Modellierung sollte so genau wie nötig und nicht so genau wie möglich sein“*

[Holtewert et al. 2014, S. 34]. Eine Form der Darstellung von Systemkomponenten ist der so genannte Black Box Ansatz. Bei dieser Darstellung werden nicht die internen Vorgänge beschrieben, vielmehr werden die äußeren Eigenschaften und Beziehungen zu anderen Systemelementen dargestellt. Im Zuge der Black Box Betrachtung sind lediglich die Eingangs- und Ausgangsgrößen von Bedeutung, während Prozesse innerhalb des Systems vernachlässigt oder durch Zustandsgrößen beschrieben werden [Stempfle 2008]. Abbildung 3-3 zeigt die Wirkungsweise der Black Box Betrachtung.



Abbildung 3-3 Black Box Ansatz

3.2.2 Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse

Zunächst soll der Unterschied zwischen temporären und permanenten Objekten erläutert werden. Vorübergehend im System existierende Objekte wie beispielsweise Werkstücke, Aufträge und Verpackungsmaterial werden als temporäre Objekte bezeichnet, während dauerhaft im System existierende Objekte wie Maschinen und Kommissionieranlagen als permanente Objekte bezeichnet werden [Hedtstück 2013].

Innerhalb der DES wird das zu betrachtende System mit Hilfe von Prozessen, Ereignissen und Aktivitäten dargestellt. Jedes Ereignis in einem ereignisdiskreten System führt zu einer Zustandsänderung. Sie weisen über keinen Zeitverbrauch auf und können nicht weiter unterteilt werden. Zusätzlich werden Ereignisse, je nach Ort der Generierung, in endogene oder exogene Ereignisse unterschieden. Während endogene Ereignisse durch andere im Modell existierende Ereignisse oder Zustände bedingt sind, werden exogene Ereignisse außerhalb der Modellgrenzen erzeugt. Ein Ereigniszustand besteht solange, bis ein Folgeereignis eintritt und einen neuen Zustand „erzeugt“. Die Transformation des Zustandes eines Objektes wird als Aktivität bezeichnet. Sie enthält eine zeitbehaftete Operation und ist gekennzeichnet durch ein Anfangs- und Endereignis. Die Folge von Ereignissen, die zeitlich geordnet und inhaltlich zusammengehörig sind, wird als Prozess bezeichnet. Ein Prozess wird in den meisten Fällen einem bestimmten Simulationsobjekt zugeordnet [Kuhn und Wenzel 2008].

Um die Beziehung von Ereignissen, Aktivitäten und Prozessen zu illustrieren, wird nun ein realitätsnahes Beispiel aus einem Produktionsbetrieb betrachtet. Ein Werkstück wird zum Zeitpunkt t_1 auf eine Maschine umgelagert. Auf dieser Maschine findet eine Bearbeitung mit Δt Zeiteinheiten statt. Im Kontext der DE sind nur die Zeitpunkte relevant, in denen die Umlagerung des Werkstückes auf und von der Maschine vollzogen wird und der Zeitpunkt, nachdem die Bearbeitung erfolgt ist. Der Zeitpunkt, zu dem das Werkstück auf der Maschine beendet ist, ist demnach der Zeitpunkt $t_2=t_1+\Delta t$. Diese Zeitpunkte, in denen das Modell eine Zustandsveränderung erfährt, werden Ereignisse genannt. Diese Ereignisse stoßen oder beenden Aktivitäten. Demzufolge steht am Anfang und am Ende jeder Aktivität ein Ereignis. In diesem konkreten Beispiel ist die Bearbeitung des Werkstücks die Aktivität. Der gesamtheitliche Vorgang von der Auftragsanfrage über die Bearbeitung von zwei Arbeitsgängen bis hin zu zur Beendigung wird Prozess genannt [Eley 2012]. In Abbildung 3-4 wird dieses Beispiel veranschaulicht. Dieses beinhaltet einen Prozess sowie zwei Aktivitäten und die dadurch fünf resultierende Ereignisse.

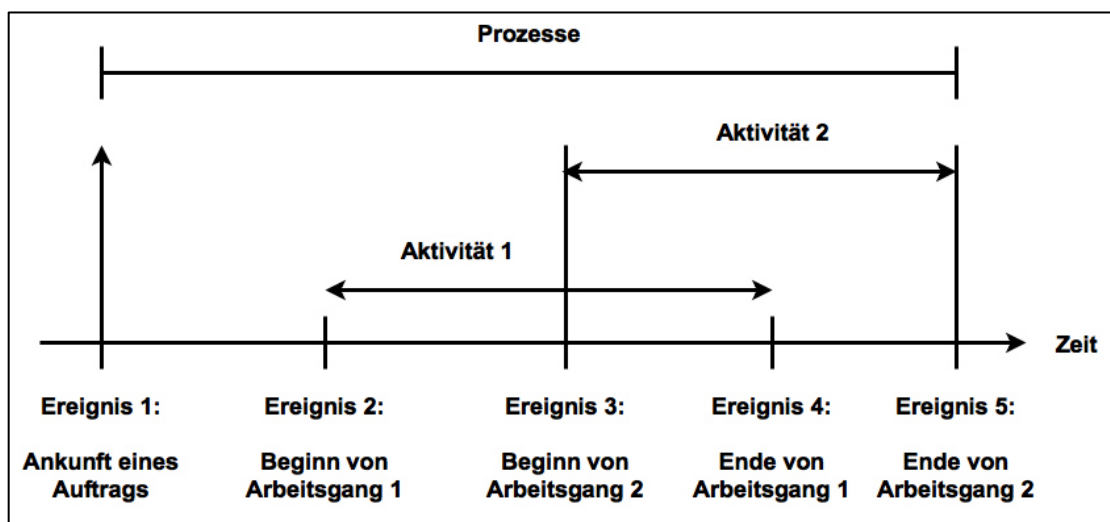


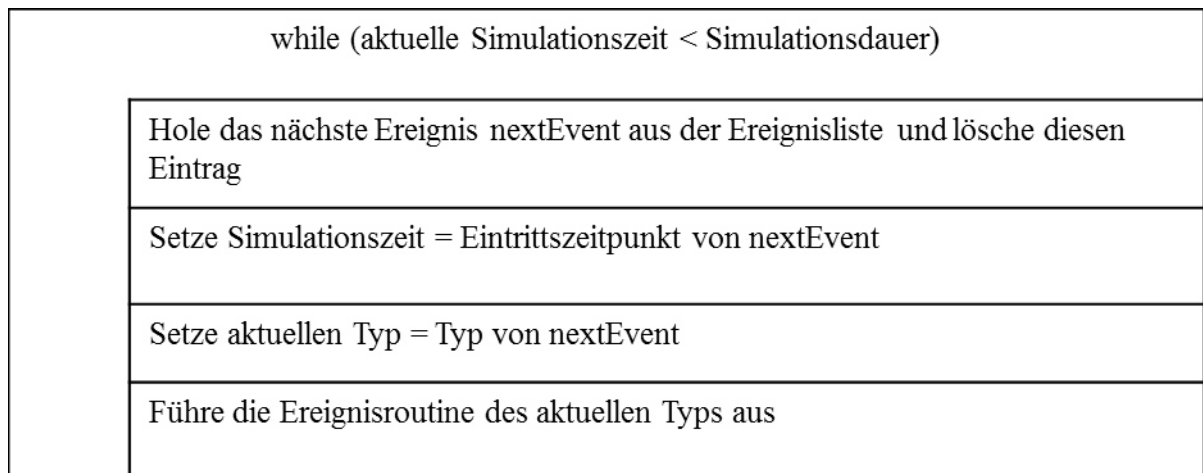
Abbildung 3-4 Prozesse, Aktivitäten und Ereignisse nach [Eley 2012]

3.2.3 Werkzeuge der ereignisdiskreten Simulation

Im Folgenden werden die elementaren Werkzeuge der DES eingeführt, um das grundlegende Verständnis der Systemmodellierung zu gewährleisten.

In der DES gilt es, die im Modell befindlichen Ereignisse zu verwalten. Dies geschieht über den Ereignisverwalter, die auch als Simulationsuhr bezeichnet wird [Eley 2012]. Dieser hat den Zweck, die im Modell generierten Ereignisse in einer so genannten Ereignisliste in der zeitlich eintretenden Reihenfolge zu sortieren und zu dokumentieren. Dabei „springt“ die Simulationsuhr von einem Ereignis zum nächsten“ [Suhl & Mellouli 2013]. Beendete Ereignisse werden anschließend aus der Ereignisliste entfernt. Die Simulation endet, wenn die Ereignisliste leer ist oder die im Vorfeld definierte Simulationszeit abgelaufen ist [Eley 2012]. Je nach verwendetem Simulationstool existieren verschiedene Algorithmen zur Steuerung einer Ereignisliste. Das Struktogramm 3-1 zeigt eine beispielhafte Steuerung der ereignisdiskreten Simulation nach Hedstück [2013] auf.

Struktogramm 3-1 Beispielhafter Algorithmus der DES nach [Hedstück 2013]



Die weiteren Elemente der DES werden nun zusammenfassend nach Eley [2012] und Suhl & Mellouli [2013] erläutert:

- **Entitäten:** Bei Entitäten handelt es sich um temporär oder permanent erzeugte Einheiten, die sich innerhalb des Simulationsmodells fortbewegen. Sie werden auch bewegliche Einheiten (BE) genannt. Dabei werden sie vom Simulationsprogramm erzeugt und nach ihrer geplanten Verwendung vernichtet. Entitäten können dabei mittels Statistiken untersucht werden, indem beispielsweise KPI wie Durchlaufzeit im Modell oder Durchsatzmenge ausgewertet werden. Beispiele für BEs sind Werkstücke, welche als Einzelteile oder als Lose dargestellt werden können, oder Verpackungsmaterial.
- **Ressourcen:** Ressourcen werden von Entitäten in Anspruch genommen. Dabei „blockieren“ diese die Ressourcenkapazität und verweilen dort in vorher definierten

Zeiten. Sie sind unbeweglich und können daher in „belegtem“ oder „nicht belegtem“ Zustand beobachtet werden. Nach der Inanspruchnahme geben Ressourcen die Entitäten wieder frei. Beispiele für Entitäten sind Montageanlagen und Nachbearbeitungsstationen.

- **Wartezonen:** Wartezonen fungieren als temporären Aufenthaltsort für Entitäten, falls eine Ressource nicht verfügbar ist. Die Abarbeitung der Entitäten in einer Wartezone kann durch verschiedene Steuerungsprinzipien wie bspw. First in-First out (FIFO) realisiert werden.
- **Attribute:** Attribute verleihen Entitäten und Ressourcen Merkmale und Kenngrößen wie Design, Gewicht und Farbe. Sie können sich im Verlauf der Simulationszeit ändern und nehmen verschiedene Attributsausprägungen ein. Ein typisches Attribut einer Entität ist der Zustand eines modellierten Werkstücks, welches die Ausprägungen „in Ordnung“ oder „nicht in Ordnung (NIO“ einnehmen kann.
- **Variable:** Variable sind Kenngrößen, die unabhängig von den dynamischen Entitäten sind und dienen zur Speicherung von Informationen. Dabei können ganzzahlige Werte oder aber auch Tabellen und Listen gespeichert werden, auf die die Entitäten anschließend Zugriff haben.
- **Methoden:** Methoden sind Konstrukte, die durch eine Programmiersprache realisiert werden. Sie können zur Steuerung einzelner Elemente oder zur Definition von Ablaufprozeduren genutzt werden, indem beispielsweise Attributwerte von Entitäten verändert werden.

Um in einem Simulationsmodell das zufällige Eintreten von Ereignisse, Aktivitäten und Bearbeitungsdauern darzustellen, werden auf so genannte Zufallszahlen zurückgegriffen. Diese werden zur Erzeugung von Zufallsprozessen verwendet und können anhand statistischer Verteilungsfunktionen dargestellt werden. Jedoch ist anzumerken, dass es im Kontext der ereignisdiskreten Simulation kein „echter“ Zufall dargestellt wird bzw. werden kann [Eley 2012]. Vielmehr werden Pseudozufallszahlenfolgen verwendet, die durch ihren periodischen Aufbau gekennzeichnet sind. Durch ihre Periodizität können Zufallszahlen jederzeit reproduziert werden, was zwar im Widerspruch zur Zufälligkeit steht, jedoch das Prüfen von Algorithmen zulässt [Werners 2013; Jetzke 2007]. *„Mit einer wirklich zufälligen Folge könnten Ergebnisse stets unterschiedlich sein und es wäre nicht zu klären, ob die Ursache einer Abweichung in*

der Zahlenfolge oder in der Implementierung eines Algorithmus liegt“ [Jetzke 2007, S. 104].

Zufallszahlen werden in so genannten Zufallszahlengeneratoren im Simulationsprogramm erzeugt. Der Anwender kann in diesem Generator den Startwert eines Zufallszahlenstroms (auch Stream genannt) eingeben. Dieser Startwert auch Seedwert bzw. Seed genannt und stellt die Ausgangsbasis zur Kalkulation des Zufallszahlenstroms. Dabei führen verschiedene Startwerte zu unterschiedlichen Ergebnissen Streams, während die Eingabe von gleichen Seedwerten dazu führt, dass ein identischer Zufallszahlenstrom erzeugt wird (siehe Abbildung 3-5).

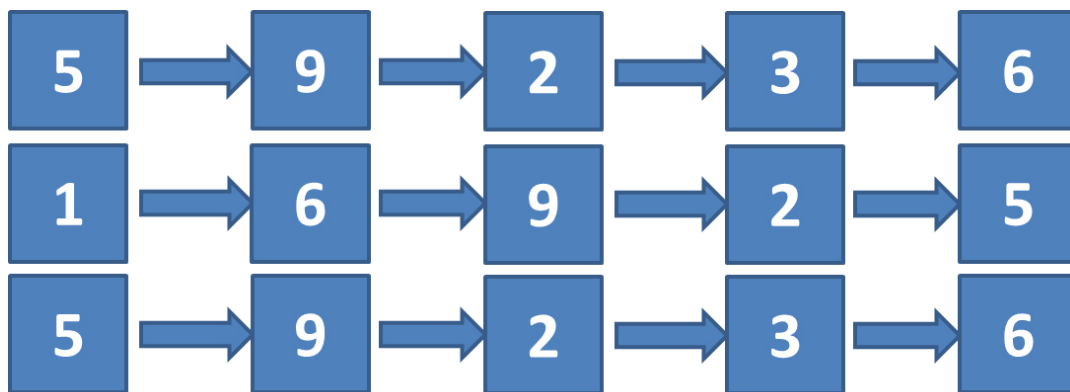


Abbildung 3-5 Schematische Darstellung zur Erzeugung von Streams

Als weitere wichtige Komponenten der DES sind die benötigten Daten zu nennen. In Rahmen der DES wird laut VDI Richtlinie 3633-1 [2014] zwischen Eingabedaten, Experimentdaten, interne Modelldaten sowie Simulationsergebnisdaten unterschieden. Eingabedaten werden von Benutzer bzw. Auftraggeber bereitgestellt oder aus Programmen und Systemen übernommen. Diese haben den Zweck, Modellbausteine, die zur Modellierung von beispielsweise Werkstücken und Maschinen verwendet werden, zu parametrisieren. Sie können statisch (z.B. Lagerkapazitäten oder Anzahl verwendeter Fahrzeuge) oder dynamisch-stochastisch (z.B. Stördauer und –abstand von Bearbeitungsstationen sowie schwankende Anlieferungszeiten) sein. Mit Hilfe der Experimentdaten werden relevante Modelleigenschaften definiert und für jeden Simulationslauf Experimentdaten neu bestimmt. Typische Experimentdaten sind beispielsweise Simulationsbeginn und -dauer. Bei den internen Modelldaten handelt es sich um festgelegte Konstanten und aus der Simulation resultierenden Variablen, die ausschließlich intern verwendet werden. Interne Modelldaten können beispielsweise Hilfs-

oder Pseudovariablen sein. Simulationsergebnisdaten stellen den Output eines Simulationslaufes dar und werden in Form von Dateien, Listen und Tabellen ausgegeben, um eine weitere Bewertung zu gewährleisten. Typische Ergebnisdaten sind Durchlaufzeit von Werkstücken, Durchsatzmenge sowie Maschinenbelegungszustände [VDI 3633-1 2014]. Abbildung 3-6 stellt die verschiedenen Datenarten nochmals graphisch dar.

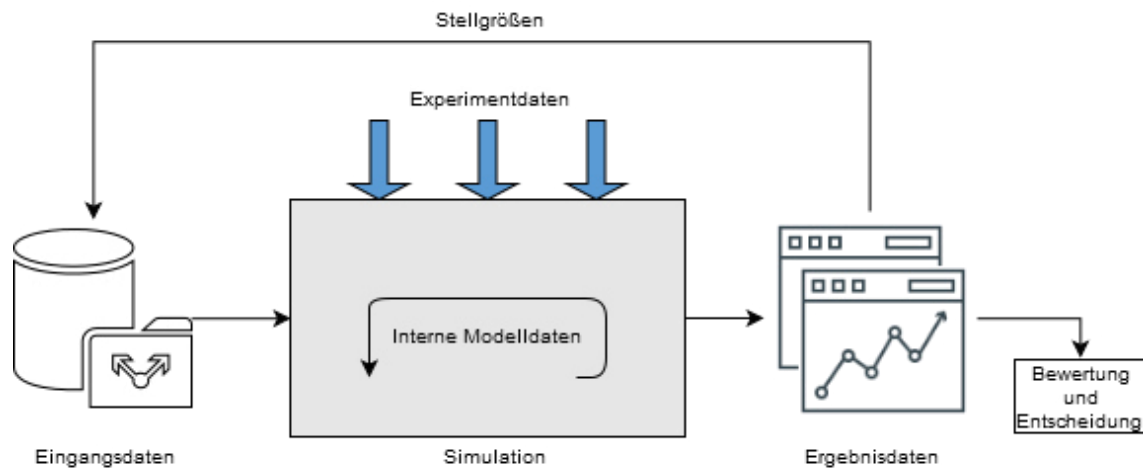


Abbildung 3-6 Simulationsdaten nach [März und Weigert 2011]

3.3 Tecnomatix Plant Simulation

In den letzten Jahren haben Simulationssysteme an Beliebtheit gewonnen, die mit Hilfe von Methodenbausteinen arbeiten. Es wird bei diesen Systemen die Bausteine mittels „Drag & Drop“ auf eine Oberfläche platziert und miteinander verbunden. Dieses Vorgehen hat den großen Vorteil, dass der Simulationsaufwand um ein vielfaches reduziert wird. Des Weiteren ermöglicht diese Vorgehensweise, dass die Einstiegschürden in das Arbeitsgebiet der Simulation verringert werden, was ebenfalls den Vorteil hat, dass selbst wenig erfahrene Anwender einen erleichterten Einstieg in die Modellierung erster Systeme haben. Durch relativ einfache Anpassungen können sowohl diverse Fertigungsarten als auch höhere Modellierungstiefen durch visuelle Änderungen und Ergänzungen realisiert werden. Das in dieser Arbeit verwendete Simulationsprogramm „Tecnomatix Plant Simulation“ wird nach dem Prinzip der Funktionsbausteine bedient [Rabe 2003; Bangsow 2011]

Auch das in der vorliegenden Arbeit verwendete Simulationswerkzeug „Tecnomatix Plant Simulation“ der Siemens AG arbeitet nach dem Prinzip der Funktionsbausteine [Rabe 2003; Bangsow 2011]. Dieses Werkzeug im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Plant Simulation ist ein Werkzeug zur ereignisdiskreten Simulation, welches sich aufgrund der einfachen Zugänglichkeit und Handhabung in der Wissenschaft und Industrie zum führenden Simulationswerkzeug für Simulation etabliert hat. Dabei basiert das Programm auf eine Darstellung einzelner Elemente durch Bausteine und wird daher zur bausteinbezogenen Modellierung zugeordnet. Jedoch ist zu erwähnen, dass mit steigender Komplexität der gesamten Simulationsstudie die Umsetzung in Plant Simulation ebenfalls komplexer wird [Bangsow 2008, Bangsow 2011; EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG 2017]. Durch die Verwendung von Plant Simulation wirbt die Siemens AG mit dem Potential zur Einsparung der Eigeninvestition, Steigerung der Produktivität, Senkung der Kosten für Neusysteme, Optimierung des Ressourcenverbrauches, Reduzierung des Lagerbestandes und der Durchlaufzeit [Siemens Industry Software GmbH 2017].

Die Benutzeroberfläche von Plant Simulation lässt sich in vier Bereiche unterteilen. Die Konsole dient zur Ausgabe von Informationen wie z.B. Fehlermeldungen, die im Verlauf der Simulationslaufes entstehen. Sie ist besonders für die Fehlersuche in komplexen Systemen hilfreich. Die Toolbox stellt die Schnellzugriffsfunktion der Klassenbibliothek dar und kann individuell angepasst werden. Das Netzwerkfenster fungiert als Arbeitsfläche, auf der die Elemente aus der Klassenbibliothek per Drag & Drop abgelegt werden und mittels Kanten verknüpft werden. Durch diese Arbeitsweise ist ein einfaches Experimentieren gewährleistet.

Zusätzlich zu den Bereichen der Benutzeroberfläche ist der Ereignisverwalter zu nennen. Dieser wird als Werkzeug zur Terminierung (Start, Stopp und Zurücksetzen) der Simulationsuhr verwendet. Außerdem kann mit Hilfe des Ereignisverwalters die Simulationsgeschwindigkeit angepasst werden. Speziell für Simulation, die ein großes Zeitfenster abbilden, ist diese Funktion sehr hilfreich. Die Option „Einzelschritt-Simulation“ innerhalb des Ereignisverwalters ermöglicht zudem, immer zum nächsten Ereignis im Modell zu „springen“ [Eley 2012; Bangsow 2011]. Abbildung 3-7 stellt die Oberfläche und den Ereignisverwalter von Plant Simulation graphisch dar.

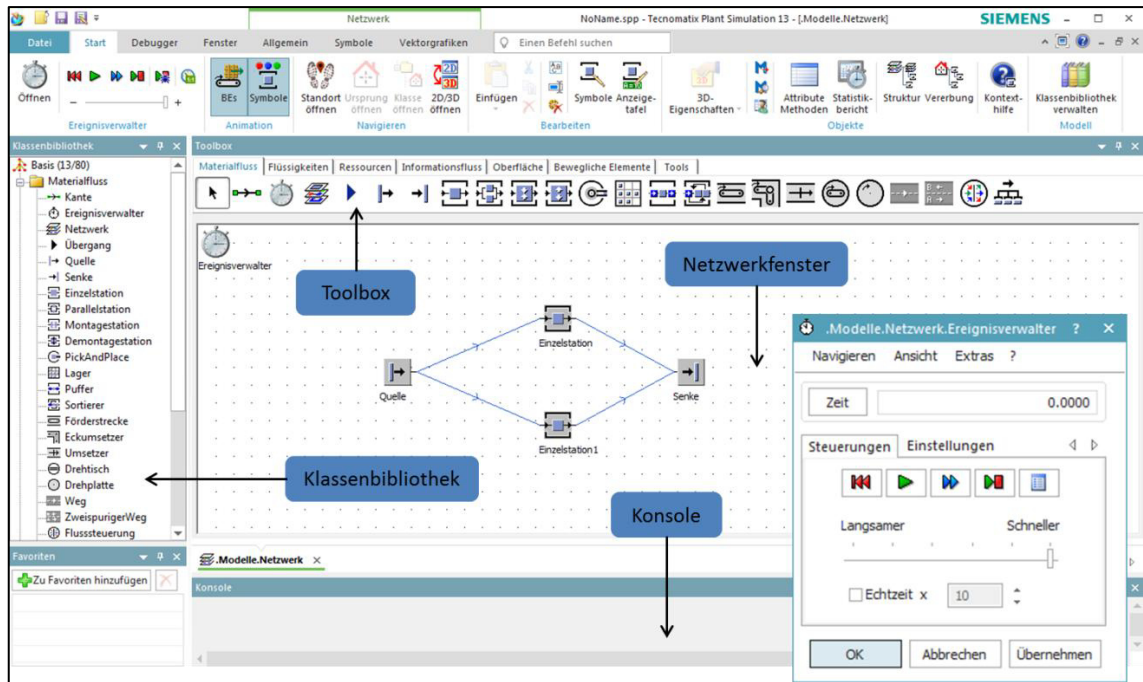
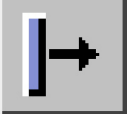
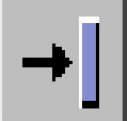

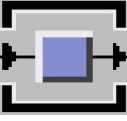





Abbildung 3-7 Benutzeroberfläche und Ereignisverwalter von Plant Simulation

Plant Simulation nutzt in seiner Programmierschnittstelle die Simulationssprache SimTalk, um auch erfahrene Simulationsanwender anzusprechen. Hierbei handelt es sich um eine objektorientierte Sprache, die die Modifizierung der Grundbausteine und die Realisierung von komplexen und realitätsgetreuen Systemmodellen ermöglicht [Bangsow 2011]. Weitere Steuerungs- und Parameterfunktion bieten die zu verwendenden Bausteine. Per Doppelklick lässt sich das Objekteigenschaftsfenster öffnen, in der je nach Bausteine verschiedene Parametrisierungen durchgeführt werden. So kann z.B. in Einzelstationen die Bearbeitungszeit von BEs und in Pufferstationen die Kapazität eingetragen werden. Einen Überblick zu den wichtigsten Elementen in Plant Simulation gibt die Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1 Standardbausteine in Plant Simulation nach [Baydar 2016]

Name	Funktion	Symbol
Quelle	Die Quelle stellt den Eingang bzw. jeder Simulation dar. Sie produziert Bes, wobei auch verschiedene BE-Typen generiert werden können. Typischerweise wird der Warenausgang als Quelle dargestellt.	
Senke	In der Senke werden die BEs aus dem Modell vernichtet. Sie kann also die BEs nicht an Folgebausteine abgeben und fungiert somit als Simulationsausgang. So werden Versandzonen und Warenausgänge bspw. als Senken abgebildet.	
BE	BEs repräsentieren die Fördergüter innerhalb eines Modells. Diese können z.B. Werkstücke oder Verpackungsmaterialien sein. Sie „belegen“ die Kapazität der Bausteine, in der sie sich befinden.	
Einzelstation	Eine Einzelstation bildet eine Maschine oder Arbeitsplatz mit der Kapazität von eins ab. Auf diesem Baustein werden die BEs bearbeitet.	
Kante	Durch Kanten werden die Bausteine miteinander verknüpft, wobei die Pfeilspitze die Materialflussrichtung anzeigt.	
Methode	Mit Hilfe von Methoden können Steuerungen realisiert werden, die von Objekten aufgerufen werden. Hierfür wird die Programmiersprache SimTalk benutzt.	
Tabelle	Tabellen dienen zur Ein- und Ausgabe von Daten und Ergebnissen. Zusätzlich können Tabellen durch geschriebene Methoden ausgefüllt bzw. überschrieben werden.	

3.4 Das Vorgehensmodell zur Durchführung einer Simulationsstudie

Um ein einheitliches Vorgehen zur Durchführung einer Simulationsstudie zu etablieren, wurde das Vorgehensmodell nach Rabe et al. [2008] entwickelt. Dieses beinhaltet sämtliche Phasen und Aktivitäten, die im Kontext einer Simulationsstudie zu berücksichtigen sind. Abbildung 3-8 stellt das Vorgehensmodell zunächst graphisch dar.

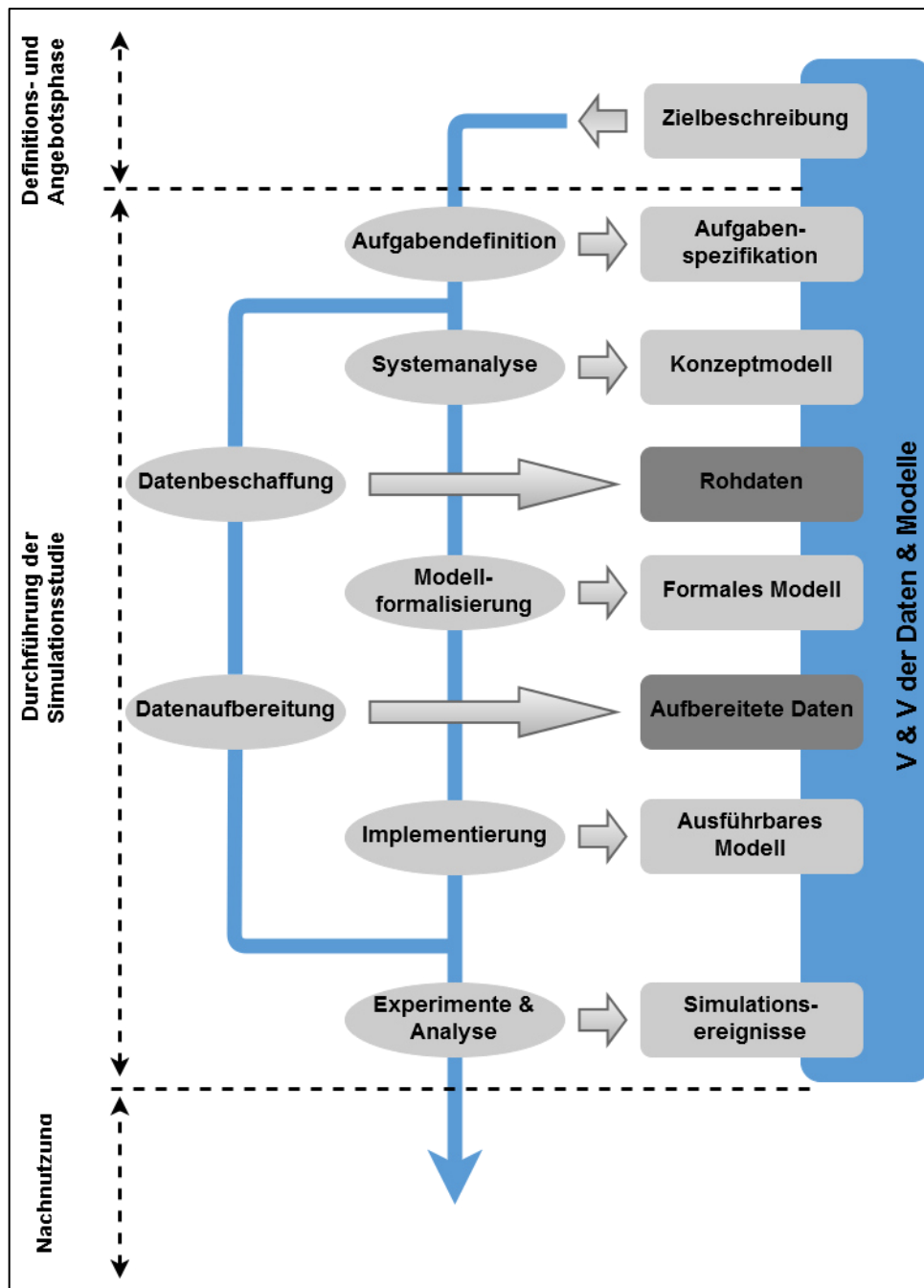


Abbildung 3-8 Vorgehensmodell zur Simulationsstudie nach [Rabe et al. 2008]

Bei der Darstellung des Vorgehensmodells ist zu beachten, dass die Projektphasen als Ellipsen und die jeweiligen Phasenergebnisse als Rechtecke dargestellt werden. Phasenergebnisse können Modelle, Dokumente oder eine Kombination von beidem sein.

Die Definitions- und Angebotsphase hat zum Ziel, eine grobe Zielbeschreibung für die Simulationsstudie auszuarbeiten, welche anschließend als Orientierung dient. Die Beschreibung des zu untersuchenden Systems erfolgt innerhalb der Zielbeschreibung. Hier werden die Systemausprägungen definiert und das Ziel der Simulation erläutert. In vielen Fällen sind die jeweiligen Simulationsziele konträr, sodass eine Priorisierung

dieser Ziele durchgeführt werden muss. Die Definitions- und Angebotsphase dient somit als Einstieg in die eigentliche Simulationsstudie [Wenzel et al. 2008].

Die Durchführung der Simulationsstudie beinhaltet sieben Projektphasen, die mit der Aufgabendefinition beginnt. In dieser Phase werden die aus der Zielbeschreibung resultierenden Ziele konkretisiert, die Systemgrenzen festgelegt sowie wichtige Systemkomponenten aufgezeigt. Außerdem wird festgelegt, wie detailliert das System zur Erfüllung der Aufgabe modelliert werden muss. Hierfür ist eine Beschreibung der Daten gemäß ihrer Art, ihrem Umfang und ihrer Granularität erforderlich. In diesem Kontext sind auch die zu nutzenden Informations- und Datenquellen sowie Nutzung und Implementierung externer Schnittstellen zu bestimmen. Eine weitere Aufgabe der Aufgabendefinition ist die Konkretisierung des Modellzwecks und dessen Nachnutzung sowie die Festlegung der Anforderung an die Lösungsmethode und der Abnahmekriterien in Bezug auf technische Anforderungen, funktionale Anforderungen, Ergebnisanforderungen, Anforderungen an die Nutzbarkeit, Anforderungen an die Erreichung der Projektziele sowie Projektmanagementanforderungen [Wenzel et al. 2008]. Ziel der Aufgabendefinition ist die Aufgabenspezifikation in Form einer von Auftraggeber und -nehmer abgestimmten Aufgabenbeschreibung. Diese dient zur Bildung eines gemeinsamen Grundverständnisses zur Lösung der Aufgabe [Rabe et al. 2008].

Durch die Systemanalyse werden die zentralen Ziele zur Anfertigung des Simulationsmodells festgelegt. Hierbei wird festgelegt, welche Systemelemente Mechanismen zur Darstellung der Problemstellung und -lösung im Detail abgebildet werden. Um einen hohen Effizienzgrad des Modells zu gewährleisten, werden irrelevante Elemente nicht berücksichtigt bzw. nicht im Detail dargestellt. Umgekehrt führt die Nichtberücksichtigung relevanter Parameter und Systemeigenschaften dazu, dass ein ungeeignetes Modell konzipiert wird und dadurch falsche Ergebnisse entstehen, die zu falschen Entscheidungen führen können [Rabe et al. 2008].

Das aus der Systemanalyse entstehende Konzeptmodell beschreibt die Anordnung und Gestaltung des Modells und der dazugehörigen Submodelle. Die Darstellung kann dabei in Form von Flussdiagrammen, Netzplänen oder Prozesskettenmodellen realisiert werden, die sowohl Material- als auch Informationsflüsse mit Ein- und Ausgabegrößen des Systems beinhalten [Wenzel et al. 2008]. Auch wenn der Begriff des Konzeptmodells nicht eindeutig definiert ist, muss es darlegen, welcher Systemumfang zu modellieren ist und wie die Umsetzung zu tätigen ist, jedoch muss in diesem Kontext keine Aussage bzgl. der Implementierung in das ausführbare Simulationswerkzeug getroffen werden [Rabe et al. 2008].

Die Datenbeschaffung als Projektphase hat zum Ziel, die benötigten Rohdaten für die Simulation zu beschaffen, um diese dann dem Auftragnehmer zur Verfügung zu stellen. Typische Rohdaten können Stücklisten, Maschinenbelegungspläne sowie Schichtpläne

sein. In Rahmen der Datenaufbereitung werden die Rohdaten durch Bereinigung, Strukturierung und Verdichtung der Daten in aufbereitete Daten transformiert. Dabei kann die Verdichtung der Daten durch Abbildung in statistische Verteilungsfunktionen erfolgen, wobei die Koeffizienten, die eingesetzten statistischen Verfahren und das Ergebnis der Verdichtung zwecks Nachvollziehbarkeit dokumentiert werden muss. Durch Plausibilitäts- und Konsistenzprüfungen können fehlerhafte Daten ermittelt und korrigiert werden, fehlende Daten müssen neu beschafft werden. In Simulationsstudien, die dazu dienen, einen Planungsstand zu überprüfen bzw. abzusichern, werden unbekannte Systemeigenschaften in Abstimmung zwischen Auftragnehmer und -geber durch Prämissen beschrieben [Wenzel et al. 2008].

Die Phase der Modellformalisierung dient zur Überführung des Konzeptmodells in ein formales Modell, indem die Inhalte des Konzeptmodells durch konkrete Algorithmen und Datenstrukturen konkretisiert werden, jedoch können diese nicht direkt und eindeutig in ein ausführbares Modell umgesetzt werden, da es „*noch unabhängig von den zu verwendenden Simulationswerkzeugen*“ ist [Pohl et al. 2005, S. 78]. So lassen sich beispielsweise Steuerungsalgorithmen nicht immer in vordefinierten Simulationsbausteinen eines Programms umsetzen [Wenzel et al. 2008]. Daher wird in der Praxis oft auf ein formales Modell verzichtet, da das Konzeptmodell oftmals soweit formalisiert wird, dass eine direkte Überführung in ein ausführbares Modell gewährleistet werden kann. Rabe et al. [2008] empfiehlt dennoch, nicht auf diese Phase zu verzichten, da im Rahmen der Verifikation und Validierung (V&V) die Modellformalisierung explizit überprüft werden kann und somit die Qualität der Simulationsstudie steigert. In Rahmen der Modellformalisierung gilt es, die Implementierbarkeit der Abläufe im Konzeptmodell sicherzustellen, sodass Simulationsexperten und Fachleute ohne weitere Untersuchungen und Analysen das Modell in ein Simulationswerkzeug umsetzen können. Die Modellformalisierung steigert außerdem die Qualität [Rabe et al. 2008; Wenzel et al. 2008].

Das Ausführbare Modell als Ergebnis der Implementierung wird von Experten durchgeführt. Je nach verwendetem Simulationswerkzeug und Modellierungskonzept wird das Modell durch eine Programmiersprache unterstützt, welche aber nicht zwingend notwendig ist. So wird beispielsweise versucht, möglichst viele Elemente durch vordefinierte Bausteine abzubilden [Rabe et al. 2008]. Hierfür gibt es jedoch keine Vorgaben, jedoch zeigt die Praxis, dass etwa 80% der benötigten Komponenten durch vordefinierte Bausteine abgebildet werden, wodurch die restlichen 20% durch neugeschaffene Komponenten dargestellt werden. Die Nutzung vordefinierter Bausteine hat zum einen den Vorteil, dass über einen gewissen Erfahrungsschatz verfügt werden kann, zum anderen wurde die Qualität dieser Bausteine bereits durch den Entwickler des Simulationswerkzeuges sichergestellt. Da neugeschaffene Bausteine Qualitätsprobleme aufweisen können, ist eine ausführliche Dokumentation der neuen Kompo-

nenten mit den hierfür getroffenen Annahmen zu führen [Wenzel et al. 2008; Rabe et al. 2008].

Die Projektphase Experimente und Analyse stellt den letzten Schritt der Simulation dar. Hierfür werden sowohl die aufbereiteten Daten als auch das ausführbare Modell benötigt, welche zusammengeführt werden. Diese Phase beinhaltet mehrere Schritte, die iterativ durchgeführt werden. Es werden Experimentpläne und Hypothesen über das zu analysierende System festgelegt und Experimente durchgeführt. Laut VDI Richtlinie 3633-3 [2013] dienen Experimente zur

„ [...] gezielten empirischen Untersuchung des Modellverhaltens übereinen bestimmten Zeithorizont durch wiederholte Simulationsläufe mit systematischen Parametervariationen“ [VDI 3633-3 2013, S. 2].

Mit Hilfe von Experimenten werden formale Ergebnisse gewonnen, die interpretiert werden. Aus der Auswertung dieser Ergebnisse werden die Konsequenzen für das reale System getroffen, welche dann übertragen werden. Dieser Vorgang wird jedoch in mehreren Schleifen durchgeführt, indem durch mehrere Parametervariationen im Simulationsmodell mehrere Szenarien durchgespielt werden, sodass bei jedem neuen Lauf neue formale Ergebnisse gewonnen werden, die wiederum zu neuen Erkenntnissen führen können [Hrdliczka et al. 1997; Haasis 2008; VDI 3633-1 2014]. Zusätzlich zur Parametervariation finden so genannte Replikationen statt. Replikation bezeichnet das Durchführen mehrerer Simulationsläufe mit gleichen Modellparametern, jedoch werden zur Absicherung der statistischen Sicherheit von vorhandenen stochastischen Komponenten verschiedene Seeds für die verwendeten Zufallszahlen verwendet [Rabe et al. 2008; VDI 3633-3 2013]. Aufgrund des Stichprobencharakters der Simulationsergebnisse werden Replikationen benötigt, um sicherzustellen, dass sowohl typische als auch untypische Verhaltensweisen abgebildet werden. Mit der Durchführung von Replikationen gewinnt die Aussage zwar an Zuverlässigkeit, jedoch sind diese auch mit einem erhöhten Aufwand verbunden [Wenzel 2008]. Law und McComas [1991] schätzen die Anzahl der erforderlichen Replikationen auf drei bis fünf, von denen anschließend der Durchschnitt gebildet werden soll. Eine verbindliche Regel zur Anzahl und Länge der Läufe existiert jedoch nicht [Rose und März 2011].

Anschließend findet eine Analyse der Ergebnisse statt, aus der dann Schlussfolgerungen für das reale System getroffen werden [Rabe et al. 2008]. Abbildung 3-9 veranschaulicht das Vorgehen der Phase Experimente und Analyse.

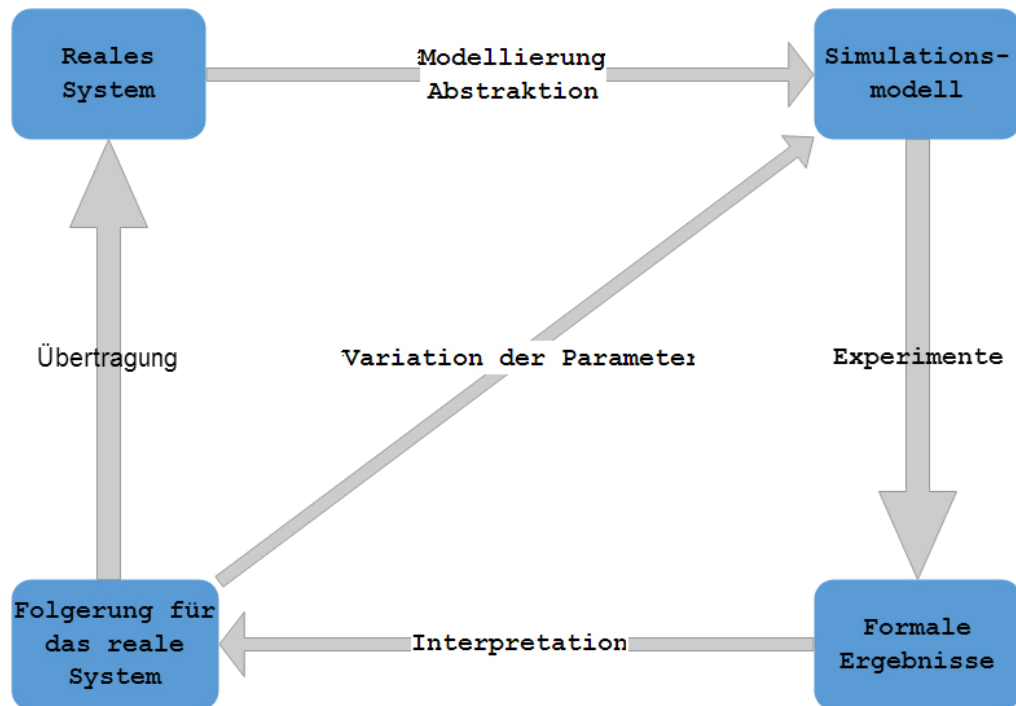


Abbildung 3-9 Vorgehen in Experimente und Analyse nach [Hrdliczka 1997]

Zusätzlich zu den Projektphasen müssen die Korrektheit und Gültigkeit des Modells nachgewiesen werden. Die geschieht über die sogenannte V&V. Das Besondere an diesem Vorgehensmodell ist die phasenübergreifende Verifikation und Validierung der Phasenergebnisse. Die Verifikation prüft die Korrektheit des Modells. Dabei umfasst die Korrektheit eines Modells in diesem Zusammenhang die Umsetzung nach den vorgegebenen syntaktischen Regeln, die semantische Korrektheit und das Fehlen logischer Fehler. Die Gültigkeit eines Modells wird mit der Validierung sichergestellt, indem geprüft wird, ob das Modell sich zeitlich so verhält wie das reale System und die strukturellen Eigenschaften übereinstimmen. Die phasenübergreifende V&V prüft die Phasenergebnisse somit auf Eignung, Plausibilität und Vollständigkeit. Durch die phasenübergreifende Überprüfung wird überprüft, ob die Übernahme von Ergebnissen aus dem vorherigen Schritt richtig und vollständig durchgeführt wurde. Falls dies nicht der Fall ist, kann ein Rückschritt in die jeweils vorherige Phase erfolgen. Die Gefahr einer V&V erst nach der Modellbildung besteht darin, dass Fehler nicht frühzeitig erkannt und behoben werden [Rabe et al. 2008; Wenzel et al. 2008]. Zusammenfassend lassen sich die V&V durch folgende Fragestellungen charakterisieren:

- **Verifikation:** Ist das Modell richtig?
- **Validierung:** Ist es das richtige Modell?

In Verbindung mit V&V finden auch häufig Tests statt [Balci 1989]. Diese sind Mittel der V&V und dienen zur Sicherstellung aller relevanten Funktionen (funktionale Korrektheit), der präzisen Wiedergabe des Systems (sachliche Korrektheit) sowie der Erfüllung der erforderlichen Randbedingungen (technische Korrektheit). Jedoch lassen sie sich nicht eindeutig der Verifikation oder Validierung zuordnen, vielmehr sind Tests mit beiden Verfahren verbunden. Während die Gültigkeit eines Modells mit Tests nicht nachgewiesen werden kann, reicht ein Test mit einem negativen Ergebnis aus, um darzustellen, dass das untersuchte Modell zur Verwendung der Aufgabenstellung nicht verwendet werden soll. Vielmehr kann durch eine Reihe von Testmethoden mit positivem Ergebnis die Wahrscheinlichkeit der Gültigkeit erhöht werden [Rabe et al. 2008]. Da sich die für die V&V erforderlichen Tests nicht ableiten lassen, ergibt sich laut van Horn [1971, S. 251] die Fragestellung *„sind dies die richtigen Tests, um nachzuweisen, dass dieses das richtige Modell ist und dass das Modell richtig ist?“*. Daher müssen Tests, zusätzlich als Mittel zur V&V, ebenfalls auch Gegenstand der V&V sein [Rabe et al. 2008]. Es gibt zahlreiche Techniken zur Durchführung von Tests, wobei ein Test auch mehrere Techniken gleichzeitig verwenden kann [Sargent 1982]. Die in dieser Arbeit verwendeten Techniken zur V&V sind die Validierung im Dialog und der Festwerttest. In Rahmen einer Validierung im Dialog findet eine Diskussion mit Fachexperten, die über einen Kompetenz bzgl. des realen Systems statt. Diese bewerten das Modell hinsichtlich der Wiedergabe der realen Prozesse. Diese Technik erlaubt die schnelle Erkennung von Fehlern, indem ungewöhnliche bzw. auffällige Prozesse durch den Fachexperten identifiziert werden. Die Wirksamkeit dieser Technik ist außerdem dadurch begründet, dass der Simulationsexperte seine Arbeit den Fachexperten erläutert. Dies führt zu einem erneuten Durchdenken und kann dabei helfen, Fehler zu entdecken. Bei der Durchführung des Festwerttests werden für Parameter wie die Bearbeitungszeit von Anlagen konstante Werte verwendet. Dies hat zur Folge, dass aus das stochastische Modell zu einem deterministischem Modell überführt wird. Ergebnisparameter wie die Ausbringungsmenge einer Montagelinie kann somit zunächst anhand einer theoretischen Berechnung exakt ermittelt werden. Dieser ermittelte Wert kann dann mit dem Ergebnis der deterministischen Simulation verglichen werden. Die anschließende Abweichung gibt eine Auskunft darüber, ob das System hinreichend genau modelliert wurde [Rabe et al. 2008].

4 Einführung des zu untersuchenden Systems

Die Produktion und Lagerhaltung der elektromechanischen Antriebskomponenten sind, wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, mit diversen Herausforderungen verbunden. Dieses Kapitel dient zur detaillierten Beschreibung der Herausforderungen sowie der Auswahl der Lösungsmethoden. Anschließend erfolgt die Systembeschreibung, auf dessen Basis die nachfolgende Simulationsstudie durchgeführt wird

4.1 Herausforderungen der Produktions- und Logistikprozesse

Die Produktion von Automobilkomponenten wie bspw. elektromechanische Antriebskomponenten erfordert die Berücksichtigung diverser Faktoren. Externe Faktoren wie Kundennachfrage und Produktionsstandort und die daraus verfügbare Fläche für Produktions- und Logistiktätigkeiten erschweren die Planung und Auslegung von Prozessen und Systemelementen. Zur Realisierung des Projektvorhabens, welches die Entwicklung und Serienproduktion der Triebköpfe vorsieht, soll auf dem Werksgelände eine neue Produktionshalle entstehen. Die neue Halle wird grob in drei Tätigkeitsbereiche unterteilt: Lagerlogistik, Kommissionierung und Produktion. Aufgrund der beschränkten Größe des Werkgeländes kann nur eine verhältnismäßig kleine Halle gebaut werden. Innerhalb dieser Halle sind sämtliche Produktions- und Logistikprozesse auszurichten. Eine weitere Restriktionsgröße bei der Planung ist die hohe Anforderung an Sauberkeit im Produktionsbereich: da die Funktionalität von Triebköpfen von Schmutzpartikeln und anderen Fremdkörpern negativ beeinträchtigt werden kann, ist eine besonders hohe Sauberkeitsanforderung innerhalb der Halle zu gewährleisten. Die Halle ist somit in drei Sauberkeitsbereiche zu unterteilen: im vorderen Logistikbereich werden die Materialien angenommen und gelagert und die fertig montierten Triebköpfe im Warenausgang auf LKW beladen. Dieser Bereich wird von Außenstaplern befahren und daher bzgl. der Sauberkeitsanforderung nicht reguliert. Des Weiteren werden im hinteren Logistikbereich Kommissioniertätigkeiten durchgeführt, in dem Bauteile zu einem Warenkorbset zusammengestellt werden. Die Kommissionierzone (im Folgenden Setkom) ist ein sauberkeitsregulierter Bereich, da hier erstmalig die Bauteile aus Ladungsträgern entnommen und Verpackungsmaterialien entfernt werden. Hier fahren nur Innenstapler, die die Materialien vom Lagerbereich zur Setkom befördern. Im Gegensatz zum Logistikbereich, in dem Staplerverkehr für den

Materialfluss sorgen, ist der Produktionsbereich, in der Montageanlagen eingesetzt werden, aufgrund der Unfallrisikominimierung gänzlich frei von Stapler zu halten. Zusätzlich zur Sauberkeitsanforderung resultiert diese Maßnahme ebenfalls aus der geringen Flächenkapazität der Halle. Im Produktionsbereich werden die Montagelinien aufgestellt, auf denen die Triebköpfe produziert werden sollen. Hier herrschen erhöhte Sauberkeitsanforderungen. Das Verhältnis der Flächenaufteilung zwischen Produktion und Logistik (inklusive Setkom) beträgt nach internen Vorgaben ca. 40:60. Sämtliche Logistikprozesse und Lagerkonzepte müssen innerhalb dieser Flächenrestriktion geplant werden. Da Stapler nicht durch den Produktionsbereich fahren dürfen, ist ein alternatives Konzept zur Materialversorgung der Montagelinien notwendig. Abbildung 4-1 zeigt die Verteilung der neuen Halle mit den Sauberkeitsbereichen auf.

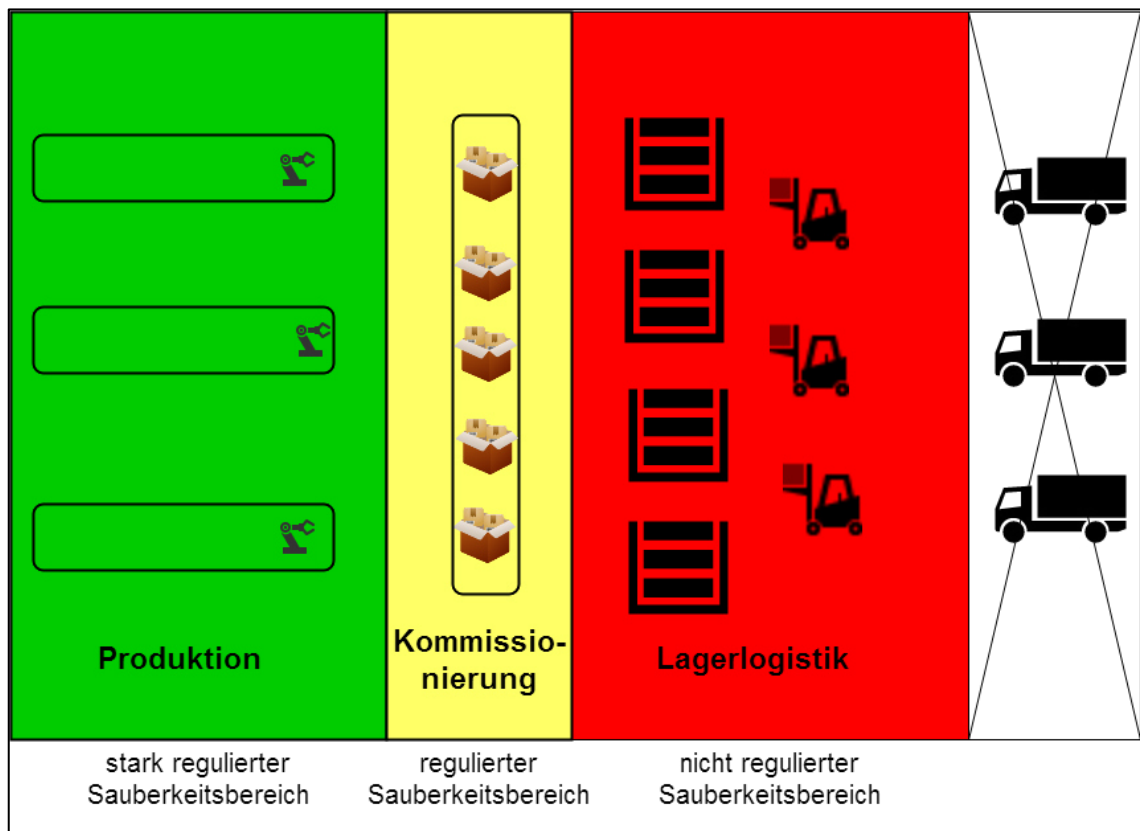


Abbildung 4-1 Sauberkeitsbereiche und Aufteilung der Halle

Die Sauberkeitsbereiche bilden gleichzeitig die Restriktion für die Platzierung der Systemelemente und den damit entstehenden Materialfluss. So können beispielsweise Produktionsanlagen nicht neben einem Lager oder dem Warenausgang im Lagerlogistikbereich platziert werden.

Triebköpfe weisen außerdem über eine relativ hohe Anzahl an Bauteilen auf, welche in zwei Kategorien unterteilt werden können: zum einen bestehen Triebköpfe aus

volumenlastigen Elementen wie das Gehäuse oder dem Elektromotor, zum anderen werden viele kleine Teile wie Schrauben verwendet. Die hohen Stückzahlen, die die Automobilindustrie charakterisieren, führen dazu, dass zur Produktion von Triebköpfen ein hohes Materialvolumen anfällt. Hieraus ergibt sich die Anforderung an ein flexibles und funktionierendes Lagersystem, in dem zum einen möglichst viel Material gelagert werden kann, und zum anderen nicht die Flächenvorgaben verletzt. Um die Lagerlogistik zu gestalten, sind die Logistikprozesse wie Transportlogistik innerhalb der Halle sowie Hallenversorgungskonzept unter den genannten Bedingungen anzupassen. Das Versorgungskonzept spielt dabei eine wichtige Rolle, da sich hier die Parameter Anlieferungsvolumen und Anlieferungsfrequenz gegenläufig verhalten: ein hohes Anlieferungsvolumen in kurzen Belieferungszyklen oder ein geringes Anlieferungsvolumen in hohen Belieferungszyklen können aufgrund der Hallenbeschränkung nicht realisiert werden. Des Weiteren besteht die Gefahr, dass bei einer nicht ausgeglichenen Kombination aus Anlieferungsvolumen und Belieferungszyklus es zu Produktionsstillständen führen kann. Somit ist ein Versorgungskonzept zu entwickeln, welches die Funktionalität des Systems unter Berücksichtigung dieser beiden Stellgrößen gewährleistet. Die Dimensionierung der Systemkomponenten der Halle ist ebenfalls unter Berücksichtigung der begrenzten Hallenfläche durchzuführen.

Als weitere Restriktionsgröße bei der Gestaltung der Systemelemente ist die Taktzeit zu nennen. Da die Halle die Kundenwerke in JIS beliefern soll, ist eine strenge Einhaltung der Taktzeiten notwendig, um die gewünschten Stückzahlen zu erreichen zu können. Das System soll weiterhin flexibel gestaltet werden, sodass die Umsetzung eines alternativen Schichtplans realisiert werden kann. Die aktuelle Planung sieht vor, dass in 15 Schichten pro Woche produziert werden soll (pro Werktag drei Schichten mit jeweils acht Stunden). Das alternative Schichtmodell verfügt über zwei Schichten am Tag mit je 10,45 Stunden Schichtlänge. Der Samstag wird gilt hierbei als Regelarbeitstag, sodass beim alternativen Schichtmodell in 12 Schichten pro Woche gearbeitet wird. Abbildung 4-2 veranschaulicht die Anforderungen an das Gesamtsystem, welche aus den Restriktionsgrößen Sauberkeit, Flächenkapazität und Taktzeit abgeleitet werden.

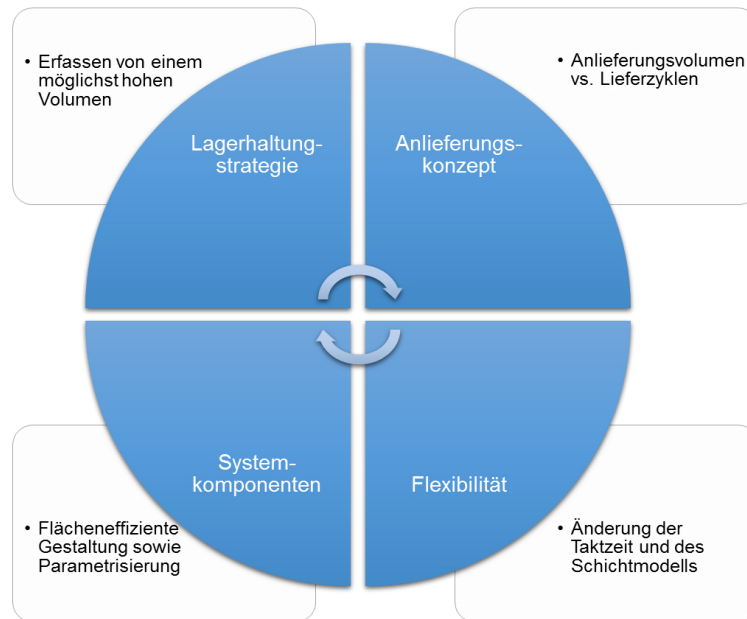


Abbildung 4-2 Anforderungen an das Gesamtsystem

4.2 Beschreibung der ausgewählten Lösungsmethoden

Die gewählten Lösungsmethoden lassen sich grob in Lagerhaltung mit Materialversorgung und Anlieferungskonzept unterteilen. Die Lagerstrategie und das Materialversorgungskonzept wird in zwei Ansätzen umgesetzt: zum einen erfolgt die Lagerung der Bauteile in zwei verschiedenen Formen. Während kleine Bauteile in einem Supermarkt mit Regaltechnik gelagert werden, die über einen Routenzug zu den Montagelinien transportiert werden, werden die großvolumigen Bauteile in Blocklagern mit Durchschubfunktion gelagert. Blocklager ermöglichen die Lagerung von Ladeeinheiten (LE) in einem Stapelfaktor, sodass auch die dritte Ebene genutzt werden kann. Die Nutzung der dritten Ebene entspannt zusätzlich die Flächensituation der Halle. Aus diesem Grund wurde außerdem der Einsatz eines Hochregallagers in Erwägung gezogen und die Einsatzmöglichkeit geprüft. Ein Hochregallager beansprucht jedoch mehr Hallenfläche für Ein- und Auslagerungsprozesse mit weiteren Betriebsmitteln, die zusätzliche Investitionskosten beanspruchen würden. Des Weiteren kann die Einhaltung der Taktzeit beim Einsatz von Hochregallagern durch die zusätzlichen Prozesszeiten für das Ein- und Auslagern nicht gewährleistet werden. Die Blocklager werden von Außenstaplern mit LE befüllt. Innenstapler entnehmen die LE und befördern diese zur Setkom. Hier werden mit Hilfe von Warenkörben, die als Teileträger fungieren, Sets gebildet. Nach dem Zusammenstellen der Sets müssen die Warenkörbe ebenfalls zu den

Montagelinien befördert werden. Hierfür wird ebenfalls eine Lösungsmethode genutzt, die die dritte Ebene verwendet. Mit Hilfe einer EHB werden die Warenkörbe zu den Montagelinien befördert und anschließend die fertigen Triebköpfe zu den Versandstationen transportiert. Der Warenkorbrtransport erfolgt dabei über schienengeführte Fahrzeuge. Dabei sind die Schienen unter der Hallendecke angebaut und beanspruchen somit keine Hallenfläche. Lediglich Übergabegeräte an der Setkom und an den Montagelinien sind auf der Hallenfläche zu platzieren. Diese Methode ist neben dem Aspekt der minimalen Flächenbeanspruchung vorteilhaft bezüglich der Sauberkeitsanforderung. EHB Fahrzeuge tragen nur eine minimale Menge an Schmutzpartikel in den stark regulierten Bereich und werden in regelmäßigen Intervallen auf einer Prüf- und Wartungsstrecke gesäubert. Somit verbindet das EHB-Konzept eine zufriedenstellende Lösung hinsichtlich Flächenauslastung und Sauberkeitsanforderung.

Als weitere Lösungsmethode ist ein geeignetes Anlieferungskonzept zu planen. Für das Anlieferungskonzept ist die Balance zwischen Anlieferungsvolumen und Anlieferungsfrequenz zu realisieren. Das ausgearbeitete Anlieferungskonzept beinhaltet den Transport von Materialien, die über einen festen Fahrplan über LKW geliefert werden und dem bedarfsgerechten Abrufen von Materialien aus WAB von einem Traileryard, sobald ein Mindestbestand unterschritten ist. Der Einsatz von WAB ist dadurch begründet, dass der Traileryard als zusätzliche Lagerstufe dient. Diese Praxis bietet sich für Lieferanten mit einer weiten Entfernung an, da diese nicht in kurzen Zyklen liefern können. Die Belieferung von LKW in festen Intervallen ist für Bauteile vorteilhaft, bei der eine Direktbelieferung zur Halle notwendig ist oder für Bauteile, die zusätzlich vorkommissioniert und dadurch nicht sortenrein angeliefert werden. Die Beschreibung der weiteren Systemkomponenten als Bestandteil der neuen Halle erfolgt im folgenden Abschnitt.

4.3 Systembeschreibung

Im Wareneingangsbereich (WE-Bereich) kommen die Einzelteile, welche für die Montage der Triebköpfe notwendig sind, aus den Zuliefererwerken oder von Fremdfirmen für die Produktion an. Der Warentransport zum Wareneingang erfolgt in einem Mischkonzept. Kleinstteile werden, in einem LKW-Mix aus einem Außenlager, in dem die Teile vorkommissioniert werden müssen, direkt an die Halle angeliefert und von Staplern entnommen, während die volumenlastigen Triebkopfkomponenten in

WABs aus dem Traileryard transportiert werden. Die WAB werden auf separaten Stellplätzen vor der Werkshalle abgestellt.

Als variantengebendes Bauteil (zusätzlich zur Aufteilung Benzin und Diesel) ist der Drehmomentwandler zu nennen. Die Steuerung dieses Bauteils erfolgt nach dem JIS Prinzip. Aufgrund des JIS-Prinzips werden die Drehmomentwandler nicht vorher auf einer WAB zwischengelagert, sondern vom Lieferanten direkt mit LKW in der richtigen Reihenfolge beliefert (es erfolgt keine zusätzliche Lagerstufe).

Die Bauteile werden in LE geliefert. Eine LE besteht, je nach Volumen und Gewicht der Komponenten, entweder aus Kleinladungsträger (KLT) oder Großladungsträger (GLT). Die LE mit den GLT sind dabei sortenrein in den WAB platziert, während die LE aus dem Misch-LKW aus mehreren KLT besteht. Die Anlieferung der LE für die JIS-Teile erfolgt in einer festen Reihenfolge.

Für den anschließenden Transport der LE ist eine Fallunterscheidung zu treffen. Während Norm- und Kleinsteile wie Schrauben und Sicherungsringe in einem Supermarkt gelagert mit Regaltechnik werden, werden die volumenlastigen Triebkopfkomponenten in einem Blocklager gelagert. Die Teile aus den beiden Blocklagern werden anschließend zum Kommissionieren zur Setkom überführt, in der die Bauteile zu einem Warenkorbset zusammengestellt werden. Die Warenkörbe werden mit Hilfe der EHB zu den drei Montagelinien befördert. Die Versorgung der Montagelinie mit KLT erfolgt über den Transport durch Routenzüge aus dem Supermarkt. Nach Durchführung aller Montageschritte auf der jeweiligen Linie werden die fertigen Triebköpfe anhand der EHB zur Perlenkettenreparatur befördert. Da die fertigen Triebköpfe in Sequenz gefertigt und versendet werden, können innerhalb der Sequenz Lücken entstehen, falls NIO Teile an den Montagelinien entstehen. Diese Lücken werden dann in der Perlenkettenreparatur, die sich vor dem Versandmodul befindet, gefüllt, indem die offene Perle durch ein Triebkopf in der geforderten Variante ersetzt wird. Dies setzt voraus, dass innerhalb der Perlenkettenreparatur bereits fertige Triebköpfe in allen verschiedenen Varianten gelagert sind, welche dann in die Sequenzlücken füllen können. Sobald ein Triebkopf dann aus der Reparaturzone entnommen und eingesetzt wird, wird automatisch ein neuer Fertigungsauftrag für genau diese Variante an das übergeordnete Produktionssteuerungssystem gesendet, damit diese Variante in der Setkom zusammengesetzt wird, auf der Montagelinie nachgebaut und anschließend in der Perlenkettenreparaturzone eingelagert werden kann.

NIO-Teile werden von den Montagelinien manuell zur Nacharbeitszone transportiert. Hier wird versucht, anhand von Nacharbeitstätigkeiten die Triebköpfe zu reparieren. Diese Triebköpfe werden über einen weiteren manuellen Transport zur Perlenkettenreparatur gebracht und dort eingelagert, defekte Triebköpfe landen im Ausschuss.

Nachdem die EHB die Perlenkettenreparatur durchlaufen hat, werden die Triebköpfe in das Versandmodul, welches sich auf einem Stahlbau auf der dritten Ebene über der Setkom befindet, transportiert. Im Versandmodul werden die Warenkörbe von der EHB aufgenommen und in Versandladungsträger (VLT) verpackt. Dabei ist für jeweils eine Montagelinie eine Versandstation vorgesehen. Die VLT werden mit Hilfe eines Verteilwagens vom Versandmodul zum Vollgut - Outbound, dem Lagerort für versandbereite VLT, gebracht und von dort anschließend mit Stapler in einen LKW, der am Warenausgang steht, beladen. Anschließend erfolgt der Transport zu den Montagewerken. Die Beschreibung der Materialflüsse (Voll- und Leergut) sowie der Informationsflüsse findet in der Systemanalyse statt. Abbildung 4-3 veranschaulicht das Versorgungskonzept sowie die Lagerstrategie.

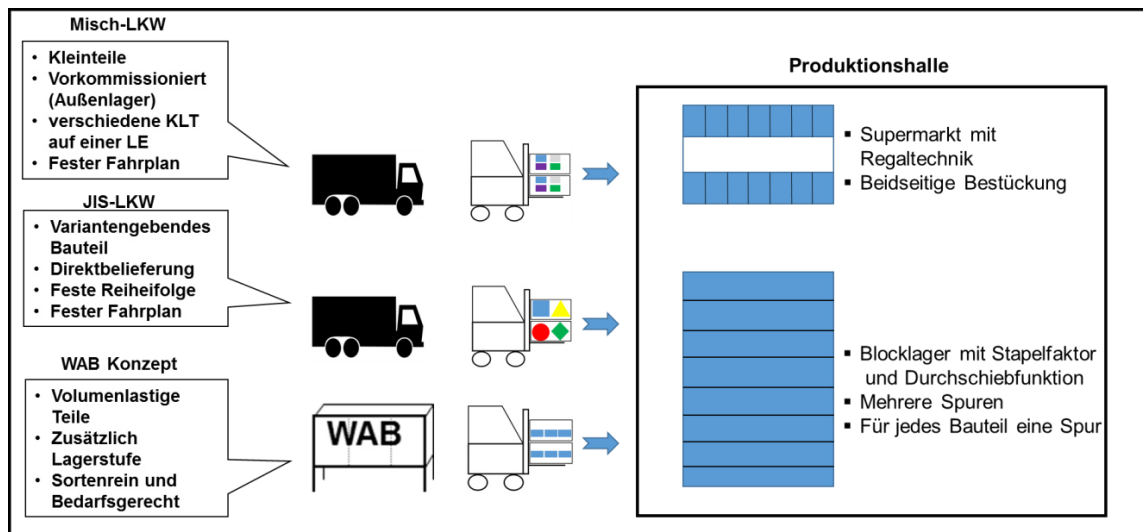


Abbildung 4-3 Belieferungs- und Lagerkonzept

Die Materialflussuntersuchung wird an einer Beispielproduktion durchgeführt, welches sich an dem oben beschriebenen System orientiert. Hier werden sowohl die drei Materialflusskonzepte als auch das Lagerkonzept untersucht. Zu diesem Zweck wird als Untersuchungsmethode die Materialflusssimulation ausgewählt. Die Simulationsstudie wird im folgenden Kapitel beschrieben.

5 Die Simulationsstudie

Das folgende Kapitel beschreibt die Durchführung der Simulationsstudie. Dabei wird das in Kapitel 3.4 beschriebene Vorgehensmodell nach Rabe et al. [2008] verwendet. Zunächst wird auf Basis der Zielbeschreibung, der Aufgabenspezifikation und der Systemanalyse ein Konzeptmodell entwickelt. Dieses wird anschließend mit Hilfe der Modellformalisierung und der Datenbeschaffung und Datenaufbereitung in ein Formales Modell überführt. Anschließend erfolgt die Implementierung in ein ausführbares Modell in Plant Simulation. Anhand von Experimenten und Analyse werden die Simulationsergebnisse für die drei Materialflusskonzepte abgeleitet, die Auswahl für ein Konzept auf Basis von Zielparametern getätigt und Anpassungsmaßnahmen für ggf. identifizierte Schwachstellen durchgeführt.

5.1 Zielbeschreibung

Als einziger Schritt der Definitions- und Angebotsphase dient die Zielbeschreibung als grobe Orientierung zur Durchführung der Simulationsstudie.

Mit Hilfe DES sollen drei Materialflusskonzepte untersucht werden, um Aussagen zur Funktionalität eines Systems zur Montage und Lagerung von elektromechanischen Antriebskomponenten treffen zu können. Außerdem soll mit Hilfe der DES das geplante Konzept der Blocklagerung im Logistikbereich überprüft werden. Die Simulation soll ebenfalls bei zunehmender Planungskomplexität des Projektes als begleitendes Werkzeug zur Absicherung von Planungsprämissen eingesetzt werden. Des Weiteren sollen Schwachstellen identifiziert und Handlungsempfehlungen ausgesprochen werden. Die Abnahmekriterien dieser Abschlussarbeit wurden festgelegt und sind im Anhang unter Abbildung B-2 Zielbeschreibung der Masterarbeit Abbildung B-2 einzusehen.

Hinweis: Da das Projekt sich noch in der Planungsphase befindet, ist stets davon auszugehen, dass sich die Daten und Anforderungen nach Abschluss dieser Masterarbeit verändern. Deshalb ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Ergebnisse und die dabei Folgerungen für das reale System sich stets auf die aktuellen Planungsprämissen und -ergebnisse basieren. Eine Änderung der Daten und Anforderungen kann zu einem anderen Ergebnis führen.

5.2 Aufgabendefinition

In diesem Abschnitt werden die zu verwendenden Komponenten der Beispielproduktionshalle beschrieben, die Systemgrenzen festgelegt und die Aufgabenspezifikation ausgearbeitet.

Das Simulationsmodell soll eine neue Produktionshalle, welche zur Montage von elektromechanischen Antriebskomponenten gebaut werden soll, abbilden. Eine Darstellung der Triebköpfe ist im Anhang unter Abbildung B-3 zu finden. Die Beispielproduktion richtet sich nach der Systembeschreibung in Kapitel 4, sodass eine Beschreibung der Systemelemente gemäß der Aufgabendefinition (siehe Abschnitt 3.4) nicht weiter notwendig ist. Die Beispielproduktion ist in einem Hallenlayout abgebildet und befindet sich im Anhang unter Abbildung B-4. Das EHB Layout ist im Anhang als Abbildung B-5 abgebildet. Als Systemgrenzen des zu erstellenden Modells werden der Wareneingang und der Warenausgang der Werkshalle gesetzt. Somit werden alle in der Halle befindlichen Komponenten der Produktion und Logistik umfasst. Abbildung 5-1 veranschaulicht die Systemgrenzen des Modells.

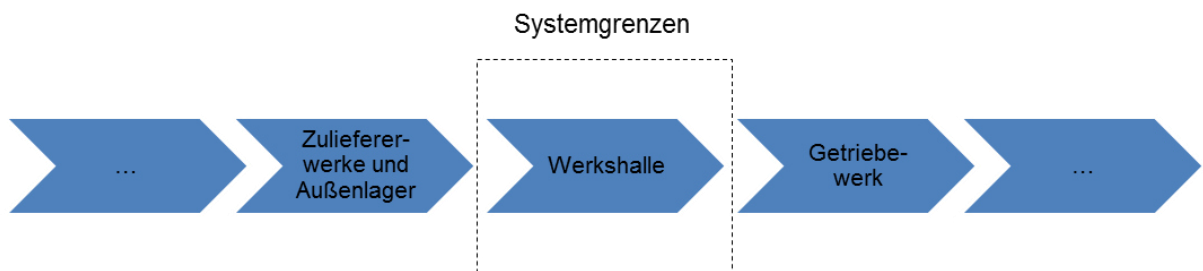


Abbildung 5-1 Systemgrenzen des Modells

Als Detaillierungsgrad wird der Black Box Ansatz gewählt. Des Weiteren besteht die Anforderung, dass das zu erstellende Modell mit einem möglichst geringen Aufwand wandelbar sein soll. Die Wandelbarkeit des Modells soll über die Eingangsdaten realisiert werden, die über eine Importfunktion einer Excel-Datei in das Modell gelangen. Die Wandelbarkeit des Modells soll des Weiteren über einen modularen Aufbau gewährleistet werden. Hierdurch können bei Änderungen und Erhöhung des Detaillierungsgrades die Black Box Bausteine durch ein Detailmodell leicht ausgetauscht oder erweitert werden. Das Black Box Modell soll neben der Überprüfung der Funktionalität aller Planungsprämissen folgende Szenarien überprüfen:

- Überprüfung der Funktionalität der konzipierten Lagerstrategie

- Experimentvergleich zwischen 60 Sekunden und 70 Sekunden Takt der Montagelinien
- Experimentvergleich zwischen zwei Schichtmodellen (Mo-Fr. mit 3 Schichten pro Tag vs. Mo-Sa mit 2 Schichten pro Tag)

Zur Verbesserung der V&V und der möglichst genauen Darstellung der Systemkomponenten sowie zur Reduzierung des Modellerstellungsaufwandes soll für die Modellierung der VDA Bausteinkasten verwendet werden. Dieser beinhaltet sämtliche Elemente der Produktion und Logistik, die in der Automobilindustrie und Automobilzulieferindustrie verwendet werden. Somit ist es nicht erforderlich, Standardbausteine so zu „manipulieren“, dass sie für den Zweck des Einsatzes hinreichend nutzbar sind. Die Durchführung der Simulationsstudie erfolgt dabei in dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Programm Plant Simulation.

Da das Modell auch für fortlaufende Planungsaktivitäten verwendet werden soll, ist neben der Importfunktion der Eingangsdaten eine Schnittstelle zum Export von Ergebnisdaten erforderlich. Diese ermöglicht, Komponenten mit Hilfe ihrer spezifischen Kennzahlen bewerten zu können, um Folgerungen für das reale System treffen zu können. Die zu verwendenden Informationsquellen und Informationsträger liegen im Unternehmen vor oder müssen noch beschafft werden. Der konkrete Prozess der Datenbeschaffung wird in Abschnitt 5.4 genau beschrieben.

Die Definition der Abnahmekriterien erfolgte zum einen in der Zielbeschreibung dieser Masterarbeit in Abbildung B-2, weshalb hier keine weitere Erklärung notwendig ist. Zum anderen erfolgt die Modellabnahme in Rahmen der Modellvalidierung, in der das Modell im Expertenkreis vorgestellt werden. Hierbei wird jedes Mal geprüft, ob das Modell den gewünschten Anforderungen entspricht. Die Funktionalität des Modells soll des Weiteren durch eine V&T Technik abgesichert. Tabelle 5-1 stellt die Aufgabenspezifikation, die sich aus der Aufgabendefinition ergeben, dar.

Tabelle 5-1 Aufgabenspezifikation

Aktivität	Ausprägung
Modellzweck	<ul style="list-style-type: none"> – Untersuchung und Bewertung von Materialflusskonzepten – Absicherung von Planungsständen – Identifikation von Schwachstellen – Überprüfung der konzipierten Lagerstrategie
Festlegung der Systemgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> – Werkshalle zur Triebkopfmontage (Wareneingang und –ausgang)
Relevante Systemkomponenten	<ul style="list-style-type: none"> – Wareneingang und –ausgangsbereich – Wareneingangsfläche in der Halle – Blocklager (Voll- und Leergut) – Setkom – Montagelinien – EHB – Supermarkt – Perlenkettenreparatur – Versandmodul
Detaillierungsgrad	<ul style="list-style-type: none"> – Black Box Modellierung
Wiederverwendbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> – Gewährleistung über Import- und Exportfunktion von Daten
Lösungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> – Tecnomatix Plant Simulation
Schnittstellen zu externen Systemen	<ul style="list-style-type: none"> – Import und Export von Daten
Geplante Modellnutzung	<ul style="list-style-type: none"> – Materialflusssimulation – Experimente und Analyse
Informationsquellen	<ul style="list-style-type: none"> – Tabelle 5-2
Abnahmekriterien	<ul style="list-style-type: none"> – Wandelbares Modell (über Import von Eingangsdaten sowie modularen Aufbau) zur weiterführenden Nutzung innerhalb der Planungsphase – Modularer Aufbau, um Systemelemente mit geringem Aufwand ersetzen zu können – Darstellung der Elemente mittels VDA Bausteinkasten – Diskussion und Abnahme in Rahmen der Validierung des Modells im Expertenkreis

5.3 Datenbeschaffung

In Rahmen der Datenbeschaffung werden alle für die Simulationsstudie relevanten Daten beschafft. Bei den Daten handelt es sich zumeist um Rohdaten, die in der Phase der Datenaufbereitung (siehe Abschnitt 5.4) noch in die richtige Form aufbereitet werden müssen. In einem gemeinsamen Kick-Off-Gespräch wurde zunächst abgestimmt, welche Daten für die Simulation notwendig sind und wer die zuständigen Ansprechpartner sind, bei der die Datenbeschaffung erfolgen kann.

Die Beschaffung der Daten erfolgt bei verschiedenen Quellen und Ansprechpartnern. Die produktspezifischen Details wie Gewicht, Abmaße und Verbaquote der einzelnen Komponenten und Triebköpfe werden aus einer Stückliste entnommen. Diese wurden von der Entwicklungsabteilung des Unternehmens zur Verfügung gestellt.

Die für die Logistik relevanten Daten wurden sowohl von den zuständigen Logistikplanern des Projektes beschafft. Hierbei handelt es sich um die Füllmengen der Ladeeinheiten und Ladungsträger pro Bauteil. Des Weiteren wurden Kennzahlen der Logistikkomponenten wie Anzahl der Stellplätze der Lager, Stapelfaktor, Ein- und Auslagerungszeiten, Anzahl der Triebköpfe pro VLT, Kennzahlen der Setkom (Taktzeit, Anzahl Stationen und Reichweite) sowie Kennzahlen für die Transportlogistik (Anzahl Routenzüge, Trolleys pro Routenzug, Geschwindigkeiten der Routenzüge und Stapler, Aufnahme- und Abgabezeiten) beschafft. Lagerkennzahlen und das Anlieferungs- und Lagerkonzept wurde gemeinsam gemäß Kapitel 4 ausgearbeitet.

Von der Montageplanung wurden produktionsspezifische Kennzahlen wie Taktzeit der Stationen, Anzahl der Stationen pro Linie, Verfügbarkeit und Stördauert beschafft. Diese wurden in einem gemeinsamen Gespräch mit den zuständigen Mitarbeitern der Montageplanung abgestimmt.

Die Daten für die EHB wurden vom Systemzulieferer beschafft. Hier sind für die Materialflussuntersuchung das EHB Layout, die Geschwindigkeit der EHB, Anzahl der Fahrzeuge, Übergabezeiten sowie die Verfügbarkeit der EHB relevant. Diese Daten wurden Anhand von Telefongesprächen sowie PDF-Dateien (EHB Layout) zusammengetragen.

Das Hallenlayout wurde als PDF Datei von der Fabrikplanung des Unternehmens bereitgestellt. In Tabelle 5-2 werden die für die Simulation benötigten Daten, die in

Rahmen dieser Phase beschafft wurde, nochmals aufgelistet. Es wird zusätzlich aufgezeigt, aus welcher Quelle diese bezogen und welche Kennzahlen benötigt werden.

Tabelle 5-2 Übersicht der beschafften Daten

Komponente	Kennzahlen	Datenquelle
Produktinformationen	<ul style="list-style-type: none"> – Verbaute Komponenten – Verbaquote – Füllmengen 	Entwicklungsabteilung (Stückliste) Logistikplanung (gemeinsame Durchsprache)
Wareneingang/-ausgang	<ul style="list-style-type: none"> – LKW Wechselzeit – Anzahl Stellplätze der WE-Fläche 	Logistikplanung (gemeinsame Durchsprache in mehreren Meetings) und eigene Konzeptionierung der Lagerstrategie
Lagertypen: JIS Lager, Blocklager, Leergutlager, Supermarkt, Versand, Vollgut Outbound)	<ul style="list-style-type: none"> – Kapazität: Anzahl der Lagerspuren, Stellplätze (pro Spur) – Stapelfaktor Vollgut/ Leergut – Prozesszeiten 	
Setkom	<ul style="list-style-type: none"> – Anzahl Stationen – Kommissionier-Taktzeit – Reichweite des angestellten Materials 	
Transportlogistik in der Halle	<ul style="list-style-type: none"> – Belieferungskonzept (LKW Direktbelieferung oder Belieferung aus dem Traileryard mit WAB) – Geschwindigkeit, Prozesszeiten und Kapazität der Fahrzeuge 	
Montagelinien	<ul style="list-style-type: none"> – Taktzeit – Anzahl Stationen – Verfügbarkeit Montage – Stördauer – Pausenzeiten und Schichtmodell 	Produktionsplanung (gemeinsames Gespräch)
EHB	<ul style="list-style-type: none"> – Geschwindigkeit EHB – Anzahl EHB Fahrzeuge – Heber Übergabezeiten – EHB Layout 	Systemzulieferer (Kennzahlen aus Telefongesprächen und Layout als PDF Datei)
Hallenlayout	<ul style="list-style-type: none"> – Anordnung der Komponenten 	Hallenlayout als PDF Datei von der Fabrikplanung

5.4 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung wird mit Hilfe von Microsoft Excel durchgeführt. Es werden in einer Excel-Datei alle zuvor beschafften Daten strukturiert dargestellt. Diese Excel-Datei wird in Rahmen der Simulationsstudie als Eingangsdatendatei verwendet, die mittels einer Importfunktion in das Modell eingepflegt wird. Daher ist es notwendig, die Datenaufbereitung möglichst übersichtlich zu gestalten, um die Nachvollziehbarkeit für einen anderen Nutzer zu einem späteren Zeitpunkt zu gewährleisten. Es werden insgesamt sieben Blätter in der Arbeitsmappe angelegt.

Im Arbeitsblatt „Misc“ werden die Systemelemente anhand der notwendigen Parameter beschrieben. Diese Parameter können bei einer späteren Prämissenänderung flexibel angepasst werden. In Tabelle 5-3 wird die Grundstruktur des Arbeitsblattes Misc dargestellt.

Tabelle 5-3 Grundstruktur des Arbeitsblattes Misc

Parameter	Wert	Bemerkung
<i>[string]</i>	<i>[string]</i>	<i>[string]</i>
Bausteinbezeichnung		
Parameter	[sec]; [m/s]; [Stück]; [%]	Hier kann zwecks Nachvollziehbarkeit eine Bemerkung eingetragen werden.

Im Arbeitsblatt „Teiledaten“ wird eine Auflistung der verbauten Komponenten der Triebköpfe durchgeführt. Diese Bauteile werden in mehreren Spalten beschrieben. Durch die Spalte „Sortenrein/JIS“ wird aufgezeigt, ob es sich bei der Komponente um ein JIS-Teil handelt oder nicht. Zur eindeutigen Identifikation der Komponenten wird pro Bauteil eine Sachnummer vergeben. Diese wird für jedes Bauteil in der Spalte „Bauteilnummer“ eingetragen. In Spalte „Bezeichnung“ erfolgt die Eintragung der Bauteilbezeichnung, sodass anschließend eine eindeutige Zuordnung zwischen Sachnummer und Bauteilbezeichnung möglich ist. Die Spalte „LT-Cluster“ dient zur Darstellung, ob die Bauteile in KLT oder GLT in der Halle transportiert werden. Da es im Bereich der KLT und GLT mehrere Varianten gibt, sind weitere Details zur Beschreibung der Ladungsträger notwendig. Die Ladungsträgerkennziffer wird in Spalte „LT Art“ eingetragen, woraus sich in Spalte „Abmaße“ die jeweiligen Abmaße

ergeben. Da zum Planungszeitpunkt die zwar Füllmengen, jedoch nicht alle LT-Cluster bestimmt wurden, sind hier in dieser Spalte Lücken zu finden. Da aber in der Simulation mit den LT und LE Füllmengen kalkuliert wird, ist dies für die Berechnung unerheblich. Gemeinsam mit der Logistikplanung wurden daraufhin die Füllmengen für die Ladungsträger („LT Inhalt“) und für die Ladeeinheiten (LE Inhalt) ermittelt. In der Spalte „Teile pro Triebkopf“ wird die Anzahl der Komponenten pro Triebkopf eingetragen. Diese Informationen sind aus den Stücklisten zu entnehmen. Zur Ermittlung des Verbrauches pro Stunde, die in Spalte zwölf für jedes Bauteil vermerkt wird, ist eine Zwischenrechnung notwendig. Die Formel für den Verbrauch pro Stunde lautet:

$$\text{Verbrauch pro Stunde} = \frac{\text{geplante Ausbringungsmenge pro Tag} \times \text{Verbauquote}}{\text{Anzahl Schichten} \times \text{Arbeitszeit pro Schicht}} \quad (5-1)$$

Die geplante Ausbringungsmenge pro Tag dient hierbei als angenommener Richtwert, die Anzahl der Schichten und die Arbeitszeit pro Schicht sind aus den Arbeitsblättern „Produktionsprogramm“ und „Schichtmodell“ zu entnehmen. Als nächstes wird bestimmt, an welchem Ort die Komponenten verbaut werden. Daher wird in Spalte „Verbauort“ der Verbauort (Setkom, Vormontage oder Montage) eingetragen. Spalte „Anzahl KLT“ dient zur Ermittlung der Anzahl der KLT an den Montagelinien. Dabei wird als Prämisse angenommen, dass eine Montagestation zwei Meter breit ist und jeweils eine Durchlaufschiene pro Bauteil an den Stationen eingesetzt wird. Die KLT werden mit der Längsseite angestellt, sodass für die Anzahl der KLT das Breitenmaß ausschlaggebend ist. Es ergibt sich für die Anzahl der KLT an der Montagestation die Formel:

$$\text{Anzahl KLT} = \frac{\text{Breite der Station (2000mm)}}{\text{Breite des KLT}} \quad (5-2)$$

Es findet eine ganzzahlige Division statt, sodass im Falle einer Dezimalzahl das Ergebnis aufgerundet wird. Die Anzahl der KLT wird ebenfalls für die Generierung des Initialzustandes verwendet.

In den weiteren Spalten wird die Belieferungsform (LKW-Direktbelieferung aus dem Außenlager, Direktbelieferung der JIS Teile oder WAB Konzept) sowie der Lagerort in der Halle (Blocklager, Blocklager der JIS Teile, Supermarkt oder Direkttransport zur

Setkom) eingetragen. Die Spalte „Initialbestand Setkom“ gibt die Reichweite der angestellten LT in Stunden an, während in der Spalte „Initialbestand Supermarkt“ die Anzahl der KLT an jeweils einer Montagelinie definiert. Diese Reichweiten werden jeweils auch als Mindestbestand in Form von Rufgrenzen verwendet.

Im Arbeitsblatt „LKW Ankunft“ wird zeilenweise dokumentiert, welches Material in welcher Anzahl an Behältern zu welchem Zeitpunkt geliefert wird. Dabei wird jeweils eine LKW-ID vergeben, eine Ankunftszeit eingetragen und die Anzahl der Behälter in LE zu den jeweiligen Sachnummern eingetragen. In der Kommentarspalte wird zusätzlich die Belieferungsform (LKW-Direktbelieferung aus dem Außenlager, LKW-Direktbelieferung vom JIS-Bauteillieferanten oder Belieferung von WAB vom Traileryard). Tabelle 5-4 zeigt die Grundstruktur des Arbeitsblattes LKW Ankunft nochmal graphisch auf.

Tabelle 5-4 Grundstruktur des Arbeitsblattes LKW Ankunft

LKW_ID	Ankunftszeit	Materialbezeichnung	Anzahl Behälter	Kommentar
ID des ankommenden LKW (fortlaufend)	Ankunftszeit in folgendem Format: [dd:hh:mm:ss]	Eindeutige Bezeichnung des angelieferten Materials bzw. Sachnummer	Anzahl Behälter [LE] der Sachnummer	
[integer]	[daytime]	[string]	[integer]	[string]

Das Arbeitsblatt „Schichtmodell“ ist maßgebend für die Bestimmung der Simulationsdauer. Hier werden Schichtanfang, Schichtende sowie die Pausenzeiten in den jeweiligen Arbeitstagen eingetragen. Die Zuweisung der Schichten zu den jeweiligen Wochentagen erfolgt durch die booleschen Ausdrücke true und false. Somit ist es möglich, eindeutig zu bestimmen, an welchen Tagen gearbeitet werden soll und wie viele Schichten pro Tag eingeplant sind (siehe Tabelle 5-5).

Tabelle 5-5 Grundstruktur des Arbeitsblattes Schichtmodell

<i>Schicht</i>	<i>Schicht-start</i>	<i>Schicht-ende</i>	<i>Mo</i>	<i>Di</i>	<i>Mi</i>	<i>Do</i>	<i>Fr</i>	<i>Sa</i>	<i>So</i>	<i>Pausen</i>
Bezeichnung der Schicht	Arbeitsbeginn	Arbeitsende	Festlegung der Arbeitstage im Schichtmodells							Pausenzeiten
[string]	[time]	[time]	[boolean]							[time]
<i>Shift_01</i>	06:00:00	14:00:00	true	true	true	true	true	false	false	8:30-8:45; 11:30-12:00
<i>Shift_02</i>	14:00:00	22:00:00	true	true	true	true	true	false	false	16:30-16:45; 19:00-19:30
<i>Shift_03</i>	22:00:00	06:00:00	true	true	true	true	true	false	false	00:00-00:15; 02:00-02:30

Bei Eintragung dieser Kombination werden 15 Schichten pro Woche getätigt. Diese verteilen sich auf die fünf Werktage von Montag bis Freitag, wobei für jeden Tag drei Schichten eingeplant sind.

Zur Bestimmung der Stapler- und Routenzugwege werden im Arbeitsblatt „Entfernungsmatrix“ drei Matrizen angelegt. Eine Matrix definiert die Entfernung der Elemente in der Halle für den Staplertransport, während eine zweite Matrix die Entfernungen zwischen dem Supermarkt und den Montagelinien angibt. Die Entfernungen und Wege der EHB über die Setkom, den Montagelinien und dem Versandmodul werden ebenfalls über eine Matrix angegeben. In Tabelle 5-6 wird die Grundstruktur der Entfernungsmatrix dargestellt.

Tabelle 5-6 Grundstruktur des Arbeitsblattes Entfernungsmatrix

<i>von</i>	<i>Supermarkt</i>	<i>Linie1</i>	<i>Linie2</i>	<i>Linie3</i>
<i>nach</i>				
<i>Supermarkt</i>	-	-	-	-
<i>Linie1</i>	-	-	-	-
<i>Linie2</i>	-	-	-	-
<i>Linie3</i>	-	-	-	-

5.5 Systemanalyse

In Rahmen der Systemanalyse wird ein Konzeptmodell erstellt und bestimmt, welcher Detaillierungsgrad für die einzelnen Elemente verwendet wird.

Bereits in der Aufgabendefinition wurde festgelegt, dass die Systemgrenzen des Modells der Wareneingang und Warenausgang ist. Das Abbilden der gesamten Lieferkette würde zu einem erhöhten Modellierungsaufwand führen, der in diesem Fall zu vermeiden ist. Daher werden die Prozesse vor Ankunft der Bauteilkomponenten und die Anlieferung zu den Kundenwerken nicht weiter betrachtet.

In Rahmen der Materialflussuntersuchung ist es notwendig, sowohl den Vollgut- als auch Leergutstrom zu betrachten.

Der Vollgutstrom beginnt mit der Anlieferung der Bauteile. Hierfür gibt es zwei Belieferungskonzepte: Während Kleinteile aus einem Außenlager (in Folgendem Außenlager-Mix genannt) und das JIS Bauteile (Drehmomentwandler) mit einem LKW direkt an die Halle beliefert werden, werden die übrigen Bauteile mit Hilfe von WAB aus dem Traileryard beliefert. Diese WAB werden vor der Halle abgestellt, sodass ein Stapler die Bauteile entnehmen und zu Wareneingangsfläche transportieren kann. Die Steuerung der Ankunft des Außenlager-Mix sowie der JIS Bauteile erfolgt, wie bereits in Abschnitt 5.4 erläutert, über das LKW-Ankunftsprogramm. Der Außenlager-Mix Umfang wird zum Supermarkt transportiert, während die Teile aus der WAB in einem Blocklager gelagert werden. Die Blocklager fordern bedarfsgerecht eine WAB aus dem Traileryard an, sobald die jeweilige Rufgrenze unterschritten wird. Die JIS Bauteile werden in einem separaten Blocklager gelagert, um nicht die Anlieferungsreihenfolge zu zerstören. Für dieses Szenario zur Lagerung der Bauteile wurde das Blocklager gewählt, da die Hallenfläche sehr begrenzt ist und das Konzept des Blocklagers ermöglicht, dass Ladeeinheiten gestapelt werden können. Sobald die Komponenten aus den Blocklagern von der Setkom angefordert werden, werden die entsprechenden Ladeeinheiten aus den Lagern entnommen. Dies geschieht, sobald der Bestand in der Setkom den festgelegten Mindestbestand von 30 Minuten unterschreitet. Die Bauteile werden auf einem Warenkorb zu einem Set zusammengestellt und mittels EHB zu den Montagelinien transportiert. Zusätzlich zu den Warenkörben sind zur Montage der Triebköpfe Kleinteile notwendig. Diese werden mit Routenzügen vom Supermarkt an die Montagelinien transportiert und dort an den Stationen bereitgestellt. Die Eingangsdatenmatrix bestimmt, wie viele KLT des jeweiligen Bauteils an den

Montagelinien bereitgestellt werden können. Wird ein KLT aufgebraucht, wird ein neuer Transportauftrag an den Supermarkt gesendet, sodass beim nächsten Routenzugtransport der gewünschte KLT an die entsprechende Linie bereitgestellt wird. Auf den Montagelinien werden die Triebköpfe montiert, auf den Warenkorb gesetzt werden und mit Hilfe der EHB zum Versandmodul transportiert. Im Versandmodul werden die Warenkörbe von der EHB aufgenommen und in VLT verpackt. Dabei ist für jeweils eine Montagelinie eine Versandstation vorgesehen. Die VLT werden mit Hilfe eines Verteilwagens vom Versandmodul zum Vollgut - Outbound gebracht und anschließend mit Stapler in ein LKW beladen. Hier ist darauf zu achten, dass ein LKW einen Auftrag bzw. eine Perle abtransportiert und erst dann abfährt, wenn die maximale Anzahl von VLT im LKW befindet. Da das Versandmodul auf einer Höhenlage über der Setkom aufgebaut ist, werden die leeren Warenkörbe „nach unten“ mit Hilfe von Elevatoren zur Setkom abgegeben und dort neu bestückt. Die leeren EHB Fahrzeuge fahren zum Warenkorb-Abgabepunkt zurück.

Insgesamt sind drei Leergutströme vorhanden, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Der erste Leergutstrom befindet sich zwischen der Setkom und einem Leergutblocklager, in der die leeren Ladungsträger gelagert werden. Diese werden mit Stapler dorthin befördert. Außerdem werden die leeren KLT aus den Montagelinien auf einem separaten Stellplatz im Supermarkt gelagert. Ein weiterer Leergutstrom befindet sich zwischen Warenausgang und Versandmodul. Hier werden leere VLT von einem LKW angeliefert und zum Leergut Inbound transportiert. Von dort transportiert der bereits oben erwähnte Verteilwagen die leeren VLT zu den Versandstationen.

Der Materialaustausch zwischen Vollgut und Leergut wird in einem 1:1 Verhältnis durchgeführt. Dies bedeutet, dass nach der Anlieferung von Komponenten zur Halle Leergut am Wareneingang mitgenommen wird. Die gleiche Prozedur findet am Warenausgang statt. Hier werden zunächst die leeren VLT abgeladen und anschließend volle VLT beladen. Dieser 1:1 Austauschmechanismus gewährleistet, dass keine Leerfahrten durchgeführt werden.

Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Tätigkeiten in der Setkom und von Fremdarbeitskräften durchgeführt werden, während die Mitarbeiter an den Montagestationen beim Unternehmen direkt eingestellt sind. Nach Unternehmensvorgaben ist zwischen den Prozessen, die durch Fremdarbeitskräfte betrieben werden, und denen, die von den Mitarbeitern des Unternehmens betrieben werden, eine

Entkopplungszeit von 30 Minuten einzuplanen. Abbildung 5-2 veranschaulicht die Konzeptdarstellung als Resultat der Systemanalyse.

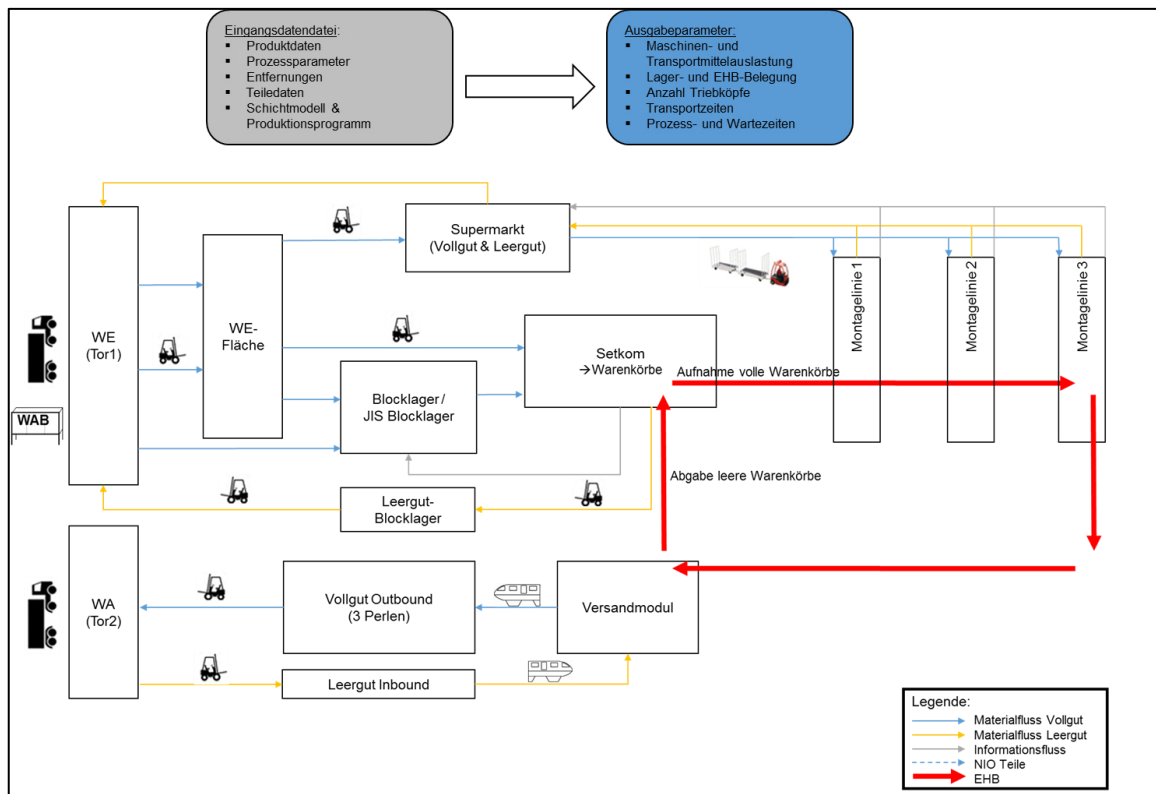


Abbildung 5-2 Konzeptdarstellung

Die Quelle des Modells sind die ankommenden LKW mit Rohteilen und Materialien. Senke des Modells stellt die Beladung der LKW mit fertigen Triebköpfen dar. Als Eingangsdaten sollen die in Rahmen der Datenaufbereitung erstellte Excel-Datei verwendet werden. Die erforderlichen Ausgabedaten sind die Maschinen- und Transportmittelauslastungen, die EHB- und Lagerbelegungszustände, die Anzahl der produzierten Triebköpfe sowie sämtliche Transport- und Prozesszeiten. Zur Durchführung der Black Box Modellierung werden weiterhin folgende Vereinfachungen und Prämissen getroffen:

Da es sich um eine Black Box Modellierung handelt, werden sämtliche Arbeitsfolgen und Prozesse abstrakt mit parametrierbarer Bearbeitungszeit und ggf. Stördaten abgebildet. In Rahmen der Black Box Modellierung wird auf die Darstellung der Perlenkettenreparatur und der Nacharbeit verzichtet. Die Darstellung sämtlicher Transporte (EHB, Stapler, Routenzüge) werden vereinfacht über die jeweiligen Weg-Zeit-Matrizen bzw. Entfernungsmatrizen durchgeführt. Diese wurden bereits in Abschnitt 5.4 eingeführt und erläutert. Im Modell wird zusätzlich zwischen „Innen-,

und „Außenstapler“ unterschieden. Stapler können sich jederzeit und überall auf den festgelegten Routen überholen. Des Weiteren werden die Staplertransportaufträge nach FIFO abgearbeitet. Dabei kann ein LKW bzw. eine WAB zwar von mehreren Staplern entladen werden, jedoch darf immer nur ein Stapler für die Be- bzw. Entladung an den LKW/WAB heranfahren. Die im Modell eingesetzten Stapler können innerhalb der jeweiligen Bereiche jeden Transportauftrag annehmen, aber immer nur einen gleichzeitig abarbeiten. Es werden zudem keine Optimierungen bezüglich der Transportroute hinsichtlich Transportzeit-Minimierung abgebildet. Um Leerfahrten zu vermeiden, wird in der Black Box Modellierung davon ausgegangen, dass ein 1:1 Vollgut-Leergut-Austausch stattfindet. Die Lagerung der Bauteile in den Blocklagern und im Supermarkt erfolgt ohne Verwendung einer detaillierten Lagerverwaltung. Das bedeutet, dass keine konkreten Lagerplätze unterschieden werden, sondern die Bestände nur abstrakt verwaltet werden. Das Material der Setkom wird aus einem gemeinsamen Bereitstellungsplatz abgerufen. Auf eine Darstellung der Warenkörbe wird ebenfalls verzichtet. Die EHB Fahrzeuge nehmen nur jeweils einen Warenkorb auf und können sich nicht überholen. Mit dieser Maßnahme wird die Untersuchung der EHB-Strecke hinsichtlich Auslastung vereinfacht. In Rahmen der Materialflussuntersuchung wird auf die Varianz der Drehmomentwandler verzichtet, da diese bereits in der richtigen Reihenfolge geliefert werden. Somit werden in der Simulation nur die Varianten Benzin (60%) und Diesel (40%) betrachtet. Die Varianten Benzin bzw. Diesel werden über zwei Bauteile bestimmt. Auf die Abbildung einer Notfallstrategie wird ebenfalls verzichtet. Die Vereinfachungen und Prämissen werden in Tabelle 5-7 nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5-7 Vereinfachungen und Prämissen

Element / Parameter	Ausprägung
Arbeitsfolgen / Prozesse	– Abstrakte Darstellung über parametrierbare Bearbeitungszeit und ggf. Stördaten
Transportrouten	– Darstellung der Transportrouten über Weg-Zeit-Matrizen
Darstellung der Stapler	– Unterscheidung zwischen Innen- und Außenstapler – Überholen ist überall und jederzeit möglich
Transportlogistik	– Durchführung der Aufträge nach FIFO – mehrere Stapler können be- bzw. entladen, jedoch nur ein Stapler gleichzeitig
Transportlogistik	– Jeder Stapler kann nur einen Auftrag gleichzeitig abarbeiten – keine Optimierungen bzgl. Transportzeit-Minimierung
Transportlogistik	– 1:1 Vollgut-Leergut-Austausch
Lagerbereiche	– Keine detaillierte Lagerverwaltung – abstrakte Darstellung der Bestände
Setkom	– Abruf des Materials aus einem gemeinsamen Bereitstellungsplatz
Warenkörbe	– Werden nicht abgebildet
EHB	– Fahrzeuge transportieren nur einen Warenkorb und können sich nicht überholen
Variantenbetrachtung	– Vernachlässigung der Drehmomentwandlervarianten – Betrachtung der Varianz zwischen Benzin (60%) und Diesel (40%)
Perlenkettenreparatur und Nacharbeit	– Wird im Rahmen der Black Box Modellierung vernachlässigt
Produktion- und Logistiksteuerung	– Keine Darstellung von Notfallstrategien

Die Modellierung erfolgt in einem einzigen 2D-Simulationsmodell, sodass keine weiteren Teilmodelle benötigt werden. Die Durchführung der Simulationsstudie erfolgt mit dem Programm Tecnomatix Plant Simulation mit Version 13.0.3, welches unter einem Lenovo Ultrabook mit einem Intel i5 Prozessor und 8 GB Arbeitsspeicher zum Laufen gebracht wird. Zur Darstellung der Systemkomponenten wird der VDA

Bausteinkasten verwendet. Tabelle 5-8 fasst die in Rahmen der Systemanalyse gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse zusammen.

Tabelle 5-8 Konzeptmodell

Aktivität	Ausprägung
Struktur und Komponenten sowie deren Wechselbeziehungen	– Siehe Abbildung 5-2
Systemgrenzen	– Wareneingang/-ausgang der Halle
Anforderungen an den Detaillierungsgrad sowie Umfang und Granularität der Daten	<ul style="list-style-type: none"> – Modell soll die beschriebenen Prozesse unter Berücksichtigung der Vereinfachungen und Prämissen (siehe Tabelle 5-7) darstellen – starke Wechselwirkung der Eingangsdaten bedingt hohe Datenqualität
Material- und Informationsfluss	– Siehe Abbildung 5-2
Eingangs- und Ausgangsgrößen	– Siehe Abbildung 5-2
Detaillierungsgrad	– Darstellung aller Systemkomponenten als Black Box
Verwendete Daten- und Informationsquellen	– Siehe Tabelle 5-2 Übersicht der beschafften Daten
Auswirkungen von Datenmangel	– Datenmangel hat eine hohe Auswirkung auf die Simulationsergebnisse, da die Systemelemente in starker Wechselwirkung zueinander stehen
Lösungsmethode	<ul style="list-style-type: none"> – Tecnomatix Plant Simulation (Version: 13.0.3) – VDA Bausteinkasten
Nicht zu modellierende Systemkomponenten	<ul style="list-style-type: none"> – Warenkörbe – Perlenkettenreparatur – Nacharbeit – Lieferkette der Halle – Notfallstrategien – Einflüsse durch TPM-Maßnahmen, Logistikprozesse oder durch Reaktionszeiten des Personals
Eingesetzter Computer	– Lenovo Ultrabook mit intel core i5 vPro Prozessor und 8GB Arbeitsspeicher
Schnittstellen zu externen Systemen	– Import der Eingangsdaten und Export der Ergebnisdaten über Schnittstelle zu Microsoft Excel

5.6 Modellformalisierung

In diesem Abschnitt werden die aus Kapitel 4 und der Systemanalyse aus Abschnitt 5.5 definierten Systemkomponenten formal beschrieben.

In der Quelle werden die Triebkopfkomponenten, die aus den LKW oder den WAB an die Halle transportiert werden, erzeugt. Diese werden im Simulationsmodell als BEs abgebildet. Ebenso werden leere VLT und das Leergut der Komponenten als BE dargestellt und durchlaufen ebenso wie das Vollgut das abgebildete System. Die BEs werden von Staplern, die auch als solche im Modell dargestellt werden sollen, aufgenommen und zum Wareneingang bzw. zum Blocklager transportiert. Es findet eine Unterscheidung zwischen Innen- und Außenstapler statt. Die Innenstapler transportieren das Vollgut zwischen Wareneingang, den einzelnen Blocklager (Voll- und Leergut), der Setkom und dem Supermarkt, während die Außenstapler am Warenausgang die vollen und leeren VLT, die JIS-Teile sowie sämtliches Leergut von der Halle in die LKW bzw. WAB transportieren.

Der Wareneingang, die verschiedenen Blocklager sowie der Supermarkt werden mit dem Baustein „Lager“ abgebildet. Der Lagerbaustein werden durch eine Gesamtkapazität sowie einer mittleren Ein-/Auslagerzeit der Stapler definiert und beinhaltet keine zusätzlich Verwaltung der Materialien. Zusätzlich werden auf der Wareneingangsfläche Tätigkeiten in Form von Prüfaktivitäten durchgeführt, die anhand einer Dreieckverteilung charakterisiert wird. Die Dreieckverteilung wird beschrieben durch einen Minimum-, Maximum und einen Erwartungswert für die Handlingszeit. Die EHB wird in anhand einer Förderstrecke, die die Warenkörbe transportieren soll, dargestellt. Die Transportzeit der EHB-Fahrzeuge ergibt sich aus den Längen der einzelnen Streckenabschnitte sowie der Geschwindigkeit des EHB-Fahrzeuges. Ein mögliches Aufstauen wird verursacht durch die Länge der Streckenabschnitte sowie der Längen der Fahrzeuge. Die Montagelinien und die Setkom werden als Bearbeitungsstationen dargestellt. Die Bearbeitungszeit soll jeweils angeben, wie lange es dauert, bis die BEs bei der Kommissionierungstätigkeit zu einem Warenkorb bzw. bei der Montage zu einem fertigen Triebkopf benötigen. Zusätzlich werden die Anzahl der Stationen angegeben. Die Montagelinien und Setkom werden weiterhin anhand folgender Parameter beschrieben: die gesamte technische Verfügbarkeit der Linien soll mit Hilfe einer prozentualen Angabe beschrieben werden. Dieser wird im Folgenden als „Verfügbarkeit“ bezeichnet. Die Verfügbarkeit einer Linie bezeichnet den durch-

schnittlichen Zeitanteil während ein Baustein betriebsbereit ist. Zusätzlich werden jeweils Störparameter hinterlegt. Die Stördauer (Mean Time To Repair, MTTR) als Störparameter gibt die mittlere Dauer einer auftretenden Störung an und wird im Modell anhand der Erlang-Verteilung abgebildet. Der Störabstand (Mean Time Between Failures, MTBF) gibt den mittleren Störabstand zwischen zwei Störungen an und wird mit der negativen Exponentialverteilung (Negexp) abgebildet. Für das Modell ist die Angabe von Verfügbarkeit und MTTR ausreichend, da der Wert für die MTBF über die Formel

$$MTBF = \frac{\text{Verfügbarkeit} \times MTTR}{1 - \text{Verfügbarkeit}} \quad (5-3)$$

im Simulationsmodell automatisch kalkuliert wird. Für die Verwendung der Erlang-Verteilung ist neben der Angabe des Mittelwertes (μ) ebenfalls die Standardabweichung (σ) anzugeben. Die Standardabweichung der Erlang-Verteilung wird im Modell in Plant Simulation automatisch mit der Formel

$$k = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2, \text{ mit } k = 2 \quad (5-4)$$

berechnet. Der k-Faktor wird im Rahmen der Verwendung des VDA Bausteinkastens automatisch festgelegt. Für die negative Exponentialverteilung ist die Angabe des Mittelwertes, welche im Rahmen der Simulation automatisch ermittelt wird, ausreichend.

Die Taktzeiten werden als konstante Verteilung angenommen. Die Versandstationen werden ebenfalls als Bearbeitungsstationen dargestellt, jedoch wird in Rahmen der Black Box Modellierung auf die Angabe von Stördaten verzichtet, sodass sich eine Verfügbarkeit von 100% ergibt. Die Taktzeiten der Setkom, der Montagelinien und der Versandstationen werden als konstante Zahlen angeben. Tabelle 5-9 stellt die Parametrisierung der Montagelinien und der Setkom zusammenfassend dar-

Tabelle 5-9 Verteilfunktionen der Bearbeitungsstationen

Baustein	Taktzeit	Verfügbarkeit	Mittlere MTTR	Mittlere MTBF
Setkom	konstant	Angabe in %	Erlang (μ, σ)	Negexp (μ)
Montagelinien	konstant	Angabe in %	Erlang (μ, σ)	Negexp (μ)
Versandstationen	konstant	wird vernachlässigt	wird vernachlässigt	wird vernachlässigt

Da an den Montagelinien und an der Setkom Ladungsträger, die aus dem Supermarkt bzw. den Blocklagern angefordert werden, direkt angestellt werden, muss auch dies im Modell abgebildet werden. So wird jeweils für die drei Montagelinien und für die Setkom ein vorgeschalteter Lagerbaustein dargestellt, die die direkte Materialanstellung darstellen soll. Die Parametrisierung dieser Bausteine erfolgte bereits im Abschnitt Datenaufbereitung und ist in der Eingangsdatendatei vermerkt. Der Transport der Triebköpfe von den Versandstationen zum Vollgut-Outbound, welcher, wie das Leergut-Inbound, als Lager dargestellt wird, erfolgt anhand von Förderstreckenabschnitten und einem Verteilwagen und sollen auch als solche modelliert werden. Die EHB Übergabestationen in Form von Hebebühnen o.ä. werden ebenfalls mit einer Prozesszeit charakterisiert, weshalb diese ebenfalls als Bearbeitungsstationen dargestellt werden. In der Abbildung 5-3 werden sie jedoch zwecks Übersichtlichkeit mit einem anderen Symbol dargestellt.

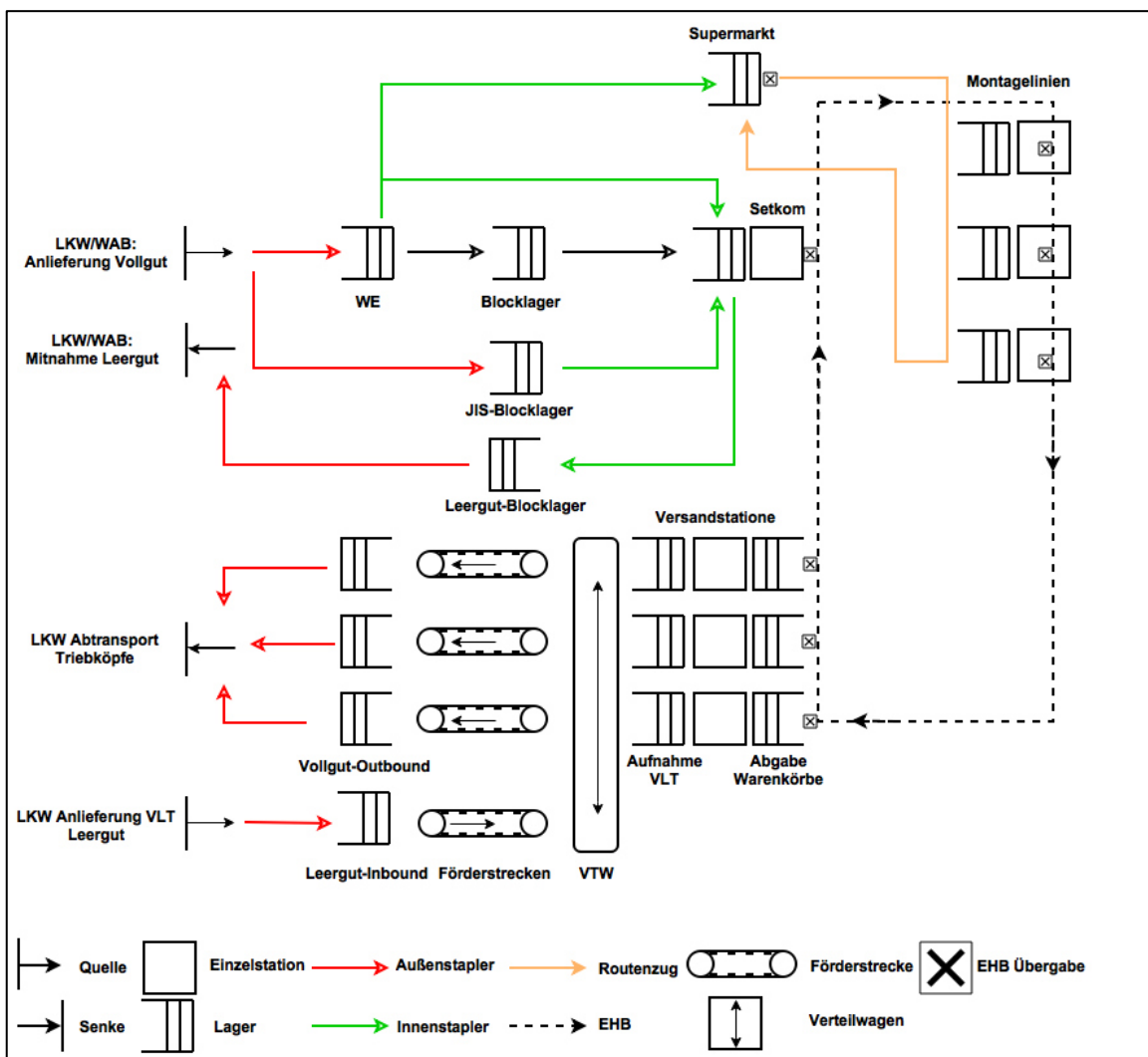


Abbildung 5-3 Formalisierung der Systemkomponenten

Des Weiteren sind Steuerungen zur Materialversorgung notwendig. Wie bereits in Abschnitt 4.3 erläutert, erfolgt die Belieferung der WAB an die Werkshalle bedarfsgerecht. Auch die Versorgung der Montagelinien sowie die Reichweite der Setkom sind bedarfsgerecht konzeptioniert. Somit ist die Implementierung einer Steuerung notwendig, die die Materialien bei Unterschreitung einer Mindestmenge bzw. einer Mindestreichweite neu anfordern. Die Rufgrenze der Blocklager ergibt sich aus der Berechnungsformel

$$LE \text{ Rufgrenze} = \frac{\text{geplante Reichweite} \times \text{Taktzeit Setkom} \times \text{Verbauquote}}{LE \text{ Inhalt}}. \quad (5-5)$$

Für die Materialanstellung an den Montagelinien ist ebenfalls bedarfsgerecht gesteuert. Sobald ein KLT an einer Montagelinie aufgebraucht wird, wird an das übergeordnete Routenzugsystem ein Auftrag generiert, dass ein KLT aus der benötigten Materialbezeichnung auf dem Routenzug beladen werden soll, sodass dieser bei seinem Routenzugprogramm die jeweilige Linie versorgen kann. Nach dem gleichen Prinzip ist die Materialversorgung der Setkom zu steuern, jedoch erfolgt anstatt die Forderung an einen neuen KLT vom Supermarkt die Erzeugung eines neuen Transportauftrages durch einen Innenstapler, welcher eine neue LE vom jeweiligen Blocklager an die Setkom anstellt, sobald die Reichweite von 30 Minuten unterschritten wird. Die Routen werden auf Basis der anliegenden Aufträge nach FIFO zusammengestellt. Bei der Zusammenstellung der Beladung für eine Fahrt werden die Transportaufträge unter Berücksichtigung der Kapazität des Zuges geplant.

Zusätzlich sind übergeordnete Steuerungen für das Modell notwendig. Auf Basis des Produktionsprogramms der drei Montagelinien werden in der Setkom die Sets für die Fertigungslinien erstellt und auf die Montagelinien verteilt. Somit ist eine eindeutige Zuweisung der Warenkörbe auf die EHB Strecken, die mit den jeweiligen Montagelinien verbunden sind, durchzuführen.

Außerdem ist eine Steuerung für eine mögliche Störung einer Linie zu gestalten. Sobald eine Montagelinie mit einer Störung versehen ist und sich die EHB-Strecke vor der Linie aufstaut, darf die Setkom keine neuen Sets für die gestörte Montagelinie zusammenstellen, um einen Stau der EHB Fahrzeuge vor der Linie zu verhindern.

Die Steuerung des Materials lässt sich wie folgt zusammenfassen: das Material wird nach zwei Prinzipien durch die Anlage geschleust. Vom Wareneingang bis in den Lagerbereich erfolgt es nach dem Push-Prinzip. Die LT werden im WE-Bereich

entsprechend der Vorgaben generiert und in die vorgesehenen Lagerbereiche transportiert. Von der Materialanstellung an den Montagelinien sowie im Bereichen Setkom wird Material aus dem Lagerbereich/Supermarkt angefordert, sobald ein Mindestbestand erreicht ist. Abbildung 5-4 veranschaulicht die Steuerung des Materials.

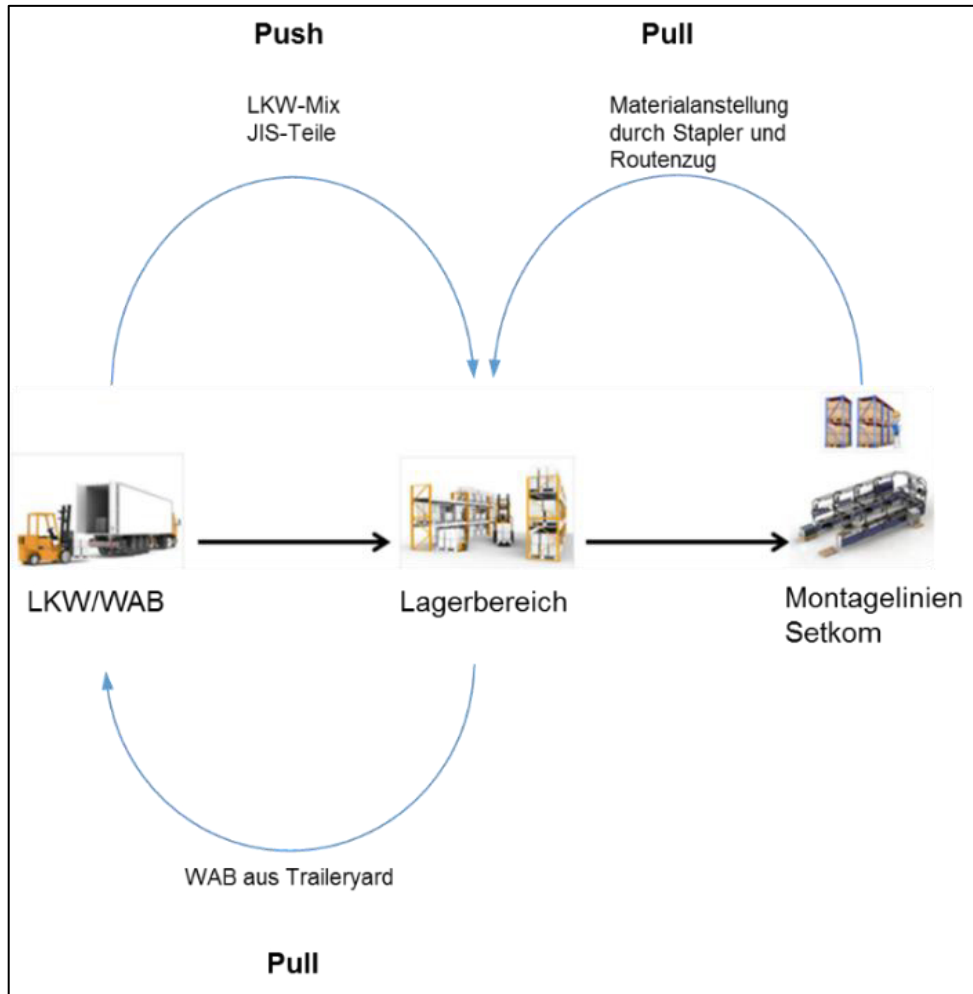


Abbildung 5-4 Materialsteuerung

In Tabelle 5-10 wird das formale Modell als Phasenergebnis der Modellformalisierung dargestellt.

Tabelle 5-10 Formales Modell

Systemelement	Ausprägung
Systemkomponenten	<ul style="list-style-type: none"> – LKW / WAB – WE-Fläche – Blocklager für Voll- und Leergut – Setkom – Supermarkt – Montagelinien – Versandmodul – Verteilwagen – Vollgut - Outbound und Leergut - Inbound – EHB – Innen- und Außenstapler – Routenzüge
Verwendete Steuerungen	<ul style="list-style-type: none"> – WAB Anforderung vom Traileryard – Materialbereitstellung an Montagelinien und Setkom – Warenkorbzusammenstellung im Falle einer Linienstörung
Stochastische Parameter und deren Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> – Störung der Montagelinien und der Setkom: <ul style="list-style-type: none"> – Stördauer: Erlang Verteilung (Angabe des Mittelwertes) – Störabstand: negative Exponentialverteilung (Angabe des Mittelwertes) – Technische Verfügbarkeit: Angabe in % – Handlingszeit auf der Wareneingangsfläche: Dreieckverteilung (Angabe von Minium-, Maximum und Erwartungswert)

5.7 V&V der aufbereiteten Daten und des formalen Modells

Damit die Richtigkeit der Überführung und Parametrisierung des ausführbaren Modells gewährleistet wird, wird eine Validierung der ausbereiteten Daten und des formalen Modells durchgeführt. Hierfür wird die in Abschnitt 3.4 beschriebene Technik „Validierung im Dialog“ eingesetzt. Die Validierung der aufbereiteten Daten fand mit

den jeweiligen Experten der Datenbeschaffung (siehe Tabelle 5-2) in jeweils gemeinsamen Abstimmungsterminen statt. Hier wurden die verwendeten Vorgehensweisen der Aufbereitung sowie die Ermittlung neuer Parameter erläutert.

Die Validierung des formalen Modells fand sowohl mit den Fachexperten des Unternehmens sowie externen Simulationsexperten statt. Hier wurde die Technik „Validierung im Dialog“ verwendet. Hier wurde das gesamte Konzept nochmals vorgestellt sowie die Auswahl der Bausteine für die Systemelemente erläutert. Die Fachexperten des Unternehmens bewerteten die Zusammenhänge der Systemelemente, während die Simulationsexperten die Elemente bzw. die Auswahl der Bausteine des formalen Modells bewerteten. Die Hinweise und Korrekturvorschläge der jeweiligen Experten wurden aufgenommen und in die Formalisierung der Systemkomponenten aufgenommen (siehe Abbildung 5-3). Somit ist diese Abbildung als korrigierte Version der Formalisierung zu verstehen.

5.8 Implementierung

Der Aufbau des ausführbaren Simulationsmodells erfolgt, wie bereits in der Aufgabendefinition (vgl. Abschnitt 5.2) beschrieben, mit dem Programm Tecnomatix Plant Simulation im 2D-Modus. Die Erstellung des Modells erfolgte in Kooperation mit dem Unternehmen EDAG PS. Zur Modellierung der Systemelemente werden zum einen die Bausteine der Standard-Klassenbibliothek und zum anderen der VDA Bausteinkasten verwendet.

Das Modell enthält mehrere Teilsysteme, die über den Standardbaustein „Netzwerk“ abgebildet werden. Grob lässt sich das gesamte Simulationsmodell in zwei Teilmodelle gliedern: eine Benutzeransicht und ein ausführbares Modell. Diese werden nun im Folgenden vorgestellt.

5.8.1 Die Benutzeransicht

Zur einfacheren Bedienung des ausführbaren Modells wird zusätzlich eine Benutzeransicht implementiert, die als Modellvorlage zur Verfügung gestellt wurde. In der Benutzeransicht lässt sich zum einen das Systemmodell per Doppelklick öffnen, zum anderen sind hier diverse Benutzerbuttons und Bausteine hinterlegt (siehe Abbildung B-6 im Anhang). Diese werden nun zwecks Nachvollziehbarkeit kurz erläutert.

Bei den zu sehenden Buttons im oberen linken Bildschirm handelt es sich wiederum um Teilsysteme, die weitere Bausteine beinhalten. Der Button „*Datapool*“ beinhaltet alle eingelesenen Daten aus der Eingangsdatendatei. Hier werden die einzelnen Arbeitsblätter der Excel Tabelle eingelesen und auf den jeweiligen Tabellenbausteinen überschrieben. Diese Tabellen werden im Baustein unter dem Textfeld „Input Data“ zusammengefasst. Eine weitere Tabelle, die sich im Reiter „Parameter“ befindet, listet die verwendeten Bausteine zur Modellierung der Systemelemente auf, die sich in einem separaten Netzwerk befinden. Der Button „*StatisticPool*“ beinhaltet die tabellarische und graphische Darstellung der Belegungs- und Auslastungszustände der verwendeten Bausteine wie bspw. Auslastung der Lagerbausteine (durchschnittliche Anzahl von Behältern) und Fahrzeuge sowie die Belegungs- und Auslastungszustände der Montagelinien und der Versandstationen. Hinter dem Button „*EventController*“ ist der Ereignisverwalter hinterlegt und dient somit nur als Direktverknüpfung. Mit dem Button „*Experimentenmanager*“ können neue Experimente mit Experimentennamen sowie die dazugehörigen Ein- und Ausgabeparameter definiert werden. Diese können anschließend im Experimentenverwalter verwaltet werden. Unter dem Button „*Interface*“ kann eine zusätzliche Benutzeroberfläche geöffnet, mit der bspw. die Animation gestartet werden kann.

Die auf der rechten Seite platzierten Bausteine sind aus dem VDA Bausteinkasten entnommen und dienen der übergeordneten Modellsteuerung. Der Baustein „Administration“ dient zur Übersicht der verwendeten Parameter in der Simulation. Im Gegensatz zum Baustein Datapool, welcher lediglich den Inhalt der Excel-Arbeitsblätter importiert, werden in diesem Baustein die Daten auf die verwendeten Bausteine und Elemente im Modell überschrieben.

Der Baustein „RandomCtrl“ dient zur automatischen Generierung von Zufallszahlenströmen, indem für die einzelnen Bausteine Zufallszahlen eingetragen werden können. Bausteine, die mit Störungen versehen wurden, können über den Baustein „BDControl“ eingesehen werden. Im Baustein „MessageLog“ erscheinen die Fehlermeldungen, die ggf. im Simulationslauf entstehen. Der Baustein „StatNet“ ermöglicht dem Anwender, anhand der Simulationsergebnisse graphisch Auwertungen durchzuführen. Mit dem Baustein „Shiftcalender“ ist es möglich, das aktuelle Schichtprogramm zu verändern. Die Reset Methode, die nach jedem Zurücksetzen der Simulation die BEs aus dem ausführbarem Modell entfernt, und die Init Methode zur

Aktivierung des Initialzustandes sind ebenfalls Bestandteile des VDA Bausteinkastens. Die Liste aller Fahrzeuge sowie die erzeugten Transportausträge durch Stapler, Routenzug und Verteilwagen werden im Baustein „VehicleCtrl“ angezeigt.

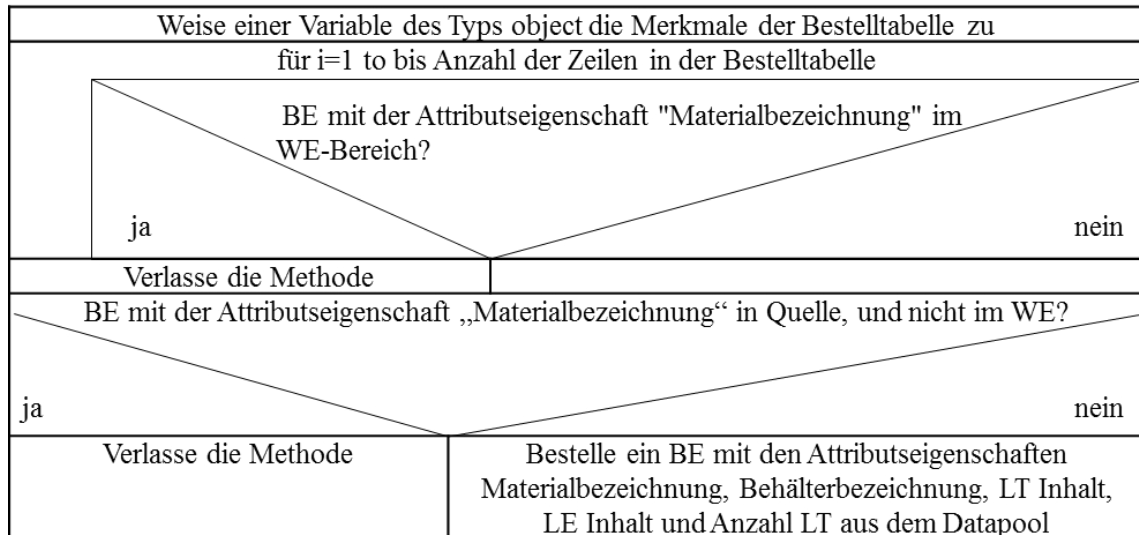
5.8.2 Das Systemmodell

Das Systemmodell enthält das darzustellende System. Es wird ein Modell erstellt, welches sich am Hallenlayout des Beispielproduktionssystems orientiert. Zu diesem Zweck wurde das Hallenlayout als Bilddatei hochgeladen und dient als Hintergrund der Modellansicht.

Die ankommenden Bauteile werden in zwei Quellen erzeugt. Eine Quelle generiert die Bauteile mit dem festen LKW Abfahrtsplan, zu denen der LKW-Mix und die JIS-Teile gehören. Die andere Quelle (LKW_OrderSource) erzeugt die Bauteile, die bedarfsgerecht an die Halle mit WAB angeliefert werden, sobald der Mindestbestand im Blocklager unterschritten wird. Die Steuerung ist in einer Methode formuliert, die nun erläutert wird. Um zu verhindern, dass in der Übergangszeit nach einer Bestellung die Methode öfter aufgerufen wird, wird zunächst eine lokale Variable des Typs object mit der Tabelle aus der Wareneingangssteuerung, die die ankommenden LKW und WAB registriert, überschrieben. Anschließend wird der Wareneingangsbereich überprüft. Es wird anhand einer for-Schleife, beginnend mit einer lokalen Variablen *i* des Typs integer von eins bis zur Anzahl der bereits bestellten Fahrzeuge in der vermerkten Variable, überprüft, ob diese sich im WE-Bereich befinden. Falls diese sich im WE-Bereich befinden, wird die LKW ID und die Materialbezeichnung in einem Parameter gespeichert. Falls ein Auftrag nicht in der vermerkten Tabelle zu finden ist, wird überprüft, ob Bestellungen bereits ausgelöst, jedoch noch nicht im Wareneingang angetroffen ist. Hierfür wird mit einer Fallunterscheidung überprüft, ob in so einem Fall ein BE dieselbe Materialbezeichnung als Attribut aufweist wie die Materialbezeichnung der Bestellanforderung. Wenn auch hier kein BE mit der entsprechenden Bestellung gefunden wird, wird ein Bestellauftrag ausgelöst, bei der ein BE mit den Attributen Materialbezeichnung, Behälterbezeichnung, LT Inhalt, LE Inhalt und Anzahl der LT pro LE generiert wird. Diese werden dann auf einem verfügbaren WAB Abstellplatz transportiert. Die LE Rufgrenze wird in der Inventartabelle in Administration Baustein eingetragen, die wiederum mit den einzelnen Blocklagern verbunden ist. Das Struktogramm 5-1 veranschaulicht die Vorgehensweise der Methode. Der Quellcode der

Methode ist im Anhang unter Quellcode A-1 zu finden und ist im Modell unter dem Namen *m_TriggerOrder* im Baustein *LKW_OrderSource* zu finden.

Struktogramm 5-1 Bedarfsgerechte Anforderung von WAB



Die Quellen sind mit einem Netzwerk verbunden, die die WE-Steuerung der Materialien an der Werkshalle abbildet. In diesem Netzwerk werden die ankommenden LKW als BE dargestellt und durchlaufen jeweils eine Warteschlangenzone („Buffer“) sowie einen Bereich für die Entladung der Materialien („*LoadingPositions*“). Beide Bereiche werden mit dem Baustein Puffer modelliert und sind mit Puffertyp „Warteschlange“ mit einer FIFO Strategie charakterisiert. Diese beiden Bausteine haben eine unendliche Kapazität und dienen lediglich zur Messung der Anzahl gleichzeitig wartender LKW zur Entladung sowie zur Messung der Anzahl von gleichzeitig verwendeter Entladepositionen. Die BEs werden anschließend in einer Senke vernichtet. Die WE-Steuerung befindet sich im Anhang ist als Teilnetzwerk in Abbildung B-7 dargestellt.

Im Systemmodell wird zur Darstellung der ankommenden LKW und WAB der Baustein Loading aus dem VDA Bausteinkasten verwendet. So werden jeweils für die WAB Stellplätze, die LKW für die Direktbelieferung des Außenlagerumfanges und der JIS-Bauteile und die LKW am Warenausgang mit den leeren VLT und den fertig montierten Triebköpfen als Loading Baustein dargestellt. Auf diesen Bausteinen werden die Komponenten und leeren VLT generiert und anschließend von Außenstaplern, die als BE des Typs „Forklift_Heavy“ dargestellt werden, entnommen (Innenstapler werden des BE Typs „Forklift“ modelliert). Mit Doppelklick wird ein Dialogfenster (siehe

Abbildung 5-5) geöffnet, mit dem bspw. die Verbindung zu anderen Bausteinen („Connection Data“), die gesamte Inventarliste („Inventory master data“) sowie der aktuelle Bestand („Current inventory data“) der Materialien und LT einsehen werden kann.

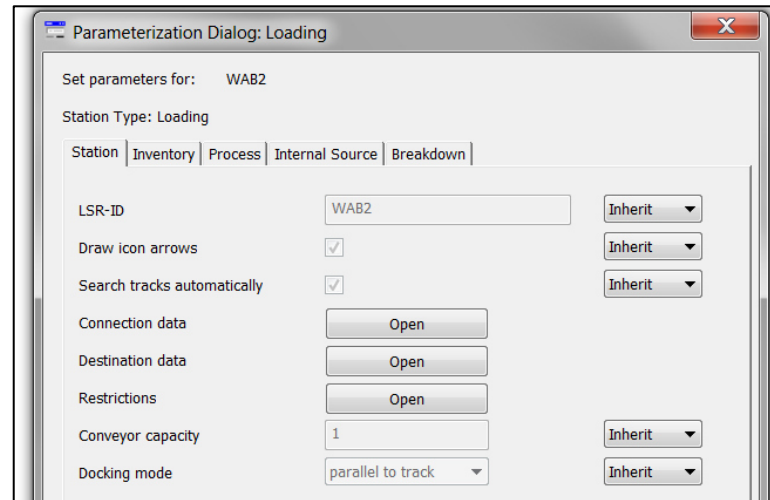


Abbildung 5-5 Dialogfenster VDA Baustein Loading

Die Staplerwege sowie die Wege für den Routenzug werden mit dem VDA Baustein LogTrack abgebildet. Transportfahrzeuge sind die einzigen BE, die entlang dieses Bausteins befahren werden können. Die Verweildauer der Fahrzeuge ergibt sich aus den Streckenentfernungen aus der Entfernungsmatrix der Eingangsdatendatei sowie der dort vermerkten Geschwindigkeit der Stapler bzw. des Routenzuges. Wie bereits in Tabelle 5-7 formuliert, können Stapler sich überall und jederzeit überholen. Im Dialogfenster des LogTrack Bausteins kann diese Einstellung durchgeführt werden, indem sämtliche Parameter mit dem Wert -1 definiert werden. Diese Zahl beschreibt in Plant Simulation den Wert unendlich. Außerdem handelt es sich bei allen LogTrack Abschnitten um Fahrbahnen, die in beide Richtungen befahren werden können (die Einstellung, dass ein LogTrack nur als Einbahnstraße fungiert, ist unter „show road tracks“ möglich). Abbildung 5-6 veranschaulicht das Dialogfenster und die Einstellung der LogTrack Bausteine.

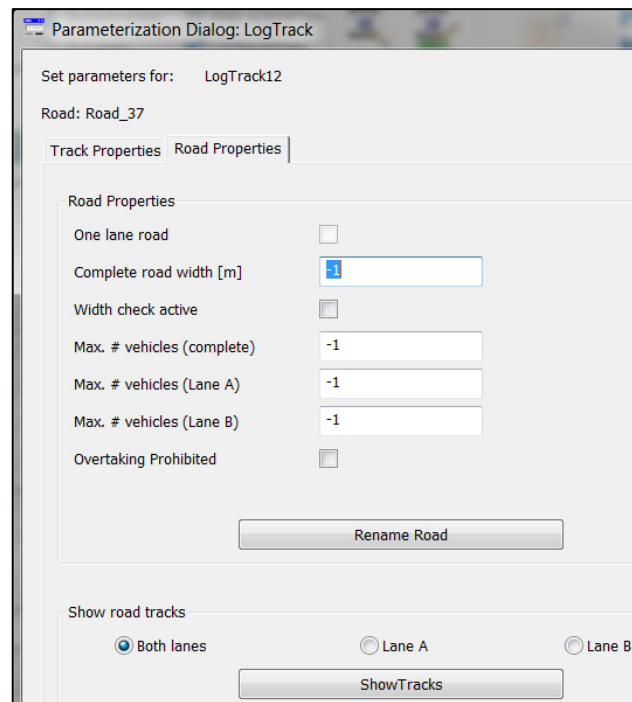


Abbildung 5-6 Dialogfenster des Bausteins LogTrack

Die Wareneingangsfläche, die Blocklager für Voll- und Leergut sowie das Vollgut-Outbound und das Leergut-Inbound werden mit dem Baustein Blockstore des VDA-Bausteinkastens dargestellt. Dieser Baustein stellt eine Lagerfläche dar, auf der Behälter mit einem bestimmten Stapelfaktor gestapelt werden können. Dieser Baustein ist ein einfacher Lagerbaustein, der von den Staplern befüllt bzw. geleert wird. Es gibt für das gesamte Lager nur einen Übergabepunkt an die Logistik. Mehrere Abgabe-/Aufnahmepunkte im Lager werden derselben Haltestelle zugeordnet. Auch hier kann, analog zum Loading Baustein, die Verbindung zu anderen Bausteinen eingestellt sowie die Gesamtinventar und aktuelle Bestandstabelle geöffnet werden. Zusätzlich ist unter dem Reiter „Inventory“ die Möglichkeit gegeben, die Anzahl der Stellplätze sowie den Stapelfaktor zu bestimmen. In Rahmen dieser Untersuchung wurde der maximal zulässige Stapelfaktor der Blocklager auf „-1“ gesetzt, was in Plant Simulation dem Wert unendlich entspricht. Hierdurch soll verhindert werden, dass die Blocklager zum Engpass des Systems werden. Durch die erzeugten Auslastungsdiagramme kann in Rahmen der Experimente und Analyse anschließend die Lagerdimensionierung für das Realsystem durchgeführt werden.

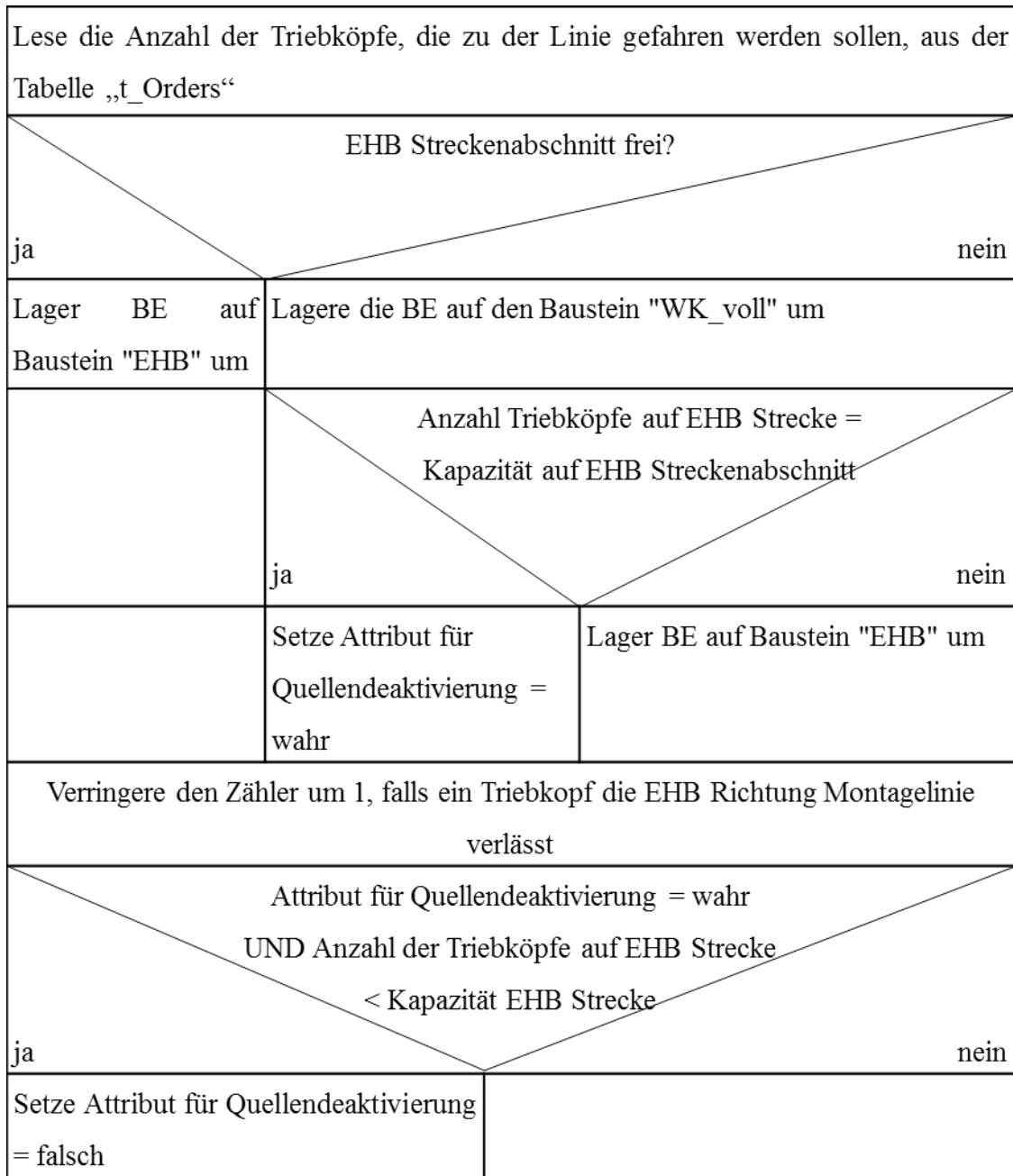
Die Setkom und die Montagelinien werden im Modell mit dem VDA Baustein LogFacility dargestellt. Neben der Taktzeit und der Anzahl der Stationen kann im Reiter Cyclictimes die Verteilfunktion des Bausteins sowie das zu hinterlegende Schicht-

programm ausgewählt werden. Zusätzlich können im Reiter Breakdown Störangaben wie Verfügbarkeit, MTTR und MTBF eingestellt werden. Die Materialversorgung für die Montagelinien und der Setkom werden mit dem Baustein Linefeed des VDA Bausteinkastens modelliert. In diesem Baustein werden die Bauteile, die direkt an der Linie/Setkom angestellt werden, gelagert. Im LogFacility Baustein wird im Reiter Parameter durch das Klicken des Buttons „Show / edit logistics stations (LSR)“ eine Tabelle geöffnet, in der die Linefeed eingetragen wird, die mit dem LogFacility Baustein verbunden werden soll. Entsprechend der Taktzeit der Logfacility werden im Linefeed Baustein die Materialien abgebucht. Im Linefeed Baustein unter dem Reiter Process kann durch das Öffnen der Process master data Tabelle die Parametrisierung der Bauteile, die im Baustein gelagert werden, durchgeführt werden, wie bspw. die Anzahl der Teile pro Triebkopf sowie die Verbaquote. Abbildung B-8 veranschaulicht die Verknüpfung und Parametrisierung des Linefeed Bausteins.

Gemäß der Modellogik werden die ankommenden Bauteile in den jeweiligen Lager, die mit den LogFacility Bausteinen verknüpft sind, abgebucht und somit zerstört. Die Erstellung der fertigen Triebköpfe erfolgt in einem Netzwerk mit dem Namen „OrderSource“. Hier sind drei Quellen platziert, die die fertigen Triebköpfe generieren. Die aus separaten Quellen erzeugten Triebköpfe werden auf die einzelnen Montagelinien verteilt. Für diesen Zweck werden Attribute verwendet. Je nach Attribut werden die Triebköpfe zu den entsprechenden Linien geroutet. Die Quellen sind mit dem Baustein FlowControl, welcher als Zusammenführungs- und Verzweigungsbaustein für BEs dient, verbunden. Die BEs werden gemäß dem FIFO Prinzip an die folgenden Bausteine weiterleitet. Das Netzwerk beinhaltet außerdem eine Methode, die mit einer Tabelle verknüpft ist. In der Tabelle wird die Anzahl der Triebköpfe notiert, die sich aktuell zwischen der Montagelinie und der Setkom auf der EHB befinden. Anhand der Steuerung wird überprüft, ob die Bestückungsstrecke noch genügend Platz hat für einen neuen Auftrag. Der Eingang der Quelle wird entsprechend gesperrt und später (bei ausreichender Kapazität) wieder freigegeben. Die Steuerung ist für das Auftreten von Störungen an der Montagelinie von großer Relevanz, da im Falle einer Linienstörung die EHB Streckenabschnitte überlastet werden, falls weiterhin BE die Setkom verlassen. Die Methode für die Setkomsteuerung im Störfall ist nach dem Struktogramm 5-2 aufgebaut (Quellcode der Methode im Anhang unter Quellcode A-2**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und hat im Modell die Bezeichnung *m.CountOrder*. Zur Realisierung der Steuerung wird ein Baustein des

Typs Bearbeitungsstation mit dem Namen „WK_voll“ eingesetzt, welche die Triebköpfe aufnimmt, sobald der Triebkopf die Setkom verlassen hat und die EHB Strecke belegt ist. Somit dient dieser Baustein nur als Warteplatz und wird nicht mit einer Bearbeitungszeit parametrisiert.

Struktogramm 5-2 Setkomsteuerung im Störfall



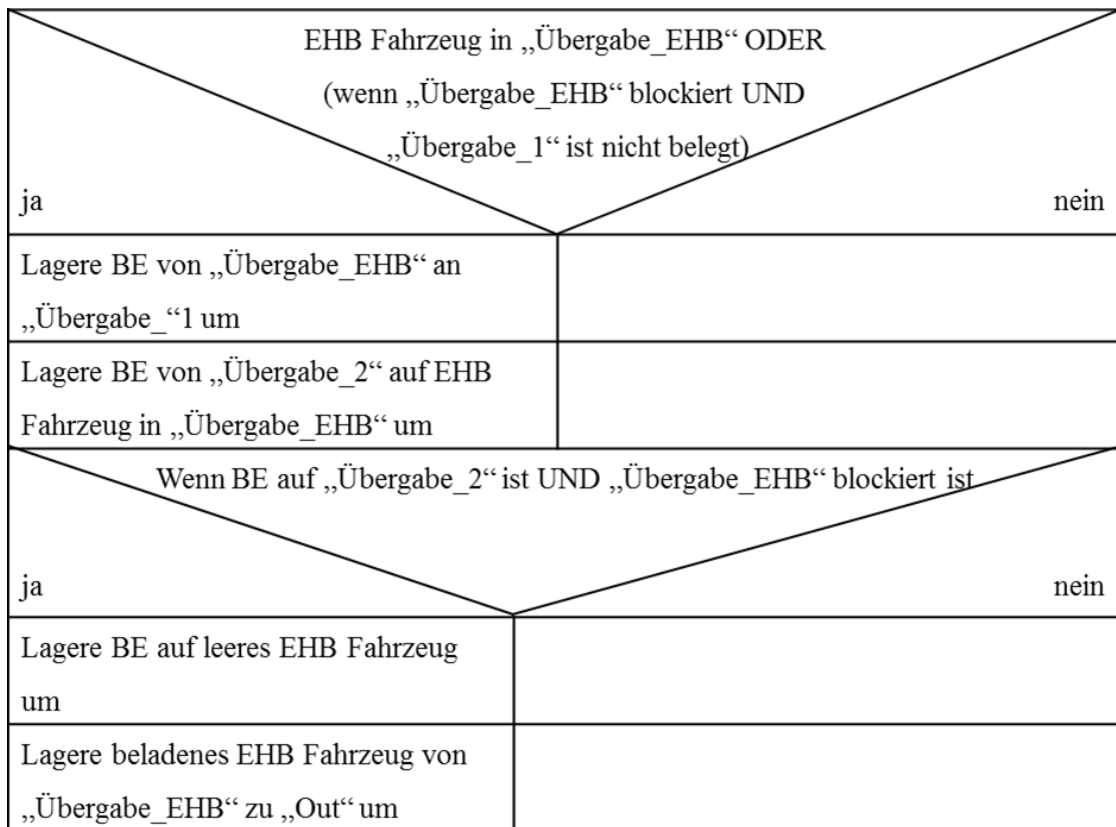
In einer separaten Quelle mit der Bezeichnung „Source_EHB“ werden die EHB Fahrzeuge des BE Typs Fahrzeug erzeugt. Das Fahrzeug kann durch Parameter wie Länge, Breite und Geschwindigkeit dimensioniert werden, die Einfluss auf das Stauverhalten auf der EHB Schiene haben.

Die Bearbeitungsstation mit der Bezeichnung „Gehänge“ dient als Wartestation, falls kein fertiger Triebkopf zur Übergabe an ein EHB Fahrzeug bereit steht. An die Bearbeitungsstation „EHB“ werden, sobald ein EHB Fahrzeug und ein Triebkopf verfügbar sind, von der Setkom die Triebköpfe umgelagert. Diese beiden Bearbeitungsstationen werden ebenfalls nicht mit einer zusätzlichen Bearbeitungszeit versehen, da diese nur für Warte- und Umlagerprozesse verwendet werden. Nachdem die Triebköpfe auf die EHB Fahrzeuge umgelagert werden, fahren die Fahrzeuge zu den jeweiligen Montagelinien. Je nach Ausprägung des Attributs wird in dem Bausteinen FlowControl die jeweilige Richtung des Fahrzeugs bestimmt. In Abbildung B-9, welche sich im Anhang befindet, wird der Bereich zur Übergabe der Triebköpfe auf die EHB Fahrzeuge dargestellt.

Die EHB Streckenabschnitte werden mit dem Baustein Platzpuffer dargestellt. Da die EHB Fahrzeuge bis zum Erreichen des jeweiligen Ziel jeden Platz im gesamten Streckenabschnitt durchlaufen müssen und die Fahrzeuge sich nicht überholen können, wird dieser Baustein zur Modellierung der EHB Strecken verwendet. Des Weiteren wird die Staufähigkeit der Streckenabschnitte aktiviert, um Aussagen über die Auslastung der Strecken treffen zu können. Zusätzlich ist der Übergabebereich zwischen den EHB Strecken und den Montagelinien zu modellieren. Hierfür wird jeweils ein separates Netzwerk mit der identischen Struktur aufgebaut. Abbildung B-10 veranschaulicht den Übergabebereich zwischen der EHB und den Montagelinien.

Im Unteren Strang fahren die EHB Fahrzeuge in die Übergabestation „Übergabe_EHB“ ein, woraufhin die Triebköpfe dann auf die Station „Übergabe_1“ abgegeben werden. Dieser Baustein stellt die Übergabe der Triebköpfe mit Elevatoren auf die Montagelinie dar und ist gekennzeichnet mit einer Übergabezeit. Anschließend wird der Triebkopf zum Montagebaustein LogFacility transportiert. Das BE gelangt danach wieder in das Netzwerk auf den Baustein „Übergabe_2“ welches die Übergabe des fertig bearbeiteten Triebkopfes auf das EHB Fahrzeug darstellen soll und ebenfalls mit einer Bearbeitungszeit charakterisiert ist. Die EHB Fahrzeuge warten auf dem Baustein „Übergabe_EHB“ auf einen Triebkopf und fahren erst dann auf den Baustein „Out“, bis ein BE nach der Bearbeitungszeit auf das Fahrzeug umgelagert wurde. Die Methode *m_EventCtrl* enthält die Steuerung des Übergabebereichs und ist nach dem Struktogramm 5-3 (Quellcode im Anhang unter Quellcode A-3) aufgebaut.

Struktogramm 5-3 Übergabebereich EHB-Montagelinie



Der kontinuierliche Prozess zwischen der Ab- und Aufnahme von BE bei möglichen Maschinenstörungen wird in der zweiten Schleife abgefangen, wenn bei Ankunft eines EHB Fahrzeuges mit einem BE noch kein fertiger Triebkopf für den Wechsel zur Verfügung steht. Das EHB Fahrzeug verweilt solange auf dem Baustein „Übergabe_EHB“ bis ein fertig bearbeiteter Triebkopf aus dem LogFacility Baustein auf dem „Übergabe_2“ Baustein ankommt.

Die bearbeiteten Triebköpfe werden anschließend zum Versandmodul mit jeweils drei Versandstationen transportiert, welches als separates Netzwerk modelliert ist. Der Übergabebereich der EHB zur jeweiligen Versandstation ist analog zum Übergabe zu den Montagelinien aufgebaut. Das EHB Fahrzeug fährt in den Baustein „Übergabe_EHB“ hinein und lagert dort das BE zum Baustein „Übergabe_1“ um. Anschließend fährt das EHB Fahrzeug zum Baustein „Out“ und verlässt den Übergabebereich des Versandmoduls Richtung Setkom. Die BEs werden dann von den Übergabebereichen auf das Förderband umgelagert, auf denen die Triebköpfe platziert sind, während der Werker die Triebköpfe auf ein VLT umsetzt. Das Förderband wird mit dem Baustein Puffer dargestellt. Der Parameter Kapazität gibt dabei den maximalen Wert von Triebköpfen an, die auf dem Förderband platziert werden können. Da die

Geschwindigkeit des Förderbandes nicht berücksichtigt wird und es lediglich zur Pufferung der Triebköpfe dient, ist diese Form der Modellierung ausreichend, sodass eine Darstellung des Förderbands als Förderstrecke mit einer (konstanten) Geschwindigkeit nicht notwendig ist. Die Versandstationen sind anhand des Baustein LogFacility dargestellt, wobei die Bearbeitungszeit die Zeit darstellt, die der Werker für das Umsetzen eines Triebkopfes in einen VLT benötigt. Anschließend gelangen die BE von der LogFacility zu einem Abgabeplatz zur Abgabe der Triebköpfe an den Verteilwagen. Der Abgabeplatz ist mit dem VDA Baustein LogStation dargestellt und stellt ein abstraktes Lager zur Aufnahme von mehreren BEs (hier VLT und Triebköpfe) dar. Der Verteilwagen, der anhand des VDA Bausteins LiftVehicle modelliert worden ist, nimmt die VLT auf und transportiert entlang einer fest definierten Strecke die Triebköpfe zum Vollgut-Outbound. Diese Strecke ist, wie bei den Staplerwegen, durch den Baustein Logtrack abgebildet. Dabei entnimmt der Verteilwagen jeweils ein leeres VLT aus einer LogStation, welche mit dem Leergut-Inbound verbunden ist und als Bereitstellungslager dient, und transportiert es zu der Versandstation. Die vollen VLT werden ebenfalls auf einem Bereitstellplatz für den Verteilwagen gelagert, die im Modell mit „Shuttle_F1“, „Shuttle_F2“ und „Shuttle_F3“ gekennzeichnet sind. Nach Abgabe eines leeren VLT wird ein volles VLT mitgenommen und zum Baustein „Vollgut_Abgabe“ transportiert. Anschließend werden die VLT zu einem der drei Vollgut-Outbound Stränge befördert. Da das Versandmodul auf der dritten Ebene platziert ist und die Vollgut-Outbound Stränge sich auf der Hallenfläche befinden, wird der Förderweg zwischen der Abgabe der vollen VLT und dem Vollgut-Outbound mit dem Baustein „Umsetzer“ modelliert. Dieser stellt die Kombination aus einer Fördertechnik und einem Anhebe- bzw. Absenkmechanismus dar und realisiert den Transport der BE von dem auf der dritten Ebene gelegenen Versandmodul und dem auf der Hallenfläche platzierten Vollgut-Outbound. Die hier relevanten Parameter sind die Streckenlänge bis zum Anhebe-/Absenkmechanismus, die Geschwindigkeit der BE auf dem Förderabschnitt sowie die Umsetzzeit. Nach Durchlaufen der Umsetzer verlassen die BE das Netzwerk. Das Teilnetzwerk des Versandmoduls ist im Anhang in Abbildung B-11 zu finden.

Für die Steuerung des Verteilwagens ist ebenfalls weitere Methode zu implementieren, die sich im Modell im Netzwerk „ShuttleCtrl“ befinden. Die Methode *m_trigger* (siehe Anhang unter Quellcode A-4) wird aufgerufen, sobald vier Triebköpfe auf einem der Bereitstellungsbausteine zur Verfügung stehen. Die Methode erzeugt anschließend einen neuen Auftrag mit den einzelnen Schritten:

- Fahrt zu Aufnahme Leergut
- Fahrt zu entsprechender Shuttle-Station
- Fahrt zur Abgabe Vollgut
- Entladen Vollgut/Leergut
- Beladen Vollgut
- Beenden des Jobs

Zur Vervollständigung der Fahrzeugsteuerung sind weitere Methoden für die Stapler- und Routenzugsteuerung zu implementieren.

Zwecks Übersichtlichkeit erfolgt eine differenzierte Modellierung der Stapler. Während Innenstapler durch den VDA Baustein „Forklift“ abgebildet werden, erfolgt die Darstellung der Außenstapler anhand des VDA Bausteins „Forklift_Heavy“. Beide BE Bausteine verfügen über dieselbe Funktionsweise, jedoch ist in der Animationsansicht die Forklift_Heavy BE größer dargestellt, sodass dem Anwender die Unterscheidung der Stapler erleichtert wird. Die Trigger Methode, die im Netzwerk „ForkliftCtrl“ (Quellcode im Anhang unter Quellcode A-5**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) platziert ist, wird aufgerufen, sobald ein neuer Transportauftrag generiert wird. Analog zur Verteilwagensteuerung führt die Trigger Methode, je nach Auftragsinhalt, folgende Aktionen aus:

- Bestimmen des Stapelfaktors
- Bestimmen, ob für einen Auftrag ein Außen- oder Innenstapler verwendet wird
- Bestimmen der Transportwege der Stapler
- Beladen Vollgut Beladen Leergut
- Entladen Vollgut/Leergut
- Beenden des Auftrages

Das Routenzugprogramm wird gemäß der Eingangsdatendatei alle 60 Minuten durchgeführt. In den LineFeed Bausteinen der Montagelinien ist eine Tabelle mit der Bezeichnung „t_inventory“ hinterlegt, die die jeweiligen Bauteile mit den Ladungsträgern und den Bauteilen pro Ladungsträger auflistet. Es wird zum einen die Sachnummer des Bauteils sowie die KLT Bezeichnung, die LT Art und dessen Füllmengen sowie die Anzahl der Bauteile im Initialzustand aus der Eingangsdatendatei übernommen. Des Weiteren wird in einer separaten Spalte die Rufgrenze von leeren KLT eingetragen, bei der ein neuer KLT aus dem stündlichen Routenzugprogramm angefordert wird. Diese Zahl wird in der Simulation bei allen Bauteilen in den LineFeed

Bausteinen der Montagelinien auf eins gesetzt. Die Trigger-Methode (siehe Anhang unter Quellcode A-6) fordert dann bei der Routenzugsteuerung (Baustein „TrolleyCtrl“) das Material an, sobald am LineFeed Baustein ein leerer KLT entsteht. In der Methode „m_EventCtrl“ (siehe Anhang unter Quellcode A-7), welches sich im Netzwerk „TrolleyCtrl“ befindet, wird dann bestimmt, welches Material auf dem Routenzug gelangen soll. Das Routenzugfahrzeug wird mit dem BE des Typs „Tugger“, die Anhänger mit dem BE Typ „Trailer“ aus dem VDA Bausteinkasten dargestellt. Die Parametrisierung des Routenzugfahrzeugs und der Anhänger erfolgt durch die beschafften Daten gemäß der Tabelle 5-2. Ein Ausschnitt der Systemansicht ist in Abbildung B-12, welche sich im Anhang befindet.

5.9 V&V des ausführbaren Modells

Bevor mit dem ausführbaren Modell die Experimente und Analyse durchgeführt werden, wird in Rahmen von V&V Techniken die Richtigkeit des Modells überprüft. Hier wird zum einen der Festwerttest gewählt, indem drei Testexperimentenreihen mit jeweils verschiedenen Szenarien durchgeführt werden. In der ersten Experimentenreihe werden alle kapazitätsmindernden Einflüssen (Störungen, Schichtmodell, Pausen und GAB) deaktiviert. Die zweite Experimentenreihe wird mit einem Schichtmodell und Pausenzeiten durchgeführt, jedoch bleiben hier die GAB und Störungen deaktiviert. In der dritten Experimentenreihe sind das Schichtmodell, die Pausenzeiten sowie die GAB aktiviert, jedoch werden auch hier die Störungen nicht berücksichtigt. Tabelle 5-11 stellt die drei Testexperimentenreihen zusammenfassend dar.

Tabelle 5-11 Übersicht des Festwerttests

Experimentenreihe	Störungen	Schichtmodell	Pausen	GAB
Festwerttest 1	✘	✘	✘	✘
Festwerttest 2	✘	✓	✓	✘
Festwerttest 3	✘	✓	✓	✓

Durch die durchgängige Deaktivierung der Störungen entfallen sämtliche stochastische Einflüsse, sodass aus dem stochastischen Modell ein deterministisches Modell wird. Die Ergebnisse werden mit theoretisch berechneten Werten verglichen. Anschließend wird, ausgehend von den Abweichungen zwischen Berechnung und Simulation, bewertet, ob

das ausführbare Modell das Systemverhalten hinreichend genau darstellt. Als Ziel- und Vergleichsparameter für die Bewertung wird die tägliche Ausbringungsmenge (im Folgenden Output), die GAE und AE definiert. Die Berechnung der GAE und AE wurde in Abschnitt 2.4 erläutert. Die Berechnung des theoretischen Outputs erfolgt auf Basis der Taktzeit der Montagelinien. Hieraus wird der stündliche Output (jobs per hour, JPH) ermittelt werden. Von den JPH ausgehend kann der tägliche Output berechnet werden. Tabelle 5-12 zeigt die Auswertung des Festwerttests, indem die Abweichungen der Simulationsergebnisse mit den theoretisch berechneten Werten dargestellt werden.

Tabelle 5-12 Ergebnisse des Festwerttests

Experimentenreihe	Beschreibung	Ergebnisparameter		
		Abweichung Output [%]	Abweichung GAE [%]	Abweichung AE [%]
Festwerttest 1	ohne Störungen, Schichtmodell, Pausen und GAB	0,14	0,14	0,14
Festwerttest 2	ohne Störungen und GAB; mit Schichtmodell und Pausen	0,46	0,46	0,46
Festwerttest 3	Ohne Störungen; mit Schichtmodell, Pausen und GAB	0,05	0,06	0,05

Die Abweichungen der jeweiligen Ergebnisparameter bewegen sich in einem Intervall zwischen 0,05 % - 0,46 %, obwohl das Modell mit der Deaktivierung der stochastischen Einflussgrößen einen deterministischen Charakter aufweist. Dies lässt sich durch die abstrakte Darstellung der Systemelemente in Rahmen der Black Box Modellierung erklären. Da die Abweichungswerte vergleichsweise sehr gering sind, kann in Rahmen der V&V angenommen werden kann, dass das ausführbare Modell das Systemverhalten des realen Systems hinreichend genau wiedergibt.

Des Weiteren wurde in Rahmen einer Validierung im Dialog das Modell einem Expertenkreis aus Fachleuten und Simulationsexperten vorgestellt und von allen Beteiligten abgenommen.

Da der Festwerttest das Modell erfolgreich auf die Richtigkeit geprüft und die Validierung im Dialog zu einem positiven Ergebnis geführt hat, können nun im Folgenden die Experimente und Analyse durchgeführt werden.

5.10 Experimente und Analyse

5.10.1 Beschreibung und Ergebnisse der Experimentenreihen

In Rahmen der Simulationsstudie werden drei Experimente durchgeführt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der Taktzeit der Montagelinien, der Verfügbarkeit der Linien, dem einzusetzenden Schichtmodell sowie der Durchführung von GAB. Die einzelnen Experimente werden nun im Folgenden vorgestellt.

- **Experimentenreihe 1 - Standardexperiment (manuelles System):** in dieser Experimentenreihe werden die Parameter verwendet, die den aktuellen Planungsprämissen entsprechen und bildet die Ausgangskonfiguration ab. Ausgehend von der Standardexperimentenreihe wird die Parametervariation durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Konfiguration mit manuellen Tätigkeiten auf den Montagelinien und bildet somit den Fall ab, falls automatisierte Lösungen nicht eingesetzt werden. Hier wird das Modell mit der Plantaktzeit sowie der geplanten Verfügbarkeit der Montagelinien ausgeführt. Außerdem wird ein „3-Schichtenmodell“ eingesetzt. Dieses Schichtmodell wird durch den Einsatz von drei Schichten pro Tag (jeweils acht Stunden pro Schicht) definiert, in der von Montag-Freitag gearbeitet werden soll. Am Ende jeder Schicht werden 15 Minuten für die GAB beansprucht.
- **Experimentenreihe 2 - Erhöhung der Taktzeit und der Verfügbarkeit (automatisches System):** hinsichtlich des Standardexperiments unterscheidet sich dieses Experiment von der Erhöhung der Taktzeit um ca. 16,67% und der Erhöhung der Verfügbarkeit um ca. 5,4%. Diese Werte entsprechen dem Einsatz von automatisierten Stationen auf den Montagelinien. Der Einsatz von Automatisierungstechnik führt in der Regel zu höheren GAE und AE Werten. Jedoch ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass zur Erhöhung der Taktzeit der Montagelinien ebenfalls die Taktzeit der Setkom und die Bearbeitungszeiten der Montagestation erhöht werden müssen, um eine gleichmäßige Austaktung des Gesamtsystems zu gewährleisten. Zur Anpassung der Taktzeit der Setkom wird folgende Formel verwendet:

$$Taktzeit\ Setkom = \frac{Taktzeit\ Montagelinie}{Anzahl\ Montagelinien} \quad (5-6)$$

Die Bearbeitungszeit einer Versandstation entspricht der Taktzeit einer Montagelinie, sodass diese gemäß der Taktzeiterhöhung ebenfalls auf denselben Wert erhöht wird. Diese Experimentenreihe soll Aufschluss über die Entwicklung der Zielparameter bei Erhöhung der Taktzeit geben und die Auswirkung auf die restlichen Systemelemente aufzeigen. Auch für diese Experimentenreihe wird das 3-Schichtmodell eingesetzt.

- **Experimentenreihe 3 - Standardexperiment mit einem 2 Schichtmodell:** im dritten Experiment wird ausgehend vom Standardexperiment das Schichtmodell variiert. Hier wird ein 2-Schichtmodell eingesetzt, in der pro Schicht 10,45 Stunden gearbeitet werden soll. Zwischen den beiden Schichten gibt es eine Entkopplungsphase, in der Tätigkeiten wie vorbeugende Instandhaltung, Gruppengespräche und die Reinigung der Halle aufgrund der hohen Sauberkeitsanforderungen durchgeführt werden. Hierdurch entfällt die für jede Schicht durchzuführende GAB. Als reguläre Arbeitstage gelten die Tage von Montag bis Samstag, sodass pro Woche zwölf Schichten durchgeführt werden (in den ersten beiden Experimenten wird in 15 Schichten pro Woche gearbeitet). Die Einführung des alternativen Schichtkonzeptes soll die Vergleichbarkeit aller Werke des Unternehmens weltweit gewährleisten, da aktuell Tätigkeiten wie GAB und Gruppengespräche nicht einheitlich durchgeführt werden. Durch die Verlagerung dieser Tätigkeiten in die Entkopplungsphase können bei Einführung des alternativen Schichtmodells durch den AE Wert alle Standorte miteinander verglichen werden, was der Managementebene dazu verhilft, strategische Entscheidungen zu treffen. Da dieses Schichtmodell noch nicht an allen Standorten ausgerollt ist, soll anhand dieser Experimentenreihe das alternative Schichtmodell für die Produktion der Triebköpfe eingesetzt und anhand der Zielparameter bewertet werden.

Die Experimentenreihen bilden dabei die drei möglichen Szenarien ab, die für die neue Werkshalle eingesetzt werden können. In Rahmen der Projektplanung wurden für diese Szenarien bereits theoretische Ergebnisse ermittelt, die anhand der Simulation nun überprüft werden. Die Abweichungen zwischen den theoretisch berechneten Werten und der Simulationsergebnisse soll Auskunft über die Richtigkeit der Planungsprämissen geben. Wünschenswert sind demnach geringe Abweichungen zwischen den berechneten Werten und den Werten aus der Simulation. Unter Berücksichtigung von identifizierten Schwachstellen, die mit Anpassungen beseitigt werden sollen, werden

anhand von Zielparametern entschieden, welches Materialflusskonzept sich am besten für die Produktion der Triebköpfe eignet. Als Zielparameter zum Vergleich der Experimentenreihen werden, wie in den Festwerttests in Abschnitt 5.9, der Output, die GAE und die AE verwendet.

Zur Steuerung der Experimente und wird im Systemmodell ein Experimentenverwalter eingesetzt. Hier können zum einen die Experimente deklariert und gesteuert werden, indem beispielsweise Parameter wie die Anzahl der Simulationstage, die Taktzeit der Maschinen und der Zeitpunkt, nachdem ein Statistikreset durchgeführt wird, variiert werden. Der Experimentenverwalter dient ebenfalls dazu, die Eingangsdaten einzulesen und den Pfad für die Ausgabe der Ergebnisse zu bestimmen. Die Ergebnisse der Experimente werden nun im Folgenden erläutert:

Die Standardexperimentenreihe weist, in Relation zu den anderen beiden Experimentenreihen, über den höchsten Output auf. Im Vergleich zu Experimentenreihe 2 ist die Taktzeit der Maschinen geringer, sodass eine höhere Rate an JPH erreicht werden kann. Außerdem ist die Betriebsnutzungszeit zur Produktion der Triebköpfe in Standardexperimentenreihe höher als in der Experimentenreihe 3. Durch das Verwenden von Rufgrenzen bei Unterschreiten des Mindestbestands in den jeweiligen Blocklagern kommt es zu keinem Zeitpunkt in der Simulation zu einem Überbestand. Eine weitere Auffälligkeit ist die Auslastung der Außenstapler. Diese sind in Summe über den Simulationsverlauf zwar nur zu 58% ausgelastet (siehe Abbildung 5-7), jedoch sind diese zu einigen Zeitpunkten zu 100% ausgelastet (siehe Abbildung 5-8), sodass es zu Wartezeiten kommt. Diese haben jedoch keinen Effekt auf die Ausbringungsmenge des Systems, da die LKW lange genug am Warenausgang auf die fertig beladenen VLT warten und die Ankunftsintervalle ausreichend gestaltet sind, um Störungen und Wartezeiten aufzufangen.

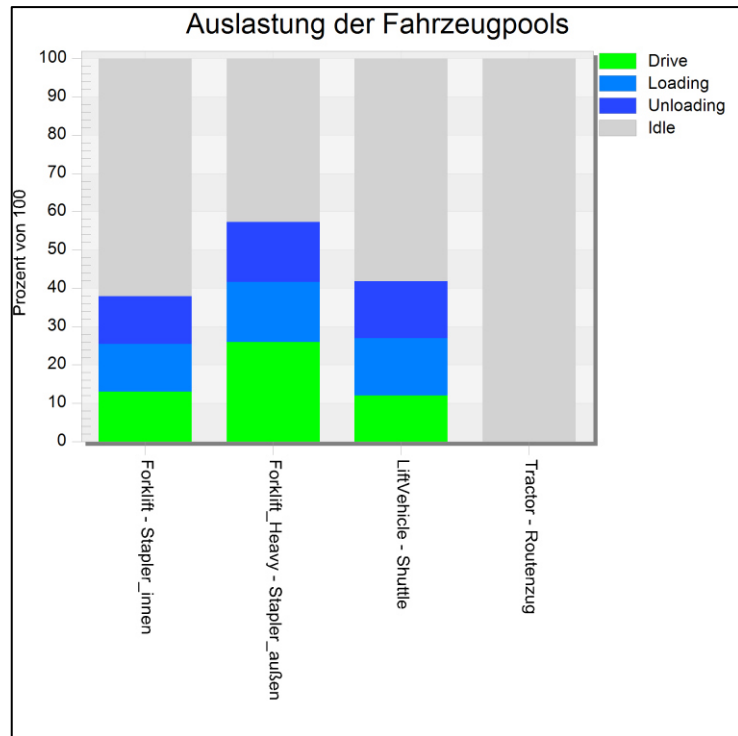


Abbildung 5-7 Prozentuale Auslastung des Fahrzeugpools

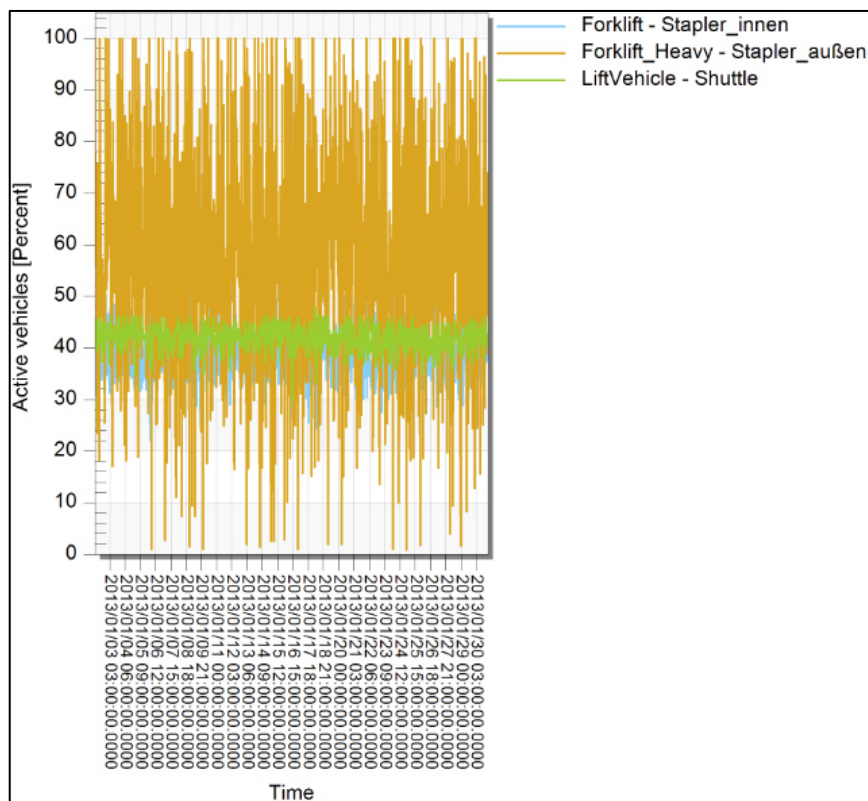


Abbildung 5-8 Prozentuale Auslastungen des Fahrzeugpools im Zeitverlauf

Die Wartezeiten der Stapler haben jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf das Gesamtsystem und den Zielparametern. Dies wird belegt durch die geringe Abweichung der Ergebnisparameter der Experimentenreihen mit den theoretisch berechneten Ergebnissen, die in Tabelle 5-13 zu sehen sind.

Die Auslastung in den Blocklagern und im Supermarkt weisen über einen zickzackförmigen Verlauf auf. Dieser beispielhafte Verlauf ist in Abbildung 5-9 zu beobachten, bei dem es sich um ein Auslastungsdiagramm eines Bauteils handelt.

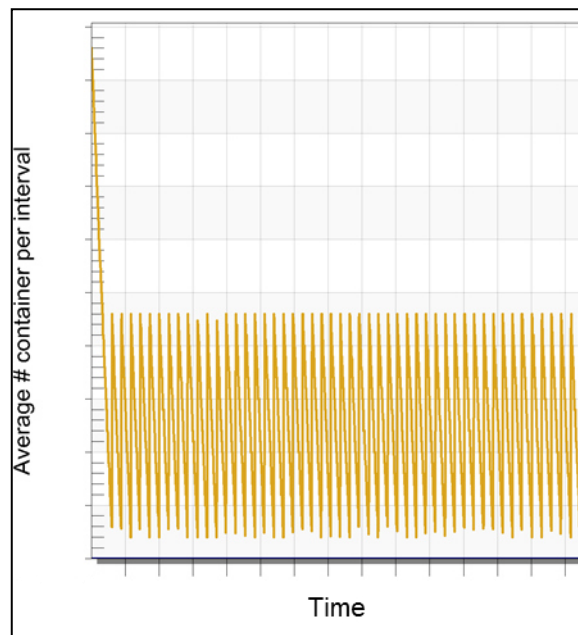


Abbildung 5-9 Durchschnittliche Anzahl von LE im Blocklager

Die durchschnittliche Anzahl von LE im Blocklager beginnt beim Initialzustand und nimmt im Zeitverlauf einen zickzackförmigen Verlauf an. Bei Unterschreitung der Rufgrenze wird neues Material angefordert und anschließend, sobald dies im Wareneingang vorliegt, eingelagert. Dies führt zu dem steilen Anstieg der Kurve, bis dann Material vollständig eingelagert ist. Das Material wird dann im Zeitverlauf aus dem Lager entnommen und zur Setkom befördert, welches durch das Fallen der Kurve dargestellt wird. Es wird zu keinem Zeitpunkt ein Über- oder Fehlbestand verzeichnet, sodass das Lager zu jedem Zeitpunkt das System mit Bauteilen versorgen kann. Durch die Analyse der Auslastungsdiagramme kann auf Basis der Planungsprämissen die notwendige Anzahl von Lagerplätzen zur Dimensionierung der Lager bestimmt werden. In diesem Fall ist zu sehen, dass für dieses Bauteil die Anzahl von Stellplätzen im Lager, die notwendig ist, um das System zu versorgen, bei ca. 23 liegt. Die Rufgrenze sollte in diesem Fall nicht weiter herabgesetzt werden, da sonst das Risiko von

Fehlbeständen im Lager zu hoch wäre (die minimale Anzahl von LE liegt in diesem Fall bei zwei). Alle Lagerbausteine weisen über denselben charakteristischen Verlauf auf und unterscheiden sich lediglich nur in der Rufgrenze, sodass die jeweiligen Zickzack-Kurven lediglich im Ordinatenabschnitt variieren. Daher werden diese nun nicht weiter erläutert.

Wie ebenfalls in Abbildung 5-7 zu sehen, ist die Routenzugauslastung sehr. Um geeignete Abstellmaßnahmen treffen zu können, wird ein weiteres Diagramm erstellt (siehe Abbildung 5-10), in der die minimalen, maximalen und durchschnittliche Anzahl von KLT pro Routenzugtour dargestellt wird. Das Auslastungsdiagramm der drei Routenzüge mit den konkreten Werten ist im Anhang unter Abbildung B-13 zu sehen.

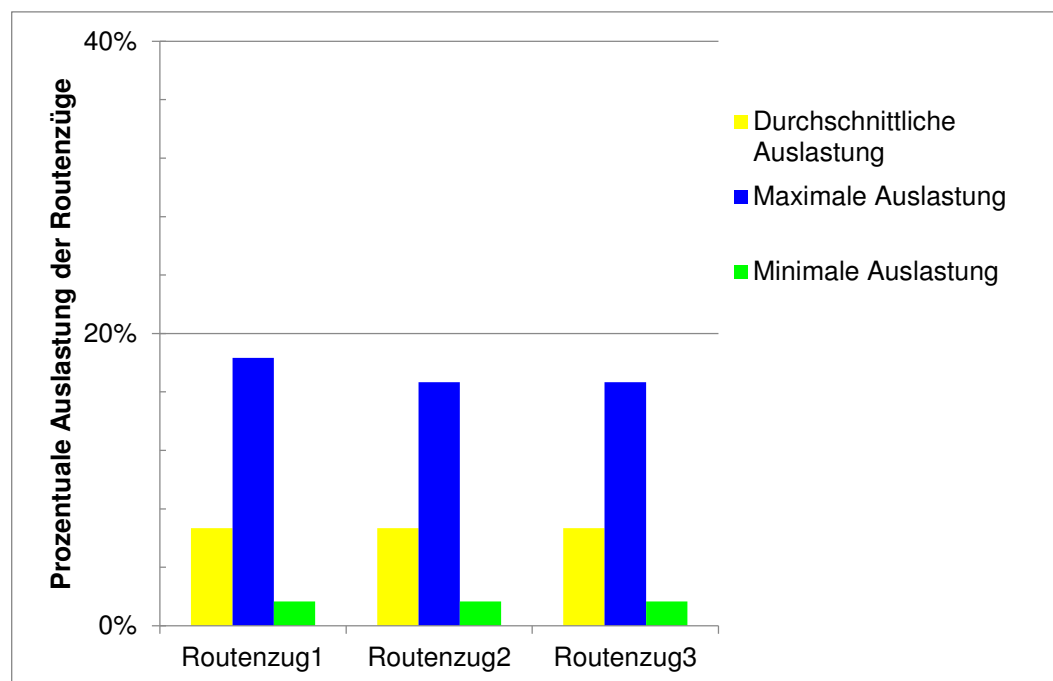


Abbildung 5-10 Auslastung der Routenzüge

Im Durchschnitt werden ca. ist ein Routenzug zu ca. 1,67% ausgelastet. Die maximale Auslastung beträgt ca. 16,67% je Routenzug. Die Gesamtkapazität eines Routenzuges wird nicht ausgenutzt.

Das Auslastungsdiagramm für die Setkom, der Montagelinien sowie der Versandstationen in Abbildung 5-11 zeigt, dass die Setkom mit einem Blockadeanteil als Engpass des System gilt, da es alle drei Montagelinien mit Warenkörben versorgt und die geringste Taktzeit aller Bearbeitungsstationen hat. Der geplante Durchsatz wird trotz des Blockadeanteils erreicht, sodass Maßnahmen wie bspw. die Reduzierung der Taktzeit nicht notwendig sind.

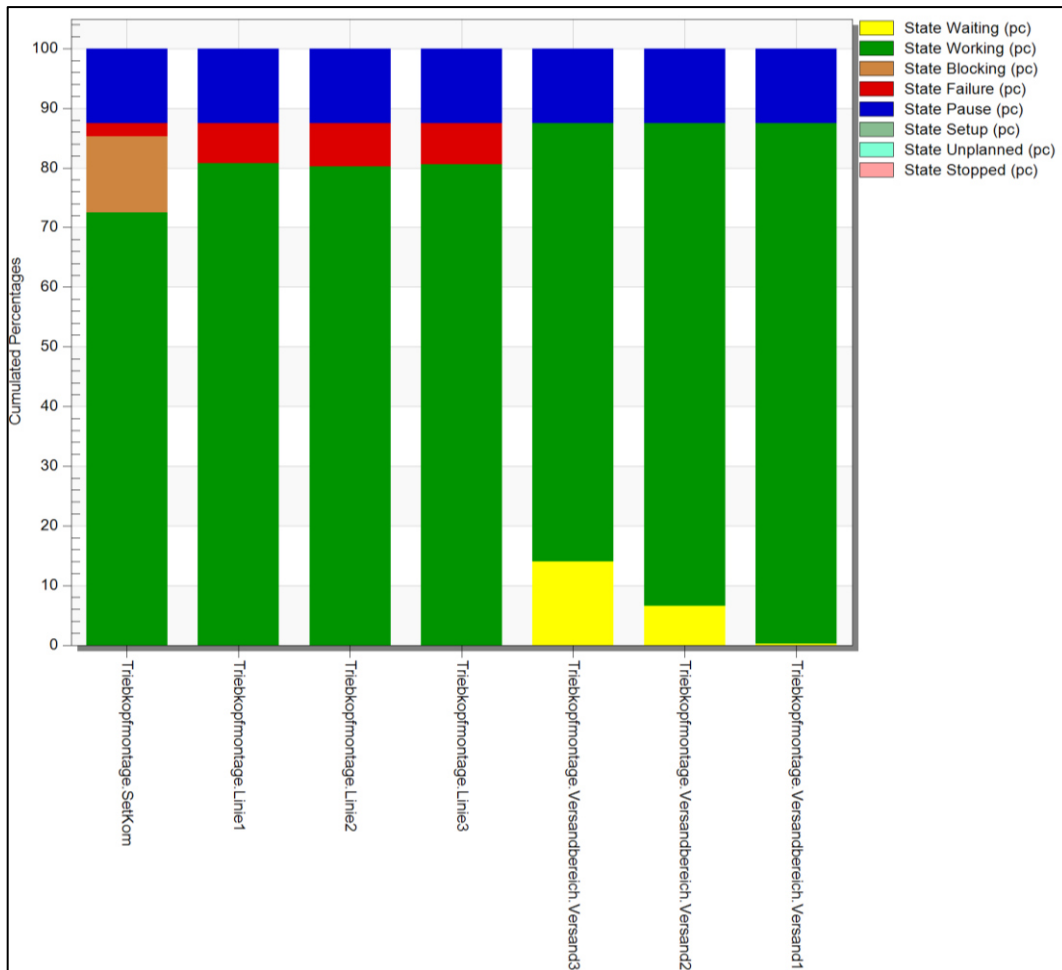


Abbildung 5-11 Auslastungen der Bearbeitungsstationen bei der Experimentenreihe 1

Die Experimentenreihe 2 mit der Erhöhung der Taktzeit und der Verfügbarkeit bringt ebenfalls, im Vergleich zu den theoretisch berechneten Werten, die jeweilige gewünschte Ausbringungsmenge. Außerdem weist diese Experimentenreihe über die höchste AE Zahl auf, der GAE Wert ist ebenfalls höher als bei der Standardexperimentenreihe. Die Erhöhung beider Kennzahlen ist begründet durch die höhere Zykluszeit und die höhere Verfügbarkeit der Montagelinien. Des Weiteren zeigt Abbildung 5-12, dass aufgrund der höheren Verfügbarkeit der Blockade- und Ausfallanteil der Montagelinien verringert wurde.

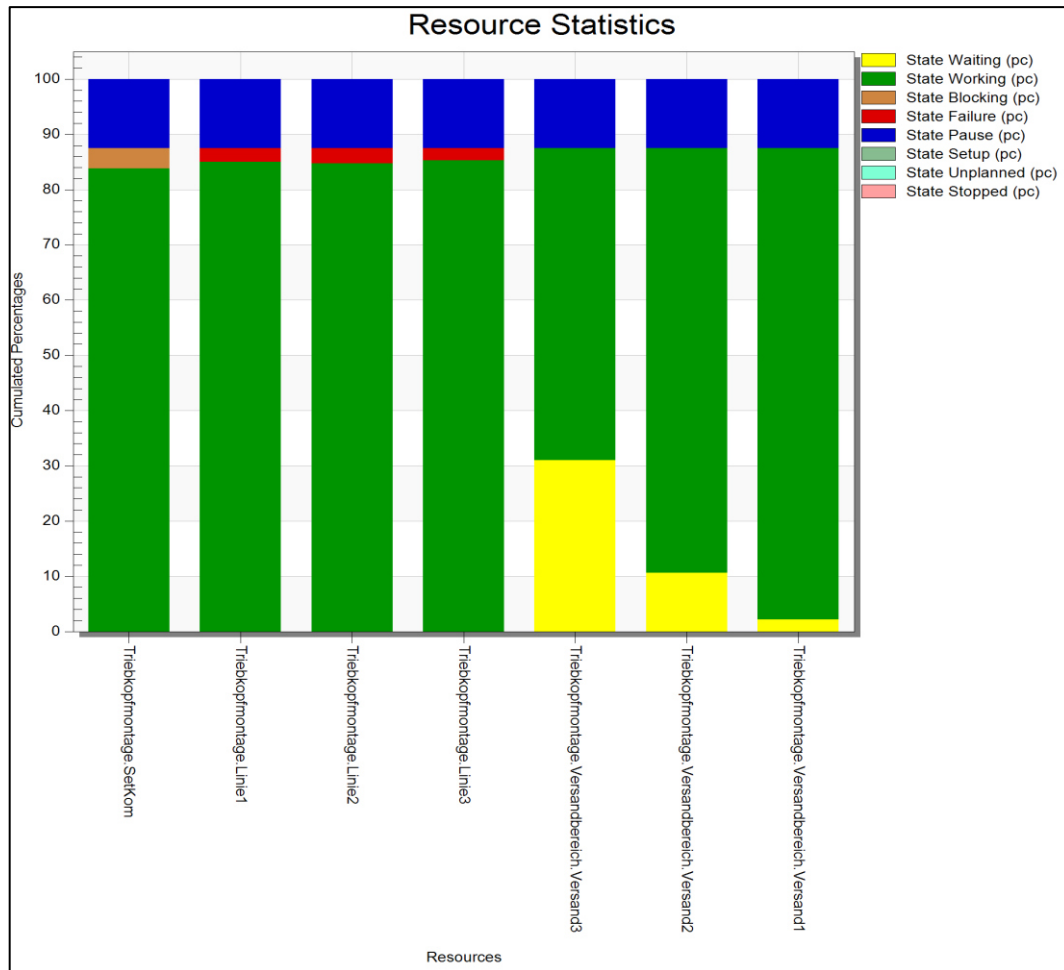


Abbildung 5-12 Auslastungen der Bearbeitungsstationen bei der Experimentenreihe 2

Die Auslastung der Fahrzeuge sowie die Lagerkennlinien sind analog zum Standardexperimentenreihe und bedürfen keiner weiteren Erklärung.

Die Experimentenreihe mit dem 2-Schichtmodell weist über den geringsten täglichen Output auf. Ursache hierfür ist die reduzierte Betriebsnutzungszeit, die aufgrund des veränderten Schichtsystems zur Verfügung steht. Diese Reduzierung der Betriebsnutzungszeit ist jedoch gleichzeitig der Grund für die Erhöhung der der GAE und AE, welche beide nah den Werten der zweiten Experimentenreihe liegen. Auch hier verhalten sich die Fahrzeugauslastungen sowie Lagerkennlinien analog zu den beiden anderen Experimentenreihen.

Um ein höheres Systemverständnis über einen längeren Zeitraum zu erhalten, wird außerdem auf Basis des täglichen Outputs die Outputentwicklung über eine Arbeitswoche betrachtet. Diese wird in Abbildung 5-13 graphisch dargestellt.

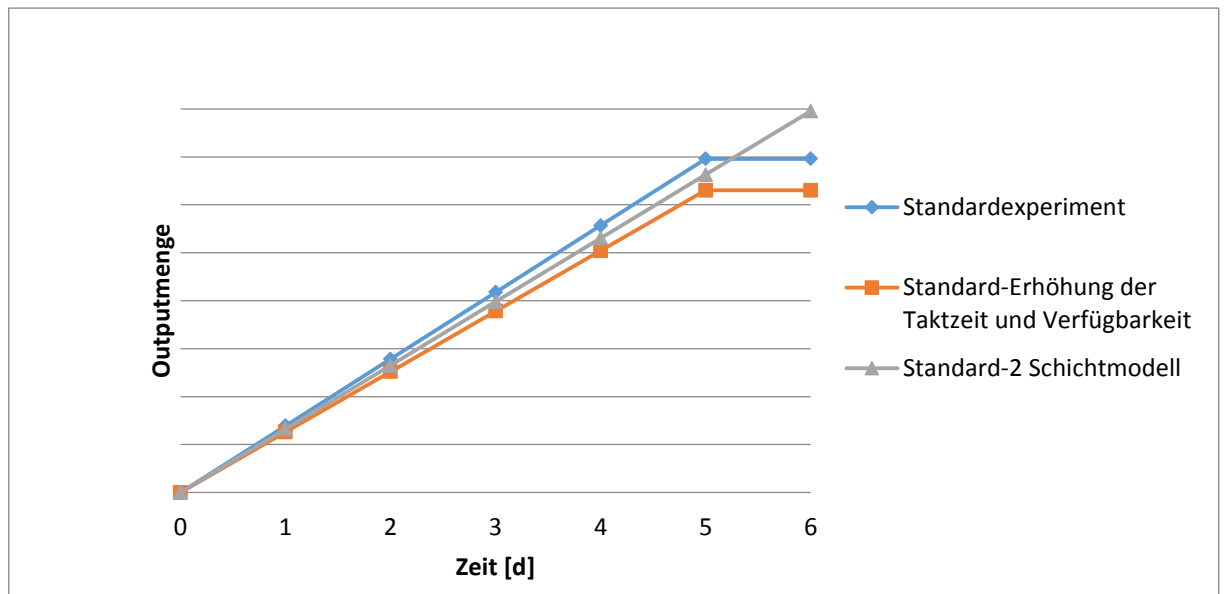


Abbildung 5-13 Entwicklung des wöchentlichen Outputs

5.10.2 Bewertung der Ergebnisse

Alle drei Experimentenreihen sind hinsichtlich ihrer Zielparameter plausibel, da sie gegenüber den berechneten Werten nur im geringen Maße abweichen. Tabelle 5-13 zeigt die prozentuale Abweichung der Simulationsergebnisse mit den berechneten Werten (Tabelle mit den konkreten Werten ist im Anhang in Tabelle B-1 dargestellt).

Tabelle 5-13 Abweichung der Simulationsergebnisse mit den berechneten Werten

Experimentenreihe	Eingangsparameter			Abweichungen Berechnung Simulation		
	Schichtmodell	Taktzeit	Verfügbarkeit	Output	GAE	AE
Experimentenreihe 1	3-Schicht Modell	standard	standard	0.03	0.03	0.02
Experimentenreihe 2	3-Schicht Modell	+ 16,67 %	+ 5,4 %	0.61	0.61	0.61
Experimentenreihe 3	2-Schicht Modell	standard	standard	0.06	0.12	0.07

Hinsichtlich der Zielparameter ist keiner der durchgeführten Experimentenreihen den anderen Experimentenreihen gegenüber dominierend. Da die Diagramme zur Fahrzeugauslastung und Lagerkennlinien ebenfalls beinahe identische Verläufe annehmen, können auch die nicht zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Daher wird zur Beurteilung der Experimentenreihen, basierend auf dem täglichen Output, der wöchentliche Output ermittelt und dieser als zusätzlicher Zielparameter herangezogen. Tabelle 5-14 zeigt die qualitative Bewertung der drei Experimentenreihen anhand der Eingabe-

und Zielparameter. Die Bewertung der Experimentenreihen mit den konkreten Werten ist befindet sich im Anhang unter Tabelle B-2.

Tabelle 5-14 Bewertung der Experimentenreihen

Experimentenreihe	Eingangsparameter				Ergebnisparameter			
	Schichtmodell	GAB [h/Schicht]	Taktzeit	Verfügbarkeit	Output / Tag	Output / Woche	GAE	AE
Experimentenreihe 1	3-Schicht Modell	0,25	Standard	Standard	+	○	-	-
Experimentenreihe 2	3-Schicht Modell	0,25	+16,67 %	+ 5,4 %	-	-	○	+
Experimentenreihe 3	2-Schicht Modell	0	Standard	Standard	○	+	+	○

Die Differenz der Outputmengen der Experimentenreihen steigt mit zunehmender Zeit, sodass für eine lange Projektdauer mit hohen Stückzahlen auf das Produktions- und Materialflusskonzept nach dem 2-Schichtmodell zurückgegriffen werden sollte, um den maximalen Output zu generieren. Da sich die AE Werte von „Experimentenreihe 2“ und „Experimentenreihe 3“ nur um 1,81% unterscheiden, ist diese Differenz hinnehmbar, da mit „Experimentenreihe 3“ pro Woche ca. 26% mehr Triebköpfe produziert werden können als mit „Experimentenreihe 2“.

Durch den zusätzlichen Arbeitstag bei „Experimentenreihe 3“ kann am sechsten Arbeitstag das tägliche Defizit beim Output egalisiert und sogar überschritten werden. Für Langzeitprojekte wie bei der Automobilindustrie, in der Komponenten über mehrere Jahre hinweg in verschiedenen Baureihen eingesetzt werden, ist es sinnvoll, Produktions- und Materialflusskonzepte einzusetzen, die auch über einen langen Zeitraum hinweg eine gewünschte Stückzahl gewährleisten. Unter diesen Prämissen ist unter den drei konzipierten Materialflusskonzepten „Experimentenreihe 3“ das empfehlende Konzept zur Produktion der Triebköpfe.

Im folgenden Abschnitt wird die Optimierung des Routenzuges durchgeführt, da diese, wie in den Abbildung 5-7 und Abbildung 5-10 aufgezeigt, nur im geringen Maße ausgelastet sind. Außerdem wird die Dimensionierung der Lagerstellplätze in den Blocklagern auf Basis der Simulationsergebnisse durchgeführt.

5.10.3 Anpassung des Routenzuges und der Blocklager

Um eine höhere Auslastung des Routenzuges zu erzielen, werden folgende Anpassungen durchgeführt:

- Statt drei Routenzüge, die jeweils eine Linie umfahren und diese mit KLT versorgen, wird nun ein Routenzugfahrzeug verwendet, welches gemäß dem Fahrzeittakt alle drei Linien nacheinander umfahren wird
- Der Fahrzeittakt wird, auf Basis der ursprünglichen Taktzeit, verdoppelt
- Die Anzahl der Routenzuganhänger wird von drei auf zwei reduziert.

Diese Daten werden in die Eingangsdatendatei eingepflegt. Ein weiterer Simulationslauf mit den neuen Daten zeigt die neuen Auslastungen des Routenzuges, die in Abbildung 5-14 zu sehen sind (das Auslastungsdiagramm mit den konkreten Werten befindet sich im Anhang in Abbildung B-14).

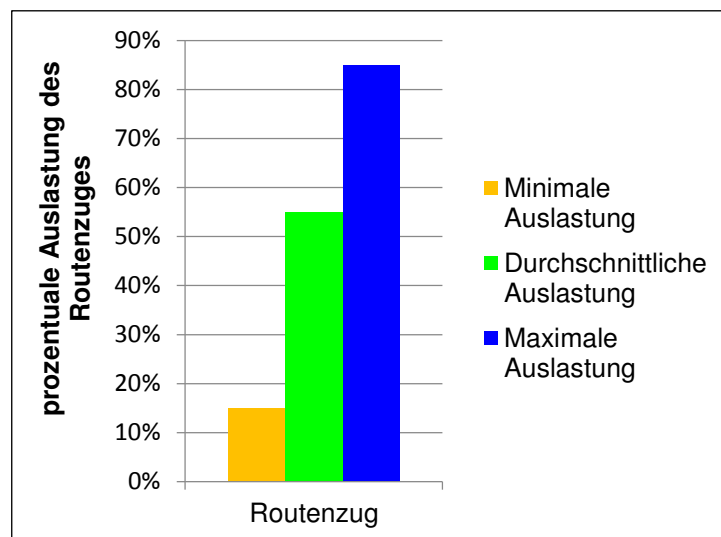


Abbildung 5-14 Auslastung der Routenzüge nach Anpassungsmaßnahmen

Es werden nach Durchführung der Optimierungsmaßnahmen ca. 34 KLT pro Routenzugfahrt transportiert. Dies entspricht einer Auslastung von ca. 85%. Eine weitere Erhöhung der Taktzeit und die Reduzierung um einen weiteren Anhänger würden dazu führen, dass die Kapazität des Routenzuges zur Versorgung der Linien nicht ausreichen würde. Demnach ist das Routenzugprogramm unter Berücksichtigung der Planungsprämissen und der oben beschriebenen Anpassungsmaßnahmen hinreichend gut ausgelastet und entspricht einem zufriedenstellenden Soll-Zustand, der für die Planung der Realprozesse angestrebt werden sollte.

Zur Dimensionierung der Blocklager wird folgendes Verfahren angewendet: da die Kennlinien der Auslastungsdiagramme der Blocklager zickzackförmig verlaufen, wird als maximale Anzahl an Stellplätzen die Spitze der Kennlinie verwendet und mit einem Sicherheitszuschlag von 20% versehen. Diese werden mit der Anzahl der Stellplätze aus der Realprozessplanung verglichen. Die ermittelten Abweichungen werden dann summiert, sodass festgestellt werden kann, ob die Anpassungen der Stellplatzanzahl der jeweiligen Blocklager zu einer Reduktion der Gesamtstellplätze und damit zur Flächeneinsparungen führt. Tabelle 5-15 zeigt dieses Vorgehen. Die Tabelle mit den konkreten Werten ist im Anhang in Tabelle B-3 zu finden.

Tabelle 5-15 Vorgehen zur Lagerdimensionierung

Bauteilbezeichnung	Anzahl Stellplätze Planung	Peak gemäß Simulation	Anzahl Stellplätze mit Sicherheitszuschlag	Flächeneinsparpotenzial
Bauteil 1				
Bauteil 2				
...				
Bauteil n				

**Flächeneinsparung
im Lagerbereich in %**

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus der Simulation ist es möglich, durch eine Anpassung der Stellplätze in den Blocklagern und unter Berücksichtigung eines Sicherheitszuschlages eine Flächenreduktion um 25% zu erzielen. Dies kommt der in Abschnitt 4.1 erwähnten Problematik der begrenzten Hallenfläche entgegen und bietet für diesen Zweck ein Verbesserungspotenzial.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass mit Hilfe der DES Materialflussuntersuchungen durchgeführt werden können, um Planungsprämissen abzusichern oder Schwachstellen der laufenden Planung zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden zunächst die theoretischen Grundlagen der Materialflusstechnik und der DES eingeführt, um das generelle Verständnis der vorliegenden Arbeit zu gewährleisten. Zur Produktion und Lagerung von elektromechanischen Antriebskomponenten wurden anhand der Beispielsproduktion und unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 erläuterten Herausforderungen des Produktionssystems drei verschiedene Konzepte eingeführt, die in Rahmen der Simulationsstudie untersucht wurden. Bei der Durchführung der Experimente wurden diese drei Konzepte jeweils als Experimentenreihen verwendet. Das erstellte Simulationsmodell beinhaltet sämtliche Produktions- und Logistikprozesse in Rahmen der Black Box Modellierung. Die Parametrisierung der Prozesse und Systemkomponenten kann über die Eingangsdatendatei, in der sämtliche Informationen zentral abgelegt sind, durchgeführt werden. Ausgehend von einer Standardexperimentenreihe, welches den aktuellen Planungsstand darstellt, wurde in einer zweiten Experimentenreihe die Taktzeit und Verfügbarkeit der Montagelinien erhöht. Die dritte Experimentenreihe beinhaltet auf Basis der Standardexperimentenreihe die Variation des Schichtmodells, indem das 3-Schichtmodell mit einer Arbeitszeit von acht Stunden pro Schicht durch ein 2-Schichtmodell mit 10,45 Stunden pro Schicht und einem zusätzlichen Arbeitstag ersetzt wurde. Die Bewertung der Materialflusskonzepte erfolgte anhand der Zielparameter Output, GAE und AE. In diesem Kontext hat sich, speziell für die langfristige Ausrichtung der Produktion und der Aussicht auf wachsende Stückzahlen im Bereich der Elektromobilität, das dritte Konzept mit den zwei Schichten pro Arbeitstag mit jeweils 10,45 Stunden pro Schicht als das praktikabelste Konzept erwiesen. Des Weiteren wurden Schwachstellen hinsichtlich der Auslastung des Routenzugprogramms und der Auslegung der Blocklager identifiziert. Die Auslastung des Routenzugprogramms konnte durch Anpassungen wie Erhöhung des Fahrtaktes und Reduzierung der Routenzüge und Anhänger erhöht werden. Durch die Neuauslegung der Lagerstellplätze in den Blocklagern auf Basis der Simulationsergebnisse wurde ein Flächeneinsparpotential von ca. 25% erzielt, was der Problematik der begrenzten Hallenfläche sehr entgegenkommt. Die Black Box Modell hat somit bei der Untersuchung von Materialflusskonzepten und Absicherung des Planungsstandes im Projekt seinen Zweck erfüllt. Das Modell kann nun fortan bei Veränderung der Prämissen und

Parameter im Unternehmen als Planungswerkzeug verwendet werden. Gerade bei kurzen Produktlebenszyklen, die für die Automobilindustrie charakteristisch sind, und der stetig sich ändernden Unternehmenslandschaft im Bereich der Elektromobilität kann das Black Box Modell sinnvoll eingesetzt werden, ohne später in die realen Prozesse eingreifen zu müssen. Außerdem kann das Modell für die strategische Planung verwendet, um beispielsweise aufzuzeigen, ob die Kapazitäten der Montagelinien und die Anzahl der Fahrzeuge bei weiteren Produktvarianten und höheren Stückzahlen ausreichen. Die hier aufgezeigten Engpässe können dann den Planern gemeldet werden, damit diese neue Betriebsmittel beschaffen.

Durch den modularen Aufbau und der zentralen Datenhaltung und -bereitstellung durch die Eingangsdatendatei kann das Simulationsmodell außerdem als Grundlage verwendet werden, um mit geringem Aufwand die Produktions- und Logistikprozesse der elektromechanischen Antriebskomponenten der darauffolgenden Baureihen zu modellieren. Speziell hinsichtlich der steigenden Bedeutung der Elektromobilität und der Diesellaffäre (siehe <https://www.morgenpost.de/wirtschaft/article211445277/Die-Chronologie-der-Diesel-Affaere-bei-VW-Audi-und-Co.html>) und dem damit sinkendem Vertrauen gegenüber den Dieselmotoren eine Entwicklung hin zu höheren Stückzahlen und Entwicklung neuer Triebkopfgenerationen denkbar. Somit erfüllt das Simulationsmodell nicht nur einen operativen Zweck, sondern dient auch zur Planung und Durchführung strategischer Prozesse. Zukünftige Herausforderungen stellen dabei hinsichtlich der Simulation die Aktualität und Qualität der Daten da, die stets über den gesamten Modelllebenszyklus gewährleistet werden muss.

Da es sich um ein Black Box Modell handelt und somit die Prozesse innerhalb der Bausteine nicht dargestellt sind, können beispielsweise lokale Engpässe an den Stationen der Montagelinien und der Setkom nicht identifiziert werden. Hierfür sind in Rahmen einer möglichen Detailmodellierung konkrete Layouts der Montagelinien und der Setkom mit den jeweiligen Bearbeitungszeiten pro Stationen notwendig, die entweder auf Annahmen basieren oder durch Zeiterfassungstechniken ermittelt werden können. Diese können im weiteren Verlauf des Projektes beschafft werden, sodass die Black Box Elemente durch Detailmodelle ersetzt werden können. Durch den modularen Aufbau des Modells können diese Änderungen mit geringem Aufwand durchgeführt werden, jedoch sind die Schnittstellen zu anderen Bausteinen wie z.B. die Materialanstellung, die im Black Box Modell jeweils über einen zentralen Baustein LineFeed gewährleistet wird, anzupassen. Statt einem zentralen Baustein wären bei einer

möglichen Detailmodellierung mehrere LineFeed Bausteine notwendig, die jeweils die Materialanstellung pro Bauteil an einer Station darstellen.

7 Literaturverzeichnis

Allgayer, F. (1999): Computergestützte Planung von Materialflußsystemen auf Basis statischer Materialflüsse. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik.

Arnold, D. (1998): Materialflußlehre. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Studium Technik).

Arnold, D.; Furmans, K. (2009): Materialfluss in Logistiksystemen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

Balci, O. (1989): How to assess the acceptability and credibility of simulation results. In: Edward A. MacNair, Kenneth J. Musselman und Philip Heidelberger (Hg.): Proceedings of the 1989 Winter Simulation Conference. Washington. Piscataway: IEEE, S. 62–71.

Bangsow, S. (2008): Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. München: Hanser Verlag (Edition CAD.de).

Bangsow, S. (2011): Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

Banks, J.; Carson, J. S.; Nelson, B. L.; Nicol, D. M. (2005): Discrete-event system simulation. 4. Aufl. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.

Baron, C. P.; Dietel, U.; Kreppenhofer, D.; Rabe, M. (2001): Handlungsanleitung Simulation. In: Markus Rabe und Bernd Hellgrath (Hg.): Handlungsanleitung Simulation in Produktion und Logistik. Ein Leitfaden mit Beispielen für kleinere und mittlere Unternehmen. Erlangen, San Diego: SCS European Publ. House; SCS International, S. 117–190.

Baumeister, K. (2013): Kommissioniersystem mit Roboter und Mehrstückgreifer. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (IPA-IAO Forschung und Praxis, 126).

Baydar, E. (2016): Data Farming Konzept in Tecnomatix Plant Simulation. Bachelorarbeit. Technische Universität Dortmund. Fachgebiet für IT in Produktion und Logistik.

Berliner Morgenpost (2017): Abgaswerte. Die Chronologie der Diesel-Affäre bei VW, Audi und Co. Online verfügbar unter <https://www.morgenpost.de/wirtschaft/article211445277/Die-Chronologie-der-Diesel-Affaere-bei-VW-Audi-und-Co.html>, zuletzt geprüft am 10.08.2017.

Bichler, K.; Riedel, G.; Schöppach, F. (2013): Kompakt Edition: Lagerwirtschaft. Grundlagen, Technologien und Verfahren. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Blessing, S. (1999): Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen. München: Herbert Utz Verlag (IWB Forschungsberichte, 134).

BMUB: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2014): Die EU-Verordnung zur Verminderung der CO₂ - Emissionen von Personenkraftwagen. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eu_verordnung_co2_emissionen_pkw.pdf, zuletzt geprüft am 31.07.2017.

Bock, F.; Reineke, R.-D. (2007): GABLER LEXIKON UNTERNEHMENSBERATUNG. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien.

Bossel, H. (1992): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (2011): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

Brumme, H.; Schröter, N.; Schröter, I. (2010): Supply Chain Management und Logistik. Stuttgart: Kohlhammer Verlag.

Bullinger, H.-J.; Lung, M. M. (1994): Planung der Materialbereitstellung in der Montage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.

DIN Norm 20629-2 (.2015): Einschienenhängebahnen für den Bergbau - Aufhängen von Schienen - Teil 2: Für eigenangetriebene Einschienenhängebahnen (EHB).

DIN Norm IEC 60050-351 (2014): Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik.

EDAG Production Solutions GmbH & Co. KG: Plant Simulation - Materialflusssimulation von Produktions- und Logistiksystemen. Online verfügbar unter <http://www.isilog.de/de/produkte/produkte/plant-simulation.html>, zuletzt geprüft am 25.07.2017.

Eley, M. (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

Fischer, C. (2014): Planung und Steuerung von Montageanlagen. Grundlagen für die Optimierung in der Montage. In: Klaus Feldmann, Volker Schöppner und Günter Spur (Hg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. 2. Aufl. München: Carl Hanser Fach-Buchverlag (Edition Handbuch der Fertigungstechnik, / hrsg. von Günter Spur ; 5), S. 602–603.

FML: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (FML) an der Technischen Universität München: Materialflussplanung. Online verfügbar unter http://www.fml.mw.tum.de/fml/index.php?Set_ID=945&letter=M&title=Materialflussplanung, zuletzt geprüft am 25.07.2017.

Gadatsch, A. (2013): Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. 7. Aufl. Wiesbaden: Imprint Vieweg+Teubner Verlag.

Gordon, G. (1978): System simulation. 2. Aufl. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Gottschalk, D. (2016): Umsetzungskonzept Refab – Information.Hamburg.

Gröbner, M. (2015): Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Just-in-time-, Just-in-sequence und One-piece-flow-Fertigungskonzepten. In: Phillip Dickmann (Hg.): Schlanker Materialfluss. mit Lean Production, Kanban und Innovationen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 16–19.

Günthner, W. A.; Kumpf, A.; Haller, M. (1997): Auswahl von Simulations-Software: Auf den Verwendungszweck kommt es an. In: fördern und heben: f+h 47 (3), S. 130–132.

Haasis, H.-D. (2008): Produktions- und Logistikmanagement. Planung und Gestaltung von Wertschöpfungsprozessen. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Hagenlocher, S.; Wilting, F.; Paul, W. (2013): „Schnittstelle Rampe – Lösungen zur Vermeidung von Wartezeiten“. für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Online verfügbar unter <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/laderampe-schlussbericht-schnittstelle-rampe.pdf?blob=publicationFile>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.

Hedtstück, U. (2013): Simulation diskreter Prozesse. Methoden und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (eXamen.press).

Holtewert, P.; Oesterle, J.; Bruns, A.; Wirtz, H. (2014): Detaillierungsgrad von Simulationsmodellen. In: PRODUCTIVITY Management 19 (5), S. 31–34.

Hompel, M. ten; Heidenblut, V. (2011): Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).

Hompel, M. ten; Sadowsky, V.; Beck, M. (2011): Kommissionierung. Materialflusssysteme 2 - Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-/Buch]).

- Hrdliczka, V.; Jakobi, H. A.; Schuhmacher, R.; Wenzel, S. (1997): Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. Überarbeitung der ASIM-Mitteilungen Heft Nr. 7a im Auftrag der ASIM-Fachgruppe 4.5.6. (Simulation in Produktion und Logistik). Online verfügbar unter <http://www.uwe-pret.de/fabrikplanung/doku/asim-leitfaden.pdf>, zuletzt geprüft am 30.07.2017.
- Jetzke, S. (2007): Grundlagen der modernen Logistik. Methoden und Lösungen. München: Hanser Verlag.
- Jünemann, R. (1989): Materialfluß und Logistik. Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Jung, S. (2014): Elektromobilität – Technologie mit Zukunft? Diplomarbeit. Hochschule Mittweida, Mittweida.
- Kahlert, J. (2004): Simulation technischer Systeme. Eine beispielorientierte Einführung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Vieweg Praxiswissen).
- Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R. (1984): Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Hanser Verlag.
- Klenk, E. (2013): Vom Soll-Wertstrom zur Umsetzung. Auslegungsverfahren zur Ausgestaltung und Dimensionierung logistischer Prozessbausteine am Beispiel Produktionssupermarkt. In: Willibald A. Günthner und Julia Boppert (Hg.): Lean Logistics. Methodisches Vorgehen und praktische Anwendung in der Automobilindustrie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, S. 163–175.
- Klug, F. (2010): Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).
- Klug, F. (2017): Das Perlenkettenprinzip der stabilen Auftragsfolge in der Automobillogistik. In: Ingrid Göpfert, David Braun und Matthias Schulz (Hg.): Automobillogistik. Stand und Zukunftstrends. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 137–160.
- Kuhn, A.; Wenzel, S. (2008): Simulation logistischer Systeme. In: Dieter Arnold, Kai Furmans, Heinz Isermann, Axel Kuhn und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Dordrecht: Springer Verlag (VDI-Buch), S. 73–94.
- Kühn, W. (2006): Digitale Fabrik. Fabriksimulation für Produktionsplaner. 1. Aufl. München: Carl Hanser Fachbuchverlag.
- Law, A. M.; Kelton, D. W. (2000): Simulation modeling and analysis. 3. Aufl. Boston: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in industrial engineering and management science).
- Law, A. M.; McComas, M. G. (1991): Secrets of successful simulation studies. In: WCS Winter Simulation Conference Proceedings, 1991. Piscataway: IEEE, S. 21–27.

Martin, H. (2014): Transport- und Lagerlogistik. Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik. 9. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.

März, L.; Weigert, G. (2011): Simulationsgestützte Optimierung. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch, 130), S. 3–12.

Ortmann, D. (2015): Konzeptentwicklung für agentenbasierte Produktionsplanung mittels ereignisdiskreter Simulationssoftware. Masterarbeit. Technische Universität Dortmund. Fachgebiet IT in Produktion und Logistik.

Pawellek, G. (2008): Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).

Pohl, S.; Bel Haj, S. S.; Best, M.; Brade, D.; Hofmann, M.; Kiesling, T. et al. (2005): Verifizierung, Validierung und Akkreditierung von Modellen, Simulationen und Förderstationen. Abschlussbericht Studienkennziffer E/F11S/2A280/T5228. Neubiberg.

Rabe, M. (2003): Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S. (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).

Rose, O.; März, L. (2011): Simulation. In: Lothar März, Wilfried Krug, Oliver Rose und Gerald Weigert (Hg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch, 130), S. 13–19.

Sargent, R. G. (1982): Verification and validation of simulation models. In: François E. Cellier (Hg.): Progress in modelling and simulation. New York, London: Academic Press, S. 159–169.

Schneider, M. (2008): Logistikplanung in der Automobilindustrie. Konzeption eines Instruments zur Unterstützung der taktischen Logistikplanung vor "Start-of-Production" im Rahmen der Digitalen Fabrik. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Siemens Industry Software GmbH (2017): Plant Simulation. Online verfügbar unter <http://www.plm.automation.siemens.com/de/products/tecnomatix/manufacturing-simulation/material-flow/plant-simulation.shtml>, zuletzt geprüft am 31.07.2017.

Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer Verlag.

- Statista: Das Statistik-Portal- Statistiken und Studien aus über 18000 Quellen (2017a): Anteil der Logistikkosten an den Gesamtkosten in Industrie und Handel von 1990 bis 2008. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/6346/umfrage/anteil-der-logistikkosten-an-den-gesamtkosten/>, zuletzt geprüft am 31.07.2017.
- Statista: Das Statistik-Portal- Statistiken und Studien aus über 18000 Quellen (2017b): Anzahl der Neuzulassungen von Hybridfahrzeugen in Deutschland von 2005 bis 2017. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200160/umfrage/neuzulassungen-von-hybridfahrzeugen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 31.07.2017.
- Stempfle, H. G. (2008): Systemtheorie im Brückenbau. Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Institut für Baustatik und Konstruktion.
- Suhl, L.; Mellouli, T. (2013): Optimierungssysteme. Modelle, Verfahren, Software, Anwendungen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (Springer-Lehrbuch).
- Süßmann, A.; Förg, A.; Wenzelis, A. (2014): Lang - Lkw: Auswirkung auf Fahrzeugsicherheit und Umwelt. Abschlussbericht. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik. Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Suessmann2/publication/270879517_Lang-Lkw_Auswirkung_auf_Fahrzeugsicherheit_und_Umwelt/links/54b667c20cf2bd04be3208eb.fpdf, zuletzt geprüft am 31.07.2017.
- van Horn, R. L. (1971): Validation of simulation results. In: Management Science 17 (5), S. 247–258.
- VDI Richtlinie 2689 (2010): Leitfaden für Materialflussuntersuchungen.
- VDI Richtlinie 3590-1 (1994): Kommissioniersysteme - Grundlagen.
- VDI Richtlinie 3629 (2005): Organisatorische Grundfunktionen im Lager.
- VDI Richtlinie 3633-1 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss - und Produktionssystemen - Grundlagen.
- VDI Richtlinie 3633-3 (2013): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Experimentplanung und -auswertung.
- Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M. (2008): Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (VDI-Buch).
- Werners, B. (2013): Grundlagen des Operations Research. Mit Aufgaben und Lösungen. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag (Springer-Lehrbuch).

Wiendahl, H.-P. (1997): Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. München, Wien: Hanser Verlag.

Eidesstattliche Versicherung

Name, Vorname

Matr.-Nr.

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem Titel

selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Ort, Datum

Unterschrift

*Nichtzutreffendes bitte streichen

Belehrung:

Wer vorsätzlich gegen eine die Täuschung über Prüfungsleistungen betreffende Regelung einer Hochschulprüfungsordnung verstößt, handelt ordnungswidrig. Die Ordnungswidrigkeit kann mit einer Geldbuße von bis zu 50.000,00 € geahndet werden. Zuständige Verwaltungsbehörde für die Verfolgung und Ahndung von Ordnungswidrigkeiten ist der Kanzler/die Kanzlerin der Technischen Universität Dortmund. Im Falle eines mehrfachen oder sonstigen schwerwiegenden Täuschungsversuches kann der Prüfling zudem exmatrikuliert werden. (§ 63 Abs. 5 Hochschulgesetz - HG -)

Die Abgabe einer falschen Versicherung an Eides statt wird mit Freiheitsstrafe bis zu 3 Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

Die Technische Universität Dortmund wird gfls. elektronische Vergleichswerkzeuge (wie z.B. die Software „turnitin“) zur Überprüfung von Ordnungswidrigkeiten in Prüfungsverfahren nutzen.

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Ort, Datum

Unterschrift