

## **Fachwissenschaftliche Projektarbeit**

Untersuchung von Einsatzmöglichkeiten und Eignung von Tecnomatix Plant  
Simulation zur Simulation von Supply Chains

Fabian Blasius  
Matrikelnummer: 197332  
Studiengang Logistik (M. Sc.)

ausgegeben am:  
16.11.2017

eingereicht am:  
15.05.2018

Betreuer:  
Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe  
Astrid Klüter, M.Sc.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen des Supply Chain Management .....</b>	<b>3</b>
2.1 Definition des Begriffs Supply Chain Management .....	3
2.2 Aufgaben und Ziele des Supply Chain Management.....	4
2.3 Problemfelder im Supply Chain Management .....	6
<b>3 Simulation im Supply Chain Management.....</b>	<b>8</b>
3.1 Grundlagen der Simulation .....	8
3.2 Nutzen der Simulation im Supply Chain Management.....	10
3.3 Anforderungen und Herausforderungen bei der Simulation von Supply Chains .....	11
3.4 Auswahl von Simulationswerkzeugen .....	13
<b>4 Bewertung von Tecnomatix Plant Simulation.....</b>	<b>17</b>
4.1 Entwicklung einer geeigneten Kriterienliste zur Bewertung von Simulationswerkzeugen hinsichtlich der Supply-Chain-Simulation.....	17
4.2 Anwendung der Kriterienliste auf Tecnomatix Plant Simulation .....	19
4.2.1 Systemumgebung .....	19
4.2.2 Softwareleistung.....	20
<b>5 Entwurf eines Supply-Chain-Simulationsmodells .....</b>	<b>29</b>
5.1 Zielbeschreibung und Aufgabendefinition.....	29
5.2 Systemanalyse.....	30
5.3 Modellformalisierung.....	32
5.4 Implementierung .....	34
5.5 Verifikation und Validierung .....	39
<b>6 Auswertung der Untersuchung.....</b>	<b>41</b>
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>42</b>
<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>43</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>47</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>47</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>48</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>49</b>

---

**Erklärung.....61**

# 1 Einleitung

Aufgrund von stetig wachsenden Markt- und Kundenanforderungen an Lieferbereitschaft und Individualität sowie einer zunehmenden Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte hat das Supply Chain Management (SCM) in den vergangenen Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen (Wellbrock 2015). Die Anzahl an Unternehmen, die durch eine verstärkte Zusammenarbeit und Vernetzung der internen und unternehmensübergreifenden Wertschöpfungsprozesse versuchen, Rationalisierungspotentiale auszuschöpfen, steigt dabei stetig (Schuh und Stich 2013). Folglich nimmt auch die Supply-Chain-Simulation, bei der die Lieferkette vom Lieferanten bis hin zum Kunden sowie zwischen einzelnen Werken eines Unternehmens abgebildet wird, einen immer wichtigeren Stellenwert ein. In Simulationsstudien können dabei typische Fragestellungen des SCM, beispielsweise bezüglich der Liefertreue, der Prozessoptimierung oder der wirtschaftlichen Standortwahl, untersucht werden, um Kosten bei einer gleichzeitigen Sicherstellung der Versorgung einzusparen (Müller-Sommer und Strassburger 2009). Bei der Durchführung einer Simulationsstudie ist die richtige Auswahl des Simulationswerkzeuges für die spätere Effizienz bei der Modellerstellung sowie für die Modellierungsmöglichkeiten der Problemstellungen entscheidend (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, das Simulationswerkzeug Tecnomatix Plant Simulation hinsichtlich dessen Einsatzmöglichkeiten und Eignung zur Simulation von Supply Chains zu untersuchen. Die Erfüllung dieses übergeordneten Ziels setzt dabei das Erreichen von Teilzielen voraus. Das erste Teilziel stellt die Entwicklung einer geeigneten Kriterienliste zur Bewertung von Simulationswerkzeugen für den genannten Anwendungsbereich dar. Durch die Anwendung dieser Kriterienliste auf Plant Simulation soll die Tauglichkeit des Werkzeugs in Bezug zur Supply-Chain-Simulation geprüft werden. Um die Bewertung anhand der Kriterienliste zu unterstützen, liegt ein weiteres Teilziel darin, ein Supply-Chain-Simulationsmodell zu entwerfen. Als Ergebnis dieser Projektarbeit soll letztlich eine Empfehlung über den Einsatz des Werkzeugs für die Simulation von Supply Chains gegeben werden.

Der Aufbau der Arbeit gliedert sich in mehrere Teile, beginnend mit einer Einführung in die Thematik des SCM, um ein Grundverständnis für die wichtigen Begriffe und Zusammenhänge zu schaffen und Gründe für den hohen Stellenwert des SCM aufzuzeigen. Im folgenden Teil wird die Notwendigkeit zur Untersuchung des Simulationswerkzeugs begründet. Hierzu werden zum einen die Vorteile der Simulation im SCM herausgearbeitet und zum anderen verdeutlicht, warum die Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeuges eine wichtige Rolle spielt. Durch die Herausarbeitung der Besonderheiten einer Supply-Chain-Simulation und der Darstellung des grundsätzlichen Vorgehens bei der Auswahl von Simulationswerkzeugen wird die Grundlage zur Entwicklung einer geeigneten Kriterienliste zur Bewertung von Simulationswerkzeugen bezüglich der Simulation von Supply Chains geschaffen. Die anschließende Anwendung der entwickelten Kriterienliste auf Plant Simulation dient einer ersten Bewertung der Tauglichkeit des Werkzeugs. In Kapitel 5 wird das entworfene Simulationsmodell vorgestellt, anhand derer Plant Simulation weiter hinsichtlich dessen Einsatzmöglichkeiten untersucht wird. Im Anschluss daran werden die

Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst und eine Aussage über die Eignung von Plant Simulation zur Supply-Chain-Simulation getroffen.

## 2 Grundlagen des Supply Chain Management

### 2.1 Definition des Begriffs Supply Chain Management

Der Begriff Supply Chain Management wurde erstmals Anfang der 80er Jahre in den USA von Unternehmensberatungen geprägt (Corsten und Gabriel 2004). Zu dieser Zeit wurde der Just in Time Ansatz, welcher dem SCM-Gedanken entspricht, entwickelt. Diesem praktischen Ansatz folgten ebenso in den USA erste theoretische Arbeiten Ende der 80er Jahre (Röderstein 2009). In Deutschland etablierte sich der Begriff daraufhin Mitte der 90er Jahre sowohl in Theorie als auch in Praxis (Werner 2013). Seither hat das SCM zunehmend an Bedeutung gewonnen. Wellbrock (2015) führt dies insbesondere auf den Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt, die damit verbundene steigende Produktindividualität und die wachsende Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte zurück. Eine Folge davon ist, dass Unternehmen immer häufiger Outsourcing betreiben und sich auf die eigenen Kernkompetenzen konzentrieren, wodurch wiederum das Interesse an unternehmensübergreifenden Kooperationen steigt (Wellbrock 2015). Der Begriff SCM wird dabei immer häufiger verwendet, obwohl bis dato keine einheitliche Definition bzw. Abgrenzung des Begriffs vorliegt (Klaus et al. 2007). In der Literatur finden sich hingegen zahlreiche Definitionen, die teilweise deutlich auseinander gehen. Im Rahmen dieser Arbeit soll von folgender Definition von Werner ausgegangen werden, da diese bewusst weit gefasst ist, um die unterschiedlichen Auffassungen zu vereinen:

*„Ein Supply Chain Management kennzeichnet interne wie netzwerkgerichtete integrierte Unternehmungsaktivitäten von Versorgung, Entsorgung und Recycling, inklusive begleitende Geld- und Informationsflüsse (Werner 2013, S. 6).“*

Nach Werner (2013) folgt diese Definition dem verbreiteten Ansatz, dass sich ein SCM über komplette Unternehmensnetzwerke erstreckt, wobei kooperative Partnergeflechte entstehen, die über mehrere Ebenen vernetzt sind und auch als „Lieferanten-Hersteller-Kunden-Verbund“ verstanden werden. Innerhalb eines solchen Netzwerks laufen eine Vielzahl von Aktivitäten ab (Werner 2013). Unabhängig von den unterschiedlichen Definitionen ist dabei allgemein akzeptiert, dass beim SCM die Integration von Unternehmensaktivitäten im Mittelpunkt steht (Wellbrock 2015). Denn nur durch eine Integration ist es möglich, Wissen und Erfahrungen aus unterschiedlichen Bereichen zu vereinen, um Verbesserungspotentiale an den Schnittstellen sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch bei unternehmensübergreifender Zusammenarbeit aufzudecken (Kuhn und Hellingrath 2002; Werner 2013).

Den unterschiedlichen Definitionen ist laut Werner (2013) außerdem gemein, dass die Koordination von Material- und Informationsflüssen eine große Bedeutung einnimmt. Hierbei wird die komplette Wertschöpfungskette ganzheitlich betrachtet, von der Anlieferung über die Fertigung und den Verkauf, bis zur Entsorgung oder zum Recycling (Werner 2013). Nach Kuhn und Hellingrath (2002) dient diese ganzheitliche Betrachtung so der zeit- und kostenoptimalen Gestaltung der Gesamtprozesse. Da alle an einer Supply Chain (SC) beteiligten Unternehmen Gewinne an-

streben, ist neben den Material- und Informationsflüssen auch der begleitende Finanzfluss zu berücksichtigen, wobei insbesondere der Zeitpunkt bzw. -raum, wann das Geld vom Kunden bis zum Lieferanten über die Kette weiterfließt, von Relevanz ist (Kuhn und Hellgrath 2002).

## 2.2 Aufgaben und Ziele des Supply Chain Management

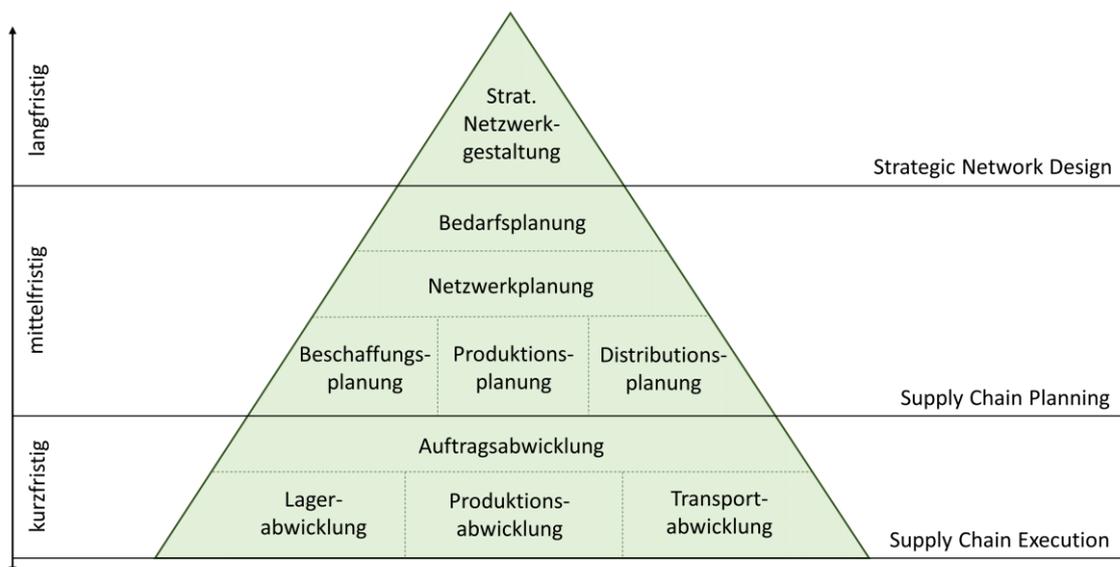
Das übergeordnete Gesamtziel des SCM stellt „*der langfristige Erhalt bzw. die langfristige Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten SC durch die Erschließung von unternehmensübergreifenden Erfolgspotentialen*“ dar (Wellbrock 2015, S. 47). Diesem Gesamtziel können laut Wellbrock (2015) die Teilziele der Steigerung des Endkundennutzens sowie der Realisierung von Kosten-, Zeit-, Qualitäts- und Flexibilitätsvorteilen untergeordnet werden. Die Steigerung des Endkundennutzens nimmt dabei einen besonderen Stellenwert ein. Denn eine hohe Kundenzufriedenheit, die durch eine Erhöhung des Kundennutzens erreicht wird, führt zu einer Bindung des Kunden an die beteiligten Unternehmen, wodurch wiederum eine langfristige Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit der gesamten SC ermöglicht wird. Der Endkundennutzen kann vor allem durch eine hohe Produktverfügbarkeit und Qualität der Logistikservices, zusammengesetzt aus der Lieferzeit, -zuverlässigkeit, -beschaffenheit und -flexibilität, positiv beeinflusst werden (Wellbrock 2015). Hierbei zeigt sich jedoch, dass die jeweiligen Teilziele in einem ständigen Konflikt zueinander stehen (Werner 2013). Als Beispiel führt Werner (2013) an, dass eine hohe Qualität auch häufig mit hohen Kosten verbunden ist.

Um das übergeordnete Ziel dennoch erreichen zu können, müssen daher sowohl unternehmensintern als auch unternehmensübergreifend bestimmte Aufgaben des SCM erfüllt werden. Zur Darstellung dieser Aufgaben wurde von den Fraunhofer Instituten IML, IPA und dem ETH Zürich ein pyramidenförmiges Aufgabenmodell (vgl. Abbildung 1) entwickelt (Kuhn und Hellgrath 2002). Dieses Modell dient ursprünglich der Strukturierung der Anforderungen bei der Auswahl einer SC-Software, zeigt jedoch in übersichtlicher Form die grundsätzlichen Planungs- und Abstimmungsbereiche, die es beim Aufbau einer Supply Chain zu berücksichtigen gilt (Koch 2012). Das Aufgabenmodell gliedert sich in die drei Hauptaufgabenbereiche Netzwerkgestaltung (Strategic Network Design), Planung (Supply Chain Planning) sowie Ausführung (Supply Chain Execution) (Beckmann 2004). Der Zeithorizont der Bereiche erstreckt sich dabei von mehreren Jahren bei der strategischen Gestaltung einer Lieferkette bis hin zu Minuten in der operativen Steuerung des Betriebs (Kuhn und Hellgrath 2002).

Ziel der strategischen Netzwerkgestaltung ist die langfristige, kostenoptimale Gestaltung der gesamten SC (Koch 2012). Über einen zeitlichen Planungshorizont von Jahren werden mit Hilfe von sogenannten What-If-Simulationen kostenoptimale Entscheidungen, unter anderem im Hinblick auf Investitions-, Verteilungs- und Rationalisierungsmaßnahmen, getroffen (Wannenwetsch 2005). Weiterhin finden auf dieser Ebene grundsätzliche Überlegungen hinsichtlich der räumlichen Anordnung von Produktionsstätten oder Lägern sowie der Auswahl von geeigneten Partnerunternehmen statt (Hellgrath et al. 2008).

In der zweiten Ebene, der taktischen und operativen Planung, werden Produktions- und Logistikressourcen einer Supply Chain geplant, um prognostizierte Kundenaufträge erfüllen zu können.

Die Planungsebene ist in verschiedene Bereiche unterteilt, die im Folgenden kurz erläutert werden. Im Rahmen der Bedarfsplanung erfolgt eine für alle Beteiligten der logistischen Kette transparente Prognose der zu erwartenden kurz-, mittel- und langfristigen Bedarfe. Eine möglichst exakte Prognose ist insbesondere wichtig, um Kundenbedarfe befriedigen, Kapazitäten innerhalb der Supply Chain planen sowie Bestände optimieren zu können. Aufgabe der Netzwerkplanung ist es sowohl unternehmensintern als auch unternehmensübergreifend die einzelnen Partner innerhalb der Wertschöpfungskette zu koordinieren, wodurch es den Partnern gelingt, ihre Bedarfe sowie die Material- und Kapazitätsressourcen aufeinander abzustimmen. Die Produktionsplanung dient der Erstellung eines optimierten Produktionsplans für jede Produktionsstätte der Supply Chain, um so die Lieferbereitschaft und Termintreue zu maximieren, die Bestandskosten zu minimieren sowie die Auslastung zu optimieren. Die Bedarfs-, Netzwerk- und Produktionsplanung bilden die Grundlage für die Beschaffungsplanung, die die Versorgung der einzelnen Bereiche mit den erforderlichen Teilen sicherstellt und das Ziel einer termingerechten Beschaffung bei gleichzeitig minimalen Beständen verfolgt. (Kuhn und Hellgrath 2002)



**Abbildung 1: SCM-Aufgabenmodell nach (Kuhn und Hellgrath 2002, S. 143)**

Die Planung der Bestände kann dabei beispielweise mithilfe von Dispositionsregeln erfolgen, die festlegen, wann und in welchem Umfang Bestellungen getätigt werden. Bei den Dispositionsregeln unterscheidet man grundsätzlich zwischen den Bestellpunktregeln, bei denen Bestellungen bei Unterschreitung eines festgelegten Bestellpunktes  $s$  ausgelöst werden, und den Bestellzyklusregeln, bei denen die Auslösungen in einem bestimmten Bestellzyklus  $t$  vorgenommen werden. Zu den Bestellpunktregeln zählen die  $(s, Q)$ -Regel, bei der die Bestellmenge  $Q$  fest vorgegeben ist, sowie die  $(s, S)$ -Regel, bei der der Lagerbestand auf den definierten Sollbestand  $S$  aufgefüllt wird. Auch bei den Bestellzyklusregeln wird der Lagerbestand entweder auf ein konstantes Niveau aufgefüllt  $((T, S)$ -Regel) oder eine feste Bestellmenge vorgegeben  $((T, Q)$ -Regel). Die  $(T, Q)$ -Regel stellt dabei eine eher theoretisch mögliche Regel dar, da sie zu sehr stark schwankenden Beständen führen kann. (Inderfurth und Jensen 2008)

Die Distributionsplanung dient letztlich der optimierten Planung der Endproduktbestände und deren kostenoptimalem Transport zum Kunden (Kuhn und Hellgrath 2002).

Der dritte Hauptaufgabenbereich, die Ausführung, bildet die operative Seite der Supply Chain ab und dient so der Abwicklung und Kontrolle der Bestell- und Transportaufträge sowie der Lagerverwaltung und dem Retourenmanagement (Koch 2012). Ziel dieser Ebene ist dabei eine direkte Verbesserung der Kundenzufriedenheit, indem die dynamische Komplexität, die aus den vielfältigen Kundenbeziehungen heraus entsteht, beherrscht wird (Hellingrath et al. 2008).

Die Tätigkeiten, die für die Abläufe und das Management der Supply Chain, also für die Erfüllung der genannten Ziele und Aufgaben, notwendig sind, werden auch als Supply-Chain-Prozesse bezeichnet und im Wesentlichen in die Prozessbausteine Planen, Beschaffen, Herstellen, Liefern und Zurückliefern gegliedert (Becker 2018). Die Visualisierung, bei der die Ist-Prozesse veranschaulicht werden, und die anschließende Analyse, die der Erkennung von Potenzialen und Schwachstellen dient, erleichtert die Kommunikation zwischen den Beteiligten der Supply Chain (Kuhn und Hellingrath 2002). Zur Visualisierung und Analyse von Prozessen stehen eine Vielzahl von Methoden, wie z.B. das Flussdiagramm, Prozessablaufdiagramm, Ereignisgesteuerte Prozessketten, Wertromanalyse oder Supply-Chain Operations Reference-model, zur Auswahl, um nur einige wenige Methoden herauszugreifen (Becker 2018). Aufgrund deren Relevanz in dieser Arbeit wird im Folgenden lediglich auf die Wertromanalyse eingegangen.

Die Wertromanalyse nutzt das Wertstromdiagramm, welches beginnend bei den Kundenanforderungen den gesamten Material- und Informationsfluss vom Kunden bis zum Lieferanten in allen Bearbeitungs- und Produktionsschritten mit Symbolen als Grafiken darstellt, um Verschwendungen im Ist-Zustand aufzuzeigen. Symbole mit definiertem Inhalt repräsentieren dabei jeden Prozessschritt in der Bearbeitungsreihenfolge. Für die Modellierung von Materialtransporten, Bearbeitungsschritten, Lagern und Informationsflüssen stehen Symbole unterschiedlicher Form zur Verfügung. Neben Standardsymbolen können darüber hinaus benutzerdefinierte Symbole hinzugefügt werden. (Becker 2018)

### **2.3 Problemfelder im Supply Chain Management**

Aufgrund der Vielzahl an Prozessen innerhalb von Supply Chains und der damit einhergehenden Komplexität können zahlreiche Probleme im SCM auftreten. Ein klassisches Problem innerhalb des SCM wird dabei durch den Bullwhip-Effekt beschrieben. (von Steinaecker und Kühner 2001)

Der Begriff Bullwhip-Effekt bezeichnet das Phänomen sich aufschaukelnder Bestellmengen. So können kleine Veränderungen der Endkundennachfrage zu immer größer werdenden Schwankungen der Bestellmenge führen, je weiter die beteiligten Akteure einer Supply Chain vom Endkunden entfernt sind. Diese Schwankungen führen wiederum dazu, dass Kapazitäten nicht gleichmäßig ausgelastet sind, Aufträge in auftragsstarken Perioden nicht rechtzeitig bearbeitet und Ressourcen in auftragsschwachen Perioden nicht genutzt werden können. Um Fehlbestände zu vermeiden, müssen daher hohe Lagerbestände gehalten werden, die hohe Kapital- und Lagerkosten verursachen. (Arndt 2008)

Die Ursachen für die Entstehung und Verstärkung des Bullwhip-Effekts können vielfältig sein (Wellbrock 2015). Nach Fröhlich-Glantschnig und Lingohr (2010) liegt die primäre Ursache jedoch in der Unsicherheit über die Nachfrage in der gesamten Supply Chain, die durch eine fehlende Weitergabe der auf den einzelnen Stufen vorliegenden Informationen verursacht wird.

Aufgrund mangelnder Informationsweitergabe besitzt lediglich der Einzelhändler Informationen über die tatsächliche Nachfrage der Endkunden. Nachgelagerte Akteure der Supply Chain richten daher ihre Bestellmengen am jeweiligen Vorgänger aus, deren Nachfrage wegen der Berücksichtigung von Sicherheitsbeständen allerdings nicht der Endkundennachfrage entspricht (Fröhlich-Glantschnig und Lingohr 2010).

Ein weiteres Problemfeld im SCM stellt die Anfälligkeit von Supply Chains auf zahlreiche Risiken und Störungen dar (Liebetruth 2016). Gefahren wie Naturkatastrophen, Unfälle oder politische Unruhen können beispielweise Verzögerungen oder Ausfälle im Liefervorgang zur Folge haben und im schlimmsten Fall zu Unterbrechungen der kompletten Lieferkette führen (Werner 2017).

Eine Methodik für den Umgang mit Risiken stellt das Supply-Chain-Risikomanagement dar, welches sich in seinen Grundzügen in die drei Phasen Risikoidentifikation, -bewertung und -steuerung gliedert. Ziel der Risikoidentifikation ist es, kritische Risiken und bisherige Maßnahmen zu identifizieren und in einem Katalog zusammenzustellen. Im Rahmen der Risikobewertung gilt es, die einzelnen Risiken mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit zu versehen und die möglichen Auswirkungen auf die Supply Chain zu quantifizieren. Die Risikosteuerung dient letztlich dazu, mögliche Maßnahmen zur Reduktion des Risikos zu evaluieren, analysieren und auszuwählen. (Schönsleben 2016)

## 3 Simulation im Supply Chain Management

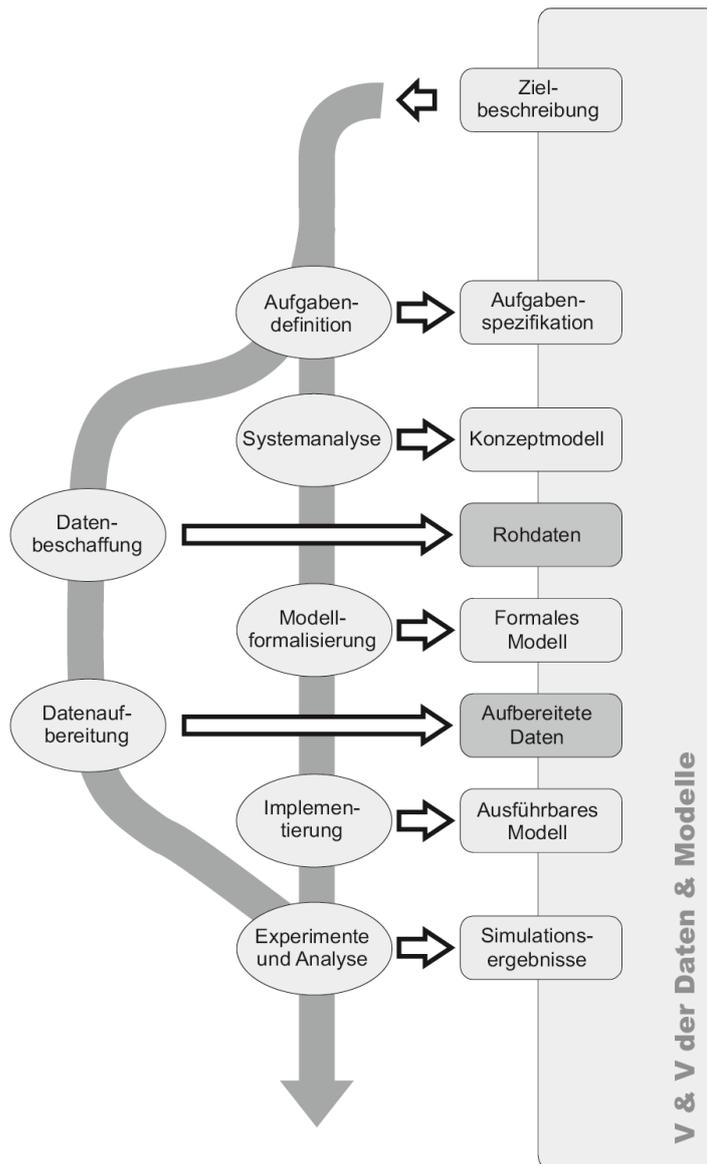
### 3.1 Grundlagen der Simulation

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) definiert die Simulation als „*das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014, S. 3).“ Ein Modell stellt hierbei eine abstrahierte Abbildung eines zu untersuchenden Systems dar, welches bereits existiert oder erst in der Zukunft entstehen soll (März et al. 2011). Aussagen über das Verhalten der durch die Modelle beschriebenen Systeme werden durch Experimente mit den Modellen gewonnen (Gutenschwager et al. 2017). In einem Experiment werden verschiedene Szenarien durch wiederholte Simulationsläufe untersucht, während das Modell systematisch hinsichtlich seiner Parameter oder Struktur verändert wird (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 2014). Unter einem Simulationslauf versteht man wiederum die Ausführung eines Simulationsmodells mit festgelegten Parametern über einen vorgegebenen Zeitraum (Gutenschwager et al. 2017). Bei Simulationen, die am Computer durchgeführt werden, spricht man überdies von Computersimulationen, während Computerprogramme, mit denen ein Modell erstellt und ausführbar gemacht wird, als Simulationswerkzeuge bezeichnet werden (Eley 2012).

Simulationenmethoden werden grundsätzlich in die kontinuierliche und diskrete Simulation klassifiziert, wobei bei der letzteren weiter zwischen der zeit- und ereignisgesteuerten Simulation unterschieden wird (Gutenschwager et al. 2017). Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der diskreten ereignisorientierten Simulation, die auch als ereignisdiskrete Simulation bezeichnet wird, weshalb nur auf diese Methode eingegangen werden soll.

Bei der ereignisdiskreten Simulation ändern sich Modellzustände nur zu gewissen, diskreten Zeitpunkten und müssen nicht ständig mit der Zeit neu berechnet werden. Der Zeitfortschritt erfolgt also von Ereignis zu Ereignis. Solche Ereignisse können beispielsweise der Abschluss eines Produktionsschrittes, Umlagerungen oder der Eingang einer Warenlieferung sein. Somit ist die ereignisdiskrete Simulation prädestiniert für die Abbildung logistischer Systeme wie Supply Chains. (Eley 2012)

Nachdem kurz auf die Grundlagen der Simulation eingegangen wurde, wird im Folgenden das Vorgehen bei der Durchführung von Simulationsstudien anhand des von Rabe et al. (2008) entwickelten Vorgehensmodells (vgl. Abbildung 2) erläutert, da sich der Entwurf des Simulationsmodells in Kapitel 5 an diesem Vorgehensmodell orientieren soll. Das Vorgehensmodell gliedert sich in verschiedene Phasen, wobei jeder Phase ein Phasenergebnis zugeordnet wird. Ausgangsbasis der Simulationsstudie stellt die Zielbeschreibung dar, in der das zu lösende Problem strukturiert zu beschreiben ist. Die erste Phase, die *Aufgabendefinition*, dient zur Vervollständigung der vom Auftraggeber entwickelten Zielbeschreibung und soll im Ergebnis, der Aufgabenspezifikation, durch eine detaillierte Beschreibung das Verständnis der Aufgabe auf Seiten des Auftraggebers und -nehmers vereinheitlichen. (Rabe et al. 2008)



**Abbildung 2: Vorgehensmodell der Simulation nach (Rabe et al. 2008, S. 5)**

In der zweiten Phase, der *Systemanalyse*, wird aus dem realen bzw. geplanten System das Konzeptmodell abgeleitet, welches im Ergebnis die Zielsetzungen, Eingaben, Ausgaben, Elemente und Beziehungen, Annahmen sowie Vereinfachungen des Simulationsmodells durch textuelle Beschreibungen, Ablaufdiagramme oder anderen Grafiken zusammenfasst. In der anschließenden *Modellformalisierung* wird das Konzeptmodell in ein formales Modell überführt, welches unabhängig von dem einzusetzenden Simulationstool ist und z. B. eine textuelle Beschreibung einer Steuerung in einen Programmablaufplan umsetzt. Das formale Modell sollte dabei so beschrieben werden, dass es Simulationsexperten ohne weitere fachliche Klärungen implementieren können. In der folgenden *Implementierung* wird auf Basis des formalen Modells das ausführbare Modell bzw. Simulationsmodell entwickelt. Die Besonderheit dieses Vorgehensmodells ist, dass die Phasen *Datenbeschaffung* und *Datenaufbereitung* aus der Reihenfolge der Modellierungsschritte ausgegliedert sind, da sie unabhängig von der Modellierung erfolgen können. Während im Zuge der *Datenbeschaffung* die für die Simulationsstudie erforderlichen Informationen in Form von Rohdaten zusammengestellt werden, werden die Rohdaten bei der *Datenaufbereitung*

so aufbereitet, dass eine Nutzung für das ausführbare Modell möglich ist. In der abschließenden Phase *Experimente und Analyse* werden letztlich das ausführbare Modell und die aufbereiteten Daten zusammengeführt. Diese Phase umfasst hierbei die Durchführung von Experimenten auf Basis von Experimentplänen, die Analyse der Ergebnisse sowie die Ableitung von Schlussfolgerungen für das reale System. (Gutenschwager et al. 2017)

Weiterhin ist die Verifikation und Validierung (V&V), die kein einmaliger Vorgang darstellt, sondern alle Phasen einer Simulationsstudie begleitet, ein wesentlicher Bestandteil bei der Durchführung einer Simulationsstudie (Rabe et al. 2008). Während bei der Verifikation Aspekte der Korrektheit eines Modells („Ist das Modell richtig?“) untersucht werden, werden bei der Validierung Aspekte der Eignung („Ist es das richtige Modell?“) überprüft (Wenzel et al. 2008). Zur Durchführung der Verifikation und Validierung stehen einige Techniken zur Auswahl. Aufgrund deren Relevanz werden im Rahmen dieser Arbeit lediglich die Techniken Trace-Analyse, Test von Teilmodellen, Animation, Monitoring sowie Strukturiertes Durchgehen kurz vorgestellt.

Bei der Trace-Analyse wird das Verhalten einzelner Objekte (z. B. Werkstück oder Fahrzeug) im ausführbaren Modell verfolgt, wozu alle Ereignisse in einer „Trace-Datei“ aufgezeichnet werden und die interessierenden Ereignisse gefiltert sowie ausgewertet werden. Der Test von Teilmodellen ist anwendbar, wenn das Modell hierarchisch in Teilmodelle strukturiert ist und die Dekomposition des Modells mit der realen Systemstruktur vergleichbar ist. Diese Teilmodelle werden unabhängig voneinander verifiziert und validiert, was jedoch häufig mit der Ergänzung eines Teilstrahmens verbunden ist, da Teilmodelle nicht immer ausführbar sind. (Rabe et al. 2008)

Bei der Animation wird das zeitliche Verhalten des Modells dargestellt, weshalb Fehler im Modellverhalten intuitiv erkannt werden können (Gutenschwager et al. 2017). Die Wahrscheinlichkeit, dass selten auftretende Fehler im Modell nicht erkannt werden, ist jedoch groß (Kleijnen 1995). Die Technik des Monitorings, bei der Werte von Zustandsgrößen und Variablen (z. B. Auslastung oder Durchlaufzeit) während des Simulationslaufes angezeigt und überprüft werden, birgt die gleichen Gefahren wie die Animation (Rabe et al. 2008).

Beim Strukturierten Durchgehen werden Modellelemente Schritt für Schritt von den Projektbeteiligten durchgegangen sowie das Verhalten des gesamten Modells untersucht. Diese Technik beruht darauf, dass die Projektbeteiligten das System und dessen Verhalten gut kennen. (Persson und Olhager 2002)

## 3.2 Nutzen der Simulation im Supply Chain Management

Ein wesentlicher Vorteil der Simulation im SCM liegt in der Möglichkeit, mithilfe von What-if-Analysen unter Berücksichtigung relevanter stochastischer Einflüsse Ideen und Strategien zu testen, ohne in das Realsystem eingreifen zu müssen (Chang und Makatsoris 2001). Laut Gutenschwager und Alicko (2004) kann die Simulation dabei auf jeder Planungsebene einer Supply Chain Anwendung finden. So kann sie dazu eingesetzt werden, neue oder bereits bestehende Lieferketten zu analysieren und Potentiale für strukturelle oder steuerungstechnische Veränderungen einer Lieferkette auf einem hohen Detaillierungsgrad abzuschätzen. In diesem Zusammenhang ist die Simulation insbesondere für die wirtschaftliche Auswahl von Lager- und Produktionsstandorten ein hilfreiches Instrument. Weiterhin dient die Simulation auch zur Untersuchung von eher

taktischen Problemstellungen (Gutenschwager und Alicke 2004). Im Zuge dessen können unter anderem verschiedene Produktions- bzw. Beschaffungsoptionen bewertet oder optimale Losgrößen für die Produktion und den Transport bestimmt werden (Fechteler und Gutenschwager 2014). Die Abbildung und Analyse verschiedener Bestellpolitiken kann zudem dabei helfen, Lagerbestände zu senken, ohne eine Verschlechterung des Liefergrades in Kauf nehmen zu müssen (Scholz-Reiter et al. 2001). Des Weiteren kann die Simulation zur Bestimmung geeigneter Auslieferungstouren von Lagerstandorten zu Kunden sowie Zwischentransporten eingesetzt werden (Fechteler und Gutenschwager 2014). Ebenso kann getestet werden, inwieweit sich Kennziffern wie die Lieferzeit, Liefertreue oder der durchschnittliche Lagerbestand bei der Umstellung auf andere Transportmittel verändern (Arndt 2008). What-if-Analysen eignen sich darüber hinaus dazu, die Auswirkungen von unterschiedlichen SC-Risiken, wie z. B. Produktionsausfälle, Transportverzögerungen oder Nachfrageschwankungen, mit vergleichsweise geringen finanziellen Mitteln im Voraus abzuschätzen (Scholz-Reiter et al. 2001).

Simulationsmodelle können weiterhin dazu beitragen, Transparenz zu schaffen, indem sie die Beziehungen zwischen einzelnen Unternehmen in der notwendigen Schärfe darstellen und berücksichtigen, und darüber hinaus dabei helfen, die Abläufe und Prozesse innerhalb der kompletten Supply Chain zu verstehen (Scholz-Reiter et al. 2001). In diesem Kontext haben sich Grafiken und Animationen als hilfreich erwiesen (Chang und Makatsoris 2001).

Es zeigt sich, dass die Einsatzmöglichkeiten der Simulation im SCM insgesamt vielfältig sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb davon ausgegangen, dass der Begriff Supply-Chain-Simulation die Anwendungsgebiete Standort- und Tourenplanung, Simulation von SC-Risiken, Produktionsplanung, optimierte Lieferantenauswahl sowie Bestandsmanagement umfasst.

### **3.3 Anforderungen und Herausforderungen bei der Simulation von Supply Chains**

Aufgrund der Vielzahl an beteiligten Unternehmen und deren Vernetzung stellen Supply Chains komplexe Systeme dar (Kaczmarek 2002). Die Simulation kann dabei helfen, solche komplexen Systeme zu untersuchen und für den Anwender verständlich zu machen (Gutenschwager und Alicke 2004). Nach Zsifkovits und Krenn (2007) liegt jedoch die Schwierigkeit darin, die komplexe Supply Chain in einem vereinfachten Modell abzubilden und gleichzeitig den Ansprüchen der Zielorientierung, Validität und Abbildungstreue gerecht zu werden. Hierbei müssen die wesentlichen Systemelemente und Wirkungsbeziehungen abgebildet werden, um die Auswirkungen alternativer Strategien und Entscheidungen sichtbar machen zu können (Zsifkovits und Krenn 2007). Trotzdem entstehen aufgrund der hohen Detaillierung und dem Betrachtungsumfang in der Netzwerkgestaltung häufig große Modelle (Motta et al. 2008). So besteht eine Supply Chain neben der vielen beteiligten Unternehmen oftmals aus einer großen Anzahl an Werken, Lägern und Produktionsmitteln (Thierry et al. 2008). Außer den statischen Elementen beinhalten solche Modelle meist eine noch größere Anzahl an dynamischen Objekten zur Abbildung von Waren- und Informationsflüssen, weshalb die Durchführung eines Simulationslaufes viel Zeit in Anspruch nehmen kann (Longo 2011). Neben der Modellierung von möglichst einfachen Modellen stellt die Wiederverwendbarkeit der Modelle eine weitere Anforderung dar, da hierdurch Zeit zur

Modellerstellung und Analyse verschiedener Szenarien sowie letztlich Kosten eingespart werden können (van der Zee und van der Vorst 2005). Allerdings gestaltet sich die Wiederverwendbarkeit von Modellen zur Simulation von Supply Chains gerade aufgrund der wenig reproduzierbaren Szenarien und langfristig abgeschlossenen Prozesse und Lieferverträge als schwierig (Müller-Sommer und Strassburger 2009).

Des Weiteren bildet die Beschaffung und Aufbereitung der Eingangsdaten eine Herausforderung der Simulation (Rabe et al. 2008). Die Qualität der Eingangsdaten hat dabei einen großen Einfluss auf das Ergebnis einer Simulationsstudie. So können mithilfe des besten Modells keine guten Ergebnisse erzielt werden, wenn die Eingangsdaten falsch oder veraltet sind (Wenzel et al. 2008). Im Zuge der Simulation von Supply Chains wird die Datenbeschaffung durch die große Anzahl an beteiligten Unternehmen, die gegebenenfalls unterschiedliche Methoden zum Sammeln und Analysieren von Daten anwenden, erschwert (Persson und Olhager 2002).

Die benötigten Daten müssen dabei jeweils von den verschiedenen Unternehmen angefragt, aufbereitet und ausgewertet werden. Im besten Fall können die Daten aus externen Datenbanken gelesen werden, damit der Startzustand des Modells immer den aktuellen Daten des Realsystems entspricht. Ein Nachteil kann sich hierbei wiederum ergeben, wenn die Daten in unterschiedlichen, getrennten Datenbanksystemen gespeichert sind. (Scholz-Reiter et al. 2001)

Eine weitere Herausforderung bei der Simulation von Supply Chains liegt in der Verifikation und Validierung (Tarokh und Golkar 2006). So tritt hinsichtlich der Technik des Strukturierten Durchgehens das Problem auf, dass Mitarbeiter zwar mit dem Verhalten des eigenen Unternehmens vertraut sind, es jedoch selten Fachexperten gibt, die über ein Detailwissen über alle beteiligten Akteure sowie das Verhalten der gesamten Supply Chain verfügen (Persson und Olhager 2002). Aufgrund der Vielzahl beteiligter Akteure sowie Prozesse innerhalb einer Supply Chain, die häufig zu umfangreichen Modellen führen, wird die V&V im Rahmen der Supply-Chain-Simulation zudem erschwert (Persson und Olhager 2002). Somit stellt die V&V gerade bei der Simulation von Supply Chains einen zeitintensiven Prozess dar (Tarokh und Golkar 2006).

Darüber hinaus sollte die Ergebnisauswertung nicht vernachlässigt werden, denn die Ergebnisse eines Simulationsmodells erlauben lediglich Aussagen über das Verhalten des Modells und nicht zwingend über das Verhalten der realen Supply Chain. Möglicherweise wurde nur ein Teil aller möglichen Eingangsgrößen im Modell berücksichtigt, weshalb geprüft werden muss, ob noch weitere relevante Größen in das Modell mit aufgenommen werden müssen. Je nach Eingangsgröße lassen sich die Kenngrößen des Modells direkt verwenden oder lediglich deren Verhältnis, um Varianten zu vergleichen. Gegebenenfalls ist auch die Durchführung von Sensitivitätsanalysen notwendig. (Scholz-Reiter et al. 2001)

Zur Auswertung der Ergebnisse ist die Erstellung einer ansprechenden Visualisierung nach Wenzel et al. (2008) heute üblich. Übersichtliche Visualisierungen, unterschieden in statische (z.B. Tabellen, Diagramme) und dynamische (z.B. Animation, Monitoring) Visualisierungsformen, verstärken die Aussage der Simulationsergebnisse und schaffen Transparenz sowie Erkenntnisgewinn für den Projektpartner (Wenzel et al. 2008). So können auch Mitarbeiter, die nicht in das Projekt eingebunden sind, ein Verständnis für die gesamte Supply Chain entwickeln (Scholz-Reiter et al. 2001).

### 3.4 Auswahl von Simulationswerkzeugen

Die Auswahl eines Simulationswerkzeuges stellt insbesondere eine wichtige Entscheidung dar, wenn eine langfristige Nutzung des Werkzeuges im Unternehmen angestrebt wird, da die Investitionen für die Software sowie für die Ausbildung der Mitarbeiter nur schwer zu revidieren sind (Wenzel et al. 2008). Des Weiteren kann die Auswahl des Werkzeuges einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz im Simulationsprojekt und damit auch der Leistungs- und Konkurrenzfähigkeit des Simulationsanwenders haben (Wenzel und Jauss 2008). Falls das ausgewählte Werkzeug beispielweise nicht die benötigte Flexibilität zulässt oder eine zu komplizierte Bedienung aufweist, kann die Simulationsstudie fehlerhafte Ergebnisse liefern oder möglicherweise gar nicht vollendet werden (Law 2015).

Zur Auswahl eines geeigneten Simulationswerkzeuges ist ein systematisches Vorgehen wie die Durchführung einer Nutzwertanalyse, bei der die infrage kommenden Simulationswerkzeuge auf Basis von unternehmensspezifisch festgelegten und gewichteten Auswahlkriterien bewertet werden, unabdingbar (Gutenschwager et al. 2017). Daneben gibt es einige weitere Verfahren zum Vergleich von Simulationswerkzeugen, wie z. B. das Punktbewertungsverfahren, die technisch-wirtschaftliche Bewertung von Entwürfen gemäß der VDI-Richtlinie 2225 oder graphische Darstellungsformen wie Wertepprofile (Wenzel et al. 2008).

In der Literatur finden sich zahlreiche Kriterien und Kategorien anhand derer die Bewertung vorgenommen werden kann, die jedoch auf die gegebene Aufgabenstellung angepasst werden sollten (Gutenschwager et al. 2017). Da die Richtlinie 3633 des VDI in einem Arbeitskreis, vertreten aus Software-Entwicklern und Anbietern, Simulationsdienstleistern, Anwendern aus der Industrie sowie Forschung und Lehre, erstellt wurde, bildet der Kriterienkatalog der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 (vgl. Tabelle 1) die Grundlage für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Kriterienliste (Kuhn und Rabe 1998).

Der Kriterienkatalog des VDI ist grundsätzlich in die Abschnitte Systemumgebung und Softwareleistung unterteilt. Der Abschnitt Softwareumgebung umfasst dabei Untersuchungskriterien, die der Gewinnung grundlegender Informationen hinsichtlich des Simulationswerkzeugs dienen. Zur besseren Übersicht für den Leser werden im Folgenden die Hauptkriterien der Richtlinie durch Kursivschrift hervorgehoben. Neben der genauen *Softwarebezeichnung*, Versionsnummer, Datum der Markteinführung sowie der Beschreibung der *Entwicklungsgeschichte* zählen Angaben zum *Softwarehersteller* und den *Vertriebspartnern* zu den Untersuchungskriterien der Systemumgebung. Weiterhin empfiehlt der VDI, Informationen bezüglich der *Marktpräsenz*, wie die Anzahl von Installationen und die Hauptabnehmerbranche, sowie *Referenzen* einzuholen. Das Kriterium *Anwenderunterstützung und Systempflege* dient der Untersuchung, inwieweit dem Anwender Hilfestellungen zur Entwicklung der Simulationsmodelle angeboten werden. Hierzu kann beispielweise geprüft werden, ob umfangreiche Handbücher zur Verfügung gestellt werden, der Hersteller Schulungskurse anbietet oder eine Servicehotline eingerichtet ist. Um das Erfordern möglicher zusätzlicher Investitionen in die Ausstattung des Unternehmens, die mit der Nutzung des Simulationswerkzeugs einhergehen, zu überprüfen, ist es darüber hinaus wichtig, die *Hardware- und Softwareanforderungen* des Werkzeuges herauszustellen. Daneben sieht es der VDI vor, die erforderlichen *Qualifikationen* für den Umgang mit dem Werkzeug zu untersuchen. Im Zuge dessen

soll festgestellt werden, inwieweit der Anwender bereits Programmierkenntnisse benötigt bzw. Simulationserfahrung aufweisen sollte. Abschließend ist es für ein Unternehmen von großer Bedeutung, die anfallenden Gesamtkosten zusammenzutragen. Neben den Kosten für zusätzliche Soft- und Hardware sowie *Servicekosten* für Wartung und Support müssen die Lizenzkosten berücksichtigt werden. Bezüglich der Lizenzkosten sind verschiedene Lizenzpakete mit unterschiedlichen Leistungsumfängen zu vergleichen, denn je nach Anzahl erworbener Lizenzen kann der Preis pro Lizenz variieren. (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997)

Der Bereich Softwareleistung des Kriterienkatalogs umfasst grundsätzlich Kriterien zur Bewertung der Funktionen eines Werkzeugs und deren Anwendbarkeit. Neben den *Anwendungsschwerpunkten, Charakteristika und Leistungsmerkmalen* gilt es, den verwendeten *Simulationsansatz* herauszuarbeiten, im Rahmen dessen auch das grundsätzliche Modellierungskonzept von Interesse ist. Außerdem empfiehlt der VDI, das Werkzeug auf mögliche Restriktionen in Bezug auf *Modellgröße und Dimension* zu untersuchen. Beschränkungen hinsichtlich der Anzahl von Elementen, Objekten, Variablen und Zufallszahlen können nämlich je nach Umfang des zu betrachteten Systems dazu führen, dass das Realsystem nicht vollständig abgebildet werden kann. Darüber hinaus sieht es der VDI vor, bereits *vorkonfigurierte Modellelemente* zur Abbildung realer Systemelemente, wie beispielsweise Fördersysteme oder Arbeitsstationen, herauszuarbeiten. Hierzu ist es erforderlich, die abzubildenden Systemelemente vorab zu bestimmen. Im Rahmen der Untersuchung der *Programmiersprache* soll festgestellt werden, ob es sich bei der implementierten Programmiersprache um eine allgemeine oder eine eigene Programmiersprache handelt. Das Kriterium *Handhabung* wird herangezogen, um die Bedienerfreundlichkeit hinsichtlich der *Modellierung und EingabeprozEDUREN* beurteilen zu können. Hierbei gilt es, die Bedieneroberfläche unter anderem in Bezug auf deren Sprache, Eingabemasken, Listenverarbeitung und Registerkarten näher zu betrachten. Ein weiterer Bestandteil dieser Kategorie stellen Bausteinbibliotheken dar. (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997)

Hinsichtlich der Bausteinbibliotheken muss geprüft werden, ob dem Anwender bereits vorgefertigte Bausteine zur Verfügung stehen bzw. eine hierarchische Modellierung unterstützt wird. Eine hierarchische Modellierung ermöglicht es dem Anwender, verschiedene Grundbausteine und Modellelemente zu eigenen Bausteinen zu kombinieren. Diese Bausteine können wiederum mit weiteren Bausteinen kombiniert werden, weshalb die hierarchische Modellierung im Besonderen für die Modellierung komplexer Systeme nützlich ist. (Law 2015)

Laut VDI sollte weiterhin ein Augenmerk auf die *Kontroll- und Steuerungselemente* des Werkzeugs gelegt werden. Hierzu soll herausgearbeitet werden, welche Standardsteuerungen zur Auswahl stehen, inwieweit Steuerungen frei programmiert werden können und ob Hilfestellungen zur Programmierung angeboten werden. Neben der Untersuchung der Modifizierbarkeit von Modellelementen und Attributen zählt auch das Herausstellen der implementierten Verteilungsfunktionen zu dieser Kategorie. Weiterhin ist die *Animation* Bestandteil des Kriterienkatalogs, bei der die Art der Graphik ebenso zu untersuchen ist wie die Art der Animation (online = während der Simulation; offline = nach der Simulation) und die grundsätzlichen Funktionen zur Anpassung der Animation. Hinsichtlich der *Laufzeitvariationen* sind unterschiedliche Funktionen zur Durchführung von Simulationsläufen zu prüfen. Darüber hinaus empfiehlt der VDI, verschiedene Methoden und Hilfen zur *Fehlersuche und -Kontrolle* zu untersuchen. Hierbei stehen insbesondere

Methoden und Hilfen zur Suche von Programmierfehlern, wie die automatische Syntaxkontrolle, die Anzeige von Fehlermeldungen und der Debugger, mit dessen Hilfe ein Programm Schritt für Schritt durchlaufen werden kann, im Vordergrund. Bezüglich der *Ergebnisauswertung und -ausgabe* sollte das Werkzeug z. B. auf Funktionen zur automatischen Erfassung von Statistiken der Objekte, zur optischen Aufbereitung der Ergebnisdarstellung oder auch zur Ergebnisausgabe in verschiedenen Dateiformaten begutachtet werden. Mithilfe des Kriteriums *Schnittstelle zu anderen Programmen* sollen die verschiedenen Alternativen zum Datenimport und -export (z. B. Datenbanken, Excel-Schnittstellen oder CAD-Systeme) herausgearbeitet werden. Das letzte Kriterium stellt abschließend die *Dokumentation der Eingabedaten* dar, welches zur Untersuchung der Möglichkeiten einer automatischen Aufbereitung der Eingabedaten dient. (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997)

**Tabelle 1: Kriterienliste zur Auswahl von Simulationswerkzeugen nach (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997)**

1. Systemumgebung	2. Softwareleistung
Softwarebezeichnung und Entwicklungsgeschichte	Anwendungsschwerpunkte, Charakteristika, Leistungsmerkmale
Softwarehersteller und Vertriebspartner	Simulationsansatz
Marktpräsenz und Referenzen	Modellgröße und Dimension
Anwenderunterstützung und Systempflege	Vorkonfigurierte Modellelemente
Hardware-Anforderungen	Programmiersprache zur anwenderspezifischen Programmierung
Betriebssystem und sonstige Software	Handhabung: Modellierung und EingabeprozEDUREN
Qualifikationsanforderungen	Kontroll- und Steuerungselemente
Systempreis und Servicekosten	Animation: Darstellung der Simulationsabläufe am Bildschirm
	Laufzeitvariation
	Fehlersuche und -kontrolle
	Ergebnisauswertung und -ausgabe
	Schnittstellen zu anderen Programmen
	Dokumentation der Eingabedaten

Ein Kriterium, welches in der VDI-Richtlinie nicht explizit enthalten ist, laut Law (2015) jedoch die wichtigste Eigenschaft einer Simulationssoftware darstellt, ist die Flexibilität bei der Modellierung. Dies ist dadurch begründet, dass die zu simulierenden Systeme eine hohe Komplexität aufweisen können (vgl. Unterkapitel 3.3) sowie jedes System unterschiedlich ist und seine Eigenheiten besitzt (Law 2015). Neben der Möglichkeiten Objektattribute und Variablen frei definieren und entwerfen sowie mathematische Funktionen wie Verteilungen nutzen zu können, zählt Law

die Funktionen eigene Bausteine entwickeln, bestehende Bausteine anpassen und diese in einer Bausteinbibliothek speichern zu können zu den Eigenschaften, die ein Simulationswerkzeug flexibel gestalten. Diese Eigenschaften werden auch im Rahmen des VDI-Kriterienkatalogs untersucht, eine ganzheitliche Betrachtung im Hinblick auf die Flexibilität fehlt allerdings (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997).

Steht ein Unternehmen vor der Auswahl eines Simulationswerkzeugs, ist es aufgrund der Vielzahl am Markt existierender Werkzeuge wenig sinnvoll, alle Werkzeuge einem Bewertungsverfahren anhand eines Kriterienkatalogs zu unterziehen. Die Eingrenzung der Werkzeuge kann daher beispielweise in einem dreistufigen Prozess erfolgen. Die erste Stufe stellt die Grobauswahl dar, bei der auf Basis der Sichtung des Marktangebotes vier bis sechs Werkzeuge verbleiben sollten. In dieser Stufe wird geprüft, ob das Werkzeug zur Beantwortung der Fragestellungen des Unternehmens geeignet ist. Hierzu müssen zunächst grundlegende Fragen geklärt werden, was simuliert werden soll, wer mit welcher Qualität simulieren soll und wie groß der finanzielle Rahmen ist. Auf der zweiten Stufe sollte eine engere Auswahl anhand von Testbeispielen und Demonstrationen erfolgen, um eine weitere Eingrenzung auf zwei bis drei Werkzeuge vorzunehmen. Je nach Anwendungsfall ist es sinnvoll, ein Bewertungsverfahren bereits in dieser Stufe oder erst in der letzten Stufe, der Endauswahl, durchzuführen. In der letzten Stufe werden darüber hinaus die übrigen Werkzeuge anhand von Testinstallationen genauer untersucht und letztlich ein Werkzeug ausgewählt. (Gutenschwager et al. 2017)

## 4 Bewertung von Tecnomatix Plant Simulation

### 4.1 Entwicklung einer geeigneten Kriterienliste zur Bewertung von Simulationswerkzeugen hinsichtlich der Supply-Chain-Simulation

Der Kriterienkatalog der VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 dient, wie in Unterkapitel 3.4 bereits erwähnt, als Basis für die Entwicklung einer geeigneten Kriterienliste, um die Eignung von Simulationswerkzeugen zur Simulation von Supply Chains zu untersuchen. Im Folgenden werden nun die Kriterien, die für die Untersuchung eine besondere bzw. keine Relevanz aufweisen, näher betrachtet. Daneben werden die Gründe für das Heranziehen zusätzlicher Bewertungskriterien erläutert. Eine vollständige Übersicht der Kriterienliste und aller zu untersuchenden Fragestellungen ist zudem Anhang A zu entnehmen. Zum besseren Verständnis werden die Kriterien der angepassten Kriterienliste durch Kursivschrift und die Kriterien der VDI-Richtlinie, die nicht übernommen oder angepasst wurden, durch Anführungszeichen (,...) hervorgehoben.

Der Bereich der Softwareumgebung nimmt im Rahmen dieser Arbeit grundsätzlich einen kleineren Stellenwert ein, da dieser zunächst einen eher groben Überblick über ein Simulationswerkzeug verschafft und Informationen herausstellt, die vor allem für einen direkten Vergleich verschiedener Werkzeuge aus Unternehmenssicht relevant sind. Dennoch wird neben den Kriterien der *Softwarebezeichnung und -hersteller* zur ersten Vorstellung des Werkzeugs das Kriterium *Marktpräsenz und Referenzen* aus dem Kriterienkatalog übernommen. Im Zuge des letzteren Kriteriums soll insbesondere geprüft werden, ob das Werkzeug im SCM eingesetzt wird und hierzu Referenzen vorzuweisen sind. Ebenso wird die *Anwenderunterstützung und Systempflege* in die Kriterienliste aufgenommen, wobei auch hier der Fokus auf möglichen Hilfestellungen bezüglich der Simulation von Supply Chains liegt. Die Kriterien der ‚Hard- und Softwareanforderungen‘ sind für die Untersuchung dieser Arbeit nicht relevant, da eine Bewertung von der bereits vorhandenen Ausstattung eines Unternehmens abhängt. Aufgrund des fehlenden Vergleichs mit anderen Werkzeugen ist eine Einordnung der ‚Systempreise und Servicekosten‘ im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Auf die Anwendung dieses Kriteriums wird daher ebenso verzichtet. Die *Qualifikationsanforderungen* zur Bedienung und Anwendung des Werkzeuges sollen hingegen herausgestellt werden. Um jedoch eine bessere Aussage bezüglich des Kriteriums treffen zu können, wird dieses dem Abschnitt Softwareleistung zugeordnet und als abschließendes Kriterium geprüft, nachdem die Funktionen des Werkzeugs und deren Handhabung bereits genauer untersucht wurden.

Die Kategorie Softwareleistung dient zur detaillierten Untersuchung von Funktionen, Umfang und Handhabung eines Simulationswerkzeugs und ist somit von besonderer Bedeutung. Das erste Kriterium des VDI-Kriterienkatalogs wird in der angepassten Kriterienliste dennoch nicht berücksichtigt, da ‚Anwendungsschwerpunkte‘ mitunter bei *Marktpräsenz und Referenzen* herausgearbeitet werden und ‚Charakteristika‘ sowie ‚Leistungsmerkmale‘ gegebenenfalls bei der Anwendung der weiteren Kriterien herausgestellt werden können. Um sicherzustellen, dass das Werkzeug grundsätzlich für die Simulation von Supply Chains infrage kommt, ist hingegen der

verwendete *Simulationsansatz* zwingend festzustellen. Bei einem ungeeigneten Simulationsansatz kann die Untersuchung an dieser Stelle abgebrochen werden. Aufgrund des häufig großen Umfangs der betrachteten Systeme (vgl. Unterkapitel 3.3) ist das Kriterium *Modellgröße und Dimension* gerade im Hinblick auf die Supply-Chain-Simulation besonders relevant. Die Kriterien ‚vorkonfigurierte Modellelemente‘ und ‚Handhabung: Modellierung und EingabeprozEDUREN‘ werden aufgrund ihrer Korrelation und der besseren Übersicht in dem Kriterium *Modellierung und Modellelemente* zusammengefasst. Bezüglich der Modellelemente ist zu prüfen, ob sich die implementierten Basiselemente zur Simulation von Supply Chains eignen bzw. Elemente vermisst werden. In diesem Zusammenhang soll bereits an dieser Stelle die Modifizierbarkeit von Modellelementen und Attributen untersucht werden. Die Untersuchung der *Bausteinbibliotheken* erfolgt im Gegensatz zur VDI-Richtlinie anhand eines eigenen Kriteriums, da die Entwicklung eigener Bausteine zur Abbildung der Komplexität von Supply Chains eine wichtige Funktion darstellt. In diesem Zusammenhang gilt es außerdem, das Werkzeug auf bereits vorhandene Bausteine für die Touren- und Standortplanung, Simulation von SC-Risiken, Bestandsmanagement, Produktionsplanung sowie optimierte Lieferantenauswahl zu prüfen. Weiterhin werden die Fragestellungen des Kriteriums ‚Kontroll- und Steuerungselemente‘, die zur Untersuchung der Steuerungsmöglichkeiten dienen, gemeinsam mit denen der ‚Programmiersprache‘ aufgrund deren Korrelation in dem Kriterium *Steuerungen und Programmierung* zusammengefasst. Ebenso werden die Subkriterien zur Analyse der vorhandenen Verteilungsfunktionen und der Dokumentation der Eingabedaten in dem Kriterium *Datenaufbereitung und stochastische Verteilungen* vereint. Da der richtige Umgang mit Daten bei der Durchführung einer Simulationsstudie im Allgemeinen, aber gerade bei der Simulation im SCM aufgrund der Vielzahl möglicher Datenquellen (vgl. Unterkapitel 3.3), einen zeitintensiven Prozess darstellt, sind bereits implementierte Funktionalitäten bezüglich der Datenaufbereitung zur Minimierung des Zeitaufwandes hilfreich. Zu den Verteilungen, die das Simulationswerkzeug bereitstellen sollte, zählen die Bernoulli-, Binomial-, Poisson-, Exponential-, Erlang-k, Normal-, Gleich- und Dreiecksverteilung, die nach Guten-schwager et al. (2017) regelmäßig in Produktion und Logistik Anwendung finden. Da sich nicht jede Datenbasis durch eine theoretische Verteilung abbilden lässt, sollte das Werkzeug darüber hinaus empirische Verteilungen unterstützen. Die *Flexibilität* stellt aufgrund der hohen Komplexität und Verschiedenartigkeit der betrachteten Systeme im SCM sowie der Vielfalt möglicher Zielstellungen ein wichtiges Kriterium dar. Im Rahmen dieses Kriteriums soll eine zusammenfassende Aussage bezüglich der Flexibilität getroffen werden, auch wenn die Eigenschaften, die ein Werkzeug flexibel gestalten, bereits in den vorherigen Kriterien geprüft wurden (vgl. Unterkapitel 3.4). Die *Animation* nimmt im Zuge der Supply-Chain-Simulation dagegen einen geringeren Stellenwert ein, kann allerdings bei der V&V, Ergebnisauswertung und -präsentation ein hilfreiches Instrumentarium darstellen, weshalb die *Animation* dennoch als Bewertungskriterium herangezogen wird. Neben der *Ergebnisauswertung und -ausgabe* ist die Untersuchung der *Schnittstellen* hinsichtlich der Simulation von Supply Chains im Besonderen hervorzuheben. Denn gerade um das Einlesen von Daten aus externen Datenbanken gewährleisten zu können, ist die Kompatibilität zu verschiedenen Systemen erforderlich, da Unternehmen gegebenenfalls auf unterschiedliche Datenbanksysteme zurückgreifen. Das Kriterium ‚Fehlersuche und -kontrolle‘ der VDI-Kriterienliste bezieht sich überwiegend auf die Suche von Programmierfehlern. Aus die-

sem Grund sollen mithilfe des angepassten Kriteriums *Unterstützung bei Verifikation und Validierung* darüber hinaus weitere Methoden der Software zur V&V untersucht werden. Im Zuge dessen gilt es zu prüfen, ob Teilmodelle sowie einzelne Steuerungsstrategien unabhängig voneinander getestet werden können und die Technik der Trace-Analyse unterstützt wird. Hinsichtlich der ‚Laufzeitvariation‘ ist eine Untersuchung der Ausführungsgeschwindigkeit der Simulation durchaus aufschlussreich. Allerdings kann ein mögliches Ergebnis zum einen aufgrund fehlender Vergleichbarkeit nicht eingeordnet werden und zum anderen ginge ein umfassendes Testverfahren über den Rahmen dieser Arbeit hinaus. Daher wird dieses Kriterium für die Bewertung in dieser Arbeit nicht herangezogen.

## 4.2 Anwendung der Kriterienliste auf Tecnomatix Plant Simulation

### 4.2.1 Systemumgebung

#### Softwarebezeichnung und Hersteller

Tecnomatix Plant Simulation, im Weiteren Plant Simulation genannt, ist eine Simulationssoftware, die ursprünglich am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) unter dem Namen Simple++ entwickelt wurde (Eley 2012). Die Software wurde stetig weiterentwickelt und gehört heute zur Produktfamilie von Siemens PLM Software. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Plant Simulation Version 13.0 untersucht.

#### Marktpräsenz und Referenz

Plant Simulation wird überwiegend in Produktion, Logistik und Engineering in nahezu allen Branchen, von der Automobilindustrie über den Anlagenbau bis hin zu Krankenhäusern, eingesetzt (Siemens PLM 2008). Plant Simulation ist dabei eines der gängigsten Werkzeuge mit mehreren tausend Installationen (Eley 2012). Mit dem Bausteinkasten SimChain bietet die SimPlan AG, Simulationsdienstleister in Produktion und Logistik, ein Simulationswerkzeug, welches speziell zur Modellierung und Analyse von Supply Chains entwickelt wurde und auf Plant Simulation basiert. Die Anwendung von SimChain erfolgt dabei mittels Web-Applikation, für den Nutzer somit unabhängig von Plant Simulation (SimPlan AG 2018b). Hinsichtlich der Supply-Chain-Simulation bietet weiterhin iSILOG, ebenso Simulationsdienstleister, eine Bausteinbibliothek für Plant Simulation, die allerdings speziell auf die Braubranche zugeschnitten ist (iSILOG 2018). Über einen weiteren Einsatz des Werkzeugs von Unternehmen zur Simulation von Supply Chains konnten keine Informationen gewonnen werden. In einigen Forschungsarbeiten zur Supply-Chain-Simulation fand Plant Simulation jedoch Anwendung.

#### Anwenderunterstützung und Systempflege

Neben kurzen Einführungsvideos zur Anwendung der Software und einer Vielzahl kleiner Beispielmodelle, an denen sich der Anwender orientieren kann, wird der Software ein umfangreiches Handbuch beigelegt. Dieses Handbuch enthält dabei sowohl Schritt-für-Schritt-Anleitungen für die Anwendung als auch Informationen zu jeglichen Objekten, Attributen und sonstigen Funktionen des Werkzeugs. Kostenpflichtige Schulungskurse für die Anwendung von Plant Simulation werden unter anderem von SimPlan, offizieller Siemens Solution Partner, durchgeführt. Neben

Basis- und Expertenschulungen bietet SimPlan Schulungen für den Umgang mit Datenbanken und die Anfertigung von 3D-Animationen an (SimPlan AG 2018a). Spezielle Schulungskurse für die Supply-Chain-Simulation finden jedoch nicht statt. In einem jährlich stattfindenden Anwendertreffen können zudem Erfahrungen ausgetauscht und hilfreiche Tipps für den Umgang mit der Software hinzugewonnen werden (Siemens PLM 2018).

## 4.2.2 Softwareleistung

### Simulationsansatz

Bei Plant Simulation handelt es sich um ein ereignisdiskretes Simulationswerkzeug. Somit kommt die Software grundsätzlich für die Supply-Chain-Simulation infrage (vgl. Unterkapitel 3.1) und kann weiter untersucht werden. Plant Simulation zeichnet sich durch ein bausteinorientiertes Modellierungskonzept aus, welches ebenso Konzepte der objektorientierten Modellierung unterstützt. So stehen Eigenschaften wie Vererbung, Hierarchie und Polymorphismus zur Verfügung (Siemens PLM 2008, 2016).

### Modellgröße und Dimension

Die maximale Anzahl an statischen Objekten, die in einem Simulationsmodell eingesetzt werden können, variiert je nach Lizenzart. So sind Modelle bei der „Standard“-Lizenz auf 4.000 und der „Educational“-Lizenz auf 1.000 Objekte beschränkt. Folgende Elemente werden dabei nicht mitgezählt und können unbegrenzt eingesetzt werden (Siemens PLM 2016):

- Methode
- Kommentar
- Variable
- Kante
- Übergang
- Fördergut, Förderhilfsmittel, Fahrzeug
- Listen und Tabellen

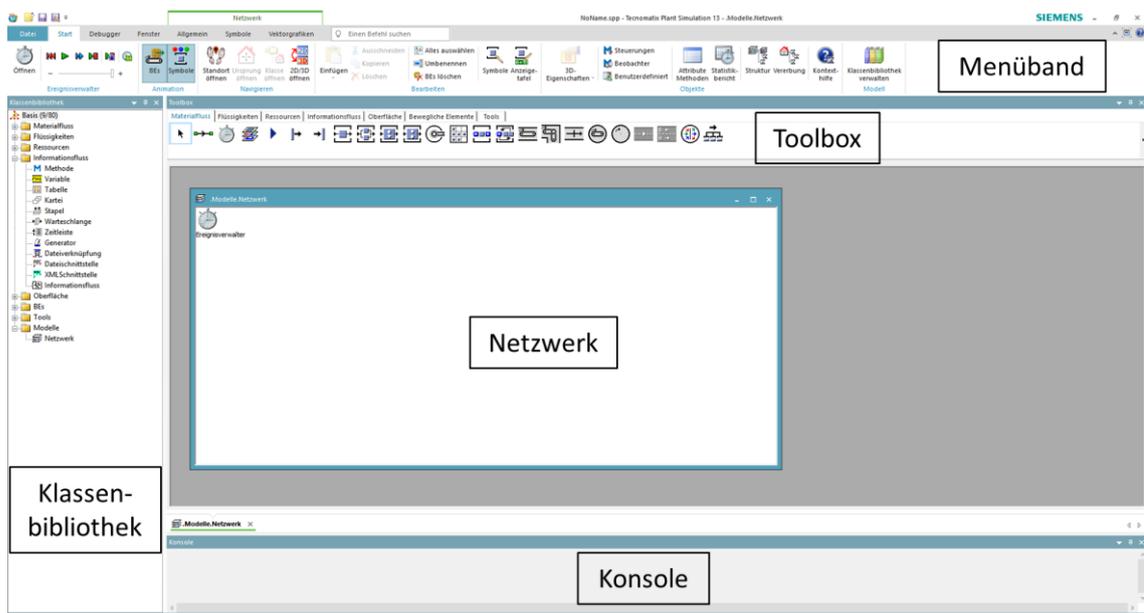
Bei allen weiteren Lizenzarten können generell beliebig viele Objekte modelliert werden, weshalb diese Lizenzarten für die Simulation von Supply Chains zu präferieren sind. Zu beachten ist jedoch, dass eine hohe Anzahl eingesetzter Objekte eine hohe Rechenleistung erfordert, um eine flüssige Handhabung und Modellierung gewährleisten zu können. Weiterhin ist die Anzahl dynamischer Objekte, wozu die Elemente Fördergut, Förderhilfsmittel und Fahrzeug gehören, unbegrenzt (Siemens PLM 2016). Allerdings wirkt sich eine große Anzahl dynamischer Objekte negativ auf die Simulationsgeschwindigkeit aus. Aufgrund dessen und der häufig großen Anzahl statischer Objekte ist für die Supply-Chain-Simulation eine leistungsfähige Hardware zu empfehlen.

### Modellierung und Modellelemente

Simulationsmodelle werden in Plant Simulation auf sogenannten Netzwerken (vgl. Abbildung 3) erstellt. Zur Modellierung werden die vorkonfigurierten Modellelemente, die in der Klassenbibliothek bereitgestellt werden, per Drag & Drop auf ein Netzwerk gezogen oder per Codeanwei-

sung auf einem Netzwerk generiert. Die Modellierung kann dabei sowohl in 2D als auch 3D erfolgen. Die Position der einzelnen Objekte auf einem Netzwerk kann in beiden Fällen beliebig angepasst werden. Für eine optimierte Bedienung ist es zudem möglich, z. B. häufig verwendete Objekte auf verschiedenen Registerkarten in der Toolbox abzulegen. Darüber hinaus erweist sich die Möglichkeit, das obige Menüband frei gestalten zu können, als bedienerfreundlich. In unterschiedlichen Registerkarten können so zahlreiche Befehle nach dem eigenen Belieben übersichtlich angeordnet werden. (Siemens PLM 2016)

Die vorkonfigurierten Modellelemente werden je nach Eigenschaft in der Klassenbibliothek in den unterschiedlichen Kategorien Materialfluss, Ressourcen, Flüssigkeiten, Informationsfluss, Oberfläche, bewegliche Objekte (BE) sowie Tools bereitgestellt. In der Regel enthält jedes Simulationsmodell mindestens ein Objekt der Materialflussobjekte Netzwerk, Quelle und Senke. Die Quelle produziert BEs wie Fördergüter und stellt daher den Wareneingang dar. Im Gegensatz dazu nimmt die Senke BEs auf und repräsentiert so den Warenausgang. Weiterhin benötigt jedes Modell einen Ereignisverwalter, der ebenfalls den Materialflussobjekten zugeordnet ist. Der Ereignisverwalter koordiniert und synchronisiert Ereignisse, die während des Simulationslaufes stattfinden. So kann ein Simulationslauf mithilfe des Ereignisverwalters gestartet, angehalten und zurückgesetzt werden. Des Weiteren beinhaltet Plant Simulation einige Materialflussobjekte, die insbesondere für die Entwicklung von Simulationsmodellen im Rahmen der Produktionsplanung, aber auch des Bestandsmanagements genutzt werden können. Hierzu zählen neben dem Lager, Puffer, Sortierer, Einzel- und Parallelstation, Montage- und Demontagestation auch die Objekte Takt und Flusssteuerung. Zur detaillierteren Abbildung innerbetrieblicher Prozesse stehen überdies weitere Materialflussobjekte zur Auswahl. Solch detaillierte Betrachtungen finden im Rahmen der Supply-Chain-Simulation allerdings in der Regel nicht statt, weshalb auf diese Elemente nicht weiter eingegangen wird. (Siemens PLM 2016)



**Abbildung 3: Arbeitsoberfläche von Plant Simulation**

Mithilfe der Objekte Lager, Puffer und Sortierer können Lagerprozesse abgebildet werden. Das Lager besitzt eine beliebige Anzahl von Plätzen, die matrixförmig angeordnet sind. Solange noch

Plätze frei sind, nimmt das Lager BEs auf und lagert diese bis sie wieder mit einer Methode entnommen werden. Methoden sind Objekte, die durch die Eingabe von Codeanweisungen unter anderem dazu dienen, Steuerungen zu erstellen. Da es sich bei Methoden um Objekte des Informationsflusses handelt, wird deren Funktionsweise im Rahmen des folgenden Kriteriums näher erläutert. (Bangsow 2011)

Auch Puffer können BEs bis zur definierten Kapazität aufnehmen. Sie dienen dabei als Ausgleichselemente zwischen zwei Komponenten, da sie BEs aufnehmen können, wenn nachfolgende Komponenten belegt sind, und BEs abgeben können, wenn die vorgeschalteten Komponenten stillstehen. Der Unterschied zum Lagerobjekt liegt darin, dass die Ausgangsreihenfolge dem LIFO- oder FIFO-Verfahren folgt und daher keine bestimmten BEs abgegeben werden können. Eine Methodensteuerung ist deshalb nicht erforderlich. Der Sortierer weist ein ähnliches Funktionsprinzip wie der Puffer auf und kann BEs im Gegensatz zum Puffer in einer geänderten Reihenfolge wieder abgeben. Die Austrittsreihenfolge richtet sich hier nach definierbaren Prioritäten. Einzel- und Parallelstationen dienen zur Abbildung von Bearbeitungsplätzen. Während die Einzelstation einen Arbeitsplatz besitzt, um ankommende BEs zu bearbeiten, kann eine Parallelstation mit beliebig vielen Arbeitsplätzen ausgestattet werden. Die übrigen Eigenschaften gleichen sich. Bei beiden Objekten werden so BEs vom Vorgänger aufgenommen und nach Ablauf von festzulegenden Rüst- und Bearbeitungszeiten an den Nachfolger abgegeben. (Siemens PLM 2016)

Zur Modellierung von Montageprozessen steht das Objekt Montagestation zur Verfügung, welches Anbauteile an ein Hauptteil anbaut. Somit ist dieses Objekt insbesondere für die Produktionsplanung relevant. Daneben kann mithilfe der Montagestation auch das Verpacken von Teilen und das Zusammenführen von Ladehilfsmittel und Fördergut modelliert werden. Konträr zur Montagestation lädt die Demontagestation Anbauteile vom Hauptteil ab oder vernichtet das Hauptteil und dient so der Abbildung von Demontage-, aber auch Entladevorgängen. (Bangsow 2011)

Die Materialflussobjekte Takt und Flusststeuerung dienen ebenso wie einige Informationsflussobjekte der Steuerung von Materialflüssen und werden deshalb im Rahmen des folgenden Kriteriums weiter betrachtet. Flüssigkeitsobjekte dienen der Simulation freifließender Materialien in flüssiger, gasförmiger oder schüttbarer Form (Siemens PLM 2016). Da diese im Rahmen von Supply-Chain-Simulationen eher in Ausnahmefällen auftreten, werden Flüssigkeitsobjekte nicht weiter behandelt. Objekte der Kategorie Ressource können des Weiteren für die Simulation von Mitarbeitern verwendet werden. Allerdings steht die Simulation von Personal nicht im Fokus der Supply-Chain-Simulation, weshalb auch auf diese Objekte nicht näher eingegangen wird.

Die unterschiedlichen Plant Simulation Objekte besitzen eine Vielzahl von teils individuellen Attributen. Attribute des Puffers sind beispielsweise die Kapazität und der Puffertyp (Stapel oder Warteschlange). Zusätzlich zu den bereits implementierten Attributen können für die meisten Objekte eigene, benutzerdefinierte Attribute erstellt werden, um den eigenen Modellierungsanforderungen gerecht zu werden. Zur Definition der benutzerdefinierten Attribute steht eine Reihe von Datentypen zur Auswahl. (Siemens PLM 2016)

Zum Abschluss der Untersuchung der vorkonfigurierten Modellelemente kann konstatiert werden, dass keine Objekte zur Touren- und Standortplanung, Simulation von SC-Risiken sowie einer optimierten Lieferantenauswahl in Plant Simulation enthalten sind. Bevor diesbezüglich jedoch ein Fazit getroffen wird, sollen die Möglichkeiten zur Modellierung der genannten Einsatzgebiete im Rahmen des Kriteriums Bausteinbibliotheken weiter untersucht werden. Auch auf die Eignung hinsichtlich des Bestandsmanagements und der Produktionsplanung soll dabei noch näher eingegangen werden. Aufgrund der übersichtlichen Oberfläche, deren individuellen Gestaltungsmöglichkeiten und der Drag & Drop Bedienung erweist sich die Modellierung selbst jedoch als sehr komfortabel.

### Steuerungen und Programmierung

Grundsätzlich erfolgt die Steuerung des Materialflusses in Plant Simulation mithilfe des Objekts Kante. Damit BEs von einem Objekt auf ein Nachfolgerobjekt umgelagert werden, werden die zwei aufeinander folgenden Objekte über eine Kante miteinander verbunden. Dabei kann ein Objekt sowohl mehrere Vorgänger- als auch Nachfolgerobjekte besitzen. Bei vielen Objekten kann eine Ausgangsstrategie festgelegt werden, nach der das Nachfolgerobjekt, auf welches ein BE umgelagert werden soll, ausgewählt wird. Alternativ dazu kann eine Flusssteuerung zwischen mindestens zwei Objekten geschaltet werden. Die Flusssteuerung ist ein Objekt, welches selbst keine BEs aufnimmt, aber das Materialflussverhalten zwischen den Vorgängern und Nachfolgern definiert. Mithilfe der Flusssteuerung können zusätzliche Umlagerstrategien bei mehreren Nachfolgerobjekten realisiert werden. Außerdem dient die Flusssteuerung zur Festlegung eines Eingangsverhaltens bei mehreren vorgeschalteten Objekten. (Siemens PLM 2016)

Ein weiteres Objekt zur Steuerung des Materialflusses ist das Takt-Objekt, mit dem eine Reihe von Einzel-, Parallel-, Montage- und Demontagestationen synchronisiert werden können. Das Objekt ermöglicht es, einen Taktbereich festzulegen. BEs werden dabei nur dann weitergegeben, wenn alle Stationen im Taktbereich fertig und nachfolgende Objekte aufnahmebereit sind. (Bangsow 2011)

Weiterhin verfügt Plant Simulation über die eigene Programmiersprache SimTalk, die von der Syntax an die Programmiersprache Pascal und an Visual Basic angelehnt ist und die Möglichkeiten der Modellierung erheblich erweitert. Durch die Eingabe von SimTalk-Anweisungen in das Objekt Methode können benutzerdefinierte Steuerungen sowie Funktionen zum Aufbau und der Analyse von Simulationsmodellen erstellt werden. (Eley 2012)

SimTalk beinhaltet eine Vielzahl von Befehlen und Anweisungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter vorgestellt werden können. Herauszustellen ist jedoch, dass alle Objektattribute mithilfe von SimTalk ausgelesen und angepasst sowie eigene Attribute erstellt werden können. Zur Unterstützung des Anwenders werden die SimTalk-Anweisungen im Handbuch erläutert und Vorlagen zur Programmierung zur Verfügung gestellt. Um Methoden aufzurufen, gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, auf die nur beispielhaft eingegangen werden kann. Beispielsweise können Methoden als Eingangs- oder Ausgangssteuerung eines Objekts festgelegt werden. Diese Methoden werden aufgerufen, sobald ein BE in das Objekt eintritt bzw. dieses verlässt. Daneben

können Methoden auch von anderen Methoden oder z. B. bei dem Auftreten von Störungen aufgerufen werden. Des Weiteren können mithilfe von Methoden Variablen, Tabellen und Listen erstellt sowie auf bereits bestehende zugegriffen werden. (Siemens PLM 2016)

Obwohl Plant Simulation umfangreiche Standardsteuerungen zur Entwicklung von Simulationsmodellen bietet, wird man dennoch nur in sehr einfachen Modellen ohne den Einsatz von eigens programmierten Methoden auskommen. Mit SimTalk steht dem Anwender allerdings eine sehr umfassende Programmiersprache zur Verfügung, die bei der Realisierung von benutzerdefinierten Steuerungen kaum Grenzen setzt. Da es sich dabei um eine eigene Programmiersprache handelt, die eine Vielzahl von Funktionen und eigenen Anweisungen aufweist, ist eine entsprechende Einarbeitungszeit vonnöten.

### Bausteinbibliotheken

Neben vorkonfigurierten Objekten enthält Plant Simulation auch bereits einige vorgefertigte Bausteine. Ein Baustein, der grundsätzlich im Rahmen des SCM relevant sein kann, ist der Baustein Genetische Algorithmen. Dieser Baustein dient unter anderem zur Optimierung von Reihenfolgeaufgaben wie das Maschinenbelegungsproblem oder Traveling Salesman Problem (TSP). Das Maschinenbelegungsproblem ist eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Produktionsplanung, bei dem es eine Menge von Aufträgen auf verschiedene Maschinen, mit dem Ziel, die Durchlaufzeit minimal zu halten, zu verteilen gilt (Völker und Schmidt 2010).

Anstelle von Maschinen können jedoch auch Produktionsstätten betrachtet werden. Die Optimierungsaufgabe besteht dann in der Bestimmung der Auftragsreihenfolge und Zuordnung von Aufträgen zu den Produktionsstätten, mit dem Ziel, die Lieferbereitschaft und Termintreue zu erhöhen. Im Gegensatz zur Optimierung des Maschinenbelegungsproblems scheint der Baustein weniger für die Optimierung des TSP und somit der Tourenplanung geeignet. Zwar enthält die Software sogar ein Beispielmodell zur Optimierung des TSP, laut Modellbeschreibung wurden die eingesetzten Lösungsmethoden des TSP allerdings speziell für Sequenzprobleme entwickelt und können nicht einfach auf komplexe zusammengesetzte praktische Probleme übertragen werden. (Siemens PLM 2016)

Des Weiteren ist der Baustein Wertstromanalyse im Rahmen des SCM von Relevanz. Da die Wertstromanalyse insbesondere zur transparenten Darstellung von Prozessen und der Analyse des Ist-Zustands eines Systems dient (vgl. Unterkapitel 2.2), zählt die Wertstromanalyse nicht zur Supply-Chain-Simulation im eigentlichen Sinne. Dennoch kann der Baustein für Unternehmen, die Wertstromanalysen durchführen bzw. deren Durchführung in Erwägung ziehen, ein Argument für den Erwerb von Plant Simulation darstellen. Allerdings ist der Baustein nur in der „Runtime“- sowie „Research“-Lizenz enthalten und muss bei allen weiteren Lizenzarten zusätzlich erworben werden (Siemens PLM 2016).

Aufgrund des hierarchischen Ansatzes von Plant Simulation können Simulationen in verschiedene Netzwerke aufgeteilt und in einem übergeordneten Netzwerk zusammengefasst werden. Mithilfe eines Netzwerkbausteins sowie den weiteren Objekten und Methoden können so benutzerdefinierte Bausteine entwickelt und in der Klassenbibliothek gespeichert werden. Ein neuer Baustein kann dabei wie jeder andere Baustein verwendet und auch in zukünftigen Simulationsmodellen eingesetzt werden. (Siemens PLM 2016)

Durch die vielen Funktionen und die implementierte Programmiersprache sind die Möglichkeiten zur Entwicklung benutzerdefinierter Bausteine sehr vielfältig, was sich gerade bei der Supply-Chain-Simulation durch die individuellen Eigenschaften eines Systems als hilfreich erweist. Allerdings ist die Entwicklung von Bausteinen zweifelsohne mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden. Aufgrund des hohen Aufwandes sowie der fehlenden bzw. ungeeigneten Objekte und Bausteine ist der Einsatz von Plant Simulation für die Standort- und Tourenplanung trotz des hierarchischen Ansatzes wenig zu empfehlen. Da für die Produktionsplanung bereits einige Objekte zur Auswahl stehen und die Entwicklung benutzerdefinierter Bausteine unterstützt wird, ist der Einsatz von Plant Simulation hingegen für diesen Bereich möglich. Inwieweit sich die vorhandenen Objekte und Bausteine letztlich für den Einsatz des Werkzeugs hinsichtlich der Simulation von SC-Risiken, der optimierten Lieferantenauswahl sowie des Bestandsmanagements eignen und Plant Simulation für diese Einsatzgebiete empfohlen werden kann, soll durch die Entwicklung eines Simulationsmodells in einem praktischen Anwendungsbeispiels näher untersucht werden.

#### Datenaufbereitung und stochastische Verteilungen

Mit Ausnahme der Bernoulli-Verteilung stellt Plant Simulation alle in der Kriterienliste aufgeführten Verteilungen zur Verfügung. Daneben stehen eine Reihe weiterer statistischer Verteilungen zur Auswahl. Der Typ der Verteilung sowie die Verteilungsparameter können in der Registerkarte „Zeiten“ je nach Objekt für die Bearbeitungs-, Rüst-, Erhol- und Zykluszeit ausgewählt werden. Daneben können die verschiedenen Verteilungen auch mit SimTalk-Funktionen erzeugt und benutzerdefinierte Verteilungen, beispielweise mithilfe von Formeln, erstellt werden. Zur Modellierung von realitätsnahen Situationen, in denen z. B. Störungen von Maschinen auftreten, können außerdem unter Auswahl der gewünschten Verteilung in den Einstellungen der unterschiedlichen Objekte Störungsprofile angelegt werden. (Siemens PLM 2016)

Zur Aufbereitung von Eingangsdaten steht das Objekt DataFit zur Verfügung. Das Objekt dient dazu, aus beobachteten Daten einer zufälligen Größe die Parameter zu finden, sodass die Verteilung die Eigenschaften der Stichprobe möglichst adäquat widerspiegelt. Mittels Anpassungstest (Chi-Quadrat-, Kolmogorov-Smirnov- oder Anderson-Darling-Test) wird dabei unter Vorgabe einer Irrtumswahrscheinlichkeit entschieden, ob eine ausgewählte Verteilung zur Simulation der Stichprobe verwendet werden kann. Außerdem beinhaltet Plant Simulation weitere statistische Werkzeuge zur Berechnung von Konfidenzintervallen, Durchführung von Regressions-, Varianzanalysen und Unabhängigkeitstests sowie zur Bestimmung von Parametern beschränkter Verteilungen. (Siemens PLM 2016)

Die große Auswahl implementierter Verteilungen und statistischer Werkzeuge, insbesondere zur Datenaufbereitung, sind hinsichtlich der Supply-Chain-Simulation als positiv zu werten. Auch die Möglichkeit zur Berücksichtigung von Störungen ist gerade für die Modellierung von Ausfällen in der Produktion hilfreich.

#### Flexibilität

Plant Simulation erfüllt alle Anforderungen, die zu einer hohen Flexibilität bei der Modellierung beitragen (vgl. Unterkapitel 3.4). Neben den zahlreichen Verteilungen sind insbesondere die Möglichkeiten zur Entwicklung eigener Bausteine sowie die umfassende Programmiersprache

hervorzuheben. Dem Anwender werden somit ausreichend Freiheiten bei der Modellierung gewährt.

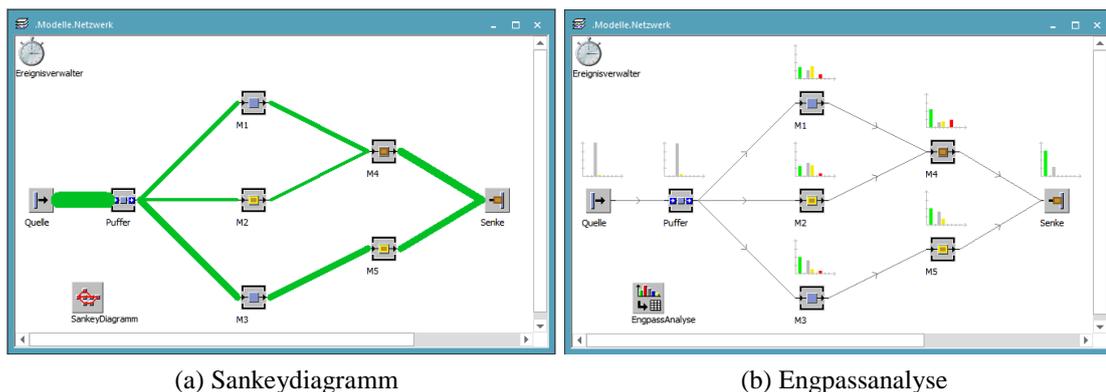
### Animation

Plant Simulation integriert sowohl eine 2D- als auch 3D-Animation, wobei das Animationslayout dem Simulationslayout entspricht. Die Animation läuft dabei simultan zur Simulation ab, die Animationsgeschwindigkeit entspricht also der Simulationsgeschwindigkeit. Zur Beschleunigung der Simulationsgeschwindigkeit kann die Animation deaktiviert werden. Während der Animation ist die Bedienung des Modells nicht eingeschränkt, d. h. das Öffnen und Schließen von Netzwerken oder Dialogfenstern der Objekte ist weiterhin möglich. An den Objektsymbolen werden zudem standardmäßig LEDs angezeigt, um verschiedene Zustände anzuzeigen. Um gewisse Zustände noch deutlicher hervorzuheben, besteht die Möglichkeit der Verwendung von Zustandssymbolen, die aber eigens erstellt werden müssen. (Siemens PLM 2016)

Für die Entwicklung von ansehnlichen 3D-Animationen ist Plant Simulation weniger geeignet, da die Auswahl an 3D-Objekten und deren Detailtreue recht eingeschränkt ist. Im Rahmen der Supply-Chain-Simulation sind 3D-Animationen allerdings auch nicht notwendig. Dahingegen sind die Grafik und die vorhandenen Funktionen der 2D-Animation für die Ergebnispräsentation und V&V ausreichend.

### Ergebnisauswertung und -ausgabe

Zur Unterstützung der Ergebnisauswertung enthält Plant Simulation die Werkzeuge Sankey-Diagramm und Engpassanalyse (vgl. Abbildung 4). Mithilfe des Sankey-Diagramms wird die Verteilung des Materialflusses durch Linien unterschiedlicher Stärke anschaulich visualisiert. Die Engpassanalyse dient ebenso zur Analyse und Visualisierung des Materialflusses. Der Baustein visualisiert dabei die Statistikdaten der Materialflussobjekte und deckt so mögliche Engpässe auf. (Siemens PLM 2016)



**Abbildung 4: Werkzeuge zur Ergebnisauswertung**

Weiterhin erstellt die Software für jedes Materialflussobjekt automatisch einen Statistikbericht. Durch die Auswahl bestimmter Objekte können so mit geringem Aufwand individuelle Berichte erstellt werden. Unter Zuhilfenahme des Diagramm-Bausteins können statistische Daten grafisch dargestellt werden. Der Baustein visualisiert dabei entweder den Inhalt eigens erzeugter Tabellen oder Eingangskanäle, die auf Werte, wie z. B. bestimmte Attribute eines Objekts, verweisen. Zur freien Gestaltung der Diagramme stehen diverse Diagrammtypen und sonstige Anzeigoptionen

zur Auswahl. Eine weitere Möglichkeit der Ergebnisdarstellung bietet der Baustein HtmlBericht, der das Erzeugen eines individuellen Ergebnisberichts ermöglicht. Neben allgemeinen Modellinformationen und Statistiken ausgewählter Objekte kann dieser Bericht um Diagramme ergänzt werden. (Siemens PLM 2016)

Die Möglichkeiten zur Auswertung und Darstellung von Ergebnissen sind in Plant Simulation somit sehr vielfältig.

Darüber hinaus steht zur Unterstützung bei der Durchführung von Experimenten der Experimentverwalter zur Verfügung. Mithilfe des Experimentverwalters können Veränderungsschritte der Eingangsgrößen, zu beobachtende Ergebniswerte sowie die Anzahl der Simulationsläufe definiert werden, die Plant Simulation dann eigenständig ausführt. Die Ergebnisse der Läufe werden aufgezeichnet und für weitere Auswertungen zur Verfügung gestellt. (Siemens PLM 2016)

### Schnittstellen

Neben einer XML-Schnittstelle für den lesenden und schreibenden Zugriff auf XML-Dateien stellt Plant Simulation eine Excel-Schnittstelle zur Verfügung. Die integrierte DDE-Schnittstelle ermöglicht dabei den Zugriff auf das Kommunikationssystem DDE (Dynamic Data Exchange), welches Microsoft Windows zur Verfügung stellt, sodass Daten aus Excel eingelesen bzw. aus Plant Simulation in Excel herausgelesen werden können. Auch das Fernsteuern von Plant Simulation aus Excel ist möglich. Für den Zugriff auf weitere relevante Schnittstellen ist das Interface-Paket erforderlich, welches nur in der „Runtime“- und „Research“-Lizenz enthalten ist. Für alle weiteren Lizenzarten ist das Paket optional zu erwerben. Im Hinblick auf Supply-Chain-Simulationen sind dabei besonders die ODBC-, Oracle- und SQL-Datenbankschnittstellen des Pakets von Relevanz. Aber auch die ActiveX- und C-Schnittstelle erweitern die Funktionsmöglichkeiten der Software. Eine direkte Anbindung an die ERP-Ebene ist hingegen nicht implementiert, sodass eine Kompatibilität nur dann erreicht wird, wenn die Daten aus dem ERP-System in eine Datenbank exportiert werden. (Siemens PLM 2016)

Die große Auswahl an Schnittstellen, insbesondere die Unterstützung verschiedener Datenbanksysteme, erweist sich insgesamt trotz der fehlenden ERP-Anbindung als sehr positiv.

### Unterstützung bei Verifikation und Validierung

Zum Auffinden von Programmierfehlern wird der Anwender durch verschiedene Hilfen unterstützt. Beispielsweise werden Syntaxfehler im Programmcode vor dem Abspeichern einer Methode direkt angezeigt. Außerdem steht ein Methoden-Debugger zur Verfügung, der es dem Anwender ermöglicht, seinen implementierten Programmcode schrittweise durchzugehen und so Fehler aufzuspüren und zu kontrollieren, ob sich das Simulationsmodell wie gewünscht verhält. (Eley 2012)

Tritt während eines Simulationslaufs ein Fehler innerhalb einer Methode auf, öffnet sich zudem der Debugger und zeigt eine entsprechende Fehlermeldung an. Um mögliche Laufzeitfehler aufzudecken, kann weiterhin der Profiler eingesetzt werden. Der Profiler zeichnet während eines Simulationslaufs Laufzeiten und Aufrufhäufigkeiten der einzelnen Methoden auf und kann so dabei helfen, die Simulationsgeschwindigkeit zu minimieren. (Siemens PLM 2016)

Außer den genannten Funktionen, um Fehler im Programmcode aufzudecken, sind durch den hierarchischen Ansatz von Plant Simulation Tests von Teilmodellen möglich. Hierzu müssen die jeweiligen Bausteine und Teilmodelle jedoch angepasst werden. Ebenso ist es möglich, einzelne Steuerungsstrategien unabhängig voneinander zu testen, wenngleich auch hierfür Anpassungen vorgenommen werden müssen. Neben der bereits erläuterten Animation kann zudem die Technik des Monitoring aufgrund der genannten Funktionen zur graphischen Darstellung von Zustandsgrößen und Variablen angewendet werden. Auch bei der Anwendung der Trace-Analyse wird der Anwender unterstützt. Der integrierte Ereignisdebugger ermöglicht es, alle Ereignisse sowie nur die interessierenden Ereignisse gefiltert in einer Datei aufzuzeichnen, um beispielsweise ein BE innerhalb des Modells zu verfolgen. Mithilfe des Ereignisdebugger können zudem Bedingungen, wann die Simulation angehalten werden soll, definiert sowie die Abarbeitung von Ereignissen verfolgt werden. (Siemens PLM 2016)

Weitere Funktionen zur V&V stehen in Plant Simulation nicht zur Verfügung, die grundlegenden Methoden und Techniken werden jedoch unterstützt.

#### Qualifikationsanforderungen

Da die Modellierungsmöglichkeiten in Plant Simulation ohne den Einsatz von Methoden begrenzt sind und so bereits bei simplen Modellen die Entwicklung von Programmcode notwendig ist, sollte der Anwender zumindest über grundlegende Programmierkenntnisse verfügen. Aufgrund der Notwendigkeit zur Modifikation vorhandener Bausteine und Objekte bzw. zur Entwicklung eigener Bausteine sind ebenso Erfahrungen in der Simulation zu empfehlen. Eine umfassende Einarbeitung in die Software ist jedoch auch bei vorhandener Simulationserfahrung und Programmierkenntnissen in Anbetracht zahlreicher Funktionen sowie der eigenen Programmiersprache unvermeidbar.

## 5 Entwurf eines Supply-Chain-Simulationsmodells

Um ein strukturiertes und systematisches Vorgehen zu gewährleisten, folgt der Entwurf des Simulationsmodells in den Grundzügen dem in Unterkapitel 3.1 vorgestellten Vorgehensmodell, auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine Simulationsstudie durchgeführt wird. Da das Simulationsmodell kein reales System abbildet sowie keine Echtdaten berücksichtigt werden, finden die Phasen Datenbeschaffung und -aufbereitung keine Anwendung. Ebenso ist die Durchführung von Experimenten und Analysen für die Untersuchung im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant.

### 5.1 Zielbeschreibung und Aufgabendefinition

Wie in Abschnitt 4.2.2 bereits angedeutet wurde, soll die Entwicklung eines Supply-Chain-Simulationsmodells dazu dienen, anhand eines praktischen Beispiels zu untersuchen, inwieweit sich Plant Simulation für den Einsatz hinsichtlich der optimierten Lieferantenauswahl, des Bestandsmanagements sowie der Simulation von SC-Risiken eignet. An dieses Primärziel sind einige Sekundärziele geknüpft. So gilt es, im Rahmen der Entwicklung des Simulationsmodells insbesondere festzustellen, inwieweit auf vorhandene Modellelemente zurückgegriffen werden kann oder die Schaffung zusätzlicher Komponenten erforderlich ist. Neben dem Aufwand, der für die Entwicklung von Komponenten aufgebracht werden muss, sollen zudem Schwierigkeiten, die gegebenenfalls dabei auftreten, herausgearbeitet werden. Weiterhin soll die Unterstützung von Plant Simulation bei der V&V anhand des Modells noch einmal genauer geprüft werden.

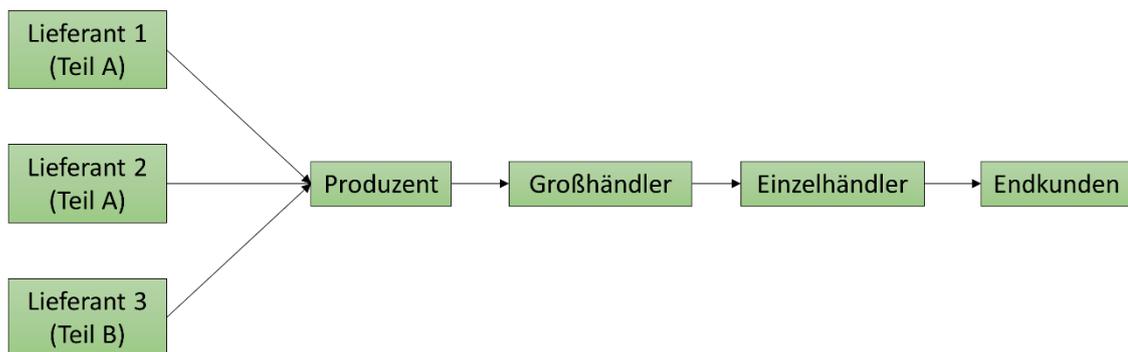
Zur Untersuchung der Eignung hinsichtlich der optimierten Lieferantenauswahl soll das Modell mehrere Lieferanten abbilden, die das gleiche Produkt liefern, jedoch unterschiedliche Preise und Lieferzeiten aufweisen. Dies bietet aus Sicht des Unternehmens, welches das Produkt bezieht, die Möglichkeit zu testen, welcher der Lieferanten insgesamt zu den geringeren Kosten führt. Im Zuge der Lieferantenauswahl soll außerdem geprüft werden, ob die Implementierung von abgestuften Preismodellen zu realisieren ist. Um die Einsatzmöglichkeiten bezüglich der Simulation von SC-Risiken näher zu untersuchen, sollen Lieferverzögerungen sowie komplette Ausfälle von Lieferungen über einen gegebenen Zeitraum in das Modell integriert werden. Der Fokus liegt dabei auf der Analyse der Auswirkungen von Lieferausfällen und -verzögerungen auf eine gesamte Supply Chain. Hierzu sowie zur Untersuchung der Eignung des Werkzeugs hinsichtlich des Bestandsmanagements sollen mehrere Akteure einer gemeinsamen Supply Chain abgebildet werden, die ihren Lagerbestand mittels (s, Q)-Bestellpunktregel organisieren. Das Ziel von möglichen Experimenten stellt dabei die Bestimmung von optimalen Bestellmengen und Bestellpunkten bei minimalen Gesamtkosten entlang der gesamten Supply Chain dar.

Nun wurden die grundlegenden Bestandteile, die in das Simulationsmodell zur Untersuchung des Werkzeugs im Hinblick auf die genannten Einsatzbereiche integriert werden sollen, genannt. Wie diese Einzelteile in einem Gesamtmodell zusammengefügt werden, wird ausführlich in der Systemanalyse erläutert.

An dieser Stelle sei noch hervorzuheben, dass die Durchführung von Experimenten und Analysen zwar kein Bestandteil dieser Arbeit ist, das Simulationsmodell jedoch die Grundlage hierfür bieten soll. Daher sollen für eine mögliche Auswertung von Ergebnissen Visualisierungen implementiert werden. Aufgrund des begrenzten Umfangs dieser Arbeit wird jedoch auf die Bestimmung der Länge der Einschwingphase sowie der Anzahl erforderlicher Replikationen verzichtet.

## 5.2 Systemanalyse

Um die genannten Bestandteile in einem Simulationsmodell zu vereinen, soll eine fünf-stufige Supply Chain, bestehend aus drei Lieferanten, einem Produzenten, Großhändler, Einzelhändler sowie den Endkunden, abgebildet werden (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 5: Konzeptmodell**

Der Produzent fertigt aus zwei unterschiedlichen Halbfertigfabrikaten (Teil A und Teil B) ein Endprodukt auf Lager. Die Komponente der Produktion wird dabei zusätzlich in das Modell integriert, um die Supply Chain realitätsnäher zu gestalten. Für die Produktion eines Endprodukts werden eine Materialeinheit (ME) von Teil A und zwei ME von Teil B benötigt. Der Produzent liefert das Endprodukt an den Großhändler, der wiederum den Einzelhändler beliefert. Letztlich bedient der Einzelhändler die Endkunden. Prozesse nach dem Warenausgang beim Einzelhändler werden nicht abgebildet, womit der Warenausgang eine Systemgrenze darstellt. Während der Produzent jeweils ein Lager für Teil A und B sowie das Endprodukt besitzt, verfügen Groß- und Einzelhändler je über ein Lager für das Endprodukt. Die Auslösung von Bestellungen erfolgt, wie in der Aufgabendefinition festgelegt, nach der (s, Q)-Regel mit konstanter Bestellmenge und konstantem Bestellpunkt. Dieses Verfahren wird mit Ausnahme des Endproduktlagers des Produzenten für jedes Lager innerhalb der Supply Chain angewandt. Sobald also der Lagerbestand den Bestellpunkt unterschreitet, wird eine Bestellung ausgelöst. Zur Vereinfachung wird hierbei die Annahme getroffen, dass keine Nachlieferungen möglich sind, d. h. eine Bestellung wird erst dann ausgelöst, wenn die vorherige Bestellung eingetroffen ist. Ebenso werden keine alternativen Bezugsquellen zugelassen. Zudem wird angenommen, dass Bestellungen nur vollständig ausgeliefert werden. Übersteigt die Nachfrage den derzeitigen physischen Bestand, verbleibt diese als Auftrag bis sie bedient werden kann. Des Weiteren werden die Prozessschritte des Warenausgangs, wie die Kommissionierung, sowie Transportprozesse nicht im Detail abgebildet, sondern durch eine Auslieferzeit zusammengefasst. Auch die Wareneingänge werden nicht detailliert betrachtet, sondern zur Vereinfachung durch konstante Zeiten beschrieben.

Durch die Auswahlmöglichkeit des Produzenten Teil A entweder von Lieferant 1 oder Lieferant 2 zu beziehen, wird die Untersuchung der optimierten Lieferantenauswahl in das Modell integriert. Die Lieferanten unterscheiden sich hinsichtlich der Lieferfrist sowie Preismodellen. Von welchem Lieferanten das Teil bezogen wird, soll dabei vor der Ausführung des Modells festgelegt werden. Die Auswahlmöglichkeit für den Bezug von Teil A beschränkt sich auf zwei Lieferanten, da die Komponente Lieferant als wiederverwendbarer Baustein entwickelt werden soll und das Hinzufügen weiterer Lieferanten somit trivial ist. Die Lagerorganisation der Lieferanten soll weiterhin nicht in dem Modell abgebildet werden. Hierbei wird grundsätzlich angenommen, dass die Bestände der Lieferanten zur Bedienung der Bestellungen ausreichen. Prozesse vor dem Warenausgang der Lieferanten werden somit nicht abgebildet, wodurch der Warenausgang eine Systemgrenze darstellt. Sind Analysen der Auswirkungen von Lieferverzögerungen oder -ausfällen der Lieferanten auf die Supply Chain Bestandteil der Untersuchung, soll der Warenausgang der Lieferanten für die Dauer der Verzögerung bzw. Ausfalls blockiert werden, da es für die Analyse der Auswirkungen auf die Supply Chain nicht relevant ist, welche Prozesse die Verzögerungen und Ausfälle verursachen. Weiterhin soll die Auswahlmöglichkeit bestehen, das Auftreten von Lieferverzögerungen und/oder -ausfällen für jeden Lieferanten vor einem Simulationslauf aktivieren bzw. deaktivieren zu können.

Eine weitere generelle Annahme besteht darin, dass das System über den gesamten Tag arbeitet, d. h. Bestellungen zu jeder Zeit eingehen können und bearbeitet werden. Außerdem sollen beim Start eines Simulationslaufes die Läger in Höhe der festgelegten Bestellmenge gefüllt werden. Ausnahme bildet auch hier das Endproduktlager des Produzenten, dessen Auffüllmenge variabel gewählt werden soll.

Im Folgenden werden nun die Ein- und Ausgabegrößen des Modells definiert. Die Eingabegrößen der Lieferanten bilden neben den gestaffelten Preisangaben die fixen Bestellkosten, die je Bestellung anfallen. Eine weitere Eingabegröße bildet die Lieferfrist. Bei deaktivierter Lieferverzögerung entspricht die Lieferfrist der Auslieferzeit und wird als konstant angenommen. Bei aktivierter Lieferverzögerung wird die Auslieferzeit durch eine statistische Verteilung beschrieben. Um einen Lieferausfall abzubilden, sind der Zeitpunkt des Eintretens sowie die Dauer des Ausfalls festzulegen. Da bei aktivierten Verzögerungen und Ausfällen die Lieferfrist nicht der Auslieferzeit entspricht, bilden die durchschnittliche Ist-Gesamtlieferzeit sowie Verspätung Ausgabegrößen der Lieferanten. Zur Berechnung der Fehlmengenkosten ist zudem die Angabe der Fehlmengenkosten je ME und Tag erforderlich.

Die Eingabegrößen des Produzenten bilden neben der Bestellmenge und des Bestellpunktes zum Bestandsmanagement der Teile A und B die Bearbeitungszeit für die Produktion des Endprodukts, welche durch eine statistische Verteilung beschrieben wird. Weitere Eingabegrößen sind der Einstandspreis je Endprodukt sowie die fixen Bestellkosten je Bestellung. Zudem sind die benötigten Zeiten für die Einlagerungen in die Läger der Teile A und B sowie in das Endproduktlager und die Auslagerung aus den Teilelagern festzulegen. Auch beim Produzenten entspricht die Lieferfrist der Auslieferzeit, die die benötigte Zeit ab der Auslagerung beim Produzenten bis zur Ankunft der Bestellung beim Großhändler beschreibt und ebenso als konstant angenommen wird. Da durch Produktionsrückstände, bedingt durch verspätete Liefereingänge oder schlechtes

Bestandsmanagement, Verspätungen in der Auslieferung auftreten können, sind die durchschnittliche Ist-Gesamtlieferzeit und Verspätung auszugeben. Zur Bestimmung der Ausgabegrößen der Fehlmengen- und Lagerhaltungskosten sind außerdem die Fehlmengen- und Lagerhaltungskosten je ME und Tag festzulegen. Neben den Lagerhaltungskosten, die für jedes der drei Läger anfallen, sind die Bestellkosten für Teil A und B auszugeben. Die durchschnittlichen Lagerbestände sowie der Lieferservicegrad, der den Anteil pünktlicher Lieferungen an den Gesamtlieferungen angibt, dienen darüber hinaus der Unterstützung der Auswertung (Hompele und Heidenblut 2011).

Die Eingabegrößen des Großhändlers bilden die Bestellmenge und der Bestellpunkt zum Bestandsmanagement des Endprodukts, der Einstandspreis, fixe Bestellkosten, Zeit für die Einlagerung, Lieferfrist sowie der Fehlmengen- und Lagerhaltungskostensatz. Zu den Ausgabewerten zählen die durchschnittliche Ist-Gesamtlieferzeit und Verspätung, der durchschnittliche Bestand, der Lieferservicegrad sowie die Fehlmengen-, Lagerhaltungs- und Bestellkosten. Mit Ausnahme des Einstandspreises und der fixen Bestellkosten entsprechen die Ein- und Ausgabegrößen des Einzelhändlers denen des Großhändlers. Die beiden Eingabegrößen werden beim Einzelhändler nicht berücksichtigt, da lediglich die Kosten entlang der Supply Chain betrachtet werden sollen, nicht jedoch der Umsatz oder Gewinn.

Daraus lässt sich ableiten, dass die Gesamtkosten der Supply Chain, die sich aus den Lagerhaltungs-, Fehlmengen- und Bestellkosten der einzelnen Akteure der Supply Chain zusammensetzen, eine weitere Ausgabegröße darstellen. Bezüglich der Fehlmengenkosten ist weiterhin anzumerken, dass die Fehlmengenkosten, die bei einem Akteur der Supply Chain aufgrund verspäteter Auslieferungen auftreten, dem zu beliefernden Akteur in Form eines Preisnachlasses gutgeschrieben werden.

Hinsichtlich der Endkunden ist lediglich deren Nachfrage zu definieren, welche durch eine statistische Verteilung beschrieben werden soll. Diesbezüglich wird davon ausgegangen, dass jeder Endkunde einen Artikel bezieht.

Weiterhin sollen die einzelnen Akteure der Supply Chain in Teilmodelle strukturiert werden. Da mehrere Lieferanten abgebildet werden, soll diese Komponente, wie schon angedeutet, als wiederverwendbarer Baustein implementiert werden.

### 5.3 Modellformalisierung

Im Rahmen der Modellformalisierung werden nun die in der Systemanalyse definierten Eingabegrößen festgelegt. In Tabelle 2 werden die Eingabegrößen des Produzenten, Einzel- sowie Großhändlers dargestellt. Da es sich bei den Bestellmengen und -punkten um Eingabegrößen handelt, die es im Rahmen von Experimenten zu variieren gilt, werden diese nicht vorab bestimmt. Zur Abbildung der Bearbeitungszeit der Produktion des Endprodukts wird eine Dreiecksverteilung mit einem wahrscheinlichsten Wert von 1:50 h, einem Minimum von 1:40 h und einem Maximum von 2:29 h angenommen. Die benötigten Zeiten für Ein- und Auslagerungen sowie Auslieferungen werden hingegen als konstant angenommen.

**Tabelle 2: Eingabegrößen des Produzenten, Groß- sowie Einzelhändlers**

	Produzent	Großhändler	Einzelhändler
Fixe Bestellkosten	100 €	120 €	---
Einstandspreis	50 €	60 €	---
Lagerhaltungskosten je ME und Tag	1 €	1 €	1 €
Fehlmengenkosten je ME und Tag	3 €	3 €	3 €
Lieferfrist/Auslieferzeit je Bestellung	2 Tage	2 Tage	1 Tag
Zeit für die Einlagerung	30 min	30 min	30 min
Zeit für Auslagerung von Teil A und B	30 min	---	---

Die angenommenen Eingabegrößen der Lieferanten sind in Tabelle 3 abzulesen. Zur Abbildung der Lieferverzögerungen werden im Rahmen dieser Arbeit stetig empirische Verteilungen angenommen, die in Tabelle 4 aufgeführt sind. Die Eingabegrößen für den Zeitpunkt des Eintretens und die Dauer von Lieferausfällen werden nicht vorgegeben, da es diese ebenso im Rahmen von Experimenten anzupassen gilt.

**Tabelle 3: Eingabegrößen der Lieferanten**

	Lieferant 1		Lieferant 2		Lieferant 3	
Objekt	Teil A		Teil A		Teil B	
Fixe Bestellkosten	45 €		40 €		20 €	
Preismodell	1 - 99	8 €	1 - 249	7 €	1 - 99	3,50 €
	100 - 299	6,50 €	150 - 499	5,50 €	100 - 499	2,50 €
	300 - 999	4 €	500 - 999	2,50 €	> 500	1 €
	> 1000	2 €	> 1000	1,50 €		
Fehlmengenkosten je ME und Tag	2 €		2 €		2 €	
Lieferfrist	2 Tage		4 Tage		3 Tage	

Letztlich wird die Annahme getroffen, dass die Endkundennachfrage einer Exponentialverteilung mit einem Beta von 2 Stunden unterliegt.

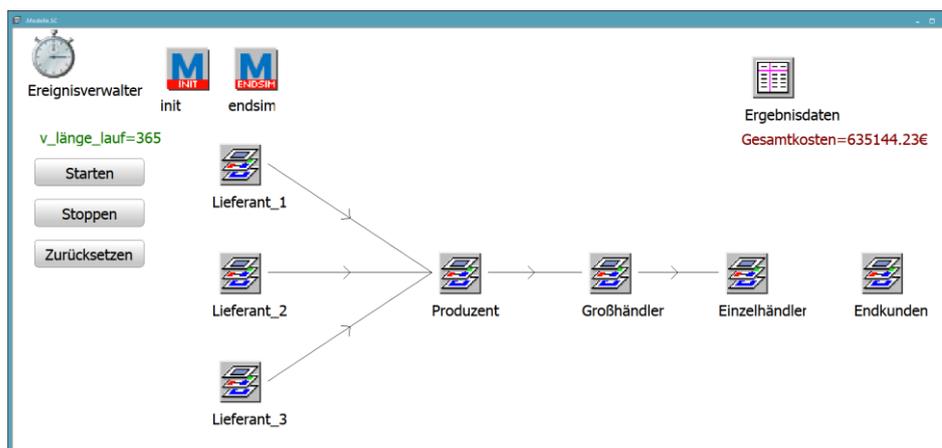
An dieser Stelle sei weiterhin anzumerken, dass die Auswahl von Verteilungen zur Abbildung von Zeiten bei der Durchführung von Simulationsstudien mit einer umfassenden Datenbeschaffung und -aufbereitung verbunden ist. Das Treffen von Annahmen, wie im Rahmen dieser Arbeit vorgenommen, ist dabei nicht ohne weiteres möglich.

**Tabelle 4: Stetig empirische Verteilungen zur Abbildung von Lieferverzögerungen**

Lieferant 1		Lieferant 2		Lieferant 3	
Tage	relative Häufigkeit	Tage	relative Häufigkeit	Tage	relative Häufigkeit
2	60 %	4	85 %	3	75 %
2 - 3	25 %	4 - 5	12 %	3 - 4	15 %
3 - 4	10 %	5 - 6	3 %	4 - 5	10 %
4 - 5	5 %				

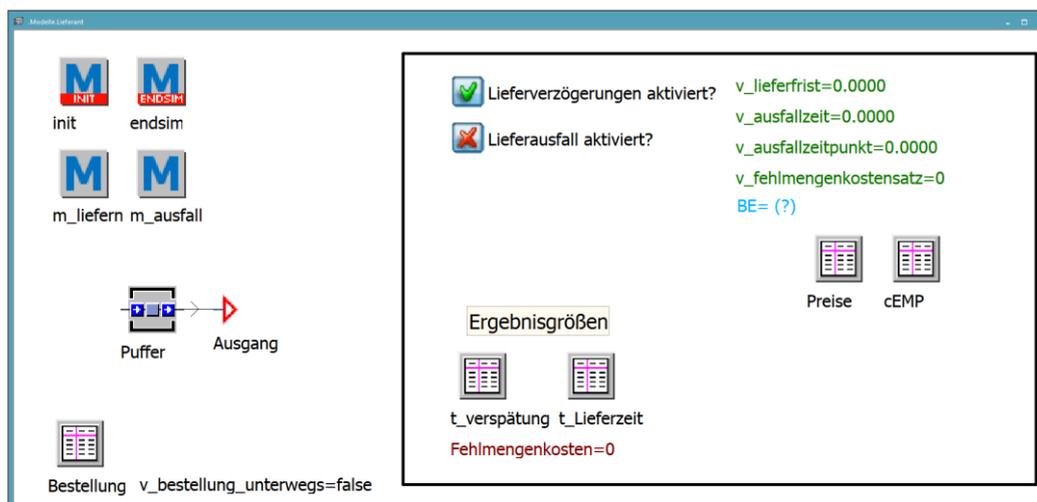
## 5.4 Implementierung

Da das Simulationsmodell in Teilmodelle strukturiert werden soll, werden die jeweiligen Akteure der Supply Chain auf eigenen Netzwerken erstellt und in dem Hauptnetzwerk „SC“ (vgl. Abbildung 6) zusammengeführt. Die Datei des Simulationsmodells befindet sich unter dem Namen „SC\_Modell.spp“ auf dem beiliegenden Datenträger.

**Abbildung 6: Übersicht des Hauptnetzwerks „SC“**

Um das Netzwerk zur Abbildung der Lieferanten als wiederverwendbaren Baustein nutzen zu können, wird es zunächst in der Klassenbibliothek abgespeichert. Anschließend kann das Netzwerk beliebig häufig in andere Netzwerke eingesetzt werden. Für die Umsetzung des Bausteins „Lieferant“ (vgl. Abbildung 7) werden lediglich zwei Materialflussbausteine verwendet, unter anderem weil die Lagerorganisation der Lieferanten nicht abgebildet werden soll. Im Folgenden wird das Funktionsprinzip des Bausteins näher erläutert. Nach Eingang einer Bestellung, die durch einen Eintrag in die Tabelle „Bestellung“ durch den Produzenten erzeugt wird, wird die Methode *m\_liefern* aktiviert. Die Methode *m\_liefern* (vgl. Quellcode B 1) ist wie alle weiteren Methoden, auf die nachfolgend eingegangen wird, dem Anhang beigefügt. Nach Ablauf der Auslieferzeit erzeugt die Methode die geordnete Anzahl an Teilen direkt in ein Pufferobjekt. Auf das Objekt Quelle wird somit verzichtet. Die Auslieferzeit wird dabei entweder durch die konstante

Zeit der Lieferfrist oder durch die stetig empirische Verteilung beschrieben, je nachdem ob Lieferverzögerungen aktiviert sind oder nicht. Außerdem dient die Methode zur Erfassung der tatsächlichen Ist-Gesamtlieferzeit sowie der Verspätung. Nachdem die Teile in den Puffer produziert wurden, verlassen diese über das mittels Kante verbundene Übergangsobjekt das Netzwerk. Durch die Verbindung der Lieferantenbausteine mit dem Netzwerk „Produzent“ werden die Teile wiederum an den Wareneingang des Produzenten umgelagert. Ist das Auftreten von Lieferausfällen aktiviert, wird beim Start eines Simulationslaufs die Methode *m\_ausfall* (vgl. Quellcode B 2) aufgerufen, die nach Ablauf der eingestellten Zeitdauer bis zum Auftreten des Ausfalls den Ausgang des Puffers für die Dauer des Ausfalls sperrt, wodurch die Teile nicht ausgeliefert werden können. Zum Aktivieren und Deaktivieren der Verzögerungen und des Ausfalls wird das Objekt Kontrollkästchen verwendet, welches das Umschalten zwischen den Zuständen *ein* und *aus* ermöglicht und einen Rückgabewert liefert, der mittels Codeanweisungen ausgelesen werden kann (Siemens PLM 2016). Um die Eingabegrößen, darunter auch das zu liefernde Teil, parametrieren zu können, wurden globale Variablen deklariert. Zur besseren Unterscheidung der Ein- und Ausgabegrößen werden die globalen Variablen auch in allen weiteren Teilmodellen zur Abbildung der Eingabegrößen grün sowie der Ausgabegrößen rot hervorgehoben. Die Eingabe der Preismodelle sowie der stetig empirischen Verteilung erfolgt darüber hinaus mithilfe von Tabellen.



**Abbildung 7: Übersicht des Bausteins „Lieferant“**

In Abbildung 8 wird ein Ausschnitt des Netzwerks „Produzent“ dargestellt. Zur Herstellung der Verbindung zwischen den Netzwerken der Lieferanten und des Produzenten werden zwei Übergänge, einen für Teil A sowie einen für Teil B, in das Netzwerk „Produzent“ eingesetzt. Beim Verbinden der Lieferanten- und Produzentennetzwerke mittels Kante kann so der gewünschte Übergang ausgewählt werden. Folglich werden Lieferant 1 und 2 mit Übergang A und Lieferant 3 mit Übergang B verbunden. Das Vorgehen zur Ein- und Auslagerung der Teile A und B folgt dem gleichen Prinzip. Die eingehenden Teile werden zunächst in einem Pufferobjekt zwischengelagert, bevor sie anschließend in ein Lagerobjekt umgelagert werden. Die benötigte Zeit für die Einlagerung wird durch das Eintragen einer Verweilzeit des Puffers realisiert. Die Produktion des Endprodukts wird mithilfe einer Montagestation umgesetzt, welche die Produktion des Endprodukts startet, sobald eine Einheit des Teils A und zwei Einheiten des Teils B die Montagestation belegen. Die Bearbeitungszeit kann dabei in der definierten Verteilung eingestellt werden. Der Nachteil dieses Objekt liegt jedoch darin, dass lediglich die Montage von zwei unterschiedlichen

Teilen möglich ist. Für die Abbildung einer Montage von mehr als zwei Teilen muss daher gegebenenfalls ein eigener Baustein entwickelt werden. Nachdem das Endprodukt die Montagestation verlassen hat, können die Teile A und B von den vorgeschalteten Pufferobjekten auf die Montagestation umgelagert werden. Diese Pufferobjekte dienen zur Abbildung der benötigten Zeit für die Auslagerung. Die Abbildung der Zeit für die Einlagerung des Endprodukts in das Endproduktlager wird mithilfe eines der Montagestation nachgeschalteten Puffers realisiert.

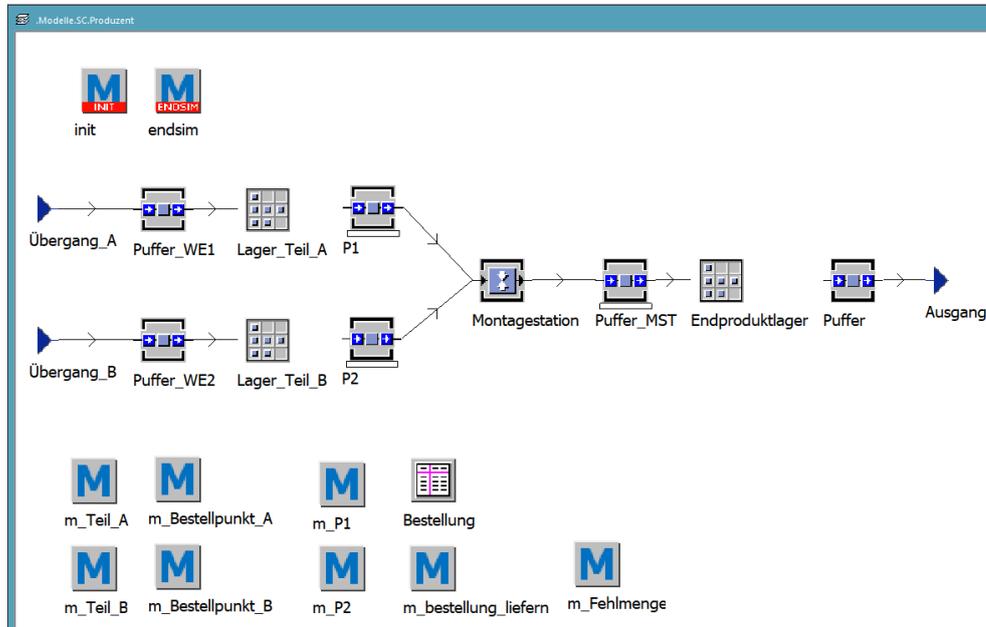


Abbildung 8: Ausschnitt des Netzwerks „Produzent“

Die Auslösung von Bestellungen der Teile A und B erfolgt mithilfe der als Ausgangssteuerung der Lagerobjekte definierten Methoden *m\_Bestellpunkt\_A* (vgl. Quellcode B 3) bzw. *m\_Bestellpunkt\_B*, die die gleiche Funktion aufweisen. Durch den Eintrag als Ausgangssteuerung werden die Methoden aktiviert, sobald ein Teil das jeweilige Lager verlässt. Falls der aktuelle Lagerbestand den Bestellpunkt unterschreitet sowie auf keine Bestellung gewartet wird, lösen die Methoden eine Bestellung beim definierten Lieferanten in Höhe der angegebenen Bestellmenge aus, indem sie einen Eintrag in die Tabelle „Bestellung“ des Lieferanten vornehmen. Die Definition der Lieferanten erfolgt dabei mittels globaler Variablen. Die Auslieferung von Bestellungen, die durch den Großhändler getätigt werden, folgt einem ähnlichen Prinzip wie die Auslieferung beim Lieferanten. Durch einen von dem Netzwerk „Großhändler“ getätigten Eintrag in die Tabelle „Bestellung“ des Produzenten wird die Methode *m\_Bestellung\_liefern* (vgl. Quellcode B 4) aktiviert. Diese Methode sperrt zunächst den Ausgang des Pufferobjekts, welches dem Endproduktlager nachgeschaltet ist, und lagert anschließend die geordnete Anzahl an Endprodukten in den Puffer um. Das Pufferobjekt wird dazu eingesetzt, um die benötigte Zeit für die Auslieferung abzubilden. Denn so wird nach Ablauf der Auslieferzeit der Ausgang des Puffers wieder freigegeben und die Endprodukte können über das Übergangsobjekt auf das nachfolgende Netzwerk des Großhändlers umlagern. Bei der Auslieferung des Produzenten ist allerdings im Unterschied zu den Lieferanten der Fall zu beachten, dass die bestellte Menge nicht immer vollständig vorrätig ist. In diesem Fall wird der aktuell vorrätige Bestand in das Pufferobjekt umgelagert und die Methode *m\_Fehlmenge* (vgl. Quellcode B 5) aufgerufen, die die fehlende Menge wiederum auf das Pufferobjekt umlagert, sobald diese auf Lager ist. Nach Ablauf der Auslieferzeit, die startet, wenn

die Bestellung vollständig im Puffer liegt, wird der Ausgang des Puffers entsperrt. Die Methode *m\_Bestellung\_liefern* dient darüber hinaus dazu, die tatsächliche Ist-Gesamtlieferzeit und Verspätung in Tabellen zu schreiben sowie die Gesamtanzahl an bestellten Einheiten und pünktlichen Lieferungen zu bestimmen.

Die Netzwerke zur Abbildung des Groß- und Einzelhändlers weisen im Grunde den gleichen Aufbau auf, weshalb lediglich das Teilmodell des Einzelhändlers in Abbildung 9 dargestellt ist. Die beiden Teilmodelle besitzen jeweils einen Übergang zur Verbindung mit dem vorgeschalteten Netzwerk, ein Lagerobjekt sowie einen Puffer vor und nach dem Lager. Die Vorgehensweise zur Einlagerung entspricht hierbei der Einlagerung der Teile A und B des Produzenten, weshalb auf eine weitere Erläuterung verzichtet wird. Auch das Auslösen von Bestellungen folgt dem bereits beschriebenen Konzept. Ebenso soll nicht weiter auf die Vorgehensweise zur Auslieferung von Bestellungen eingegangen werden, da diese im Grunde dem gleichen Prinzip wie die Auslieferung des Endprodukts bei dem Produzenten folgt. Die Teilmodelle des Groß- und Einzelhändlers unterscheiden sich dadurch, dass der Puffer, der dem Lager nachgeschaltet ist, bei dem Großhändler mit einem Übergang zur Verbindung mit dem Einzelhändler verbunden ist und bei dem Einzelhändler mit dem Objekt Senke. Die Ankunft der Endprodukte in der Senke entspricht dabei der Auslieferung an den Kunden.

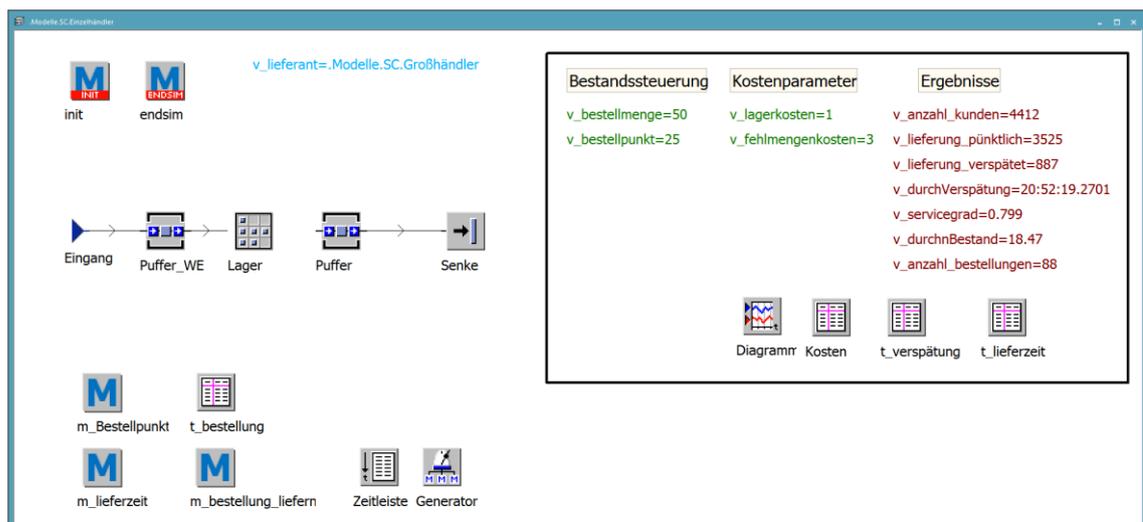


Abbildung 9: Übersicht des Netzwerks „Einzelhändler“

Da das Teilmodell „Endkunden“ lediglich zur Generierung von Kundenaufträgen dient, besitzt dieses nur ein Generator-Objekt sowie die Methode *m\_Kundenauftrag* (vgl. Quellcode B 6). Der Generator aktiviert in eingestellten Abständen eine eingetragene Steuerung (Siemens PLM 2016). Im Rahmen dieses Simulationsmodells wird die exponentielle Verteilung mit einem Beta von 2 Stunden eingestellt und die genannte Methode eingetragen. Folglich wird die Methode, die durch einen Eintrag in die Tabelle „Bestellung“ des Einzelhändlers die Bestellung auslöst, in statistisch verteilten Abständen aufgerufen und so die Kundenaufträge generiert.

Weiterhin folgt die Bestimmung der Ausgabegrößen in allen Teilmodellen der gleichen Vorgehensweise. Hierzu wird in allen Teilmodellen eine Methode mit dem Namen *endSim* eingesetzt, die am Ende eines Simulationslaufs aktiviert wird. Als Beispiel ist die *endSim*-Methode des Produzenten dem Anhang beigelegt (vgl. Quellcode B 7). Neben der Ermittlung des Servicegrades

dient die Methode auch zur Berechnung der Bestellkosten. Beim Produzenten ist hierbei zu beachten, dass die Einstandspreise aufgrund der abgestuften Preismodelle variieren können. Die Bestimmung des tatsächlichen Einstandspreises wird dabei mithilfe eines Schleifendurchlaufs durch die Preistabelle der Lieferanten und einem Vergleich mit der Bestellmenge realisiert. Die Implementierung von Preisstaffelungen ist somit mit überschaubarem Aufwand möglich. Darüber hinaus dient die Methode zur Ermittlung der Fehlmengenkosten. Da sich die Fehlmengenkosten je verspätetem Tag der Auslieferung und Anzahl verspäteter Einheiten ergeben, wird zur Berechnung die Tabelle „t\_Verspätung“, in der alle Verspätungen aufgezeichnet wurden, genutzt. Eine weitere Funktion der *endSim*-Methode liegt in der Bestimmung der Lagerhaltungskosten, die sich mithilfe der täglichen Durchschnittsbestände berechnen lassen. Da Plant Simulation keine Funktion zur automatisierten Bestimmung durchschnittlicher Lagerbestände zur Verfügung stellt, wird die Ermittlung der durchschnittlichen Bestände daher mithilfe der Objekte Generator und Zeitleiste realisiert. Die Zeitleisten zeichnen dabei in eingestellten Abständen, hier eine Minute, die aktuellen Lagerbestände auf. Der Generator ruft wiederum in konstanten Abständen von einem Tag eine Methode auf, die den Mittelwert der aufgezeichneten Bestände bildet und in eine Tabelle schreibt. Diese Tabelle dient so wiederum der Bestimmung der täglich und insgesamt anfallenden Lagerhaltungskosten. Mithilfe der *endSim*-Methode werden zudem die durchschnittlichen Lieferzeiten und Verspätungen berechnet, wozu der Mittelwert der in Tabellen aufgezeichneten Werte gebildet wird. Da die *mittelWert*-Funktion des Werkzeugs, die den arithmetischen Mittelwert eines Bereichs einer Tabelle zurückgibt, Datentypen zur Abbildung von Zeiten ignoriert, erfolgt die Berechnung mithilfe von Schleifen.

Um die Auswertung der Ergebnisse zu erleichtern, werden die Ausgabegrößen in der Tabelle „Ergebnisdaten“ (vgl. Abbildung 10) des Hauptnetzwerkes abgebildet. Das Aufzeichnen der Ergebnisse erfolgt dabei ebenso mithilfe einer *endSim*-Methode (vgl. Quellcode B 8).

	Einzelhändler	Großhändler	Produzent Endproduktlager	Produzent Lager Teil A
<b>Bestellkosten</b>	251600	203490	-----	32560
<b>Bestellrabatt</b>	10800	0	-----	2200
<b>Fehlmengenkosten</b>	1818	10800	0	-----
<b>Lagerkosten</b>	10818.82	17566.25	63569.14	27324.22
<b>Gesamtkosten</b>	253436.82	231856.25	63569.14	58484.22
<b>Servicegrad</b>	0.902	0.726	1	-----
<b>Durchschnittliche Verspätung</b>	20:28:28.7628	2:00:30:00.0000	0	-----
<b>Durchschnittliche Lieferzeit</b>	1:02:00:51.9642	2:13:17:15.6164	2:00:00:00.0000	-----
<b>Durchschnittlicher Bestand</b>	29.64	48.13	174.16	74.86

**Abbildung 10: Ausschnitt der Tabelle „Ergebnisdaten“**

Darüber hinaus sollen Diagramme (vgl. Abbildung 11) zur Visualisierung der Bestände der jeweiligen Läger die Auswertung der Ergebnisse unterstützen. Bei der Implementierung hat sich gezeigt, dass die Parametrierung der gewünschten Einstellungen und Darstellungsform eine gewisse Einarbeitungszeit erfordert.

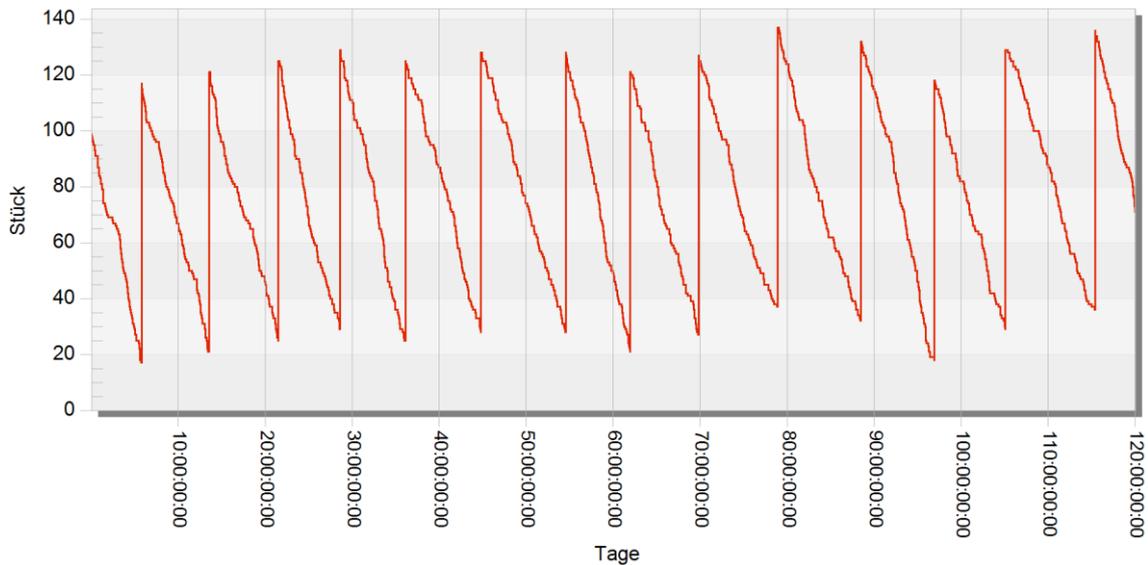


Abbildung 11: Diagramm zur Visualisierung des Bestandsverlaufs des Einzelhändlers

## 5.5 Verifikation und Validierung

Aufgrund des begrenzten Umfangs der Arbeit soll insbesondere die Technik des Tests von Teilmodellen zur V&V des entwickelten Modells angewendet werden. Hierbei soll herausgestellt werden, mit welchem Aufwand das Ergänzen der Teilmodelle um Testrahmen verbunden ist, um diese ausführbar zu machen. Des Weiteren soll geprüft werden, inwieweit der Anwender beim Testen der Teilmodelle durch den Methoden-Debugger sowie die Animation unterstützt wird.

Um das Teilmodell „Lieferant“ ausführbar zu machen, müssen Bestellungen generiert werden, die im Gesamtmodell durch den Produzenten ausgelöst werden. Hierfür wird, wie zur Generierung der Endkundennachfrage, ein Generator eingesetzt, der in eingestellten Abständen die Methode *m\_Auftrag* (vgl. Quellcode B 9) aufruft, die wiederum Bestellungen in zufälliger Höhe erzeugt. Darüber hinaus wird der Übergang, der das Netzwerk der Lieferanten mit dem des Produzenten verbindet, durch eine Senke ersetzt, um so den Warenausgang abzubilden. Außerdem ist ein Ereignisverwalter einzusetzen, der die Grundlage zur Ausführung eines Modells bildet. Die Ergänzung um einen Testrahmen ist bei diesem Teilmodell also mit geringem Zeitaufwand möglich. Mithilfe des Debuggers werden nun alle Methoden in Einzelschritten ausgeführt, um deren Korrektheit zu prüfen. In Kombination mit der Animation kann so festgestellt werden, ob die BEs in der richtigen Anzahl erzeugt sowie korrekt umgelagert werden. Das schrittweise Durchlaufen ermöglicht es weiterhin, das korrekte Eintragen von Werten in die vorgesehenen Tabellen sowie die Berechnung der Ausgabegrößen zu prüfen. Ebenso dient der Debugger zur Überprüfung der Funktionalität der Kontrollkästchen, die das Aktivieren und Deaktivieren von Lieferverzögerungen und -ausfällen ermöglichen sollen. Der Debugger von Plant Simulation unterstützt den Anwender beim Testen und Durchlaufen der Methoden dabei mit verschiedenen Funktionen. Beispielweise öffnet sich der Debugger durch das Setzen von Klassenhaltepunkten beim Aufruf der gewünschten Zeilen des Programmcodes, womit unter anderem der korrekte Aufruf von Methoden, wie etwa durch Ein- oder Ausgangssteuerungen, geprüft werden kann. Das Überwachungs-

fenster des Debuggers bietet zudem eine Anzeige jeglicher Ausdrücke, Variablen- und Attributwerte sowie der Aufrufkette, wodurch der Verlauf des Methodenaufrufs nachvollzogen werden kann. Auf die weiteren Funktionen des Debuggers soll nun nicht näher eingegangen werden, es kann jedoch festgehalten werden, dass die vorhandenen Funktionen des Debuggers die Überprüfung des korrekten Methodenverhaltens erleichtert.

Zur Realisierung der Ausführbarkeit des Teilmodells „Produzent“ sind die Wareneingänge der Teile A und B sowie der Warenausgang des Endprodukts abzubilden und Kundenbestellungen zu generieren. Der Unterschied bei der Ergänzung um einen Testrahmen zum Teilmodell „Lieferant“ liegt somit lediglich in der Abbildung der Wareneingänge. Hierzu wird für jeden Wareneingang ein Pufferobjekt eingesetzt. Nach der Auslösung von Bestellungen werden die Ausgänge der Puffer gesperrt sowie die bestellte Anzahl an BEs in den Puffer erzeugt. Anschließend werden die Puffer nach Ablauf einer parametrierbaren Zeit wieder freigegeben. Die Steuerung dieses Ablaufs erfordert die Programmierung jeweils einer Methode. Weiterhin sind kleine Anpassungen in den Methoden, die Bestellungen auslösen, vorzunehmen sowie Preistabellen zur Berechnung der Bestellkosten anzulegen. Somit ist die Ergänzung um einen Testrahmen auch hier mit einem geringen Aufwand verbunden. Das schrittweise Durchlaufen der Methoden wird nun auch für dieses Modell durchgeführt. Zur Kontrolle der korrekten Montage der Teile A und B haben sich auch die Animation, mit der Funktion, verschiedene Farben für unterschiedliche BEs wählen zu können, sowie die implementierten Zustandsanzeigen als hilfreich erwiesen.

Um das Teilmodell „Großhändler“ ausführbar zu machen, sind im Grunde die gleichen Anpassungen wie bei dem Teilmodell „Produzent“ vorzunehmen. Bei dem Teilmodell „Einzelhändler“ ist zudem nur der Wareneingang abzubilden, weshalb die Ergänzung um Testrahmen insgesamt mit überschaubarem Aufwand möglich ist. Das korrekte Ausführen der Methoden wurde darüber hinaus auch bei den beiden letztgenannten Teilmodellen mithilfe des Debuggers und der Ausführung in Einzelschritten untersucht. Eine Datei mit allen angepassten Teilmodellen befindet sich im Übrigen unter dem Namen „SC\_Modell\_VV.spp“ auf dem beiliegenden Datenträger.

Da durch die Untersuchung der Funktionalität der Teilmodelle nicht direkt auf die Funktionalität des Gesamtmodells geschlossen werden kann, wurden insbesondere auch die Steuerungen an den Schnittstellen der Teilmodelle durch das Ausführen in Einzelschritten geprüft.

## 6 Auswertung der Untersuchung

Wie die Anwendung der Kriterienliste in Unterkapitel 4.2 gezeigt hat, ist Plant Simulation ein sehr umfangreiches Simulationswerkzeug, das viele Funktionen, von der Aufbereitung von Eingangsdaten bis hin zur Ergebnisauswertung, bereitstellt und eine benutzerfreundliche Bedienung aufweist. Im Kontext der Supply-Chain-Simulation ist dabei unter anderem die Vielzahl unterstützter Schnittstellen, insbesondere Datenbankschnittstellen, als positiv zu werten. Daneben kann im Rahmen des SCM aus Unternehmenssicht die Unterstützung der Wertstromanalyse für die Entscheidung zugunsten von Plant Simulation ausschlaggebend sein. Darüber hinaus zeichnet sich das Werkzeug aufgrund der hierarchischen Modellierung, frei definierbaren Attributen und Variablen sowie der umfassenden Programmiersprache durch eine hohe Flexibilität aus.

Während einige Objekte und Bausteine für die Anwendung in der Produktionsplanung zur Verfügung stehen, bietet die Software kaum Objekte für die Simulation im Rahmen der Standort- und Tourenplanung. Dies schließt die Anwendung in den letztgenannten Einsatzbereichen zwar nicht grundsätzlich aus, erfordert aber einen großen Arbeitsaufwand in der Entwicklung geeigneter Bausteine. Ebenso ist die Auswahl an Objekten und Bausteinen für den Einsatz im Bestandsmanagement, der optimierten Lieferantenauswahl sowie der Simulation von SC-Risiken begrenzt. Durch den Entwurf eines Simulationsmodells in Kapitel 5 konnte jedoch gezeigt werden, dass ein Einsatz des Werkzeugs in diesen Anwendungsgebieten mithilfe der zur Verfügung stehenden Objekte und Funktionen möglich ist, auch wenn das abgebildete Modell nicht den Umfang und die Komplexität einer realen Supply Chains aufweist sowie vereinfachende Annahmen getroffen wurden. Zudem konnte festgestellt werden, dass die Implementierung des Modells den Entwurf einiger benutzerdefinierter Steuerungen erforderte, was zum einen mit einem entsprechenden Arbeitsaufwand verbunden ist und zum anderen die Gefahr von Programmierfehlern birgt. Bei der Vermeidung und dem Auffinden von Fehlern wird der Anwender allerdings unter anderem durch den Debugger unterstützt. Darüber hinaus ermöglicht die umfassende Programmiersprache die Realisierung individueller Steuerungen. Bei der Implementierung des Simulationsmodells konnte außerdem die Funktion zur Entwicklung benutzerdefinierter Bausteine im Rahmen des Teilmodells zur Abbildung der Lieferanten genutzt werden. Hierbei erweist sich die Möglichkeit, Bausteine den individuellen Anforderungen entsprechend konzipieren sowie diese in zukünftigen Modellen einsetzen zu können, als vorteilhaft. Des Weiteren ist hervorzuheben, dass sich Vorgehensweisen und Steuerungen der verschiedenen Teilmodelle entsprechen, wodurch sich der Gesamtaufwand letztlich wieder reduziert. Aufgrund der vielen Funktionen und der eigenen Programmiersprache ist jedoch festzustellen, dass der Anwendung des Simulationswerkzeugs eine umfassende Einarbeitung vorausgeht. Aus diesem Grund und der Notwendigkeit zur Entwicklung benutzerdefinierter Steuerungen und Bausteine ist der Einsatz von Plant Simulation im Rahmen des Bestandsmanagements, der optimierten Lieferantenauswahl sowie der Simulation von SC-Risiken eher bei einer langfristig angestrebten Nutzung des Werkzeugs zu empfehlen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst eine Kriterienliste entwickelt, in der die relevanten Kriterien, die einer Bewertung von Simulationswerkzeugen hinsichtlich der Eignung und Einsatzmöglichkeiten zur Simulation von Supply Chains dienen, zusammengefasst sind. Die anschließende Anwendung der Kriterienliste auf Plant Simulation hat gezeigt, dass das Werkzeug einen großen Funktionsumfang bietet und die Anforderungen für den Einsatz zur Supply-Chain-Simulation überwiegend erfüllt. Mit Ausnahme des Einsatzbereiches der Produktionsplanung ergeben sich jedoch Nachteile bei der Auswahl zur Verfügung stehender Objekte und Bausteine. So stellt das Werkzeug kaum Objekte für den Einsatz in der Standort- und Tourenplanung bereit, weshalb der Einsatz des Werkzeugs für diese Anwendungsgebiete nicht empfohlen, aber auch nicht grundsätzlich ausgeschlossen wird. Da die Auswahl vorkonfigurierter Modellelemente für den Einsatz im Bestandsmanagement, der optimierten Lieferantenauswahl sowie der Simulation von SC-Risiken ebenso begrenzt ist, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, um die Eignung von Plant Simulation für diese Einsatzbereiche näher zu untersuchen. Die Implementierung des entworfenen Konzeptmodells ist dabei mithilfe der vorhandenen Objekte möglich, erforderte aber die Entwicklung einiger benutzerdefinierter Steuerungen, deren Programmierung mit einem entsprechenden Arbeitsaufwand verbunden ist. Durch den hierarchischen Modellierungsansatz, der die Entwicklung benutzerdefinierter Bausteine ermöglicht, konnte allerdings der Aufwand zur Implementierung des Gesamtmodells reduziert werden. Da benutzerdefinierte Bausteine auch in zukünftigen Simulationsmodellen eingesetzt werden können und so gegebenenfalls zur Reduzierung des Modellierungsaufwands beitragen, ist ein Einsatz von Plant Simulation im Rahmen des Bestandsmanagements, der optimierten Lieferantenauswahl sowie der Simulation von SC-Risiken eher bei einer langfristig angestrebten Nutzung des Werkzeugs zu empfehlen. Dies liegt auch darin begründet, dass die Nutzung des Werkzeugs aufgrund der Vielzahl an Funktionen sowie der eigenen Programmiersprache ohnehin einer umfangreichen Einarbeitung bedarf.

Um die Eignung von Plant Simulation hinsichtlich der genannten Einsatzbereiche noch besser einordnen zu können, ist ein Vergleich mit anderen Simulationswerkzeugen anhand der entwickelten Kriterienliste über den Rahmen dieser Arbeit hinaus durchaus empfehlenswert. Zur Auswahl eines Simulationswerkzeugs aus Unternehmenssicht können dabei außerdem die hier nicht betrachteten Kriterien bezüglich der Kosten, Software- und Hardwareanforderungen entscheidend sein.

# Literaturverzeichnis

- Arndt, Holger (2008): Supply Chain Management. Optimierung logistischer Prozesse. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Bangsow, Steffen (2011): Praxishandbuch Plant Simulation und SimTalk. Anwendung und Programmierung in über 150 Beispiel-Modellen. München: Hanser.
- Becker, Torsten (2018): Prozesse in Produktion und Supply Chain optimieren. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Beckmann, Holger (2004): Supply-Chain-Management. Strategien und Entwicklungstendenzen in Spitzenunternehmen. Berlin: Springer.
- Chang, Yoon; Makatsoris, Harris (2001): Supply Chain Modeling Using Simulation. In: *International Journal of Simulation - Systems, Science & Technology Vol. 2, No.1*, S. 24–30.
- Corsten, Daniel; Gabriel, Christoph (2004): Supply-Chain-Management erfolgreich umsetzen. Grundlagen, Realisierung und Fallstudien ; mit 20 Tabellen. 2. Aufl. Berlin: Springer.
- Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer.
- Fechteler, Till; Gutenschwager, Kai (2014): Die Landkarte zeigt, wie gut es funktioniert. In: *IT&Production* (09/2014), S. 64–65.
- Fröhlich-Glantschnig, Elisabeth; Lingohr, Tanja (2010): Gibt es die optimale Einkaufsorganisation? Organisatorischer Wandel und pragmatische Methoden zur Effizienzsteigerung. Wiesbaden: Gabler.
- Gutenschwager, Kai; Alicke, Knut (2004): Supply Chain Simulation mit ICON-SimChain. In: Thomas Spengler, Stefan Voß und Herbert Kopfer (Hg.): Logistik Management. Prozesse, Systeme, Ausbildung. Heidelberg: Physica, S. 161–178.
- Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Hellingrath, Bernd; Hegmanns, Tobias; Toth, Michael; Maaß, Jan-Christopher (2008): Prozesse in Logistiknetzwerken - Supply Chain Management. In: Dieter Arnold, Kai Furmans, Heinz Isermann, Axel Kuhn und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 459–486.

- Hompel, Michael; Heidenblut, Volker (2011): Taschenlexikon Logistik. Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Inderfurth, Karl; Jensen, Thomas (2008): Lagerbestandsmanagement. In: Dieter Arnold, Kai Furmans, Heinz Isermann, Axel Kuhn und Horst Tempelmeier (Hg.): Handbuch Logistik. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 153–167.
- iSILOG (2018): Anwendungsspezifische Bibliotheken für Plant Simulation. Online verfügbar unter <http://isilog.de/de/produkte/produkte/plant-simulation/plant-simulation-bibliotheken.html>, zuletzt aktualisiert am 11.05.2018.
- Kaczmarek, Michael (2002): Definition von Anforderungen an die Modellierung und Analyse der Supply Chain. Dortmund: Sonderforschungsbereich 559 (02007).
- Klaus, Peter; Rothböck, Markus; Staberhofer, Franz (2007): Steuerung von Supply Chains. Strategien - Methoden - Beispiele. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden.
- Kleijnen, Jack P.C. (1995): Verification and validation of simulation models. In: *European Journal of Operational Research* 82 (1), S. 145–162.
- Koch, Susanne (2012): Logistik. Eine Einführung in Ökonomie und Nachhaltigkeit. Berlin: Springer Vieweg.
- Kuhn, Axel; Hellingrath, Bernd (2002): Supply-Chain-Management. Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette. Berlin: Springer.
- Kuhn, Axel; Rabe, Markus (1998): Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin: Springer.
- Law, Averill M. (2015): Simulation modeling and analysis. 5. Aufl. New York, NY: McGraw-Hill.
- Liebetruth, Thomas (2016): Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Instrumente und Methoden für das Supply Chain Process Management. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Longo, Francesco (2011): Supply Chain Management Based on Modeling & Simulation: State of the Art and Application Examples in Inventory and Warehouse Management. In: Pengzhong Li (Hg.): Supply Chain Management: Intech, S. 93–144.
- März, Lothar; Krug, Wilfried; Rose, Oliver; Weigert, Gerald (2011): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Motta, Marco; Wagenitz, Axel; Hellingrath, Bernd (2008): Gestaltung logistischer Netzwerke - Ein Praxisbericht. In: Markus Rabe (Hg.): Advances in simulation for production and logistics applications. [Tagungsband zur 13. Fachtagung, Berlin, 01. - 02. Oktober 2008]. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. (118), S. 21–30.

- Müller-Sommer, Hannes; Strassburger, Steffen (2009): Ausprägungen und Nutzungsgrad der Logistiksimulation im Umfeld der Automobilindustrie. In: Albrecht Gnauck und Bernhard Luther (Hg.): Proceedings des 20. Symposiums Simulationstechnik ASIM 2009. Cottbus, S. 353–361.
- Persson, Fredrik; Olhager, Jan (2002): Performance simulation of supply chain designs. In: *International Journal of Production Economics* 77 (3), S. 231–245.
- Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. 1. Aufl. Berlin: Springer.
- Röderstein, René (2009): Erfolgsfaktoren im Supply Chain Management der DIY-Branche. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Scholz-Reiter, Bernd; Münster, Carsten; Jakobza, Jens (2001): Supply Chain-Simulation für kleine und mittlere Unternehmen. In: Oliver Lawrenz (Hg.): Supply-Chain-Management. Konzepte, Erfahrungsberichte und Strategien auf dem Weg zu digitalen Wertschöpfungsnetzen. 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg, S. 139–149.
- Schönsleben, Paul (2016): Integrales Logistikmanagement. Operations und Supply Chain Management innerhalb des Unternehmens und unternehmensübergreifend. 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint Springer Vieweg.
- Schuh, Günther; Stich, Volker (2013): Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Siemens PLM (2008): Plant Simulation. Produktübersicht. Online verfügbar unter [http://www.plant-simulation.de/images/stories/Dokumente/Plant\\_Simulation\\_Produkt%C3%BCbersicht.pdf](http://www.plant-simulation.de/images/stories/Dokumente/Plant_Simulation_Produkt%C3%BCbersicht.pdf), zuletzt geprüft am 10.05.2018.
- Siemens PLM (2016): Tecnomatix Plant Simulation 13 Step-by-Step Hilfe.
- Siemens PLM (2018): 2018 Plant Simulation Worldwide User Conference. Online verfügbar unter <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/topic/plant-simulation-conference/18556>, zuletzt geprüft am 10.05.2018.
- SimPlan AG (2018a): Plant Simulation Schulungen / Trainings. Online verfügbar unter <http://www.plant-simulation.de/schulung.html>, zuletzt geprüft am 10.05.2018.
- SimPlan AG (2018b): SimChain - Modellierung und Analyse von Liefernetzwerken. Online verfügbar unter [https://www.plant-simulation.de/images/stories/Dokumente/Infoblatt\\_SimChain.pdf](https://www.plant-simulation.de/images/stories/Dokumente/Infoblatt_SimChain.pdf), zuletzt geprüft am 11.05.2018.
- Tarokh, Mohammad; Golkar, M. (2006): Supply Chain Simulation Methods. In: 2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. Shanghai: SOLI, S. 448–454.
- Thierry, Caroline; Thomas, André; Bel, Gérard (Hg.) (2008): Simulation for supply chain management. London: Wiley-ISTE (Control systems, robotics and manufacturing series).

- van der Zee, D. J.; van der Vorst, J. G. A. J. (2005): A Modeling Framework for Supply Chain Simulation: Opportunities for Improved Decision Making\*. In: *Decision Sciences* 36 (1), S. 65–95.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 (2014): Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen - Grundlagen. Düsseldorf: Beuth.
- VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 (1997): Auswahl von Simulationswerkzeugen - Leistungsumfang und Unterscheidungskriterien. Düsseldorf: Beuth.
- Völker, Sven; Schmidt, Peter-Michael (2010): Simulationsbasierte Optimierung von Produktions- und Logistiksystemen mit Tecnomatix Plant Simulation. In: Gert Zülch und Patricia Stock (Hg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Hannover, Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, S. 93–100.
- von Steinaecker, Jörg; Kühner, Michael (2001): Supply Chain Management - Revolution oder Modewort? In: Oliver Lawrenz (Hg.): *Supply-Chain-Management. Konzepte, Erfahrungsberichte und Strategien auf dem Weg zu digitalen Wertschöpfungsnetzen*. 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg, S. 39–69.
- Wannenwetsch, Helmut (2005): *Vernetztes Supply-Chain-Management. SCM-Integration über die gesamte Wertschöpfungskette*. Berlin: Springer.
- Wellbrock, Wanja (2015): *Innovative Supply-Chain-Management-Konzepte. Branchenübergreifende Bedarfsanalyse sowie Konzipierung eines Entwicklungsprozessmodells*. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Wenzel, Sigrid; Collisi-Böhmer, Simone; Pitsch, Holger; Rose, Oliver; Weiß, Matthias (2008): *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Wenzel, Sigrid; Jauss, Anke (2008): Diskussion eines Benchmark-Verfahrens für den Vergleich von Simulationswerkzeugen in Produktion und Logistik. In: Markus Rabe (Hg.): *Advances in simulation for production and logistics applications*. [Tagungsband zur 13. Fachtagung, Berlin, 01. - 02. Oktober 2008]. Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verl. (118), S. 565–574.
- Werner, Hartmut (2013): *Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling*. 5. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Werner, Hartmut (2017): *Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling*. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.
- Zsifkovits, Helmut; Krenn, Barbara (2007): Beherrschung von komplexen Systemen durch Modellbildung und Simulation. In: Corinna Engelhardt-Nowitzki (Hg.): *Management komplexer Materialflüsse mittels Simulation. State-of-the-Art und innovative Konzepte*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, S. 55–70.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: SCM-Aufgabenmodell nach (Kuhn und Hellingrath 2002, S. 143) .....	5
Abbildung 2: Vorgehensmodell der Simulation nach (Rabe et al. 2008, S. 5) .....	9
Abbildung 3: Arbeitsoberfläche von Plant Simulation .....	21
Abbildung 4: Werkzeuge zur Ergebnisauswertung .....	26
Abbildung 5: Konzeptmodell .....	30
Abbildung 6: Übersicht des Hauptnetzwerks „SC“ .....	34
Abbildung 7: Übersicht des Bausteins „Lieferant“ .....	35
Abbildung 8: Ausschnitt des Netzwerks „Produzent“ .....	36
Abbildung 9: Übersicht des Netzwerks „Einzelhändler“ .....	37
Abbildung 10: Ausschnitt der Tabelle „Ergebnisdaten“ .....	38
Abbildung 11: Diagramm zur Visualisierung des Bestandsverlaufs des Einzelhändlers .....	39

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kriterienliste zur Auswahl von Simulationswerkzeugen nach (VDI-Richtlinie 3633 Blatt 4 1997) .....	15
Tabelle 2: Eingabegrößen des Produzenten, Groß- sowie Einzelhändlers .....	33
Tabelle 3: Eingabegrößen der Lieferanten .....	33
Tabelle 4: Stetig empirische Verteilungen zur Abbildung von Lieferverzögerungen .....	34

# Abkürzungsverzeichnis

BE	Bewegliches Objekt
ME	Materialeinheit
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
TSP	Traveling Salesman Problem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
V&V	Verifikation und Validierung

# Anhang

## Anhang A: Angepasste Kriterienliste

<b>1. Systemumgebung</b>
<p>1.1 Softwarebezeichnung und -hersteller</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Produktname</li><li>• Hersteller</li><li>• Geschichte</li><li>• Softwareversion</li></ul> <p>1.2 Marktpräsenz und Referenz</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Hauptabnehmerbranche? Auch für SCM eingesetzt?</li><li>• Referenzen in SCM?</li></ul> <p>1.3 Anwenderunterstützung und Systempflege</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Handbücher (Sprache)?</li><li>• Schulungskurse?</li><li>• Anwender-Erfahrungsaustausch?</li></ul>
<b>2. Softwareleistung</b>
<p>2.1 Simulationsansatz</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Simulationsansatz des Werkzeugs?</li><li>• Ist der Simulationsansatz für die Simulation von Supply Chains geeignet?</li><li>• Welches Modellierungskonzept wird eingesetzt? (Bausteinorientiert, Sprachorientiert, Petri-Netze)</li></ul> <p>2.2 Modellgröße und Dimension</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Beschränkte Anzahl statischer Objekte</li><li>• Beschränkte Anzahl dynamischer Objekte</li></ul> <p>2.3 Modellierung und Modellelemente</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Erfolgt die Modellierung in 2D oder 3D?</li><li>• Welche Modellelemente stehen zur Verfügung?<ul style="list-style-type: none"><li>○ Sind Basiselemente für die Supply-Chain-Simulation vorhanden?</li><li>○ Welche Elemente fehlen? Reicht der Umfang?</li></ul></li><li>• Können Modellelemente modifiziert werden?</li><li>• Sind Attribute für Modellelemente frei definierbar?</li></ul> <p>2.4 Steuerungen</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Welche Standardsteuerungen sind vorhanden? Wie komfortabel können diese eingestellt werden?</li><li>• Können benutzerdefinierbare Steuerungen entwickelt werden?<ul style="list-style-type: none"><li>○ Welche Programmiersprache steht zur Verfügung? (Online-Hilfsfunktion?)</li></ul></li></ul>

- Wie werden Funktionen/Methoden aufgerufen?
- Gibt es Einschränkungen beim Aufbau von Steuerungen?

### 2.5 Bausteinbibliotheken

- Sind Bibliotheken mit Standardbausteinen verfügbar? Sind Bausteine für die Supply-Chain-Simulation vorhanden?
  - Gibt es Bausteine für Tourenplanung, Standortplanung, Lieferantenauswahl, Simulation von SC-Risiken, Bestandsmanagement, Produktionsplanung?
- Wird die Entwicklung anwenderdefinierter Bausteine unterstützt?

### 2.6 Datenaufbereitung und Stochastische Verteilung

- Welche stochastischen Verteilungen sind verfügbar?
  - Vorgegebene Verteilungsfunktionen (Bernoulli-, Binomial-, Poisson-, Exponential-, Erlang-k-, Normal-, Gleich- und Dreiecksverteilung)?
  - Anwenderdefinierbare Verteilungsfunktionen?
- Auf welche Modellparameter sind die Verteilungen anwendbar?
- Gibt es Werkzeuge zur automatischen Aufarbeitung der Eingabedaten?

### 2.7 Flexibilität

- Wie flexibel ist das Werkzeug bzgl. der Modellierung, Steuerungen, Bausteinen und Verteilungen?

### 2.8 Animation

- Wird Animationslayout neben Simulationsmodell erstellt oder gleichzeitig?
- Animation während/nach Simulation?
- Art der Grafik? (2D, 3D)
- Können Modelle während der Animation bedient werden?
- Können Parameter (Systemzustand, Auslastung) dynamisch dargestellt werden?

### 2.9 Ergebnisauswertung und -ausgabe

- Sind automatische Statistiken der Elemente verfügbar?
- Sind Statistikanalyse-Werkzeuge vorhanden?
- Wie ist der Umfang der Ergebnisdarstellung?
- Ist ein Experimentiermodul verfügbar?

### 2.10 Systemintegration und Schnittstellen

- Gibt es eine XML- und Excel-Schnittstelle?
- Gibt es Datenbankschnittstellen?
  - ODBC
  - JDBC
  - Oracle
- Gibt es Schnittstellen zur ERP-Ebene?

### 2.11 Unterstützung bei Verifikation und Validierung

- Welche Methoden zum Auffinden von Programmierfehlern stehen zur Verfügung?
  - Syntaxkontrolle
  - Fehlermeldung
  - Debugger
  - Profiler

- Können Teilmodelle unabhängig voneinander verifiziert und validiert werden?
- Sind unabhängige Tests einzelner Steuerstrategien möglich?
- Wird die Trace-Analyse unterstützt?
- Werden weitere Techniken zur V&V bereitgestellt?

## 2.12 Qualifikationsanforderungen

- Werden Programmierkenntnisse erfordert?
- Wird Simulationserfahrung erfordert?

## Anhang B: Quellcodes

### Quellcode B 1: Methode `m_liefern`

```

is
  i:integer;
  anzahl:integer;
  stoch_lieferzeit, bestelleingang:time;
do
  waituntil bestellung.yDim > 0 and bestellung.xdim = 2 prio 1;
  bestelleingang:=bestellung[2,1];
  anzahl:=bestellung[1,1];
  bestellung.entferneZeile(1);

  if verzögerungen.wert = true
  then
    stoch_lieferzeit := z_cEMP(1, cEMP);
    wait stoch_lieferzeit;
  elseif verzögerungen.wert = false
  then
    wait(v_lieferfrist);
  end;
  for i:=1 to anzahl loop
    BE.erzeugen(puffer);
  next;
  waituntil puffer.leer prio 1;
  t_lieferzeit["Lieferzeit", t_Lieferzeit.ydim+1] := Ereignisverwalter.zeit -
  bestelleingang;
  if round(Ereignisverwalter.zeit - bestelleingang) > v_lieferfrist
  then
    t_verspätung[1, t_verspätung.ydim+1] := Ereignisverwalter.zeit -
    bestelleingang - v_lieferfrist;
    t_verspätung[2, t_verspätung.ydim] := anzahl;
  end;
end;

```

```

v_bestellung_unterwegs:=false;
self.methaufr(0);
end;

```

### Quellcode B 2: Methode m\_ausfall

```

is
do
wait (v_ausfallzeitpunkt);
Puffer.ausganggesperrt := true;
wait v_ausfallzeit;
Puffer.ausganggesperrt := false;
end;

```

### Quellcode B 3: Methode m\_Bestellpunkt\_A

```

is
lagerbestand:integer;
do
lagerbestand := Lager_Teil_A.anzahlBEs;
if lagerbestand+Puffer_WE1.anzahlBEs < v_bestellpunkt_A
and v_lieferant_teilA.v_bestellung_unterwegs = false
then
v_lieferant_teilA.bestellung[1,v_lieferant_teilA.bestellung.ydim +1]
:= v_bestellmenge_A;
v_lieferant_teilA.bestellung[2, v_lieferant_teilA.bestellung.ydim]
:= Ereignisverwalter.zeit;
v_lieferant_teilA.v_bestellung_unterwegs := true;
v_anzahl_bestellungen_A := v_anzahl_bestellungen_A + 1;
end;
end;

```

### Quellcode B 4: Methode m\_Bestellung\_liefiern

```

is
i, j, l:integer;
anzahl, bestand, fehlmenge:integer;
bestelleingang, bestellausgang:time;
do
waituntil bestellung.yDim > 0 and bestellung.xdim = 2 prio 1;
bestand := Endproduktlager.anzahlBEs;
bestelleingang :=bestellung[2,1];
anzahl:=bestellung[1,1];
bestellung.entferneZeile(1);
v_bestellungen := v_bestellungen + anzahl;

```

```
if anzahl <= bestand
  and bestelleingang = Ereignisverwalter.zeit
then
  Puffer.ausganggesperrt := true;
  for i:=1 to anzahl loop
    Endproduktlager.inhalt.umlagern(Puffer);
  next;
  wait v_lieferzeit;
  Puffer.ausganggesperrt := false;
  waituntil puffer.leer prio 1;
  bestellausgang := Ereignisverwalter.zeit;
  t_Lieferzeit[1, t_Lieferzeit.ydim+1] := bestellausgang -
  bestelleingang;
  v_Lieferungen := v_Lieferungen + anzahl;
  v_Lieferung_pünktlich := v_Lieferung_pünktlich + anzahl;
  v_bestellung_unterwegs := false;
  self.methaufr(0);
else
  Puffer.ausganggesperrt := true;
  if anzahl > bestand
  then
    for j:=1 to bestand loop
      Endproduktlager.inhalt.umlagern(Puffer);
    next;
    fehlmenge := anzahl - bestand;

    m_fehlmenge(fehlmenge);
  elseif anzahl <= bestand
  then
    for l:=1 to anzahl loop
      Endproduktlager.inhalt.umlagern(Puffer);
    next;
  end;
  t_verspätung[1, t_verspätung.ydim+1] := Ereignisverwalter.zeit -
  bestelleingang;
  wait v_lieferzeit;
  Puffer.ausganggesperrt := false;
  waituntil puffer.leer prio 1;
  bestellausgang := Ereignisverwalter.zeit;
  t_Lieferzeit[1, t_Lieferzeit.ydim+1] := bestellausgang -
  bestelleingang;
  t_verspätung[2, t_verspätung.ydim] := anzahl;
  v_Lieferungen := v_Lieferungen + anzahl;
```

```

    v_bestellung_unterwegs := false;
    self.methaufr(0);
end;
end;

```

#### Quellcode B 5: Methode m\_Fehlmenge

```

(fehlmenge: integer)
is
  i:integer;
do
  waituntil Endproduktlager.anzahlBEs > 0 prio 1;
  for i := 1 to Endproduktlager.anzahlBEs loop
    Endproduktlager.inhalt.umlagern(Puffer);
    if i >= fehlmenge
    then
      exitloop;
    end;
  next;
  if i < fehlmenge
  then
    m_fehlmenge(fehlmenge-i);
  end;
end;

```

#### Quellcode B 6: Methode m\_Kundenauftrag

```

is
do
  v_händler.t_bestellung[1, v_händler.t_bestellung.ydim+1] :=
  Ereignisverwalter.zeit;
  v_händler.v_anzahl_kunden := v_händler.v_anzahl_kunden + 1;
end;

```

#### Quellcode B 7: endSim-Methode des Netzwerks „Produzent“

```

is
  i,k,n,p,q:integer;
  ydim_teilA, ydim_teilB : integer;
  bestellkosten_var, gesamtbestand_endproduktlager, gesamtbestand_lagerA,
  gesamtbestand_lagerB : real;
  gesamtlieferzeit, verspätung : time;
do
  if v_lieferungen > 0
  then
    v_servicegrad := v_lieferung_pünktlich/v_Lieferungen;

```

```
end;

--Kosten Teil A
for i := 1 to v_lieferant_teilA.Preise.ydim loop
  if v_bestellmenge_A < v_lieferant_teilA.Preise["Staffelung", i]
  then
    ydim_teilA := i-1;
    exitloop;
  end;
  if i = v_lieferant_teilA.Preise.ydim
  then
    ydim_teilA := i;
  end;
next;

bestellkosten_var := v_lieferant_teilA.Preise["Preis", ydim_teilA];
Kosten_lagerA["Bestellkosten", 1] := (bestellkosten_var*v_bestellmenge_A +
v_lieferant_teilA.Preise["Bestellkosten fix", 1]) *
v_anzahl_bestellungen_A;
Kosten_LagerA["Bestellrabatt", 1] := v_lieferant_teilA.Fehlmengenkosten;
gesamtbestand_lagerA := generator_LagerA.daily_inventory.sum({2,1}..{2,*});
Kosten_lagerA["Lagerkosten", 1] := gesamtbestand_lagerA*v_lagerkosten;
Kosten_lagerA["Gesamtkosten", 1] := Kosten_lagerA["Lagerkosten", 1]+
Kosten_lagerA["Bestellkosten", 1] - Kosten_LagerA["Bestellrabatt", 1];
v_durchnbest_A := generator_LagerA.daily_inventory.mittelWert({2,1}..{2,*});

--Kosten Teil B
for k := 1 to v_lieferant_teilB.Preise.ydim loop
  if v_bestellmenge_B < v_lieferant_teilB.Preise["Staffelung", k]
  then
    ydim_teilB:= k-1;
    exitloop;
  end;
  if k = v_lieferant_teilB.Preise.ydim
  then
    ydim_teilB := k;
  end;
next;

bestellkosten_var := v_lieferant_teilB.Preise["Preis", ydim_teilB];
Kosten_lagerB["Bestellkosten", 1] := (bestellkosten_var*v_bestellmenge_B +
v_lieferant_teilB.Preise["Bestellkosten fix", 1]) * v_anzahl_bestellungen_B;
Kosten_LagerB["Bestellrabatt", 1] := v_lieferant_teilB.Fehlmengenkosten;
gesamtbestand_lagerB := generator_LagerB.daily_inventory.sum({2,1}..{2,*});
Kosten_lagerB["Lagerkosten", 1] := gesamtbestand_lagerB*v_lagerkosten;
```

```
Kosten_lagerB["Gesamtkosten", 1] := Kosten_lagerB["Lagerkosten", 1] +
Kosten_lagerB["Bestellkosten", 1] - Kosten_lagerB["Bestellrabatt", 1];
v_durchnbest_B := generator_LagerB.daily_inventory.mittelWert({2,1}..{2,*});

--Kosten Endproduktlager
for p := 1 to t_verspätung.ydim loop
    Kosten_Endproduktlager["Fehlmengenkosten", 1] :=
    Kosten_Endproduktlager["Fehlmengenkosten", 1] + v_fehlmengenkosten
    *ceil(t_verspätung[1,p]/str_to_time("24:00:00"))*t_verspätung[2,p];
next;

gesamtbestand_endproduktlager :=
generator_Endproduktlager.daily_inventory.sum({2,1}..{2,*});
Kosten_Endproduktlager["Lagerkosten", 1] :=
gesamtbestand_endproduktlager*v_lagerkosten;
Kosten_Endproduktlager["Gesamtkosten", 1] :=
Kosten_Endproduktlager["Lagerkosten", 1] +
Kosten_Endproduktlager["Fehlmengenkosten", 1];
v_durchnbest :=
generator_Endproduktlager.daily_inventory.mittelWert({2,1}..{2,*});

--Gesamtkosten
v_gesamtkosten := Kosten_Endproduktlager["Gesamtkosten", 1]+
Kosten_lagerA["Gesamtkosten", 1] + Kosten_lagerB["Gesamtkosten", 1];

--Durchschnittliche Lieferzeit
for n := 1 to t_Lieferzeit.ydim loop
    gesamtlieferzeit := gesamtlieferzeit+t_lieferzeit["lieferzeit", n];
next;
if t_lieferzeit.ydim > 0
then
    t_lieferzeit["DurchLieferzeit", 1] := gesamtlieferzeit/t_Lieferzeit.ydim;
end;

--Durchschnittliche Verspätung
for q := 1 to t_verspätung.ydim loop
    verspätung := verspätung + t_verspätung[1,q];
next;
if t_verspätung.ydim > 0
then
    t_verspätung[3,1] := verspätung/t_verspätung.ydim
end;
end;
```

**Quellcode B 8: endSim-Methode Hauptnetzwerks „SC“**

```

is
do

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Bestellkosten"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.kosten["Bestellkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Bestellrabatt"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.kosten["Bestellrabatt",1],2));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Fehlmengenkosten"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.kosten["Fehlmengenkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Lagerkosten"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.kosten["Lagerkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Gesamtkosten"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.kosten["Gesamtkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Servicegrad"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.v_servicegrad,3));

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Durchschnittliche Verspätung"] :=
  to_str(Einzelhändler.v_durchVerspätung);

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
  to_str(Einzelhändler.t_lieferzeit[5,1]);

  Ergebnisdaten["Einzelhändler", "Durchschnittlicher Bestand"] :=
  to_str(round(Einzelhändler.v_durchnBestand,2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Bestellkosten"] :=
  to_str(round(Großhändler.kosten["Bestellkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Bestellrabatt"] :=
  to_str(round(Großhändler.kosten["Bestellrabatt",1],2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Fehlmengenkosten"] :=
  to_str(round(Großhändler.kosten["Fehlmengenkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Lagerkosten"] :=
  to_str(round(Großhändler.kosten["Lagerkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Gesamtkosten"] :=
  to_str(round(Großhändler.kosten["Gesamtkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Servicegrad"] :=
  to_str(round(Großhändler.v_servicegrad,3));

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Durchschnittliche Verspätung"] :=
  to_str(Großhändler.t_erspätung[3,1]);

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
  to_str(Großhändler.t_lieferzeit[2,1]);

  Ergebnisdaten["Großhändler", "Durchschnittlicher Bestand"] :=
  to_str(round(Großhändler.v_durchnBestand,2));

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Bestellkosten"] :=
  to_str(round(Produzent.kosten_lagerA["Bestellkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Bestellrabatt"] :=
  to_str(round(Produzent.kosten_lagerA["Bestellrabatt",1],2));

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Fehlmengenkosten"] := "-----";

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Lagerkosten"] :=
  to_str(round(Produzent.kosten_lagerA["Lagerkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Gesamtkosten"] :=
  to_str(round(Produzent.kosten_lagerA["Gesamtkosten",1],2));

  Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A", "Servicegrad"] := "-----";

```

```

Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A","Durchschnittliche Verspätung"] :=
"-----";

Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
"-----";

Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil A","Durchschnittlicher Bestand"] :=
to_str(round(Produzent.v_durchnBest_A,2));

Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Bestellkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_lagerB["Bestellkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Bestellrabatt"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_lagerB["Bestellrabatt",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Fehlmengenkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Lagerkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_lagerB["Lagerkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Gesamtkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_lagerB["Gesamtkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Servicegrad"] := "-----";
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Durchschnittliche Verspätung"] :=
"-----";
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
"-----";
Ergebnisdaten["Produzent Lager Teil B","Durchschnittlicher Bestand"] :=
to_str(round(Produzent.v_durchnBest_B,2));

Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Bestellkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Bestellrabatt"] := "-----";
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Fehlmengenkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_Endproduktlager["Fehlmengenkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Lagerkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_Endproduktlager["Lagerkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Gesamtkosten"] :=
to_str(round(Produzent.kosten_Endproduktlager["Gesamtkosten",1],2));
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Servicegrad"] :=
to_str(round(Produzent.v_servicegrad,3));
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Durchschnittliche Verspätung"] :=
to_str(Produzent.t_erspätung[3,1]);
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
to_str(Produzent.t_lieferzeit[2,1]);
Ergebnisdaten["Produzent Endproduktlager","Durchschnittlicher Bestand"] :=
to_str(round(Produzent.v_durchnBest,2));

Ergebnisdaten["Lieferant 1","Bestellkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Bestellrabatt"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Fehlmengenkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_1.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Lagerkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Gesamtkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_1.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Servicegrad"] := "-----";

```

```
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Durchschnittliche Verspätung"] :=
to_str(Lieferant_1.t_erspätung[3,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
to_str(Lieferant_1.t_lieferzeit[2,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 1","Durchschnittlicher Bestand"] := "-----";

Ergebnisdaten["Lieferant 2","Bestellkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Bestellrabatt"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Fehlmengenkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_2.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Lagerkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Gesamtkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_2.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Servicegrad"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Durchschnittliche Verspätung"] :=
to_str(Lieferant_2.t_erspätung[3,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
to_str(Lieferant_2.t_lieferzeit[2,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 2","Durchschnittlicher Bestand"] := "-----";

Ergebnisdaten["Lieferant 3","Bestellkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Bestellrabatt"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Fehlmengenkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_3.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Lagerkosten"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Gesamtkosten"] :=
to_str(round(Lieferant_3.Fehlmengenkosten,2));
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Servicegrad"] := "-----";
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Durchschnittliche Verspätung"] :=
to_str(Lieferant_3.t_erspätung[3,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Durchschnittliche Lieferzeit"] :=
to_str(Lieferant_3.t_lieferzeit[2,1]);
Ergebnisdaten["Lieferant 3","Durchschnittlicher Bestand"] := "-----";

Gesamtkosten := Einzelhändler.kosten["Gesamtkosten",1] +
Großhändler.kosten["Gesamtkosten",1]+Produzent.kosten_lagerA["Gesamtkosten",1]
+ Produzent.kosten_lagerB["Gesamtkosten",1] +
Produzent.kosten_Endproduktlager["Gesamtkosten",1] +
Lieferant_1.Fehlmengenkosten+Lieferant_2.Fehlmengenkosten +
Lieferant_3.Fehlmengenkosten;

promptmessage("Simulationslauf beendet!");
end;
```

**Quellcode B 9: Methode m\_Auftrag**

```
is
do
  if v_bestellung_unterwegs = false
  then
    Bestellung[1,Bestellung.ydim+1] := z_gleich(3,50,600);
    Bestellung[2,Bestellung.ydim] := Ereignisverwalter.zeit;
    v_bestellung_unterwegs := true;
  end;
end;
```

# Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Projektarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift