

Projektarbeit

System Dynamics – Ein Konzept zur Untersuchung der Möglichkeiten zur Anwendung von System Dynamics in der Logistik

Stephan Kullik

Matrikelnummer: 149262

Studiengang: Maschinenbau

ausgegeben am:
13.12.2017

eingereicht am:
13.7.2018

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe

Zweitgutachter: M.Sc. Astrid Klüter

Kurzfassung

Aufgrund von volatilen Kundenbedarfen, steigender Wirtschaftskraft und zahlreichen weiteren Herausforderungen sind in der Wirtschaft zunehmend Optimierungen der internen Prozesse erforderlich, um im globalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben. System Dynamics hat sich in der Vergangenheit durch die Möglichkeit zu einer Verbesserung der Bewertung von Strategien in anderen Industriebereichen durchgesetzt.

Im Rahmen dieser Projektarbeit wird daher als übergeordnetes Ziel untersucht, ob die bereits in anderen Industriebereichen angewandte Modellierungsmethode System Dynamics auch in der Logistik sinnvoll angewandt werden kann. Hierfür wird bewertet, ob die zunehmende Komplexität einer Supply Chain mit einem umfassenden dynamischen Modell im Vergleich zu einem stark vereinfachenden Modell besser eingeschätzt werden kann. Zu diesem Zweck wird zuerst herausgearbeitet was die Modellierung ausmacht. Das umfasst zum einen das Modellieren selbst, mit seinen Schwächen, Besonderheiten und Zielen sowie zum anderen die Besonderheiten der Modellierung von Supply Chains, wo ebenfalls näher auf Problemfelder und Ziele eingegangen wird. Im Anschluss wird das Grundprinzip von statischen und dynamischen Analyseverfahren näher erläutert, um daraus aufbauend System Dynamics mit seiner Struktur und Funktionsweise zu veranschaulichen. Aus der dargestellten Theorie werden anschließend Bewertungskriterien abgeleitet, um den Einsatz von System Dynamics in der Supply Chain zu bewerten. Die Bewertung erfolgt an dieser Stelle nicht nur mit der zuvor erarbeiteten Theorie, sondern ebenfalls mit einem fiktiven Modell einer Supply Chain. Darauf aufbauend werden Optimierungschancen näher beschrieben, die durch die Implementierung erreicht werden können, welche z. T. ebenfalls am Beispielmodell erläutert werden. Beendet wird dieses Kapitel mit einem Resümee, in dem die Anwendbarkeit von System Dynamics in der Supply Chain kurz zusammengefasst wird. Die letzte Zusammenfassung mit Ausblick gibt wiederum einen Überblick über die gesamte Arbeit und was in der Zukunft bzgl. Simulationen und Rechenleistung zu beachten sein wird.

Abstract

Due to volatile customer requirements, rising economic power and numerous other challenges, the industry is increasingly seeking to optimize internal processes in order to remain competitive in global competition. System Dynamics has prevailed in the past with the ability to improve the evaluation of strategies across many industries.

Within the framework of this project thesis, the overarching goal is to investigate whether the model approach System Dynamics, which has already been applied to other industrial sectors, can also be meaningfully applied in logistics. It evaluates whether the increasing complexity of a supply chain with a comprehensive dynamic model can be better estimated compared to a simplistic model. For this purpose, it is first worked out what constitutes the modelling. On the one hand, this includes modelling itself, its weaknesses, peculiarities and goals as well as the peculiarities of the modelling of supply chains, which also deals more closely with problem areas and goals. Subsequently, the basic principle of static and dynamic analysis methods is explained in more detail in order to illustrate System Dynamics with its structure and mode of operation. Subsequently, evaluation criteria are derived from the theory presented in order to assess the use of System Dynamics in the supply chain. At this point, the assessment is not only based on the previously developed theory, but also on a fictitious model of a supply chain. Afterwards the optimization chances, which can be reached by the implementation, are described in more detail. This chapter concludes with a resume summarizing the applicability of System Dynamics in the supply chain. Finally, a summary with an outlook gives an overview of the entire work and what needs to be considered in the future regarding simulation and computing power.

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt.....	I
Kurzfassung	II
Abstract.....	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung	1
2 Begriffliche Grundlagen und Einordnung.....	3
2.1 Methodische Grundlagen der Modellbildung.....	3
2.1.1 Prozessmodell als Grundlage der Modellbildung.....	4
2.1.2 Schwächen und Besonderheiten stark vereinfachender und komplexer Modellbildung	5
2.1.3 Ziele der Modellbildung	6
2.1.4 Modellbildung und Supply Chain	7
2.1.5 Problemfelder und Ziele in der Supply Chain Modellbildung	8
2.2 Analyseverfahren	11
2.2.1 Statische Analyseverfahren.....	12
2.2.2 Dynamische Analyseverfahren	12
2.3 System Dynamics als Simulations- und Analyseinstrument	13
2.3.1 Struktur und Funktionsweise von System Dynamics	14
2.3.2 Integration von System Dynamics in Industriebereichen	18
2.3.3 Mikro- und Makromodelle bei System Dynamics	20
3 Untersuchung der Anwendung von System Dynamics in der Logistik.....	22
3.1 Bewertungskriterien zur Integration von System Dynamics	22
3.2 Bewertung von System Dynamics in der Supply Chain	23
3.2.1 Komplexität und Vereinfachungen in der Modellierung.....	23
3.2.2 Flexibilität und Erweiterbarkeit von Modellen	24
3.2.3 Ein Supply Chain Modellbeispiel	25
3.2.4 Gültigkeit und Vergleichbarkeit bei System Dynamic Modellen.....	27
3.2.5 System Dynamics zur Strategiebewertung.....	27
3.3 Optimierungschancen durch System Dynamics	28
3.4 Resümee	31

4 Zusammenfassung und Ausblick	33
Literaturverzeichnis	35
Eidesstattliche Versicherung	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Weltweite Verzweigung von Unternehmen	7
Abbildung 2.2: Unternehmensinterne Supply Chain	8
Abbildung 2.3: Darstellung der Bausteine von System Dynamics	15
Abbildung 2.4: Vereinfachter Rückkopplungskreislauf	15
Abbildung 2.5: Exponentieller Wachstumsprozess	16
Abbildung 2.6: Räuber Beute Modell als Flussdiagramm	17
Abbildung 2.7: Simulationsergebnis des Räuber Beute Modells	18
Abbildung 3.1: Beispielmodell einer Supply Chain	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Eignung von Modellierungs- und Simulationsmethoden fürs Supply Chain

Management 10

Abkürzungsverzeichnis

DGL	Differentialgleichung
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
SC	Supply Chain
SCM	Supply Chain Management
SD	System Dynamics
UML	Unified Modeling Language

1 Einleitung

Für Unternehmen sind lang- und mittelfristige Planungsentscheidungen nötig, um langfristigen Erfolg im Konkurrenzkampf mit anderen Unternehmen zu ermöglichen und erfolgreich zu wirtschaften. Dafür müssen negative Konsequenzen durch falsch getroffene Planungsentscheidungen minimiert werden, wofür Entscheidungshilfen nötig sind. Hierfür werden u.a. Simulationsmodelle als Hilfestellung genutzt, um Personen bessere Rückschlüsse zu Entscheidungen mit einzelnen Prozessen oder ganzen Systemen zu ermöglichen (vgl. Belz und Reinhold 2013).

Eines der Modelle der dynamischen Simulation ist System Dynamics (SD), welches der Schwerpunkt dieser fachwissenschaftlichen Projektarbeit ist. SD ist gekennzeichnet durch komplexe, zeitdiskrete, nicht lineare, dynamische und rückgekoppelte Elemente, die in einem System vermascht sind. Durch Betrachtung zahlreicher äußerer Einflüsse werden Simulationsmodelle immer komplexer. Die Einflüsse treten dabei nicht alleinstehend auf, sondern beeinflussen sich untereinander. Damit wird das Trennen von Ursache und Wirkung zunehmend schwerer. Andere stark vereinfachende Modellierungstechniken mit diskreten oder auch hybriden Simulationsmodellen berücksichtigen diese vermaschten Rückkopplungsfaktoren oft nur unzureichend. Die durch die Nichtbeachtung entstehende Ungenauigkeit in der Simulation kann jedoch reduziert werden. Gerade wegen zunehmenden Komplexitätssteigerung der Supply Chain (SC) wird diese Ungenauigkeit immer relevanter (vgl. Weber 1979).

Das Ziel ist daher ein genaueres Simulationsmodell für die SC modellieren zu können und somit genauere Hilfen für Systemeinschätzungen und -verbesserungen zu erreichen. Hierfür ist auszuarbeiten, wie ein bereits in anderen Industriebereichen angewandter Modellansatz System Dynamics auch in der Logistik bzw. im Bereich der Lieferketten zielführend einsetzbar ist. So soll dargestellt werden, in wie weit die zunehmende Komplexität einer SC mit einem umfassenden dynamischen Modell im Vergleich zu einem stark vereinfachten Simulationsmodell besser eingeschätzt werden kann. Dabei wird dieses Ziel von zwei Leitfragen gelenkt. Zum einen ist zu klären, was ist SD, welche anderen Analyseverfahren werden sonst genutzt und wie grenzen sie sich zu SD ab. Zum anderen stellt sich die Frage, welche Optimierungschancen sich durch den Einsatz von SD in der SC bieten.

Diese fachwissenschaftliche Arbeit gliedert sich in zwei große Kapitel mit insgesamt sechs größeren Abschnitten. Das erste große Kapitel 2 umfasst die ersten drei Abschnitte und handelt die Theorie mit begrifflichen Grundlagen und Einordnungen ab, um Grundkenntnisse für Kapitel 3 zu vermitteln. Im ersten Abschnitt 2.1 wird zunächst auf die methodischen Grundlagen der Modellierung eingegangen. Das umfasst zum einen die Erläuterung eines Prozessmodells, samt Schwächen stark vereinfachter Modellierungssprachen, als auch die Erläuterung des hier schwerpunktmäßigen Modellierungsobjektes, die SC. Der zweite Abschnitt umfasst Analyseverfahren, mit der Unterteilung auf statische und dynamische Analyseverfahren. Aufbauend auf das Vorwissen kann im nächsten Abschnitt näher auf SD eingegangen werden. Verstärkt wird hier die Struktur von SD aufgezeigt, um sowohl die Funktion als auch Vorteile verständlich darzustellen. Zur Überleitung ins nächste Kapitel wird weiterhin die erfolgreiche Integration von System Dynamics in Industriebereichen, als auch Mikro- und Makromodelle, erläutert.

Das nächste Kapitel soll Anwendungsbereiche von SD in der SC aufzeigen. Hierfür werden die in Abschnitt 3.1 zuvor aus der Theorie gesammelten Aspekte der Modellierung und Simulation zusammengefasst zu Bewertungskriterien, mit denen die Anwendung von SD in der SC bewertet wird. Darauf aufbauend widmet sich Abschnitt 3.2 dem Kernthema, der Integration von SD in die SC und den damit einhergehende Optimierungschancen. Die Erläuterung der Optimierungschancen wird dabei z. T. mit Hilfe fiktiver SC Szenarien näher dargestellt. Zuletzt wird in Abschnitt 3.4 ein Resümee mit etwaigen Schlüssen zu Anwendungschancen von SD gezogen, wobei schwerpunktmäßig auf die SC eingegangen wird.

2 Begriffliche Grundlagen und Einordnung

In diesem Kapitel werden theoretische Grundlagen über Grundbegriffe dieser fachwissenschaftlichen Arbeit näher beschrieben. Dies umfasst insbesondere die Definition der Begriffe der Modellbildung sowohl allgemein als auch spezifischer der SC-Modellierung, wo insbesondere auf Problemfelder in der SC-Modellierung und Schwächen stark vereinfachender Simulationsmodelle eingegangen wird. Im Anschluss werden statische und dynamische Analyseverfahren aufgegriffen. Mit diesem Vorwissen wird eine Erläuterung von SD sowie der dazugehörigen Struktur und Funktionsweise ermöglicht.

2.1 Methodische Grundlagen der Modellbildung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen der Modellbildung näher erläutert. Für das weitere Verständnis sind einige Grundbegriffe nötig. Da z. T. in der hier genutzten Literatur unterschiedliche Terminologien genutzt wurden, wird im Folgenden kurz näher erläutert wie diese hier zu verstehen sind.

Das Modell ist hier als eine abstrahierte Abbildung der Realität zu verstehen (Bossel 1987; Seidlmeier 2006). Durch ein Modell wird dabei i. d. R. entweder ein Objekt oder eine Abfolge von Ereignissen dargestellt, welche untersucht werden soll. Eine Abfolge von Ereignissen, die zu einer Entwicklung führen, wird auch als Prozess bezeichnet, weshalb für diese Art des Modells unter anderem der terminologische Begriff Prozessmodell genutzt wird (Profos 1982). Im Folgenden wird in der Grundlagenerklärung für ein besseres Verständnis der Begriff Prozessmodell verwendet. Da im weiteren Verlauf der Arbeit nur Prozessmodelle behandelt werden, ist bei dem Begriff Modell im Folgenden immer ein Prozessmodell gemeint. Ähnlich ist die Bezeichnung bei dem Begriff des Simulationsmodells (Gumzej und Rosi 2017), wobei ebenfalls das Prozessmodell gemeint ist. Das Simulationsmodell wird jedoch im Kontext der Analyse bzw. Simulation genutzt, um über Experimente am Modell zu einem Erkenntnisgewinn über das vom Modell abgebildete System zu kommen. Bei der Abbildung von Modellen wird oftmals von einem System gesprochen, was dem Prozessbegriff bezogen auf dieses Arbeitsthema nahekommt. So gilt nach DIN IEC 60050-351 als System, eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden...“ können.

Mit der Modellbildung (Kramer 2008) ist das Modellieren bzw. das Erstellen eines Modells gemeint. Dies geschieht nach den Regeln einer Modellierungssprache, die Anforderungen an den Vorgang der Modellbildung stellt und sich von anderen Modellierungssprachen unterscheidet (vgl. Hesse und Mayr 2008). Synonym wird hier auch von Modellbildungsmethoden oder -techniken (Kramer 2008) gesprochen. Die Beschreibung der jeweiligen Modellierungssprache wird wiederum in mindestens einem Metamodell festgehalten (Hesse und Mayr 2008).

Bei der Unterscheidung von unterschiedlichen Modellen wird ebenfalls der Begriff Modellart genutzt (Profos 1982). Dieser Terminus bezieht sich hier nur auf die Einteilung von Modellen in Cluster.

2.1.1 Prozessmodell als Grundlage der Modellbildung

Nach Profos (1982, S. 55f.) wird ein Prozessmodell als „...ein durch mathematische Beziehungen beschriebenes Abbild bestimmter Eigenschaften eines realen oder gedachten technischen oder nichttechnischen Systemen verstanden“. Hierbei werden nur relevante zugehörige Systemeigenschaften in einer verkürzten Form abgebildet. Diese Abstraktionen werden hierfür zum Zweck der Modellierung i. d. R. nur hinreichend genau durchgeführt. Somit wird eine Abwägung zwischen Aufwand und Nutzen nötig. Mit einem hohen Umfang der mit dem Modell durchzuführenden Untersuchung wird die Komplexität des Modells steigen, was mit höheren Modellbildungskosten einhergeht. Wie groß der Umfang eines Modells sein wird ist stark vom Fall und den Anforderungen an das zu erstellende Modell abhängig. In wechselseitiger Abhängigkeit hierzu steht die jeweilige Modellierungstechnik. Die Wahl der Modellierungstechnik wird durch das zu erreichende Ziel, dem Modellzweck, beeinflusst und ist mit entscheidend für die Modellkomplexität. Die Aufgabe eines Prozessmodells ist dabei die Verknüpfung von Eingangs-, Ausgangsgrößen und Systemvariablen untereinander sowie zusätzlicher Systemparameter herzustellen. Hierbei werden z. T. auch deterministische Größen mit in das Modell eingebunden, um die Zusammenhänge einzelner Elemente darzustellen.

Für die Vorgehensweise zur Bildung eines Modells werden i. d. R. vier unterschiedliche Verfahren genutzt. Zum einen Top Down bzw. Deduktive Modellbildung. Hierbei wird mit der Zerlegung des Systems in klare Schnittstellen begonnen, bevor die Modellierung der Zusammenhänge der jeweiligen Komponenten und die anschließende Modellierung der einzelnen Komponenten erfolgt. Zum anderen ist eine Modellbildung nach Bottom Up bzw. eine induktive oder experimentelle Modellbildung möglich. Bei dieser Vorgehensweise wird mit der Modellierung möglichst geschlossener Elemente begonnen, bevor diese ggf. getestet und dann zu einem System zusammengefügt werden. Als dritte Möglichkeit ist eine Kombination aus Top Down und Bottom Up zu nennen. Die Zerlegung erfolgt hier nach dem Top Down Prinzip, während der Modellaufbau nach dem Bottom Up Vorgehen durchlaufen wird. Somit wird eine systematische problemorientierte Zerlegung sowie ein einfacher Test beim Entwurf ermöglicht. Zuletzt ist das Vorgehen Middle Out aufzuzählen. Dieses Verfahren ist vor allem bei Engpässen sinnvoll. Etwaige kritische Engpässe werden zuerst identifiziert und die Modellbildung erfolgt mit allen relevanten Elementen um den Engpass herum. (vgl. Profos 1982, S. 64 ff.)

Die genauen Abläufe der Modellbildung sind dabei von den jeweiligen verwendeten Modellbildungssprachen bzw. Metamodellen abhängig. Modellierungssprachen sind das Vorgabenmodell mit der jeweiligen Syntax und Semantik, die nötig sind um das Modell ohne Vorwissen des modellierten Systems lesen und verstehen zu können. Mit der Syntax werden inhaltsunabhängige Regeln vorgegeben, die bzgl. der Form und Struktur gelten. Dagegen wird durch die Semantik die inhaltliche Bedeutung des jeweiligen Modells wiedergegeben (vgl. Gutenschwager et al. 2017). Beispiele für einfache Modellierungssprachen sind Petrinetze (Priese und Wimmel 2008), Unified Modeling Language (UML) (Jézéquel et al. 2002) oder Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) (Becker et al. 2012).

Es lassen sich für die Modellbildung nach Zirn und Weikert (2006) vier Phasen der Modellbildung ausmachen, die i. d. R. durchlaufen werden. In der ersten Phase werden Vorgaben gesammelt, während in der zweiten Phase Wirkzusammenhänge ergründet werden, mit denen in der dritten Phase ein quantitatives Modell über in Formeln gebrachte Wirkzusammenhänge erstellt

wird. Zuletzt werden diese Gleichungen in der vierten Phase aufbereitet und in eine Standardform gebracht.

Zu beachten ist hierbei nach Bossel (1987), dass Modelle auf insgesamt vier unterschiedlichen Ebenen ihre Gültigkeit beweisen müssen, um als korrekte Abbildung der Realität zu gelten. Dies umfasst zum einen den Test auf die strukturelle Gültigkeit mit der Frage nach korrekten Strukturbeziehungen, die der Wirklichkeit entsprechen müssen und der Verhaltensgültigkeit, die das System in Bezug auf sein Verhalten mit Randbedingungen bei Umwelteinwirkungen und Anfangsbedingungen prüft. Zum anderen wird getestet ob die empirische Gültigkeit erfüllt ist, wo logische Ereignisse mit empirischen Daten des Realsystems und Modellergebnissen verglichen werden sowie die Anwendungsgültigkeit, wofür das Modell auf seine Sinnhaftigkeit zur Problemlösung des Modellzwecks untersucht wird.

Nach Profos (1982) ist eine Einteilung von Modellarten in folgende Gruppen möglich.

- Theoretischen bzw. empirischen Modellen
- Deterministische bzw. statistische Modelle
- Unveränderliche bzw. veränderliche Modelle
- Parametrische bzw. nicht parametrische Modelle
- Lineare bzw. nicht lineare Modelle.

Aufgrund des Umfangs dieser wissenschaftlichen Arbeit wird hier im Folgenden nur weiter eingegangen auf Modellarten des Typs der linearen bzw. nichtlinearen Systeme und der deterministischen bzw. nichtdeterministischen Systeme.

2.1.2 Schwächen und Besonderheiten stark vereinfachender und komplexer Modellbildung

Eine klare Trennung zwischen den in Abschnitt 2.1.1 dargestellten Modellarten ist nicht immer möglich. Oft wird ein Modell in einer Schnittmenge der vorgestellten Modellarten liegen, was eine klare Auswahl eines zu erstellenden Modells erschwert. Weiterhin sind lineare Modelle bzw. Systeme i. d. R. nur Näherungsbeschreibungen. Allerdings sind lineare Systeme z. T. soweit ausreichend genau, dass sie für ein lineares zeitinvariantes Modell nutzbar werden. Hierdurch wird eine geschlossene Lösung in einem linearen System ermöglicht, was in nichtlinearen Systemen nur in Ausnahmefällen möglich ist. Dabei ist der Rechenaufwand bei der Analyse und numerischen Verfahren bei linearen Systemen geringer im Vergleich zu nichtlinearen Systemen, wobei gefundene Lösungen in linearen Systemen als generell übertragbar anzunehmen sind (vgl. Profos 1982, S. 55 ff.).

In der Praxis werden oft relativ komplexe Modelle genutzt. Um diese Komplexität zu beherrschen werden i. d. R. Differenzialgleichungssysteme in Modellen verwendet. Sie werden als sinnvoll erachtet für die Darstellung von nichtlinearen Beziehungen. Für die Darstellung werden hier pro Differenzialgleichung (DGL) nur eine Eingangs- und eine Ausgangsgröße zur vollständigen Beschreibung des Übertragungsverhaltens benötigt. Algebraische Beziehungen werden somit ausgeschieden und müssen hier nicht direkt berücksichtigt werden. Das Ergebnis hierbei ist ein DGL-System erster Ordnung. Durch diesen Zustandsraum mit einfacher Eingangs- und Ausgangsdarstellung wird eine computerseitige Bearbeitung begünstigt. Als Nachteil ist ein relativ hoher Abstraktionsgrad zu sehen, wegen dem Zusammenhänge oft nicht direkt ersichtlich sind und für in diesem System unerfahrene Modelleure das Arbeiten im Modell erschwert. Ebenfalls

nachteilig wirkt sich die nötige Auswahl von Zustandsvariablen aus den Systemvariablen aus, die subjektiv und nicht eindeutig gewählt werden. Hierdurch wird ein Vergleich mit anderen Modellen zum gleichen Prozess schwerer bzw. aufwendiger (vgl. Profos 1982, S. 57).

Eine Alternative zur Darstellung mittels DGLs wird im Falle linearer zeitinvarianter Systeme über Antwortfunktion gegeben. Hier werden über passend gewählte deterministische Beschreibungen der Verläufe für die entsprechenden Eingangsgrößen ebenfalls Modellierungen ermöglicht (vgl. Profos 1982, S. 57).

Ein Modell, welches zu Optimierungszwecken eingesetzt wird, benötigt zur Lösung eines Problems Randbedingungen. Dies erfolgt i. d. R. analytisch über Verfahren, die sich unterteilen in die Kategorien, die zur Bestimmung von Randbedingungen Ableitungen bzw. Gradienten nutzen und in Verfahren, die dies eben nicht tun. Eine zu lösende Randbedingung wird bei einer einfachen Optimierung beispielsweise durch die Maximierung von einem Wert $F(x)$ gegeben. Bei linearen Modellen mit nur einer Variable ist dies relativ unkompliziert über Verfahren wie die Methode des goldenen Schnittes möglich, wohingegen bei komplexeren nichtlinearen Modellen mit mehreren Variablen die Komplexität zunimmt (vgl. Domschke und Drexel 2011).

2.1.3 Ziele der Modellbildung

Die Ziele der Modellbildung ergeben sich zum einen aus den Grundsätzen der Modellbildung und zum anderen aus dem Auslöser, der die Modellbildung notwendig gemacht hat, dem sog. Modellzweck. Aus den fünf z. T. bereits kurz in Abschnitt 2.1.1 und 2.1.2 angesprochenen Grundsätzen der Modellbildung, der Richtigkeit, Relevanz, Klarheit, Vergleichbarkeit und dem systematischen Aufbau, lassen sich mehrere ausführliche Ziele ableiten (vgl. Schütte et al. 1998).

Eine Modellierung wird u.a. zur Vermeidung von Fehlern genutzt. Dies geschieht durch mehrere Effekte. Zum einen werden beispielsweise durch das frühzeitige durchplanen Fehler schneller in frühen Planungsstadien entdeckt und können noch vergleichsweise leicht und kostengünstig behoben werden. Zum anderen werden durch klare Systemdarstellungen Missverständnisse vermieden, da jedem Projektbeteiligten klar ist, wie das System funktioniert bzw. funktionieren soll. Somit wird die Einigkeit und Kommunikation innerhalb von Projektgruppen erleichtert, wo Menschen nur schwer eine Vorstellung über komplexe Systeme erlangen können. Ein Informationsüberfluss wird hierdurch vermieden oder zumindest gelenkt. Weiterhin soll hierdurch eine Steigerung der Qualität erreicht werden, bei gleichzeitigem Rückgang der Kosten. Dieser Aspekt ist u. a. auch auf die bessere Dokumentation zurückzuführen, die mit einer guten Modellierung einhergeht sowie auf die Wiederverwertbarkeit von sich bereits bewehrten modellierten Systemabschnitten (Siehe hierzu auch Systemarchetypen in Senge und Klostermann 2006). Die Dokumentation ist ebenfalls für die Wartung eines Systems von Bedeutung, da hierfür Wissen über das System benötigt wird (vgl. Schütte et al. 1998; Bandow und Holzmüller 2009).

Ein weiteres Hauptziel der Modellierung ist die Möglichkeit Experimente durchzuführen zu können. Durch das Variieren von Parametern an einem Modell wird die Möglichkeit gegeben das Systemverhalten zu analysieren oder bereits ausgearbeitete Strategien zu testen. Dieses Verfahren wird auch Analyse oder Simulation genannt (vgl. Bandow und Holzmüller 2009).

Zusammenfassend lassen sich nach Bandow und Holzmüller (2009, S. 5 ff.) die Modellzwecke auf die strukturelle Nachbildung eines Systems zurückführen, wozu neben der Dokumentation folgende Punkte gezählt werden:

- „Prognose
- Simulation
- Entscheidung
- Experiment
- Optimierung
- Berechnung
- Gestaltung
- Planung.“

2.1.4 Modellbildung und Supply Chain

Grundlage der näher zu untersuchenden Modellierungsmethodik dieser fachwissenschaftlichen Arbeit ist der Bereich der Supply Chain (SC). Die SC ist als Geflecht von Organisationen und Prozessen zu verstehen. Sie wird erzeugt, durch die Verbindung der jeweils vor und nachgelagerten Elemente. Diese Betrachtung ermöglicht je nach Detailierungsgrad sowohl externe Modellierungen der Kunden- und Lieferantenverhältnisse als auch firmeninterne Modellierung. Dabei reichen externe Lieferantenverhältnisse auf mehrere Vorstufen (sogenannter Tiers) von Lieferantenverhältnissen zurück und können den ganzen Globus umfassen, was in der beispielhaften Abbildung 2.1 ersichtlich werden soll. Bei der firmeninternen Modellierung wird dagegen die interne Beschaffung, Produktion oder der Absatz näher modelliert.



Abbildung 2.1: Weltweite Verzweigung von Unternehmen (Quelle: Wereldkaart met, von Macrovector | Freepik 2017).

Dieser Aspekt der internen SC wird in Abbildung 2.2 dargestellt. Hier werden die internen Abläufe eines Unternehmens aufgezeigt, mit Verbindungen die auch in der internen Lieferkette nicht nur in eine Richtung verlaufen. In diesem Abschnitt soll nicht nur ein Grundverständnis über die SC vermittelt werden, sondern auch auf die hohen Fluktuationen und stark verzweigten, teilweise nicht direkt ersichtlichen Korrelationen zwischen SC-Teilnehmern verwiesen werden.

Diese Korrelationen sind die Grundlage, um ggf. Optimierungschancen aufzuzeigen, wenn sie mit den Charakteristika von SD Übereinstimmungen aufzeigen.

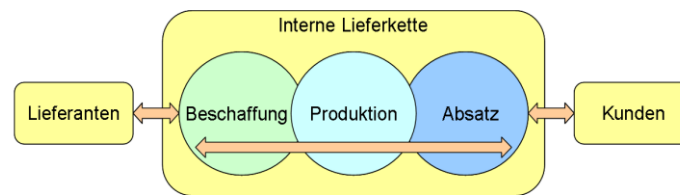


Abbildung 2.2: Unternehmensinterne Supply Chain (Quelle: An illustration of a company's supply chain, von Chen, Paulraj 2004).

Die Verzweigungen der Elemente in der ganzen Welt sind heutzutage so stark vernetzt, dass die Welt gemeinhin auch als „ein großes Dorf“ bezeichnet wird. Dies wird als Sinnbild für die subjektiven Entfernungen der einzelnen SC-Teilnehmer genutzt, die symbolisch immer näher aneinandergerückt werden (vgl. McLuhan et al. 1995). Dieser Effekt ist dabei nicht als natürliche Entwicklung zu sehen, sondern als Antwort auf komplexer werdende Marktbedingungen, die beherrscht werden müssen, um weiterhin Erfolg im Konkurrenzkampf mit anderen Unternehmen zu ermöglichen und somit erfolgreich zu wirtschaften. Einer der maßgebenden Aspekte ist durch die Globalisierung gegeben. Ein erheblicher treibender Einfluss der Globalisierungsaspekte wird beschrieben durch den Anstieg der Variabilität und Volatilität bei Produkten, die wiederum bei der Produktion immer geringere Fertigungstiefen besitzen. Dabei sind trotz einer vernetzten Welt weiterhin kulturelle Eigenheiten von regionalen Absatzmärkten und unterschiedliche politische Ausrichtungen oder ggf. auch Willkür zu berücksichtigen. Während durch die Globalisierung auch Mobilitätshindernisse verkleinert wurden und beispielsweise Zölle oder Transportkosten sanken, ist somit insgesamt trotzdem eine gestiegene Komplexität in der SC zu verzeichnen, die auch in naher Zukunft noch weiter steigen wird (vgl. Pastors 2002; Belz und Reinhold 2013).

Lösungen gegen diese Komplexitätssteigerung führen oftmals zu ebenfalls steigender Komplexität bei der Bewältigung des Problems. Oft wird hier durch den Einsatz von IT mit Automatisierung oder neuen funktionellen Möglichkeiten sowie einer Anpassung der SC versucht, der Komplexität habhaft zu werden. Für die SC wird dies ebenfalls steigende Anforderungen und somit Anpassungen zur Folge haben. Im Einzelnen kann das bedeuten Lieferzeiten weiter zu verkürzen oder zumindest genauer zu strukturieren bzw. besser einzuplanen und somit die gesamten Lieferbedingungen aus Sicht des Kunden zu verbessern (vgl. Kurzmann et al. 2015, S. 9ff.). Als Maßnahmen sind hier beispielsweise die „Smart Factory“ und „Just in Time“ zu nennen (Grundig 2015; Vogel-Heuser et al. 2017).

2.1.5 Problemfelder und Ziele in der Supply Chain Modellbildung

Grundlage der Problemfelder der SC-Modellierung sind die Problemfelder des Supply Chain Management (SCM), da die SC-Modellierung i. d. R. nur als Mittel zum Zweck zur Lösung der Probleme des SCM genutzt wird (Siehe Werner 2013).

Wie im Abschnitt 2.1.4 beschrieben ist hier einer der größten treibenden Faktoren, der das SCM beeinflusst, die Globalisierung. Die Globalisierung führt oftmals zu wachsendem Welthandel mit verlängerten Transportzeiten, Verbreiterungen des Produktportfolios, bei verkürzten Produktlebenszyklen und immer größer werdender Kundenmacht. Damit wachsen zunehmend auch immer wieder die Anforderungen an alle SC-Teilnehmer und damit die Komplexität. Für Unternehmen sind daher lang- und mittelfristige Planungsentscheidungen zu Zielen nötig, um langfristigen Erfolg im Konkurrenzkampf mit anderen Unternehmen zu ermöglichen und erfolgreich zu wirtschaften. Die abzuwägenden Ziele sind dabei z. T. undifferenziert und widersprüchlich. So wird hier zuerst auf das „Zielkreuz der Logistik“ verwiesen, wo Faktoren wie eine hohe Auslastung von Maschinen gegen niedrige Bestände sowie kurze Lieferzeiten gegen eine hohe Liefertreue abgewogen werden müssen. Wenn weiterhin eine hohe Lieferflexibilität und Vermeidung von Sonderkosten gewährleistet wird, sollte ein Grundgerüst für die Wirtschaftlichkeit des SC-Teilnehmers gegeben sein. Da die Komplexität der SC jedoch zunehmend ansteigt und sich durch globale Ereignisse schlagartig verändern kann, beispielsweise durch Naturkatastrophen, ist auch eine kurzfristige Anpassungsfähigkeit von Vorteil. Für die Modellbildung müssen daher entsprechend flexible anpassungsfähige Modellbildungsmethoden genutzt werden, um diesen Ansprüchen zu genügen (vgl. Domschke und Drexl 2011; Wiendahl 1989).

Die Domänen in denen Modelle dabei als Entscheidungshilfe agieren sollen sind in der SC zahlreich. Eine weitere Auswahl besteht beispielsweise aus der Bestimmung des Kundenentkopplungspunktes, Standortentscheidungen, Eigen/Fremdfertigung, Losgrößen, Ladungsträgerwahl, Pull/Push Fertigung, Sicherheitsabstand, Dimensionierung der Fertigung, Transportstruktur, etc. (vgl. Kiener et al. 2017; Werner 2013).

Ein weiterer entscheidender Effekt, der in der SC eine genaue Planung erschwert ist der Forrester oder Bullwhip Effekt. Hierbei entsteht ein Aufschaukeln von Bestellschwankungen, entlang der SC-Teilnehmer Die Schwankungen nehmen dabei vom Kunden ausgehend immer weiter zu. Selbst kleine Amplituden können sich zu den unterschiedlichen Zulieferern hin vervielfachen. Hervorgerufen wird dieser Effekt durch „...lokal auf jeder Stufe prognostizierten Absätzen und lokal gehaltenen Sicherheitsbeständen, durch Preisschwankungen in Form von Promotions, Mengenrabatte etc. und nicht zuletzt aufgrund von Kontingentierungen und dem Engpasspoker der vorgelagerten Stufen“ (Pastors 2002, S. 396 f.).

Damit lassen sich nach Gutenschwager et al. (2017) folgende genauere Fragen zum Ablauf der Produktion bilden:

- Kann der geforderte Durchsatz an Teilen bei gegebener Arbeitszeit erreicht werden?
- Sind ausreichend Pufferplätze vorgesehen?
- Insbesondere: Wie groß sind Lagerflächen in normalen Regalen sowie Durchlaufregalen zu dimensionieren?
- Welcher Lieferant bekommt welche Logistikfläche zugewiesen?
- Wie viele Gabelstapler oder andere Transportfahrzeuge müssen eingesetzt werden?
- Wie werden die Transportaufträge verteilt und ausgelöst?

Umgedeutet können aus diesen Fragen drei allgemeinere Anforderungen ermittelt werden, die das Modell erfüllen muss. Diese lauten nach Gumzej und Rosi (2017)

- Wie groß ist das System bzw. hier die SC auszulegen?
- Können Auslastung und Kosten der Distribution eingeschätzt werden?

- Können Produktions- und Liefermengen optimiert werden?

Zusammenfassend und z. T. erweiternd, bedeutet das nach Gutenschwager et al. (2017, S. 37 ff.) und Weigert et al. (2010) weiter, das folgende Kennzahlen für eine Auslegung benötigt werden:

- Durchsatzbezogene Kennzahlen
- Durchlaufzeitbezogene Kennzahlen
- Bestandsbezogene Kennzahlen
- Zustandsbezogene Kennzahlen
- Auslastungsbezogene Kennzahlen
- Terminbezogene Kennzahlen

Ein Modell, welches ein SC-System modelliert, sollte diese Fragen beantworten oder Kennzahlen zum System aufzeigen können, um eine Hilfestellung im Management zu bieten, wo Entscheidungen i. d. R. entlang unterschiedlicher hierarchischer Ebenen getroffen werden. Diese Ebenen werden nach Gumzej und Rosi (2017) als strategisch, taktisch und operativ klassifiziert. Dabei besitzt jede Ebene unterschiedliche Einflüsse auf die SC.

Hinzu kommt, dass durch die Betrachtung zahlreicher äußerer Einflüsse ein Modell immer komplexer wird. Die Einflüsse treten dabei nicht alleinstehend auf, sondern beeinflussen sich untereinander. Ein Problem hierbei ist die Unterscheidung der Faktoren in Ursache und Wirkung. Daher helfen komplexe Modelle in der SC z. T. weniger für das Verständnis als viel mehr zur Analyse von Strategien (vgl. Weber 1979; Moorman 2008).

Weiter nach Gumzej und Rosi (2017) gilt hierbei, dass die Lösungsfindung für Probleme zunehmend aufwendiger wird, da durch Interdependenzen zwischen den Managementebenen selbst Unterscheidungen zunehmend erschwert werden. Somit ist die Betrachtung der Ebenen entlang einer individuellen Entität nur bedingt möglich. Für die Modellierung in der SC wird daher ein Modell benötigt, welches möglichst entitäts- und ebenenübergreifend ein komplexes System abbildet. Daher gilt gerade hier, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, dass ein Modell an den Modellierungszweck angepasst ausgewählt und modelliert werden muss.

Tabelle 2.1: Eignung von Modellierungs- und Simulationsmethoden fürs Supply Chain Management (Quelle: vgl. Gumzej und Rosi 2017, S. 87).

	Netzwerkentwurf	Strategieentwurf	Ablauf und Zeitplanung
Simulation diskreter Ereignisse	T, O	T, O	T, O
System Dynamics	S, T	S, T	S, T
Agentenbasierende Simulation	S, T	S, T, O	S, T

Legende: S - Strategisch, T - Taktisch, O - Operationell

Die Tabelle 2.1 zeigt welche Modellierungs- bzw. Simulationsmethoden für welche Planungsebene zur Problemlösung geeignet sind. Diese Simulationsmethoden werden im Folgenden näher behandelt. Bei den Verfahren „...stellt sich heraus, dass Agentenbasierende Simulation und SD hauptsächlich zum Lösen strategischer und taktischer Probleme eignen, während Simulation diskreter Ereignisse auf der anderen Seite hauptsächlich zur Lösung operationeller Probleme brauchbar ist“ (Gumzej und Rosi 2017, S. 88). Die strategische, taktische und operationelle Ebene

stehen hierbei für eine mögliche Planungsart nach Fristigkeit, also die zeitliche Planung im SCM und sind gleichzusetzen mit der lang-, mittel- und kurzfristigen Planungsreichweite (vgl. Domschke und Drexl 2011, S. 10).

2.2 Analyseverfahren

Die in diesem Kapitel behandelten Analyseverfahren sind als Problemlösungsmethoden zu verstehen. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird unter Analyseverfahren die Simulation verstanden. Das bedeutet die zuvor hergeleiteten Modelle, die bisher nur zur Verbildlichung eines Sachverhaltens genutzt werden konnten, werden jetzt weitergehend nutzbar. Wurden bei der Modellierung DGLen mit ins Modell eingebunden, so werden diese in der Analyse gelöst, um die Ergebnisse zu veranschaulichen und ggf. in weiteren Schritten Experimente am Modell durchzuführen. Das bedeutet durch Variationen von Parametern an einem Modell wird das Systemverhalten analysiert, besser verstanden, Optimierungschancen im System aufgezeigt und ggf. wird die Effektivität von bereits ausgearbeiteten Strategien getestet. Die Analyse erfolgt aufgrund der großen Anzahl von Rechenschritten dabei i. d. R. mit der Hilfe von Informationstechnik (vgl. Gutenschwager et al. 2017; Zirn und Weikert 2006).

Da für die Simulation ein Modell genutzt wird, ähneln die Charakteristika der Simulation denen des Modells. Die wesentlichen Aspekte die eine Simulation ausmachen sind dabei nach Romeike und Spitzner (2013) zu beschreiben durch:

- Beobachtbarkeit: Das reale System ist nur schwer zu verstehen, da das System zu schnell / langsam arbeitet oder zu klein / groß ist.
- Sicherheit: Eine Analyse wäre in der Realität aufgrund von Gefahren nicht möglich.
- Preis: Eine Analyse ist am realen System teurer als eine Modellbildung mit seiner Analyse.
- Existenz: Das reale System existiert noch nicht und befindet sich noch in der Planungsphase, weshalb eine Untersuchung nicht am realen System durchgeführt werden kann.
- Modifizierbarkeit: Eine Modifikation am Modell ist leichter und günstiger als am realen System.
- Vertraulichkeit: Bei Strategiebewertungen ist die Gefahr des Vertrauensverlustes i. d. R. größer, wenn sie am realen System durchgeführt wird, im Vergleich zu Simulationen, mit einem kleineren Kreis von eingeweihten Personen.
- Reproduzierbarkeit: Durch die Verwendung von gleichen Eingangsparametern lassen sich Ergebnisse erneut erzielen.

Bevor mit der Abstraktion des Sachverhaltes und der Parametrisierung aller relevanten Werte das Modell erzeugt werden kann, ist die Wahl eines passenden Simulationsmodells entscheidend. So sind beispielsweise statische Simulationen für zeitunabhängige Modellierungen zu nutzen und dynamische Simulationen für zeitabhängige Modellierungen (vgl. Gutenschwager et al. 2017). Im Folgenden werden dafür charakteristische Eigenschaften vorgestellt, um in nächsten Kapitel Unterschiede zu SD aufzuzeigen.

2.2.1 Statische Analyseverfahren

Während ein System über seine Eigenschaften mit Hilfe von Attributen sog. Zustandsgrößen abgebildet wird, die den Zustand eines Elementes innerhalb des Systems durch Variablen und Konstanten zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben, wodurch der Systemzustand definiert wird, sind diese in einem statischen Simulationsmodell über die Zeit gesehen konstant (vgl. Gutenschwager et al. 2017). Dieses Verhalten wird als statisch bezeichnet. In solch einem statischen System werden die Zustandsgrößen der Ausgangsgrößen im gleichen Moment wie die Werte der Eingangsgrößen beschrieben (vgl. Wunsch und Schreiber 2006). Beispielhaft für statische Systeme sind Fahrpläne oder Gebäudepläne zu nennen, die i. d. R. über den Betrachtungszeitraum konstant bleiben. Als mathematisches Äquivalent sind hier zeitunabhängige Formeln oder Gleichungssysteme zu nennen, die ebenfalls ein statisches Modell beschreiben (vgl. Gutenschwager et al. 2017). Als Beispiel zu andere Formen von statischen Modellen werden hier Markov-Ketten und Folgerungsnetze genannt. So werden mit Markov-Ketten Wahrscheinlichkeiten für Systementwicklungen mit unterschiedlich wahrscheinlichen Systemzuständen dargestellt. Folgerungsnetze visualisieren dagegen mögliche Zustände, die nur eintreten, wenn notwendige Bedingungen erfüllt werden (vgl. Bossel 1987).

2.2.2 Dynamische Analyseverfahren

Entgegen dem statischen System unterliegt das dynamische System dem Verhalten über die Zeit, wodurch sich das System durch Zustandsänderungen in zur jeweiligen Zeit zugehörige Systemzustände begibt (vgl. Gutenschwager et al. 2017). Für den in dieser Arbeit behandelten Kontext der SC werden in der Praxis i. d. R. solch dynamische Analyseverfahren genutzt. Beispielhaft zu nennen wäre hier für dynamische Systeme der Transport auf oder in den zuvor erwähnten statischen Systemen, mit Gebäude- oder Fahrplänen. Durch die zeitabhängige Bewegung wird das System dabei dynamisch. Die zu wählenden Grenzen zwischen statischer und dynamischer Analyse sind hierbei subjektiv. Die genannten Beispiele für statische Systeme können auch dynamisch bewertet werden, wenn beispielsweise bei Gebäuden der Verschleiß mit der Zeit analysiert werden soll und dieser hierfür zusätzlich modelliert wird. Somit wird aus einem statischen Gebäudeplan ein dynamisches Modell (vgl. Bossel 2004).

Für Beispiele von dynamische Analyseverfahren werden hier Modelle von folgenden Systemen genannt: zeitabhängige deterministische Systeme, zeit- und ortabhängige deterministische Systeme oder ereignisdiskrete Systeme. Die Kombination der deterministischen zeit- und ortsabhängigen Systeme wird durch partielle Differenzialgleichungen wiedergegeben und ist oftmals mit einem hohen Rechenaufwand verbunden. Als Beispiel zu nennen ist die sog. Finite Elemente Methode, die auf einer Zerlegung in kleine Einheiten mit hoher Anzahl basiert. Hierbei entstehen so viele Verbindungen, dass Korrelationen zwischen ihnen aufwendig berechnet werden müssen. Simulationen mit diesem Verfahren sind somit vergleichsweise zeit- und rechenintensiv (vgl. Bossel 1987, S. 15ff.).

Die Auftrennung in statische und dynamische Analyseverfahren ist nicht die einzige. Eine Einteilung in kontinuierliche und ereignisdiskrete Systeme ist ebenfalls möglich. Im Folgenden wird das letztere näher beschrieben werden, da ereignisdiskrete Systeme bei dynamischen Analyseverfahren regelmäßig zur Anwendung kommen. So ist ein dynamisches ereignisdiskretes System auch als sog. erweiterter Automat modellierbar. Hierbei ist ein Automat als Maschine zu

verstehen, die über Zustände und Zustandsänderungen das System als Schaltsystem darstellt, welches „ausreichend genaue Informationen für die Lösung der betrachteten Analyse und Entwurfsaufgaben“ bereitstellt (Lunze 2017, S. 51). Ein Automat wird über drei Bestandteile zusammengesetzt. Zum einen die Zustandsmenge (oder den Zustandsraum), die die Menge an möglichen Zuständen ausdrückt, die ein Automat oder System annehmen kann. Zum anderen besteht ein Automat aus der Ergebnismenge und der Zeitmenge als Teilmenge der reellen Zahlen. „Der Gesamtsystemzustand zu einem Zeitpunkt wird durch die Wertebelegung aller Attribute aller Systemelemente zu diesem Zeitpunkt beschrieben.“ (Gutenschwager et al. 2017, S. 13). Tritt zu einem Zeitpunkt ein Ereignis ein, so wechselt das System von einem Zustand in einen Folgezustand, wobei der Wechsel des Zustandsüberganges in einer Zustandsübergangsfunktion beschrieben wird. Damit ist die Zustandsübergangsfunktion einer der Kernbestandteile eines Automaten (vgl. Lunze 2017; Gutenschwager et al. 2017). Nach Gumzej und Rosi (2017, S. 84 f.) zeichnet sich die agentenbasierte Simulation durch folgende Eigenschaften aus:

- „Entitätsorientierung
- Schwerpunktmäßige Modellierung von Entitäten und deren Interaktionen
- Heterogenität der Entitäten
- Mikroentitäten sind aktive Objekte, die in ihren Umgebungen agieren, untereinander kommunizieren und autonome Entscheidungen treffen
- Entscheidungen und Interaktionen zwischen Agenten führen Dynamik in Systeme ein
- Agenten und ihre Umgebungen bilden formale Modelle
- Der Zeitablauf ist diskret und auf Modellebene universal
- Modelle lassen sich durch Veränderungen der Verhaltensregeln von Agenten und der Systemstrukturen flexibilisieren
- Systemstrukturen sind während Simulationsläufen variabel.“

Zusammenfassend gilt, ob ein Simulationsmodell statisch / dynamisch oder kontinuierlich / ereignisdiskret ist hängt nicht nur vom Charakter des zu modellierenden Systems, sondern auch vom Modellzweck ab. Eine klare Abgrenzung ist somit nicht möglich (vgl. Lunze 2017).

2.3 System Dynamics als Simulations- und Analyseinstrument

Eines der Modelltypen der dynamischen Simulation ist System Dynamics (SD), welches Schwerpunkt dieser fachwissenschaftlichen Projektarbeit ist. SD ist gekennzeichnet durch komplexe, zeitdiskrete, nichtlineare, dynamische und rückgekoppelte Elemente, die in einem System vermascht sind. SD, früher auch Industriel Dynamics oder auf Deutsch auch Systemdynamik genannt, ist eine von J. W. Forrester Ende der 50er Jahre entwickelte Modellierungssprache zur Darstellung sozialökonomischer und technischer Systeme (vgl. Weber 1979, S. 5 ff.; Gumzej und Rosi 2017) unter der Fragestellung wie sich die Systeme unter dem Einfluss sich ändernder äußerer Einwirkungen verhalten (Profos 1982, S. 11). SD basiert auf den Grundlagen der Regelungstechnik, wobei Elemente in Blockdiagrammen aufgebaut werden. (Der genaue Aufbau und die Funktionsweise der Elemente der Regelungstechnik wird hierbei nicht weiter dargestellt und wird wie im Werk Regelungstechnik I, II, III von Unbehauen 2000a, 2000b, 2009 angenommen).

Die Annahme dabei ist, dass dynamische Systeme mit Verzögerungen und Verstärkungen reagieren, dabei durch vermaschte Rückkopplungsschleifen verbunden sind und somit interpretiert werden können. Aufgrund der hohen Komplexität der Modelle werden sie weiter in Subsysteme aufgeteilt, die ebenfalls als eigenständiges System betrachtet werden können. Die Abgrenzungen der Subsysteme sind dabei subjektiv von der Zielsetzung der Modellierung sowie dem Informationsgehalt abhängig. Die für die Vermaschung genutzten Rückkopplungsschleifen werden abhängig von ihren Ursache-Wirkungsbeziehungen als positive oder negative Rückkopplungsschleife bezeichnet. Negativ ist die Schleife wenn „...die Rückwirkung auf die die Änderung verursachte Variable der Änderung entgegengerichtet ist“ oder positiv falls der gegenteilige Effekt mit ein exponentieller Wachstumsprozess vorliegt (Weber 1979, S. 5 ff.).

Nach Gumzej und Rosi (2017) werden die Simulationsparadigma von SD durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- „Systemorientierung
- Schwerpunktmäßige Modellierung von Systemvariablen
- Homogenität der Entitäten
- Verzicht auf Entitäten auf Mikroniveau
- Einführung von Dynamik in Systeme mittels Koppelschleifen
- Puffer und Flüsse bilden formale Modelle
- Der Zeitablauf ist kontinuierlich als Bestandteil der Systemvariablen, deren Werte sich durch Transaktionen ändern.
- Modellflexibilität ermöglicht, die Struktur von Systemen außerhalb von Simulationsläufen zu verändern“

2.3.1 Struktur und Funktionsweise von System Dynamics

Nach Weber (1979) wird ein SD Modell mathematisch durch ein nicht-lineares DGL-System wiedergegeben, wobei Variablen durch Zustandsgrößen des Systems (Level), die Zustandsgrößen verändernden Raten (Rate) und Hilfsgrößen zur Bestimmung dieser Raten (Auxiliary) wiedergegeben werden. Zusammenhänge werden durch gerichtete Kanten dargestellt, wobei zwischen Abhängigkeiten (Pfeile mit gestrichelter Linie) und Material oder Informationsflüssen (durchgehende Pfeile) unterschieden wird (Siehe Abbildung 2.3). Mittels der Quelle und Senke werden hierbei Abgrenzungen einzelner Flüsse zu den Systemgrenzen dargestellt. Diese Systemabgrenzung erfolgt in dieser Form nur bei der Flussdiagrammdarstellung (vgl. Burkhard 2005, S. 32).

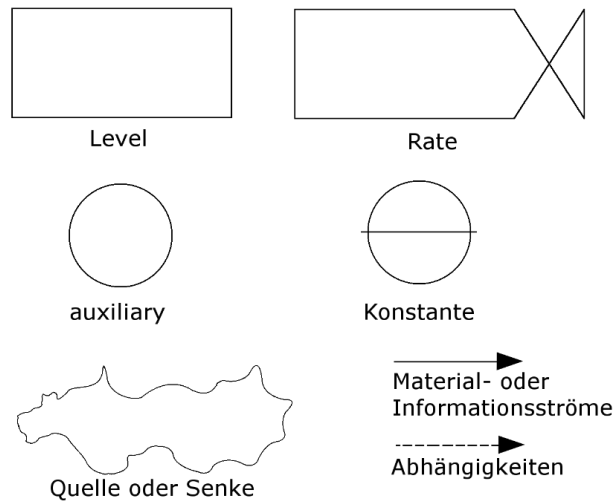


Abbildung 2.3: Darstellung der Bausteine von System Dynamics (Quelle: Weber 1979, S. 7).

Für die Darstellung von Modellen unter SD wird je nach Literatur zwischen zwei oder drei unterschiedlichen Wirkungsdiagrammen unterschieden. Zum einen wird eine Einteilung in Subsystemdiagramme, Feedbackdiagramme und Bestandsflussgrößendiagramme bzw. Flussdiagramme beschrieben (vgl. Wilms 2012). Zum anderen aber auch die einfachere Aufteilung in die grundsätzlichen Rückkopplungskreislaufdiagramme (Causal Loop Diagramm, Ursache-Wirkungsdiagramm oder Kausaldiagramm) und die bereits genannte Gruppe der Bestandsflussdiagramme (vgl. Bala et al. 2017).

Der Aufbau eines Rückkopplungskreislaufdiagrammes wird in Abbildung 2.4 dargestellt. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben besitzt das hier dargestellte System eine positive Rückkopplung, da ein exponentielles Wachstum der Bevölkerung vorliegt. In dieser Darstellung erfolgt dabei ausschließlich eine übersichtliche Darstellung des Systems, um Ursache-Wirkungszusammenhänge zwischen einzelnen Entitäten zu skizzieren. Aufgrund der rein beschreibenden Art wird diese Art des Modells auch als qualitatives Modell bezeichnet (vgl. Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 24 ff.). Analog hierzu bietet der Diagrammtyp der Subsystem Diagramme eine „...aggregierte Übersicht über die relevanten Subsysteme des betrachteten Systems und die wesentlichen Wechselbeziehungen“ (Wilms 2012, S. 113). Zusammen werden sie bzgl. der Quantifizierung unter qualitativen Modellen zusammengefasst (vgl. Burkhard 2005, S. 36). Nach Burkhard f. (2005, S. 36) gilt weiterhin, dass qualitative Modelle eine gewisse Größe nicht überschreiten dürfen, um weiterhin der Anschauung des Systems zu dienen. Dieser Aspekt gilt insbesondere, wenn über Wirkungsgraphen auch Wirkungsbeziehungen zwischen Elementen qualifiziert werden.

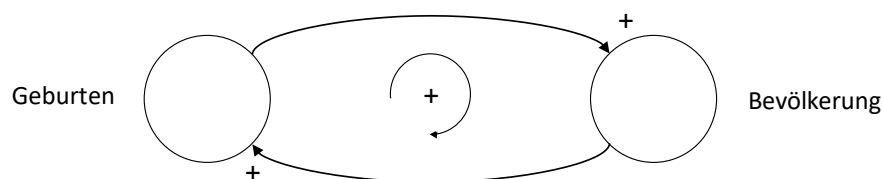


Abbildung 2.4: Vereinfachter Rückkopplungskreislauf (Quelle: Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 17).

Dagegen zeigt Abbildung 2.5 den prinzipiell gleichen Sachverhalt des exponentiellen Bevölkerungswachstums mit der zuvor in Abbildung 2.3 dargestellten Symbolik. Dabei wächst eine gegebene Bevölkerung (Level) um die Anzahl von Geburten bzw. dem Bevölkerungszuwachs (Rate) pro Zeitperiode an. Wie groß dieser Zuwachs von Geburten ist hängt dabei von der Bevölkerungsgröße selbst sowie von der Geburtenrate (Modellkonstante) ab, die angibt wie viele Geburten statistisch pro Mensch hinzukommen. Zu beachten ist hierbei, dass das Modell stark vereinfacht ist. In einem realistischeren Fall wäre so z.B. die hier als Konstante angegebene Geburtenrate nicht mehr konstant, sondern von weiteren Faktoren abhängig, was die Komplexität und Dynamik eines realen Modells widerspiegelt. In einer Simulation zeigt sich als Ergebnis dieses Modells eine einfache exponentielle Wachstumskurve. Hierbei wächst die Bevölkerung mit jeder Zeitperiode zunehmend schneller an.

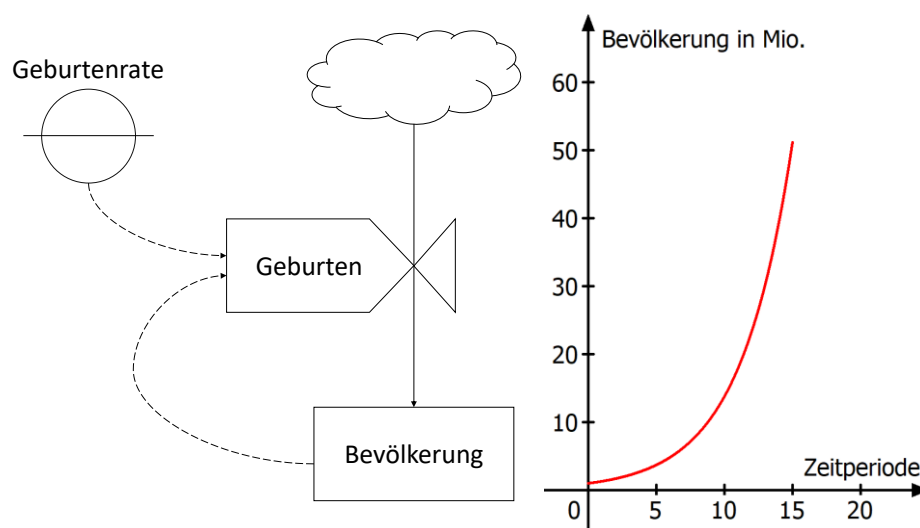


Abbildung 2.5: Exponentieller Wachstumsprozess (Quelle: vgl. Weber 1979, S. 8).

Diese Darstellungsform ist die des Flussmodells und fällt durch ihre genauere Beschreibung und Strukturierung des Systems mit Unterscheidung von Elementen in die Kategorie der quantitativen Modelle (vgl. Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 29 ff.; Burkhard 2005, S. 36 ff.).

Wie Zusammenhänge in der Modellbildung zusammenwirken wird in einem neuen Beispielmmodell in der Abbildung 2.6 dargestellt. Wie im zuvor beschriebenen exponentiellen Wachstumsmodell in Abbildung 2.5 wächst dabei prinzipiell auch die Population der Hasen an. An dieser Stelle wird das Modell um zwei Änderungen erweitert. Zum einen wird die maximale Hasenpopulation durch eine beschränkte Tragfähigkeit begrenzt und zum anderen wird die Anzahl der Hasen in diesem Modell durch eine Interaktion mit Füchsen reduziert. Umgekehrt hängt der Fuchszuwachs nicht nur von der Größe der Fuchspopulation, sondern direkt von der Anzahl der erbeuteten Hasen ab. Dabei ist die Anzahl der erbeuteten Hasen wiederum von der Anzahl der Füchse abhängig. Die Fuchspopulation unterliegt in diesem Modell keinen natürlichen Fressfeinden, daher wird ihre Population analog zum exponentiellen Wachstumsmodell durch eine Rückkopplung ergänzt. Diese Rückkopplung dient hier jedoch der Darstellung des Fuchstodes, weshalb die hier dargestellte Rückkopplung nicht als positive, sondern als negative Rückkopplung eingebunden ist.

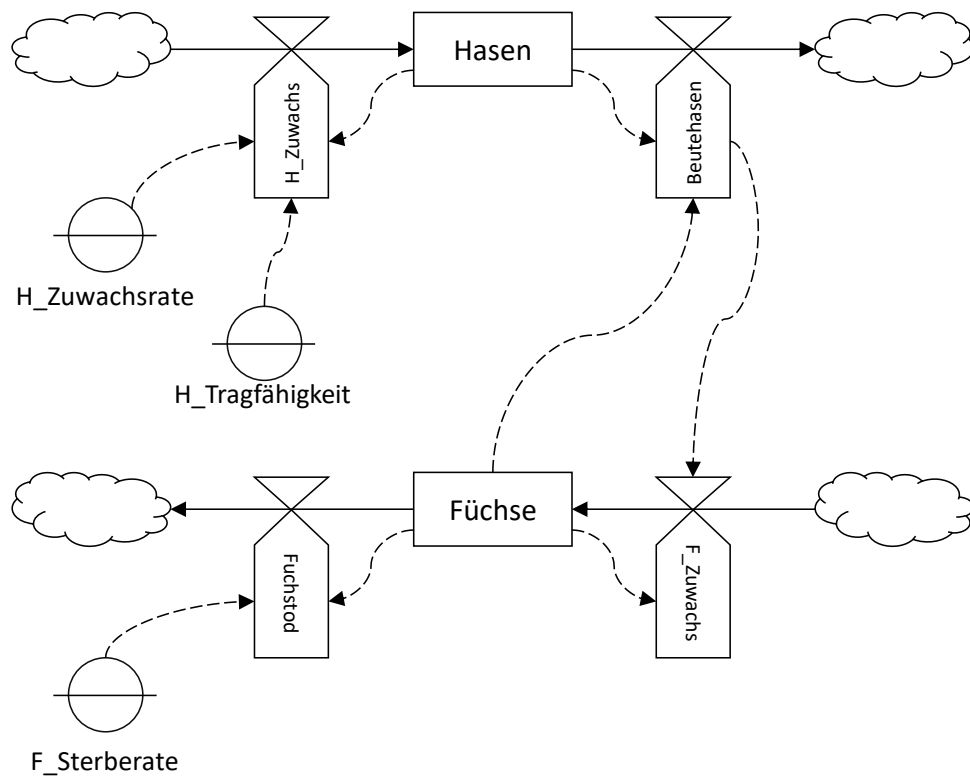


Abbildung 2.6: Räuber Beute Modell als Flussdiagramm (Quelle: vgl. Ossimitz und Schlöglhofer 1990, S. 33).

Wenn das dargestellte Modell mit DGLen modelliert wurde, kann eine Auswertung relativ unkompliziert computergestützt erfolgen. Ein mögliches Ergebnis dieses Modells wird in Abbildung 2.7 in einem zweidimensionalen Diagramm dargestellt. Hierbei wird die Hasenpopulation auf der X-Achse und die Fuchspopulation auf der Y-Achse aufgetragen. Zu Beginn (mit einem Kreis gekennzeichnet) ist die Population von Hasen deutlich größer als die Tragfähigkeit ihrer Population, weshalb ihr Bestand schnell rückläufig ist. Zu diesem Zeitpunkt steht für die Fuchspopulation ausreichend Nahrung zur Verfügung, wodurch die Fuchspopulation stark anwächst. Durch diese große Jägerpopulation wird wiederum die Beutetierpopulation mit der Zeit so stark reduziert, dass letztendlich der Hungertod für viele Füchse eintritt. Nachdem die Hasenpopulation sich durch die geringe Fuchspopulation erneut stärker verbreiten kann, wird der hier beschriebene Vorgang mit verringerter Schwingungsamplitude immer wieder wiederholt und läuft einem Konvergenzpunkt entgegen. Zu diesem Zeitpunkt ist das System in einen eingeschwungenen Zustand übergegangen, in dem sich eine relativ konstante Anzahl aus Beutetieren und Jägern eingestellt hat. (vgl. Bossel 1987, S. 66).

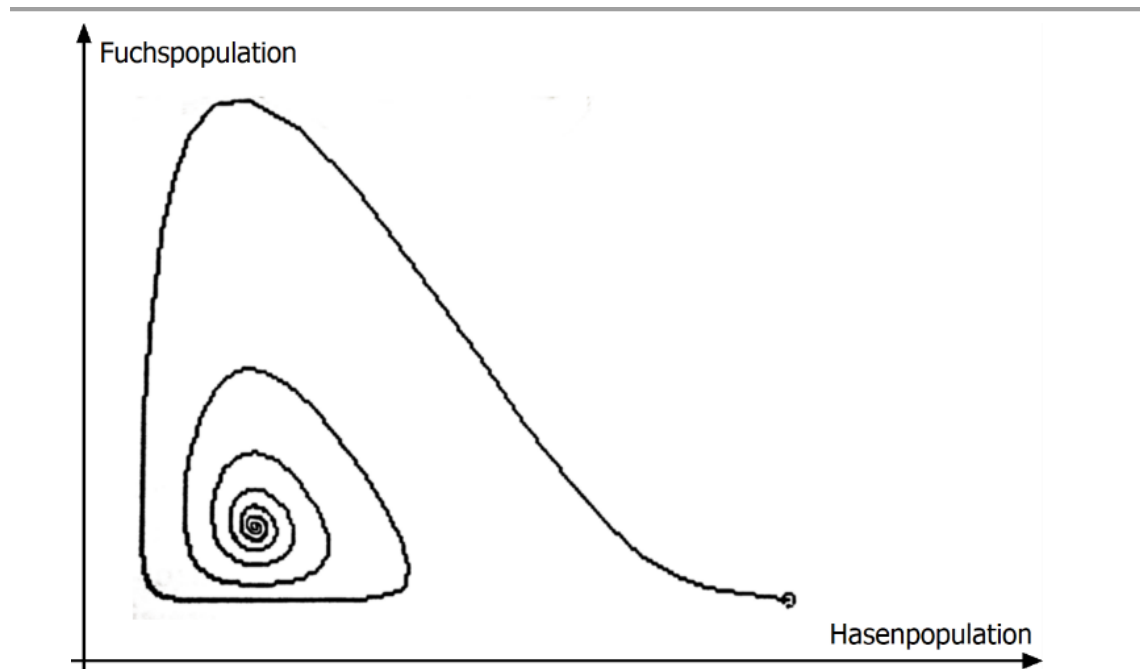


Abbildung 2.7: Simulationsergebnis des Räuber Beute Modells (Quelle: vgl. Bossel 1987, S. 67).

Nach Burkhard (2005, S. 40) ist bei der Modellbildung von SD - Modellen die mentale Kreativität ein bedeutender Faktor. So wird durch SD einerseits die Möglichkeit gegeben mentales Wissen in ein Modell einzubringen, sorgt andererseits auch dafür, dass subjektive und fehlerhafte Annahmen des Entwicklers mit ins Modell aufgenommen werden können.

2.3.2 Integration von System Dynamics in Industriebereichen

SD ist bereits seit den 70er Jahren in mehreren Industriebereichen integriert worden. Exemplarisch wird hier näher auf die Bereiche des Weltbevölkerungswachstums, der Finanzbranche und der SC eingegangen, wo eine Integration von SD erfolgreich und zielführend umgesetzt werden konnte oder eine Untersuchung stattfand.

Die Ausgangslage der Finanzdienstleister wird durch gewisse Gemeinsamkeiten zu der Entwicklung der SC geprägt. So finden Veränderungen in der Finanzbranche vor dem Hintergrund hoher Komplexität statt, teilweise noch ausgeprägter als in den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 dargestellten Randbedingungen zur SC. So gilt nach Moorman (2008, S. 4 ff.) „Unternehmen der Finanzbranche unterliegen im besonderen Maße politischen, regulatorischen, demographischen, technologischen und ökologischen Einflüssen.“ Des Weiteren sind Finanzdienstleister in einem internationalen Netz aus Wirtschaftsstrukturen und Kapitalströmen eingebunden, das mit Restrukturierungen in kürzer werdenden Intervallen sowie mit hohen Ansprüchen von Kunden, Mitarbeitern und Eigentümern verbunden ist, was alles ebenfalls zu einer Komplexitätssteigerung führt. Eine langfristige Planung wird somit zunehmend erschwert und durch eine erhöhte Komplexität wird die Fehleranfälligkeit ebenfalls gesteigert. Die Konsequenzen der Finanzindustrie ähneln dem Ansatz dieser Wissenschaftlichen Arbeit: „Instrumente und Methoden zur Unterstützung des Management sind dringend erforderlich“ (Moorman 2008, S. 4).

Weiter nach Moorman (2008) sind klassische Ansätze zur Komplexitätsreduktion in einfachen Ursache-Wirkungsketten bei der Problemanalyse zur Strategieentwicklung oft zu kurz grei-

find. Somit wird oft ein zu starker Fokus auf Einzelprobleme gelegt, wobei der Gesamtzusammenhang aus dem Blickfeld gerät und durch Rückkopplungen ausgelöste dynamische Komplexität bei einer Analyse über den Zeitverlauf zu wenig berücksichtigt wird. Daher wurden SD Modelle gerade im Bereich der Ursache-Wirkungsketten eingebunden, um diese Diskrepanzen eines zu starken Fokus abzustellen. SD Modelle werden in diesem Zusammenhang insbesondere zur Bewertung von Strategien genutzt indem SD bei der Auswahl einer zum jeweiligen Problem passenden Strategie hilft.

Der Einsatz von SD als Weltmodell des Bevölkerungswachstums ist nach Weber (1979) als Forschungsobjekt zur Alternative zum neoklassischen Wachstumsmodell entstanden. Die Intention war Erklärungen für wirtschaftliche Phänomene zu finden, die zur damaligen Zeit auftraten, z. T. zu Problemen führten und nicht mit dem damals gängigen neoklassischen Wirtschaftsmodell erklärbar waren. Weber führte dies auf die zur damaligen Zeit genutzten Modelle zurück, welche überwiegend zu statischer und unflexibler Natur waren. Dabei wurde untersucht, ob mit der Dynamik des Simulationsmethode SD eine Alternative geschaffen werden kann, welche die Realität in genaueren Maß abbildet. Somit wurde durch den kybernetischen Ansatz die Möglichkeit gegeben, Probleme nicht mehr nur isoliert zu betrachten, sondern miteinander verflochten in komplexeren Systemen. Dieser Lösungsweg war nötig, da Entitäten in der Realität oft nicht unabhängig voneinander, sondern miteinander verzweigt sind.

Bei der damals neuen Anwendung von SD als Simulationsmodell für ein Weltmodell ist neben Würdigungen ebenfalls Kritik geäußert worden. Unter anderem wurde kritisiert, dass die zuvor getroffenen Annahmen, auf denen das Systemverhalten beruht, das Modell zu stark beeinflussen und sind daher infrage gestellt worden. Das Simulationsergebnis zeigt dabei bei kleinen Änderungen der Randbedingungen z. T. grundlegend andere Ergebnisse. Um das Weltmodell als Prognoseinstrument zu nutzen ist somit eine Untersuchung der Validität des Modells nötig, was die Zuverlässigkeit, die Zielangemessenheit und die empirische Gültigkeit umfasst (vgl. Weber 1979, S. 21 ff.).

Nach Burkhard (2005) wurde zur damaligen Zeit bei der Simulation mit SD z. T. auf die Validierung von Modellen verzichtet (Siehe Abschnitt 2.1.1), obwohl eine einmalige Kalibrierung des Modells an vergangenen Daten ggf. nicht ausreicht für eine detailgetreue Modellbildung. „Die Einschätzung, wann ein Modell die realen Verläufe ungefähr abbildet, ist naturgemäß recht subjektiv“ (Burkhard 2005, S. 37). Hierbei ist zu beachten, dass der Genauigkeitsanspruch ebenfalls vom Modellzweck abhängen kann und ggf. angepasst werden muss (vgl. Burkhard 2005, S. 37f.).

Zusammenfassend lässt sich nach Burkhard (2005, S. 39) sagen, dass die Systemtheorie SD entwickelt und integriert wurde, um immer komplexer werdenden Problemen mit einem ganzheitlichen Lösungsansatz zu begegnen. Dabei grenzt sich SD von anderen analytischen Ansätzen ab. Beispielsweise wird im mechanistischen Ansatz versucht die Problemlösung isoliert von Abläufen in anderen Disziplinen zu suchen. Dagegen wird bei der Systemtheorie versucht eine ganzheitliche Sichtweise einzunehmen, ohne dass Zusammenhänge zwischen verschiedenen Einflussgrößen zerrissen werden.

Wie in den Abschnitten 2.1.4 und 2.1.5 dargestellt, gelten für Modellierungen in der SC besondere Herausforderungen. Da die Beispiele in der Logistik vielschichtig sind, wird im Folgenden Abschnitt das Beispiel der Kombination von SD in der SC bei der Automobilbranche nach

Gumzej und Grm (2017) behandelt. Hierbei gilt, dass wegen der Probleme vor denen das SCM steht, Modelle zur Analyse und Verbesserung benötigt werden. Dies umfasst insbesondere die Optimierung des Materialflusses mit dem oft genutzten „Cross-Docking Verfahren“. Für die effiziente Beherrschung dieses Prozesses sind die ankommenden Transportgüter möglichst schnell und direkt weiter zu transportieren, um „Just in Time“ Belieferungen zu ermöglichen. „Direkt“ wird in diesem Zusammenhang verstanden als Transport möglichst ohne Zwischenlagerung. So sollen Lagerkosten möglichst geringgehalten werden. Für den Betrieb von Produktionslinien sind „rollende Lager“ dabei von großer Bedeutung. Sollten bei Transporten Engpässe auftreten, könnten ganze Produktionslinien stillstehen. Daher ist die Produktion von strategisch bedeutenden Prozessen immer zu gewährleisten. Damit solche Lieferausfälle nicht auftreten, ist die Funktionalität des komplexen SC Netzwerkes zu garantieren, wofür wiederum möglichst genaue Planungen und Planungswerkzeuge benötigt werden

Der Einsatz von SD soll dabei helfen die Probleme des SCM, die hier kurz angedeutet wurden, zu beheben. Das bedeutet Probleme diagnostizieren, Betriebe optimieren und Lösungen evaluieren. Hierbei soll durch den SD Ansatz eine grundlegende Simulationsmethode zur Modellierung und Steuerung des SC Netzwerkes integriert werden. Ein möglicher Nutzen ist das Entgegenwirken zu dem in Abschnitt 2.1.5 beschriebene Forrester Effekt. In diesem Fall werden Verzerrungen der Bestände entlang der SC durch eine bessere Planung mittels SD berücksichtigt. Ebenso werden Entscheidungshilfen und Notfallpläne benötigt. Hierfür sollen „Was ist wenn Szenarien“, mit einem großen Spektrum von Zukunftsvorhersagen hergestellt und Ergebnisse verständlich an Entscheidungsträger vermittelt werden. Ein generelles Ziel ist hierbei i. d. R. ebenfalls die Gewinnmaximierung mit der Optimierung. Die Annäherung an dieses Ziel wird beispielsweise über Stellschrauben der Lagerbestände, Wartungskosten oder geographische Vorteile zu erreichen sein. Als Auslöser einer solchen Optimierung ist hierbei auch ein wiederkehrendes Problem in der SC denkbar, wie beispielsweise ein Lagerbestandsproblem. Ebenfalls denkbar ist die Anwendung von SD, zur Problemidentifikation, um die genaue Ursache eines bestimmten Problems zu finden, wenn ein ungewolltes Systemverhalten vorliegt. Das Ergebnis dieser Untersuchung lässt sich mit den zuvor genannten Punkten verbinden und ermöglicht neben der Identifikation des Problems auch eine Evaluation von Maßnahmen.

Als weiterer Vorteil von SD beim Einsatz in der SC wird hierbei die einfache Integrierbarkeit des Modells zur computerseitigen Modellierung und Auswertung hervorgehoben. So wie in den in Abschnitten 2.1.1, 2.1.2 und 2.3.1 beschrieben wird dabei eine relativ genaue Vereinfachung über Intervallrechnungen mit DGLen ermöglicht (vgl. Gumzej und Rosi 2017).

Bei einer weiteren Untersuchung von SD in der SC der japanischen Automobilbranche, ist eine Begutachtung bei einer verstärkten Betrachtung entlang einer verallgemeinernden Betrachtungsebene der sog. Makroebene, bzw. der Makromodellebene, erfolgt (vgl. Kumar und Yamaoka 2007).

2.3.3 Mikro- und Makromodelle bei System Dynamics

Die in Abschnitt 2.1.1 beschriebene subjektive Sicht bei einer Modellerstellung kommt beim Modellieren von komplexen Zusammenhängen zum Tragen. Ein Beispiel für solch einen komplexen Zusammenhang ist die SC zu nennen. Je nach Modellzweck müssen Prozesse auf unterschiedlichen Analyseebenen betrachtet werden. Zum einen ist eine Sichtweise bestehend aus einzelnen

zusammenfassenden Prozessbausteinen möglich. Prozessbausteile stehen in diesem Zusammenhang für Gruppen oder Netzwerke weiterer untergeordneter kleiner Prozesse. Bei dieser übergeordneten Sichtweise wird von der sog. Makroebene gesprochen. Ausgehend von dieser Makroebene stehen somit die Beziehungen zwischen Organisationsgruppen im Vordergrund. Charakteristisch sind hierbei wechselwirkende Beziehungen zwischen den einzelnen Entitäten. Zum anderen sind Modelle mit einer detailreichen Abbildung eines Systems ohne die in der Makroebene genutzten zusammenfassenden Vereinfachungen denkbar. Hierbei stehen i. d. R. Individuen oder einzelne Prozesse im Vordergrund. Bei dieser Ebene wird wiederum von der sog. Mikroebene gesprochen. Während Zusammenhänge im Makromodell ersichtlich sind, ist für eine genaue Analyse von Makrophänomenen die Einbeziehung eines Mikromodells sinnvoll, wenn aus dem Modell heraus eine genaue Identifikation von Prozessschwachstellen erfolgen soll. Somit ermöglicht das Mikromodell statt einem übergeordneten Segment, welches beispielsweise im Makromodell modelliert ist, auch einen einzelnen Prozess oder Mitarbeiter als Fehlerquelle zu identifizieren. (vgl. Greve et al. 2009).

Durch die starke Vernetzung von SC-Teilnehmern in sowohl der Mikroebene als auch der Makroebene sind somit je nach Modellzweck beide Anwendungsfälle denkbar. Somit ist der Einsatz von SD auf beiden Ebenen prinzipiell möglich, da in beiden Fällen zahlreichen Rückkopplungsschleifen auftreten (vgl. Kumar und Yamaoka 2007). Im Einsatz von SD zur Systemanalyse reicht daher die Modellierung eines übergreifenden Makromodells zusammen mit der Modellierung von lediglich einzelnen Mikromodellen bei den Segmenten, in denen Problemprozesse identifiziert werden sollen. Somit wird Modellierungsarbeit rationalisiert und monetäre Kosten eingespart.

In Kombination mit der SC sind nach Gumzej und Rosi (2017, S. 80) die Mikro- und Makroebene von folgenden Charakteristika geprägt:

„Mikroebene

- viele und heterogene Entitäten
- lokale Interaktionen zwischen Entitäten
- strukturierte Entitäten
- adaptive Entitäten

Makroebene

- Selbstorganisation
- Koevolution von Entitäten
- Abhängigkeit von Verbindungen/Transportwegen.“

In dieser Arbeit wird aufgrund des Umfangs schwerpunktmäßig nur auf Makromodelle eingegangen. Durch die Sicht auf Organisationsgruppen wird hierbei eine Erklärung des Prinzips von SD mit Rückkopplungsschleifen in der SC leicht ersichtlich, während sich die Modellierung auf einfache Beispielbausteingruppen beschränkt. Da das Prinzip der Modellierung und der Analyse prinzipiell das gleiche ist, orientieren sich die Beispiele daher verstärkt an der Sichtweise der Makroebene.

3 Untersuchung der Anwendung von System Dynamics in der Logistik

In diesem Kapitel werden zunächst die zuvor aus der Theorie gesammelten Aspekte der Modellierung und Simulation zusammengefasst zu Bewertungskriterien, mit denen die Anwendungsbereiche von SD in der SC bewertet werden können. Durch diese Kriterien wird näher auf die Anwendungsbereiche in der SC eingegangen und Optimierungschancen hervorgehoben.

3.1 Bewertungskriterien zur Integration von System Dynamics

Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, sind für die Modellierung und Simulation in der SC zahlreiche Faktoren von Bedeutung, um ein effektives und zielgerichtetes Ergebnis zu erreichen. In diesem Fall wird als Ziel von einer möglichst genauen Abstraktion der Realität mit anschließender Analyse, bei vertretbarem Arbeits- und Ressourcenaufwand ausgegangen. Mit den nachfolgenden Bewertungskriterien soll im Weiteren überprüft werden in wie weit SD diese Kriterien erfüllt.

- Zu klären ist wie komplex die Modellierung in der SC sein muss, mit der Fragestellung ob lineare Vereinfachungen ausreichen, um gültige Simulationsergebnisse zu erreichen. Dabei gilt, dass wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben nicht alle Verfahren der Analyse gleich schnell sind und den gleichen Ressourcenverbrauch besitzen. Vereinfachungen haben hierbei einen bedeutenden Einfluss auf den Ressourcenverbrauch. Für die Einbindung von SD in die SC ist daher weiter zu prüfen, ob eine Einbindung ohne nennenswerten Einsatz von Technik möglich ist und trotzdem ausreichend genaue Simulationsergebnisse bieten kann.
- Da Systeme in der SC heutzutage großen Fluktuationen ausgesetzt sein können, muss sich eine Flexibilität mit Anpassungsfähigkeit und Erweiterbarkeit in der verwendeten Modellierungstechnik widerspiegeln.

Für die Bewertung von Anwendungsbereichen von SD in der SC wurden Anwendungsspezifische Fragen herausgearbeitet, die auf ihre Machbarkeit zu prüfen sind. Das umfasst neben den in Abschnitt 2.1.3 dargestellten Zielen der Modellbildung auch Fragen der Neuplanung mit Festlegungen vom Kundenentkopplungspunkten, Standortentscheidungen, Eigen/Fremdfertigung, Dimensionierung der Fertigungs- und Transportstruktur mit strategische Wahlen von Losgrößen, Ladungsträgern, Produktionsprinzipien nach dem Pull oder Push Verfahren, der Größe des Sicherheitsbestandes etc. Dabei lassen sich z. T. vergleichsweise einfache Fragen im Tagesgeschäft einer SC ableiten, wie beispielsweise:

- Kann der geforderte Durchsatz an Teilen bei gegebener Arbeitszeit erreicht werden?
- Sind ausreichend Pufferplätze vorgesehen?
- Insbesondere, wie groß sind Lagerflächen in normalen Regalen sowie Durchlaufregalen zu dimensionieren?
- Welcher Lieferant bekommt welche Logistikfläche zugewiesen?
- Wie viele Gabelstapler oder andere Transportfahrzeuge müssen eingesetzt werden?
- Wie werden die Transportaufträge verteilt und ausgelöst?

In allgemeineren Anforderungen an SD formuliert bedeutet das:

- Wie groß ist die SC auszulegen?
- Können Auslastung und Kosten der Distribution eingeschätzt werden?
- Können Produktions- und Liefermengen optimiert werden?

Ein Teil der hier genannten Faktoren und Anforderungen wird daher im nächsten Abschnitt anhand von Fallbeispielen näher untersucht, um die Anwendbarkeit von SD in der SC in diesen Punkten zu bestätigen oder ausschließen zu können.

- Sowohl die in Abschnitt 2.1.1 dargestellten notwendigen Gültigkeitskriterien als auch die in Abschnitt 2.1.3 aufgeführten Grundsätze für Modelle müssen auch für SD in der SC erfüllt werden. Somit ist zu prüfen, ob Aspekte von SD die Erfüllung dieser Kriterien behindern. Da die Validität für jedes entwickelte Modell generell geprüft werden sollte, wird die Gültigkeit hier als gegeben angenommen. Für die Bewertung ist daher weiter zu prüfen, ob beim Einsatz von SD leicht Diskrepanzen bei der Erfüllung der Grundsätze der Modellbildung entstehen können.
- In Abschnitt 2.1.2 wurden Industriebereiche beschrieben in denen SD bereits integriert wurden. Dabei wurde die Fähigkeit von SD zur Strategiebewertung und Ersatz für vereinfachte Simulationsmodelle hervorgehoben. Daher ist im Folgenden zu ermitteln, ob und wie diese Bedingungen auch auf den Einsatz von SD in der SC gelten.

3.2 Bewertung von System Dynamics in der Supply Chain

Für die Einbindung von SD in der SC sind wie bereits in Abschnitt 3.1 beschrieben wurde zahlreiche Bedingungen für eine erfolgreiche Implementierung zu erfüllen. Im Folgenden wird daher mit den zuvor genannten Kriterien auf die Theorie in Kapitel 2 zurückgegriffen, um mit den dort behandelten Bereichen die Einführung von SD in der SC zu bewerten. Des Weiteren werden Kriterien anhand eines Beispielmodells aus der SC abgehandelt.

3.2.1 Komplexität und Vereinfachungen in der Modellierung

Zur Frage der linearen Vereinfachung und Komplexität ist zuerst zu klären, ob sie ausreichend genau ist. In Abschnitt 2.1.2 wurde festgehalten, dass lineare Vereinfachungen immer einen Fehler mit sich bringen, für einfache Schätzungen z. T. allerdings ausreichend genau sind. Da jede Simulation eine Vereinfachung ist und ihr Ergebnis einer gewissen Schwankung unterliegt, ist ein vereinfachtes Modell somit durchaus anwendbar, wenn der Fehler berücksichtigt wird. Aufgrund der hohen Komplexität die Modelle in der SC oftmals haben würde sich der Fehler allerdings i. d. R. exponentiell vergrößern. Mit jeder genutzten linearen Funktion würde ein zusätzlicher Vereinfachungsfehler hinzukommen. Mit einer so hohen Ungenauigkeit wird ein Ziel der Simulation in der SC verfehlt. Denn hierbei gilt, für eine langfristige Planung, die ohnehin schon starken Schwankungen unterliegt, soll ein möglichst genaues Simulationsergebnis erzielt werden, um so eine möglichst effiziente Entscheidungshilfe im Unternehmen zu bieten (Abschnitt 2.1.5).

DGLen besitzen einerseits einen hohen Abstraktionsgrad, welcher das Einarbeiten ins Modell erschwert, sind andererseits aber gut für die computergestützte Auswertung geeignet. Da Computertechnik heutzutage weit verbreitet ist, wird somit sowohl das Arbeiten mit SD als auch der Einsatz von SD prinzipiell fast überall möglich. Aufgrund des hohen Abstraktionsgrades mit

DGLen und Flussdiagrammen sind z. T. zusätzliche Modelle zur Erklärung in Form von Kausal-diagrammen sinnvoll (Abschnitt 2.3.1). Da Simulationen vergleichsweise viel Rechenbedarf benötigen, ist weiter zu prüfen, in wie weit SD mehr Rechenressourcen benötigt als andere Verfahren. Wie in Abschnitt 2.1.2 weiter beschrieben wird, muss bei einem nicht linearen Gleichungssystem mehr Rechenleistung aufgebracht werden, um das Gleichungssystem zu lösen, als bei einem linearen Gleichungssystem. Im Fall von SD würden hierbei nichtlineare DGLen genutzt werden (Abschnitt 2.3.1), wobei sich mit der θ -Notation bestätigen lässt, dass hierbei mehr Rechenschritte zur Lösung benötigt werden, als bei linearen Vereinfachungen. Bei der numerischen Rechnung wird die Zeitvariable allerdings ebenfalls diskretisiert und nicht für alle Zeitwerte berechnet, sondern erfolgt nur entlang eines engmaschigen infinitesimal großen Gitters. Die Gitterbreite wird dabei i. d. R. jedoch so klein gewählt, dass der Fehler ausreichend klein bleibt, sodass sein Einfluss oft zu vernachlässigen ist. Somit werden trotz des nur sehr kleinen Fehlers vergleichsweise wenige Rechenressourcen benötigt. Wie in Abschnitt 2.2.2 bei der Finite Elemente Methode beschrieben, gilt die Bedingungen nur, solange ein Simulationsmodell nicht übermäßig viele Elemente enthält. Da die SC immer komplexer wird, müssen Modelle analog ebenfalls komplexer modelliert werden, um alle relevanten Elemente des Systems einzubinden. Die Lösung komplexerer Systeme benötigt dabei systembedingt mehr Rechenschritte und somit mehr Rechenleistung, um in einer für den Anwender vertretbaren Zeit ein Ergebnis auszugeben. Da SD die gleichen Rechenprinzipien wie andere Simulationsverfahren nutzt ist durch den Einsatz von SD in der SC nur bedingt die Möglichkeit gegeben Rechenressourcen einzusparen. Daher sollten vergleichsweise rechenstarke Informationssysteme für die Simulation von komplexen Systemen genutzt werden.

Bei der Modellbildung in der SC wird i. d. R. ein System in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt, damit kommt der statischen Analyse nur vergleichsweise wenig Bedeutung in der SC-Modellierung zu. Dagegen ist SD ein dynamisches Verfahren welches nicht nur zeitliche Abhängigkeiten, sondern auch zahlreiche andere Ursache-Wirkungsverzweigungen, berücksichtigt und damit prinzipiell eine Möglichkeit der guten SC-Modellierung darstellt. Dieser Zusammenhang gilt insbesondere, da die zu modellierenden Modelle der SC auf Makroebene durch stärkere Verzweigungen immer komplexer werden. Die hier benötigten Rückkopplungsschleifen in Kombination mit Systemabbildungen von hoher Genauigkeit können gut mit SD in Modelle implementiert werden. Aufgrund der Anforderungen nach hoher Genauigkeit ist der Einsatz von linearen Vereinfachungen dagegen als nicht zielführend zu betrachten.

3.2.2 Flexibilität und Erweiterbarkeit von Modellen

Weiter gilt, das eine Modellierungstechnik ausreichend flexibel sein muss, um sich den Fluktuationen der SC entsprechend anzupassen. Durch den Wettbewerbsdruck mit dem immer größer werdenden Wunsch nach Produktvariationen, kurzen Lieferzeiten und sich durch unvorhersehbare Ereignisse ändernde Lieferwege oder Bedingungen wird die Bedeutung von flexiblen Modellen immer wichtiger. Flexibilität wird hierbei als Anpassbarkeit und Erweiterbarkeit eines Modells verstanden. In Abschnitt 2.3 und 2.3.1 wurde dabei beschrieben, dass SD als Simulationsmethode i. d. R. auf Computermodelle zurückgreift, wodurch eine Änderung am bestehenden Modell relativ unkompliziert und ohne eine gesamte Neumodellierung möglich ist. Bei komple-

nen Modellen ist das Flussmodell von SD dagegen als unübersichtlich anzusehen. Wenn Änderungen oder Erweiterungen vorgenommen werden sollen, dann sollte der Entwickler das Modell kennen. Das Einarbeiten ist als erschwert anzusehen, wenn ein Anwender kein Vorwissen vom System besitzt. Die Möglichkeit der flexiblen Anpassbar- und Erweiterbarkeit ist jedoch weiterhin als gegeben anzusehen.

3.2.3 Ein Supply Chain Modellbeispiel

Die in den Bewertungskriterien dargestellten Anwendungsfragen werden im Folgenden durch ein fiktives Modell bewertet. Hierbei wird ein stark vereinfachtes Modell genutzt, welches nur prinzipiell die jeweilige Möglichkeit aufzeigen soll und zahlreiche Verzweigungen mit Einflüssen, die in der Praxis auftreten, vernachlässigt. Das Modell in Abbildung 3.1 zeigt vereinfacht die SC eines Fahrradproduzenten auf Makroebene. Dabei umfasst das Modell sowohl Elemente des Transportes entlang des Wertstromflusses innerhalb einer SC als auch den Marktkreislauf, welcher von dem Bedarf an Produkten beeinflusst wird.

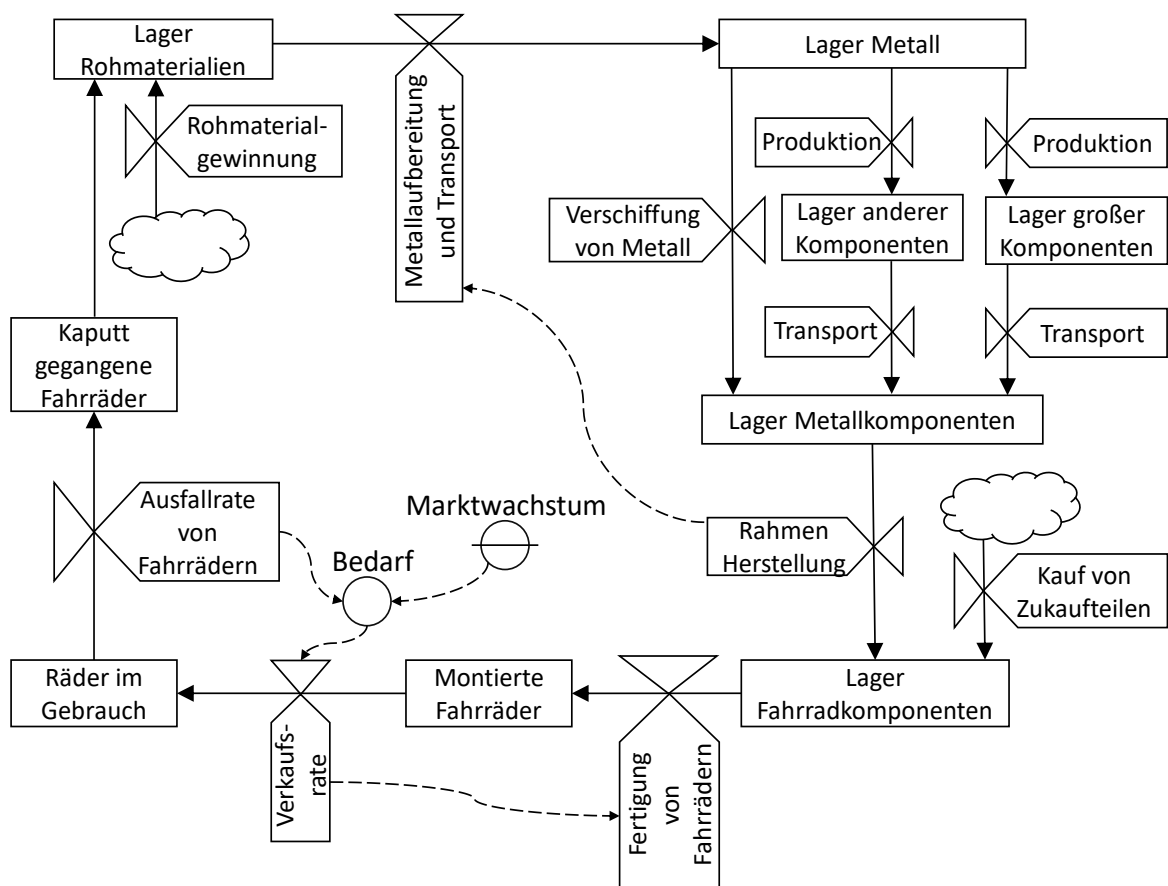


Abbildung 3.1: Beispielmodell einer Supply Chain (Quelle: vgl. Jain et al. 2013, S. 417).

In diesem Beispielmodell wird Rohmaterial aufbereitet zu Metall und weiter zum Lager eines Unternehmens transportiert. Von hier wird der Werkstromfluss für unterschiedliche Fertigungen aufgeteilt, bevor er wieder im Lager eines fremden Standortes zusammenfließt. Denkbar sind hier zum einen Kleinteilfertigungen wie die nötigen Kugellager und zum anderen Rohfertigteile als Rohteile für den Rahmen, sowie Aluminiumpulver für ein Spritzgussverfahren. Bei der Fertigung

der Rahmenteile wird dabei im Modell ein Informationsfluss dargestellt, der die Metallaufbereitungsrate beeinflusst. Damit wird das Verhältnis zwischen verbrauchten und zu beschaffenden Ressourcen synchronisiert. Dieser Informationsfluss wird hier nur beispielhaft an einer Stelle eingeführt und sollte in einem realen Modell und der Praxis häufiger zwischen Wertschöpfungsschritten genutzt werden, um die Produktion effizient zu steuern (Pull-Fertigung). Die fertigen Rahmenteile werden mit weiteren Zukaufteilen zwischengelagert, bevor sie fertig montiert werden. Somit sind mehrere interne und auch externe Wertstromflüsse zu beachten. Wie viele Fahrräder montiert werden hängt dabei von der Anzahl der verkauften Räder ab. Da das Produkt Fahrrad sowohl ein sperriges als auch ein saisonales Produkt ist, wo die Lagerung fertig montierter Räder relativ viel Platz benötigt, aber die Verkaufszahlen je nach Jahreszeit stark schwanken sind hier Abwägungen zu treffen und Prozesskontrollen durchzuführen, wobei das Modell Abhilfe schaffen kann. Die Verkaufsrate wiederum ist selbst von einer Hilfsvariable abhängig, nämlich dem Bedarf. Der Bedarf setzt sich aus dem Marktwachstum und der Ausfallrate von Fahrrädern zusammen, welche als statistischer Wert von allen Rädern in Gebrauch angenommen wird. Damit wird hier vergleichsweise unkompliziert eine positive Rückkopplungsschleife im SD Modell dargestellt. Der Vollständigkeit halber werden schlussendlich beschädigte Räder wieder dem Wertstoffkreislauf zugeführt.

Neben der Möglichkeit zur Verdeutlichung des Systems mittels eines Modells, kann ein solches Modell über ein DGL-System gelöst werden. Das Ergebnis eines stark vereinfachten Modells kann damit ggf. bereits Engpässe aufzeigen, Restlaufzeiten von Pufferbeständen bestimmen, Maschinen- und Logistikkapazitäten sowie Arbeitskosten aufzeigen oder das Einschwingverhalten darstellen. Das bedeutet zum einen, dass erkenntlich wird ob eine Wachstumsrate zu klein ist, also ob ein Prozess zu wenig produziert und daher andere Prozesse nicht voll ausgelastet werden. Zum anderen können strategische Entscheidungen getroffen werden. Ein Beispiel für eine strategische Entscheidung wäre die Untersuchung ob mit geplanter Obsoleszenz Verkaufszahlen gesteigert und damit der monetäre Gewinn erhöht werden kann. Trotz eines begrenzt großen Kundenmarktes würde somit trotzdem eine Möglichkeit zu Absatzsteigerungen ermöglicht werden. Dies geschieht durch eine schrittweise Berechnung zu jeder einzelnen Zeitperiode. Die Ergebnisse der einzelnen Level und Rates werden hierfür tabellarisch gespeichert und sind anschließend für die Bewertung der einzelnen SC Entitäten heranzuziehen.

Wie am Modell gezeigt wurde können somit die Anfangsfragen, ob mit SD sowohl die Größe einer SC ausgelegt als auch die Auslastungen und Kosten der Distribution bestimmt werden kann, positiv beantwortet werden. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben werden zur Lösung des Problems allerdings entsprechend viele Randbedingungen nötig. Die Optimierung von Produktions- und Liefermengen muss dagegen noch gezeigt werden. Dies geschieht zusammen mit den genaueren Simulationscharakteristika im Abschnitt der Optimierungschancen.

Für die Ermittlung der Produktionsmengen ist ein wie in Abschnitt 2.3.3 beschriebenes Modell auf der Mikroebene vorteilhaft. Hierbei werden die einzelnen Produktionsschritte genauer modelliert, wodurch eine genauere Identifikation von einzelnen Störprozessen zugelassen wird. Somit kann mit SD prinzipiell in allen Bereichen der SC erfolgreich eingesetzt werden.

3.2.4 Gültigkeit und Vergleichbarkeit bei System Dynamic Modellen

Wie in Abschnitt 2.1.1 beschrieben muss bei einem Modell, welches ein reales System abbilden soll, die strukturelle Gültigkeit, die Verhaltensgültigkeit, die empirische Gültigkeit und die Anwendungsgültigkeit erfüllt sein. Da die Anforderungen der Gültigkeiten auf ein Modell bezogen sind, müssen diese an prinzipiell an jedem erstellten Modell getestet werden. Da SD die Erfüllung der Anforderungen prinzipiell ermöglicht, wird die Gültigkeit hier als erfüllt angenommen. Analog gilt diese Annahme für die Grundsätze der Modellierung. Die in Abschnitt 2.1.2, 2.3.1 und 2.3.2 beschriebene Subjektivität der Modelle mit unterschiedlichen Auslegungen führen beim Einsatz von SD in der SC ggf. zu einem Problem. Das umfasst zum einen Entscheidungen, welche Systemeigenschaften besonders bedeutsam sind und zum anderen wie hierfür Randbedingungen zu wählen sind. Durch subjektive Einflüsse werden bei mehreren Modellierungen des gleichen Systems von unterschiedlichen Entwicklern unterschiedliche Modelle entstehen. Die Vergleichbarkeit zu anderen Modellen wie sie in Abschnitt 2.1.1 gefordert wird, ist somit nur bedingt gegeben. Durch die hohe Komplexität von Modellen in der SC wird der Effekt bei Randbedingungen von SD Modellen verstärkt. Selbst kleine Änderungen an Randbedingungen eines Modells werden am Ergebnis ggf. zu signifikanten Unterschieden führen (Abschnitt 2.3.2). Zurückblickend betrachtet werden bei der Wahl der Randbedingungen z. T. schlicht falsche Annahmen getroffen. Je komplexer ein Modell wird, desto mehr Annahmen werden getroffen, was eine größere Fehleranfälligkeit bedeutet und die Kontrolle der gültigen Abbildung zunehmend erschwert.

Auch wenn der Effekt subjektiver Randbedingungen bei SD durch die hier oftmals behandelten komplexen Systeme und daher komplexen Modellen verstärkt beachtet werden muss, so gilt die starke Ergebnisschwankung prinzipiell generell für alle komplexen DGL-Systeme. Allerdings sind die Auswirkungen durch die hohe Anzahl von Einwirkungen bei SD besonders zu beachten. Daher sollte beim Einsatz von SD als Gegenmaßnahme verstärkt auf Kontrollen in Kombination mit genauer Dokumentation und Absprachen zwischen Projektmitarbeitern geachtet werden. Für Entwickler ist daher für das Modellieren ein möglichst genaues Vorwissen über die in SD zu modellierende SC von Vorteil.

3.2.5 System Dynamics zur Strategiebewertung

Bei Optimierungsproblemen ist oftmals keine einfache Maximierung eines Wertes gesucht, was mit SD auch lösbar ist, sondern eine Abwägung zwischen widersprüchlichen Zielen. Als Beispiel wurde hierfür in Abschnitt 2.1.5 das Zielkreuz der Logistik genannt. Mit dem Einsatz von SD allein ist dieses Problem nicht zu lösen. Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben wird, ist mit der Integration von SD in die SC allerdings eine Hilfestellung gegeben, die Führungskräften bei strategischen Fragen helfen kann.

Wie in Abschnitt 2.1.5 beschrieben sind hierbei drei Ebenen zu beachten, in denen Hilfestellungen benötigt werden. Das umfasst die strategische, die taktische und die operationelle Ebene. Wie festgestellt wurde eignet sich SD zum Einsatz in der strategischen sowie der taktischen Planungsebene. Im Bereich der kurzfristigen Planungen, bzw. auf der operativen Ebene, ist der Einsatz von SD dagegen nur bedingt als sinnvoll zu erachten. Bei den in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten Mikro- und Makromodellen wurde eine Auftrennung in unterschiedliche Betrachtungsbereiche als sinnvoll erachtet. Da die Betrachtung der Planungsebenen entlang einer individuellen Entität nur bedingt möglich ist, sollte hierbei ggf. auch auf mehrere Modelle zurückgegriffen werden.

Die Stärke von SD liegt dabei im Bereich der Makromodelle, welche vor allem Kausalzusammenhänge zwischen übergeordneten Organisationen behandeln, was sich in der Nutzung von SD in den Planungsebenen widerspiegelt. Die Begründung hierfür ist eine ebenfalls übergeordnete Betrachtung in der strategischen und taktischen Planungsebene. Die Unterscheidung nach Netzwerkentwurf, Strategieentwurf sowie Ablauf und Zeitplanung ist für den Einsatz von SD wiederum unbedeutend. Hier ist SD generell einsetzbar (Abschnitt 2.1.5).

Zur Abgrenzung zu anderen Verfahren lässt sich festhalten, dass bei entitätsübergreifenden Problemen sowohl die Agentenbasierende Simulation als auch SD zielführend sind, während die Ereignisdiskrete Simulation aufgrund einer detaillierteren Modellierung Probleme z. T. besser in den Vordergrund rücken kann und somit eher für Simulationen im Operativen Bereich sinnvoll ist. Während SD eigentlich ein Simulationsverfahren mit kontinuierlichem Zeitablauf ist, lässt sich der Zeitverlauf hier diskretisieren, womit SD dem Zeitablauf von ereignisdiskreter Simulation und der agentenbasierenden Simulation gleichkommt. Für die Auswahl zur Strategiebewertung ist somit je nach Anwendungsfall eines oder mehrere Simulationsverfahren zu wählen. Bei bestimmten Fällen, wie in der operativen Planung, ist SD alleine nur bedingt zielführend.

3.3 Optimierungschancen durch System Dynamics

Neben der Bewertung, welche im letzten Abschnitt vorgenommen wurde, werden in diesem Abschnitt die Optimierungschancen von SD in der SC dargestellt. Für das Aufzeigen von Optimierungsmöglichkeiten in der SC durch eine Simulation mit Hilfe von SD wird vorerst erneut auf das in Abschnitt 3.2 vorgestellte Beispielmodell zurückgegriffen (Siehe Abbildung 3.1). Für die Darstellung von Chancen werden Anfangsszenarios dargestellt, anhand derer Probleme gefunden und somit Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Da in diesem Beispiel keine echte Simulation durchlaufen wird, erfolgt die Darstellung hier rein schematisch. Im ersten Szenario wird jedes Level des Modells auf einen zufällig gewählten Anfangsbestand von jeweils 20 Losgrößen festgesetzt. Entsprechend des Modells werden sich die Stückzahlen bei einem Simulationsdurchlauf mit jeder Zeitperiode verändern, wodurch ersichtlicher wird wo ggf. Probleme bei Lagerbeständen bestehen. In Abschnitt 3.2 wurde bereits beschrieben, dass zwischen den Prozessen der Rohmetallaufbereitung und der Rahmenherstellung keine Pull-Produktionsbeziehungen herrschen. Die Fertigung und der Transport der Zwischenfertigungsteile erfolgt dabei mit einer vollen Auslastung der Produktions- und Transportkapazität. Die Folgen hiervon sind, dass der Lagerbestand im Metalllager relativ weit unter die Anfangslosgröße sinkt, wohingegen der Bestand des Metallkomponentenlagers weit über der eingeplanten Losgröße ausfällt. Durch einen unnötig großen Bestand wird hierbei nicht nur unnötig viel Kapital durch die Komponententeile gebunden, sondern auch die Lagerkosten höher gehalten als sie bei einer gesteuerten Pull-Fertigung wären. Analog verhalten sich mehrere Flussdiagrammstränge beim Zusammenlaufen. Da hier keine Steuerung stattfindet müssen diese Prozesse exakt aufeinander abgestimmt sein. Ist keine Abstimmung vorhanden wird mit der Zeit ein Überschuss entstehen, von mindestens einer der Komponentengruppe im Vergleich zu einer anderen. Während diese Optimierungschancen rein am Modell ersichtlich waren, lassen sich wie in Abschnitt 3.2.3 beschrieben, durch das Ergebnis einer computergestützten Simulation auch in komplexeren Systemen Optimierungschancen mittels SD anhand von fehlerhaften Prozessen finden.

Wenn eine Pull-Steuerung bei Prozessen vorliegt, wie im Beispielmodell bei der Montage der Räder, dann wird mit Hilfe von SD eine Abwägung möglich. Eine Abwägung ist in diesem Fall nötig, um zwischen der Produktionskapazität und Lagerkapazität, bei schwankender Nachfrage, ein Optimum zu finden, welches den Verkauf durchgängig oder mit vertretbaren Wartezeiten gewährleistet. Das ist nötig, da Produktionskapazitäten ebenso wie Lagerplätze begrenzt sind, Fahrräder im montierten Zustand jedoch relativ viel Platz verbrauchen. In einer Simulation mit SD können diese Anpassungen genau durchgespielt werden und so als eine Hilfestellung bei der Abwägung dienen. Weitere ähnliche Optimierungsmöglichkeiten, die denkbar wären, sind hierbei die in Abschnitt 2.1.5 genannten SC-Aspekte mit einer Verlegung des Kundenentkopplungspunktes, Standortentscheidungen, Losgrößen, Ladungsträgerwahl etc. Während das dargestellte Modell noch vergleichsweise simpel ist und das erste Szenario auch mit beispielsweise ereignisdiskreter Simulation gelöst werden könnte, ist ein Ergebnis mit zunehmender Anzahl von Rückkopplungsschleifen leichter mittels SD zu erreichen.

Änderungen am realen System sollten dabei zuerst am Modell durchlaufen werden. Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben wird, ist eine Modifikation am Modell bedeutend leichter durchzuführen als am echten System. Nicht zielführende Strategien sind am Modell nur geringfügig monetär schädlich, da der Modellierungsaufwand i. d. R. bedeutend günstiger ist, als eine Änderung mit Fehlkalkulation am echten System. Beispielsweise entstehen durch die Nichterfüllung von Lieferverträgen in Kombination mit einem Reputationsverlust nicht nur monetäre Schäden, sondern auch nicht monetäre Schäden. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass SD bei Fabrikplanungen nur einen Teil der nötigen Simulation ausmachen kann. Während SD beispielsweise die Simulation der digitalen Fabrik nicht ersetzen kann, liegt die Stärke von SD auf der Makroebene mit dem Zusammenspiel zwischen Fabriken.

Für die Prüfung einer Strategie gilt darüber hinaus, dass Versuche am Modell eher die Vertraulichkeit gewährleisten können, bedingt durch den kleineren beteiligten Mitarbeiterkreis. Sollten unpopuläre oder revolutionäre Verbesserungsstrategien zu prüfen sein, ist die Vertraulichkeit durchaus zu berücksichtigen. Bei der im Modell dargestellten Rückkopplungsschleife mit ausfallenden Fahrrädern, wäre beim Bekanntwerden der Prüfung von geplanter Obsoleszenz ein Reputationsverlust zu erwarten. Somit lässt sich durch SD in diesem Modell eine Entwicklung mit Rückkopplungsschleifen untersuchen und gleichzeitig die Vertraulichkeit gewährleisten.

Ein weiterer Vorteil bei dem Einsatz von SD mit der Modellierung ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Abschnitt 2.2). In einem zweiten Szenario wäre beispielsweise die Prüfung für eine firmeninterne Produktion der Zukaufteile möglich. Für eine optimale Planung der Prozesse werden die unterschiedlichen Strategien am Modell verglichen. Die Auswahl der besten Strategie gelingt über vergleichbare Ergebnisse zwischen unterschiedlichen Integrationsplanungen. Für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist wiederum eine Reproduzierbarkeit von zuvor erzielten Ergebnissen nötig. Bei SD wird aufgrund des hinterlegten DGL-Systems solange dasselbe Ergebnis in einer Simulation erzielt, wie die gleichen Eingangsdaten vorliegen. In der Realität werden dagegen statistische Schwankungen und Ungenauigkeiten für ein anderes Ergebnis bei mehreren Durchläufen sorgen, selbst bei gleichen Anfangsbedingungen. Sollten sich dagegen die in diesem Szenario bereits im Betrieb befindlichen Produktionsstätten nicht für die Fertigung der Zukaufteile eignen und eine Neuplanung für eine Fertigung nötig sein, so wird mit SD ebenfalls eine

Möglichkeit zur Modellierung und Analyse von noch nicht existenten Systemen oder Systemerweiterungen gegeben. Durch die Modellierung und anschließende Analyse des in der Planungsphase erdachten Systems können die in Abschnitt 2.1.3. angesprochen Fehlplanungen vermieden werden. Analog gilt hier, dass die Simulation i. d. R. günstiger ist, als wenn im späten Planungsstadium Änderungen vorgenommen werden müssen.

Das letzte noch nicht angesprochene Kriterium aus Abschnitt 2.2, die Sicherheit für den menschlichen Arbeitnehmer, ist an diesem Modellbeispiel nur schwer zu verdeutlichen. Generell sind jedoch auch hier Optimierungen durch SD in der SC zu erzielen. Als Beispiel sind auf Mikroebene modellierte chemische Prozesse mit Rückkopplungsschleifen zu nennen, welche getestet werden sollen. In einem möglichen Beispielprozess wird eine für den Menschen gefährlichen Gasentwicklung bei falsch ablaufenden Prozess vermieden, durch die in der Simulation mit SD hergeleiteten mindestens zu erfüllenden Umweltrandbedingungen. Somit werden falsche Auslegungen günstig und sicher unter Beihilfe von SD ausgemustert.

Unabhängig vom Modell werden im Folgenden weitere Optimierungschancen mit den im Theorieteil erarbeiteten Grundlagen dargestellt. Für das Verständnis von neuen Arbeitnehmern über ein Unternehmen und den dort ablaufenden Prozessen sind Modelle hilfreich (Abschnitt 2.1.3). Eine Abbildung von einem Unternehmen mit allen Wirkzusammenhängen, sowohl im internen Unternehmen als auch extern zu anderen Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette ist mit SD überaus zielführend. Da Kausalketten der Kernbestandteil von SD sind, lassen sich mit dieser Modellierungsmethode Wirkzusammenhänge ohne weitere nötigen und z. T. unerwünschte Elemente in einem Modell darstellen. Die Übersichtlichkeit wird somit bei vermaschten Zusammenhängen in der SC durch den Einsatz von SD erhöht. Diese Übersichtlichkeit gilt insbesondere für die einfachen Kausaldiagramme bei SD. Zu beachten ist hierbei die Größenbegrenzung. Während quantitative Modelle für ein gutes Systemverständnis bei Mitarbeitern ohne Prozesswissen sorgen, so werden Modelle mit zunehmender Größe unübersichtlicher. SD dient somit ebenfalls als kreative Maßnahme zum Verständnis bei der Modellierung von Systemen, jedoch nur so lange die Systemgrenzen entsprechend gut abgegrenzt sind.

Wie bereits in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, wurde SD bereits als Ersatz zu anderen Modellen eingeführt. Beispielhaft wurde hier u. a. das neoklassische Modell aufgeführt. Beim Einsatz in der SC kann SD ebenfalls alte Modelle ersetzen oder ggf. auch in neuen Bereichen implementiert werden, wo bisher keine Modelle oder Analyseverfahren genutzt wurden. Die Integration von SD in der SC scheint oberhalb der Stufe von Produktionsleitsystemen (MES) sinnvoll (Abschnitt 2.3.2). Hierbei kann beispielsweise eine Ergänzung in der Software für das Bestandsmanagement bei der Beschaffung erfolgen. Wenn Voraussagen nur den eigenen internen Verbrauch eines Unternehmens über die Zeit simulieren, wäre mit SD eine Erweiterung um externe Einflüsse denkbar. So lange eine Vernetzung zwischen allen Lieferanten noch nicht vollständig stattfindet, wie gewissermaßen in der „Smart Factory“ vorgesehen, wäre mit SD beispielsweise eine besseres einkalkulieren des Forrester-Effekts möglich. Hierbei wird das für den eigenen Bedarf bestellte Material nicht nur dem internen Verbrauch, sondern auch der vorhergesagten Schwankung des Bullwhip-Effekts angepasst. Allerdings sind ebenfalls Optimierungen durch Simulationen bzgl. der Preisentwicklung mit dem günstigsten Transport, den Produktkosten oder der Verfügbarkeit auf dem Weltmarkt denkbar, um durch verändertes Kauf- und Verkaufsverhalten besser auf den Markt zu reagieren und langfristig monetäre Kosten einzusparen oder den Gewinn zu steigern.

Bei der Integration könnte SD ebenfalls positive Auswirkungen bei dem Wunsch nach einer Umstellung der Arbeitsweise haben. Beispielhaft zu nennen wären hier die werksinterne Distribution oder die Materialbeschaffung. Die Arbeitsweise eines Informationssystems lässt sich individuell nach den Anforderungen gestalten. Die Abgabe von Entscheidungsvorschlägen auf Basis eines Simulationsmodells in Kombination mit Algorithmen zur Entscheidungsfindung scheint hierbei denkbar. Dagegen funktioniert die Arbeitsweise bei Arbeitnehmern oft auf mentalem Wissen, was eine subjektive nicht an das Unternehmen angepasste Arbeitsverhalten bedeuten kann. Durch den Einsatz von SD lassen sich hierbei ggf. eher alte Arbeitsweisen ändern als mit Mitarbeiteranweisungen. Somit lässt sich eine Umstellung einer Arbeitsweise ggf. leichter in Kombination mit der Einführung von SD umsetzen.

Ein weiteres Beispiel für eine Optimierungschance eines in der Planung genutzten Informationssystems mit einem SD-Modell wäre eine dynamische Anpassung von Variablen für die Feinplanung von Produktions- und Lieferprozessen bezogen auf Arbeitnehmer. Hierbei erfolgt die Einplanung von benötigten Arbeitnehmern i. d. R. leicht überdimensioniert, um Krankheitsfälle kompensieren zu können. Für die Einplanung beim Urlaub von Mitarbeitern ist darauf zu achten, dass dieses Maß nicht unterschritten wird. Da z. T. während Sportgroßereignissen oder anderen besonderen Ereignissen eine vergrößerte Anzahl von Krankmeldung von Arbeitnehmern in einem Betrieb eingehen kann, sind Diskrepanzen zwischen Soll- und Ist-Werten bei der zu erfüllenden Arbeitsleistung möglich. Mit einer Integration von SD in die Feinplanung von Prozessen könnte so eine Verbesserung bei Mindestzahlen von benötigten Arbeitnehmern erreicht werden, durch die für Ereignisse entsprechend angepasste Variable der Überkalkulation, im Vergleich zu einer klassischen statischen Einplanung.

Das in Abschnitt 2.1.1 beschriebene Problem der ansteigenden Modellkomplexität kann mit SD durch partielle Modellierung von Subsystemen an Problemstellen umgangen werden. Somit ist die überwiegende Nutzung eines zusammenfassenden Makromodelles möglich und nur für Problemstellen, anstatt des ganzen Systems, müssen genauer modellierte Mikromodelle erzeugt werden. Die Abgrenzung bei SD Diagrammen durch die jeweiligen Quellen und Senken an den einzelnen Flussdiagrammsträngen ermöglicht so eine einfache Kombination zwischen der Makro- und Mikroebene. Hierdurch sinkt der Arbeitsaufwand bei Arbeiten mit SD und somit auch die monetären Kosten.

3.4 Resümee

Die Integration von SD in die SC hat sich als sinnvoll erwiesen, in einem Vergleich zu stark vereinfachenden Modellierungsmethoden. Insbesondere lineare und statische Modelle sind in SC oft nur bedingt zielführend. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass SD in vielen Bereichen in der SC eingesetzt werden kann. Die Möglichkeiten gehen dabei vom Beschreibungsmodell über das Simulationsmodell bis hin zum Optimierungsmodell. Allerdings ist SD nicht als alleinige Simulationmethode für alle Anwendungsfälle zu verstehen, sondern schwerpunktmäßig für Modelle gedacht, wo Wirkzusammenhänge zwischen Entitäten zu untersuchen sind und somit vor allem auf der Makroebene sinnvoll einzusetzen.

Wie in Abschnitt 2.3.2 ersichtlich wird, liegt eine besondere Stärke von SD vor allem in der Hilfe zur Entscheidung einer Strategie. Somit ist die Anwendung besonders effektiv, wenn bereits

ein oder mehrere Probleme identifiziert sind, entsprechende Strategien zur Problemlösung vorliegen und eine Hilfestellung zum Bewerten der jeweiligen Strategien benötigt wird. Durch Simulation von mehreren Strategien ist die Möglichkeit gegeben zu bestimmen welches die effektivste Lösungsstrategie ist. Der Vorteil von SD liegt dabei in den genaueren Simulationsergebnissen. Stärker vereinfachende Simulationsmodelle sind hierfür zu ungenau und können nicht ausreichend genau als Hilfestellung dienen. Der Rechenaufwand ist bei SD im Gegensatz zu stark vereinfachenden Simulationsmodellen höher, wobei der zusätzliche Aufwand für das Erreichen von genaueren Ergebnissen als vertretbar anzunehmen ist. Für die Nutzung zur Strategiebewertung sind je nach zeitlichem Planungsfall neben SD allerdings auch weitere Simulationsverfahren in Betracht zu ziehen. Für operative Planungen ist statt SD eine ereignisdiskrete Simulation i. d. R. zielführender.

Wenn SD in der SC zum Einsatz kommt sind auch Schwächen zu verzeichnen. So ist die Wahl bei Randbedingungen oftmals subjektiv, was ggf. zu starken Schwankungen und Abweichungen vom realen System führen kann. Durch die komplexe Vernetzung ist eine Kontrolle dabei schwer. Beim Einsatz von SD sind daher genaue Kontrollen, mit Dokumentation und Absprachen notwendig.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Durch die voranschreitenden Entwicklungen der Technik, die zum einen mit neuen Innovationen zu neuen Produktfamilien führen, was neue Anlagenplanungen bedingt oder zum anderen durch weiterentwickeln bestehender Produktionsanlagen zum Stand der Technik (Industrie 4.0), sind auch in Zukunft Veränderungen in der Supply Chain anzunehmen. Mit Ausblick auf die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens sollten daher möglichst effiziente Anpassungsstrategien genutzt werden. System Dynamics hat sich in der Vergangenheit durch die Möglichkeit zu einer Verbesserung der Bewertung von Strategien in vielen Industriebereichen durchgesetzt, da System Dynamics eine genauere Beurteilung als stark vereinfachende Simulationsmodelle ermöglichte. In diesem Zusammenhang wurde diese Arbeit mit dem Ziel geschrieben, die Einführung von System Dynamics in der Supply Chain zu bewerten, um zu prüfen ob durch ein vermaschtes Simulationsmodell genauere Hilfen für Systemeinschätzungen und -verbesserungen zu erreichen sind.

Im Verlauf dieser Arbeit wurde daher zuerst herausgearbeitet was die Modellierung ausmacht. Das umfasste zum einen das Modellieren selbst, mit seinen Schwächen, Besonderheiten und Zielen sowie zum anderen die Besonderheiten der Modellierung von Supply Chains, wobei ebenfalls näher auf Problemfelder und Ziele eingegangen wurde. Zusammen mit der Erläuterung von Analyseverfahren haben sich hierbei Charakteristika herausgestellt, die System Dynamics erfüllen muss. Zu den bedeutendsten Punkten gehören die Beobachtbarkeit eines Systems, die Sicherheit von Arbeitnehmern, ein günstiger Preis für eine Analyse, die Möglichkeit zur Untersuchung von nicht existierenden Systemen, die einfache Modifizierbarkeit von Modellen, die Gewährleistung von Vertraulichkeit, die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen und die Darstellbarkeit von zahlreichen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen. Im Laufe der Arbeit wurde zunächst weiter die Struktur und Funktion von System Dynamics näher vorgestellt, bevor auf die Bewertung und Optimierung von System Dynamics in der Supply Chain eingegangen wurde. Bei der Bewertung stellte sich heraus das System Dynamics diese Charakteristika prinzipiell erfüllen kann. Bei der Optimierung stellte sich als größter Vorteil von System Dynamics dabei die Hilfe zur Entscheidungsfindung bei strategischen Fragen des Supply Chain Management heraus. Gleichwohl ist der Einsatz von System Dynamics zur Optimierung, Diagnostik, Neuplanungen etc. bei Prozessen ebenfalls als sinnvoll zu erachten. So wird durch den Einsatz von System Dynamics letztendlich die Flexibilität gesteigert und es werden monetäre Kosten gesenkt. Einige dieser Beispiele wurden dabei mit Hilfe eines fiktiven Supply Chain Modells verdeutlicht.

In Zukunft werden wahrscheinlich zwei Entwicklungen auftreten. Zum einen wird die Komplexität der Supply Chain auf Makroebene weiter anwachsen und zum anderen werden immer mehr Daten gesammelt werden (Big Data). Diese Daten auszuwerten erfordert zum einen immer mehr Rechenleistung und daher möglichst effiziente Analyseverfahren. Zum anderen werden durch die steigende Rechenleistung immer komplexer werdende Simulationsmodelle ermöglicht, welche eine genauere Abbildung der Realität zulassen. So werden wahrscheinlich in ferner Zukunft zunehmend Arbeitsplätze, die die mentale Arbeitserfahrung für das einschätzen von Märkten sowie das treffen von Entscheidungen nutzen, durch Analyseverfahren wegrationalisiert. Die Bedeutung von analytischen Verfahren wird daher voraussichtlich weiter steigen. Der systemdynamische Ansatz wird dabei wahrscheinlich ebenfalls noch eine große Rolle spielen, aber auch

durch andere Ideen erweitert werden. Beispielsweise ist eine Verbindung mit selbstlernenden neuronalen Netzen denkbar, die mit zunehmender Laufzeit genauere Prognosen bzw. bessere Entscheidungen treffen können. Das Wachstum der hierfür nötigen Rechenleistung dürfte für die Zukunft ambivalent verlaufen. Zum einen wächst die Rechenleistung nicht mehr nach den Mooreschen Gesetzen an und gerät mit Fertigungen im zwei bis drei Nanometer Bereich bald an die physikalischen Grenzen der Chipherstellung. Zum anderen könnte der Sprung auf quantenbasierte Rechensysteme eine deutliche Leistungssteigerung ermöglichen. Da sich diese Rechensysteme noch in der Entwicklung befinden und keine kostengünstige Serienreife erreicht haben, bleibt abzuwarten, inwieweit der wachsende Rechenressourcenbedarf in Zukunft gedeckt wird (vgl. Nielsen und Chuang 2009; Waldrop 2016).

Literaturverzeichnis

Bala, Bilash Kanti; Arshad, Fatimah Mohamed; Noh, Kusairi Mohd (2017): System Dynamics. Modelling and Simulation. Singapore: Springer.

Bandow, Gerhard; Holzmüller, Hartmut H. (2009): „Das ist gar kein Modell!“. Unterschiedliche Modelle und Modellierungen in Betriebswirtschaftslehre und Ingenieurwissenschaften. Wiesbaden: Gabler / Springer Fachmedien.

Becker, Jörg; Kugeler, Martin; Rosemann, Michael (2012): Prozessmanagement. Ein Leitfaden zur prozessorientierten Organisationsgestaltung. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.

Belz, Christian; Reinhold, Michael (2013): Internationaler Industrieertrieb. In: Binckebanck, Lars (Hg.): Internationaler Vertrieb. Grundlagen, Konzepte und Best Practices für Erfolg im globalen Geschäft. Wiesbaden: Springer, S. 1–240.

Bossel, Hartmut (1987): Systemdynamik. Grundwissen, Methoden und BASIC-Programme zur Simulation dynamischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.

Bossel, Hartmut (2004): Systeme, Dynamik, Simulation. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme. Norderstedt: Books on Demand.

Burkhard, Schade (2005): Volkswirtschaftliche Bewertung von Szenarien mit System Dynamics. Bewertung von nachhaltigen Verkehrsszenarien mit ESCOT. Dissertation. Technische Hochschule - Universität Fridericiana Karlsruhe. Fakultät für Wirtschaftswissenschaften.

Domschke, Wolfgang; Drexl, Andreas (2011): Einführung in Operations Research. 8. Auflage. Berlin: Springer.

Greve, Jens; Schnabel, Annette; Schützeichel, Rainer (2009): Das Makro-Mikro-Makro-Modell der soziologischen Erklärung. In: Greve, Jens, Schnabel, Annette und Schützeichel, Rainer (Hg.): Das Mikro-Makro-Modell der soziologischen Erklärung. Zur Ontologie, Methodologie und Metatheorie eines Forschungsprogramms. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 7–18.

Grundig, Claus-Gerold (2015): Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 5. Auflage. München: Hanser.

Gumzej, Roman; Grm, Klavdija (2017): System Dynamics Modelling in Automotive Supply Chain Management. In: Halang, Wolfgang A. und Unger, Herwig (Hg.): Logistik und Echtzeit. Echtzeit 2017. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 89–98.

Gumzej, Roman; Rosi, Bojan (2017): Modellierung und Simulation von Lieferketten. In: Halang, Wolfgang A. und Unger, Herwig (Hg.): Logistik und Echtzeit. Echtzeit 2017. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 79–88.

Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2017): Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen. Berlin: Springer Vieweg.

- Hesse, Wolfgang; Mayr, Heinrich C. (2008): Modellierung in der Softwaretechnik: eine Bestandsaufnahme. In: Informatik Spektrum, Heftnummer 5, S. 377–393.
- DIN IEC 60050-351, 2014: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik.
- Jain, Sanjay; Lindskog, Erik; Andersson, Jon; Johansson, Björn (2013): A hierarchical approach for evaluating energy trade-offs in supply chains. In: International Journal of Production Economics, Heftnummer 142, S. 411–422.
- Jézéquel, Jean-Marc; Cook, Stephen; Hussmann, Heinrich (2002): UML 2002 The Unified Modeling Language. Model Engineering, Concepts, and Tools. 5th International Conference Dresden. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kiener, Stefan; Maier-Scheubeck, Nicolas; Obermaier, Robert; Weiß, Manfred (2017): Produktionsmanagement. Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung. 11. Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter.
- Kramer, Ulrich (2008): Kraftfahrzeugführung. Modelle - Simulation - Regelung. München: Hanser.
- Kumar, Sameer; Yamaoka, Teruyuki (2007): System dynamics study of the Japanese automotive industry closed loop supply chain. In: Journal of Manufacturing Technology Management, Heftnummer 18, Ausgabe 2, S. 115–138.
- Kurzmann, Ernst; Langmann, Erwin; Eder, Kurt (2015): Supply Chain Management. Wie Sie mit vernetztem Denken im 21. Jahrhundert überleben. 1. Auflage. Frankfurt am Main: Frankfurter Societäts-Medien.
- Lunze, Jan (2017): Ereignisdiskrete Systeme. Modellierung und Analyse dynamischer Systeme mit Automaten, Markovketten und Petrinetzen. Berlin: De Gruyter.
- McLuhan, Marshall; Powers, Bruce; Leonhardt, Claus-Peter; Baacke, Dieter (1995): The global village. Paderborn: Junfermann.
- Moorman, Jürgen (2008): Strategische Herausforderungen für Finanzdienstleister. In: Strohecker, Jürgen und Sehnert, Jürgen (Hg.): System Dynamics für die Finanzindustrie. Simulieren und analysieren dynamisch-komplexer Probleme. Unter Mitarbeit von Moorman Jürgen. Frankfurt am Main: Frankfurt-School-Verl., S. 3–17.
- Nielsen, Michael; Chuang, Isaac (2009): Quantum computation and quantum information. 10. printing. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ossimitz, Günther; Schlöglhofer, Franz (1990): Materialien zur Systemdynamik. Wien: Hölder-Pichler-Tempsky.
- Pastors, Peter (2002): Risiken des Unternehmens - vorbeugen und meistern. 1. Auflage. Mering: Rainer Hampp.
- Priese, Lutz; Wimmel, Harro (2008): Petri-Netze. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Profos, Paul (1982): Einführung in die Systemdynamik. Stuttgart: Teubner.

- Romeike, Frank; Spitzner, Jan (2013): Von Szenarioanalyse bis Wargaming. Betriebswirtschaftliche Simulationen im Praxiseinsatz. 1. Auflage. Weinheim: Wiley.
- Schütte, Reinhard; Becker, Jörg; Rosemann, Michael (1998): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung. In: Schütte, Reinhard (Hg.): Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung. Wiesbaden: Gabler, S. 435–445.
- Seidlmeier, Heinrich (2006): Prozessmodellierung mit ARIS. Eine beispielorientierte Einführung für Studium und Praxis. 2. Auflage. Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn /GWV Fachverlage GmbH.
- Senge, Peter M.; Klostermann, Maren (2006): Die fünfte Disziplin. Kunst und Praxis der lernenden Organisation. 10. Auflage. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Unbehauen, Heinz (2000a): Regelungstechnik I. Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme. 10. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Unbehauen, Heinz (2000b): Regelungstechnik III. Identifikation, Adaption, Optimierung. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Unbehauen, Heinz (2009): Regelungstechnik II. Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelsysteme. 9. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (2017): Handbuch Industrie 4.0. Band 4: Allgemeine Grundlagen. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg.
- Waldrop, Mitchell M. (2016): The chips are down for Moore's law. The semiconductor industry will soon abandon its pursuit of Moore's law. Now things could get a lot more interesting. In: Nature, Heftnummer 530, S. 144–147.
- Weber, Karlheinz P. (1979): System Dynamics. Untersuchung eines kybernetisch-systemtheoretischen Modellansatzes unter besonderer Berücksichtigung von wachstumstheoretischen Modellen. Frankfurt am Main: R.G. Fischer.
- Weigert, Gerald; Rose, Oliver; Gocev, Pavel; Mayer Gottfried (2010): Kennzahlen zur Bewertung logistischer Systeme. In: Zülch, Gert und Stock, Patricia (Hg.): Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal. Integration aspects of simulation: equipment, organization and. Karlsruhe: KIT Scientific Publication (AM 131), S. 599–606.
- Werner, Hartmut (2013): Supply Chain Management. Grundlagen, Strategien, Instrumente und Controlling. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer.
- Wiendahl, Hans-Peter (1989): Grundlagen und Entwicklungsstand der Belastungsorientierten Fertigungssteuerung. In: Wiendahl, Hans-Peter (Hg.): Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Praxis und Weiterentwicklung. Tagungsbericht. München, 1988. Technische Universität Hannover; Gesellschaft für Management und Technologie. 2. Auflage. Hannover: Institut für Fabrikanlagen der Universität Hanover, S. 9–48.
- Wilms, Falko (Hg.) (2012): Wirkungsgefüge. Einsatzmöglichkeiten und Grenzen in der Unternehmensführung. 1. Auflage. Bern: Haupt.

Wunsch, Gerhard; Schreiber, Helmut (2006): Stochastische Systeme. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Zirn, Oliver; Weikert, Sascha (2006): Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praxisnahe Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer.

Eidesstattliche Versicherung (Affidavit)

Kullik, Stephan

Name, Vorname
(Last name, first name)

149262

Matrikelnr.
(Enrollment number)

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit/Masterarbeit* mit dem folgenden Titel selbstständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

I declare in lieu of oath that I have completed the present Bachelor's/Master's* thesis with the following title independently and without any unauthorized assistance. I have not used any other sources or aids than the ones listed and have documented quotations and paraphrases as such. The thesis in its current or similar version has not been submitted to an auditing institution.

Titel der Bachelor-/Masterarbeit*:
(Title of the Bachelor's/ Master's* thesis):

**System Dynamics – Ein Konzept zur Untersuchung der Möglichkeiten
zur Anwendung von System Dynamics in der Logistik**

*Nichtzutreffendes bitte streichen
(Please choose the appropriate)

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

Belehrung:

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

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

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

Die oben stehende Belehrung habe ich zur Kenntnis genommen:

Official notification:

Any person who intentionally breaches any regulation of university examination regulations relating to deception in examination performance is acting improperly. This offense can be punished with a fine of up to €50,000.00. The competent administrative authority for the pursuit and prosecution of offenses of this type is the chancellor of TU Dortmund University. In the case of multiple or other serious attempts at deception, the examinee can also be unenrolled, section 63, subsection 5 of the North Rhine-Westphalia Higher Education Act (*Hochschulgesetz*).

The submission of a false affidavit will be punished with a prison sentence of up to three years or a fine.

As may be necessary, TU Dortmund will make use of electronic plagiarism-prevention tools (e.g. the "turnitin" service) in order to monitor violations during the examination procedures.

I have taken note of the above official notification:**

Ort, Datum
(Place, date)

Unterschrift
(Signature)

**Please be aware that solely the German version of the affidavit ("Eidesstattliche Versicherung") for the Bachelor's/ Master's thesis is the official and legally binding version.