

Dynamik logistischer Systeme

Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter, Dipl.-Phys. Christoph de Beer,
Dr.-Ing. Michael Freitag, Dipl.-Ing. Tilo Hamann,
Dipl.-Ing. Henning Rekersbrink, Dipl.-Phys. Jan Topi Tervo

BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH
<http://www.biba.uni-bremen.de>

1 Einleitung

Produktionsunternehmen müssen heute in einem hochdynamischen Unternehmensumfeld agieren. Die für Wettbewerbsfähigkeit und Markterfolg notwendige Flexibilität und Anpassungsfähigkeit hat jedoch eine zunehmende strukturelle und dynamische Komplexität des Produktionssystems selbst zur Folge (Scholz-Reiter et al. 2002). Das führt unter Umständen zu unvorhersehbarem Systemverhalten, das entgegen den ursprünglichen Zielsetzungen zu Leistungsminderungen führen kann (Larsen et al. 1999). Ursache dafür ist die Diskrepanz zwischen den der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zugrunde liegenden Modellen und der produktionslogistischen Realität.

Die klassische PPS setzt eine prinzipielle Planbarkeit der produktionslogistischen Prozesse voraus. Dieser Annahme werden zunehmend zwei Grenzen gesetzt: Zum einen verändert sich das Unternehmensumfeld ständig, so dass häufige Neuplanungen notwendig werden. Dieser Marktdynamik wird mit einer rollierenden Planung und Optimierung in zunehmend kürzeren Zeitabständen begegnet. Zum anderen stellt das Produktionssystem selbst ein dynamisches System dar, welches auf unterschiedliche Randbedingungen auch unterschiedlich reagiert. Diese intrinsische Systemdynamik ist eine der Ursachen für irreguläre Systemzustände und unvorhersehbares Verhalten (Helbing et al. 2004; Freitag 2005) – sie wird in der klassischen PPS jedoch nicht berücksichtigt.

Solche dynamischen Systeme werden in vielen Bereichen durch dynamische Modelle beschrieben. Diese Modelle dienen zum einen der Analyse des Systemverhaltens und zum anderen dem Entwurf von Steuerungssystemen. Für die Logistik stellt sich nun die Frage, ob sich Modellierungs-, Analyse- und Steuerungsmethoden für dynamische Systeme im Allgemeinen nicht auch auf Produktions- und Logistiksysteme im Speziellen anwenden lassen. Dafür ist in einem ersten Schritt zu prüfen, inwieweit sich verschiedene Modellierungskonzepte zur Abbildung logistischer Systeme und Prozesse eignen bzw. wie genau sie die Realität abbilden können. Gelingt die Modellierung als dynamisches System mit hinreichender Genauigkeit, können in einem zweiten Schritt auf den dynamischen Modellen basierende Steuerungsmethoden entwickelt werden, die besser als konventionelle Planungsmethoden die intrinsische Systemdynamik berücksichtigen und auf unvorhersehbare Änderungen und Störungen reagieren können.

Mit dem vorliegenden Beitrag sollen Modellierungsmethoden zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Produktions- und Logistiksystemen sowie Steuerungsmethoden vorgestellt werden, die eine verbes-

serte Logistikleistung auch bei starken Nachfrageschwankungen und internen Änderungen des Systems ermöglichen.

2 Modellierung dynamischer logistischer Systeme

Zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens von Produktions- und Logistiksystemen müssen die Systeme im ersten Schritt in einem Modell abgebildet werden. Dabei sollte neben statischen Aspekten wie dem Layout und der Dimensionierung gerade in logistischen Systemen die Abbildung der systemeigenen Dynamik im Vordergrund stehen. Für diesen Aspekt der Modellierung gibt es verschiedene Konzepte, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Innerhalb der Logistik sind Simulationsmodelle der betrachteten Systeme weit verbreitet, mit welchen – äquivalent zu realen Versuchen – Simulationen unter verschiedenen Parameterkonstellationen durchgeführt werden. Diese Herangehensweise hat jedoch die grundsätzliche Schwäche, dass die Ergebnisse solcher Modelle streng genommen immer nur für die durchgeführten Experimente gelten. Allgemeine Aussagen in Form von Gesetzmäßigkeiten über derart modellierte Systeme sind prinzipbedingt nur sehr schwer zu erhalten.

Aus dem Blickwinkel einer „Theorie der Logistik“ lassen sich diese Vorgehensweisen, für die es eine Vielzahl unterschiedlichster Modellierungskonzepte gibt, unter dem Begriff „Simulation“ zusammenfassen und der Fokus für Modellierungsmöglichkeiten in der Logistik auf diejenigen Konzepte richten, welche durch ein theoretisches Konzept einen analytischen Zugang zu den Eigenschaften des erstellten Modells erlauben. Unter Analyse soll dabei die Möglichkeit verstanden werden, allgemeingültige Aussagen über ein Modell treffen zu können, ohne Experimente durchführen zu müssen.

Zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen

Es existieren zwei grundlegend unterschiedliche Denkweisen in der Modellierung, welche sich im Kern durch verschiedene Beschreibungen für den zeitlichen Fortgang des Systems gegeneinander abgrenzen lassen. Das Aufeinanderfolgen verschiedener Systemzustände wird in der einen Sichtweise durch das Auftreten von so genannten Ereignissen begründet, weshalb diese Sichtweise hier „ereignisorientiert“ genannt wird. Als Beispiel kann die Vorstellung einer Warteschlange dienen: Der Start der Bearbeitung, d.h. die Zustandsänderung des Systems hin zum Zustand „Bearbeiten“, wird durch das Ereignis der Ankunft eines Auftrags verursacht.

| Ereignisorientiert | | Flussorientiert | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Analysemöglichkeiten | Petri-Netz | <p>hauptsächlich funktionelle Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deadlocks • Beschränktheit • Erreichbarkeit • etc. | MaxPlus-Algebra | <p>hauptsächlich dynamische Zusammenhänge:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimale Zykluszeiten • Fahrpläne • Auswirkungen von Planabw. • etc. <p>Anfänge einer Systemtheorie vorhanden</p> | Warteschl.-theorie | <p>hauptsächlich stochastische Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mittelwerte • Varianzen • Verteilungen • ... • Leistungsgrößen • \emptyset-Auslastung • \emptyset-Wartezeit • etc. | Simulation | <p>Modellierungssysteme für die Simulation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Discrete Event Systems (DES) • Multiagentensysteme (MAS) • Zelluläre Automaten (ZA) • etc. | Regelungstechnik | <p>hauptsächlich zeitl. Änderung von Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Stabilität • Grenzen • transiente Phase • Schwingverh. • Reglerentwurf • etc. | Dynamische Systeme | <p>hauptsächlich Langzeitverhalten von Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fixpunkte • Attraktoren • Einzugsgebiete • Stabilität • etc. | Simulation | <p>Modellierungssystem für die Simulation:</p> <ul style="list-style-type: none"> • System Dynamics (SD) |
| | Simulationstools | <p>viele verschiedene vorhanden, sowohl für Analyse als auch zur Simulation siehe z. B. (PetriNetsWorld 2007)</p> | <p>MaxPlus-Toolboxen für:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matlab • Scilab • Maple | <p>Arena • etc.</p> | <p>eMplant • Arena • Witness • Quest • Objektorient. Programmiersprachen (C++, ...) etc.</p> | <p>Matlab / Simulink • LabView • etc.</p> | <p>Mathematica • Maple • Matlab • ODE/PDE-Solver • etc.</p> | <p>Vensim (SD) • AnyLogic • ACSL • DYNAMO • etc.</p> | | | | | | |

Abb. 1. Strukturierung der Modellierungsmöglichkeiten

In einer hierzu komplementären Sichtweise wird der Fortgang des Systems durch einen Gradienten beschrieben, welcher in der Regel durch die aktuellen Werte der Zustandsvariablen selbst beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang wird oft vom Fluss einer bestimmten Größe gesprochen, daher wird diese Sichtweise hier „flussorientiert“ genannt. Als Beispiel kann die Vorstellung eines mit Wasser gefüllten Trichters dienen: Der Fortgang des Systems entspricht der Änderung der Füllhöhe. Dieser Gradient wird durch die aktuellen Zu- und Abflüsse bestimmt, welche wiederum von der Füllhöhe abhängen können.

In Abb. 1 sind die in diesem Beitrag beschriebenen Modellierungskonzepte, deren Analysemöglichkeiten und spezifische Simulationstools zusammenfassend dargestellt. Unter den beiden Bereichen „Simulation“ werden wie beschrieben alle Modellierungskonzepte ohne analytische Untersuchungsmöglichkeit zusammengefasst. Weiterhin sind Beispiele für entsprechende Simulationstools angegeben.

2.1 Ereignisorientierte Denkweise

Für logistische Systeme wählt man intuitiver Weise meist einen ereignisorientierten Ansatz, da in solchen Systemen in der Regel keine kontinuierlichen, fließenden Größen im Vordergrund stehen, sondern einzelne Objekte und deren Verhalten. In den meisten Fällen werden dann Simulationsmodelle mit verschiedenen Konzepten erstellt wie z.B. ereignisdiskrete Modelle, Multiagentensysteme oder zelluläre Automaten. Modellierungskonzepte, welche eine analytische Betrachtung erlauben, gibt es für den ereignisorientierten Ansatz im Wesentlichen drei: Petri-Netze, die Warteschlangentheorie und die MaxPlus-Algebra, welche im Folgenden betrachtet werden sollen.

Petri-Netze

Die Theorie der Petri-Netze beinhaltet sowohl eine eigene graphische Beschreibungssprache als auch eine dahinter liegende, fundierte mathematische Theorie. Mit Hilfe von wenigen Elementen (Stellen, Transitionen, Token, Kanten usw.) lassen sich insbesondere kausale Zusammenhänge und Nebenläufigkeiten modellieren und mathematisch analysieren (Kiencke 2006). Dies führte u.a. zu einer vermehrten Anwendung der Petri-Netz-Theorie bei automatisierungstechnischen Problemstellungen. In Abb. 2 ist ein kleines Beispielnetz dargestellt, welches eine Synchronisation paralleler Prozesse darstellen kann: die rechte Transition kann erst schalten, wenn beide Vorgängerprozesse abgeschlossen sind.

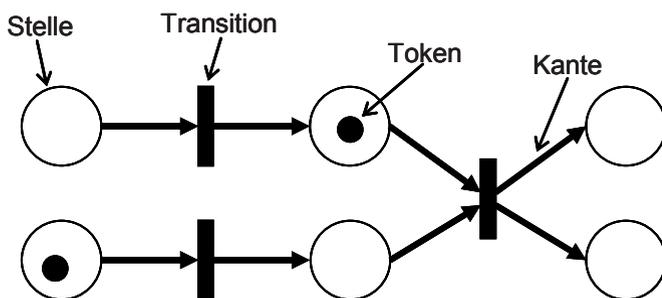


Abb. 2. Beispiel für ein Petri-Netz zur Synchronisation paralleler Prozesse

Die Vorteile von Petri-Netzen liegen in den Analysemöglichkeiten der erstellten Modelle. So lassen sich auf analytischem Wege verschiedene Eigenschaften nachweisen, welche auch für logistische Anwendungen interessant sind, wie bspw. Deadlock-Freiheit, Beschränktheit, Erreichbarkeit oder Reversibilität (Krauth 1990; Kiencke 2006). Hierbei handelt es sich hauptsächlich um funktionelle Eigenschaften der Modelle wie z.B. die Beschränktheit, welche eine Beschränkung der Anzahl von Token (beschränkte Pufferkapazitäten) in allen Stellen und unter allen Schaltungen garantiert oder die Deadlock-Freiheit, welche garantiert, dass das System nicht in verklemmte Zustände geraten kann (irreguläre Zustände bei Materialrückflüssen).

Demgegenüber können quantitative Aspekte wie z.B. in der Logistik typische Fragen zu Durchlaufzeiten oder mittlerer Auslastung nicht analytisch untersucht werden. Dies liegt in der Zeitlosigkeit von Petri-Netzen begründet, wodurch sämtliche diesbezügliche Größen nicht darstellbar sind. Weitere Nachteile von Petri-Netzen liegen in der prinzipiellen Unmöglichkeit zum Zählen von bisherigen Ereignissen begründet – ein nächster Schritt hängt im Petri-Netz immer nur vom direkt vorausgegangen Zustand ab. Auch ihre feste Struktur schränkt Petri-Netz-Modelle dahingehend ein, dass zur Laufzeit keine Strukturelemente (z.B. Stellen oder Transitionen) automatisiert entstehen oder entfernt werden können.

Aufgrund dieser Beschränkungen von Petri-Netzen wurden viele Erweiterungen vorgeschlagen, welche viele logistisch wichtige Fälle darstellen können. Zu nennen sind Erweiterungen mit Farben oder Attributen für Token, Prioritätsregeln und zeitbehaftete Transitionen oder spezielle Inhibitor-Kanten, welche das Schalten einer Transition verhindern können. Fast allen Erweiterungen ist jedoch gemein, dass dadurch die Analysemöglichkeiten eingeschränkt werden und solche Netze dann simulativ untersucht werden müssen.

Durch die einheitliche und intuitiv verständliche Notation von Petri-Netzen existiert eine Vielzahl von Simulationstools. Die Palette reicht von auf die Analyse spezialisierten Tools (z.B. Low Level Petri Net Analyzer (LoLA), ein expliziter Modellprüfer für Petri-Netz-Modelle) bis hin zu reinen Simulatoren für sämtliche Spielarten und Erweiterungen von Petri-Netzen. Eine Übersicht über die Möglichkeiten bietet u.a. die Website „Petri Nets World“ (Petri Nets World 2007).

Warteschlangentheorie

Die Warteschlangentheorie ist ein Teilgebiet der Stochastik und beschäftigt sich mit der mathematischen Analyse von Systemen, in denen Aufträge von Bedienstationen bearbeitet werden. Die Warteschlangentheorie nutzt zur Beschreibung von Bedienungssystemen ein einfaches Grundmodell. Es besteht aus der so genannten Bedienstation, die über ein oder mehrere parallel arbeitende, gleichartige Maschinen oder Arbeitsplätze verfügt, und aus einer vorgelagerten Warteschlange (Abb. 3). Die Aufträge treffen einzeln und zu zufälligen Zeitpunkten vor der Bedienstation ein. Ein neu ankommender Auftrag wird bearbeitet, sofern mindestens eine Maschine oder ein Arbeitsplatz frei ist, andernfalls wird er in die Warteschlange eingereiht. Dieses Grundmodell kann auf vielfältige Weise variiert und zu komplexen Warteschlangennetzen verknüpft werden.

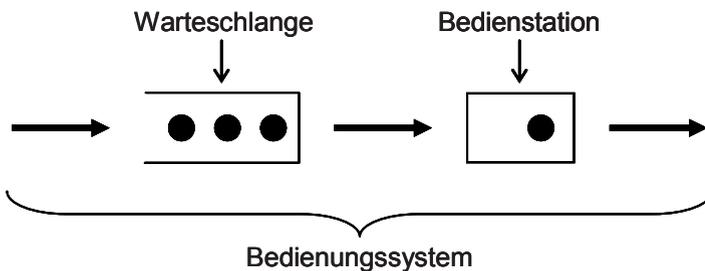


Abb. 3. Grundmodell der Warteschlangentheorie

Die Analysemöglichkeiten von Warteschlangensystemen liegen in der Berechnung von deren Leistungsgrößen wie z.B. der mittleren Auslastung der Maschinen, der mittleren Anzahl von Aufträgen im System, der mittleren Warteschlangenlänge, der mittleren Wartezeit usw.

Die Nachteile von Warteschlangenmodellen liegen hauptsächlich in den theoretischen Voraussetzungen für die Anwendung der Analysegleichungen begründet. So gelten die Berechnungen oft nur für einen eingeschwungenen Systemzustand (Kiencke 2006). Dieser lässt sich in der

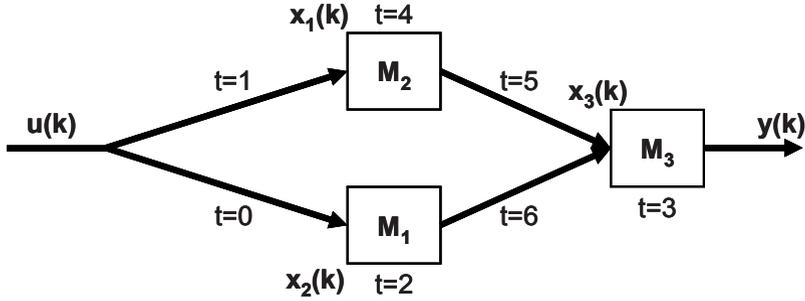
Praxis aber selten voraussetzen und für die Einschwingphasen sind die Analysemöglichkeiten wesentlich begrenzter. Weiterhin wird an den Warteschlangenmodellen Kritik geübt, da für die analytischen Herangehensweisen teils verteilungsspezifische Voraussetzungen eingehalten werden müssen, welche sich in der Praxis nicht erfüllen oder überprüfen lassen (Nyhuis u. Wiendahl 1999).

Da die Warteschlangentheorie mit Zufallsvariablen operiert, kann sie grundsätzlich auch nur Aussagen über entsprechende Eigenschaften der Zufallsvariablen wie Mittelwerte, Varianzen, Kovarianzen usw. tätigen. Über zukünftige Systemzustände bei einer gegebenen deterministischen Einlastung in ein Warteschlangensystem, wie z.B. die Ankunftszeiten aller zukünftigen Aufträge, kann die Warteschlangentheorie keine Aussagen treffen.

Simulationstools speziell für die Warteschlangentheorie gibt es an sich nicht, da sie eine Theorie für statische Systemgrößen ist. Dennoch sind Tools wie „Arena“ recht nahe an den Begriffen der Warteschlangentheorie, da sie entsprechende Elemente aufweisen und auf die Einstellung vieler stochastischer Parameter wie z.B. verschiedene Verteilungen, Mittelwerte, Varianzen, Warteschlangendisziplinen usw. ausgelegt sind. Streng genommen gehören diese Tools aber zu den ereignisdiskreten Simulationen mit stochastischen Einstellmöglichkeiten.

MaxPlus-Algebra

Die MaxPlus-Algebra ist ein mathematisches Werkzeug zur Beschreibung und Analyse ereignisdiskreter Systeme. Im Gegensatz zur Warteschlangentheorie, welche sich mit stochastischen Systemen beschäftigt, können mit Hilfe der MaxPlus-Algebra deterministische Systeme beschrieben und analysiert werden. Mit der MaxPlus-Algebra lassen sich Vorgänge beschreiben, die rekursiv abhängig sind und daher aufeinander warten müssen. Die dazu notwendige wiederholte Anwendung der nichtlinearen Minimum/Maximum-Operatoren ist in den herkömmlichen mathematisch-analytischen Systembeschreibungen nicht geschlossen darstellbar. Mit einer geeigneten Algebra, in der ein Maximum- (\oplus) und ein Plus-Operator (\otimes) definiert werden (daher MaxPlus-Algebra), kann eine geschlossene Darstellung erreicht werden, welche nicht nur optisch linearen Gleichungssystemen ähnelt (Abb. 4).



$$x(k+1) = \begin{pmatrix} 4 & \varepsilon & \varepsilon \\ \varepsilon & 2 & \varepsilon \\ 13 & 10 & 3 \end{pmatrix} \otimes x(k) \oplus \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 10 \end{pmatrix} \otimes u(k)$$

$$y(k) = (\varepsilon \quad \varepsilon \quad 3) \otimes x(k)$$

Abb. 4. MaxPlus-Darstellung für ein Produktionssystem

Abb. 4 zeigt oben ein Beispiel eines Produktionssystems mit drei Maschinen. Hier ist $u(k)$ die Zeit, in der das k -te Teil in das System kommt, und $y(k)$ die Zeit, zu der das k -te Teil das System verlässt. Analog sind $x_i(k)$ die Ankunftszeiten des k -ten Teils an der Maschine i . Im unteren Teil der Abb. 4 ist die Entsprechung des Systems in MaxPlus-Schreibweise angegeben.

Die Vorteile der MaxPlus-Algebra liegen hauptsächlich in der Anwendbarkeit der Methoden der linearen Algebra. Vor allem sind damit dynamische Eigenschaften und Zusammenhänge des Systems analytisch zugänglich wie z.B. Fahrplanberechnungen (\rightarrow Eigenvektor), minimale Zykluszeiten (\rightarrow Eigenwert), Auswirkungen von Planabweichungen usw. Durch die geschlossene Darstellung scheint die MaxPlus-Algebra die Voraussetzungen für eine noch immer fehlende Systemtheorie für ereignisdiskrete Systeme zu erfüllen; Ansätze einer solchen Theorie wurden bereits vorgestellt (Schutter 1996).

Ein weiterer praktischer Vorteil liegt in der Beschreibungsart, welche neben den analytischen Möglichkeiten eine schnelle Berechnung aller Systemzustände mit linearen Methoden erlaubt. Eine schnelle Simulation ist mit der gleichen Beschreibung möglich – ähnlich wie dies bei Differentialgleichungen der Fall ist.

Simulationstools im eigentlichen Sinne sind für MaxPlus-Algebra-Systeme nicht vorhanden, da eine große Klasse unterschiedlicher ereignisorientierter Systeme mit Hilfe der MaxPlus-Algebra modelliert werden kann. Dennoch existieren für die Berechnungen innerhalb der Algebra-Notation Toolboxen für gängige Mathematiksoftware wie z.B. Matlab, Maple und Scilab.

Simulation

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen, analytischen Modellierungskonzepten, welche jeweils bestimmte Beschreibungsgrenzen aufweisen, ist die Erstellung eines Simulationsmodells fast immer möglich. Simulationen bieten dagegen keine Analysemöglichkeiten im Sinne der oben angegebenen Definition – es ist nur eine Analyse von durch Simulationen erhaltenen, statistischen Systemdaten möglich. Da durch die Komplexität der zu untersuchenden Systeme oft jedoch keine andere Möglichkeit bleibt, wird die Simulation zur Modellierung und Untersuchung logistischer Systeme häufig verwendet.

Die Anwendung von Simulationsmodellen als Konzept zur Untersuchung von Systemen oder zum Steuerungsentwurf macht, analog zu klassischen Versuchen, eine statistische Versuchsplanung und eine entsprechende Anzahl von Simulationsdurchläufen notwendig, was je nach Komplexität der Modelle erhebliche Zeit in Anspruch nehmen kann. Ebenfalls analog zu klassischen Versuchen hat man jedoch die Hoffnung, durch die Untersuchung einer Vielzahl von experimentellen Ergebnissen zu übergeordneten Erkenntnissen und schließlich zu einem Theoriegebäude zu gelangen, welches dann die Simulationsergebnisse vorhersagen kann.

Zur Erstellung von Simulationsmodellen gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Konzepten. Die bekanntesten für logistische Systeme benutzten Konzepte sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit: Multiagentensystemen (MAS), zelluläre Automaten (ZA) oder auch das sehr allgemeine, aus der Informatik stammende Konzeptgebäude der ereignisdiskreten Simulation (engl.: Discrete Event Simulation (DES)).

Für jedes dieser Simulationskonzepte existieren entsprechende Softwaretools, die mehr oder weniger verbreitet sind. Weiterhin gibt es Tools, welche nicht in ein solches Simulationskonzept eingebettet sind, sondern eigene spezielle Möglichkeiten aufweisen. Die Softwaretools reichen von weit verbreiteten, mächtigen Tools mit z. T. eigenen Konzepten und Notationen wie „eM-Plant“, „Arena“, „Witness“ oder „Quest“ bis hin zu offenen Programmiersprachen wie C++.

2.2 Flussorientierte Denkweise

Aufgrund der langen Tradition innerhalb der Mathematik und der Naturwissenschaften existiert für flussorientierte Ansätze eine große Menge an Analysemöglichkeiten. Da ereignisorientierte Modelle diesbezüglich in der Regel wesentlich stärker eingeschränkt sind, wird versucht, logistische Problemstellungen mit flussorientierten Ansätzen zu modellieren und zu untersuchen. Ein weiterer Grund für die Wahl eines solchen Ansatzes ist die wesentlich schnellere Simulation – ereignisdiskrete Systeme benötigen zur Simulation in der Regel erheblich mehr Rechenleistung als das numerische Lösen von Differentialgleichungen.

Flussorientierte Modellierungskonzepte mit einem entsprechenden theoretischen Hintergrund zur Analyse gibt es im Wesentlichen zwei: die Regelungstechnik und das Gebiet der Dynamischen Systeme. Beide Konzepte sind sehr eng miteinander verbunden. Da sie jedoch aus verschiedenen Fachrichtungen kommen – die Regelungstechnik aus den Ingenieurwissenschaften und Dynamische Systeme aus der Mathematik – werden sie hier getrennt behandelt.

Der hauptsächliche Unterschied zwischen den beiden Disziplinen liegt an deren unterschiedlichen Zielen: Während die Regelungstechnik Systeme dahingehend betrachtet, dass durch Rückkopplungen und Regelungen ein gewünschtes Systemverhalten erzeugt werden soll, liegt das Ziel im Bereich der Dynamischen Systeme in der Beschreibung des Systemverhaltens an sich.

Regelungstechnik

Die Regelungstechnik befasst sich mit der gezielten Beeinflussung von dynamischen Systemen durch das Prinzip der Rückkopplung. In Abb. 5 ist ein einfacher Regelkreis skizziert.

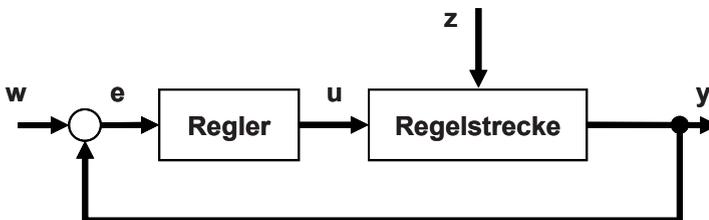


Abb. 5. Der Standardregelkreis

Das zu regelnde System (die Regelstrecke) besitzt eine Ausgangsgröße (y), welche gestört wird (z) und konstant gehalten werden soll. Mittels eines Vergleiches (e) mit dem Sollwert (w) errechnet der Regler die notwendige Größe zur Beeinflussung des Systems (u). Die Beschreibung der Systeme erfolgt in der Regel durch Differentialgleichungen.

Die Hauptaufgabe der Regelungstechnik liegt im Entwurf einer geeigneten Regelung, durch welche das Gesamtsystem gewünschte Eigenschaften aufweist. Diese Eigenschaften können Sollwertfolge, Trajektorienfolge, Störunterdrückung u.v.a.m. sein. Hierzu wurden verschiedene Stabilitätsbegriffe und vor allem dazugehörige Analysemöglichkeiten entwickelt. Neben diesen Stabilitätsuntersuchungen bietet die Regelungstechnik auch Analysemöglichkeiten für Wertegrenzen, Schwingungsverhalten u.ä. sowie Möglichkeiten zur Untersuchung der transienten Phase des Systems (Lunze 2005).

Die bereits angesprochene Verwendung von Flussgrößen erschwert den Einsatz der Regelungstechnik in der Logistik. Teile- und auftragspezifische Größen wie z.B. Durchlaufzeiten und Bearbeitungszeiten können innerhalb der Regelungstechnik nicht dargestellt werden. Die Teile bzw. Aufträge und damit auch ihre Einzelheiten gehen vollständig im Fluss auf. Des Weiteren sind logistische Problemstellungen in der Regel keine Regelungsaufgaben, sondern Optimierungsprobleme. Dies beides führt dazu, dass zur Anwendung der Regelungstechnik auf die Logistik entsprechend angepasste Modelle entwickelt werden müssen, welche dann weniger intuitiv wirken als z.B. bei einer ereignisgesteuerten Simulation. Die Forschung in der Regelungstechnik hat sich jedoch in den letzten Jahren zunehmend auch diskreten Phänomenen zugewandt (Ratering u. Duffie 2003), wobei Berührungspunkte mit den Anfängen der Systemtheorie innerhalb der MaxPlus-Algebra zu erwarten sind (Schutter 1996).

Als Simulationstools, welche eine entsprechende regelungstechnische Notation benutzen, sind Matlab/Simulink und LabView zu nennen. Zur Lösung der regelungstechnischen Aufgaben werden außerdem numerische oder analytische Mathematiktools verwendet.

Dynamische Systeme

Im Gegensatz zur Regelungstechnik befasst sich das Gebiet der Dynamischen Systeme als Teilgebiet der Mathematik hauptsächlich mit der Beschreibung des Verhaltens eines Systems und nicht mit dessen Beeinflussung. Die Dynamischen Systeme werden dabei in der Regel durch Differentialgleichungen beschrieben.

Hauptuntersuchungsgebiete sind die Bestimmung von Fixpunkten, Attraktoren und deren Einzugsgebieten und damit zusammenhängend auch

Stabilitätsuntersuchungen. Eine weitere wichtige Analysemöglichkeit im Zusammenhang mit der Systemstabilität ist die Bestimmung des Übergangs zu chaotischem Verhalten, welches bei nichtlinearen Systemen leicht auftreten kann. Prinzipiell umfassen die Analysemöglichkeiten dynamischer Systeme quasi den gesamten Methodenschatz der Mathematik.

Simulationstools im eigentlichen Sinn gibt es für dieses Gebiet nicht, jedoch ist eine numerische Lösung der aufgestellten Differentialgleichungen mit einer Simulation des Systems gleichzusetzen. Verbreitete Tools sind beispielsweise Matlab, Mathematica, Maple und spezielle ODE/PDE-Solver.

Simulation

Sobald man Differentialgleichungen nicht mehr analytisch betrachtet, sondern numerisch mit festen Parametern eine Lösungsapproximation errechnet, befindet man sich bereits im Bereich der Simulation. Da in den beiden vorgestellten flussorientierten Konzepten keine spezifischen Notationen auftauchen, können alle dort bereits genannten Softwaretools zur Simulation verwendet werden. Auf einer unteren Ebene können prinzipiell auch alle Programmiersprachen verwendet werden, welche auf mathematische Operationen ausgelegt sind. Die Vorteile numerischer flussorientierter Simulationen liegen – wie bereits erwähnt – in der schnellen Ausführung der Simulation.

Zusätzlich zu den beschriebenen Simulationsmöglichkeiten wurde mit „System Dynamics“ ein Konzept zur Simulation flussorientierter Systeme erstellt. Die Vorteile dieses Konzeptes liegen in einer einheitlichen Notation der Systemelemente, einer graphischen Oberfläche zur Systemerstellung und schließlich der automatisierten numerischen Simulation der erstellten Modelle. Die Anwenderfreundlichkeit und das Systemverständnis stehen hier im Vordergrund. Zusätzlich zu den Möglichkeiten der kontinuierlichen Beschreibung mittels Differentialgleichungen verfügt „System Dynamics“ auch über diskrete Elemente wie z.B. Fallunterscheidungen oder Triggerfunktionen, welche eine intuitive Modellerstellung erleichtern. Die Analysemöglichkeiten wie z.B. die Sensitivitätsanalyse von „System Dynamics“ basieren ausschließlich auf einer Simulation aller interessierenden Parameterkonstellationen, sind aber standardisiert und für den Anwender leicht durchführbar. Für das System-Dynamics-Konzept existieren einige Softwaretools, teilweise auch mit Erweiterungen, z.B. Vensim, AnyLogic.

3 Steuerung von logistischen Systemen

Durch Modellierung und Analyse können Aussagen über Eigenschaften und Verhalten eines Systems getroffen werden. Diese können bei der Konzipierung der Steuerung des Systems wichtige Hinweise zu deren Ausgestaltung liefern. Steuerung im weiteren Sinne umfasst hier die Planung, die Steuerung i.e.S. und die Regelung, die sich durch ihren zeitlichen Ablauf und die Einbeziehung der verschiedenen Systemparameter voneinander unterscheiden. Je nach Dynamik bzw. Komplexität und Zielstellung des Systems fällt die Wahl auf die jeweils adäquate Methode, mit der das gewünschte Ziel mit dem geringsten Aufwand hinreichend genau erreicht wird.

Planung bedeutet die Bestimmung einer optimalen Konfiguration des Systems im Voraus, also im Sinne der Mathematik die Bestimmung optimaler, zulässiger Lösungen eines Optimierungsproblems hinsichtlich einer gegebenen Zielfunktion. Steuerung und Regelung basieren hingegen auf einer Beeinflussung des Systems zur Laufzeit. Dabei unterscheiden sich beide Ansätze elementar durch die Einbeziehung der zu beeinflussenden Größe. Während die Steuerung ohne Rückkopplung auf das System wirkt, basiert die Regelung eben auf der Einbeziehung einer Rückkopplung des Systems auf die Stellgröße. Aus systemtheoretischer Sicht ist eine Steuerung ein offener und eine Regelung ein geschlossener Regelkreis.

Bei der Wahl der passenden Steuerung wird in Abhängigkeit vom zu lösenden Planungs- und Steuerungsproblem auch über den Zentralitäts- bzw. Dezentralitätsgrad entschieden. In der Regel ist in zentralen Systemen der Anteil der Planung höher als in dezentralen Systemen, in denen Steuerung und Regelung dominieren. Die Idee der Dezentralisierung der Steuerung besteht darin, Entscheidungen zu verteilen und damit das komplexe Entscheidungsproblem soweit zu reduzieren, dass eine Entscheidungsfindung in akzeptabler Zeit möglich ist. Dies ist eine Möglichkeit, Dynamik und Komplexität zu beherrschen, wobei zu beachten ist, dass durch den dezentralen Charakter der Beeinflussung des Systems dessen Dynamik verändert werden kann.

Abb. 6 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Planungshorizont und Dezentralitätsgrad und die Einordnung der Steuerungsverfahren für logistische Systeme.

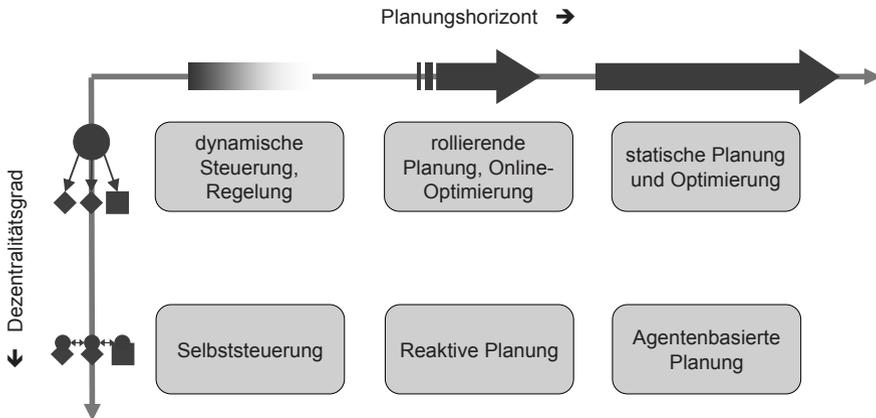


Abb. 6. Einordnung von Steuerungsverfahren für logistische Systeme

Im Folgenden werden die Konzepte Planung, Steuerung und Regelung auf zentraler und dezentraler Ebene näher erläutert.

3.1 Zentrale Verfahren

Planung

Die zentrale Planung stellt in der Logistik ein elementares Instrument dar, im Vorfeld einer Ausführung Entscheidungen über unterschiedliche Systemparameter und -variablen zu treffen und nach diesen Gesichtspunkten das System zu konfigurieren. Dieses Vorgehen stellt im mathematischen Sinne eine Optimierung dar. So lassen sich die folgenden Bestandteile der Planung identifizieren:

- eine Zielfunktion, die optimiert werden soll (z.B. die Logistikleistung),
- eine oder mehrere Variablen, von denen die Zielfunktion abhängt (z.B. Auslastung, Bestand) und
- Nebenbedingungen, die von der Lösung des Problems erfüllt werden müssen (z.B. Termine, Kapazitätsbeschränkungen).

Hierbei lassen sich in einem ersten Schritt zwei Arten von Optimierungsproblemen identifizieren: die skalare und die multikriterielle Optimierung. Die skalare Optimierung betrachtet nur eine reellwertige Zielfunktion, nach der optimiert wird. Soll ein System jedoch nach mehreren Zielen gleichzeitig optimiert werden, so muss für jedes Ziel eine Zielfunktion aufgestellt werden. Die Gesamtheit aller Zielfunktionen kann wiederum zu einer vektorwertigen Zielfunktion zusammengefasst werden. Dies

führt zu einer Vektor- bzw. einer multikriteriellen Optimierung. Dabei ergeben sich im Allgemeinen aber keine Lösungen, die alle Komponenten der Zielfunktion gleichzeitig zu einem Optimum führen. Es ergibt sich vielmehr eine Lösungsmenge des Problems, aus der zum Beispiel durch eine Gewichtung der Einzelkomponenten der Zielfunktion ein einzelner Optimalpunkt ermittelt werden kann.

Exakte Verfahren

Die zur Optimierung eingesetzten Verfahren lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Eine Menge von Problemen ist durch lineare Gleichungen darstellbar und dadurch exakt lösbar, z.B. durch lineare Programmierung mit dem Simplex-Verfahren. Eine Einschränkung dieser Probleme auf nur ganzzahlige Lösungen erschwert die Optimierung, wird aber in der Logistik vermehrt benötigt, z.B. in der Produktionsplanung, im Scheduling oder in der Tourenplanung. Diese komplexen Probleme sind durch Linearisierung zum Teil exakt lösbar (Domschke u. Drexl 2004). Allerdings bildet eine lineare Näherung die Wirklichkeit in den meisten Fällen nicht exakt genug ab, weshalb auf nichtlineare Gleichungen zurückgegriffen werden muss. Dadurch ergibt sich eine zweite Menge von Problemen, die nicht mehr exakt lösbar sind.

Nicht-exakte Verfahren

Hier kommen dann Verfahren zum Einsatz, die für analytisch nicht lösbare Probleme approximativ nicht-exakte Lösungen generieren. Deren Ergebnisse stellen nicht zwingend das globale Optimum dar. Die Wahl des Lösungsverfahrens hängt dabei stark von den Randbedingungen des Problems ab, z.B., ob die Zielfunktion deterministisch ist oder stochastische Einflüsse hat, ob sie in der Zielumgebung mehrere lokale Optima besitzt oder wie hoch der Rechenaufwand ist, um einen Gradienten der Zielfunktion zu bestimmen. Je nach Einschätzung können dann Verfahren zum Einsatz kommen, die lokal in einer bestimmten Umgebung ein Optimum suchen, welches aber nicht das globale Optimum darstellen muss. Beispiele sind das Downhill-Simplex-Verfahren oder das Newton-Verfahren in verschiedenen Ausführungen (Jarre u. Stoer 2003).

Um hierfür den Suchraum einzugrenzen oder um im gesamten Suchraum ein globales Optimum zu finden, werden Methoden eingesetzt, die Heuristiken genannt werden. Sie durchlaufen den Suchraum mit unterschiedlichen Strategien und sollen dabei möglichst gute Lösungen hervorbringen. Zur Beschränkung eines großen, komplexen Suchraums werden zum Beispiel so genannte Branch-and-Bound-Algorithmen eingesetzt

(Domschke u. Drexl 2004). Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit erhöht, mit Methoden der lokalen Optimierung ein globales Optimum zu finden.

Methoden, die im gesamten Suchraum mittels heuristischer Verfahren nach globalen Optima suchen, sind z.B. Evolutionäre Algorithmen (Pham u. Karaboga 2000), die ihr erlangtes Wissen über den Suchraum der nächsten Generation vererben und somit besonders hilfreich sind, wenn der Suchraum gewissen Gesetzmäßigkeiten unterliegt. Ameisenalgorithmen (Bonabeau et al. 1999) hingegen basieren auf dem Gedanken der Schwarmintelligenz. Basierend auf einem Pheromonansatz wird das Verhalten von Ameisen bei der Nahrungssuche modelliert. Je stärker ein Weg frequentiert wird, desto wahrscheinlicher wird er von den folgenden Ameisen gewählt. Mit einem gewissen Prozentsatz weichen die Ameisen dabei vom Weg ab und untersuchen zufällig alternative Wege und damit Lösungen. Das so genannte „Simulated Annealing“ (Pham u. Karaboga 2000) ist ein Verfahren, welches an den physikalischen Abkühlungsprozess angelehnt ist. Dabei sorgt die langsame Abkühlung dafür, dass die Moleküle ausreichend Zeit haben, sich zu ordnen und stabile Kristalle zu bilden. So erreicht das System einen stabilen Zustand durch Energieminimierung und somit ein lokales Optimum. Weiterhin existieren graphentheoretische Ansätze, um logistische Fragen wie das Travelling-Salesman-Problem oder das Zuordnungsproblem zu lösen (Domschke u. Drexl 2004).

Alle diese Verfahren werden zur Planung eingesetzt. Das heißt, sie dienen der Berechnung optimaler Planvorgaben für das logistische System. Im Gegensatz dazu werden Steuerungs- und Regelungsmethoden eingesetzt, um das System instantan, d.h. während des Betriebes zu beeinflussen.

Steuerung

In der Theorie wird strikt zwischen Steuerungs- und Regelungsmethoden unterschieden. Während Regelungen stets rückgekoppelte Verfahren sind und die sich ergebende Systemdynamik immer eine Lösung der Bewegungsgleichungen des ursprünglichen Systems ist, wird bei rückkopplungslosen Steuerungsverfahren eine neue Systemdynamik erzeugt. Um eine Steuerung zu entwerfen, müssen zunächst die Systemgleichungen bekannt sein, also ein Modell des Systems muss bestehen. Je genauer und besser das Modell, desto besser wird die Steuerungsmethode arbeiten. Es folgt die Definition einer Soll-Dynamik für das System und daraus die Ableitung von zeitabhängigen Steuerungskräften, die dann dem System „aufgezwungen“ werden. Vorteil ist, dass bei gelungener Modellierung keine Systembeobachtung mehr nötig ist, weil diese Verfahren ohne Rückkopplung arbeiten. Hier liegt aber auch die Gefahr des Verfahrens, dass auf un-

vorhergesehene Änderungen des Systems nicht sofort adaptiv durch die vorhandene Steuerung reagiert werden kann. Ein Beispiel solch einer Steuerungsmethode aus der nichtlinearen Dynamik ist die Methode von Hübler (Hübler 1989).

Regelung

Regelungen hingegen ziehen Änderungen des Systems in Betracht. So definiert das Deutsche Institut für Normung die Regelung als einen „Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“ (DIN 19226). Zum Entwurf von Regelungen im Rahmen der Regelungstechnik ist ein detailliertes Modell des Regelkreises notwendig. Darauf basierend werden durch unterschiedliche Methoden die Messung und die Adaption der Regelgröße vorgenommen. Prinzipiell lassen sich für lineare Systeme zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Regelungen entwerfen. Ein in beiden Fällen anwendbares Vorgehen ist das so genannte Wurzelortskurvenverfahren. Die Wurzelortskurve ist eine grafische Darstellung der Lage der Pol- und Nullstellen der komplexwertigen Übertragungsfunktion eines offenen Regelkreises in Abhängigkeit eines Parameters. Das Verfahren bietet nun Möglichkeiten, vom Verhalten des offenen Kreises auf das Verhalten des Systems nach Einführung eines Regelgliedes zu schließen bzw. den Regler durch diese Kenntnisse auszulegen. Die linearen Verfahren sind in der Praxis allerdings nicht immer einsetzbar, da lineare Systeme in der Regel nur eine Annäherung an das reale Systemverhalten sind. Deshalb kommen ebenfalls Methoden zum Einsatz, die das nichtlineare Verhalten in Betracht ziehen. Ein Beispiel hierfür ist das so genannte „Gain Scheduling“. Hierbei wird für jeden Betriebspunkt des Systems ein Regler fester Struktur entworfen, dessen Parameter vom jeweiligen Betriebspunkt abhängen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass das System an jedem Betriebspunkt linearisiert werden kann. Eine weitere Methode besteht darin, die Nichtlinearitäten des Systems durch geeignete Vorfilter und Rückführungen zu kompensieren (Methode der globalen Linearisierung). Für das so linearisierte System kann dann anhand bekannter linearer Verfahren eine Regelung entworfen werden (Lunze 2005).

Für Regelungen von Systemen, die eine chaotische Dynamik aufweisen, eignen sich Methoden aus der nichtlinearen Dynamik wie z.B. das OGY-Verfahren nach Ott, Grebogi und Yorke (Ott et al. 1990) und das Verfahren nach Pyragas (Pyragas 1992). Ziel beider Methoden ist es, eine instabile Dynamik des Systems mithilfe von kleinen, zeitabhängigen Störungen eines Systemparameters zu stabilisieren. Da in einem chaotischen System

unendlich viele solcher instabiler Orbits existieren und die Zieldynamik durch jeden Orbit repräsentiert werden kann, sind diese Methoden besonders effektiv einzusetzen, wenn im System chaotisches Verhalten vorherrscht. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass in der Regel kein analytisches Modell des Systems notwendig ist; die Kenntnis lokaler Systemeigenschaften, die aus Zeitreihen nur weniger oder einer einzigen Systemvariablen gewonnen werden können, reicht aus.

Ein spezielles Regelungsverfahren ist die prädiktive Regelung. Sie beinhaltet eine Optimierung der Stellgrößenfolge aufgrund der Vorhersage des künftigen Systemverhaltens. Somit wird eine bessere Ermittlung des Regelwertes ermöglicht, da das zukünftige Verhalten durch den so genannten Prädiktor approximiert und in die Berechnung des Regelwertes einfließt (Scholz-Reiter et al. 2004a).

Ist eine mathematische Modellierung der Regelstrecke bzw. des zu regelnden Systems zu aufwendig oder nicht möglich, können heuristische Verfahren zur Reglerbestimmung eingesetzt werden. Dabei werden systematisch Reglerstruktur und -parameter ausgewählt. Jedoch ist die Güte dieser Regelungen häufig nicht mit der einer mathematisch exakten Regelung vergleichbar.

Zur Beschreibung der Regelstrecke und zur heuristischen Reglerbestimmung sind neuronale Netze gut geeignet. Durch ihre Fähigkeit, anhand von Beispielen zu lernen, ersparen sie die aufwändige Ermittlung mathematischer Gleichungen und sind zudem als sehr robust und fehlerresistent bekannt. Zur Abbildung der Übertragungsfunktion einer Regelstrecke kommen in der Regel die so genannten Feedforward-Netze, trainiert mit überwachten Lernverfahren, zum Einsatz. Aber auch zur Prognose, die für die prädiktive Regelungen unabdingbar ist, sind diese Netztypen sehr gut geeignet (Draeger 1997; Zell 2003).

Die strikte theoretische Unterscheidung zwischen Steuerung und Regelung ist in der logistischen Praxis meist nicht wiederzufinden. Vielmehr ist der Übergang zwischen beiden Verfahren fließend, so dass eine genaue Zuordnung nicht mehr möglich ist. Ursache hierfür ist, dass oft eine Anpassung der Steuerung in bestimmten Zeitabständen notwendig wird und somit Messgrößen des Systems immer wieder die Steuerung beeinflussen. Eine klassische Regelung ist ebenfalls nur in seltenen Fällen zu beobachten, da oftmals zwischen Mess- und Regelgröße zwar ein qualitativer, aber kein funktionaler Zusammenhang besteht. Im Allgemeinen stammen die heute in der Logistik angewandten Methoden aus der Familie der Optimierungen, von denen dann Steuerungsmaßnahmen abgeleitet werden können (Lödding 2005).

Erste Ansätze zur Integration der Regelungstheorie in die Logistik sind in den Arbeiten von Pritschow und Wiendahl (Pritschow u. Wiendahl 1995) und Duffie (Duffie 1996) sowie bei Petermann (Petermann 1996) und Breithaupt (Breithaupt 2001) zu finden.

3.2 Dezentralisierung

Die Motivation für die Einführung von dezentralen Steuerungsverfahren in Logistiksystemen ist die Tatsache, dass in komplexen und dynamischen logistischen Systemen eine instantane optimale Entscheidungsfindung oft nicht möglich ist, da entweder das Entscheidungsproblem zu komplex ist und damit eine zu hohe Rechenzeit erfordert oder die nötigen Informationen im entscheidungsrelevanten Zeitfenster nicht zur Verfügung stehen. Das heißt, dass weder die Entscheidungsfindung noch die notwendige Kommunikation zur Entscheidungsübermittlung und Ausführung möglich sind, bevor sich die Randbedingungen erneut verändert haben und somit die gefundene Entscheidung nicht mehr als optimal zu bewerten ist. Um auf globaler Ebene ein stabiles Systemverhalten zu erreichen, wird daher in zentral gesteuerten Systemen eine suboptimale Leistung in Kauf genommen. Dies führt in komplexen Systemen zu einer verringerten Effizienz und im Extremfall zu unvorhersehbarer Dynamik im System, die die Zielsetzung der Stabilität in Frage stellt. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Stabilität und Robustheit und damit der Effizienz eines logistischen Systems scheint die Einführung von selbststeuernden logistischen Prozessen zu sein, durch die man sich eine Erhöhung der Flexibilität und Adaptivität verspricht. Selbststeuerung in logistischen Systemen bedeutet die Verlagerung einzelner Entscheidungsfunktionen von einer zentralen Planungs- und Steuerungsinstanz auf einzelne logistische Objekte. Als logistische Objekte werden sowohl materielle Objekte wie Maschinen oder Bauteile als auch immaterielle Objekte wie Produktionsaufträge bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass es technologisch möglich ist, logistische Objekte mit der notwendigen Informations- und Kommunikationstechnologie auszustatten, so dass diese in die Lage versetzt werden, selbstständig Entscheidungen aufgrund von lokalen Informationen zu treffen. Dies verspricht auf lokaler Ebene eine Verbesserung der Reaktivität auf sich ändernde Randbedingungen und damit eine Verbesserung der Robustheit des Systems und auf globaler Ebene ein verbessertes Gesamtverhalten im Sinne der logistischen Zielerreichung und damit eine verbesserte Effizienz des logistischen Systems.

Selbststeuerung wird dabei wie folgt definiert: „Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen

Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-deterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit und positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte, flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität“ (Hülsmann u. Windt 2007). Für die Ingenieurwissenschaften wurde aus dieser globalen Selbststeuerungsdefinition folgende, auf die Kernfunktionen logistischer Objekte in selbststeuernden Logistiksystemen fokussierte Definition hergeleitet: „Selbststeuerung logistischer Prozesse ist gegeben, wenn das logistische Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leistet“ (Hülsmann u. Windt 2007).

Eine Möglichkeit, Selbststeuerung umzusetzen, besteht in der Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden, die einen Rahmen zur Entscheidungsfindung der logistischen Objekte liefern. Durch diese Methoden wird die Art der Entscheidungsfindung vorherbestimmt, nicht aber die Entscheidung selbst. Diese wird von dem logistischen Objekt anhand von lokalen Informationen situationsbedingt autonom getroffen. Bei der Entwicklung dieser Selbststeuerungsmethoden stellt sich die Frage, wie viele Informationen zur Entscheidungsfindung verwendet werden und wie komplex die zu treffende Entscheidung ist. Dabei bewegt man sich auf einem Kontinuum zwischen lokalen und globalen Informationen sowie optimaler und suboptimaler Entscheidung im Sinne des Beitrags zur Zielerreichung der Einzelentscheidung. Damit hängt es von der Menge und der Qualität der berücksichtigten Informationen zur Entscheidungsfindung ab, ob die Selbststeuerungsmethode als Steuerung oder Regelung oder im Extremfall als Planung bezeichnet werden kann.

Die Einführung von selbststeuernden logistischen Prozessen verspricht durch die Interaktion einer hohen Anzahl von autonomen logistischen Objekten, die anhand von begrenzten, aber jederzeit verfügbaren lokalen Informationen und relativ simplen Regeln Entscheidungen treffen, ein Gesamtverhalten des Systems, welches ohne eine zentrale Steuerungsfunktion zu einer erhöhten Effizienz führt. Die Entscheidungsfindung auf lokaler Ebene wird dabei soweit angepasst, dass trotz Informationsintransparenz und Suboptimalität der Einzelentscheidungen ein Systemverhalten hervorgerufen wird, welches zur Verbesserung der Effizienz und Robustheit des Systems beiträgt. Durch simples Verhalten und Interaktion auf lokaler Ebene wird also auf globaler Ebene ein gewünschtes Verhalten erzeugt. Dieses Phänomen wird als Emergenz bezeichnet. Emergente Eigenschaften eines Systems sind solche, die nicht direkt aus den Eigenschaften einzelner Systemelemente hergeleitet werden können, sondern durch die Interaktion der Systemelemente hervorgerufen werden (Küppers u. Krohn

1992; Ueda et al. 2004). Dies kann allerdings eine Intransparenz des Systems hervorrufen, da gewisse Eigenschaften auf globaler Ebene nicht mehr aus den Eigenschaften und dem Verhalten der einzelnen Elemente zu begründen sind (Elbert 2006). Tragen diese emergenten Eigenschaften des Systems zur Verbesserung der Zielerreichung im logistischen Kontext, also zur verbesserten Effizienz im Sinne der logistischen Zielgrößen bei, so wird dies als positive Emergenz bezeichnet. Im logistischen Kontext zählen zu diesen emergenten Eigenschaften auf der einen Seite messbare Kenngrößen wie mittlere Durchlaufzeiten, Bestände, Auslastungen, Termintreue und deren Verteilungen, auf der anderen Seite aber auch nicht direkt quantifizierbare Größen wie die Flexibilität, Adaptivität und die Robustheit des Systems bezüglich innerer und äußerer Störungen. Diese globalen Eigenschaften bzw. Kenngrößen des Systems entstehen durch die Interaktion der selbststeuernden logistischen Objekte, sind aber nicht notwendigerweise aus den Selbststeuerungsmethoden und damit der Umsetzung der Selbststeuerung oder den Eigenschaften der logistischen Objekte ableitbar. „Positiv“ bezieht sich dann auf die gewünschte Ausprägung dieser Größen bzw. Eigenschaften des Systems, deren Gewichtung auf der logistischen Positionierung beruht (Nyhuis u. Wiendahl 1999). Abb. 7 verdeutlicht den Begriff positive Emergenz im produktionslogistischen Kontext.

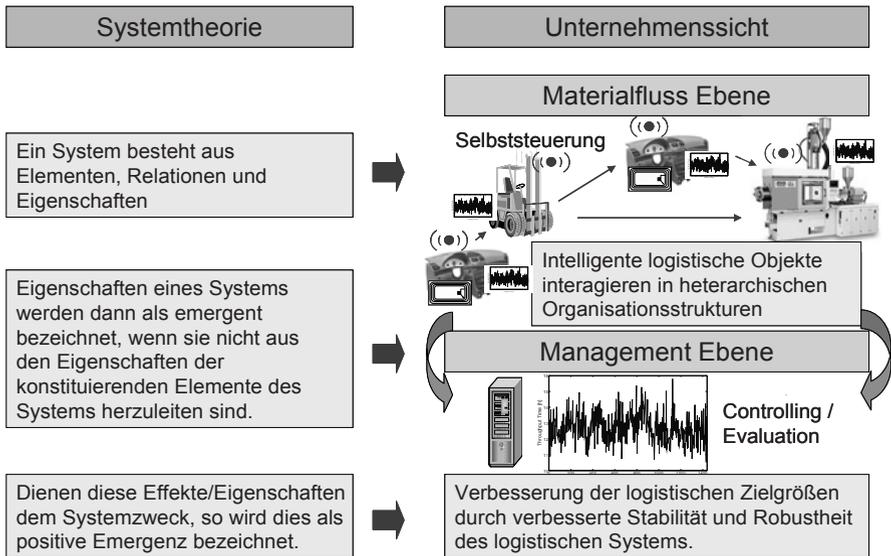


Abb. 7. Positive Emergenz im produktionslogistischen Kontext

Ein Beispiel für eine dezentrale Steuerung bzw. Regelung ist die dezentrale Bestandsregelung mit neuronalen Netzen. In Abb. 8 sind das Ereignis, die Verteilung eines Werkstückes auf alternative Arbeitssysteme, die Ein- und Ausgangsgrößen und der Materialfluss als Vorgänger-Nachfolger-Prinzip für eine dezentrale neuronale bestandsorientierte Produktionsregelung schematisch dargestellt.

Am Arbeitssystem $AS_{n,m-1}$, dem werkstückabhängigen Vorgänger der Arbeitssysteme $AS_{n,m}$, wurde ein Werkstück der Werkstückart i soeben fertiggestellt und muss nun auf einen der potenziellen Nachfolger umgelagert werden. Dazu sendet das Werkstück eine Anfrage an die Reglereinrichtung (den NN-Server) und gibt als Information lediglich seine Werkstückart i weiter. Daraufhin wird ein bestimmtes neuronales Netz aktiviert, das speziell für diese Werkstückart bzw. Klasse von Werkstückarten trainiert wurde.

Die wichtigste Reglereingangsgröße ist die Regelabweichung e_B , d. h. die Soll-Ist-Bestandsabweichung an den jeweiligen Alternativarbeitssystemen. Die Soll-Bestände werden hierbei rechnerisch über ein heuristisches Optimierungsverfahren wie Simulated Annealing bestimmt (Scholz-Reiter et al. 2004b; Scholz-Reiter et al. 2006).

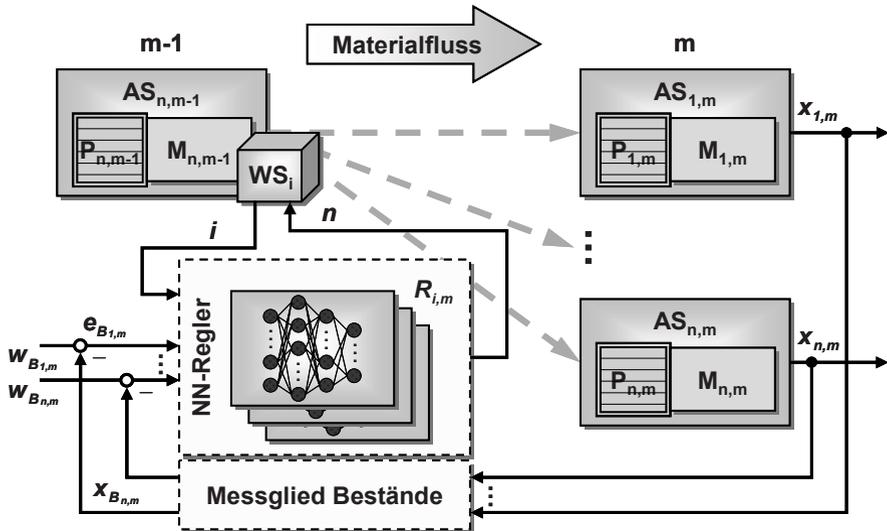


Abb. 8. Schema der dezentralen Bestandsregelung mit neuronalen Netzen

4 Beispiel einer dezentralen Produktionsregelung mit neuronalen Netzen

Anhand des ereignisdiskreten Simulationsmodells eines kundenauftragsorientierten Einzel- und Kleinserienfertigers werden der Einsatz einer dezentralen neuronalen Produktionsregelung demonstriert und die positiven Auswirkungen auf die logistischen Kenngrößen dargestellt. Der durch das Verrichtungsprinzip der Werkstattfertigung im Wesentlichen ungerichtete Materialfluss und die hohe Anzahl an Arbeitssystemen (insgesamt 82) ergeben eine sehr hohe Materialflusskomplexität, die vom Regelungskonzept zu bewältigen ist.

Das Unternehmen stellt Anlagen zur Montage von Motoren, Getrieben und Achsen sowie die dazugehörigen Testsysteme für die Automobilindustrie her. Die Verwendung standardisierter Bauteile oder Konstruktionselemente ist meistens nicht möglich. Des Weiteren ist der Anteil der Aufträge, die nach Fertigungsbeginn durch Kundenwünsche gestaltlichen Änderungseinflüssen unterworfen sind, sehr groß. Die angefertigten Montageanlagen sind mehrteilige Erzeugnisse mit komplexer Struktur, was sich in der Anzahl der Arbeitsgänge von 3 bis 36 und in der Anzahl der Stücklistenpositionen, die mehr als 500 betragen kann, niederschlägt.

Das Werkstattprinzip befähigt die Fertigung zu einer hohen Maschinenauslastung und einer hohen Flexibilität gegenüber Änderungen des Produktionsprogramms bzgl. Art und Menge. Auftretende Störungen können leicht ausgeglichen werden, da redundante Fertigungsmittel zur Verfügung stehen. Für die Fertigungssteuerung des Beispielunternehmens bedeutet die Werkstattfertigung allerdings einen hohen Planungs- und Steuerungsaufwand.

Bei dem auf den Praxisfall angewendeten Produktionsregelungskonzept mit neuronalen Netzen ist eine Umlagerung von Fertigungsaufträgen zwischen den verschiedenen Alternivarbeitssystemen vorgesehen. Da aber nahezu alle Bearbeitungsmaschinen in der Werkstatt des Beispielunternehmens von unterschiedlichem Typ sind, wurde zunächst untersucht, welche Verlagerungen jeweils technologisch möglich sind. Diese ergeben sich aus der konstruktiven Beschaffenheit des Bauteils sowie den notwendigen Bearbeitungsschritten. Einschränkungen können hier z. B. die zur Bearbeitung benötigte Anzahl der Maschinenachsen und die Zugänglichkeit der zu bearbeitenden Oberfläche darstellen.

Für die vollständige Umsetzung des Regelungskonzeptes mit neuronalen Netzen müsste je Arbeitssystem ein Reglernetz trainiert und eingesetzt werden. Es erfolgte eine Teilumsetzung der neuronalen Regelung an so genannten kritischen Arbeitssystemen, die über die Auslastung identifiziert

wurden. Eine Überlastung bestimmter Arbeitssysteme und/oder hohe Schwankungen der Belastung lassen relativ zuverlässig Rückschlüsse darauf zu, ob es sich hierbei um kritische Bereiche handelt.

Durch die Engpassanalyse rückten die Drehmaschinen Dreh1 bis Dreh3 in den Fokus der Betrachtung. Zudem konnte anhand einer Matrix eine weitgehende Austauschbarkeit dieser Bearbeitungsmaschinen festgestellt werden. Die durch die dezentrale Produktionsregelung mit neuronalen Netzen vorgesehenen Umlagerungen von Werksaufträgen auf Alternativarbeitssysteme können somit für die Drehmaschinen als realistisch angesehen werden.

Wie bereits erwähnt, stellte die Komplexität des Materialflusses eine besondere Herausforderung an die Regelung dar. Werksaufträge durchlaufen die Produktion entsprechend ihrer bauteilspezifischen Bearbeitungsreihenfolge. Die neuronale Regelung muss deshalb in der Lage sein, prinzipiell jedes Arbeitssystem als potenziellen Vorgänger der Drehmaschinen zu berücksichtigen. In das Modell wurde daher eine zweistufige Regelung implementiert. Die erste Stufe der Regelung veranlasst eine Rückkopplung an vorgelagerte Maschinen. Durch die Rückkopplung können diese auf den aktuellen Systemzustand, insbesondere den Bestand der Drehmaschinen reagieren. Die zweite Stufe der Regelung sieht eine Umlagerung von Werksaufträgen zwischen den Drehmaschinen anhand der Entscheidung der neuronalen Reglernetze vor, womit zusätzlich die Auslastungen der verschiedenen Alternativarbeitssysteme ausgeglichen werden.

Die eingesetzten neuronalen Netze besitzen entsprechend der Anzahl der Drehmaschinen drei Input- und drei Output-Neuronen. Als Eingabe fungiert der Quotient aus Ist-Bestand und Soll-Bestand, wobei sich die Soll-Bestände aus der Arbeitsweise der einzelnen Arbeitssysteme ergeben. Die Maschinenführer bereiten mit einem Vorlauf von ungefähr einer Schicht die Werksaufträge für die Folgeschicht, einschließlich der Werkzeugbestellung, vor. Die Soll-Bestände betragen somit für die Arbeitssysteme mit einer Maschine (Dreh2 und Dreh3) acht und für die Kostenstelle mit zwei Maschinen (Dreh1) sechzehn Arbeitsstunden.

Um die Vorteilhaftigkeit der neuronalen Regelung genauer darstellen zu können, wurden die logistischen Leistungsmerkmale direkt an den geregelten Systemen ermittelt. Dadurch lassen sich die stark verzerrenden Einflüsse der Auswärtsfertigung ausschliessen, und die Auswirkungen der Regelung signifikanter darstellen. Die Auswertung erfolgte über einen Simulationszeitraum von 2 Monaten, in dem etwa 2.900 Werksaufträge mit ungefähr 24.000 Arbeitsvorgängen anfielen.

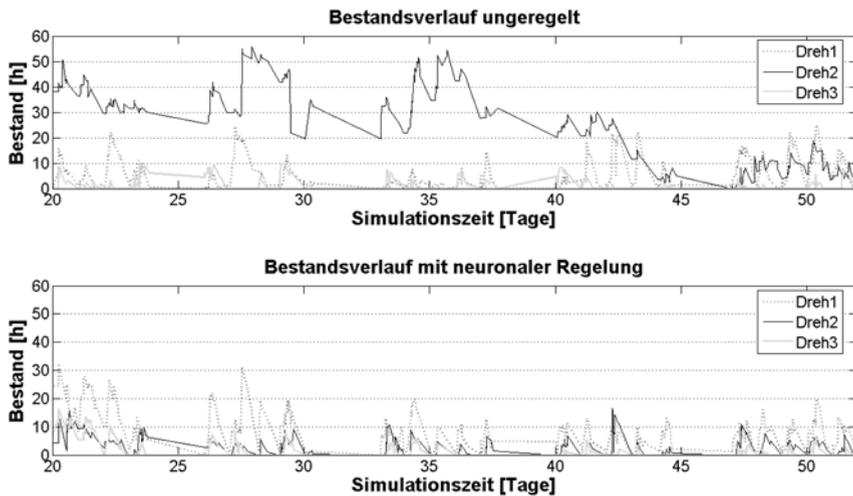


Abb. 9. Auswirkung der neuronalen Regelung auf die Bestandsverläufe

Die Abb. 9 zeigt, dass die temporäre Belastung an den einzelnen Drehmaschinen über den Simulationszeitraum durch den Einsatz der neuronalen Regelung ausgeglichen werden konnte. Dabei wurden einige Belastungsspitzen abgebaut, was in einer Verringerung des Gesamtbestands resultierte.

Die Gesamtauslastung aller Drehmaschinen wurde zwar über den Simulationszeitraum konstant gehalten, aber über die einzelnen Arbeitssysteme gleichmäßiger verteilt. Die Durchlaufzeiten und die Streuung konnten durch den Einsatz der Regelung mit neuronalen Netzen signifikant reduziert werden. Hierbei wurde die mittlere Durchlaufzeit um über 13 Stunden und die mittlere gewichtete Durchlaufzeit um mehr als 17 Stunden verringert, was einer Reduzierung um ca. 59 % gegenüber dem unregulierten Zustand entspricht. Zudem wurde der Variationskoeffizient der Durchlaufzeit um mehr als 35% gesenkt, siehe Abb. 10. Szenario I bezeichnet hierbei den unregulierten Zustand, Szenario II die einfache Rückkopplung und Szenario III die dezentrale Bestandsregelung mit neuronalen Netzen.

Die Steigerung der logistischen Leistungsfähigkeit der Drehmaschinen schlägt sich auch in den Ergebnissen des gesamten Produktionssystems nieder. Die Regelung der Arbeitsplatzgruppe Drehmaschinen rief bereits eine Reduzierung der Durchlaufzeiten der Werksaufträge im gesamten Produktionssystem um 5% hervor.

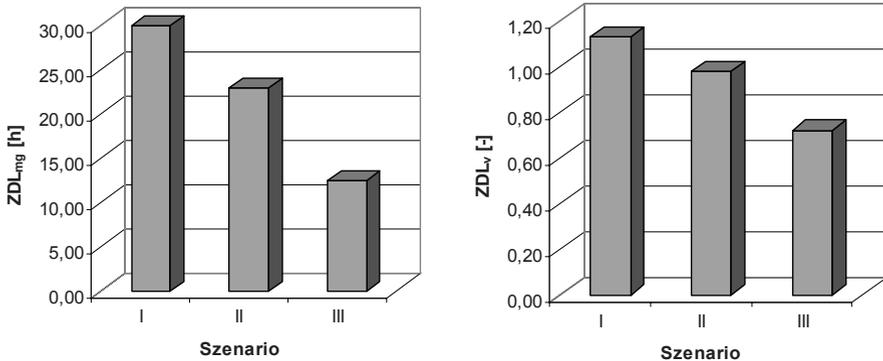


Abb. 10. Reduzierung der Durchlaufzeiten durch dezentrale neuronale Regelung

Dieses Beispiel verdeutlicht das Vorgehen zum Umgang mit Dynamik in logistischen Systemen. Zunächst wurde ein ereignisdiskretes Simulationsmodell eines realen werkstatorientierten Produktionssystems erstellt und darauf basierend eine dezentrale Regelung mit neuronalen Netzen abgeleitet. Das Beispiel zeigt, dass das Konzept der Produktionsregelung mit neuronalen Netzen aufgrund seines dezentralen Ansatzes sowohl die Dynamik, in Form eines auf Realdaten basierenden Auftragseingangs, als auch die Materialflusskomplexität und die Bauteilvielfalt eines realistischen Produktionsszenarios bewältigen kann. Der Einsatz der neuronalen Netze war dabei besonders geeignet, da sie aufgrund ihres erlernten Wissens komplexe Probleme, ohne eine explizite und mathematische Beschreibung der Ursache-Wirkung-Zusammenhänge, lösen können.

5 Fazit

Die Betrachtung logistischer Systeme als dynamische Systeme ermöglicht ein qualitatives Verständnis der inneren Wirkzusammenhänge und der zeitlichen Entwicklung des Logistiksystems und der darin ablaufenden Prozesse. Insbesondere lassen sich durch dynamische Modelle zufällig scheinende Ereignisse und irreguläre Prozesse ggf. mit deterministischen, nichtlinearen Abhängigkeiten erklären. Eine explizite Beschreibung eines Logistiksystems durch dynamische Modelle ist bis heute allerdings nur für überschaubare Subsysteme möglich. Dabei müssen bestimmte Einflussfaktoren, z.B. menschliches Verhalten, oft vernachlässigt werden.

Für eine Modellierung der Dynamik logistischer Prozesse wird die generelle Frage zu klären sein, unter welchen Umständen und Randbedin-

gungen ein Logistiksystem als dynamisches System beschreibbar und analysierbar ist und ob es sich bei dem betrachteten System um ein deterministisches und nichtlineares oder um ein stochastisches System handelt. Erst diese Systemklassifikation ermöglicht die theoretisch fundierte Beschreibung von Logistiksystemen. Hier ist eine weitere intensive, interdisziplinäre Zusammenarbeit der entsprechenden Forschergruppen notwendig, um Logistiksysteme aus der Sicht dynamischer Systeme zu klassifizieren.

Schließlich hängt die erfolgreiche Modellierung und Steuerung dynamischer Logistiksysteme von der Verfügbarkeit geeigneter Prozessdaten ab. Hier wird der Einsatz neuer IuK-Technologien die bisherige Situation der oft mangelhaften Datenqualität sicherlich entscheidend verbessern. Dabei wird die Aufgabe der Logistikverantwortlichen darin bestehen, die technologischen Möglichkeiten zu nutzen und geeignete Daten zu erfassen, die eine Analyse und Steuerung der logistischen Prozesse in Echtzeit ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Modellierung und Steuerung der Dynamik logistischer Systeme und Prozesse noch in den Anfängen steckt. Jedoch werden durch weitere Forschungsarbeiten und durch neue technologische Entwicklungen die bisherigen Anwendungsgrenzen zunehmend verschwinden und damit die Potenziale der interdisziplinären Symbiose zwischen den Theorien für dynamische Systeme und der Logistik künftig besser genutzt werden können.

Literatur

- Bonabeau E, Dorigo M, Theraulaz G (1999) *Swarm Intelligence – From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press, Oxford
- Breithaupt J (2001) *Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen*, VDI Verlag, Düsseldorf
- DIN 19226 *Regelungstechnik und Steuerungstechnik*, Deutsches Institut für Normung
- Domschke W, Drexl A (2004) *Einführung in Operations Research*. Springer, Berlin
- Draeger A (1997) *Neuronale Netze zur Regelung verfahrenstechnischer Anlagen*. Dissertation, Universität Dortmund, Shaker, Dortmund
- Duffie NA (1996) Heterarchical control of highly distributed manufacturing systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 9/4, pp 270-281

- Elbert R (2006) Möglichkeiten und Grenzen der Selbststeuerung in der Logistik – Theoriegeleitete Analyse der Voraussetzungen für Integration und Koordination zur Selbststeuerung. In: Pfohl H-C, Wimmer T (Hrsg) Wissenschaft und Praxis im Dialog – Steuerung von Logistiksystemen auf dem Weg zur Selbststeuerung. Deutscher Verkehrsverlag, Hamburg
- Freitag M (2005) Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der Nichtlinearen Dynamik. GITO-Verlag, Berlin
- Helbing D, Lämmer S, Witt U, Brenner T (2004) Network-induced oscillatory behavior in material flow networks and irregular business cycles. *Physical Review E*, 70, 056118
- Hübler A (1989) Adaptive control of chaotic systems. *Helvetica Physica Acta*, 62, pp 343-346
- Hülsmann M, Windt K (eds) (2007) Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow. Springer, Berlin
- Jarre F, Stoer J (2003) Optimierung. Springer, Berlin
- Kiencke U (2006) Ereignisdiskrete Systeme. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München
- Krauth J (1990) Modellierung und Simulation flexibler Montagesysteme mit Petri-Netzen. *OR Spektrum*, 12/4, S 239-248
- Küppers G, Krohn W (1992) Selbstorganisation – Zum Stand einer Theorie in den Wissenschaften. In: Krohn W, Küppers G (Hrsg) Emergenz - Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung. Suhrkamp, Frankfurt a. M.
- Larsen ER, Morecroft JDW, Thomsen JS (1999) Complex behaviour in a production-distribution model. *European Journal of Operational Research*, 119, pp 61-74
- Lödding H (2005) Verfahren der Fertigungssteuerung. Springer, Berlin
- Lunze J (2005) Regelungstechnik 1. Springer, Berlin
- Nyhuis P, Wiendahl H-P (1999) Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. Springer, Berlin
- Ott E, Grebogi C, Yorke JA (1990) Controlling chaos. *Physical Review Letters*, 64/11, pp 1196-1199
- Petermann D (1996) Modellbasierte Produktionsregelung. VDI Verlag, Düsseldorf
- Petri Nets World (2007) URL: <http://www.informatik.uni-hamburg.de/TGI/PetriNets>. Abrufdatum: 06.08.2007
- Pham DT, Karaboga D (2000) Intelligent optimisation techniques – genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks. Springer, Berlin
- Pritschow G, Wiendahl H-P (1995) Application of control theory for production logistics - results of a joint project. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 44/1, pp 421-424
- Pyragas K (1992) Continuous control of chaos by self-controlling feedback. *Physics Letters A*, 170/6, pp 421-428
- Ratering A, Duffie NA (2003) Design and Analysis of a Closed-Loop Single-Workstation PPC System. *CIRP Annals* 52/1, pp 355-358

- Scholz-Reiter B, Freitag M, Schmieder A (2002) Modelling and control of production systems based on Nonlinear Dynamics Theory. In: CIRP Annals 51/1, pp 375-378
- Scholz-Reiter B, Hamann T, Höhns H, Middelberg G (2004) Model Predictive Control Of Production Systems Using Partially Recurrent Neural Networks. Proceedings of the 4th CIRP – International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, June 30 - July 2, Sorrento, Italy, pp 93–97
- Scholz-Reiter B, Hamann T, Höhns H, Middelberg G (2004) Decentral Closed Loop Control of Production Systems by Means of Artificial Neural Networks. Proceedings of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, May 19-21, Budapest, Hungary, pp 199-203
- Scholz-Reiter B, Hamann T, Zschintzsch M (2006) Cased-Based Reasoning for production control with neural networks. Proceedings of the 39th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, June 7-9, Ljubljana, Slovenia, pp 233-240
- Schutter B de (1996) Max-Algebraic System Theory for Discrete Event Systems. Katholieke Universiteit Leuven
- Ueda K, Lengyel A, Hatano L (2004) Emergent Synthesis Approaches to control and planning in make to order manufacturing environments. Annals of the CIRP, 53/1, pp 385-388
- Zell A (2003) Simulation neuronaler Netze, 4. Aufl. Oldenbourg Verlag, München