

Katja Windt

## **Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik**

### **1. Einleitung**

Die Ingenieurwissenschaften bedienen sich klassischerweise neuer Technologien, die als Veränderungstreiber den technischen Fortschritt repräsentieren. Einen wesentlichen Veränderungstreiber in der Logistik stellt die Radiofrequenztechnologie (RFID: Radio Frequency Identification Technology) dar, die derzeit die Logistik revolutioniert bzw. in Kombination mit weiteren Technologien, wie z.B. der Sensortechnologie, revolutionieren wird. So genannte Transponder werden auf Produkte, Pakete oder Paletten geklebt und fortan können Informationen des zugehörigen Paketes jederzeit über den Transponder berührungslos ausgelesen werden. Eine lebenszyklusorientierte Verfolgung einzelner Teile oder Pakete wird möglich. Darüber hinaus bieten sich neue Potenziale unter dem Aspekt der Selbststeuerung: Durch eine Weiterentwicklung der derzeitigen Technologie soll in Zukunft zum Beispiel ein Paket in der Lage sein, selbst den optimalen Weg zu seinem Empfänger zu finden. Auf Flughäfen könnten Gepäckwagen selbst dafür sorgen, dass sie immer dann an einem Gate bereit stehen, wenn neue Passagiere erwartet werden. Übertragen auf einen Produktionsbetrieb ist denkbar, dass die Teile eines Produktes selbst ihren Weg zum Montagestandort finden.

Solche und ähnliche Beispiele zeigen einen Paradigmenwechsel hin zu neuen Steuerungsstrategien auf, der insbesondere die Produktion und die Logistik nachhaltig verändern wird. Kern der Idee der Selbststeuerung ist, im Unterschied zu bestehenden zentral und hierarchisch ausgerichteten Planungs- und Steuerungsansätzen, dezentrale und heterarchische Steuerungsmethoden zu entwickeln, die es erlauben, zeitnah und effizienter auf Veränderungen im komplexen Umfeld zu reagieren. Autonome Entscheidungsfunktionalitäten werden auf einzelne Objekte wie Maschinen, zu produzierende Teile oder auch Pakete verlagert und diese durch entsprechende Methoden und Technologien in die Lage versetzt, sich selbst zu steuern.

Ziel dieses Beitrages ist, zum Begriffsverständnis der Selbststeuerung beizutragen und die damit verbundenen Potenziale aus Sicht der Ingenieurwissenschaften und hier speziell der Produktionstechnik und Logistik aufzuzeigen. 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 2005).

Aus Sicht der Ingenieurwissenschaften stellt „Selbststeuerung“ eine Ergänzung zum Begriff der Selbstorganisation dar. Die Entstehung des Begriffes Selbststeuerung und seiner Bedeutung in den Ingenieurwissenschaften ist auf mehrere Entwicklungen in unterschiedlichen Bereichen zurückzuführen. Zum einen haben die transdisziplinären Forschungen zum Thema Selbstorganisation zum Verständnis von sich selbst organisierenden Einheiten in den Ingenieurwissenschaften beigetragen. Zum anderen ist die klassischer-

weise in den Ingenieurwissenschaften vorhandene fachliche Ausrichtung der Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik für die Fokussierung auf den Begriff der Steuerung, der auch im Sinne der Planung und Steuerung der Produktion verwendet wird, maßgeblich. Darüber hinaus wurden bereits vorhandene Dezentralisierungsbestrebungen von Organisationsstrukturen (Aufbauorganisationen von Unternehmen) konsequent weitergedacht und die Entscheidungsverlagerung bis auf die einzelnen Objekte bezogen.

Dieser Beitrag verfolgt neben der Schaffung eines Begriffsverständnisses zur Selbststeuerung in Produktion und Logistik ferner das Ziel, die vorhandenen methodischen Ansätze für Produktion und Logistik vorzustellen und diese hinsichtlich aufgestellter Anforderungen zur Realisierung der Selbststeuerungsideen zu überprüfen. Die Perspektive, die sich aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht durch die Selbststeuerung eröffnet, soll im Kapitel 2 und hier insbesondere im Abschnitt 2.1 ausgeführt werden. Im produktionsstechnischen Sinne ist der Begriff Steuerung geläufig. Beispielsweise spricht man von Auftragssteuerung bzw. -koordination im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung. Hierunter versteht man, wie Luczak (1998) ausführt, die Abstimmung der Aktivitäten aller an der Auftragsabwicklung beteiligten Bereiche. Ziel dabei ist, die vom Kunden bestellten Produkte in der gewünschten Zeit, Menge und Qualität zum gewünschten Termin kostenoptimal zu fertigen und auszuliefern. Um grundsätzlich ein Verständnis für die Abläufe und Problemstellungen der Produktion zu vermitteln und hier insbesondere für die dynamisch komplexen Prozesse, sollen zunächst beispielhaft die wesentlichen Aspekte zur Planung und Steuerung der Produktion erläutert werden (Abschnitt 2.2 und 2.3). Der Einsatz von Methoden zur Selbststeuerung hat zum Ziel, positive emergente Effekte im Sinne einer Erreichung logistischer Zielgrößen zu erlangen. Hierbei spielen jedoch Zielkonflikte eine wesentliche Rolle. Wie positive Emergenz im logistischen Sinne definiert ist, zeigt Abschnitt 2.4. Diese grundsätzlichen logistischen Problemstellungen werden anschließend an einem Beispiel praxisorientiert beschrieben (Abschnitt 2.5). Selbststeuerung bezieht sich auf intelligente logistische Objekte, die in Abschnitt 2.6 erläutert werden. Unter Einsatz neuer Technologien, insbesondere im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologie (I&K), und unter Anwendung der zu entwickelnden Selbststeuerungsmechanismen werden diese logistischen Objekte intelligent gemacht, welches sie befähigt, selbststeuernd zu agieren. Ein kurzer Einblick in intelligente Objekte des Alltags, die den Menschen in der Bewältigung seines Tagesablaufs unterstützen sollen, deutet den gesamtgesellschaftlichen Horizont des Themas an.

Eine Einordnung des Begriffes Selbststeuerung in die disziplinübergreifenden Beschreibungen zur Selbstorganisation wird in Kapitel 3 vorgenommen. Dazu sollen die grundlegenden disziplinübergreifenden Ansätze der unterschiedlichen und in diesem Sammelband bereits dargelegten Begriffsverständnisse zur Selbstorganisation kurz aufgegriffen und den Erkenntnissen zum Verständnis der Selbststeuerung gegenübergestellt werden. Darüber hinaus werden die konstitutiven Merkmale von Selbststeuerung erläutert.

Zur Realisierung der Ideen der Selbststeuerung bedarf es der Erfüllung von Anforderungen, die in Kapitel 4 hinsichtlich der Ebenen Organisation und Management, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Materialfluss und Logistik unterschieden werden (Ropohl 1979). Gegenstand der Anforder-

rungsbetrachtungen soll somit der selbststeuernde physische Materialfluss, die informationstechnische Realisierung der Selbststeuerung als auch das Management selbststeuernder Prozesse sein.

Kapitel 5 zeigt bestehende Ansätze zur Planung und Steuerung der Produktion, die bereits Aspekte der Selbstorganisation bzw. Selbststeuerung in der Logistik und hier insbesondere zur Planung und Steuerung der Produktion auf. Grundsätzlich zu unterscheiden sind dabei die managementorientierten Ansätze der Betriebswirtschaftslehre und die Ansätze aus Sicht der Ingenieurwissenschaften, wobei hier dem transdisziplinären Ansatz der Selbstorganisation folgend auch Aspekte aus anderen Disziplinen aufgegriffen werden. Der interdisziplinäre Diskurs von Teilaspekten beider Ansätze (Managementlehre und Ingenieurwissenschaften) wird zusammenführend am Interviewtext dieses Sammelbandes von Fredmund Malik untersucht (Abschnitt 5.3). Der Beitrag endet mit einem Ausblick (Abschnitt 6) auf zukünftige forschungsrelevante Fragestellungen, die trotz der bestehenden Ansätze noch ungelöst sind.

## **2. Die ingenieurwissenschaftliche Perspektive: Selbststeuerung intelligenter Objekte**

Intelligente Objekte wie Teile und Komponenten eines Produktes werden sich zukünftig selbst durch die Fertigung oder als Pakete durch Transportnetze steuern.<sup>1</sup>

### **2.1 Motivation zur Selbststeuerung aus Sicht von Produktion und Logistik**

Wettbewerbsfähige Unternehmen müssen schnell, kostengünstig und termingerecht liefern. Dynamische Einflüsse stellen das Unternehmen jedoch vor vielfältige Herausforderungen, die die Erreichung der genannten Ziele erschweren. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Anforderungen an das Produkt hinsichtlich Innovation und Qualität sowie aus Sicht des Marketings erfüllt sind. Im Kern der vorwiegend logistischen Betrachtungen steht eine effiziente Auftragsabwicklung, an die Anforderungen aus folgenden Blickwinkeln gestellt werden (**Bild 1**):

- Produktsicht,
- Technologiesicht,
- Markt- und Gesellschaftssicht,
- Prozesssicht sowie
- Netzwerksicht.

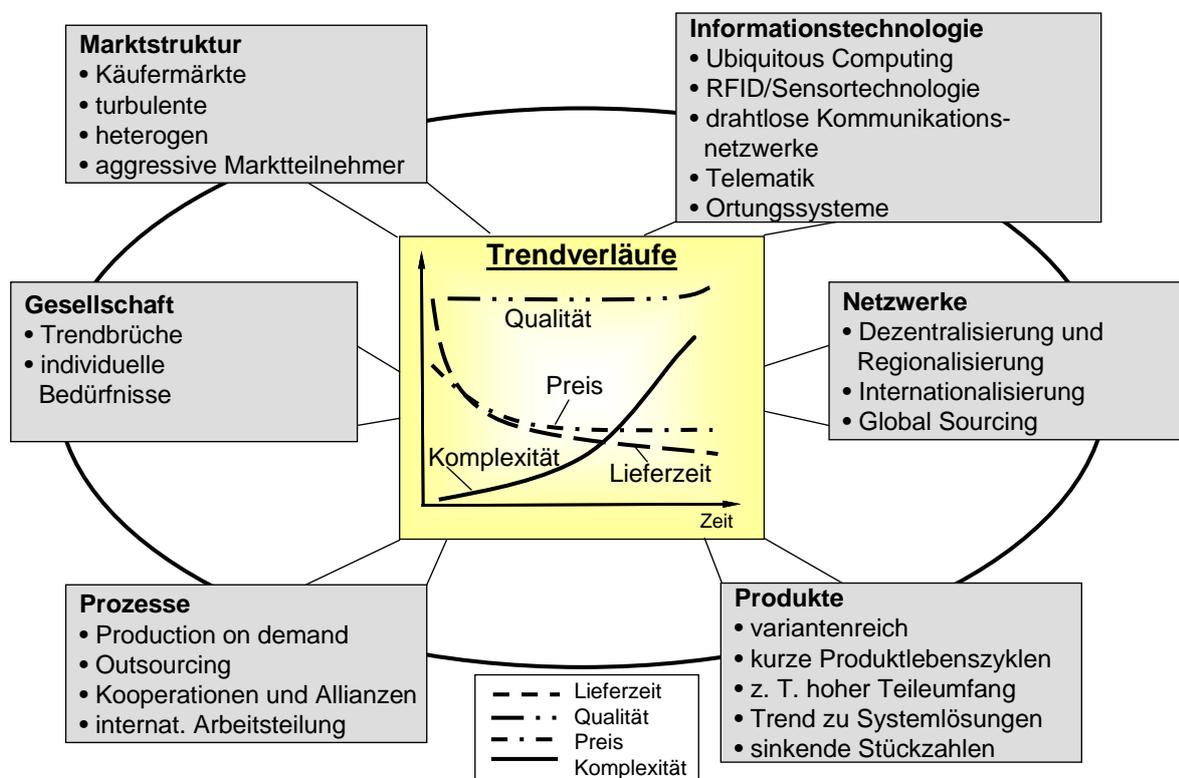
Kurze Produktlebenszyklen gehören mittlerweile ebenso zum Kennzeichen der Konjunktur- und Wettbewerbsverhältnisse wie sinkende Stückzahlen bei gleichzeitig steigender Variantenvielfalt und steigender Komplexität der Produkte und Prozesse. Die Graphik in der Mitte des Bildes zeigt über den generellen Trendverlauf der steigenden Komplexität von Produkten und Prozessen hinaus die qualitativen Anforderungen an Lieferzeit, Qualität und Preis. Die Produktqualität wird gleichmäßig hoch erwartet bzw. ist leicht ansteigend zu verzeichnen. Gleichzeitig wächst der Kosten- und Zeitdruck auf die Unternehmen: Bei sinkenden Preisen müssen immer kürzere Lieferzeiten realisiert werden. Um den daraus resultieren-

---

<sup>1</sup> Verwiesen sei hier auch ganz generell auf den Sonderforschungsbereiches an der Universität Bremen „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ (Freitag et al. 2004; SFB 637 Universität Bremen 2004; Scholz-Reiter 1998, 2004), der sich mit der Erforschung und Nutzbarmachung der Selbststeuerung als einem neuen Paradigma für logistische Prozesse befasst.

den Anforderungen an Schnelligkeit und Flexibilität gerecht zu werden, bestehen Ansatzpunkte in einer innovativen Produkt- und Produktionsgestaltung sowie vor allem in einer effizienten Prozesslenkung (Wiendahl 1997). Hier setzt die Idee der Selbststeuerung an, die in folgende Thesen aufgegriffen wird:

- Selbststeuerung schafft eine effiziente Prozesslenkung und wird den Aufwand zur Durchführung von Planungsfunktionen auf ein Minimum reduzieren.
- Durch Verlagerung von Entscheidungskompetenz auf einzelne logistische Objekte wird die Robustheit komplexer nicht-deterministischer Systeme erhöht.
- Selbststeuerung führt unter Einsatz neuer Technologien Informations- und Materialfluss in Produktions- und Logistiksystemen zusammen, wodurch sich die Transparenz vernetzter Materialflussstrukturen erhöht.



**Bild 1:** Rahmenbedingungen als Herausforderung für Produktion und Logistik (nach Wiendahl 1997)

Um die in den Thesen zum Ausdruck kommenden Potentiale aus Sicht der Logistik ausschöpfen zu können, bedarf es der Erfüllung von Anforderungen in logistischen Systemen, die in Kapitel 4 näher untersucht werden. Zum tieferen Verständnis der logistischen und hier insbesondere der produktionslogistischen Zusammenhänge sollen im Folgenden grundlegende Definitionen zu Logistik und zum logistischen System erläutert werden. Gerade die dynamisch-komplexen Problemstellungen der Logistik stellen ein Anwendungsfeld für Selbststeuerung dar, um die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen in dem beschriebenen Umfeld zu steigern

## 2.2 Logistik und logistisches System

Nach Fleischmann (2002) unterscheidet man makro- (z.B. Verkehrssysteme einer Region) und mikrologistische Systeme. Das mikrologistische System ist das logistische System eines Unternehmens oder ein

Subsystem davon und wird schwerpunktmäßig in diesem Beitrag betrachtet. Logistische Systeme wirken im Sinne der Definition von Logistik. Logistik heißt (Seven-Rights-Definition nach Plowman), die Verfügbarkeit des richtigen Gutes in der richtigen Menge, im richtigen Zustand, am richtigen Ort, zur richtigen Zeit, für den richtigen Kunden und zu den richtigen Kosten zu sichern. Dabei bezieht sich die Logistik in Unternehmen auf die ganzheitliche Planung, Steuerung, Koordination, Durchführung und Kontrolle aller unternehmensinternen und unternehmensübergreifenden Güter- und Informationsflüsse. Die Logistik stellt für Gesamt- und Teilsysteme in Unternehmen, Konzernen, Netzwerken und sogar virtuellen Unternehmen prozess- und kundenorientierte Lösungen bereit. Die Beschaffungs-, Produktions-, Distributions-, Entsorgungs- und Verkehrslogistik sind dabei wichtige Teilgebiete der Logistik, die in alle Prozessketten und -kreisläufe einfließen (Klaus 1998). Ein weiteres charakteristisches Merkmal der Logistik ist zum einen, dass jedes logistisches System ein Informations- und Kommunikationssystem (I&K-System) benötigt. Dieses System ist Bestandteil des logistischen Systems, seine Gestaltung und Steuerung gehören zur Logistik. Zum anderen ist die gleichzeitige Betrachtung vieler Prozesse als Gesamt-Fluss in einem Netzwerk und in ihrer Abstimmung auf Gesamtziele eines Systems der Logistik eigen. Schließlich ist die Logistik interdisziplinär. Sie befasst sich mit physischen Systemen und Prozessen, wobei sowohl technische als auch ökonomische Aufgaben sowie die Gestaltung der Informations- und Kommunikationssysteme eine Rolle spielen (Fleischmann 2002).

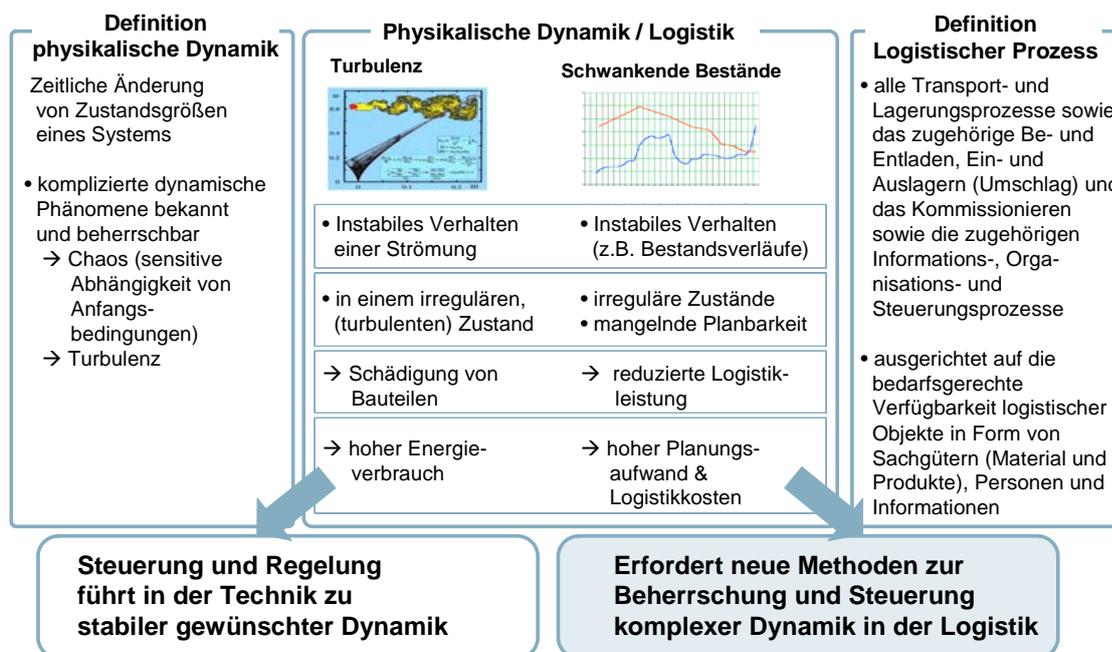
### **2.3 Komplexität und Dynamik in der Logistik**

Produktions- und Logistiksysteme weisen eine komplexe Dynamik auf. Ebeling (1998) bezeichnet komplex in Anlehnung an (Grassberger 1981; Lai 1996; Simon 1962) als (aus vielen Teilen zusammengesetzte) ganzheitliche Strukturen, die durch viele (hierarchisch geordnete) Relationen bzw. Operationen miteinander verknüpft sind. Die folgende Definition der Komplexität für Strukturen lässt sich gut auf logistische Strukturen übertragen: Die Komplexität einer Struktur spiegelt sich in der Anzahl gleicher bzw. verschiedener Elemente, in der Anzahl der gleichen bzw. verschiedenen Relationen und Operationen sowie in der Anzahl der vernetzten Ebenen wider. Im strengen Sinne liegt Komplexität dann vor, wenn die Anzahl der vernetzten Ebenen sehr groß (unendlich) ist (Ebeling et al. 1998).

In der Logistik ist der Begriff der Komplexität im Zusammenhang mit Materialflussstrukturen in der Produktion zu sehen, welche wiederum eng mit der zu produzierenden Variantenanzahl verknüpft ist. Lödding (2001, 2004) unterscheidet zwischen einem linearen Materialfluss, dem komplexen Materialfluss ohne Rückflüsse und dem komplexen Materialfluss mit Rückflüssen. Die Komplexität hängt demnach zum einen von der Anzahl der möglichen Vorgänger und Nachfolger eines Arbeitssystems ab und steigt zum anderen mit der Anzahl der Rückflüsse. Rückflüsse entstehen, wenn die Arbeitssysteme einer Fertigung nicht mehr in eine räumliche Anordnung gebracht werden können, die alle Aufträge in der gleichen Richtung durchlaufen können (Lödding 2004). In logistischen Netzwerken wird die unternehmensinterne Komplexität um die partnerübergreifende Sicht erweitert. Beispielsweise stellt ein wandelbares Produktionsnetz ein solches Netzwerk dar, in dem viele Partner unterschiedliche Steuer- und Regelungsstrategien entlang einer Lieferkette verfolgen. Ein wandelbares Produktionsnetz wird definiert als ein sich dynamisch rekonfigurierender Verbund mehrerer Unternehmen auf Zeit (Dangelmaier 1997). Wandelbar wird

hier im Sinne ständiger Selbsterneuerung verstanden. Jedes komplexe Gebilde, also auch Produktionsnetze, müssen nach (Hejl 1984) lernfähig bleiben, um dem Wandel zwischen der Beziehung Umwelt und Unternehmen begegnen zu können. Laut Ashby (1956) ist das Verharren in starren Verhaltensmustern ein Verlust für die Komplexitätsverarbeitungsfähigkeit eines Produktionsnetzes. Die Komplexität des logistischen Netzwerkes wird in diesem Zusammenhang mit einem veränderten zeitlichen Verhalten in Verbindung gebracht, welches durch den Begriff der Dynamik gekennzeichnet wird.

In Analogie zur physikalischen Dynamik, bei der das instabile Verhalten einer Strömung in Form von Turbulenzen charakteristisch ist, kann das instabile Verhalten von logistischen Prozessen durch schwankende Bestandsverläufe dargestellt werden. Bestände in der Produktionslogistik werden als Umlauf- oder Lagerbestand bezeichnet. Während Lagerbestände klassischerweise in Stück gemessen werden, ist es sinnvoll, Umlaufbestände in Stunden Bearbeitungszeit anzugeben. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Kapazitäten der Arbeitssysteme ebenfalls in Stunden pro Tag angegeben werden und somit eine Einplanung der Aufträge ohne Dimensionskonflikt<sup>2</sup> erfolgen kann. Technologische Erkenntnisse zeigen, dass bei irregulären (turbulenten) Zuständen Schädigungen von Bauteilen z.B. an Brücken oder Maschinen auftreten können und insgesamt ein hoher Energieverbrauch notwendig ist. Steuerungs- und Regelungsalgorithmen führen in der Technik jedoch in vielen Fällen zu einer stabilen Dynamik, hingegen in der Logistik Methoden zur Beherrschung der komplexen Dynamik noch erforscht werden müssen. Derzeit sind solche Zustände in der Logistik mit einer reduzierten Logistikleistung (lange Durchlaufzeiten, schlechte Termintreue) verbunden wobei gleichzeitig hohe Logistikkosten und ein erhöhter Planungsaufwand zu verzeichnen sind (**Bild 2**).



**Bild 2:** Physikalische Dynamik und deren Anwendung auf logistische Prozesse (in Anlehnung an Peters)

<sup>2</sup> Dimensionskonflikt beschreibt das Problem der Darstellung zweier Parameter in einem Diagramm mit unterschiedlichen Einheiten.

Typische dynamische Veränderungen in einem Produktionsnetz können neben Nachfrageschwankungen beispielsweise Ausfälle von Maschinen, Lieferschwierigkeiten von Lieferanten oder kurzfristige Kundenwünsche sein, auf die kurzfristig reagiert werden muss. Derzeitige Planungs- und Steuerungssysteme sind mit dieser Art der komplexen Dynamik überfordert. Selbststeuerung soll dafür sorgen, dass diese dynamische Komplexität von logistischen Systemen effizient im Sinne der Erreichung logistischer Zielgrößen aufgegriffen wird. In der Definition Selbststeuerung wird dies als positive Emergenz, d.h. als höhere Systemrobustheit bezeichnet. Positive Emergenz ist in der Logistik schwer messbar. Es bestehen Wirkzusammenhänge und Zielkonflikte zwischen Zielgrößen, die im Folgenden verdeutlicht werden sollen.

## **2.4 Positive Emergenz in der Logistik**

Die Entstehung emergenter Eigenschaften ist nach Ebeling (1998) eng verknüpft mit dem Begriff komplexe Strukturen. Die Statistische Physik hat emergente Eigenschaften erstmals als solche definiert, die bei einem zusammengesetzten System neue bzw. qualitativ andere Eigenschaften sind, als im Vergleich zum Teilsystem (Ebeling et al. 1998). Läderach (2000) beschreibt emergente Eigenschaften als solche die im Prinzip erklärbar aber nur in einfachen Fällen voraussagbar sind. Emergente Eigenschaften beruhen zum einen auf Wechselwirkungen zwischen den Komponenten und zum anderen auf Wechselwirkungen zwischen dem Ganzen und seiner Umgebung. Dabei kann unterschieden werden zwischen positiver und negativer Emergenz im Sinne zu erreichender globaler Zielgrößen des betrachteten Systems.

Oftmals wird in Unternehmen der Fokus nicht nur auf ein einziges Ziel gerichtet, sondern eine Kombination aus mehreren Zielen favorisiert. Auf Auftragsebene stehen die minimale Terminabweichung vom Kundensolltermin, eine kurze Durchlaufzeit und ein durch die zugesagten Aufträge geforderter Durchsatz im Vordergrund. Diese Ziele bilden die Bedürfnisse des Marktes ab. Hingegen zählen eine angemessene Auslastung sowie niedrige Bestände zu den internen Betriebszielen, die vorwiegend ressourcenorientiert definiert werden (Eidenmüller 1995; Wiendahl 1997). Gleichzeitig ist es selbstverständlich, eine hohe Wirtschaftlichkeit, d.h. minimale Kosten bei gegebener Leistung anzustreben, wobei hier nur die durch die Logistik induzierten Kosten berücksichtigt werden können. Der Qualitätsstandard wird als gegeben vorausgesetzt, aber auch mittelbar betrachtet, denn das nicht erreichte Qualitätsziel ist mit Nacharbeiten verbunden, was zu höheren Beständen, längeren Durchlaufzeiten und größeren Terminabweichungen führt. Diese vier Zielgrößen kennzeichnen im Wesentlichen das Zielsystem der Produktionslogistik, welches im Unterschied zu rein finanziell orientierten Zielsystemen die logistische Leistungsfähigkeit berücksichtigt. Es bewertet somit die strategischen Vorteile, die sich Unternehmen aus einer überlegenen Produktionslogistik ergeben (Lödding 2001). Da es Zielkonflikte gibt (niedrige Umlaufbestände widersprechen zum Beispiel einer hohen Auslastung), ist es erforderlich, zum einen die Wirkzusammenhänge zwischen den Zielgrößen zu berücksichtigen und zum anderen die Ziele zu gewichten, so dass im Zweifelsfalle über Prioritäten entschieden werden kann. Wie die Gewichte der einzelnen Ziele zueinander gesetzt werden, hängt von der jeweiligen Unternehmenspolitik ab (Windt 2001).

Der bestehende Zielkonflikt zwischen den logistischen Zielgrößen lässt eine Maximierung bzw. Minimierung mehrerer Ziele nicht zu. Auch ein Gesamtoptimum ist praktisch nicht zu definieren. Daher ist es

notwendig, die wechselseitigen Abhängigkeiten der Ziele voneinander zu kennen. So können bewusst bestimmte Zielgrößen in Kenntnis der Auswirkungen auf andere Zielgrößen positioniert werden. Positionierung bedeutet in diesem Zusammenhang die Bestimmung eines realistischen Wertes einer Zielgröße, um die anderen Zielgrößen zu ermitteln.

Positive Emergenz in der Logistik würde demnach bedeuten, dass durch den Einsatz von Selbststeuerungsmechanismen, je nach unternehmensinterner Zielpriorisierung, diese anzustrebenden Zielgrößen global (das gesamte Unternehmen oder alle Aufträge über einen längeren Zeitraum betrachtend) besser zu erreichen sind, der Markterfolg sich demnach nachhaltig einstellt oder sich verbessert, als es dies mit bisherigen fremdgesteuerten Planungs- und Steuerungssystemen der Fall ist. Aus den Erläuterungen zu bestehenden Zielkonflikten wird deutlich, dass sich ein Unternehmen hinsichtlich der Festlegung von Zielgrößen Positionieren muss, d.h. es werden einzelne Ziele zu Lasten anderer Ziele priorisiert. Diese Priorisierung müsste sich jedoch dynamisch an veränderte Umgebungsbedingungen anpassen lassen, d.h. die Zielprioritäten können sich grundsätzlich über der Zeit verändern. Darüber hinaus ist es im Rahmen der Idee der Selbststeuerung möglich und durchaus sinnvoll, dass sich auf der Ebene der intelligenten logistischen Objekte autonome dynamische Zielsysteme konfigurieren lassen, die sich den jeweiligen Umgebungsbedingungen des logistischen Objektes anpassen. Dies würde bedeuten, dass das logistische Objekt in Abstimmung mit den globalen Zielgrößen eigenständig Prioritäten dynamisch bildet. Hierzu ist eine Kenntnis der aufgezeigten Wirkzusammenhänge unmittelbare Voraussetzung. Beispielsweise wäre die Zielpriorisierung bei einem durchsatzbestimmenden Engpass-Arbeitssystem<sup>3</sup> hinsichtlich einer sicheren hohen Auslastung zu Lasten des Zieles niedriger Bestände zu wählen. Hingegen ist es sinnvoll, bei einem Randarbeitssystem, über das nur ein geringer Anteil der Fertigungsaufträge abzuwickeln ist, die Zielgröße kurze Durchlaufzeiten zu Lasten einer höheren Auslastung zu favorisieren. Dies macht deutlich, dass die Diskussion zur Grenze zwischen Selbst- und Fremdsteuerung auch und vor allem die Formulierung bzw. Priorisierung von globalen und lokalen Zielen betrifft. Dadurch, dass überhaupt Grenzen der Selbststeuerung diskutiert werden, wird in Analogie zur Begriffsabgrenzung zwischen autonomer<sup>4</sup> und autogener<sup>5</sup> Selbstorganisation (Goebel 1998), von einer autonomen Selbststeuerung unter Vorgabe von Zielen bzw. Randbedingungen ausgegangen.

## **2.5 Problemstellungen am Beispiel einer Werkstättenfertigung**

Die Werkstättenfertigung ordnet die Arbeitssysteme nach dem Verrichtungsprinzip an, d.h. gleichartige Arbeitssysteme werden räumlich zu einer Werkstatt zusammengefasst (Lödding 2004; Wiendahl 1997).

---

<sup>3</sup> Unter Durchsatz wird nach Windt (2001) die Anzahl der von einem Arbeitssystem abgewickelten Aufträge in einem bestimmten Zeitraum verstanden. Es wird dabei vorausgesetzt, dass der Durchsatz die von den Kunden geforderten Aufträge repräsentiert. Daher werden die technischen und logistischen Zustände der Produktion, so wie diese aktuell vorliegen, bewertet, unabhängig davon, ob es sich um zukünftig erlösträchtige Aufträge handelt oder nicht. Das Arbeitssystem welches den höchsten Durchsatz aufweist, repräsentiert den durchsatzbestimmenden Engpass.

<sup>4</sup> Nach Goebel (1998) das bewusste Mitwirken von Individuen an der Ordnung einer Organisationsstruktur.

<sup>5</sup> Nach Goebel (1998) bilden sich bei der autogenen Selbstorganisation Ordnungen, Regeln, Muster von selbst, d.h. spontan.

Kennzeichen des Fertigungsprinzips Werkstättenfertigung sind stark streuende Auftragszeiten (Summe aus Bearbeitungs- und Rüstzeit multipliziert mit der Losgröße<sup>6</sup>) und eine hohe Komplexität der Koordinierungszusammenhänge insbesondere bei komplexen Materialflüssen. Diese Kennzeichen sind im Wesentlichen zurückzuführen auf eine hohe Variantenvielfalt, aus der ein häufiger Produktwechsel mit unterschiedlichen Arbeitsgangfolgen resultiert.

Derzeitige Steuerungsmethoden und -systeme erweisen sich beim Umgang mit den aufgezeigten dynamisch-komplexen Problemstellungen als unzureichend. Das in der Regel sukzessive Vorgehen bei zentral ausgerichteten Planungsprozessen wird den dynamischen Anforderungen nicht mehr gerecht. Schon nach kurzer Zeit stimmen die Planvorgaben nicht mehr mit den Realdaten überein. Die Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse aus dem Realprozess wird nur unzureichend oder zu langsam auf den Planungsprozess im Sinne einer Regelung zurückgeführt (Horváth 2002; Ullmann 1994). Das Ergebnis einer Planungsstufe stellt zudem gleichzeitig die Ausgangsbasis der nachfolgenden Planungsstufe dar. Die wechselseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Planungsschritte können gegenwärtig allerdings kaum berücksichtigt werden. Zudem kann auf kurzzeitige Änderungen nur schlecht reagiert werden (Windt 2001). Nach Kiesewetter (1991) besteht ein weiteres Problem bei Planungs- und Steuerungsprozessen insbesondere in der Produktion darin, dass eine sehr detaillierte Planung, die einen exakt deterministischen Ablauf voraussetzt, auf die dynamische Steuerung stochastischer Probleme angewandt wird, was bereits im Ansatz inadäquat ist. Daher löst sich in der industriellen Praxis die Steuerung von der Planung und wird dann mit herkömmlichen Mitteln ohne Systemunterstützung durchgeführt. Dezentralisierungsbestrebungen hinsichtlich einer Bottom-up-Strategie zeigen Schwächen auf, die die Erreichung logistischer Ziele erschweren (Windt 2001). Ein wesentlicher Grund hierfür liegt in einer realitäts- und zeitfernen Erfassung von Daten (Roos 2003). In der betrieblichen Praxis ist es üblich, von zentralen Planvorgaben hinsichtlich der Abarbeitungsreihenfolge an Arbeitssystemen abzuweichen. Vertauschungen der Reihenfolge von Aufträgen haben jedoch in der Regel einen signifikanten negativen Einfluss auf die logistische Zielerreichung hinsichtlich kurzer Durchlaufzeiten und einer hohen Termintreue (Lödding 2004). Die negativen Auswirkungen werden jedoch nicht unmittelbar im zentralen System zu erkennen sein, erst mit einem Zeitverzug werden diese auch in der zentralen Steuerungsinstanz bemerkt. Dann eingeleitete Maßnahmen (z.B. kurzfristige Erhöhung der Kapazität zum Abbau entstandener erhöhter Umlaufbestände) greifen wiederum nur mit Zeitverzug, so dass im Mittel Aufträge nicht zum vereinbarten Termin zum Kunden ausgeliefert werden können. Ein einzelner Auftrag mit der Fähigkeit zur Selbststeuerung könnte jedoch weitestgehend ohne oder zumindest mit einem wesentlich geringeren Zeitverzug reagieren. Eine Reihenfolgevertauschung zu Lasten dieses hier betrachteten Auftrages würde über ein autonomes Monitoring zeitnah erkannt. Der Auftrag selbst könnte nun beispielsweise alternative Arbeitssysteme (sofern möglich) wählen oder direkt kapazitive Maßnahmen einfordern. Zudem gibt es bisher keine gesicherten Erkenntnisse darüber, bis zu welchem Grad zentrale Entscheidungsstrukturen unter den geschilderten Randbedingungen effizienter sind als dezentrale autonome Ausführungssysteme. Medienbrüche und Schnitt-

---

<sup>6</sup> Die Losgröße ist die Menge an Teilen oder Produkten, die zusammen im Rahmen eines Fertigungsauftrages im Produktionsprozess hergestellt oder in einer gemeinsamen Bestellung eingekauft wird.

stellen zwischen verschiedenen Informationssystemen verhindern darüber hinaus, dass eine durchgängige Informationskette von den einzelnen Prozessen bis hin zur Unternehmensleitung besteht (Luczak et al. 1998; Roos 2003).

Neue Methoden der Selbststeuerung sollen diese Problemstellungen aufgreifen und sicherstellen, dass durch die Entwicklung autonomer und dezentraler Steuerungssysteme im Sinne der beschriebenen Thesen zur Selbststeuerung die logistischen Zielgrößen (im Wesentlichen: Kurze Lieferzeiten, hohe Termintreue, hohe Auslastung, geringe Bestände) nachhaltig erreicht werden können. Dabei stehen Aspekte wie Flexibilität, Adaptivität und Reaktivität auf sich dynamisch verändernde äußere Einflüsse unter Beibehaltung der globalen Ziele im Vordergrund. Im Fokus steht vor allem die Fragestellung, bis zu welcher Ebene in einem Unternehmen welche Ziele vorgegeben werden, bzw. welche Vorgaben im Sinne einer Fremdsteuerung zu treffen sind und wie viel Selbststeuerung zur Erreichung der Zielgrößen sinnvoll und notwendig ist. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die intelligenten logistischen Objekte. Nachdem bereits einige Beispiele hierzu genannt worden sind, soll im Folgenden zunächst das Verständnis logistischer Objekte vertieft und anschließend erläutert werden, was unter dem Begriff intelligentes logistisches Objekt aus technischer Sicht verstanden wird.

## **2.6 Intelligente logistische Objekte**

### ***Logistische Objekte***

Ein Objekt ist definiert als Sache oder Gegenstand des Wahrnehmens, Erkennens und Denkens (Wahrig-Burfeind 1999) oder Etwas, das Gegenstand irgendwelcher Aktivitäten (z.B. Bearbeitung, Begehren, Betrachtung, Wahrnehmung, Beobachtung) eines Subjekts wird. Die objektorientierte Technologie fasst konkrete Ausprägungen einer Klasse als Instanz zusammen und beschreibt deren statische Eigenschaften als Attribute und die dynamischen Eigenschaften (Verhalten) durch Methoden. Objekte können angeordnet werden und so Strukturen bilden. Zeitliche Strukturen sind dabei mit der Dynamik des Systems verknüpft.

Logistische Betrachtungen unterscheiden bei der Anordnung von Betriebsmitteln zwischen unterschiedlichen Fertigungsprinzipien. Dabei wird unter dem Objekt- bzw. Flussprinzip die Anordnung der Betriebsmittel entsprechend der Folge des Arbeitsablaufes verstanden (Schulte 1999; Zäpfel 1989). Das logistische Objekt wird in diesem Kontext als Betriebsmittel und somit als Arbeitssystem verstanden. Der Begriff logistisches Objekt wird in Kombination mit Selbststeuerung umfassender definiert. Neben den Betriebsmitteln (Arbeitssystemen, Maschinen) werden sowohl alle materiellen Gegenstände wie auch die immateriellen Informationen in vernetzten Logistikstrukturen als logistische Objekte (z.B. Aufträge) bezeichnet. Zum Beispiel betrifft dies Produkte, Komponenten, Teile, Rohmaterialien, Produktionsaufträge, Paletten, Güter, Sendungen, Verpackungen, Transportsysteme (Gabelstapler, Förderbänder), Werkzeuge etc.

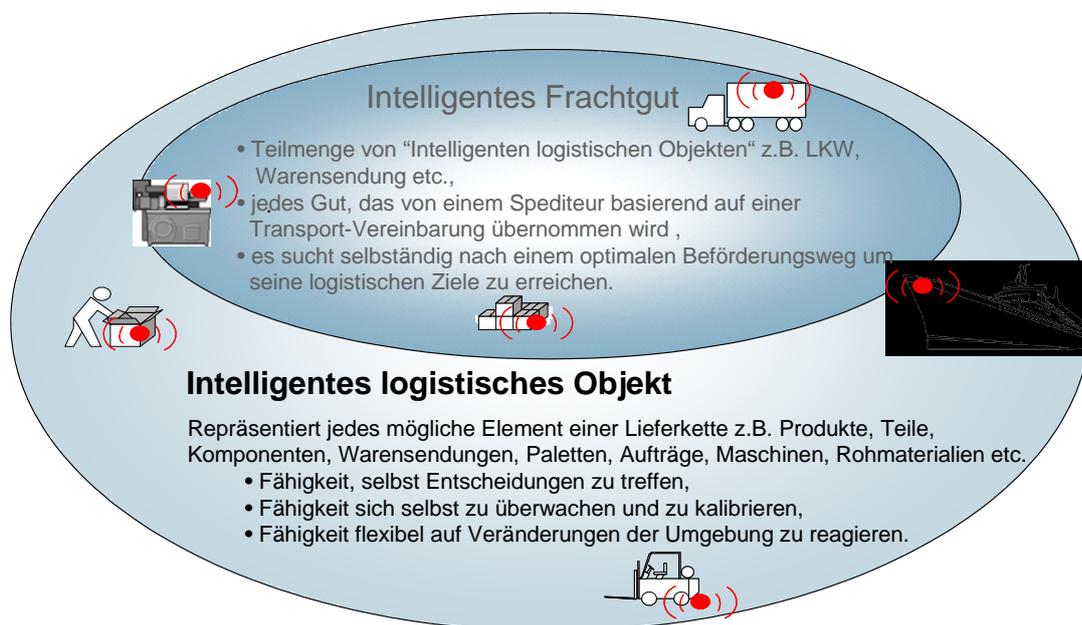
### ***Intelligenz***

Es ist nicht Ziel dieses Abschnittes, Intelligenz im menschlichen Sinne zu beschreiben, sondern vielmehr soll der Bezug zu technischen und künstlichen Eigenschaften hergestellt werden. Erst durch Konzepte

Künstlicher Intelligenz (KI) lässt sich der Begriff der Intelligenz auch auf Merkmale künstlicher Systeme anwenden. Disziplinübergreifend zeigen sich unterschiedliche Verständnisse von Intelligenz; vor allem hinsichtlich einer Beschreibung der KI-Theorien. Insbesondere die Physik, die Biologie, Informatik und Mathematik sowie die Philosophie arbeiten an der Ausformulierung solcher Theorien. Beispielsweise gilt in der Informatik die symbolistische Theorie als klassisches Modell zur Erklärung der Intelligenz. Diese betrachtet die Informationsverarbeitung als Definitionsgrundlage der Intelligenz und der damit zusammenhängenden Begriffe (Eraßme 2002). Unter der Verarbeitung der Informationen wird die eindeutige Manipulation bzw. Umformung der vorgegebenen Symbole (Zeichen eines streng definierten Alphabetes) in andere entsprechend einer vorgegebenen Vorschrift (Algorithmus) (Helm 1991) verstanden. Diese Definition lässt sich ausdehnen auf Intelligenz in Zusammenhang mit intelligenten Objekten.

### **Intelligente logistische Objekte**

Intelligente logistische Objekte sind Gegenstände der Logistik, wie Aufträge, Produkte, Arbeitssysteme, die die Fähigkeit zu kommunizieren und zur Informationsverarbeitung besitzen. Technologien dienen hierbei als Befähiger, wie zum Beispiel die RFID-Technologie (Radio Frequency Identification Technology) (Finkenzeller 2002; Shepard 2004; Westkämper&Jendoubi 2003). Intelligente logistische Objekte mit der Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen, sind Grundlage der Selbststeuerung (**Bild 3**). Eine wesentliche Untermenge der intelligenten logistischen Objekte bilden intelligente Sendungen, was auf die Bedeutung der Transportprozesse im Rahmen der Logistik zurückzuführen ist.



**Bild 3:** Fähigkeiten intelligenter logistischer Objekte

Als intelligente Objekte werden auch alltägliche Gegenstände bezeichnet: Intelligente, smarte, drahtlos vernetzte Gegenstände, „Pervasive, Ubiquitous Computing“ – hierunter wird die Vision verstanden, dass mikroskopisch kleine Computer in die unterschiedlichen Dinge integriert und im täglichen Leben allgegenwärtig sein werden (TA-Swiss-Studie 2004). Anders als die meisten heutigen informations- und kommunikationstechnischen Produkte werden Komponenten des Pervasive Computing mit Sensoren ausgestattet sein, über die sie ihre Umgebung erfassen, ohne dass der Benutzer dies aktiv veranlasst (Beh-

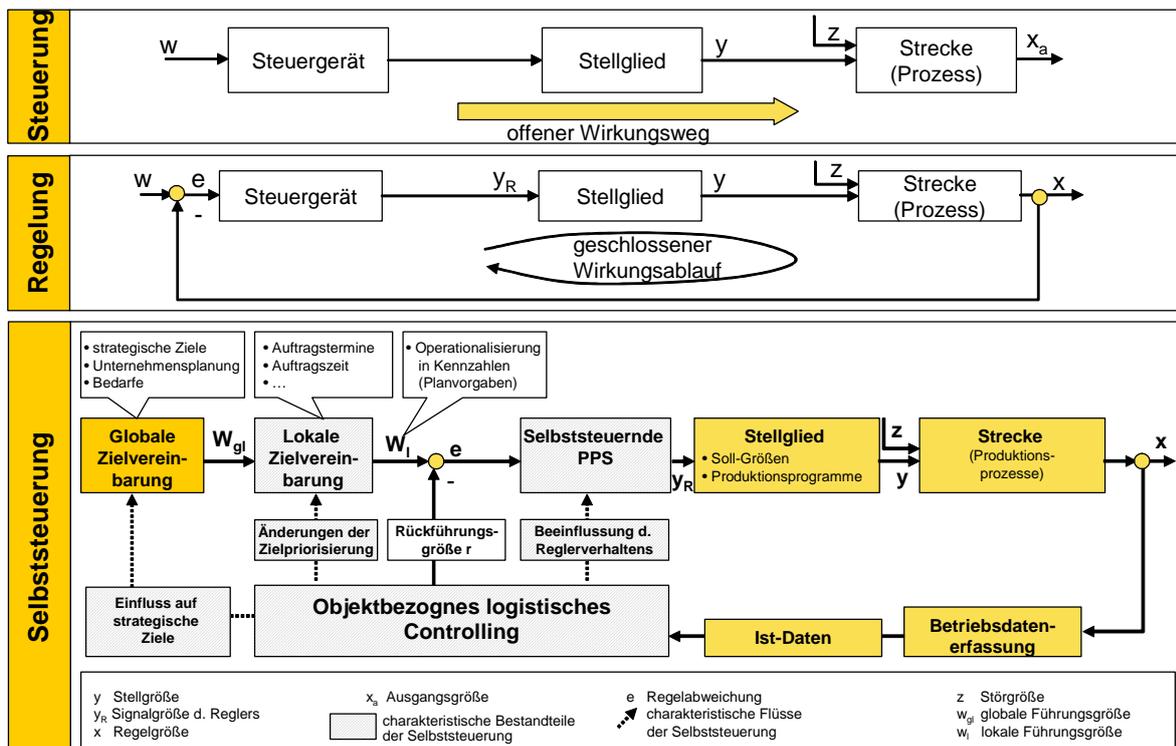
rendt & Erdmann 2003). Zukünftige allgegenwärtige Anwendungsformen von intelligenten Gegenständen könnten vielleicht so aussehen: Im Revers des Anzugs befindet sich ein multifunktionales Kommunikationsgerät der Zukunft oder ein kontextsensitive Bierglas, ausgestattet mit einem Sensor, meldet der Bedienung, wann der Gast das Bier ausgetrunken hat. Der Einsatz intelligenter Sensoren, zum Beispiel in die Armbanduhr (Smart Watch) integriert, dient auch als Gesundheitsmonitor und kontaktiert im Notfall völlig selbstständig den Dienst habenden Arzt oder das nächstgelegene Krankenhaus. Das zukünftig intelligente Haus vernetzt über ein lokales Netzwerk nahezu alle Geräte und Systeme im privaten Wohngebäude lokal und ist an ein äußeres globales Netzwerk angebunden (Reichl & Wolf 2004). Gemäß einer Schätzung von IBM könnte im Jahr 2013 für eine Milliarde Menschen bereits eine Billion elektronisch aufgerüsteter, vernetzter Gegenstände zur Verfügung stehen.

### **3. Selbststeuerung: Begriffliche Abgrenzung**

Die Begriffe Steuerung, Regelung sowie Selbstorganisation sind, wie einleitend erwähnt, an der Bildung des Begriffes Selbststeuerung beteiligt und bedürfen der wechselseitigen Abgrenzung.

#### **3.1 Steuerung, Regelung, Selbststeuerung**

Zunächst sind Steuerung und Regelung zu unterscheiden (**Bild 4**). DIN 19226 (Regelungstechnik und Steuerungstechnik) definiert die Steuerung als Vorgang in einem System, „bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen. Kennzeichen für das Steuern ist dabei der offene Wirkungsweg oder ein geschlossener Wirkungsweg, bei dem die durch die Eingangsgrößen beeinflussten Ausgangsgrößen nicht fortlaufend und nicht wieder über dieselben Eingangsgrößen auf sich selbst wirken“. Im Gegensatz dazu wird bei der Regelung „fortlaufend eine Größe, die Regelgröße  $x$ , erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße  $w$ , verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst. Kennzeichen für das Regeln ist der geschlossene Wirkungskreislauf, bei dem die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst“ (DIN 19226; Breithaupt 2001, S.3-4). Der wesentliche Vorteil der Regelung im Vergleich zur Steuerung liegt darin, dass Informationen, die im Prozess entstehen, nutzbar gemacht werden, um den Prozess im gewünschten Sinne zu beeinflussen (Martin 1998). Insbesondere die Störgröße  $z$ , die, neben der Stellgröße  $y$ , auf die Regelstrecke wirkt, steht stellvertretend für die dynamischen Einflüsse. Über die Stellgröße wiederum wird die Regelgröße über die Regelstrecke beeinflusst, um sie der Führungsgröße anzupassen (Schmidt 1987).



**Bild 4:** Steuerung, Regelung (in Anlehnung an Breithaupt 2001; Schmidt 1987), Selbststeuerung

Der Ansatz der Selbststeuerung geht noch einen Schritt weiter, als dies im klassischen Regelkreis dargestellt ist. Einleitend erwähnt worden war bereits die Definition von Selbststeuerung: 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 2005).

In Analogie zum regelungstechnischen Gedanken bei technischen Prozessen lässt sich auch ein Regelkreis der Produktionsplanung- und -steuerung aufbauen. Die folgenden Überlegungen bauen auf dem Regelkreis der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) von (Wiendahl 1997) auf. Der Ansatz der Selbststeuerung stellt die Vorgaben der Führungsgrößen einerseits und die Einschnitte in die autonome Entscheidung durch die feste Definition eines Reglers andererseits in Frage. Zudem bezieht sich Selbststeuerung, wie ausgeführt, auf einzelne logistische Objekte. Dementsprechend ist der dargestellte geschlossene Wirkungsablauf der Selbststeuerung im **Bild 4** unten für jedes logistisches Objekt relevant.

Regler werden meistens so dimensioniert, dass die Regelung entweder eine gutes Störungs- oder ein gutes Führungsverhalten aufweist. Selbststeuerung lässt darüber hinaus die Option zu, auf eine Störung in Form der Änderung von Führungsgrößen zu reagieren. In einer ersten Stufe ist es möglich, die Priorisierung von Zielgrößen zu ändern. Beispielsweise könnte somit ein Auftrag, dessen vorgegebene oberste Priorität die Zielgröße hohe Termintreue darstellt, möglichst geringe Fertigungskosten favorisieren und somit alternative Arbeitspläne zur ursprünglich geplanten Abfolge der Arbeitsschritte wählen. Eine Störgröße, die ein solches Verhalten auslösen würde, könnte zum Beispiel eine lange Warteschlange am Engpassarbeits-

system sein. Um termintreu fertig gestellt zu werden, müsste der Auftrag vorgezogen werden. Wird kalkuliert, welche negativen Auswirkungen Reihenfolgevertauschungen jedoch auf die gesamte Auftragsabwicklung haben, wäre eine lokale Umpriorisierung von Zielgrößen, welche letztlich nicht zu Reihenfolgevertauschungen führt, zu begründen. Der Einfluss des einzelnen logistischen Objektes kann auch auf die strategischen Ziele des Unternehmens einwirken. Hier werden explizit die Grenzen der Selbststeuerung angesprochen, die die Frage der notwendigen fremdgesteuerten Vorgaben betreffen. Die Produktionsplanung und -steuerung selbst und ebenso das Logistikcontrolling beziehen sich individuell auf Objekte. Die charakteristischen Bestandteile der Selbststeuerung sind im **Bild 4** unten schraffiert dargestellt.

### **3.2 Merkmale der Selbststeuerung**

Die Vision der Selbststeuerung von Objekten besteht unter anderem darin, qualifizierte Fähigkeiten auf physische Gegenstände zu übertragen. Dabei sollen neue Technologien und Methoden dazu dienen, die Schwächen menschlichen Denkens in Bezug auf nur schwer erfassbare komplexe Zusammenhänge zu ersetzen und einzelne Objekte dazu zu befähigen, Entscheidungen in einem sich dynamisch ändernden Umfeld zu treffen. Ein wesentliches Merkmal der Selbststeuerung ist demzufolge das autonome Treffen von Entscheidungen. Weitere konstitutive Merkmale sind ein autonomes zielorientiertes Verhalten, die Fähigkeit zur Messung, Rückkopplung und Bewertung von Ereignissen, Interaktionsfähigkeit, Nichtdeterminismus (emergentes Verhalten) sowie Heterarchie. Diese Merkmale werden im Folgenden erläutert und diskutiert.

#### ***Autonomes zielorientiertes Verhalten***

Dieses Merkmal beinhaltet einen gewissen Konflikt: Einerseits durch die im Merkmal implizierte Zielorientierung, sofern diese fremdgesteuert vorgegeben ist, und andererseits durch die Autonomie. Das Merkmal der Zielorientierung ist Voraussetzung für das Treffen von Entscheidungen und bedeutet einen Endpunkt eines Ereignisses zu definieren, den man zu erreichen anstrebt. Die Zielorientierung ist eng mit dem Erfolg eines Verhaltens verknüpft. Die Festlegung von Unternehmenszielen zum Beispiel erfolgt im Rahmen der Zielbildung. Träger der Unternehmenspolitik sind die oberen internen und externen Willensbildungszentren des Unternehmens (Bleicher et al. 1996). Diese Ziele bilden den Rahmen zum selbstständigen Handeln im Sinne der hier betrachteten autonomen Selbststeuerung im Unterschied zur autogenen<sup>7</sup> Selbststeuerung.

Ein Ziel des Einsatzes der Selbststeuerung in der Logistik ist, den gesteigerten Anforderungen an die Logistik durch eine Verbesserung der Leistung logistischer Systeme gerecht zu werden. Um den Grad der Erreichung dieses Zieles einschätzbar zu machen, muss die logistische Leistung durch Kennzahlen gemessen werden können. Kennzahlen bilden die Grundlage zur Anwendung von Methoden zur Beurteilung und Verbesserung der Leistung logistischer Systeme (Wiendahl 2002). Laut Weber (1993) besteht die Aufgabe darin, geeignete Indikatoren zur Darstellung der Zielerreichung in Form von leicht und objektiv erfassbaren Messgrößen für die Logistikziele festzulegen. Es bedarf bei der Entwicklung eines Evaluierungssystems zur Messung der Zielerreichung einer weiteren Herausforderung: Nämlich die Erforschung

---

<sup>7</sup> Zur Erläuterung autonome und autogene Selbstorganisation vgl. Beitrag Göbel in diesem Sammelband.

der Grenzen selbststeuernder logistischer Systeme im Hinblick auf den effizienten und leistungsverbessernden Einsatz der Selbststeuerung. Dieser soll im Unterschied zur Fremdsteuerung bewertbar gemacht werden. Diese Notwendigkeit erschließt sich unmittelbar aus der Erkenntnis, dass ein selbststeuerndes System sich in eine Richtung bewegen, die nicht im Sinne des steuernden Systems bzw. eines übergeordneten Zielsystems ist. Um dies zu verhindern, müssen geeignete transparente Schnittstellen vereinbart werden, die das System ausreichend beobachtbar machen. Diese Schnittstellen können wiederum nicht statisch sein, sondern werden sich der Entwicklung der Systeme anpassen müssen. Um die Möglichkeiten zur Selbststeuerung zu erhalten, müssen Systeme gegenüber ihrer Umwelt für Transparenz sorgen. Ein wesentlicher Schritt zur Schaffung von Transparenz ist die Entwicklung eines Evaluierungssystems für selbststeuernde logistische Prozesse. Ein selbststeuerndes System soll somit beobachtbar und in seiner Zielerreichung bewertbar gemacht werden (vergleiche Abschnitt 2.4).

In Bild 4 stellen die Führungsgrößen die Ziele des Regelkreises beispielsweise eines logistischen Objektes (eines Kundenauftrages) dar. Sofern zwischen unterschiedlichen Graden der Selbststeuerung zu unterscheiden ist, könnten zunächst global vorgegebene Ziele seitens einer Unternehmensführung in der Priorisierung der Ziele vom einzelnen Objekt selbstständig veränderbar sein. Dies bedeutet, dass über der Zeit, also im Produktionsprozess, die Prioritäten der Ziele veränderbar sind (dynamisches Zielsystem). Eine priorisierte hohe Termintreue wird zu Gunsten einer hohen Auslastung von Maschinen abgelöst. Ein höherer Grad der Selbststeuerung würde darüber hinaus eine eigene Festlegung von Zielgrößen zunächst in vorgegebenen Bandbreiten logistischen Objekten erlauben und in einer noch höheren Stufe die Ziele gänzlich autonom definieren lassen. Da Selbststeuerung hier autonome im Unterschied zu autogenen Prozessen favorisiert, wird Selbststeuerung in Verbindung mit vorgegebenen globalen Zielgrößen betrachtet. Dynamische Änderungen von Prioritäten sind aber durchaus zulässig, gewollt und im Sinne der positiven Emergenz logistischer Prozesse auch sinnvoll.

### ***Fähigkeit zur autonomen Entscheidung***

Eine Entscheidung ist die bewusste Auswahl einer von mindestens zwei Alternativen (Rommelfanger & Eickemeier 2001). Die Option nicht zu wählen (Unterlassungsalternative) stellt im Sinne der Entscheidungstheorie ebenfalls eine Handlungsalternative dar, wird aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht jedoch als Beibehalten des aktuellen Zustandes mit modelliert, um ein Fortschreiten des Produktionsprozesses zu gewährleisten. Sie ist damit wieder eine gleichwertige zielorientiert zu bewertende Alternative, wie diejenigen Handlungsalternativen, die eine nicht nur zeitlich orientierte Zustandsänderung des betrachteten logistischen Objektes zur Folge hätten.

Wesentlich bei der Selbststeuerung ist die Festlegung von Entscheidungskompetenzen, womit einer Entscheidungseinheit, hier einem logistischen Objekt, das Recht übertragen wird, in dem durch die Struktur der jeweils übertragenen Entscheidungsaufgabe gezogenen Rahmen, Entscheidungen zu fällen (Frese et al. 1996). Sicher ist, dass getroffene Entscheidungen Einfluss auf andere logistische Objekte ausüben. Dadurch, dass Selbststeuerung impliziert, dass bei sich dynamisch ändernden Situationen schnell und zielorientiert reagiert werden soll, kann eine reaktive Entscheidung eines anderen logistischen Objektes jederzeit vollzogen werden. Somit beinhalten Entscheidungen ein adaptives Verhalten. Ein weiteres

Kennzeichen von Selbststeuerung in diesem Zusammenhang ist die Lösungsfähigkeit paralleler Problemstellungen. Dies unterscheidet sich explizit von der Vorgehensweise bei hierarchisch, zentral ausgerichteten Verfahren, die sukzessiv und nicht simultan vorgehen.

### ***Fähigkeit zur Messung, Rückkopplung und Bewertung von Ereignissen***

Im Sinne der Generierung von Handlungsalternativen sollten solche Situationen angemessen identifizierbar sein, die tatsächlich eine Störgröße oder eine Änderung der Umgebungsbedingungen darstellen. Dahinter verbergen sich die Merkmale der Wahrnehmbarkeit einerseits und die Fähigkeit, neue Zusammenhänge zu erkennen, andererseits. Es muss bereits vor Generierung von Handlungsalternativen bewertet werden, ob eine Änderung von Zuständen Einfluss auf die priorisierten Ziele hat, ob also die Notwendigkeit einer Entscheidungsfindung überhaupt vorliegt. Dies geschieht im Rahmen des oben skizzierten selbststeuernden Regelkreises.

Auch hier muss wiederum eine Entscheidung getroffen werden und zwar, ob aufgrund geänderter Rahmenbedingungen Entscheidungen zu treffen sind. Diskussionswürdig ist der Terminus „bewusste Entscheidung“, da Fokus dieser Betrachtungen logistische Objekte, also Gegenstände darstellen. Hiermit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass Entscheidungen nicht dem Zufall überlassen bleiben. Entscheidungen werden immer auf Basis von Zielen und nachvollziehbaren Regeln getroffen, womit auch eine Übereinkunft zum Tragen von Konsequenzen (sofern bekannt) einhergeht. Die Fähigkeiten zum Schlussfolgern einerseits und Entscheidungen vorausschauend treffen zu können andererseits stehen dabei im Vordergrund (Pro-Aktivität). Da die Folgen von Entscheidungen nicht immer zum Zeitpunkt der Entscheidungsfindung bekannt sind, wird in der Entscheidungstheorie nach drei unterschiedlichen Entscheidungsformen unterschieden: Entscheidung bei sicherer Erwartung, Entscheidung bei Unsicherheit, Entscheidung bei Risiko und Ungewissheit (Bamberg & Coenenberg 2004). Letztere erfordert die Einbeziehung von Risikobetrachtung. Das Risikomanagement ist abhängig bzw. eng verknüpft mit dem Vorhandensein von Wissen. Daher spielen die Bereiche Wissens- und Risikomanagement in diesem Kontext eine wichtige Rolle. Dem Bewerten kommt in diesem Zusammenhang ebenfalls eine besondere Bedeutung zu. Die Bewertung, ob Selbststeuerung eine bessere oder schlechtere Erreichung von Zielen ermöglicht als fremdgesteuerte Prozesse, muss unter Einsatz eines entsprechenden Evaluierungssystems durchgeführt werden. Die Operationalisierung von Zielen in Kennzahlen und die genaue Definition der dafür zu nutzenden Daten muss vorab durchgeführt werden.

### ***Interaktionsfähigkeit***

Interaktionsfähigkeit stellt ein konstitutives Merkmal der Selbststeuerung dar. Die Interaktionsfähigkeit kann je nach Grad der Selbststeuerung unterschiedliche Ausprägungen erreichen. Beginnend mit einer einfachen Datenbereitstellung, auf die autonome logistische Objekte zugreifen können, steigt der Grad der Selbststeuerung mit der Kommunikation, also dem Austausch von Daten oder dem Übertragen von Informationen zwischen einzelnen Objekten und erreicht den höchsten Grad der Selbststeuerung durch Koordination im Sinne eines Zusammenwirkens und gegenseitigen Abstimmens verschiedener Objekte bei der Entscheidungsfindung. Es wird deutlich, dass, um selbststeuernd im Sinne der Definition tätig zu

werden, mindestens Daten zur Alternativengenerierung für die Entscheidungsfindung vorhanden sein müssen.

### ***Heterarchie***

Betrachtet man eine hierarchische Organisationsform mit Über- und Unterordnung, d.h. mit Rangstufen, dann ergibt sich für den dazu komplementären Begriff der Heterarchie eine relativ einfache Definition, nämlich als „Nebenordnung“. Hieraus resultiert, dass netzwerkartige Strukturen komplementär zu den baumartigen Strukturen hierarchischer Systeme anzusehen sind (Goldammer 2003). Für die Selbststeuerung ist es wesentlich, dass heterarchische Systemstrukturen vorhanden sind, weil in komplexen Systemstrukturen nur dann autonome Entscheidungen getroffen werden können, wenn das Prinzip der Nebenordnung gilt. Andernfalls würde das Prinzip der Fremdsteuerung überwiegen.

### ***Nichtdeterminismus***

Laut Definition besteht ein Ziel der Selbststeuerung darin, durch verteilte Bewältigung von Dynamik und Komplexität nichtdeterministischer Systeme eine höhere Systemrobustheit zu erreichen. Die Selbststeuerung ihrerseits ist nichtdeterminierbar. Nichtdeterminismus bedeutet, dass bei gleicher Eingabe von Anfangswerten unterschiedliche Möglichkeiten für den Übergang in einen nachfolgenden Zustand existieren. Ein nichtdeterministisches Verhalten von Systemen zeigt emergente Eigenschaften, die prinzipiell erklärbar aber nicht vorhersagbar sind. Läderach (2000) führt hierzu aus: Wenn die Komponenten und die Prozessbedingungen bekannt und durch Naturgesetze bestimmt sind, dann sind die Eigenschaften des Ganzen ebenfalls Folgen von Naturgesetzen und damit mindestens im Prinzip erklärbar. Dies muss nicht immer gelingen, wenn empirische Daten über vergangene Prozesse fehlen, wenn ein naturwissenschaftlicher Zusammenhang noch nicht erforscht ist oder wenn der Aufwand für eine Analyse zu groß ist. Dann liegt keine Erklärung vor. Letzteres trifft für die Produktion und Logistik zu. Der Produktionsprozess ist durch viele sich zeitlich und örtlich verändernde Parameter gekennzeichnet. Trotz theoretisch möglicher gleicher Anfangsbedingungen hinsichtlich der Ressourcenverfügbarkeit können zwei Aufträge unterschiedlich in der Fertigung abgearbeitet werden und führen zu unterschiedlichen Termintreuwerten. Schon die Anfangsbedingungen sind jedoch aufgrund der hohen Anzahl an Parametern nicht bestimmbar. Im Laufe des Produktionsprozesses kommen dynamischen und spontan auftretende Einflussgrößen dazu (vergleiche Abschnitt 2.3), wodurch insgesamt das Verhalten des logistischen Systems nicht determiniert ist. Selbststeuerung verfolgt das Ziel, mit Komplexität und der Unvorhersagbarkeit von Abläufen effizienter umzugehen. Die Zielerreichung der Produktion und somit auch die der Gesamtheit aller Kundenaufträge soll verbessert werden, obwohl keine genauen Aussagen darüber getroffen werden können, welche Konsequenzen das einzelne Verhalten eines Auftrages auf die mittlere Termineinhaltung aller Aufträge über einen repräsentativen Zeitraum hinweg haben wird.

### ***Zusammenwirken der konstitutiven Merkmale der Selbststeuerung und Potentiale aus logistischer Sicht***

Die beschriebenen konstitutiven Merkmale lassen sich weitestgehend aus der Definition Selbststeuerung ableiten. Sie beeinflussen sich zum Teil gegenseitig bzw. manche Merkmale sind implizit in einem anderen Merkmal enthalten. Das Merkmal des *zielorientierten Verhaltens* determiniert das Merkmal *Nichtde-*

*terminismus* bzw. schränkt dieses ein. Durch eine Zielorientierung wird ein Rahmen vorgegeben, in dem Selbststeuerung stattfinden kann. Durch die Festlegung auf eine autonome Selbststeuerung ist dies jedoch konsequent. Beide Merkmale können somit nebeneinander und trotz gegenseitiger Einschränkungen bestehen. Die Zielorientierung wird, wie in Abschnitt 2.4 ausgeführt, die im logistischen Zielsystem vorhandenen Zielkonflikte berücksichtigen müssen. Anhand dieses Merkmals wird sich die sinnvolle Unterscheidung zwischen Fremd- und Selbststeuerung herausbilden, die es noch zu erforschen gilt. Andererseits impliziert das Merkmal *Fähigkeit zur autonomen Entscheidung* die *Fähigkeit zum Messen, Rückkoppeln und Bewerten*. Letzteres ist im Rahmen des Problemlösungszyklus zur Entscheidungsfindung eine wesentliche Voraussetzung und zeigt die enge Verbindung zur Steuerungs- und Regelungstechnik auf. Um sicherzustellen, dass logistische Objekte auf der Ausführungsebene autonome Entscheidungen treffen können, sind, wie bereits erwähnt, *heterarchische Strukturen* notwendig. Damit wird auch das Merkmal *Interaktionsfähigkeit* unterstützt, denn es ist so möglich, mit anderen logistischen Objekten zu kommunizieren und somit weitere Informationen im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen.

Zusammengenommen zeigen die Merkmale den Bezug zu den in Abschnitt 2.1 aufgestellten Thesen zur Selbststeuerung auf. Die Merkmale *autonomes Entscheiden* im Sinne eines *zielorientierten Verhaltens* in *heterarchischen Systemstrukturen* führen dazu, dass im Sinne der ersten These eine effiziente Prozesslenkung erreicht werden kann. Der Aufwand von zentralen Planungsfunktionen wird minimiert, d.h. durch entsprechende Möglichkeiten des *Messens, Rückkoppelns und Bewertens* in Kombination mit *interagierenden logistischen Objekten* ist es möglich, bei sich dynamisch verändernden Situationen (zum Beispiel Ausfall einer Maschine) schnell zu reagieren. Dieses schnelle Reagieren ist möglich, obwohl die Auswirkungen der Entscheidungen auf das gesamte System (den Unternehmenserfolg im logistischen Sinne betrachtend) *nichtdeterminierbar* sind. Da jedes intelligente logistische Objekt für sich gesehen unter Einsatz von Selbststeuerungsmethoden den optimalen Weg durch die Produktion findet, wird insgesamt eine höhere Robustheit der komplexen logistischen Systeme durch Selbststeuerung erreichbar sein. Diese höhere Robustheit bedeutet, dass die in Abschnitt 2.4 beschriebenen logistischen Zielgrößen über einen längeren Zeitraum und auf die Masse von abzuwickelnden Aufträgen insgesamt bezogen, auf einem höheren Niveau erreicht werden können, als es dies ohne Selbststeuerungsstrategien der Fall wäre. Darüber hinaus führt der Einsatz neuer Technologien dazu, dass der Informations- und Materialfluss, wie in der letzten These in Abschnitt 2.1 formuliert, zusammengeführt wird, d.h. auf dem logistischen Objekt können die notwendigen logistischen Informationen über entsprechende Leseeinrichtungen direkt ausgelesen und interpretiert werden. Diese zusätzliche Transparenz führt dazu, dass Probleme frühzeitig erkannt werden können, bzw. das einzelne logistische Objekt kann diese Probleme selbst früher erkennen und darauf angemessen reagieren.

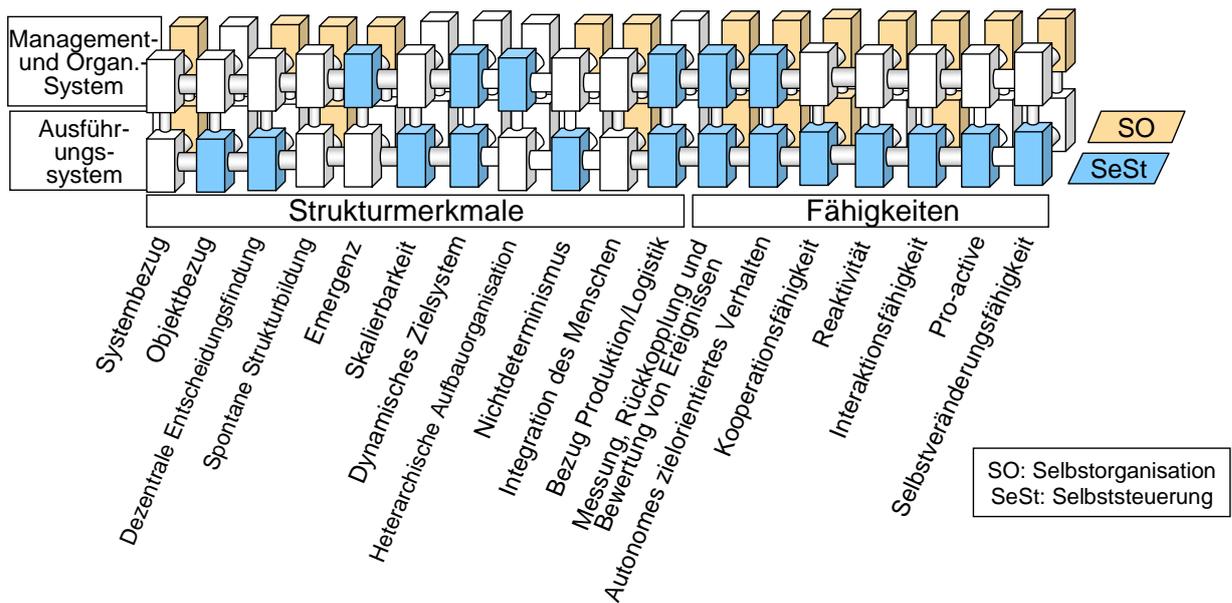
### **3.3 Selbstorganisation und Selbststeuerung**

Die Konkretisierungen „Selbstorganisation“ und auch „Selbstmanagement“ sind im engeren Sinne von der Selbststeuerung zu unterscheiden. Selbstmanagement meint die Befähigung eines Systems, sich selber Ziele zu setzen, Strategien auszuwählen, sich eine Organisation zu geben und Ressourcen zu beschaffen, also aus eigenen Möglichkeiten ein Managementsystem zu entwerfen und jeweils zu verändern. Selbstor-

ganisation als Teilelement des Managements bezeichnet hingegen nur die Art und Weise, wie in einem System Ordnung von innen heraus entsteht, also wie ein System prozessuale und systemische Strukturen selber gestaltet. Die Selbststeuerung als Fähigkeit intelligenter logistischer Objekte baut auf den Erkenntnissen der Selbstorganisationsforschung auf, die transdisziplinär in den 1960er und frühen 1970er Jahren begonnen wurde. Unabhängig voneinander wurden Konzepte untersucht, die die spontane Entstehung von Ordnung und die Entwicklung dynamischer Systeme beinhalteten (Paslack & Knost 1990). Die verschiedenen Konzepte der einzelnen Disziplinen wurden unterschiedlich benannt, weisen aber alle einen Bezug zum Phänomen der Selbstorganisation auf. Auf die Darstellung der unterschiedlichen Konzepte wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Artikel im vorliegenden Sammelband verwiesen. Um die Nähe zur Produktionstechnik zu wahren, sei hier ein Beispiel aus der Schwingungslehre zitiert. Bereits 1930 wurde der Begriff der Selbststeuerung von Pohl&Lüders (1930) verwendet. Ihr Beispiel bezog sich auf die Wirkungsweise einer Hausklingel, deren Klöppelstange sich quasi selbst die Energie zum Schwingen holt, indem sie durch eine Feder den Stromschluss zu einem Elektromagneten herstellt. Durch die Selbstinduktion wird der Pendelkörper in Form der Klöppelstange jedoch beschleunigt und so der Stromkreis unterbrochen. Durch die Feder wird der Stromschluss dann erneut hergestellt, so dass, eine konstante Energieversorgung der Hausklingel vorausgesetzt, ein Klingelton ertönt. Im Sinne der oben beschriebenen und definierten Merkmale kann dieses Verhalten jedoch nicht als selbststeuernd bezeichnet werden. Praktisch gesehen bleibt der Klöppelstange nichts anderes übrig, als sich so zu verhalten. Entscheidungsalternativen existieren nicht. Dennoch bleibt festzuhalten, dass Pohl&Lüders (1930) erstmals Selbststeuerung als „sich selbst mit Energie versorgen“, verstanden haben und sie damit nicht allzu weit entfernt vom heutigen Verständnis der Selbststeuerung waren.

Der Begriff der Selbststeuerung ergänzt aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht das transdisziplinäre Verständnis über Selbstorganisation. Signifikante Unterschiede sind schwer zu identifizieren. So ist im folgenden Bild der Versuch unternommen worden, anhand verschiedener Merkmale Unterschiede der beiden Ansätze heraus zu arbeiten. Diesen Merkmalen ist gemein, dass sie grundsätzlich sowohl für Selbstorganisation als auch für Selbststeuerung zu treffen. Untersucht werden daher ihre Ausprägungen (stark oder schwach) hinsichtlich Selbststeuerung einerseits und/ oder Selbstorganisation andererseits. Eine weitere Unterscheidungsdimension bildet die Ausprägung je Ansatz in einer der Arbeitsebenen (vergleiche Bild 6): Materialfluss und Logistik (Ausführungssystem) oder Management- und Organisationssystem (Entscheidungssystem). Das farbige sechste Kästchen (von links) vorne unten heißt dementsprechend, dass Skalierbarkeit für Selbststeuerung stark zutrifft und zwar stärker auf der Ebene der Ausführungssysteme. Unter Skalierbarkeit wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass Ressourcen in der Fertigung ohne direkte Einbindung übergeordneter Strukturen autonom angepasst werden können. Für Selbstorganisation ist dieses Merkmal schwach ausgeprägt und somit nicht farblich markiert. Es gibt aber auch Merkmale, die auf beide Begriffe stark zutreffen. Beispielsweise Selbstveränderungsfähigkeit. Gemeint ist die Fähigkeit von Prozessen, die sich durch ihre eigene Aktivität selbst verändern. In diesem Schema trifft dieses Merkmal verstärkt auf das Ausführungssystem der Selbststeuerung zu und gleichermaßen auf Selbstorganisation aber hier ausgeprägter bezogen auf das Management- und Organisationssystem. Die Merkmale sind geclustert in Strukturmerkmale, wie die Integrationsmöglichkeit des Men-

schen oder der Bezug zu Produktion und Logistik und in grundsätzliche Fähigkeiten, wie vorausschauend seine Ziele zu erreichen (Pro-aktiv).

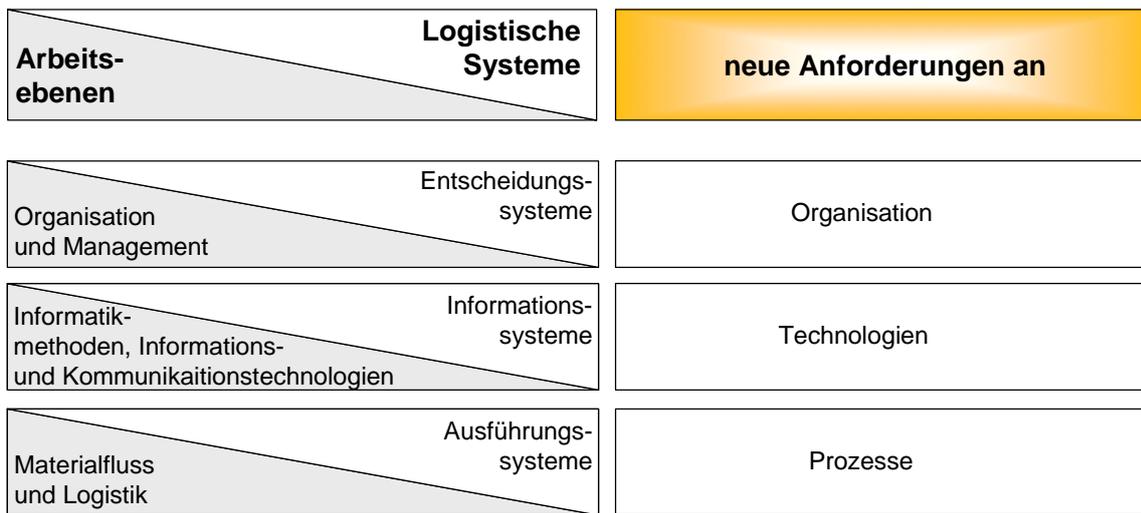


**Bild 5:** Abgrenzung Selbststeuerung – Selbstorganisation

Diese Darstellung ist zunächst eine erste Einschätzung aus dem Verständnis der beiden Ansätze heraus. Zusammenfassend lässt sich anhand des Bildes feststellen, dass bei dem Ansatz der Selbstorganisation die Merkmale auf der Management- und Organisationssystemebene stärker ausgeprägt sind, hingegen für Selbststeuerung die Merkmale für das Ausführungssystem relevanter sind. Dies zeigt auch der Vergleich der Ausprägungen der Merkmale System- und Objektbezug. Selbststeuerung ist eher am einzelnen Objekt orientiert, während der Ansatz der Selbstorganisation eher das System als Ganzes betrachtet. Hierin und in der technikorientierteren Sichtweise durch die Nutzung neuer Technologien im Rahmen der Selbststeuerung ist wohl der Hauptunterschied der beiden Ansätze zu sehen. Um die in den Merkmalen und Thesen zum Ausdruck gebrachten Potentiale der Selbststeuerung auch in der Umsetzung im Unternehmen realisieren zu können, bedarf es der Erfüllung von Anforderungen, die im folgenden Kapitel betrachtet werden sollen.

#### 4. Anforderungen aus logistischer Sicht an die Selbststeuerung intelligenter Objekte

Die Anforderungen zur erfolgreichen Realisierung von Selbststeuerungsstrategien richten sich an unterschiedliche Arbeitsebenen im Unternehmen. Nach Ropohl (1997) lassen sich diese Arbeitsebenen in Organisation und Management, Informatikmethoden sowie Informations- und Kommunikationstechnologien als auch in Materialfluss und Logistik unterteilen, welches jeweils die Entscheidungs-, Informations- und Ausführungssysteme betreffen (**Bild 6**)



**Bild 6:** Strukturierung von Anforderungsbereichen für den Einsatz der Selbststeuerung aus logistischer Sicht (nach Ropohl 1997)

#### 4.1 Organisation und Management: Entscheidungsunterstützungssysteme

Zunächst muss es möglich sein, Selbststeuerung eindeutig zu identifizieren, d.h. durch wohldefinierte und möglichst messbare Merkmale zwischen Fremd- und Selbststeuerung zu unterscheiden. Darauf aufbauend ist eine weitere Anforderung, die Grenzen zwischen Selbst- und Fremdsteuerung zu definieren, bzw. ableiten zu können, bis wohin Selbststeuerung sinnvoll im Sinne der Erreichung logistischer Zielgrößen erscheint und ab welcher Ebene Fremdsteuerung im Sinne von vorgegebenen Anweisungen notwendig ist. Die Entwicklung dynamischer Zielsysteme ist im Sinne der oben angegebenen Definition von Selbststeuerung eine wesentliche Prämisse. Dynamisch bedeutet, dass es möglich ist, beispielsweise Priorisierungen von Zielen objektbezogen zu verändern. Zum Messen und Evaluieren der jeweiligen Zielerreichung ist die Entwicklung eines Evaluierungssystems für Selbststeuerung notwendig. Solch ein Evaluierungssystem sollte im Rahmen von Entscheidungsunterstützungssystemen genutzt werden, welches die Bestimmung des jeweiligen Selbststeuerungsgrades mit der dazu realisierten Zielerreichung ermittelbar macht. Hierzu ist es ebenfalls erforderlich eine ereignisorientierte Wissensrepräsentation zu installieren und somit den permanenten Zugriff auf aktuelles Wissen zu ermöglichen. Dies bedingt die genaue Festlegung der Informationen, die intelligenten logistischen Objekten zur Verfügung stehen müssen. Im Einzelnen ist der Umfang der Informationen festzulegen, die die intelligenten logistischen Objekte selbst speichern und weiterkommunizieren können. Beim Vorhandensein von Entscheidungsalternativen spielt das jeweilige Risiko eine wichtige Rolle. Zur Einführung von Selbststeuerungsmechanismen in Unternehmen ist aber vor allem eine Akzeptanz der Nutzer vorauszusetzen, die, sei es durch sich verändernde organisatorische Abläufe und/oder durch die Nutzung neuer Technologien, vor Herausforderungen stehen.

#### 4.2 Informatikmethoden und Informations- und Kommunikationstechnologien: Informationssysteme

Selbststeuerung setzt die Nutzung neuer Technologien voraus, die eine Kommunikation zwischen intelligenten Objekten ermöglicht und letztlich auch eine Kooperation zulässt. Mobile Kommunikationstechnologien wie Bluetooth oder WLAN stellen neue Anforderungen an die Datensicherheit. Bisherige Techno-

logien ermöglichen die Speicherung von Daten. Die Verarbeitungsmöglichkeit von Daten im Sinne einer Entscheidungsfindung sollte auch am intelligenten logistischen Objekt direkt möglich sein. Neben der Erfassung zeitaktueller Daten ist eine Lokalisierungsfunktion des logistischen Objektes notwendig, um beispielsweise einen Fertigungsauftrag mit den zugehörigen Halbzeugen zu orten. Derzeitige satellitengestützte Positionierungssysteme (Galileo, GPS, DGPS) können die geforderte Genauigkeit noch nicht erbringen. Zukünftig wird durch die Möglichkeit der permanenten Erfassung von aktuellen Daten die Datenmenge enorm ansteigen. Hierzu ist es notwendig, Methoden zur Handhabung der Daten zu entwickeln, wodurch wiederum der Aspekt der Datensicherheit betroffen sein wird. Eine weitere Erhöhung der Datenmenge wird durch die Forderung der Integration von Sensortechnologien erfolgen. Die Wissensbasis zur Entscheidungsfindung wird somit erweitert. Notwendige Informationen, die das logistische Objekt aus seiner Umgebung benötigt (zum Beispiel Temperaturangaben in einem Container beim Transport verderblicher Waren), können über Sensoren zur Verfügung gestellt werden. Mehrere Sensoren könnten über die Bildung von Adhoc-Netzwerken ein Gesamtbild der aktuellen Situation erfassen und somit den Entscheidungsfindungsprozess vorbereiten. Die Zuverlässigkeit der Technologie ist elementare Voraussetzung. Beispielsweise beinhalten aktive Transponder eine Batterie zur Energieversorgung, deren zuverlässige Funktion über lange Zeiträume heute noch ein Problem darstellt. Neben der Verlässlichkeit der Technologie sind Standardisierungsbestrebungen zu unterstützen. Bei der Radio Frequency Identification Technology sind die Frequenzen länderübergreifend unterschiedlich, insbesondere in den USA und Europa werden verschiedene Frequenzbänder benutzt. Entsprechende Lesegeräte müssen hierauf vorbereitet sein. Durch die Einführung von intelligenten logistischen Objekten verändern sich Planungs- und Steuerungssysteme der logistischen Prozesse. Diese sind bisher auf hierarchische Strukturen mit sukzessiven Planungsalgorithmen ausgerichtet. Es ist durchaus denkbar, dass im Grenzfall der Selbststeuerung die Frage erlaubt ist, ob überhaupt noch Planungsfunktionen notwendig sind, d.h. es könnten nur noch autonome Steuerungsmechanismen existieren. Dies hat unmittelbar Folgen für die derzeit üblichen Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme bzw. ERP-(Enterprise Resource Planning) Systeme.

Letztlich ist die Vereinbarkeit von Technologie zu angemessenen Preisverhältnissen eine elementare Voraussetzung zur Umsetzung der Selbststeuerung. Derzeit sind Transponder so teuer, daß sie nicht für die Steuerung denkbarer logistischer Objekte genutzt werden können. Zudem müssen im Falle einer flächendeckenden Nutzung von Transpondern in der Logistik auch die Fertigungskapazitäten der Technologie bereitstehen. Integriert man diese Technologie auch in Alltagsgegenstände, wie dies bereits angerissen wurde, so müssen gesundheitliche Risiken durch die Einwirkung elektromagnetischer Wellen auf den menschlichen Organismus ausgeschlossen sein. Ebenso sensibel wird das Thema Datenschutz verfolgt werden müssen.

### **4.3 Materialfluss und Logistik: Ausführungssysteme**

In Ergänzung zu den Anforderungen an Organisation und Management sowie an Technologien müssen aus Sicht der Materialfluss- und Logistikebene prozessorientierte Anforderungen erfüllt werden, um logistische Prozesse zur Selbststeuerung zu befähigen. Dazu gehört die Anforderung, zunächst selbststeuernde Prozesse modellieren zu können. Dies betrifft insbesondere die Modellierung des dynamischen und

zielorientierten Verhaltens der selbststeuernden logistischen Objekte und das autonome Treffen von Entscheidungen. Weitere Anforderungen an die Modellierung im Speziellen finden sich in (Scholz-Reiter et al. 2004). Darüber hinaus muss es den einzelnen logistischen Objekten möglich sein, die prozessimmanente Intelligenz zu nutzen, um autonome Entscheidungen zu treffen, die ein zielorientiertes Verhalten beinhalten. Hierzu sind Algorithmen zu entwickeln, die den Prozess der Entscheidungsfindung unterstützen. Es ist ebenso erforderlich, Problemstellungen zu lösen, die die Teilbarkeit von Produktions- in Fertigungs- und Montageaufträgen beinhalten. Informationen, die beispielsweise auf zwei Teilen, die zusammenmontiert werden sollen, gespeichert sind, müssen zusammengeführt werden. Aus zwei logistischen Objekten wird somit eines und diese „Verschmelzung zweier Identitäten“ muss auch für die verteilten Informationen möglich sein. Eine weitere Forderung betrifft die Möglichkeit, auch das Umfeld als jederzeit dynamisch wandelbar auffassen zu können. Das bedeutet, dass Entscheidungen einzelner logistischer Objekte, die Einfluss auf andere logistische Objekte ausüben, auch unmittelbar umsetzbar sind (Windt et al. 2004). Letztendlich ändern sich die Prozessabläufe der Auftragsabwicklung. Die Herausarbeitung dieser veränderten Prozessabläufe ist eine Voraussetzung, um auch die zugehörigen Planungs- und Steuerungssysteme an die geänderten Anforderungen der Selbststeuerung anzupassen.

## **5. Methodische Ansätze zur Selbststeuerung**

Es existieren bereits methodische Ansätze, die einzelne der dargestellten Merkmale der Selbststeuerung aufzeigen und im weiteren Sinne der Logistik zuzuordnen sind. Im Folgenden werden diese methodischen Ansätze vorgestellt und grundsätzlich nach evolutionstheoretischen Ansätzen der Managementlehre einerseits und nach Ansätzen der Ingenieurwissenschaften andererseits unterteilt. Der zuerst genannte Ansatz aus der Managementlehre greift überwiegend die Forschungen zum Thema Selbstorganisation auf. Der Ansatz der Selbststeuerung hingegen ist ursprünglich den Ingenieurwissenschaften zuzuordnen und beschreibt ein neues Forschungsfeld. Um einen Bezug zu den im letzten Kapitel skizzierten Anforderungen an logistische Objekte herzustellen, sollen die ausgewählten ingenieurwissenschaftlichen Ansätze in den Bereichen Organisation und Management, Informatikmethoden und Informations- und Kommunikationstechnologien und Materialfluss und Logistik gegliedert werden. Klassischerweise ist der Ansatz der Managementlehre der Arbeitsebene Organisation und Management einzuordnen. Die Einordnung der ingenieurwissenschaftlichen Ansätze in die drei gewählten Kategorien ist nicht immer eindeutig. Durch die stärkere Verschmelzung zwischen Material- und Informationsfluss werden auch die Grenzen zwischen den einzelnen Kategorien unschärfer. Es wird daher die Kategorie ausgewählt, in der der Ansatz im Schwerpunkt einzuordnen ist.

Bezugnehmend auf das in diesem Sammelband abgedruckte Interview mit Fredmund Malik wird der von ihm verfolgte Evolutionäre Managementansatz stellvertretend für weitere Ansätze zur Selbstorganisation im Rahmen der Managementlehre betrachtet und Ansätzen aus den Ingenieurwissenschaften gegenübergestellt. Die Methoden der Swarm-Intelligence, die in den Ingenieurwissenschaften genutzt werden, werden hierzu dem evolutionären Ansatz von Malik gegenübergestellt.

## 5.1 Evolutionstheoretischer Ansatz der Managementlehre

Die evolutionstheoretischen Ansätze verfolgen die Annahme, dass lebende Organismen und Unternehmen Ähnlichkeiten im Hinblick auf den Systemcharakter aufweisen (Hantschek & Jung 1996; Hayek 2004). Die These hierbei ist, dass letztendlich die Umwelt darüber entscheide, welche der organisationalen Variationen am meisten nütze und daher überlebt (Kieser 2002). Nicht ausreichend an ihre Umwelt angepasste Systeme werden ausgelesen und neue entstehen. Der evolutionstheoretische Ansatz lehnt sich in weiten Teilen an die synthetische Evolutionstheorie der Biologie an. Typisch für diese Theorie ist, dass als Analyseeinheit die gesamte Population und nicht das Individuum betrachtet wird. Jedes Individuum trägt nur einen Teil der Merkmale der Gesamtpopulation in seinem Genpool. Der Genpool unterliegt sprunghaft auftretenden Mutationen, die zur Bereicherung des Genpools dienen und zu Variationen führen (Junker 1988).

Die evolutionstheoretischen Ansätze versuchen diese Mechanismen auf die Evolution von Unternehmen zu übertragen. Die Ausgangsbasis für die St. Gallener Schule, die insbesondere durch Fredmund Malik vertreten wird, stellt das Konzept der spontanen Ordnung dar. Es sagt aus, dass Ordnung durch Regeln entsteht, die sich durch Evolution und Interaktion der Individuen entwickeln. Malik schreibt hierzu: „Regeln brauchen von niemanden in bewusster Absicht gesetzt zu werden, sondern sie entstehen im Zuge der Evolution aus der Interaktion der Individuen miteinander [...]. Sie sind häufig der handelnden Person auch gar nicht bekannt oder bewusst, sondern wirken faktisch. Verhaltensregeln in diesem Sinne sind keine willkürlichen Normen, sondern stellen vielmehr die wohl wichtigste Anpassungsform des Menschen an eine Umwelt dar, über deren Einzelheiten er nie genug wissen kann, um [...] in diesem kausalen Sinne rational handeln zu können“ (Malik 1981, Bd. 2, S. 121-140). Da die Individuen als Träger des evolutionären Prozesses verstanden werden, ermöglichen sie, dass soziale Systeme sich durch ständige Veränderung ihres Verhaltens sich an neue Umweltbedingungen anpassen. Sie verfügen also über die Fähigkeit der Selbstorganisation und die Möglichkeit zur Weitergabe von Verhaltensregeln auf evolutionäre Weise (Kieser 2002). Einen weiteren Ansatzpunkt der evolutionstheoretischen Managementlehre bildet Ashbys Gesetz der erforderlichen Varietät („law of requisite variety“), wonach ein System die Varietät der Umwelt nur im Umfang der eigenen Varietät kompensieren kann (Ashby 1956). Daraus folgt, dass die Varietät maximiert werden und die Komplexität in keinem Falle eingeschränkt werden dürfe. Für Malik (1981) gilt: Die evolutionäre Perspektive ist eine Perspektive, die zu Bescheidenheit, Zurückhaltung und zu einer Besinnung auf die Grenzen des Möglichen mahnt. Für das Management ist daraus ableitend zu erwarten, einen Rahmen zu schaffen, der Schranken und Richtung der Unternehmung in ihrer Entwicklung festlegt (Kieser 2002).

Einige dieser Aussagen finden sich auch im vorliegenden Interview mit Malik wieder. Anhand von ausgewählten Interviewpassagen soll in Abschnitt 5.3 dargelegt werden, wie Ansätze der Evolutionstheorie, auf der der Ansatz des evolutionären Managements basiert, auch in ingenieurwissenschaftlichen Bereichen aufgegriffen wurden. Zunächst werden dazu die methodischen Ansätze der Selbststeuerung aus Sicht der Ingenieurwissenschaften dargestellt werden, bevor diese am Beispiel des Forschungsgebiets der Swarm-Intelligence den Inhalten von Malik gegenüber gestellt werden sollen.

## **5.2 Ansätze der Selbststeuerung in den Ingenieurwissenschaften**

### **5.2.1 Organisation und Management**

#### ***Die Fraktale Fabrik***

Ein weiterer Ansatz für autonome Selbststeuerung auf Managementebene ist das Konzept der „Fraktalen Fabrik“ (Warnecke 1993). Die Fraktale Fabrik (Fractal Manufacturing System FMS) wird als ein offenes System definiert, welches aus selbständig agierenden (selbststeuernden) und in ihrer Zielausrichtung selbstähnlichen Einheiten (Fraktale) besteht und durch dynamische Strukturen einen vitalen Organismus bildet. Die Fraktale Fabrik basiert auf dem Teamarbeitsgedanken. Jedes Team (Geschäftseinheit) ist dem Unternehmen selbstähnlich, d.h. es agiert wie eine eigenständige Fabrik. Es organisiert sich selbst und bildet mit anderen Teams neue Strukturen (Selbstorganisation). Es ist nach Kühnle (1996) somit ein adaptives System, das sich permanent an veränderte Anforderungen anpassen kann (Kühnle, 96). Voraussetzung für eine Selbststeuerung der Fraktale innerhalb des Gesamtsystems sind relativ autonome, stabile Subsysteme. Das führt zu einer Strukturierung nach Art eines sich verzweigenden Stammbaumes. Charakteristisch für die Fraktale Fabrik ist demnach, dass sich die Fraktale selbst optimieren. Sie sind jedoch in ein hierarchisches System von Aufgaben bzw. Zielen eingebunden und werden in einem Organisationsnetzwerk übergreifend geführt.

### **5.2.2 Informatikmethoden und Informations- und Kommunikationstechnologien**

Zwei Konzepte, die eine Selbststeuerung produktionslogistischer Prozesse bzw. eine Selbstorganisation von Produktionssystemen zum Ziel haben, sind das „Holonische Manufacturing System“ (HMS) und das „Biological Manufacturing System“ (BMS). Das BMS wird im Schwerpunkt zu den Ansätzen der Kategorie Materialfluss und Logistik eingeordnet und daher im nächsten Abschnitt ausgeführt. Des Weiteren gibt es in der Informatik seit Jahren Ansätze, die unter dem Begriff Bionik oder Bioanalogie eingruppiert werden können (Limberger & Mühlhäuser 2002).

#### ***Holonische Manufacturing System***

Ein Holonisches Manufacturing System besteht aus autonomen, kooperativen und intelligenten Modulen – den so genannten Holonen, die sich eigenständig anpassen und konfigurieren lassen. Holone repräsentieren sowohl reale Systemkomponenten (z.B. Maschinen, Produkte) als auch virtuelle Bestandteile (z.B. Aufträge). Als Teilgebiet der Entwicklung intelligenter Fertigungssysteme (engl.: IMS – Intelligent Manufacturing Systems), propagiert der holonische Ansatz eine Abkehr von der traditionell zentralistischen und hierarchischen Planung und Steuerung hin zu selbstorganisierenden Systemen autonom (inter-)agierender Holone. Bei der praktischen Umsetzung holonischer Systeme werden sehr häufig Technologien aus der Forschung zu Multi-Agenten-Systemen angewandt. Unter dem Begriff Multi-Agenten-Systeme (MAS) werden Softwaretechnologien verstanden, die die Fähigkeit besitzen, soziales und individuelles Verhalten zu entwickeln (Lüth 1998). HMS sind durch eine flache Organisationsform gekennzeichnet, in der es keine Trennung zwischen Steuerung und Ausführung gibt. In einem Holon, dem Grundelement von HMS, sind jeweils Mensch, Maschine und Informationsverarbeitungssystem zusammengefasst. Als Holon (Koester 1989) bezeichnet man in Multi-Agenten-Systemen Agenten, die wieder-

um aus Agenten bestehen. Zwischen dem Holon und seinen Mitgliedern besteht eine Ganzes-Teil-Beziehung. Es kooperiert mit anderen Holonen, um gemeinsam als starke Komponente innerhalb des gesamten Produktionssystems zu agieren. Die Autonomie gibt dem Holon die Möglichkeit, auf unvorhersehbare Umstände zu reagieren, ohne ein übergeordnetes Steuerungssystem zur Lösung einbeziehen zu müssen. Die so geschaffene Form der „Holarchy“ ist eine Hierarchie kooperierender Holone, welche ein Ziel verfolgen. Soziale Fähigkeiten der Holone wie Kommunikation, Verhandeln und Kooperation führen zu selbststeuernden Prozessen innerhalb des Produktionssystems (Bongaerts et al. 1997; Brussels et al. 1998; Langer et al. 1999; Tönshoff et al. 1997; Wyns et al. 1999).

### ***Bioanaloge Ansätze (Biology-Inspired Technologies)***

Bionik oder Bioanalogie stellen Ansätze dar, in denen man das Wissen über Problemlösungsverhalten aus der Natur für technische Zwecke nutzbar macht. Hierzu gibt es viele Ansätze, wie zum Beispiel neuronale Netze, genetische Algorithmen oder Aspekte der Robotik, wie sechsbeinige Laufmaschinen. In (Montresor & Babaoglu 2002) sollen unter Nutzung von Ansätzen complex adaptiver Systeme (CAS) selbstorganisierende Informationssysteme gestaltet werden, die robust den Anforderungen dynamisch komplexer Umgebungen genügen. So sollen neue Lösungen für Probleme bei der Bildung von Ad-hoc und virtuellen Netzwerken and Grid Computing gefunden werden.

In der Informatik werden zum Beispiel biologische Organisationsstrukturen unter dem Stichwort Ant Colonies erforscht (Limberger & Mühlhäuser 2004). Besonders Lebewesen, die in Schwärmen leben, zeichnen sich durch hochkomplexes Verhalten und extrem hohes Problemlösungspotential aus. Das so bezeichnete Forschungsgebiet der „Swarm-Intelligence“ befindet sich quasi zwischen den Forschungsgebieten „Artificial Life“ und Multiagentensystemen der Künstlichen Intelligenz. Dieser Ansatz wird im Folgenden näher erläutert, um diesen dann stellvertretend für die ingenieurwissenschaftlichen Ansätze zur Selbststeuerung/Selbstorganisation im Vergleich mit dem Ansatz von Fredmund Malik heranziehen zu können.

### ***Swarm-Intelligence***

Auch der ursprünglich auf Tierverhalten bezogene Begriff der Swarm-Intelligence versucht Techniken und Verfahren der Natur anwendbar für unterschiedlichste Prozesse in Unternehmensbereichen fruchtbar zu machen. Als Schwarm kann eine Gruppe von Individuen bezeichnet werden, die direkt oder indirekt in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren. Laut Bonabeau und Meyer (2000) kann die Fähigkeit von Insekten, im Kollektiv große Leistungen zu erbringen, (z.B. riesige Bauwerke durch Termiten, Verhalten von Vögeln und Fischen in Schwärmen) mit der Swarm-Intelligence begründet werden. Aus dieser wiederum ergeben sich positive Eigenschaften wie Flexibilität, Robustheit und auch Selbstorganisation, die es den Insekten erlaubt haben, sich in der Evolution zu behaupten. Sie definieren die Swarm-Intelligence folgendermaßen: “Any attempt to design algorithms or distributed problem-solving devices inspired by the collective behaviour of social insect colonies and other animal societies” (Bonabeau et al. 1999, S. 7).

Die wichtigsten Merkmale der Swarm-Intelligence sind (Bonabeau & Meyer 2001a):

- Arbeit der Gruppe ohne (Ober-)Aufsicht,

- Teamarbeit der Gruppen nach dem Prinzip der Selbstorganisation,
- Koordination durch verschiedene Interaktionen zwischen den Individuen und den Individuen mit der Umwelt,
- einfache Interaktionen führen zu einer effizienten Lösungsstrategie eines Problems in der Gesamtheit und somit zu einem komplexen Systemverhalten.

Sogenannte Ameisenalgorithmen greifen Verhaltensweisen von Ameisen auf. Ameisen lösen das Problem des kürzesten Weges zu einer Futterquelle, indem sie eine Spur aus Pheromonen legen, der ihre Artgenossen folgen. Dabei liegt ein Vorteil zunächst in der zufälligen Erkundung des Raumes der alternativen Möglichkeiten, um zur Futterquelle zu gelangen. Folgt eine Ameise dem kürzesten Weg, so ist sie schneller auf dem Rückweg zum Nest als diejenige, die einen längeren Weg gewählt hat. Da sie ihre Route somit eher doppelt markiert als die anderen, werden die übrigen Ameisen dazu gebracht, diesem Weg zu folgen. Aus einfachen Regeln folgt ein zielorientiertes Kollektivverhalten. Dieses Verhalten soll durch die Schaffung von Ameisen-Algorithmen nutzbar gemacht werden. Es handelt sich hierbei um naturanaloge Optimierungsverfahren, die bisher zum Beispiel beim Routing in Kommunikationsnetzwerken eingesetzt werden (Merkle & Middendorf 2003; Michels & Middendorf 1999). Diese naturanalogen Optimierungsverfahren werden auf einem Rechner eingesetzt und dienen der zentralisierten Planung. Die möglichen Vorteile von heterarchischen Strukturen werden dabei nicht genutzt.

### ***Multi-Agentensysteme***

Natürliche Agentensysteme und insbesondere Kolonien sozialer Insekten faszinieren durch ihre Robustheit, ihre Flexibilität und ihre Anpassungsfähigkeit. So versuchen Wissenschaftler Softwareagenten zu entwickeln, um die beobachteten Problemlösungsweisen auf komplexe Optimierungsaufgaben zu übertragen. Bonabeau und Meyer (2001) nennen als Beispiel für die Übertragung dieser Problemlösungsweise die Telekommunikation. Die Software soll, die schnellsten Verbindungen ausfindig machen und bei Aufschub an bestimmten Knotenpunkten auf die veränderten Bedingungen sofort mit neuen Wegmöglichkeiten reagiert (Bonabeau&Meyer 2000, 2001). Es gibt weitere Forschungen zur reaktiven Steuerung von Lieferketten mit Agentensystemen (Scholz-Reiter et.al. 2003). So sollen die Agenten u. a. in der Lage sein, mit anderen Agenten oder Menschen zu kommunizieren und innerhalb eines definierten Auftrags ihre Aktionen selbst zu initiieren und zu steuern. Dazu sind weitere Fähigkeiten wie Mobilität, Lernfähigkeit und Reaktionsfähigkeit notwendig.

### **5.2.3 Materialfluss und Logistik**

Die skizzierten Konzepte Holonic Manufacturing System, Fraktale Fabrik, Multi-Agentensysteme und auch das im Folgenden beschriebene Biological Manufacturing System lassen jedoch bisher eine breitenwirksame Anwendung in der industriellen Praxis, die der Arbeitsebene Materialfluss und Logistik am nächsten ist, vermissen.

### ***Biological Manufacturing System***

Das Biological Manufacturing System oder auch Bionic Manufacturing System (BMS) nach Ueda imitiert die biologische Bauweise (Selbstorganisation) und Optimierung (Evolution), um flexiblere Produkti-

onssysteme zu erhalten (Ueda & Ohkura 1995). Es behandelt den Umgang mit dynamischen Veränderungen der internen und externen Umwelt- und Rahmenbedingungen während des Produktlebenszyklus. Das BMS ist durch eine verteilte Struktur gekennzeichnet, wobei die Informationsdarstellung in genetischer Form erfolgt. Es besitzt die Fähigkeit zur Selbstreproduktion und Evolution (Entwicklung hin zu neuen, verbesserten Produkten), Anpassung, Selbsterkennung- und Selbstwiederherstellung. Beispielsweise können Fertigungszellen die autonomen Einheiten eines BMS darstellen, welche zusammengenommen ein Produktionssystem bilden. Um kurzfristig auf Änderungen zu reagieren, werden im Sinne der Wandlungsfähigkeit zwei Ansätze im Rahmen des BMS verfolgt: Das Produktionssystem reagiert auf Veränderungen oder das Produkt. Produkte entwickeln, vom Rohmaterial beginnend, ihre eigenen DNA Informationen, wohingegen die Fertigungsmittel das Produkt unter Zuhilfenahme von BN Informationen (individuell erlangte Informationen während der Lebenszeit) erstellen. Das Produkt eignet sich in weiterer Folge BN Informationen aus seiner Lebenszeit an und generiert hieraus ein Wissensarchiv. Als Resultat ist das Produkt fähig, automatisch auf Fehlfunktionen zu reagieren und sein Design für die nächste Generation von Produkten weiter zu entwickeln bzw. dieses Wissen zur Verfügung zu stellen (Ueda et.al. 1994, 1997, 1998).

### 5.3 Gegenüberstellung von Ansätzen der Ingenieurwissenschaften zur Selbststeuerung und dem evolutionstheoretischen Ansatz der Managementlehre von Malik

Die Thesen von Malik, insbesondere jene aus dem vorliegenden Interview, sollen in diesem Abschnitt aufgegriffen und schwerpunktmäßig mit den Ansätzen der Biological-Inspired Techniques (Swarm-Intelligence etc.) verglichen werden. Folgende Stichpunkte erscheinen hierfür als relevant:

Nr.	Merkmal	Theorie Malik	Bioanaloge Ansätze
1	Umgang mit dynamischer Komplexität	+	+
2	Planbarkeit der Systeme	-	-
3	Vorhandensein einer Lenkungsfunktion	+	-
4	Vorhandensein von Kontrollfunktionen	+	-
5	Varietät der Vielfalt	+	+
6	Emergenz	+	+
7	Schaffung von Rahmenbedingungen der Selbstorganisation	+	o
8	Autonomes Treffen von Entscheidungen durch die Individuen	+	+
9	Autonomes zielorientiertes Verhalten	o	+
10	Heterarchie	o	+
11	Nicht-Determinismus	+	+
12	Interaktionsfähigkeit der Individuen	+	+
13	Vorhandensein von abstrakten Regeln	+	+

**Tabelle 1:** Gegenüberstellung der Ansätze Swarm-Intelligence und Evolutionäre Managementlehre nach Malik (+: Merkmal im Ansatz vorhanden, -: Merkmal ist nicht im Ansatz vorhanden; o: schwach ausgeprägtes Merkmal)

Zusammenfassend lässt sich festhalten: Beide Theorien gehen von dynamisch komplexen Systemen aus (1). Die Ausgangsbasis für beide Theorien ist die These, dass die Systeme zu komplex sind, um planbar zu sein (2). Malik sieht eine Lenkungsebene des Managements vor. In bioanalogen Ansätzen gibt es keine übergeordnete Lenkungsebene (3). Diese Lenkungsebene dient auch der Kontrolle damit sich das System in die gewünschte Richtung entwickelt. Eine Kontrollfunktion ist in vielen bioanalogen Ansätzen, insbesondere in der Swarm-Intelligence nicht nötig, da angenommen wird, dass nur die am besten angepassten Populationen überleben werden. Jedoch beschreibt Malik als Vision für die Selbstorganisation den Verzicht auf den Anspruch, jedes Detail steuern zu können und postuliert das Akzeptieren bestimmter Grenzen von Steuerungsfähigkeit und Kontrolle<sup>8</sup> (4). Varietät und Vielfalt sollen in beiden Ansätzen den Umgang mit komplexer Dynamik ermöglichen. Malik beschreibt Varietät als „die Anzahl möglicher unterscheidbarer Zustände, die ein System aufweisen und generieren kann“<sup>9</sup> (5). Zudem beanspruchen beide Ansätze für sich ein emergentes Verhalten. Durch das Vorhandensein vieler Individuen in beiden Ansätzen ist der Gruppe eine Problemlösungsfähigkeit gegeben, die die Einzelindividuen nicht aufweisen (6). Hierzu müssen in Maliks Theorie Rahmenbedingungen für die Selbstorganisation erst noch geschaffen werden. In den Bioanalogen Theorien sind diese Rahmenbedingungen bereits durch die Natur vorgegeben (7). Eine weitere Gemeinsamkeit beider Ansätze ist, dass die Individuen der Systeme in der Lage sind, autonome Entscheidungen zu treffen. Erweisen sich Entscheidungen als falsch, so wird die dadurch erzeugte Variante in beiden Ansätzen ausselektiert (8). Beispielsweise treffen die Individuen im Ansatz der Swarm-Intelligence autonome Entscheidungen stets zielorientiert („Überleben“), jedoch können die Individuen sich in Maliks Ansatz im Rahmen vorgegebener Ziele orientieren. Insofern ist auch in Maliks Ansatz ein zielorientiertes Verhalten zu beobachten, jedoch ist die Autonomie des Verhaltens durch die stärker ausgeprägte Vorgabe der Ziele eingeschränkter als beim Ansatz der Swarm-Intelligence (9). Malik sieht grundsätzlich eine Lenkungsebene vor. Trotz der heterarchischen Ansätze sind ausgeprägtere hierarchische Strukturen bei ihm vorhanden als im Fall der Bioanalogen Verfahren. Im Ansatz der Swarm-Intelligence zum Beispiel befinden sich die Individuen auf einer Ebene vernetzter Strukturen (10). Beide Theorien behandeln das nicht-deterministische Verhalten des Systems selbst und des Umfeldes (11). Die Individuen interagieren miteinander in beiden Ansätzen (12). Für die Swarm-Intelligence sei hier ein Beispiel zitiert (Niesing, 2004): Das Befolgen einfacher Regeln ermöglicht Vogelschwärmen nicht nur in einer Linie zu fliegen, sondern auch Hindernissen auszuweichen. Drei einfache Regeln ermöglichen diese Fähigkeit: 1. Schere aus bevor es zu einer Kollision mit einem anderen Vogel oder Objekt kommt. 2. Fliege ebenso schnell wie deine Nachbarn. 3. Versuche in das wahrgenommene Zentrum zu fliegen. Auch Malik geht vom Vorhandensein abstrakter Regeln aus. Diese Regeln entstehen nach Malik durch die

---

<sup>8</sup> Vgl. Interview Malik Z. 34-39.

<sup>9</sup> Interview Malik Z. 444 ff.

ständige Weiterentwicklung der Systeme:<sup>10</sup> „Evolutionäre Gebilde sind entstanden aus de facto Regelmäßigkeiten und dadurch, dass das Verhalten der Menschen, ohne dass sie es wussten, bestimmten Regeln folgt, die möglicherweise von niemandem gesetzt worden sind [...]“. Diese haben eine besondere Bedeutung, denn durch sie kann, laut Malik, Wissen weitergegeben werden. Diese Ausführungen zeigen, dass beide Ansätze abstrakte Regeln voraussetzen (13).

Vergleicht man die Unterschiede der Ansätze auf Basis der markierten Merkmale in der Tabelle, so stellt man fest, dass ein höherer Grad der Selbststeuerung im Bioanalogen Ansatz vorhanden ist. In Maliks Ansatz fehlt dabei eine Beschreibung des optimalen oder anzustrebenden Verhältnisses zwischen Selbstorganisation innerhalb des Systems und Fremdorganisation durch das Management. So erscheint es wahrscheinlich, dass die Gestalter der Organisation doch lieber auf alte, bewährte Muster zurückgreifen. Kieser (2002, S. 262) schreibt dazu: „Das Konzept des evolutionären Managements ersetzt die klassischen Organisationsmuster nicht, (sondern) bettet sie lediglich in ein neues Sprachspiel ein“.

Beispiele des Swarm-Intelligence Ansatzes in der industriellen Praxis lassen sich nicht nur bei den schon erwähnten Scheduling-Problemen finden. Beispielsweise hat ein international ausgerichtetes Unternehmen für Fertigbeton versucht, seine Terminprobleme damit zu lösen, dass es den einzelnen Fahrern mehr Freiheiten zugesprochen hat. Es gab keine genauen Anweisungen mehr, sondern lediglich die Aufgabe, die Waren pünktlich zum Kunden zu transportieren. Dies bedeutet, dass nicht, wie sonst üblich, Routen vorgegeben wurden. Den Fahrern wurde außerdem die Möglichkeit eingeräumt, miteinander zu kommunizieren, so dass Absprachen untereinander möglich wurden. Die einzelnen Fahrzeuge bilden sozusagen einen Schwarm aus Fahrzeugen. Durch das Nicht-Vorhandensein der übergeordneten Steuerungseinheit konnte das Unternehmen signifikante Verbesserungen der Termintreue erzielen (Kelly 2001).

Zur Umsetzung der Ansätze in Materialfluss- und Logistiksysteme bedarf es, wie bei dem bislang in der Theorie existierenden Ansatzes der Selbststeuerung, des Einsatzes neuer Technologien. Durch die erwähnten technologischen Entwicklungen könnten Bioanaloge Ansätze ein breiteres Anwendungsfeld in industriellen Bereichen finden als dies heute der Fall ist. Die Kommunikation in Unternehmen kann zukünftig durch Weiterentwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologie erheblich beschleunigt werden. Zusätzliche und detailliertere Informationen stehen für jeden Teilnehmer des Netzwerkes innerhalb eines Unternehmens jederzeit zur Verfügung. Räumliche und zeitliche Differenzen treten mit dem Einsatz dieser neuen Technologien in den Hintergrund.

Die beiden hier skizzierten Ansätze haben bisher kaum aufeinander Bezug genommen. Wie sich jedoch zeigt, gibt es viele gemeinsame Begrifflichkeiten. Vermutlich könnten beide Ansätze nicht nur durch den Einsatz der neuen Technologien sondern auch voneinander profitieren. Es wird sich zeigen, inwieweit der neue Forschungsansatz Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik die aufgestellten Anforderungen erfüllen kann, um das Potential einer höheren Robustheit im Sinne der besseren Erreichung logistischer Zielgrößen erschließen zu können.

---

<sup>10</sup> Interview Malik Z. 300ff.

## 6. Zusammenfassung

Selbststeuerung intelligenter Objekte in der Logistik beschreibt eine Zukunftsvision, die neue Ideen für Methoden der Selbststeuerung, neue Technologien und dezentralisierte, heterarchische Systemstrukturen kombiniert. Dieser kombinierte Ansatz soll den Umgang mit dynamisch-komplexen Systemen, wie dies logistische Systeme sind, verbessern und somit eine Erreichung logistischer Zielgrößen sicherstellen. Dies bedeutet, dass positive emergente Effekte von dem Ansatz erwartet werden, die die Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen langfristig stärken sollen. Zukünftige Arbeiten werden der Frage nachgehen, ob Selbststeuerung tatsächlich zu einer positiven Emergenz im Sinne einer höheren Systemrobustheit in Form der besseren Erreichung von logistischen Zielgrößen führt. Die Erforschung der Grenzen zwischen Fremd- und Selbststeuerung scheint dabei besonders wünschenswert. Insgesamt erscheint der Ansatz der Selbststeuerung intelligenter logistischer Objekte mit den beschriebenen Merkmalen und Potentialen vielversprechend, um zukünftig auf die skizzierten dynamisch-komplexen Problemstellungen in Produktion und Logistik im Sinne der Erlangung einer höheren Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen reagieren zu können.

## 7. Literatur

Ashby, W.R., *An Introduction into Cybernetics*, Methuen, London 1956.

Bamberg, G./A. Coenenberg, *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*, München <sup>12</sup>2004.

Behrendt, S./L. Erdmann, „Nachhaltigkeit und Vorsorge – Anforderungen der Digitalisierung an das politische System. Aus Politik und Zeitgeschichte“, in: *Das Parlament* 42, 2003, S. 13-20.

Bleicher, K. u.a., „Normatives Management“, in: W. Eversheim/G. Schuh (Hrsg.), *Betriebshütte, Produktion und Management*, Berlin/New York <sup>7</sup>1996, S.2-1-2-55.

Bonabeau, E./M. Dorigo/G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Oxford University Press, New York, 1999.

Bonabeau, E./G. Theraulaz, „Swarm Smarts“, in: *Scientific American*, March 2000, S.72-79.

Bonabeau, E./Ch. Meyer, „Schwarm-Intelligenz: Unternehmen lernen von Bienen und Ameisen“, in: *Harvard Business Manager* 6 (2001), S.38-49.

Bonabeau, E./Ch. Meyer, „Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business“, in: *Harvard Business Review*, May 2001a, S.107-114.

Bongaerts, L./P. Valckenaers/H. van Brussel/P. Peeters, „Schedule Execution in Holonic Manufacturing Systems“, in: *Proceedings of 29th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, May 11th - 13th, Osaka University, Japan 1997, S.209-215.

Breithaupt, J.-W., „Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen“, in: *Fortschrittsberichte VDI*, Reihe 2, Nr. 571, Düsseldorf 2001, S.3-4.

Brussel van, H. u.a., „Reference Architecture for Holonic Manufacturing Systems“, in: *Computers in Industry, special issue on IMS* 37 (1998), S.255-276.

- Dangelmaier, W./H. Wiedenmann, *Modellbasiertes Planung und Steuern der Fertigung*, hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin/Zürich 1997.
- Dangelmaier, W., *Vision Logistik – Logistik wandelbarer Produktionsnetze*, Paderborn 1997.
- DIN 19226: Steuerung- und Regelungstechnik, Teil 2: Begriffe zum Verhalten dynamischer Systeme, Teil 4: Begriffe für Regelungs- und Steuerungssysteme, Berlin 1994.
- Ebeling, W./J. Freund/F. Schweitzer, *Komplexe Strukturen: Entropie und Information*, Stuttgart/Leipzig 1998.
- Eidenmüller, B., *Die Produktion als Wettbewerbsfaktor*, Köln 1995.
- Eraßme, R., *Der Mensch und die „Künstliche Intelligenz“*, Diss. Aachen 2002, letzter Abruf am 05.02.2004: [http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/194/02\\_194.pdf](http://sylvester.bth.rwth-aachen.de/dissertationen/2002/194/02_194.pdf).
- Finkenzeller, K., *RFID-Handbuch - Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten*, München <sup>3</sup>2002.
- Fleischmann, B., „Begriffe der Logistik, logistische Systeme und Prozesse“, in: A. Kuhn u.a. (Hrsg.), *Handbuch Logistik*, Berlin/Heidelberg 2002.
- Freitag, M./O. Herzog/B. Scholz-Reiter, „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“, in: *Industrie Management* 20 (2004), S. 23-27.
- Frese, E./G. Schmidt/D. Hahn/P. Horváth, „Organisationsstrukturen und Management“, in: W. Eversheim/G. Schuh (Hrsg.), *Betriebshütte, Produktion und Management*, Berlin/New York <sup>7</sup>1996.
- Goebel, E., *Theorie und Gestaltung der Selbstorganisation*, Berlin 1998.
- Goldammer, E.v., *Heterarchie und Hierarchie – Zwei komplementäre Beschreibungskategorien*, Vordenker.de, 2003, [http://www.vordenker.de/heterarchy/a\\_heterarchie.pdf](http://www.vordenker.de/heterarchy/a_heterarchie.pdf), Abruf am 28.11.2004.
- Grassberger, P., „On the Hausdorff dimension of fractal attractors“, *J. Stat. Phys.* 26 (1981).
- Hayek, F.A. von, *Recht, Gesetzgebung und Freiheit*, Landberg am Lech 2004.
- Hejl, P.M., „Towards a Theory of Social Systems: Self-Organization and Self-Maintenance, Self-Reference and Syn-Reference“, in: Ulrich, H./G.J. Probst (Hrsg.), *Self-Organization and Management of Social Systems*, Berlin/Heidelberg/New York 1984.
- Helm, G., *Symbolische und konnektionistische Modelle der menschlichen Informationsverarbeitung. Eine kritische Gegenüberstellung*, Berlin/Heidelberg/New York 1991.
- Horváth, P., *Controlling*, München <sup>8</sup>2002.
- Hülsmann, M./K. Windt (Hrsg.), *Selbststeuerung – Entwicklung eines terminologischen Systems*, Sammelband, vorgesehen zur Veröffentlichung 2005.
- Junker, R./S. Scherer, *Evolution – Ein kritisches Lehrbuch*, Gießen 1998.
- Kelly, K., *NetEconomy*, Berlin 2001.
- Kieser, A., *Organisationstheorien*, Berlin 2002.
- Kiesewetter, S.A., *Entwicklung einer dynamisch adaptierbaren Produktionsregelung: Dezentrale, hierarchische Regelung operativer Produktionsabläufe*, Diss. Aachen 1991.
- Klaus, P., *Gabler-Lexikon Logistik*, Wiesbaden 1998, S. 434-441 und S. 379.
- Koester, A., *The Ghost in the Machine*, London 1989.

- Kühnle, H., „Die Fraktale Fabrik - Neue Organisationsformen“, in: W. Künrth (Hrsg.), *Menschen Maschinen Märkte. Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Warnecke*, Berlin 1996, S. 89-102.
- Läderach, H., *Komponenten, Prozesse und Emergenz*, Pfäffikon 2000,  
<http://www.ifi.unizh.ch/groups/ailab/teaching/semi2000/Emergenz.pdf>, Abruf am 24.11.2004.
- Lai, Y.-C., „Complexity in Hamiltonian-driven dissipative chaotic dynamical systems“, in: *Phys. Rev. E* 54 (1996), S.4667-4676.
- Langer, G. u.a., „Research Contributions to the Modelling and Design of Intelligent Manufacturing Systems“, in: *Proceedings of the Second International Workshop on Intelligent Manufacturing Systems*, Leuven 1999.
- Limberger, T./M. Mühlhäuser, *Bioanaloge Ansätze für das globale multimediale Internet*, Darmstadt 2002, <http://nibbler.tk.informatik.tu-darmstadt.de/publications/2002/ThemaForschung0202.pdf>,  
 Abruf am 20.12.2004.
- Lödding, H., „Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung“, in: *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 2, Nr. 587, Düsseldorf 2001.
- Lödding, H., *Verfahren der Fertigungssteuerung*, Berlin/Heidelberg 2004.
- Luczak, H./W. Eversheim/M. Schotten, *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*, Berlin 1998.
- Lüth, T., *Technische Multi-Agenten-Systeme*, München/Wien 1998.
- Malik, F., „Evolutionäres Management“, in: F. Malik/G. Probst (Hrsg.), *Die Unternehmung*, Bd. 2, Bern/Stuttgart 1981, S. 121-140.
- Martin, C., „Produktionsregelung – ein modularer, modellbasierter Ansatz“, Diss. TU München, in: *iwb-Fortschrittbericht Nr.113*, Berlin 1998.
- Merkle, D./M. Middendorf, „Swarm Intelligence“, to appear in: E. Burke/G. Kendall (Hrsg.), *Introductory Tutorials in Optimisation, Search and Decision Support Methodology*, Kluwer 2003.
- Michels, R./M. Middendorf, „An Ant System for the Shortest Common Supersequence Problem“, in: D. Corne/M. Dorigo/F. Glover (Hrsg.), *New Ideas in Optimization*, London 1999.
- Montesor, A./O. Babaoglu, The BISON Project, *IEEE Computational Intelligence Bulletin*, Dec. 2002, Vol. 1, No.1.
- Niesing, B., „Gemeinsam Schlau“, in: *Fraunhofer Magazin* 3/2004, München, S. 54-55.
- Paslack, R./P. Knost, „Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung“, in: *Wissenschaftsforschung Report 37*, Sciences Studies, Bielefeld 1990.
- Pohl, R.O./K. Lüders, *Pohls Einführung in die Physik*, Berlin/Heidelberg 1930.
- Reichl, H./J. Wolf, „Things that think“, in: *TU-Berlin - Forschung aktuell*, Nr. 49 (2004).
- Rommelfanger, H.J./S. H. Eickemeier, *Entscheidungstheorie*, Berlin 2001.
- Roos, H.-J., „Einsatz standardisierter Datenträger für den warenbegleitenden Informationsfluss in der deutschen Möbelfertigung“, *Abschlussbericht AIF*, Nr. 12765 N, Stuttgart 2003.
- Ropohl, G.J.B., *Eine Systemtheorie der Technik – Grundlegung der Allgemeinen Theorie*, München 1979.
- Schmidt, G., *Grundlagen der Regelungstechnik*, Berlin/Heidelberg 1987.

- Scholz-Reiter, B., „Chancen und Möglichkeiten der reaktiven Planung und Steuerung von intermodalen Stückguttransporten“, in: M. Fluhr (Hrsg.), *Innovative Lösungen für den Verkehr von morgen. In Time*, Berlin 1998, S. 32-48.
- ders./H. Höhns, „Agent-based Collaborative Supply Net Management“, in: *Collaborative Systems for Production Management*, Kluwer 2003, 3-17.
- ders. u.a., „New Concepts of Modelling and Evaluation Autonomous Logistic Processes, IFAC Conference on Manufacturing, Modelling, Management and Control“, in: *Proceedings of IFAC-MIM'04*, Athen, Griechenland, 21-22 Oktober 2004.
- ders./K. Windt/M. Freitag, „Autonomous Logistic Processes – New Demands and First Approaches“, in: *Proceedings of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, May 19-21, 2004, Budapest, Hungary.
- Schulte, C., *Logistik: Wege zur Optimierung des Material- und Informationsflusses*, München 1999.
- SFB 637 Universität Bremen: *Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen* (2004). Technical Report, Preprint, verfügbar unter <http://www.sfb637.uni-bremen.de/treports.html>.
- Shepard, S., *RFID Radio Frequency Identification*, New York 2004.
- Simon, H.A., „The architecture of complexity“, in: *Proc. Am. Phil. Soc.* 106 (1962), 467.
- TA-Swiss-Studie [2004], *Unser Alltag im Netz der schlaunen Gegenstände*, Kurzfassung der TA-SWISS Studie „Das Vorsorgeprinzip in der Informationsgesellschaft – Auswirkungen des Pervasive Computing auf Gesundheit und Umwelt“, [http://www.ta-swiss.ch/www-remain/reports\\_archive/publications/2003/TA\\_46A\\_2003\\_deutsch.pdf](http://www.ta-swiss.ch/www-remain/reports_archive/publications/2003/TA_46A_2003_deutsch.pdf), Abruf am 05.02.2004.
- Tönshoff, H.K./M. Winkler/M. Ehrmann, „Holonc Manufacturing: The Route to Autonomous and Cooperative Manufacturing Systems“, in: *Proc. 9th IFAC-Symposium "Information Control in Manufacturing"*, Nancy-Metz 1997.
- Ueda, K./K. Ohkura, *A Modeling of Biological-oriented Manufacturing Systems with Two Types of Populations. Advancement of Intelligent Production*, Paris, 1994, 75-80.
- ders., „A Biological Approach to Complexity in Manufacturing Systems“, in: *Proc. 27th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, Paris, 1995, 69-78.
- Ueda, K./S. Harima/M. Migita, „A Biological Manufacturing System Model with Immune-like Recognition Mechanism“, in: *Proc. 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 1998, 164-169.
- Ueda, K./J. Vaario/K. Ohkura, „Modeling of Biological Manufacturing Systems for Dynamic Reconfiguration“, in: *Annals of the CIRP* 46/1 (1997), 343-346.
- Ullmann, W., „Controlling logistischer Prozesse am Beispiel des Fertigungsbereichs“, Diss. Hannover, in: *Fortschrittberichte VDI*, Reihe 2, Nr. 311, Düsseldorf 1994.
- Wahrig-Burfeind, R., *Fremdwörterlexikon*, Gütersloh/München 1999.
- Warnecke, H.-J., *Revolution der Unternehmenskultur: Das Fraktale Unternehmen*, Berlin/Heidelberg<sup>2</sup>1993.
- Weber, J., *Logistik-Controlling*, Stuttgart<sup>3</sup>1993.

- Westkämper, E./L. Jendoubi, „Smart Factories – Manufacturing Environments and Systems of the Future“, in: H. Bley (Hrsg.), *Proceedings of the 36th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 2003, 13-16.
- Wiendahl, H.-P., *Betriebsorganisation für Ingenieure*, Wien <sup>4</sup>1997.
- Wiendahl, H.-P., Messung der Leistungsfähigkeit logistischer Systeme, in: D. Arnold/H. Isermann/A. Kuhn/H. Tempelmeier (Hrsg.), *Handbuch Logistik*, Berlin/Heidelberg 2002.
- Windt, K./H. Fastabend/M. Höbig, „Management dezentraler Produktionsstrukturen – Neue Ansätze und Herausforderungen für die Produktion der Zukunft“, Beitrag zum 38. Forum „Produktionsnetzwerke – eine neue Herausforderung der Logistik“, 08.04.1997, Hannover.
- Windt, K., „Engpassorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen“, in: *Fortschrittberichte VDI*, Reihe 2, Nr. 579, Düsseldorf 2001, S. 53.
- Wyns, J./H. van Brussel/P. Valckenaers, „Application Framework for Holonic Manufacturing Systems“, in: *Proc. 32nd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*, 1999, 589-594.
- Zäpfel, G., *Taktisches Produktions-Management*, Berlin/New York 1989.