

## Kapitel: „Wachstum in Netzen“

# Die Intelligenz der Schwärme – Strategien zur Steuerung komplexer Logistik

Prof. Dr. Bernd Scholz-Reiter, Thomas Jagalski  
Bremer Institut für Produktion und Logistik – BIBA

Logistische Netzwerke, die wir für unsere Versorgung mit Gütern und Energie brauchen, werden immer komplexer und dynamischer [9]. Wichtige Treiber dafür sind das steigende Handelsaufkommen, die Atomisierung von Ladungen und die zunehmende Verknüpfung von Lieferketten zu Liefernetzwerken [10]. Zentrale Planungs- und Steuerungsinstanzen, wie sie heute noch vielfach in der Logistik zur Anwendung kommen, werden immer weniger in der Lage sein, den daraus resultierenden Anforderungen gerecht zu werden [9]. Dies kann beispielsweise darin begründet liegen, dass eine starken dynamischen Schwankungen unterliegende Marktnachfrage dazu führt, dass eine Optimierung des Gesamtsystems nicht mehr zeitnah genug durchzuführen ist. Eine Optimierung der in der Logistik oft np-harten Problemstellungen [1] – auch, wenn Optimierungsheuristiken verwendet werden – ist meist zeitintensiv und genau während dieser Zeit kann sich ein hochdynamisches System so weit verändert haben, dass die unlängst noch optimalen Entscheidungen bereits überholt sind. Die steigende Komplexität und Dynamik logistischer Netzwerke lässt den Planungsaufwand konventioneller, zentraler Planungs- und Steuerungsinstanzen eskalieren.

Ein viel versprechender Ansatz aus diesem Dilemma ist der Einsatz von adaptiven logistischen Prozessen mit der Fähigkeit zur Selbststeuerung. Dieser Ansatz eignet sich, da die Selbststeuerung logis-

tischer Prozesse eine Möglichkeit bietet, trotz steigender Komplexität in Kombination mit kurzfristigen Ereignissen den Anforderungen an eine flexible und effiziente Auftragsabwicklung gerecht zu werden [8,12,20]. Bei der Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden steht nicht selten die Natur Modell: Häufig greift die Logistik hier auf Methoden aus dem Gebiet der Schwarm-Intelligenz zurück. Dies ist die technische Nachbildung des Verhaltens von sozialen biologischen Systemen, beispielsweise von Bienen-schwärmen oder Ameisenkolonien, mit Methoden der Künstlichen Intelligenz [6,19].

Welchen Nutzen diese bioanalogen Methoden für die Strategien zur Selbststeuerung in der Logistik bringen, lässt sich für ausgewählte Anwendungen in Simulationsstudien bereits zeigen [4,15,16]. So kann beispielsweise ein bewusst allgemein gehaltenes Beispielszenario aus der Produktionslogistik die Anwendbarkeit, die Auswirkungen auf die logistische Performanz sowie das aus den lokalen bioanalogen Selbststeuerungsstrategien resultierende globale Systemverhalten veranschaulichen. Als exemplarisches Anwendungsszenario wurde eine Fließfertigung verschiedener Produkttypen in einer Werkstatt gewählt, zu deren Fertigstellung mehrere Arbeitsschritte nötig sind und für die unterschiedliche Produktionslinien zur Verfügung stehen. Für das für die Produktionslogistik typische Problem des „Job-Shop-Schedu-

lings" wurde für die Analyse der Auswirkungen des Einsatzes von bioanalogen Methoden ein Pheromonkonzept entwickelt. Dieses Konzept überträgt das soziale Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche auf logistische Problemstellungen. Außerdem wurde eine dem Verhalten von Honigbienen bei der Nahrungsbeschaffung entlehene Selbststeuerungsmethode entwickelt. Mit beiden Ansätzen untersucht man sowohl ihre Performanz und Robustheit gegenüber Nachfrageschwankungen als auch das dynamische Gesamtverhalten.

### Bioanaloge Methoden für die Strategien zur Selbststeuerung in der Logistik

Seit einigen Jahren beschäftigt sich die Logistikforschung intensiv mit Fragestellungen zur Selbststeuerung in Form von dezentral organisierten Planungs- und Steuerungssystemen. Der Begriff Selbststeuerung kann wie folgt definiert werden: „Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nichtdeterministischen 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“ [24]. Dazu werden auch bestehende Ansätze zur Selbststeuerung und Selbstorganisation aus anderen Wissenschaftsdisziplinen, wie beispielsweise der Biologie sowie deren Übertragbarkeit auf logistische Fragestellungen untersucht. Bei der Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden werden wiederholt natürliche Verhaltensweisen adaptiert: Häufig greift die Logistik dabei

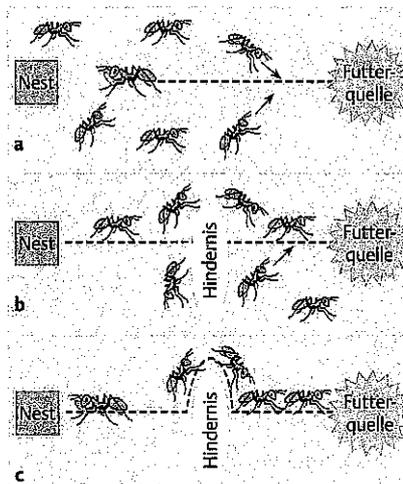


Abb. 1 Ameisen bei der Futtersuche (nach [7]).

auf Methoden aus dem Gebiet der „Schwarm-Intelligenz“ zurück. Mit Schwarm-Intelligenz bezeichnet man den Ansatz, eine verteilte Problemlösungsstrategie, wie sie sich im gemeinsamen Verhalten sozialer Insekten zeigt, zu verstehen und auf andere Problemstellungen zu adaptieren [2].

Bioanalogen Systemen ist die Fähigkeit zur Selbststeuerung inhärent. Schwarm-Intelligenz kann als Teamarbeit sozialer Insekten verstanden werden, die zu einer aus den Interaktionen der Individuen entstehenden Selbstorganisation führt. Charakteristisch für bioanaloge Selbststeuerungsstrategien ist eine auf der Erfahrung von Vorgängern basierende Entscheidungsfindung sowie simple Verhaltensweisen der einzelnen Elemente des betrachteten Systems [2]. Die simplen Interaktionen resultieren dann in effizienten Lösungen schwieriger Problemstellungen und somit in einem komplexen Systemverhalten [3].

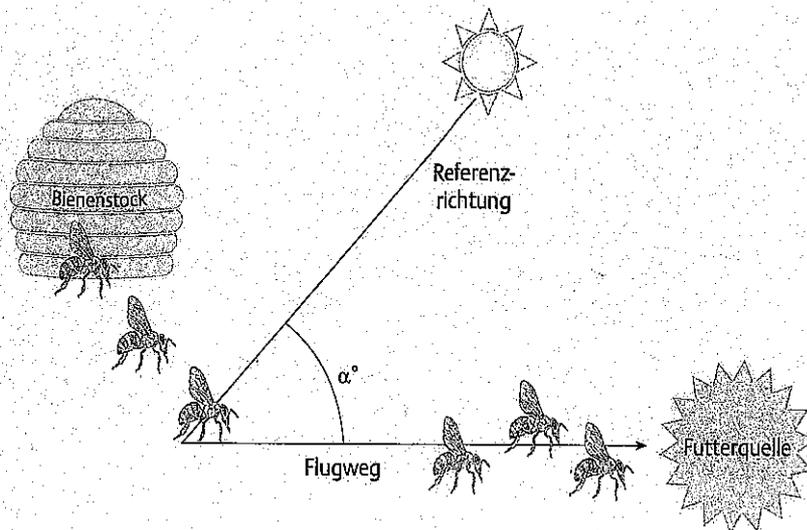


Abb. 2 Informationsgehalt des Schwänzeltanzes.

### Das Verhalten von Ameisen bei der Futtersuche

Ameisen suchen Futterquellen durch zufälliges Herumstreuen. Wenn sie eine Futterquelle gefunden haben, nehmen sie etwas von dem Futter auf und bringen es zurück zum Nest. Dabei hinterlassen sie eine verdampfende chemische Substanz (Pheromon) [14,18,21]. Eine Kommunikation der wichtigen Information über Futterquellen findet also nicht direkt, sondern vielmehr über das Verändern der Umwelt statt. Nachfolgende Ameisen, die auf eine Pheromonspur treffen, können entscheiden, ihre eigene Suche nach Futter fortzusetzen oder der Pheromonspur zu folgen. Wenn sie der Pheromonspur folgen, können sie rasch ebenfalls Futter von der Futterquelle aufnehmen und zum Nest bringen und verstärken folglich die verdampfende Pheromonspur (Abb. 1a).

Bei neuen Wegen oder plötzlich auftretenden Hindernissen (Abb. 1b) werden zunächst die verschiedenen Alternativen

ausprobiert. Auf kürzeren Wegen hat die Pheromonspur weniger Zeit zu verdampfen und infolgedessen ist die Pheromonkonzentration hier am höchsten. Dieser Weg wird am häufigsten gewählt und die entsprechende Pheromonkonzentration ständig erneuert (Abb. 1c). Es kommt zu einer positiven Rückkopplungsschleife, die es den Ameisen ermöglicht, kürzeste Wege zu finden [7].

### Das Verhalten von Honigbienen bei der Futtersuche

Ein Honigbienenschwarm hat üblicherweise verschiedene Futterquellen zur Verfügung. Die Bienen, die eine Futterquelle kennen, können entweder den so genannten „Schwänzeltanz“ aufführen, um damit die Futterquelle zu bewerben, sie können die Futterquelle aufsuchen und Futter zum Bienenstock bringen, ohne die Quelle zu bewerben, sie können neue Futterquellen suchen oder ihre Nahrungsbeschaffung komplett beenden

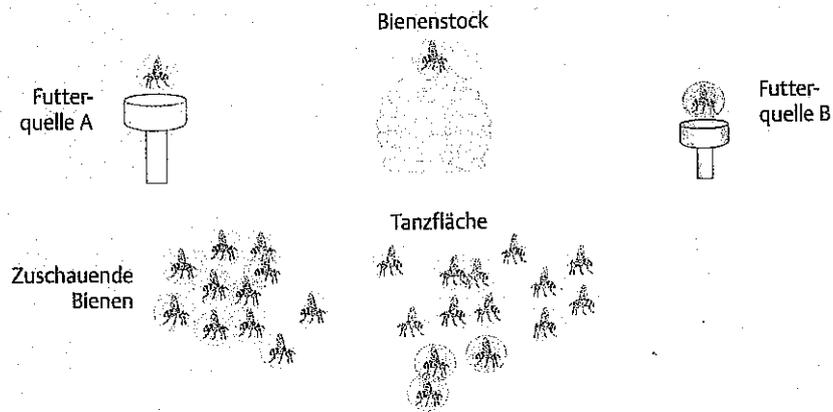


Abb. 3 Informationsübermittlung am Bienenstock mithilfe des Schwänzeltanzes (nach [2]).

[5]. Der Schwänzeltanz beinhaltet Informationen über die Richtung sowie die Entfernung bekannter Futterquellen (Abb. 2).

Der Schwänzeltanz wird am Bienenstock auf der so genannten „Tanzfläche“ aufgeführt. Zusätzlich zu den Informationen über die Richtung und die Entfernung werden durch die Anzahl der aufgeführten Tänze auch Informationen über die Qualität der Futterquelle an zuschauende Bienen weitergegeben [5] (Abb. 3).

Die Wahrscheinlichkeit, eine zuschauende Biene mithilfe des Schwänzeltanzes für die beworbene Futterquelle zu begeistern, ist proportional zur Anzahl der Schwänzeltänze für diese Futterquelle. Die Länge des Schwänzeltanzes hingegen ist wie erwähnt proportional zur Qualität der Futterquelle [22,23]. Dementsprechend werden gute Futterquellen oft und lang beworben und entsprechend auch häufig von zuschauenden Bienen als attraktive Quelle gewählt. Jede zum Bienenstock zurückkehrende Biene bewertet die Futterquelle anhand des Verhältnisses aus der Energie, die zum Bienenstock

gebracht wird und dem Energieverbrauch für den Transport. Je höher die individuelle Bewertung der Qualität der Futterquelle ist, desto mehr Schwänzeltänze wird die Biene aufführen. Zuschauende Bienen werden jedoch nur einem Tanz beiwohnen, da sie damit alle relevanten Informationen erhalten haben. Je mehr Schwänzeltanzdurchläufe eine Biene aufführt, desto mehr unbeschäftigte Bienen können ihn sehen. Es kommt zu einem positiven Feedback, der dazu führt, dass energiereiche und nahe gelegene Futterquellen besonders häufig aufgesucht werden [13].

Schwarm-Intelligenz, wie sie sich beispielsweise im Verhalten von Honigbienen oder Ameisen bei der Futtersuche zeigt, ist mithin ein kontinuierliches Ringen um eine möglichst gute Anpassung an sich stetig verändernde Bedingungen. Darüber hinaus ist aber das Gesamtverhalten eines Schwarms offensichtlich mehr als die Summe der Einzelaktionen; durch die kooperative Kommunikation und Interaktion der einzelnen Schwarmteilnehmer entsteht ein Gesamtverhalten, das über die Fähigkeiten des einzel-

nen Individuums hinausgeht: Man spricht hier von Emergenz. Exakt von solchen Strukturen gilt es in der Logistik zu lernen. Die Herausforderung besteht darin, den selbststeuernden Umgang mit Dynamik, der den naturalogen Verfahren inhärent ist, auf logistische Prozesse zu übertragen. Dabei muss einerseits das logistische System so konzipiert werden, dass der Einsatz lokaler bioanaloger Selbststeuerungsstrategien ermöglicht wird und andererseits das durch die bioanalogen Selbststeuerungsstrategien erzeugte Verhalten des Gesamtsystems analysiert und die lokalen Entscheidungsstrategien gegebenenfalls angepasst werden.

#### Transfer – Lernen von der Natur

Allgemein kann die Übertragung natürlicher oder biologisch inspirierter Verfahren auf produktionslogistische Problemstellungen anhand folgender Trends klassifiziert werden [6]:

1. Biologisch inspirierte Methoden zur Entwicklung von Problemlösungstechniken,
2. Methoden, die natürliche Phänomene synthetisieren und
3. Methoden, die natürliche Materialien nutzen.

Bei den vorgestellten Verfahren von sozialen Insekten bei der Futtersuche sind Parallelen zum Problem der Entscheidungsfindung beim Job-Shop-Scheduling offensichtlich: So wie Ameisen und Bienen über den zu wählenden Weg zum Futter entscheiden müssen, müssen in einem selbstgesteuerten produktionslogistischen Szenario die zu produzierenden Teile autonom über den nächsten Produktionsschritt entscheiden. Eine Maschine, die eine gute Bearbeitungszeit

und kurze Wartezeiten anbietet, sollte dementsprechend für Nachfolger mithilfe eines Signals, dass die Attraktivität der Maschine für nachfolgende Teile widerspiegelt, beworben werden. Es handelt sich hierbei folglich um biologisch inspirierte Methoden zur Entwicklung von Problemlösungstechniken – dem ersten Trend aus der obigen Klassifikation.

#### Übertragung des Pheromonkonzepts auf produktionslogistische Problemstellungen

In Analogie zum Verhalten der Ameisen bei der Futtersuche kann die Erfahrung eines Teils mithilfe eines künstlichen Pheromons kommuniziert werden. Da die Qualität der Information über die Güte der beworbenen Alternative mit der Zeit nachlässt, wird im Pheromonkonzept ein der Evaporationskonstante entsprechender Zerfall der Pheromonkonzentration integriert. Die Entscheidung nachfolgender Teile beruht dann auf der vorgefundenen Pheromonkonzentration. Wann immer ein Teil eine Maschine verlässt, mithin nach jedem Bearbeitungsschritt, hinterlässt es Informationen über die Durchlaufzeit, die sich aus der Bearbeitungszeit sowie der Wartezeit bei der betroffenen Maschine ergibt. Nachfolgende Teile können diese Informationen nutzen, um ihre Entscheidung zu treffen. Die Kommunikation findet folglich durch eine Veränderung der Umwelt und nicht direkt statt [2, 11]. Zum Treffen der Entscheidung brauchen nachfolgende Teile ausschließlich die Information über die aktuelle aggregierte Pheromonkonzentration, die von der Durchlaufzeit und der Evaporationskonstante abhängt. Die genaue Feinjustage der Evaporationskonstante gemäß dem gegebenen produktionslogistischen Szenario ist dabei von großer Bedeutung. Den Transfer des Ver-

Tab. 1 Übertragung des Pheromonkonzepts auf das Job-Shop-Scheduling.

	Ameisen bei der Futtersuche	Transfer: Pheromonkonzept
Art der Informationsweitergabe	Hinterlassen eines Pheromons	Hinterlassen eines künstlichen Pheromons
Entscheidungshilfe für	Nachfolgende Ameisen	Nachfolgende Teile
Verfügbarkeit der Information	Entlang des Wegs zwischen Futterquelle und Nest	An der Quelle bzw. der Vorgängermaschine
Zeitpunkt der Informationsweitergabe	Auf dem Rückweg zum Nest	Nach jedem Produktionsschritt
Regelung der Aktualität der Information	Durch Evaporation	Durch künstliche Evaporation
Art der Beeinflussung	Wahrscheinlichkeit, dass nachfolgende Ameisen einen Weg wählen, basiert auf der vorgefundenen Pheromonkonzentration	Wahrscheinlichkeit, dass Teile eine Maschine wählen, basiert auf der vorgefundenen Konzentration des künstlichen Pheromons

haltens von Ameisen bei der Futtersuche auf das Pheromonkonzept zur Steuerung produktionslogistischer Problemstellungen fasst Tab. 1 zusammen.

### Übertragung des Verhaltens von Honigbienen bei der Futtersuche auf produktionslogistische Problemstellungen

Zur Übertragung des Verhaltens von Honigbienen bei der Futtersuche wird die Attraktivität der verschiedenen Wege mithilfe der Dauer der Bewerbung einer Futterquelle und somit durch die Anzahl der Schwänzeltanzdurchläufe realisiert. Da auch hier der Wert der Information der beworbenen Alternative dynamisch abnimmt, ist die Verfügbarkeit des dem Schwänzeltanz äquivalenten Attraktivitätssignals zeitlich limitiert. Nachfolgende Teile können ihre Entscheidung an-

hand der vorgefundenen aggregierten Signalstärke der jeweiligen Vorgänger treffen. Nach dem Bearbeitungsschritt bewertet ein Teil die Wartezeit und die Bearbeitungszeit an der betroffenen Maschine und hinterlässt diese Informationen für nachfolgende Teile. Diese Information soll so lange nachfolgenden Teilen zugänglich sein, wie sich aus der individuellen Bewertung der Durchlaufzeit ergibt. Das entspricht der Festlegung der Anzahl der Schwänzeltanzdurchläufe der Honigbienen. Die Kommunikation findet hier wie im Pheromonkonzept nicht direkt statt [5, 13]. Nachfolgende Teile treffen dann ihre Entscheidung anhand der für jede Alternative vorgefundenen aggregierten Signalstärke der Vorgänger. Hier ist die genaue Feinjustage der Bewertung der Durchlaufzeit zu beachten. Tab. 2 veranschaulicht die Übertragung des Verhaltens von Honigbienen bei der

**Tab. 2** Übertragung des Verhaltens von Honigbienen bei der Futtersuche auf produktionslogistische Problemstellungen.

	Honigbienen bei der Futtersuche	Transfer: Honigbienenkonzept
Art der Informationsweitergabe	Schwänzeltanz	Signal, das die Attraktivität der Maschine widerspiegelt
Entscheidungshilfe für	Zuschauende Bienen	Nachfolgende Teile
Verfügbarkeit der Information	Am Bienenstock	An der Quelle bzw. der Vorgängermaschine
Zeitpunkt der Informationsweitergabe	Nach der Rückkehr zum Bienenstock	Nach jedem Produktionsschritt
Regelung der Aktualität der Information	Individuelle Bewertung der Futterquelle → Wahl der Anzahl der Schwänzeltanzdurchläufe	Individuelle Bewertung der Durchlaufzeit an der betroffenen Maschine → Dauer des Attraktivitätssignals
Art der Beeinflussung	Wahrscheinlichkeit, dass zuschauende Bienen den beworbenen Weg wählen, basiert auf der Anzahl der Schwänzeltanzdurchläufe	Wahrscheinlichkeit, dass Teile die beworbene Maschine wählen, basiert auf der Summe der (noch gültigen) Signale der Vorgänger

Futtersuche auf produktionslogistische Problemstellungen.

**Beispielszenario aus der Produktionslogistik – Job-Shop-Scheduling**

Als exemplarisches Anwendungsszenario wird eine Fließfertigung  $k$  verschiedener Produkttypen in einer Werkstatt gewählt. Dabei sind zur Fertigstellung der  $k$  Produkttypen jeweils  $m$  Arbeitsschritte nötig. Es stehen jeweils  $n$  Produktionslinien zur Verfügung. Dementsprechend besteht das Fließfertigungsszenario aus  $m \times n$  matrixförmig angeordneten Arbeitsplätzen mit jeweils einer Maschine und einem Eingangspuffer, in welchem die verschiedenen Produkttypen auf die

Bearbeitung warten. Ein Produktionslinienwechsel kann auf jeder Produktionsstufe erfolgen, jedoch muss dann gegebenenfalls eine Rüstzeit auf den alternativen Produktionslinien eingeplant werden. Die zu produzierenden Teile müssen sich auf jeder Produktionsstufe selbststeuernd und analog zu ihren biologischen Vorbildern die Produktionslinie aussuchen, auf der sie im nächsten Schritt bearbeitet werden (für die Topologie dieses produktionslogistischen Szenarios siehe **Abb. 4** und [15, 16, 20, 21]).

**Das Simulationsmodell**

Zur Modellierung des produktionslogistischen Szenarios wurde ein detailliertes „System Dynamics Modell“ mithilfe des

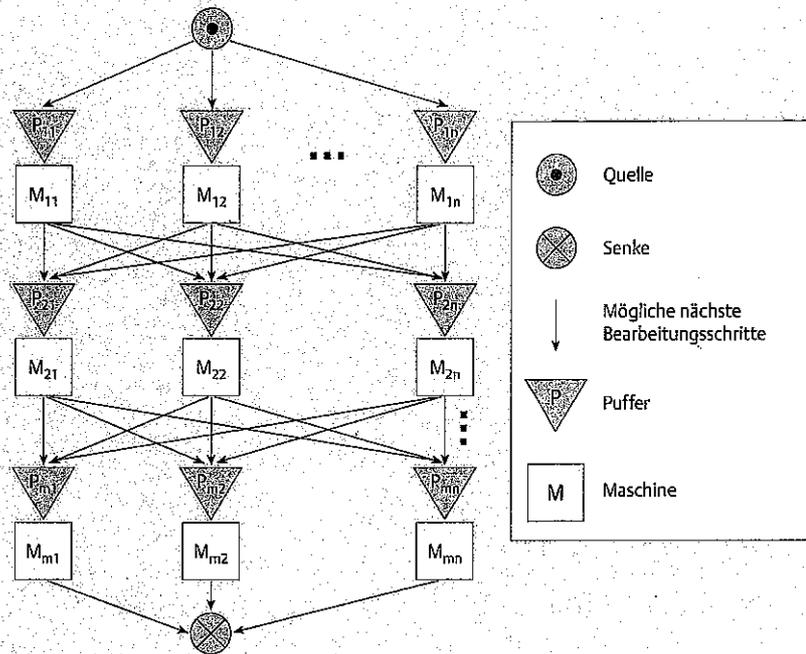


Abb. 4  $m \times n$ -Maschinenmodell zur Produktion verschiedener Produkttypen (nach [25]).

Softwaretools „Vensim“ von Ventana Systems erstellt. Dieses Modell erlaubt die Implementierung verschiedener bioanaloger Selbststeuerungsstrategien. System Dynamics wurde als Softwaretool gewählt, da dieses Tool insbesondere die Modellierung bioanaloger Steuerungsstrategien mit den dazugehörigen Rückkopplungsschleifen sowie einer wertekontinuierlichen Betrachtung der Informationsvorhaltung und der Materialflüsse bietet.

#### Parametrisierung des Modells

Um die Komplexität des vorgestellten produktionslogistischen Szenarios handhabbar zu gestalten, wurden die Simulationsmodelle auf  $n=3$  Produktionsschritte mit jeweils  $m=3$  Maschinen, die  $k=3$  Produkttypen A, B und C produzieren, beschränkt. Innerhalb einer gegeb-

nen Zeitperiode von 30 Tagen werden die Rohmaterialien gemäß einer simulierten saisonal schwankenden Marktnachfrage nach den drei Produkttypen an der Quelle in das System eingelastet. Die Ankunftsrate der drei Produkttypen werden demzufolge als Sinusfunktion definiert. Sie sind für die Produkttypen identisch jedoch um jeweils  $1/3$  der Simulationszeit verschoben, um temporäre Über- bzw. Unterlastsituationen zu generieren. Das heißt, dass im Durchschnitt alle 2 Stunden und 24 Minuten neue, zu bearbeitende Teile des Typs A, B beziehungsweise C in das System eingelastet werden. Reale Produktionssysteme sind üblicherweise im Mittel zu ungefähr 80 % ausgelastet und demzufolge wurden eine durchschnittliche Ankunftsrate von 0,4 1/h und eine Amplitude der Sinusfunktion von 0,36 1/h gewählt. Das führt dazu, dass um den Mittelwert von 80 %

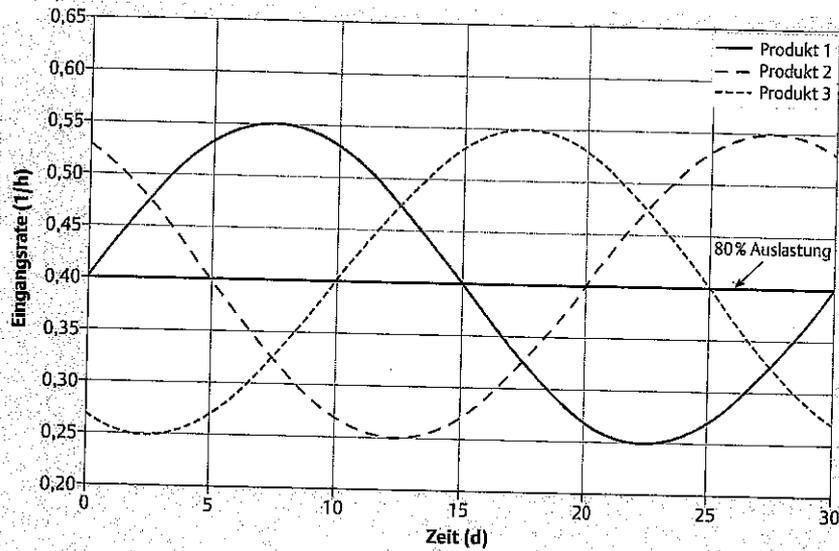


Abb. 5 Eingangsrate der drei verschiedenen Produkttypen [26].

eine maximale Auslastung von ca. 104 % geschaffen wird, der zum Ausgleich eine entsprechende Unterlastsituation folgt. **Abb. 5** verdeutlicht die Einlastung der verschiedenen Produkttypen.

Es wird angenommen, dass die verschiedenen Produkttypen auf den verschiedenen Produktionslinien zwar gleiche Bearbeitungszeiten haben, jedoch eine jeweils unterschiedliche Rüstzeit einplanen müssen, wenn sie sich entscheiden, die Produktionslinie zu wechseln. **Tab. 3** zeigt die verschiedenen Rüstzeiten auf. Sie sind zyklisch, um keinen Produkttyp zu bevorzugen und so ausgelegt, dass es bei einer gleichmäßigen Einlastung für jeden Produkttyp eine eindeutig am besten, am zweitbesten bzw. am schlechtesten geeignete Produktionslinie gibt (siehe auch [17]).

Die zu produzierenden Teile haben ihre autonomen Entscheidungen auf Basis der Erfahrungen ihrer Vorgänger bezüglich der Durchlaufzeit auf den jeweiligen Maschinen zu treffen. Die betrachtete logis-

Tab. 3 Rüstzeiten des 3 x 3-Maschinenmodells.

Rüstzeiten (min)	Maschine		
	M <sub>m1</sub>	M <sub>m2</sub>	M <sub>m3</sub>
A → B	30	10	60
A → C	60	30	10
B → A	10	60	30
B → C	60	30	10
C → A	10	60	30
C → B	30	10	60

tische Zielgröße ist der Bestand, der sich aus der Aggregation aller sich im System befindlichen Teile ergibt.

### Simulationsergebnisse

In die Computersimulation wurde als Vergleichswert eine Selbststeuerungsmethode, die als Entscheidungsgrundlage

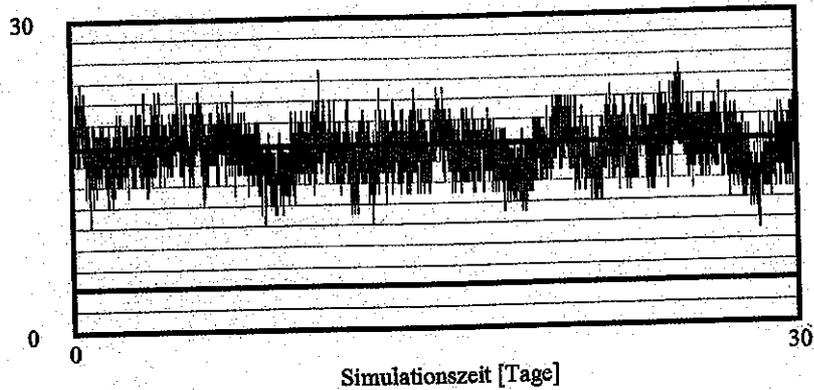


Abb. 6 Bestand bei der Warteschlangenmethode.

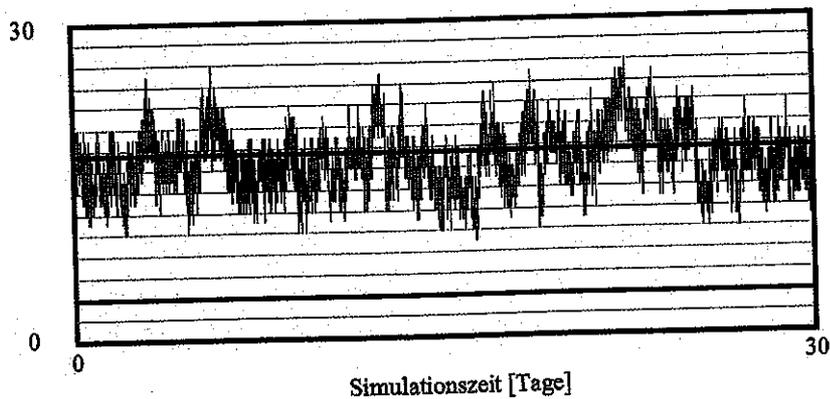


Abb. 7 Bestand bei pheromonbasierter Steuerung.

die in Arbeitszeit gemessene Länge der Warteschlangen der verschiedenen alternativen Maschinen nutzt, miteinbezogen. Diese Warteschlangenmethode hatte in vorherigen Simulationen eine gute logistische Performanz und einen guten Umgang mit Dynamik und Komplexität ge-

zeigt [15, 16] und eignet sich somit gut als Vergleichswert. Die Entwicklung des sich im System befindlichen Gesamtbestands an Teilen für die Warteschlangenmethode zeigt **Abb 6**.

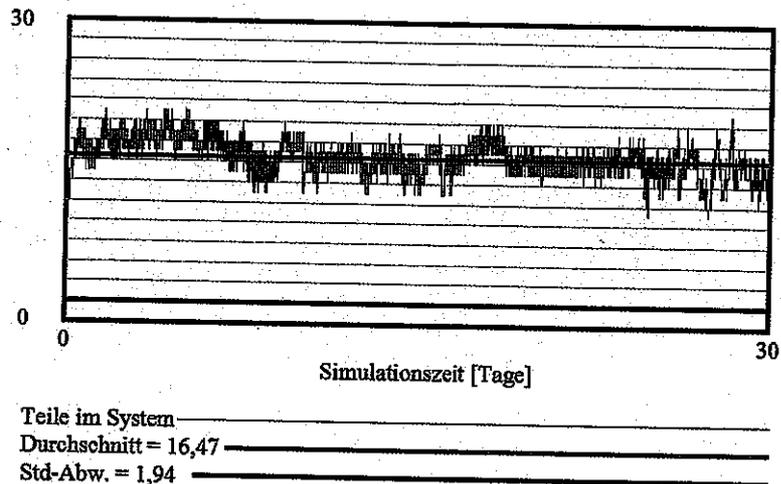


Abb. 8 Bestand bei Honigbienen-analoger Steuerung.

Die Steuerung mithilfe der Warteschlangenmethode wartet mit einem Durchschnitt von 17,64 sich im System befindlicher Teile bei einer Standardabweichung von 4,11 Teilen auf. Die pheromonbasierte Steuerung zeigt eine vergleichbar gute logistische Performanz. Im Durchschnitt befinden sich hier 17,53 Teile im System bei einer Standardabweichung von 3,88 Teilen (Abb. 7).

Die auf dem Verhalten von Honigbienen bei der Futtersuche basierende Steuerung weist eine bessere logistische Performanz auf (Abb. 8). Der Durchschnitt der sich im System befindlichen Teile reduziert sich hier auf 16,49 bei einer auffällig gesunkenen Standardabweichung von 1,94 Teilen.

#### Analyse der Dynamik

Eine Möglichkeit der Analyse des dynamischen Verhaltens auf sich ändernde Bedingungen bietet die Sensitivitätsanalyse. In der Sensitivitätsanalyse wird allgemein der Einfluss von Inputfaktoren

auf bestimmte Zielgrößen analysiert. Es findet eine Grenzbetrachtung der Ergebnisse statt. Dabei wird jeweils ceteris paribus ein Parameter verändert und geprüft, wie sich der Zielwert mit der Parametervariation verändert. Im vorliegenden Fall sollen mithilfe von Sensitivitätsanalysen die Fähigkeiten der einzelnen Steuerungsmethoden, mit unterschiedlich komplexen Nachfragesituationen umzugehen, untersucht werden. Durch eine größere Einlastung wird die temporäre Überlastsituation deutlich verschärft. Die Fähigkeit, in diesen Situationen besonders gute Entscheidungen zu treffen, macht sich in diesen Fällen besonders bezahlt. Gegenstand der Sensitivitätsanalyse ist hier eine ceteris paribus Änderung des Parameters, der die Amplitude der Einlastfunktion für jeden Produkttyp repräsentiert, um jeweils 16/36. Die drei vorgestellten Steuerungsmethoden zeigen jeweils ein unterschiedliches Leistungsvermögen, mit derlei Überlastsituationen umzugehen. Die Ergebnisse der mathematischen Analyse sind hier zur Veranschaulichung grafisch aufgearbeitet. Das Ergebnis der Sensitivitätsana-

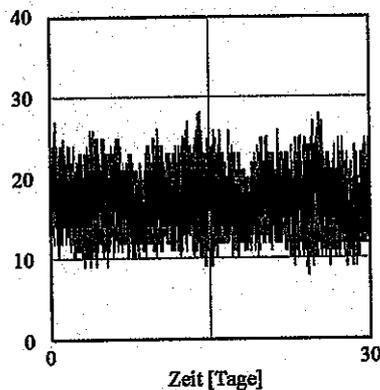


Abb. 9 Sensitivitätsanalyse für die Warteschlangenmethode.

lyse für die Warteschlangenmethode lässt sich aus **Abb. 9** ersehen.

Das Maximum bei Überlast befindet sich hier bei 28 Teilen und das Minimum bei acht Teilen, was einer Schwankungsbreite von 20 Teilen entspricht.

Die pheromonbasierte Steuerung zeigt einen deutlich schlechteren Umgang mit komplexen Einlastsituationen. Sie reagiert nervöser auf die besonders starken Nachfragespitzen (**Abb. 10**). Die Sensitivitätsanalyse für die Steuerung nach dem Pheromonkonzept zeigt eine Schwankungsbreite von 27 Teilen mit einem Maximum von 33 Teilen bei Überlast und sechs Teilen bei Unterlast.

Die Sensitivitätsanalyse der auf dem Verhalten von Honigbienen bei der Futtersuche basierenden Steuerung zeigt hingegen, dass diese bioanaloge Steuerung am besten mit dynamisch schwankender Nachfrage umgehen kann (**Abb. 11**).

Die Schwankungsbreite der Ausschläge bei Überlastsituationen ist, wie in **Abb. 11** leicht erkennbar, mit 14 Teilen deutlich kleiner als bei den anderen beiden

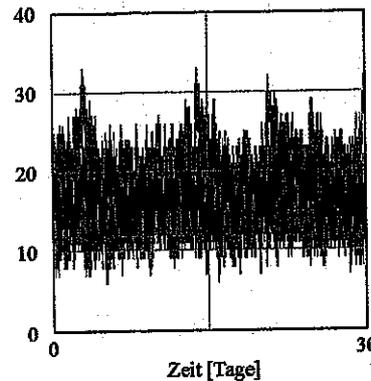


Abb. 10 Sensitivitätsanalyse für die pheromonbasierte Steuerung.

Methoden. Das Maximum liegt hier bei 24 Teilen und das Minimum bei 10 Teilen.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe von bioanalogen Methoden für die Strategien zur Selbststeuerung lässt sich eine drohende Eskalierung des Planungs- und Steuerungsaufwands von starken dynamischen Schwankungen unterliegenden logistischen Netzwerken verhindern. Die vorgestellten, dem Schwarmverhalten sozialer Insekten nachempfundenen Steuerungsstrategien für produktionslogistische Problemstellungen weisen eine mit klassischen Planungs- und Steuerungsstrategien vergleichbare logistische Performanz auf. Sie können aber durch die ihnen inhärente Selbststeuerung, wie insbesondere die dem Futtersuchverhalten von Honigbienen nachempfundene Steuerungsstrategie eindrucksvoll belegt, besser mit dynamischen Schwankungen umgehen und schaffen es dabei zugleich, den Planungs- und Steuerungsaufwand stark zu senken. Das bietet darüber hinaus den Vorteil, dass auf eine zentrale Informationsvorhaltung und die damit verbundene

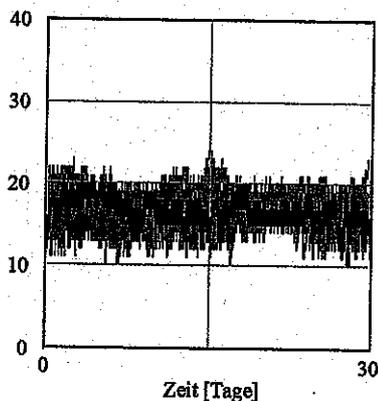


Abb. 11 Sensitivitätsanalyse für die dem Verhalten von Honigbienen bei der Futtersuche nachempfundene Steuerung.

Übermittlung und Speicherung der Informationen verzichtet werden kann, da die bioanalogen Methoden ausschließlich auf lokale Informationen angewiesen sind. Die Transferleistung, die dabei erbracht werden muss, kann – wie gezeigt – durchaus nachvollziehbar gestaltet werden und erfordert nur ein gewisses Maß an Kreativität. Eine ausgedehnte Erforschung natürlichen Verhaltens sowie die weitere Nutzbarmachung natürlicher oder biologisch inspirierter Verfahren für produktionslogistische Problemstellungen sowie eine Ausdehnung auf weitere Problemstellungen in der Logistik, wie beispielsweise Herausforderungen in der Transportlogistik, ist viel versprechend. Von der Natur zu lernen heißt auch und insbesondere Weiterentwicklung. Indem verschiedene biologisch inspirierte Verfahren kombiniert werden, kann eventuell eine jedem gegebenen logistischen Szenario angepasste, verbesserte Selbststeuerungsstrategie entworfen werden.

#### Hinweis

Die diesem Beitrag zugrundeliegenden Forschungsarbeiten wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ gefördert.

#### Literatur

- 1 Armbruster D. de Beer Ch. Freitag M. Jagalski T. Ringhofer Ch. Autonomous Control of Production Networks Using a Pheromone Approach. In: *Physica A* 363 (2006) 1, S. 104-114
- 2 Bonabeau E. Dorigo M. Theraulaz G. *Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems*. New York 1999
- 3 Bonabeau E. Meyer C. *Swarm Intelligence: A Whole New Way to Think About Business*. In: *Harvard Business Review* 2001, S. 106-114
- 4 Böse F. Piotrowski J. Windt K. Selbststeuerung in der Automobil-Logistik. In: *Industrie Management* 20 (2005) 4, S. 37-40
- 5 Camazine S. Sneyd J. A model of collective nectar source selection by honey bees: self-organization through simple rules. In: *Journal of Theoretical Biology* (1991) Vol. 149, S. 547-571
- 6 de Castro L.N. Fundamentals of natural computing: an overview. In: *Physics of Life Reviews* 4 (2007), S. 1-36
- 7 Dorigo M. Gambardella L.M. Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Travelling Salesman Problem. In: *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (1997) Vol. 1
- 8 Freitag M. Scholz-Reiter B. Herzog O. Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management* 20 (2004) 1, S. 23-27
- 9 Kim J.-H. Duffie N. A. Backlog control for a closed loop PPC system. In: *CIRP Annals* 53 (2004) 1, S. 357-360
- 10 Kuhn A. Hellingrath H. *Supply Chain Management – Optimierte Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette*. Berlin 2002

- 11 Peeters P. v. Brussel H. Valckenaers P. Wyns J. Bongaerts L. Heikkilä T. Kollingbaum M. Pheromone Based Emergent Shop Floor Control System for Flexible Flow Shops. In: Proceedings of the International Workshop on Emergent Synthesis IWES 1999, S. 173-182
- 12 Pfohl H.-C. Wimmer T. (Hrsg.): Wissenschaft und Praxis im Dialog: Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung. Hamburg 2006
- 13 Schmickl T. Sammeln, Verteilen und Bewerten von Informationen: Verteilte Intelligenz in einem Bienenvolk. Wien 2003
- 14 Scholz-Reiter B. Delhoum S. Zschintzsch M. Jagalski Th. Freitag M. Inventory control in shop floors, production networks and supply chains using System Dynamics. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Konferenzband zur 12. ASIM Fachtagung "Simulation in Produktion und Logistik". Erlangen 2006, S. 273-282
- 15 Scholz-Reiter B. Freitag M. de Beer Ch. Jagalski T. Modelling Dynamics of Autonomous Logistic Processes: Discrete-event versus Continuous Approaches. In: Annals of the CIRP 55 (2005) 1, S. 413-417
- 16 Scholz-Reiter B. Freitag M. de Beer Ch. Jagalski T. Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control. In: Proc. of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Florianopolis 2005
- 17 Scholz-Reiter B. Jagalski T. de Beer C. Freitag M. Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times. In: Proceedings of the 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Liverpool 2007
- 18 Scholz-Reiter B. Jagalski T. de Beer Ch. Selbststeuerung logistischer Prozesse in Produktionsnetzen. In: Industrie Management 23 (2007) 1, S. 19-22
- 19 Scholz-Reiter B. Jagalski T. Peters K. Wenning B.-L. Freitag M. Timm-Giel A. de Beer C. Strategies of Social Insects and Other Bio-Inspired Algorithms for Logistics: State of the Art and New Perspectives. In: Timm I.J. (Hrsg.): Proc. of the Workshop on Applied Artificial Intelligence and Logistics at the 27th German Conference on Artificial Intelligence (KI2004). Ulm 2004
- 20 Scholz-Reiter B. Windt K. Freitag M. Autonomous logistic processes. New Demands and First Approaches. In: Proceedings of the 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems 2004, S. 357-362
- 21 Scholz-Reiter B. Jagalski T. Dynamics of autonomous control in production logistics. In: Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society. Athens 2008
- 22 Seeley T. Camazine S. Sneyd J. Collective decision-making in honey bees: how colonies choose among nectar sources. In: Behavioral Ecology and Sociobiology (1991) Vol. 28, S. 277-290
- 23 Seeley T.D. Honey bee foragers as sensory units of their colonies. In: Behavioral Ecology and Sociobiology (1994) 34, S. 51-62
- 24 Windt K. Philipp T. de Beer C. Scholz-Reiter B. Evaluation of Autonomous Logistic Processes - Analysis of the Influence of Structural Complexity. In: Hülsmann M. Windt K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow. Berlin 2007
- 25 Scholz-Reiter B. et al. Autonomous Logistic Processes: Discrete-event versus Continuous Approaches. In: Annals of CIRP 55 (2005) 1, S. 414
- 26 Scholz-Reiter B. et al. Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen. In: H.-Ch. Pfohl & T. Wimmer (Hrsg.): Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung. Hamburg 2006, S. 20

**Prof. Dr.-Ing. Bernd**

**Scholz-Reiter**, geboren 1957 in Rodenberg, studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Berlin. Dort wurde er 1990 promoviert, danach Postdoc als IBM World Trade Postdoctoral Fellow am



IBM T.J. Watson Research Center in Yorktown Heights, N.Y., USA. Von 1994–2000 Professor für Industrielle Informationstechnik an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus und gleichzeitig von 1998–2000 Leiter des Fraunhofer Anwendungszentrums für Logistiksystemplanung und Informationssysteme. Seit 2000 Professor für Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme an der Universität Bremen. Geschäftsführer des Bremer Instituts für Produktion und Logistik GmbH (BIBA), Sprecher des Sonderforschungsbereichs „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen und der International Graduate School for Dynamics in Logistics.

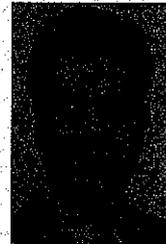
Ziel seiner Forschung ist es, neue Konzepte, Methoden und informationstechnische Lösungen zu entwickeln, die einerseits zur Verbesserung der Planung und Steuerung von logistischen Prozessen dienen und andererseits das Systemverständnis und die Qualifikation der Menschen in diesen sozio-technischen Systemen erhöhen.

Er ist u.a. ordentliches Mitglied der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften *acatech* und der Berlin Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften. Seit 2007 ist er Vizepräsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Prof. Dr. Bernd Scholz-Reiter  
Bremer Institut für Produktion und Logistik  
GmbH an der Universität Bremen  
Hochschulring 20  
28359 Bremen

**Thomas Jagalski M.Sc.**

**(Econ. & Mgmt.)**, geboren 1969 in Gelsenkirchen, studierte Volkswirtschaftslehre und Management an der Humboldt-Universität zu Berlin. Seit 2004 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich „Selbst-



steuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen.

Seine Forschungsgebiete sind die Modellierung und die Analyse der Dynamik bioanaloger Prozesse in der Produktionslogistik.

Thomas Jagalski, M.Sc.  
Bremer Institut für Produktion und Logistik  
BIBA-IPS  
Hochschulring 20  
28359 Bremen