

# Bienenalgorithmen zur Selbststeuerung logistischer Prozesse

Bernd Scholz-Reiter, Thomas Jagalski, Universität Bremen und Julia Bendul, Bundesvereinigung Logistik e.V.



Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter ist Professor für Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme am Fachbereich Produktionstechnik der Universität Bremen und Direktor des Bremer Instituts für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA) sowie Herausgeber der Zeitschriften Industrie Management und PPS Management.



Thomas Jagalski, M.Sc. (Economics and Management) ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistische Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen sowie leitender Redakteur der Zeitschrift Industrie Management.



Dipl.-Wirtsch.-Ing. Julia Bendul arbeitet als wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Bundesvereinigung Logistik e.V. (BVL) in Bremen und ist externe Doktorandin an der Universität Bremen im Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme.

mehr zur Kernkompetenz von Unternehmen, um auch zukünftig erfolgreich am Markt agieren zu können. Heutige Produktionsplanungs- und -steuerungsansätze sind zunehmend nicht mehr in der Lage, den steigenden Anforderungen – erwachsend aus Dynamik und Komplexität – gerecht zu werden [1]. Dieser Beitrag stellt einen neuen bioanalogen Ansatz für die Produktionsplanung und -steuerung dar, der auf den Kommunikationsmechanismen von Honigbienen basiert und damit deutlich von den bereits bekannten pheromonbasierten Ansätzen zur Selbststeuerung produktionslogistischer Prozesse [2] abweicht.

Mithilfe einer Simulationsstudie wird das Potenzial des vorgestellten Ansatzes hinsichtlich des Umgangs mit den dynamischen Umgebungsbedingungen aufgezeigt. In einem matrixförmigen Produktionsszenario mit Rüstzeiten wird das Verhalten der Kennwerte für Durchlaufzeiten und Pufferfüllstände sowie

die Flexibilität im Umgang mit unerwarteten Vorkommnissen, wie beispielsweise Maschinenausfällen, des Ansatzes analysiert.

## Selbststeuerung in der Produktion

Dezentrale Selbststeuerungsstrategien erlauben es, heterarchische Steuerungsstrategien zu entwickeln, um zeitnah und effizient auf Veränderungen im komplexen Unternehmensumfeld reagiert zu können. Dazu werden Entscheidungsfunktionalitäten auf einzelne logistische Objekte verlagert, die durch neue Informations- und Kommunikationstechnologien in die Lage versetzt werden, Daten zu verarbeiten und zu bewerten, Entscheidungen zu treffen und Aktionen zu initiieren beziehungsweise mit anderen logistischen Objekten zu kommunizieren [3].

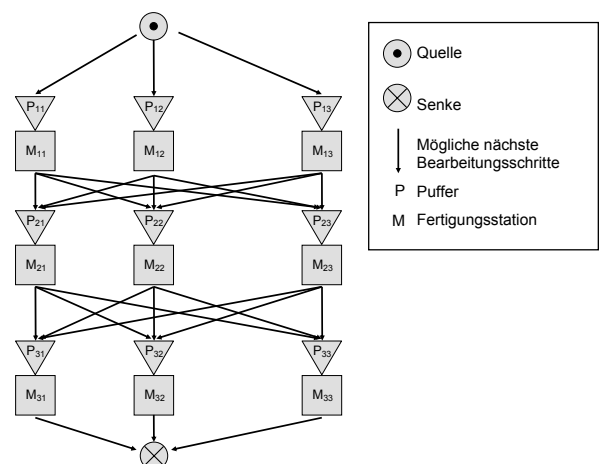
Auf die Stufe der Werkstattsteuerung übertragen bedeutet Selbststeuerung, dass beispielsweise Teile und Maschinen

Die Fähigkeit, sich den dynamischen Bedingungen der internen und externen Umwelt anzupassen, wird immer

### Kontakt:

Universität Bremen  
 Fachgebiet PPS  
 Postfach 33 05 60  
 28335 Bremen  
 Tel.: 0421 / 218-9786  
 E-Mail: jag@biba.uni-bremen.de  
 URL: <http://www.biba.uni-bremen.de/psps>

Bild 1: Schematische Darstellung des Produktionsszenarios.



aufgrund lokaler Informationen Entscheidungen über die Bearbeitungsreihenfolge oder die Route durch das Maschinennetz treffen können. Durch diese Dezentralisierung wird es möglich, dass schnell und flexibel auf kurzfristige Änderungen und unerwartete Vorkommnisse reagiert werden kann.

Gemäß der am Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ entwickelten globalen Definition bedeuten selbststeuernde Prozesse, Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Selbststeuerung 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 [4].

Zur Realisierung einer solchen autonomen Entscheidungsfindung werden lokale Entscheidungsregeln benötigt. Bei der Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden steht nicht selten die Natur Modell: häufig wird dabei auch auf die Erkenntnisse aus dem Gebiet der Swarm-Intelligence zurückgegriffen.

## Insektenstaaten als Vorbild für dezentrale Entscheidungsfindung

Insektenstaaten wie Ameisen, Termiten und Bienen sie bilden, zeigen ein eindruckvolles Verhalten im Umgang mit ihrer dynamischen Umwelt, das auf wenigen, einfachen und lokalen Entscheidungsregeln beruht. Obwohl ein einzelnes Mitglied der Kolonie nicht in der Lage ist, globale Entscheidungen zu treffen, erwächst ein hoch entwickeltes kollektives Verhalten durch einfache Interaktionen zwischen den Gruppenmitgliedern. Komplexe Probleme, die über die Fähigkeiten des einzelnen Mitglieds der Gruppe hinausgehen, werden durch die Befolgung einfacher Regeln erfolgreich und effizient gelöst. Insektenstaaten sind gekennzeichnet durch ein

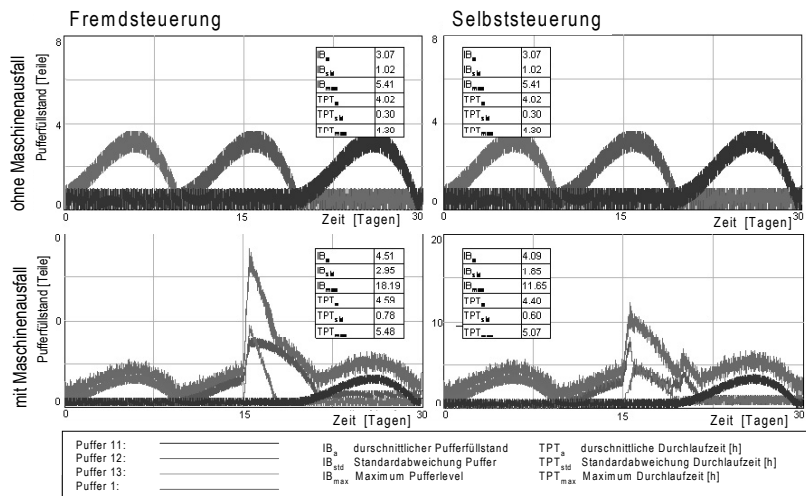


Bild 2: Gegenüberstellung der Pufferfüllstände und Durchlaufzeitkennwerte für ein fremd- und selbstgesteuertes Produktionsszenario.

hohes Level von Adaptivität, Robustheit und Selbstorganisation. Einige dieser Eigenschaften sind bereits auf diverse verteilte Optimierungsprobleme u.a. in den Bereichen der Telekommunikation, Transport und Fertigung übertragen worden [5].

Im Rahmen des SFB 637 wurde bereits ein Selbststeuerungskonzept für die Werkstattsteuerung basierend auf dem Futtersuchverhalten von Ameisen mit unterschiedlichen Bearbeitungszeiten [2] sowie mit Rüstzeiten [6] vorgestellt. Auf der Suche nach neuen Ansätzen scheinen aber auch nicht-pheromonbasierte Ansätze, wie sie sich beispielsweise aus der Analogie zum Verhalten von Honigbienen generieren lassen, viel versprechend.

## Selbstorganisation des Futtersuchverhaltens von Honigbienen

In einem Bienenstaat wirken vielfältige Mechanismen basierend auf einfachen Regeln und Verhaltensformen, die sich auf das dezentrale Entscheidungsfindungsproblem von intelligenten logistischen Objekten in der Fertigung übertragen lassen.

Ein Bienenstaat hat für gewöhnlich diverse Futterquellen zur Auswahl. Eine Biene, die eine Futterquelle besucht hat, entscheidet anschließend, ob sie diese Quelle mit dem so genannten Schwänzeltanz bewirbt, ob sie die

Nahrungssuche ohne Unterbrechung fortsetzt, oder ob sie in den Pool der untätigen Arbeiterbienen zurückkehrt. Für den Fall, dass die Biene entscheidet, eine Futterquelle zu bewerben, führt sie eine Bewertung der Futterquelle durch, indem sie die heimgebrachte Energie ins Verhältnis setzt. Das Verhältnis dient als Basis für die Entscheidung über die Länge des Schwänzeltanzes, der den beobachtenden Bienen unter anderem die generelle Richtung, die Entfernung und die Qualität der Futterquelle mitteilt [7].

Die Wahrscheinlichkeit, dass eine der Beobachter-Bienen für eine bestimmte Futterquelle angeworben wird, ist direkt proportional zu der Anzahl von Umläufen, die ein Tanz dauert. Die Länge des Tanzes ist also abhängig von der Qualität der Quelle und folglich werden mehr Bienen für eine bessere Futterquelle rekrutiert. Experimente haben gezeigt, dass Zuschauer-Bienen in der Regel nur einen Tanz verfolgen und diesen auch noch vor seinem Ende verlassen, also die beobachtenden Bienen keinen Vergleich der tanzenden Bienen vornehmen.

## Transfer des Kommunikationsmechanismus auf ein Maschinensystem

Ebenso wie eine Biene entscheidet, zu welcher Blume sie als nächstes

fliegen wird, muss in einem selbststeuernden Produktionsszenario ein zu bearbeitendes Teil selbst entscheiden, welche Maschine den nächsten Bearbeitungsschritt durchführen soll. Selbst wenn eine Maschine generell eine kurze Bearbeitungszeit für eine bestimmte Teileart offeriert, kann eine Miteinbeziehung von Transportzeiten, Warteschlangenlänge und notwendige Rüstprozesse die Entscheidungsfindung erheblich verbessern. Analog zu der von den Bienen verwendeten Gleichung zur Bewertung von Futterquellen, die von Seeley [8] beschrieben wurde, kann ein dimensionsloser Wert für die Maschinenqualität  $MQ_{mk}$  berechnet werden, indem der Nutzen an einer Maschine zu den verursachten Kosten ins Verhältnis gesetzt wird. Jeder Produktionsstufe und jeder Teileart wird daher ein Value Added  $VA_{mk}$  zugewiesen von dem die Kosten, entstanden durch die Bewertung der Durchlaufzeit  $TPT_{mnk}$  mit Kostenfaktor  $R$ , abgezogen und anschließend zu diesen ins Verhältnis gesetzt werden. Diese zeitabhängige Gleichung ist die Grundlage für die Festlegung der Dauer eines Signals der Stärke 1:

$$MQ_{mnk}(t) = \frac{VA_{mnk} - TPT_{mnk}(t) * R}{TPT_{mnk}(t) * R} \quad (1)$$

Die Summe aller aktuellen Signale für ein bestimmte Maschine und eine bestimmte Teileart ist wiederum der Entscheidungsfindungswert zur Wahl des nächsten Bearbeitungsschritts für die nachfolgenden Teile.

### Das Produktionsszenario

Um zu zeigen, dass die entwickelte Steuerungsmethode effektiv und flexibel mit Komplexität und Dynamik im Fertigungsumfeld umgehen kann, wird ein matrixförmiges Simulationsmodell mit drei parallelen Produktionslinien und jeweils drei Maschinen  $M_{ij}$  verwendet (Bild 1). Der Auftragseingang erfolgt in phasenverschobenen Sinuskurven. Die Amplitude beträgt  $a_i=0,25$ . Ein vollständiger neuer Auftrag je Teiletyp gelangt durchschnittlich alle 2:24 h in das Produktionssystem. Jede Produktionslinie ist in der Lage, alle Teiletypen zu bear-

beiten. Die Bearbeitungszeit ist jedoch nur für eine Linie optimal mit 2:00 h und steigt auf 2:30 h und 3:00 h für die zweit- und drittbeste Wahl. Die Produktionslinien sind auf jeder Stufe gekoppelt, sodass die Teile nach jedem Bearbeitungsschritt aufgrund lokaler Informationen autonom entscheiden können, ob sie zu einer anderen Linie wechseln und somit von ihrem Basis-Arbeitsplan abweichen (für die Topologie des produktionslogistischen Szenarios siehe auch [9,10]).

### Simulationsergebnisse

Bild 2 (oben) zeigt die Füllhöhe der Puffer vor der ersten Maschinenreihe. Die Maschinenpuffer auf den nachfolgenden Produktionsstufen, verhalten sich qualitativ identisch, jedoch sind die Auftragseingänge bereits durch die erste Bearbeitungsstufe geglättet. Die linke Seite zeigt die Ergebnisse für ein konventionelles fremdgesteuertes System, das die Teile jeweils der Maschine mit der theoretisch niedrigsten Bearbeitungszeit zuweist. Aufgrund der bis auf die Phasenverschiebung identischen Ankunftsfunktionen weisen die Kurven einen identischen Verlauf auf. Die Pufferfüllhöhe verdeutlicht die Oszillation des sinusförmigen Auftragseingangs. Innerhalb einer Simulationsperiode von 30 Tagen treten demgemäß drei maximale Pufferstände von 5,41 Teilen auf und ein durchschnittlicher Pufferbestand von 3,07 Teilen kann beobachtet werden. Die Standardabweichung beträgt 1,02 Teile. Solange keine Störung im Produktionsablauf auftritt, ergeben sich für das selbstgesteuerte System identische Kurvenverläufe und Kennwerte.

Bild 3: Rüstzeiten für Produktwechselprozesse an verschiedenen Maschinen.

Rüstzeit [min] Produktwechsel $x \Rightarrow y$	Maschine $M_{m1}$	Maschine $M_{m2}$	Maschine $M_{m3}$
A $\Rightarrow$ B	30	10	60
A $\Rightarrow$ C	60	30	10
B $\Rightarrow$ A	10	60	30
B $\Rightarrow$ C	60	30	10
C $\Rightarrow$ A	10	60	30
C $\Rightarrow$ B	30	10	60

Um die Flexibilität des Systems aufzeigen zu können, wird nach 15 Tagen Simulationszeit ein 12-stündiger Maschinenausfall der Maschine  $M_{12}$  modelliert. Der untere Teil von Bild 2 zeigt, dass sich im fremdgesteuerten System die Teile im Puffer solange anstauen, bis die Maschine wieder einsatzbereit ist. Demgegenüber verteilen sich die Teile in einem selbstgesteuerten System selbständig auf die anderen Maschinen. Der maximale Pufferfüllstand steigt auf nur 11,65 Teile anstatt auf 18,19 Teile. Dementsprechend sinken auch die Standardabweichung (von 2,95 auf 1,85 Teile) und das durchschnittliche Pufferlevel (von 4,51 auf 4,09 Teile).

Diese Effekte spiegeln sich auch in den Durchlaufzeitkennwerten wieder. Im Gegensatz zum System ohne Maschinestörung wird die durchschnittliche Durchlaufzeit von 4,02 h auf 4,59 h im fremdgesteuerten Fall und auf 4,40 h im selbstgesteuerten Fall erhöht. Gleichzeitig steigt die maximale Durchlaufzeit auf 5,48 h für das fremdgesteuerte System und 5,07 h für das selbststeuernde System gegenüber dem Ausgangswert von 4,30 h. Die vielleicht wichtigste Kennzahl der Standardabweichung der Durchlaufzeit steigt von 0,30 h auf 0,78 h für den Fall der Fremdsteuerung, aber lediglich auf 0,60 h für das selbstgesteuerte System.

### Szenario mit Rüstzeiten

Um das Szenario realitätsnäher zu gestalten, werden Rüstzeiten in das Simulationsmodell implementiert (Bild 3). Im Gegenzug dazu wird die Bearbeitungszeit für alle Maschinen und Produktarten auf 2:00 h vereinheitlicht. Folglich muss auch die Prioritätsregel

Amplitude $a$		0.3		0.5	
Kommunikation des Rüstzustandes? (ja/nein)		nein	ja	nein	ja
Pufferstand [Stück]	$IB_a$	5.88	5.74	6.89	6.44
	$IB_{std}$	1.78	1.02	1.76	1.50
	$IB_{max}$	11.87	9.07	13.38	11.45
Durchlaufzeit [h]	$TPT_a$	6.68	6.18	7.37	6.91
	$TPT_{std}$	0.46	0.20	0.38	0.25
	$TPT_{max}$	7.83	6.79	8.50	7.43

*Bild 4: Vergleich der Puffer- und Durchlaufzeitkennzahlen für das Szenario mit und ohne Kommunikation des Rüststatus.*

für die Entnahme aus den Puffern der Maschinen von FIFO (first-in-first-out) auf eine Regel, die die Rüstvorgänge minimiert, geändert werden. Diese Regel hat zur Folge, dass ein Rüstvorgang erst dann ausgeführt wird, wenn alle Teile der Sorte des aktuellen Rüstzustands aus dem Puffer entnommen sind.

Der Kern des Selbststeuerungsansatzes für ein Szenario mit Rüstzeiten ist die Weitergabe der Information über den aktuellen Rüstzustand an die nachfolgenden intelligenten Teile, die diese Information in ihre Entscheidungsfindung mit einbeziehen können. Obwohl es in einem Bienenstock keinen mit einem Rüstvorgang vergleichbaren Prozess gibt, kann seine Bedeutung einfach in den bestehenden Entscheidungsalgorithmus implementiert werden. Wie oben beschrieben wurde die Signalstärke auf den Wert 1 festgelegt. Indem dieser Wert für eine Zeiteinheit auf einen bestimmten Wert erhöht wird, kann eine zusätzliche Werbung für eine bestimmte Maschine und eine bestimmte Produktart nur für den direkten Nachfolger realisiert werden.

Die Simulationsergebnisse konnten für sämtliche Puffer- und Durchlaufzeitkennzahlen durch die Hinzunahme zusätzliche Information verbessert werden. Die Simulation hat gezeigt, dass sich dieser positive Effekt besonders deutlich bei stärker schwankenden Einlastsituationen zeigt. Bild 4 gibt die Ergebnisse für die Einlastungen mit den Amplituden der Sinusschwingung  $a_2 = 0,3$  und  $a_3 = 0,5$  wieder.

Besonders hervorzuheben sind die Werte für die Standardabweichung der Durchlaufzeit, die um mehr als die Hälfte für  $a_2$  (von 0,46 h auf 0,20 h) und etwa ein Drittel für  $a_3$  (von 0,38 h auf 0,25 h) reduziert werden konnte. In beiden

Fällen konnte der maximale Pufferfüllstand um ca. 2 Teile von 11,87 auf 9,07 Teile beziehungsweise von 13,38 auf 11,45 Teile reduziert werden. Darüber hinaus konnten der durchschnittliche Pufferfüllstand von 5,88 auf 5,74 Teile für  $a_2$  und von 6,89 auf 6,44 Teile für  $a_3$  reduziert werden.

## Zusammenfassung

Die Steuerungsmechanismen zu Entscheidungsfindung für die Nahrungsaufnahmen in Insektenstaaten und insbesondere in Bienenstöcken zeichnen sich durch ihre Dezentralität und Einfachheit einerseits, und durch ihre Effektivität andererseits aus. Die Simulation des Transfers dieser Mechanismen auf ein Produktionsszenario mit Rüstzeiten hat gezeigt, dass eine Anwendung dieser einfachen, lokalen Entscheidungsregeln nicht nur möglich ist, sondern auch die resultierenden positiven Eigenschaften des biologischen Vorbilds, wie zum Beispiel Flexibilität und Adaptivität, auf das logistische System übertragen werden können.

## Literatur

- [1] Kim, J.-H., Duffie, N.A.: Backlog Control for a Closed Loop PPC System. In: Annals of the CIRP 53 (2004) 1, S. 357-360.
- [2] Armbruster, D., de Beer, C., Freitag, M., Jagalski, Th., Ringhofer, C.: Autonomous Control of Production Networks Using a Pheromone Approach. In: Physica A 363 (2006), S. 104-114.
- [3] Fleisch, E., Kickuth, M., Dierks, M.: Ubiquitous Computing: Auswirkungen auf die Industrie. In: Industrie und Management 19 (2003) 6, S. 29-31.
- [4] Hülsmann, M., Windt, K. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Com-

munication and Material Flow. Berlin 2007.

- [5] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G.: Swarm Intelligence. From Natural to Artificial Systems. New York 1999.
- [6] 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.
- [7] Camazine, S.D., Deneubourg, J.-L., Franks, N.R., Sneyd, J., Theraulaz, G., Bonabeau, E.: Self-Organization in Biological Systems. New Jersey 2001.
- [8] Seeley, T.D.: Honey bee foragers as sensory units of their colonies. In: Behavioral Ecology and Sociobiology 34 (1994) 1, S. 51-62.
- [9] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., Jagalski, T.: Modelling dynamics of autonomous logistic processes: Discrete-event versus continuous approaches. In CIRP Annals 55 (2005) 1, S. 413-416.
- [10] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, C., Jagalski, T.: Modelling and analysis of autonomous shop floor control. In: Proceedings of the 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Florianopolis 2005.

## Schlüsselwörter:

Produktionssteuerungsverfahren, Produktionslogistik, Selbststeuerung, Schwarm-Intelligenz, Bienen

### Autonomous Control of Production Systems using Honey-Bee-Algorithms

This paper focuses on the application of a bee-like autonomous control method to a matrix-like shop floor model with setup times. Apparently present planning and control systems are unable to cope with the new needs for flexibility and process reliability resulting from dynamics and complexity in the environment. Autonomous control means de-centralized coordination of intelligent logistic objects in a dynamically changing environment. By the aid of a continuous flow simulation the system's performance will be analyzed in regard to the application effect on throughput times and inventory levels.

*Keywords:* manufacturing control, production logistics, autonomy, swarm-intelligence, bees