

# Evolution in der Logistik

## Selbststeuerung logistischer Prozesse

**B. Scholz-Reiter, C. de Beer, F. Böse, K. Windt,**  
Universität Bremen;

### Kurzfassung

Die Evolution der Logistik lässt sich zurzeit besonders durch den Paradigmenwechsel hin zu selbststeuernden Prozessen in der Logistik beobachten. Der vorliegende Beitrag verdeutlicht, dass nicht die vollkommene Selbststeuerung in logistischen Systemen das Ziel ist, sondern eine adäquate Erhöhung des Grades der Selbststeuerung. Dadurch können die vielfältigen Potenziale, die sich durch emergent auftretende Eigenschaften ergeben, genutzt werden. An ausgewählten Praxisbeispielen wird dies verdeutlicht.

### 1. Einleitung

Heutige Märkte unterliegen vielfältigen Veränderungen, die zu einer immer höheren Komplexität logistischer Systeme führen und damit neue Anforderungen an deren Gestaltung und Steuerung stellen. Typische Beispiele für diese marktorientierten Veränderungstreiber sind die zunehmende Kundenorientierung, kürzere Produktlebenszyklen bei zunehmender Variantenvielfalt oder die ansteigende Vernetzung von Unternehmen [1]. Die Bewältigung dieser neuen Anforderungen erfordert Logistikkonzepte und Methoden, die eine hohe Flexibilität und Adaptivität des Logistiksystems gewährleisten [2].

Konventionelle logistische Planungs- und Steuerungssysteme werden diesen Anforderungen nicht gerecht: die zentrale, sequentielle Planung basiert auf stark vereinfachten Prämissen (prognostizierbare Durchlaufzeiten, fixe Operationszeiten der Aufträge etc.), erfolgt zeitlich weit vor der Auftragsfreigabe und sieht damit keine Rückkopplung zwischen den Teilsystemen sowie zeitnahe Änderungen des erstellten Plans zur Laufzeit vor [3]. Demzufolge sind bei stark fluktuierender Nachfrage oder unerwarteten Störungen zentrale Planungs- und Kontrollinstanzen nicht hinreichend leistungsfähig. Diese grundsätzlichen Schwachstellen konventioneller logistischer Planungs- und Steuerungssysteme machen eine Weiterentwicklung von Logistiksystemen erforderlich. Eine Möglichkeit ist die Implementierung von dezentralen Planungs- und Steuerungsmethoden auf Basis autonomer logistischer Objekte in selbststeuernden Logistiksystemen.

Der in der Logistikforschung in den letzten Jahren zunehmend untersuchte Paradigmenwechsel von der konventionellen Fremdsteuerung logistischer Systeme hin zur Selbststeuerung dezentraler autonomer Systeme kann als Evolution in der Logistik bezeichnet werden, da dies eine scheinbare natürliche Weiterentwicklung ist, wie sie auch in anderen Wissenschaftsdisziplinen beobachtet werden kann. Beispielhaft sei hier die Informatik mit dem Trend zum Organic Computing [4] sowie das Internet genannt, welches

durch das dezentrale Routing eine große Flexibilität und Robustheit aufweist [5]. Weiterhin ist aus der Biologie bekannt, dass sich soziale Insekten zu dezentral organisierten Systemen ohne eine zentrale Kontrollinstanz entwickeln, die eine hohe Adaptivität und Robustheit aufweisen [6]. Die Potenziale und Grenzen dieses neuen Evolutionsschritts in der Logistik in Form der Selbststeuerung werden in dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG geförderten Sonderforschungsbereich SFB 637 „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen untersucht [6].

## **2. Anwendungspotenziale und Grenzen der Selbststeuerung**

Charakteristisches Merkmal der Selbststeuerung in logistischen Systemen ist die Verlagerung von Entscheidungsfunktionen von der zentralen Planungs- und Steuerungsinstanz auf die logistischen Objekte. Selbststeuerungsmethoden weisen damit einen dezentralen, heterarchischen Charakter gegenüber zentralen, hierarchischen Ansätzen bei konventioneller Fremdsteuerung auf [3]. Zu den logistischen Objekten zählen sowohl materielle Objekte (Maschinen, Bauteile etc.) als auch immaterielle Objekte (Produktionsauftrag, Kundenauftrag etc.) eines Logistiksystems. Selbststeuernde logistische Objekte können autonom agieren und ihren Weg innerhalb des betrachteten Logistiknetzwerks selbst – d.h. gemäß ihren eigenen Zielsetzungen – bestimmen [7]. Aufbauend auf den Ergebnissen im SFB 637 wird der Terminus Selbststeuerung wie folgt definiert:

„Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-deterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit und positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte, flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität.“ [8]

Für die Ingenieurwissenschaften wurde aus dieser globalen Selbststeuerungsdefinition folgende, auf die Kernfunktionen logistischer Objekte in selbststeuernden Logistiksystemen fokussierte Definition hergeleitet:

Selbststeuerung logistischer Prozesse ist gegeben, wenn das logistische Objekt Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung selbst leistet.“ [9]

Der eingangs beschriebene Evolutionsschritt von der Fremdsteuerung logistischer Systeme hin zur Selbststeuerung basiert auf der Annahme, dass die Implementierung selbststeuernder logistischer Prozesse bei der zunehmenden Komplexität heutiger Logistiksysteme eine bessere Zielerreichung logistischer Zielgrößen erlaubt als konventionell fremdgesteuerte logistische Prozesse. Von besonderem Forschungsinteresse ist dabei die Fragestellung, welcher Selbststeuerungsgrad für ein betrachtetes Logistiksystem mit einem gegebenen Komplexitätsgrad zu einer optimalen logistischen Zielerreichung führt. Das

Spannungsfeld zwischen logistischer Zielerreichung, Komplexität und Selbststeuerungsgrad eines Logistiksystems ist in Bild 1 dargestellt.

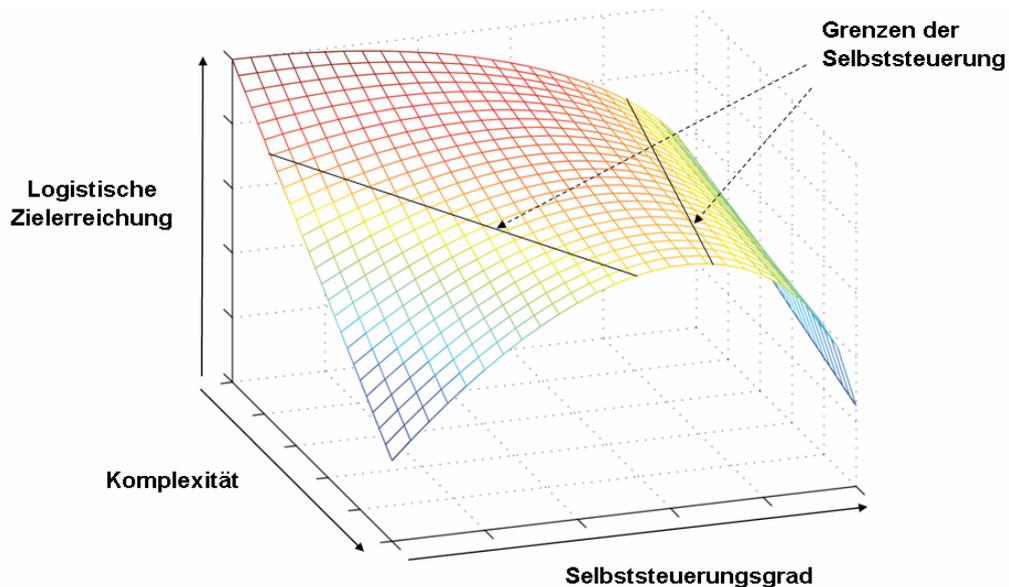


Bild 1: Anwendungspotenziale und Grenzen der Selbststeuerung.

Zur Bestimmung der Anwendungspotenziale und Grenzen der Selbststeuerung wurde ein Evaluierungssystem entwickelt, das die Messung der logistischen Zielerreichung, der Komplexität sowie des Selbststeuerungsgrads und damit die Herleitung der Anwendungspotenziale und Grenzen in Form der in Bild 1 antizipativ dargestellten Kurve erlaubt [10] [11] [12]. Grundlage für den abgebildeten Kurvenverlauf sind die folgenden Annahmen:

- Je komplexer das betrachtete Logistiksystem ist, desto geringer ist die logistische Zielerreichung.
- Logistiksysteme mit geringer Komplexität weisen bei einem geringen Selbststeuerungsgrad eine höhere logistische Zielerreichung auf als bei hohem Selbststeuerungsgrad.
- Der optimale Selbststeuerungsgrad in komplexen Logistiksystemen entspricht nicht dem maximalen Selbststeuerungsgrad. Für ein gegebenes hohes Komplexitätsniveau steigt die logistische Zielerreichung bei zunehmenden Selbststeuerungsgrad an, erreicht ein Optimum und fällt anschließend wieder ab.

Anhand des Kurvenverlaufs lassen sich für ein betrachtetes Logistiksystem für einen vorgegebenen, mindestens zu erreichenden logistischen Zielerreichungsgrad die Grenzen und damit die Anwendungspotenziale der Selbststeuerung identifizieren. Dazu wird eine Ebene für den vorgegebenen, mindestens zu erreichenden logistischen Zielerreichungsgrad in das 3D-Diagramm eingezeichnet. Die Schnittstellen der Ebene mit der Kurve stellen die Grenzen der Selbststeuerung dar.

### 3. Positive Emergenz selbststeuernder logistischer Prozesse

Es stellt sich nun die Frage, mit welchem Selbststeuerungsgrad die gewünschte logistische Zielerreichung realisiert werden kann. Hier dient das Konzept der positiven Emergenz als Erklärungsansatz [13]. Emergente Eigenschaften eines Systems sind solche, die durch die Interaktion der Systemelemente hervorgerufen werden und nicht direkt auf den Eigenschaften einzelner Systemelemente beruhen [13, 14].

Im logistischen Kontext kann dann positive Emergenz verstanden werden als gewünschtes Verhalten des Gesamtsystems in Bezug auf die logistische Zielerreichung, welches nicht durch eine zentrale Kontrollinstanz vorgegeben und geplant wird, sondern durch die Interaktion zwischen den einzelnen logistischen Objekten entsteht und nicht direkt aus den Eigenschaften der einzelnen logistischen Objekte hergeleitet werden kann. Zu diesen emergenten Eigenschaften zählen dann auf der einen Seite messbare Kenngrößen wie mittlere Durchlaufzeiten, Bestände, Auslastungen oder auch Termintreue und deren Verteilungen, auf der anderen Seite aber auch nicht direkt quantifizierbare Größen wie die Flexibilität, Adaptivität und die Robustheit des Systems bezüglich inneren und äußeren Störungen. Diese globalen Eigenschaften bzw. Kenngrößen des Systems entstehen durch die Interaktion der selbststeuernden logistischen Objekte, sind aber nicht notwendigerweise aus den Selbststeuerungsmethoden und damit der Operationalisierung der Selbststeuerung oder den Eigenschaften der logistischen Objekte ableitbar.

„Positiv“ bezieht sich dann auf die gewünschte Ausprägung dieser Größen bzw. Eigenschaften, die durch das logistische System definiert werden und deren Gewichtung auf der logistischen Positionierung beruhen [15].

Zum simulativen Nachweis von positiver Emergenz durch Selbststeuerung wurde die mittlere Durchlaufzeit von selbststeuernden Teilen in einem Produktionsnetzwerk untersucht.

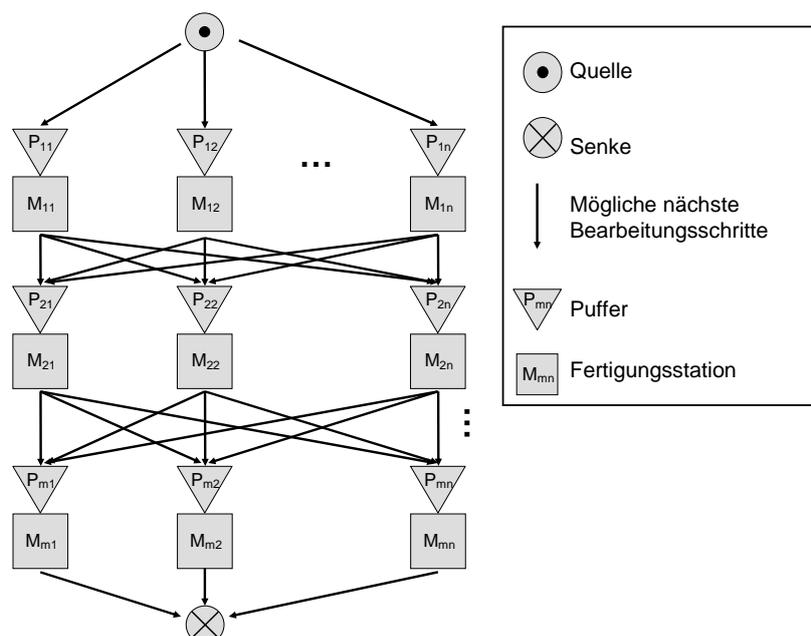


Bild 2: Matrix-Modell einer Fertigung.

Bild 2 zeigt das produktionslogistische Modell einer Fertigung in Matrixform, welches bereits in früheren Arbeiten entwickelt wurde [16, 17]. Die Aufträge für die unterschiedlichen Produkte gelangen an der Quelle in die Fertigung und durchlaufen dann das Modell anhand ihres Produktionsplans auf den für sie vorgesehenen Fertigungsstationen. Dabei gibt es auf jeder Stufe genau eine Station, die, was die Bearbeitungszeit betrifft, die optimale ist. Außerdem gibt es parallele Fertigungsstationen, die geeignet sind, den jeweiligen Bearbeitungsschritt auszuführen. Jedoch muss beim Ausweichen auf parallele Fertigungsstationen eine höhere Durchlaufzeit in Kauf genommen werden; sei es durch Transportzeiten, Rüstzeiten, die für jedes Teil anfallen, oder durch die Tatsache, dass die Fertigungsstationen unterschiedlich spezialisiert sind und daher nur für einen spezifischen Arbeitsschritt die minimale Zeit und für Alternativarbeiten, die nur selten ausgeführt werden, länger benötigen. Dieses Modell wurde in früheren Arbeiten bereits bezüglich Stabilität und Komplexitätseigenschaften untersucht [18,19]. In einem weiteren Schritt wurde jetzt die mittlere Durchlaufzeit der Teile, die durch einen Planungsalgorithmus, der alle zwölf Stunden die eingegangenen Aufträge für die Fertigungsstationen einplant, mit derjenigen von selbststeuernden Teilen verglichen.

Abbildung 3 zeigt die abnehmende mittlere Durchlaufzeit und die verringerte Streuung der Durchlaufzeit von selbststeuernden Teilen im Vergleich zu den Durchlaufzeiten, die durch rolierende Planung erreicht werden.

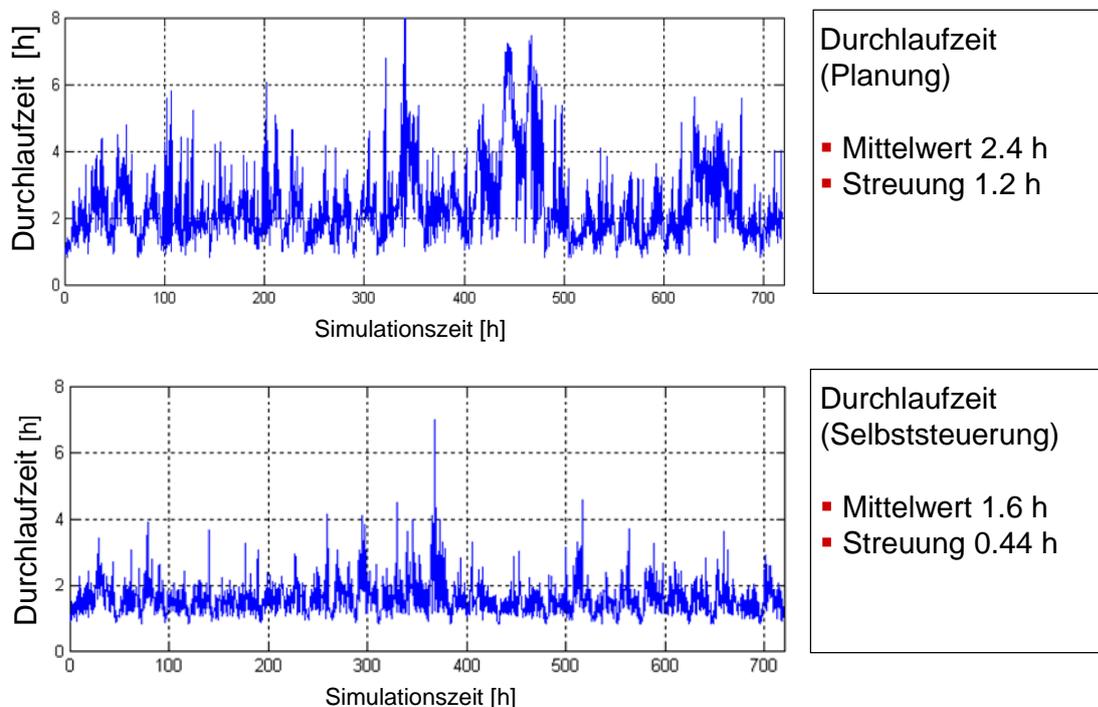


Bild 3: Verbesserte Durchlaufzeit durch Selbststeuerung.

Abbildung 4 zeigt die mittleren Durchlaufzeiten für ein Szenario, in dem zufällig Arbeitsstationen ausfallen. Dies illustriert die verbesserte Robustheit des Systems gegenüber Störungen.

Beispielhaft zeigen diese Simulationsergebnisse, dass durch die Einführung von selbststeuernden logistischen Objekten die logistischen Zielgrößen sowie die Robustheit des Systems gegenüber Störungen als emergente Eigenschaften bzw. Kenngrößen des Systems verbessert werden können.

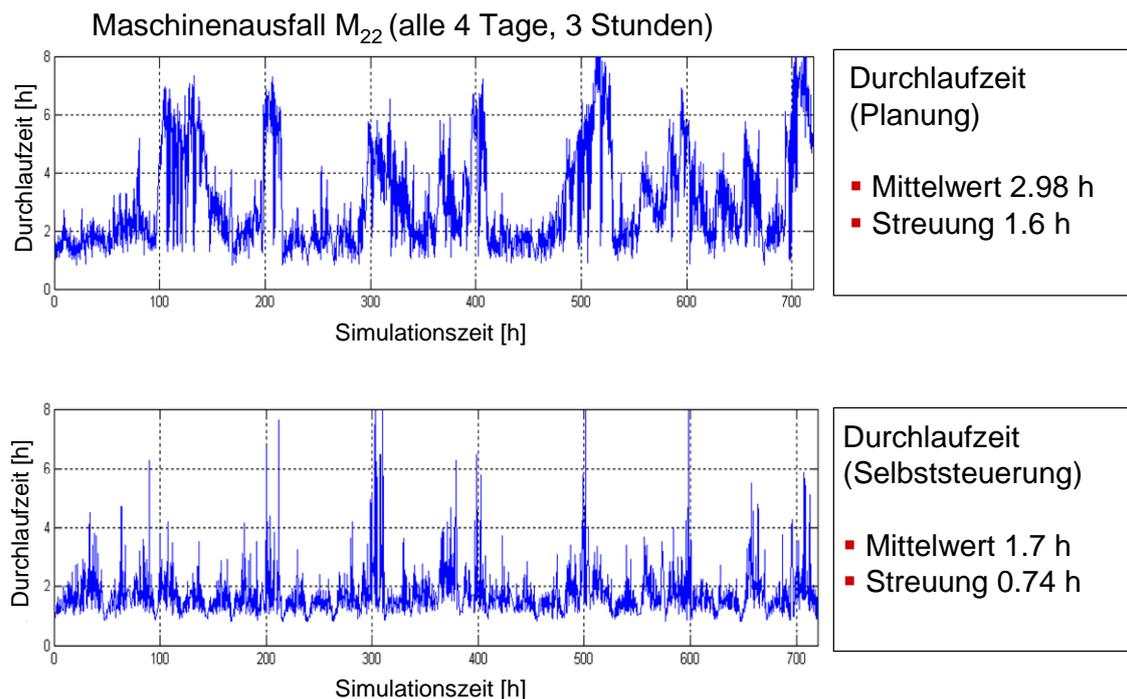


Bild 4: Verbesserte Durchlaufzeit durch Selbststeuerung bei Maschinenausfällen.

#### 4. Erste Schritte in der Evolution zu mehr Selbststeuerung in der logistischen Praxis

Beispielhaft sollen hier drei Fälle von Selbststeuerung in der logistischen Praxis vorgestellt werden, welche die umfangreichen Möglichkeiten der Selbststeuerung in unterschiedlichen Bereichen der Unternehmenslogistik verdeutlichen.

##### **Selbststeuernde Stellplatzvergabe eines Automobilterminals**

Auf Automobil-Terminals werden heute zur Planung und Steuerung logistischer Prozesse in der Regel zentrale Logistiksysteme eingesetzt, die den hohen Anforderungen an eine flexible Auftragsabwicklung aufgrund der zunehmenden Dynamik und Komplexität nicht gerecht werden. Der Fahrzeugdurchlauf auf Automobil-Terminals von der Anlieferung über die Einlagerung und technische Aufbereitung bis hin zur Auslieferung zum Autohändler wird zentral geplant und gesteuert. In Kooperation mit der Firma E. H. Harms GmbH & Co. KG Automobile-Logistics wurden im Rahmen einer Simulationsstudie die Einsatzpotenziale der Selbststeuerung in der Automobillogistik am Beispiel der Stellplatzverwaltung auf dem Auto-Terminal Hamburg untersucht. Gemäß des Begriffsverständnisses der Selbststeuerung im

logistischen Kontext wurden dazu die logistischen Objekte – in diesem Fall die Fahrzeuge und die Stellflächen – in die Lage versetzt, ihre Entscheidungsprozesse autonom durchzuführen. Die Fahrzeuge und die Stellflächen besitzen dabei als autonome logistische Objekte ihre eigenen Stammdaten und agieren unabhängig gemäß ihren eigenen Zielsystemen (vgl. Bild 5).

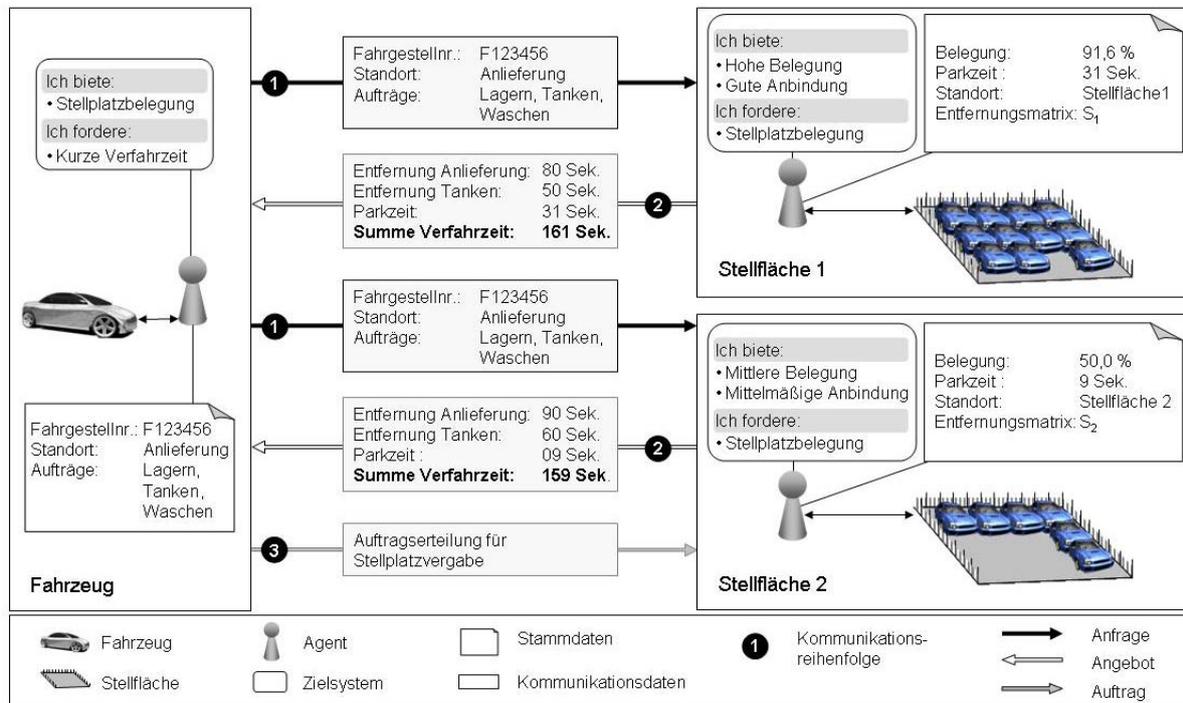


Bild 5: Entscheidungsmethodik zur selbststeuernden Stellplatzverwaltung [20].

Jedes Fahrzeug bietet den einzelnen Stellflächen die Belegung eines Stellplatzes an und verfolgt selbst das Ziel einer möglichst geringen Verfahrzeit auf dem Terminalgelände. Stellflächen haben demgegenüber eine hohe Belegung zum Ziel und liefern dem anfragenden Fahrzeug als Angebot die aufsummierte Verfahrzeit zurück. Das Fahrzeug vergleicht die aufsummierten Verfahrzeiten der einzelnen Stellflächen, die je nach Belegung und Lage mitunter stark voneinander abweichen können, und wählt die günstigste aus.

Für die Simulationsläufe wurden reale Fahrzeug- und Auftragsdaten für den Zeitraum eines Jahres zugrunde gelegt. Wesentliches Ergebnis der Simulationsstudie war ein signifikantes Zeiteinsparungspotential. Eine Erweiterung des Anwendungsszenarios um weitere Geschäftsprozesse, selbststeuernde logistische Objekte, logistische Zielgrößen und dynamische Einflussgrößen lassen darüber hinaus weitere Nutzenpotentiale erwarten [21].

### Der Intelligente Container

Der intelligente Container wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereiches SFB637 vom MCB (Microsystems Center Bremen) als autonomes Transportüberwachungssystem innerhalb einer sich selbst steuernden Lieferkette entwickelt [22].

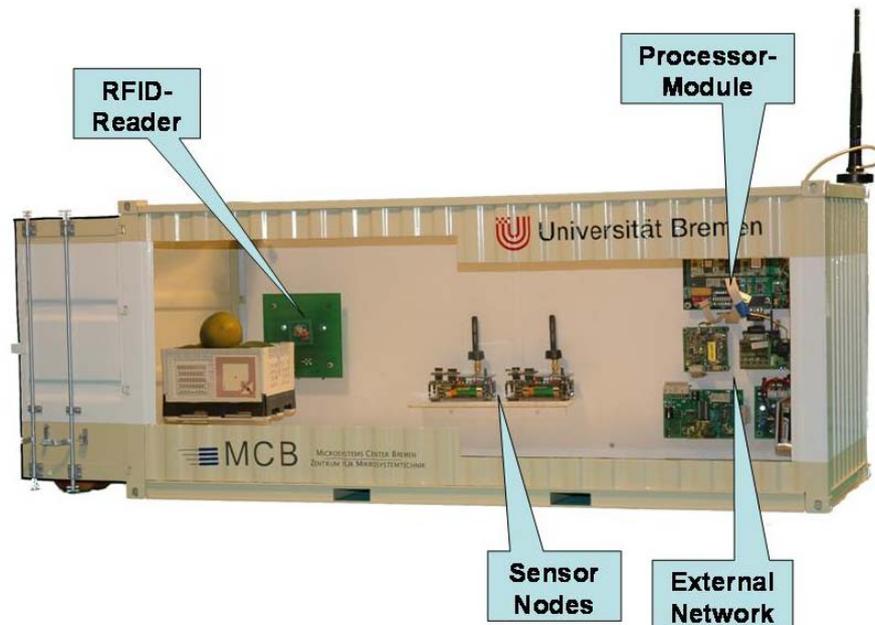


Bild 6: Der Intelligente Container [20].

Die Idee ist es, einen Container in die Lage zu versetzen, zu erkennen, welche Ladung befördert wird, diese zu überwachen und gegebenenfalls mit externen Stellen zu kommunizieren. Dazu wurde ein Prototyp im Maßstab 1:8 entwickelt, der mit einem RFID Leser, mit dem der Beladevorgang überwacht wird, einem drahtlosem Sensornetzwerk, mit dessen Hilfe eine Überwachung kritischer Frachtparameter möglich ist, eineressoreinheit, in der anfallende Daten vorverarbeitet werden können, sowie einem Kommunikationsmodul, mit dem die Verbindung in externe Datennetze ermöglicht wird ausgerüstet wurde. Dieser intelligente Container ist eingebunden in einen Demonstrator, mit dessen Hilfe selbststeuernde Transportprozesse dargestellt werden können. Um die Echtzeit-Ortung demonstrieren zu können, fährt ein LKW-Modell auf einem Straßennetz in der Werkhalle des BIBA und übermittelt seine Standortdaten über eine XY-Ortung direkt an eine Agentenplattform, auf der die einzelnen logistischen Objekte virtuell mit ihren Stammdaten und Zielsetzungen repräsentiert werden. Kommt es zu Störungen, wie z.B. Staus auf der Autobahn oder Ausfall der Kommunikation oder des Kühlaggregats, werden diese vom intelligenten Container erkannt und lösen Entscheidungsprozesse in und zwischen den Software-Agenten aus. Ziel ist die Wiederherstellung eines akzeptablen Zustandes oder die Um- oder Neuplanung des Transportes.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die zuletzt genannten Beispiele verdeutlichen, dass der zunächst nur theoretisch vorhergesagte Trend zur Selbststeuerung in der Logistik in der Praxis angekommen ist. Bisher ist allerdings nur ein Bruchteil der Potenziale ausgeschöpft. Um diese Anwendungspotenziale der Selbststeuerung sowie die zugrunde liegenden Thesen zu den

positiven emergenten Auswirkungen der Selbststeuerung besser verstehen und identifizieren zu können, ist noch umfangreiche Forschungsarbeit erforderlich.

### **Literatur**

- [1] Scholz-Reiter, B., Windt, K., Freitag, M.: Autonomous Logistic Processes - New Demands and First Approaches. In: Proceedings of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Budapest, 2004.
- [2] Philipp, T., Böse, F., Windt, K.: Autonomously Controlled Processes – Characterisation of Complex Production Systems. In: Proceedings of 3rd CIRP Conference in Digital Enterprise Technology. Setubal, Portugal, 2006.
- [3] Scholz-Reiter, B., Windt, K., Kolditz, J., Böse, F., Hildebrandt, T., Philipp, T., Höhns, H.: New Concepts of Modelling and Evaluating Autonomous Logistics Processes. In: Chryssolouris, G.; Mourtzis, D. (eds.): Manufacturing, Modelling, Management and Control 2004. IFAC Workshop Series, Elsevier Science, Amsterdam, 2005.
- [4] Organic Computing. URL: <http://www.organic-computing.de>, Abrufdatum 17.01.2007.
- [5] Scholz-Reiter, B., Rekersbrink, H., Freitag, M.: Internet routing protocols as an autonomous control approach for transport networks. In: Teti, R. (eds.): Proc. 5th CIRP international seminar on intelligent computation in manufacturing engineering. 2006, pp. 341-345
- [6] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G.: Swarm Intelligence - From Natural to Artificial Systems. Oxford 1999.
- [7] Windt, K., Böse, F., Philipp, T.: Autonomy in Logistics - Identification, Characterisation and Application. In: International Journal of Robotics and CIM, 2007, forthcoming.
- [8] Hülsmann, M., Windt, K. (eds.): Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow. Berlin: Springer, 2007, forthcoming.
- [9] Windt, K.; Böse, F.; Philipp, T.: Criteria and Application of Autonomous Cooperating Logistic Processes. In: Gao, J.X.; Baxter, D.I.; Sackett, P.J. (eds.): Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Research - Advances in Manufacturing Technology and Management, Cranfield, 2005.
- [10] Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.: Autonomously Controlled Logistic Processes – Characterization of Complex Production Systems. In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2007, forthcoming.
- [11] Böse, F., Windt, K.: Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In: Hülsmann, M., Windt, K. (eds.): Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow. Springer, Berlin, 2007, forthcoming.

- [12] Philipp, T., Böse, F., Windt, K.: Evaluation of Autonomously Controlled Logistic Processes. In: Proceedings of 5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Ischia, Italy, 2006.
- [13] Küppers, G., Krohn, W.: Selbstorganisation. Zum Stand einer Theorie in den Wissenschaften. In: Krohn, W., Küppers, G (Hrsg) „Emergenz: Die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung“, 2. Aufl., Frankfurt/M.: Suhrkamp, S. 7-26.
- [14] Ueda, K., Lengyel, A., Hatano, L.: Emergent Synthesis Approaches to control and planning in make to order manufacturing environments. In: Annals of the CIRP 53(2004)1, pp. 385-388.
- [15] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.
- [16] Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, Ch.; Jagalski, Th.: Modelling Dynamics of Autonomous Logistic Processes: Discrete-event versus Continuous Approaches. In: Annals of the CIRP, 55(2005)1, pp. 413-417
- [17] Scholz-Reiter, B.; Philipp, Th.; de Beer, Ch.; Windt, K.; Freitag, M.: Einfluss der strukturellen Komplexität auf den Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen. In: Pfohl, H.-Ch.; Wimmer, Th. (Hrsg.): Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung. Konferenzband zum 3. BVL-Wissenschaftssymposium Logistik, Deutscher Verkehrs-Verlag, Hamburg, 2006, S. 11-25
- [18] Armbruster, D.; de Beer, C.; Freitag, M.; Jagalski, T.; Ringhofer, C.: Autonomous Control of Production Networks Using a Pheromone Approach. In: Physica A, 363(2006)1, pp. 104-114
- [19] Hülsmann, M.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; Wycisk, C.; De Beer, C.: Autonomous Cooperation as a Method to cope with Complexity and Dynamics? – A Simulation based Analyses and Measurement Concept Approach. In: Bar-Yam, Y. et al. (eds.): Proceedings of the International Conference on Complex Systems (ICCS 2006). Boston, MA, USA, 2006, web-publication, 8 pages
- [20] Böse, F., Piotrowski, J., Windt, K.: Selbststeuerung in der Automobil-Logistik. In: Industrie Management, 20(2005)4, S. 37-40.
- [21] Böse, F., Windt, K.: Autonomously Controlled Storage Allocation. In: Hülsmann, M., Windt, K. (eds.): Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics – The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow. Springer, Berlin, 2007, forthcoming.
- [22] Jedermann, R. Lang, W.: Wenn der Container mitdenkt. RFID im Blick - Sonderausgabe RFID in Bremen, Juli 2006, S. 16-18.