

Selbststeuerung in der betrieblichen Praxis

Ein Framework zur Auswahl der passenden Selbststeuerungsstrategie

Bernd Scholz-Reiter, Felix Böse, Thomas Jagalski und Katja Windt, Universität Bremen

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

Felix Böse ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistische Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen.

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.

Dr.-Ing. Katja Windt ist Abteilungsleiterin am BIBA und Teilprojektleiterin im Sonderforschungsbereich 637 „Selbststeuerung logistische Prozesse – ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“ an der Universität Bremen.

In der Logistikforschung wird intensiv das Konzept der Selbststeuerung logistischer Systeme als neuer Ansatz zur Gestaltung eines dezentral organisierten Planungs- und Steuerungssystems untersucht, da die Selbststeuerung logistischer Prozesse eine Möglichkeit bietet, trotz steigender Komplexität in Kombination mit kurzfristigen Ereignissen den Anforderungen an eine flexible und effiziente Auftragsabwicklung gerecht zu werden [1, 2].

Kontakt:

Universität Bremen
Fachgebiet PSPS
Thomas Jagalski
Hochschulring 20
28359 Bremen
Tel.: 0421 / 218-9786
E-Mail: jag@biba.uni-bremen.de

Die Forschungsarbeit konzentriert sich dabei u.a. auf die Entwicklung innovativer Selbststeuerungsstrategien und deren Anwendung mithilfe geeigneter Methoden und Instrumentarien. Auch wenn die Nutzenpotenziale unterschiedlicher Selbststeuerungsstrategien für ausgewählte Anwendungsszenarien der Produktionslogistik bereits in Simulationsstudien nachgewiesen wurden [3 – 6], fehlt bisher für den breiten Einsatz in der betrieblichen Praxis ein Leitfaden für die Identifikation der jeweils am besten geeigneten Selbststeuerungsstrategie. Im Rahmen dieses Beitrags soll ein Framework vorgestellt werden, welches die Auswahl der passenden Selbststeuerungsstrategie für ein gegebenes Produktionssystem erleichtert.

Eine wesentliche Aufgabe bei der Entwicklung eines derartigen Frameworks stellt die Strukturierung und Abbildung bestehender Forschungsergebnisse dar. Im vorliegenden Framework erfolgte dazu eine Klassifizierung der einzelnen Untersuchungen hinsichtlich diverser Anwendungsszenarien, der entwickelten und für solche Szenarien einsetzbaren Selbststeuerungsstrategien und den zur Modellierung verwendbaren Methoden. Ergänzt wird das Framework um ein Instrumentarium als Hilfskomponente zur Evaluierung der einzelnen Anwendungsszenarien, Selbststeuerungsstrategien und Methoden. Bild 1 zeigt einen Auszug des entwickelten Frameworks.

Das Framework bietet die Möglichkeit, ein gegebenes Produktionssystem

einem passenden, abstrahierten Anwendungsszenario zuzuordnen, die für dieses Szenario am Besten geeignete Selbststeuerungsstrategie zu identifizieren und die für deren Umsetzung benötigten Modellierungsmethoden zu bestimmen (Bild 2). Im Folgenden werden die Komponenten des Frameworks im Einzelnen beschrieben und anhand von Beispielen erläutert.

Anwendungsszenarien

Die Klassifizierung der Anwendungsszenarien erfolgt hinsichtlich der räumlichen Anordnung in selbststeuernde Produktionssysteme und Produktionsnetze mit selbststeuernden Produktionssystemen. Die Materialflussnetze der betrachteten selbststeuernden Produktionssysteme umfassen dabei m Produktionsschritte mit n alternativen Bearbeitungsstationen und werden demgemäß in Form von $m \times n$ Matrizen abgebildet. Die selbststeuernden Produktionssysteme können des Weiteren hinsichtlich der Variabilität der Produktionsschrittabfolge in Produktionssysteme mit fixer Produktionsschrittabfolge $m \times n$ PS_{fix} und Produktionssysteme mit variabler Produktionsschrittabfolge $m \times n$ PS_{variabel} untergliedert werden. Die betrachteten Produktionsnetze bestehen aus mehreren Produktionssystemen, die sowohl fremd- als auch selbststeuernd sein können und werden ebenfalls hinsichtlich der Variabilität der Produktionsschrittabfolge in fixe Produktionsnetze $z \times m \times n$ PN_{fix} und variable Produktionsnetze $z \times m \times n$ PN_{variabel} unterschieden.

Selbststeuerungsstrategien

Seit einigen Jahren beschäftigt sich die Logistikforschung intensiv mit Fragestellungen zur Selbststeuerung in Form von dezentral organisierten Planungs- und Steuerungssystemen. Dazu werden auch bestehende Ansätze zur Selbststeuerung und Selbstorganisation aus anderen Wissenschaftsdisziplinen sowie deren Übertragbarkeit auf logistische Fragestellungen untersucht. Ein typisches Beispiel stellen bioanaloge Steuerungskonzepte dar, die zunächst als Konzepte entwickelt [7, 8] und danach zunehmend in der Logistik hinsichtlich verschiedener Anwendungsszenarien konkretisiert wurden (beispielsweise [6, 9] für Produktionssysteme oder [10] für Produktionsnetze). Charakteristisch für bioanaloge Selbststeuerungsstrategien ist eine indirekte Kommunikation über die Umwelt, eine auf der Erfahrung von Vorgängern basierende Entscheidungsfindung sowie simple Verhaltensweisen der einzelnen Elemente des betrachteten Systems. So kommunizieren zum Beispiel Ameisen durch Hinterlassen einer verdampfen Substanz (Pheromon), um einen Weg zu einer Futterquelle zu markie-

ren. Nachfolgende Ameisen können ihre Entscheidung anhand der vorgefunden Pheromonkonzentrationen treffen. Auf dem kürzesten Weg hat die Pheromonspur am wenigsten Zeit zu verdampfen; somit wird dieser Weg am häufigsten gewählt und die entsprechende Pheromonkonzentration ständig erneuert [11]. Für produktionslogistische Szenarien konnte dieses Konzept durch die Pheromon-basierte Selbststeuerungsstrategie mit (PH R) und ohne (PH) Rüstzeiten konkretisiert werden.

Demgegenüber basiert die Entscheidungsfindung bei rationalen Selbststeuerungsstrategien auf der Antizipation zukünftiger Systemzustände, beispielsweise in Form von Erwartungswerten. Entscheidungsrelevante Informationen werden via Interaktion mit anderen Elementen des Systems ermittelt. Das Verhalten der einzelnen Elemente ist meist komplexer und spiegelt sich in den Entscheidungsprozessen wider. Ein typisches Beispiel für eine rationale Selbststeuerungsstrategie ist die regelbasierte Entscheidungsmethodik (REM). Dabei besitzen die selbststeuernden Objekte eines Produktionssystems ein eigenes lokales Zielsystem, anhand dessen sie ihren Weg durch das Produktionssystem

bestimmen. Die zugrunde liegenden Entscheidungsprozesse sind dabei in Form von Regeln abgelegt [12]. Beim Queue Length Estimator (QLE) wird die Zeit bis zur Fertigstellung unter Berücksichtigung der Pufferbestände für jede Entscheidungsalternative geschätzt. Eine Möglichkeit, die Vorteile der bioanalogen und der rationalen Strategien miteinander zu verbinden, bieten kombinierte Strategien, bei denen beispielsweise die Entscheidungsfindung auf einem gewichteten Mittel aus der Erfahrung der Vorgänger und der Antizipation zukünftiger Systemzustände basiert [13].

Methoden

Für die Modellierung der einzelnen Selbststeuerungsstrategien wurden im Rahmen des SFB 637 bereits umfangreiche Prozess- und Simulationsstudien in den Bereichen der Materialfluss und der Prozessmodellierung durchgeführt. Im Bereich der Geschäftsprozessmodellierung wurden dabei u.a. die Unified Modelling Language (UML) und das Architecture of Integrated Information Systems (ARIS) Konzept als Modellierungsmethoden zur Abbildung von

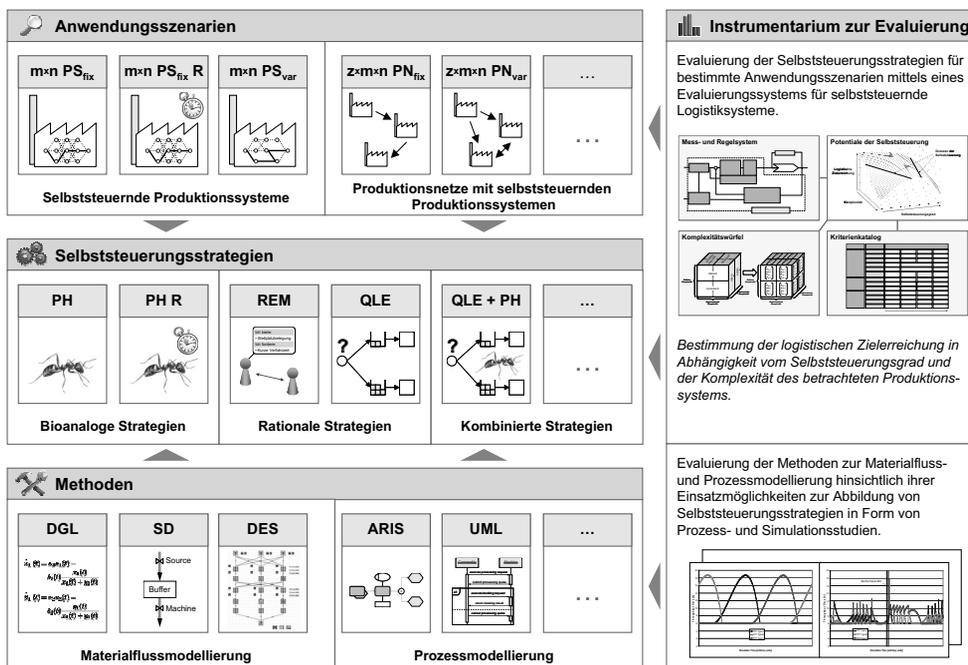


Bild 1: Exemplarischer Auszug aus dem Framework: Anwendungsszenarien, Selbststeuerungsstrategien, Methoden und Instrumentarium zur Evaluierung.

m: Anzahl Produktionsschritte n: Anzahl alternative Bearbeitungsstationen z: Anzahl Produktionsstandorte PS/PN: Produktionssystem/-netz fix/variabel: Produktionsschrittfolge PH: Pheromonbasierte Selbststeuerung PH R: Pheromonbasierte Selbststeuerung mit Rüstzeiten QLE: Queue Length Estimator REM: Regelbasierte Entscheidungsmethode QLE + PH: Queue Length Estimator & Pheromonbasierte Selbststeuerung DGL: Differentialgleichungssysteme SD: System Dynamics DES: Ereignisdiskrete Simulation ARIS: Architektur integrierter Informationssysteme UML: Unified Modelling Language

Anwendungsszenarien		Selbststeuerungsstrategien				
		Bioanaloge Strategien		Rationale Strategien		Kombinierte Strategien
		Pheromonbasierte Selbststeuerung (PH)	Pheromonbasierte Selbststeuerung mit Rüstzeiten (PH R)	Queue Length Estimator (QLE)	Regelbasierte Entscheidungsmethode (REM)	Queue Length Estimator & Pheromonbasierte Selbststeuerung (QLE + PH)
Selbststeuernde Produktionssysteme	$m \times n$ Produktionssystem mit fixen Produktionsstufen ($m \times n$ PS _{fix})	+	-	+	(+)	(+)
	$m \times n$ Produktionssystem mit fixen Produktionsstufen und Rüstzeiten ($m \times n$ PS _{fix} R)	-	+	(+)	(+)	+
	$m \times n$ Produktionssystem mit variablen Produktionsstufen ($m \times n$ PS _{var})	(+)	(-)	(+)	+	(+)
Produktionsnetze mit selbststeuernden Produktionssystemen	$z \times (m \times n)$ Produktionsnetz mit fixen Produktionsstufen ($z \times m \times n$ PN _{fix})	+	(-)	(+)	(+)	(+)
	$z \times (m \times n)$ Produktionsnetz mit variablen Produktionsstufen ($z \times m \times n$ PN _{var})	(+)	(-)	(+)	(+)	(+)
Methoden						
Materialflussmodellierung	Differentialgleichungssysteme (DGL)	+	(+)	(+)	(+)	(+)
	System Dynamics (SD)	+	+	+	(+)	+
	Ereignisdiskrete Simulation (DES)	-	(-)	+	+	(-)
Prozessmodellierung	Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS)	(+)	(+)	(+)	+	(+)
	Unified Modelling Language (UML)	(+)	(+)	(+)	+	(+)

+ geeignet (bewiesen) (+) wahrscheinlich geeignet - eher ungeeignet (bewiesen) (-) wahrscheinlich ungeeignet

Bild 2: Exemplarischer Auszug aus dem Framework: Matrix zur Auswahl der passenden Selbststeuerungsstrategie und Methode.

Selbststeuerungsstrategien untersucht [14, 15]. Zu den untersuchten Methoden im Bereich der Materialflusssimulation zählen Differentialgleichungssysteme (DGL) [9, 16, 17], System Dynamics [6, 10, 13] sowie die ereignis-diskrete Simulation (DES) [5, 18, 19].

Instrumentarium zur Evaluierung

Zur Beurteilung der Güte der einzelnen Selbststeuerungsstrategien hinsichtlich ihrer Eignung für die einzelnen Anwendungsszenarien wurde ein Evaluierungssystem für selbststeuernde Logistiksysteme entwickelt [20]. Es ermöglicht die Ermittlung des logistischen Zielerreichungsgrads in Abhängigkeit vom Selbststeuerungsgrad und der Komplexität eines betrachteten Logistiksystems. Es besteht aus einem Mess- und Regelsystem zur Bestimmung des logistischen Zielerreichungsgrads, einem Kriterienkatalog zur Ermittlung des Selbststeuerungsgrads sowie einem Komplexitätswürfel zur Beschreibung der Komplexität des betrachteten Produktionssystems. Kernziel der Evaluierung der Selbststeuerungsstrategie ist es, das logistische Potenzial der Selbststeuerungsstrategie zur Erreichung der logistischen Zielgrößen zu ermitteln.

Im Vergleich mit anderen Steuerungsstrategien lässt sich eine Aussage über deren jeweilige Güte treffen.

Die Modellierungsmethoden werden im Rahmen von Prozess- und Simulationsstudien hinsichtlich ihrer Güte zur Abbildung der einzelnen Selbststeuerungsstrategien untersucht. Dazu wurde einerseits ein vorgegebenes Szenario mit verschiedenen Modellierungswerkzeugen abgebildet, um die jeweiligen Vor- und Nachteile herauszuarbeiten [3, 4, 9, 16] und andererseits flossen die Erfahrungen bei der Modellierung der Selbststeuerungsstrategien mittels der verschiedenen Methoden in den Methodenkatalog ein (beispielsweise [6, 12, 13]).

Exemplarische Anwendung des Frameworks

Als exemplarisches Anwendungsszenario wird eine Fließfertigung dreier Produkttypen in einer Werkstatt gewählt. Dabei sind zur Fertigstellung der beiden Produkttypen jeweils drei Arbeitsschritte nötig. Es stehen jeweils drei Produktionslinien zur Verfügung. Ein Produktionslinienwechsel kann auf jeder Produktionsstufe erfolgen, jedoch muss dann gegebenenfalls eine Rüstzeit eingeplant werden. Die zu produzierenden

Teile sollen sich auf jeder Produktionsstufe selbststeuernd die Produktionslinie aussuchen können, auf der sie im nächsten Schritt bearbeitet werden. Jede Maschine hat einen Eingangspuffer, in welchem die verschiedenen Produkttypen auf die Bearbeitung warten (für die Topologie dieses produktionslogistischen Szenarios siehe auch [4, 5]). Im Framework entspricht dieses Anwendungsszenario dem Typ Produktionssystem in Matrixform mit fixer Produktionsschrittfolge unter Beachtung von Rüstzeiten (Anwendungsszenario $m \times n$ PS_{fix} R hier 3×3 PS_{fix} R). Für dieses Anwendungsszenario bietet das Framework die Selbststeuerungsstrategie Pheromonbasierte Selbststeuerung mit Rüstzeiten (PH R) an. Die pheromonbasierte Strategie für Szenarien ohne Rüstzeiten (PH) wäre hier ungeeignet, da diese keinerlei Informationen über Rüstzustände kommuniziert. Die regelbasierten Selbststeuerungsstrategien (etwa QLE oder RB S) müssten die zu erwartenden Rüstprozesse schätzen und kämen damit je nach Bedienregel der Maschine zu fehlerbehafteten Entscheidungen [13]. Im Gegensatz dazu kommuniziert die PH R Selbststeuerungsstrategie den jeweiligen Rüstzustand über eine Erhöhung der Pheromonkonzentration, wobei jedoch diese

zusätzliche Pheromonmenge durch eine höhere und an die Produktionsrate der entsprechenden Maschine angepasste Verdampfungskonstante keine falschen Informationen für Nach-Nachfolgeteile induziert. Zur Erstellung eines Simulationsmodells, mit dessen Hilfe die Performanz sowie die Robustheit des entsprechenden Szenarios analysiert werden soll, bietet das Framework für die PH R Selbststeuerungsstrategie die Modellierungsmethode System Dynamics an. Die Prozessmodellierungswerkzeuge (etwa UML oder ARIS) wären hier weniger gut geeignet, da sie nicht den tatsächlichen Materialfluss simulieren können. In einer ereignis-diskreten Simulation könnte die kontinuierliche exponentielle Verdampfung des Pheromons nur mittels einer schlechten Annäherung durch einen gleitenden Durchschnitt dargestellt werden [6, 9, 13]. Differentialgleichungen hätten das Problem, aggregierte Werte zu betrachten und damit nicht den tatsächlichen Materialfluss auf Teileebene.

Fazit und Ausblick

Es wurde ein erster Ansatz eines Frameworks vorgestellt, welches in der betrieblichen Praxis die Auswahl der passenden Selbststeuerungsstrategie für ein gegebenes Produktionssystem erleichtert. Forschungsbedarf besteht bei der sukzessiven Erweiterung des Frameworks bezüglich neu- bzw. weiterentwickelter Selbststeuerungsstrategien und Modellierungsmethoden sowie bei der Ausweitung des Anwendungsszenarienkatalogs, beispielsweise auf Montage- und Transportprozesse. Darüber hinaus ist die Integration von Analysewerkzeugen zur Messung und Bewertung des dynamischen Verhalten des Gesamtsystems (beispielsweise Zeitreihenanalysen, Methoden der nichtlinearen Dynamik) in das Framework geplant.

Literatur

- [1] Freitag, M., Scholz-Reiter, B., Herzog, O.: Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen. In: *Industrie Management* 20 (2004) 1, S. 23-27.
- [2] Pfohl, H.-C., Wimmer, T. (Hrsg.): *Wissenschaft und Praxis im Dialog: Steuerung von Logistiksystemen - auf dem Weg zur Selbststeuerung*. Hamburg, 2006.
- [3] Böse, F., Piotrowski, J., Windt, K.: Selbststeuerung in der Automobil-Logistik. In: *Industrie Management* 20 (2005) 4, S. 37-40.
- [4] 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, S. 413-417.
- [5] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, Ch., Jagalski, Th.: Modelling and Analysis of Autonomous Shop Floor Control. In: *Proc. of 38th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*. Florianopolis 2005.
- [6] 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.
- [7] Valckenaers, P., Van Brussel, H., Bonneville, F., Bongaerts, L., Wyns, J.: Holonic Manufacturing Systems. In: *Proceedings of the IFAC Workshop IMS'94*. Wien 1994.
- [8] Ueda, K., Ohkura, K.: A Modeling of Biological-oriented Manufacturing Systems with Two Types of Populations. In: *Advancement of Intelligent Production*. Chiba 1994, S. 75-80.
- [9] Armbruster, D., de Beer, Ch., Freitag, M., Jagalski, Th., Ringhofer, Ch.: Autonomous Control of Production Networks Using a Pheromone Approach. In: *Physica A* 363 (2006) 1, S. 104-114.
- [10] Scholz-Reiter, B., Jagalski, Th., de Beer, Ch.: Selbststeuerung logistischer Prozesse in Produktionsnetzen. In: *Industrie Management* 23 (2007) 1, S. 19-22.
- [11] Bonabeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G.: *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. New York 1999.
- [12] Böse, F., Windt, K.: Autonomously Controlled Storage Allocation. In: Hülsmann, M., Windt, K. (Hrsg.): *Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*. Berlin 2007.
- [13] Scholz-Reiter, B., Jagalski, Th., de Beer, Ch., Freitag, M.: Autonomous Shop Floor Control Considering Set-up Times. In: *Proc. of 40th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems*. Liverpool 2007, zur Veröffentlichung vorgesehen.
- [14] Böse, F., Windt, K.: Business Process Modelling of Autonomously Controlled Production Systems. In: Hülsmann, M., Windt, K. (Hrsg.): *Understanding Autonomous Cooperation & Control in Logistics - The Impact on Management, Information and Communication and Material Flow*. Berlin 2007.
- [15] Scholz-Reiter, B., Kolditz, J., Hildebrandt, T.: UML as a Basis to Model Autonomous Production Systems. In: Cunha, P.F., Maropoulos, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology*. Setúbal 2006.
- [16] Dachkovski, S., Wirth, F., Jagalski, T.: Autonomous control in Shop Floor Logistics: Analytic models. In: Chryssolouris, G., Mourtzis, D. (Hrsg.): *Manufacturing, Modelling, Management and Control 2004*. Amsterdam 2005.
- [17] Scholz-Reiter, B., Wirth, F., Freitag, M., Dashkovskiy, S., Jagalski, T., de Beer, C., Rüffer, B.: Some remarks on the stability of manufacturing logistic networks. Stability margins. In: *Proceedings of the International Scientific Annual Conference on Operations Research*. Bremen 2005, S. 91-96.
- [18] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, Ch., Jagalski, Th.: The Influence of Production Networks' Complexity on the Performance of Autonomous Control Methods. In: Teti, R. (Hrsg.): *Proceedings of the 5th CIRP International Seminar on Computation in Manufacturing Engineering*. Naples 2006, S. 317-320.
- [19] Scholz-Reiter, B., Freitag, M., de Beer, Ch., Jagalski, Th.: Modelling and Simulation of a Pheromone based Shop Floor Control. In: Cunha, P., Maropoulos, P. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology*. Setúbal 2006.
- [20] 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 2006, S. 347-352.

Schlüsselwörter:

PSPS, Produktionslogistik, Selbststeuerungsstrategien, Framework

Autonomous Control in Practice

Production logistics has seen the introduction of autonomous control strategies, which had been implemented with different modelling methods. Additionally a standardising body of tools for the evaluation of autonomous control strategies has been set up. This article presents a framework, which helps to identify the appropriate autonomous control strategy together with the corresponding modelling approach for given production logistics scenarios.

Keywords:

production planning and control, production logistics, autonomous control strategies, framework