

# Wandlungsfähigkeit durch selbststeuernde Produktionssysteme

*Ein Beispiel aus der Bekleidungsindustrie*

Bernd Scholz-Reiter und Steffen Sowade, Universität Bremen



Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter leitet das Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme (PSPS) an der Universität Bremen und ist Herausgeber der Zeitschriften *Industrie Management* und *Productivity Management*.



Dipl.-Ing. Steffen Sowade arbeitet als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Institut für Produktion und Logistik (BIBA) an der Universität Bremen, Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer Systeme.

Produktionssysteme sind einer Vielzahl von Faktoren ausgesetzt, welche ihre Leistungsfähigkeit beeinflussen und hohe Anforderungen an ihre Flexibilität, Robustheit und Anpassungsfähigkeit [1-2] stellen. Sowohl die Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme als auch die Selbststeuerung logistischer Prozesse ermöglichen die Bewältigung intern oder extern induzierter Komplexität und Dynamik. Nach [3] verlangt Wandlungsfähigkeit erstens Schnittstellen und Standards,

welche die funktionale und nicht-funktionale Interoperabilität von physischen und informationstechnischen Fabrikelementen gewährleisten. Zweitens muss die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden. Drittens sind Methoden zur Steuerung von Wandlungsprozessen und zur Bewertung des ökonomischen Nutzens von Wandlungsfähigkeit erforderlich. Dieser Beitrag erläutert am Beispiel einer gemischten Werkstatt- und Linienfertigung in der Bekleidungsindustrie, inwiefern Selbststeuerung wandlungsfähige Produktionssysteme unterstützen kann. Dazu werden ausgewählte Wandlungsobjekte und -befähiger beschrieben und die für eine Selbststeuerung erforderlichen Systemelemente vorgestellt.

Wandlungsfähigkeit bezeichnet die Fähigkeit des Produktionssystems, sich internen oder externen Einflüssen anpassen zu können. Im Gegensatz zur Flexibilität, welche Anpassungsmöglichkeiten innerhalb eines vordefinierten Bereichs beschreibt, erlaubt Wandlungsfähigkeit explizit die Veränderung dieses Bereichs. Wandlungsfähigkeit wird durch die Ausstattung eines Produktionssystems mit Wandlungsbefähigern erreicht. Diese spezifizieren die von den jeweiligen logistischen Systemelementen zu erfüllenden Anforderungen z.B. hinsichtlich der Eigenschaften Universalität, Modularität, Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit. Entsprechend den Systemebenen von Produktionssystemen

werden dessen Fabrikelemente, -module, -strukturen usw. befähigt, eine bestimmte Stärke an Wandlung zu einem geringen monetären und zeitlichen Aufwand durchführen zu können. Dazu bestehen für jedes Element Gestaltungsmöglichkeiten bezüglich der Wahl der Betriebsmittel, der Organisationsstruktur sowie der Raum- und Gebäudetechnik [4]. Wandlungsbedarfe können einen operativen, taktischen oder strategischen Zeithorizont aufweisen und die Gestaltung einzelner oder mehrerer Fabrikelemente usw. betreffen [5-7]. Im Rahmen der Fabrikplanung wird die Größenordnung der gewünschten Wandlungsfähigkeit festgelegt. Diese kann aber auch zu einem späteren Zeitpunkt an neue Anforderungen angepasst werden.

## Selbststeuerung, adaptive Steuerung und Agentensysteme

In selbststeuernden Produktionssystemen organisieren logistische Objekte, wie Aufträge, Güter und Ressourcen, logistische Prozesse durch eine dezentrale Anwendung von Entscheidungsregeln. Dazu verfügen diese Objekte über Fähigkeiten zur Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und Entscheidungsausführung. Sie wirken positiv emergent zusammen und erhöhen die Flexibilität und die Robustheit logistischer Systeme [8]. Eine Selbststeuerung wird durch die Auswahl einer Steuerungssystemarchitektur, einer Selbststeuerungsmethode und durch die Vorgabe

### Kontakt

BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH  
Bereich IPS  
Hochschulring 20  
28359 Bremen  
Tel.: 0421 / 218-9793  
E-Mail: [sow@biba.uni-bremen.de](mailto:sow@biba.uni-bremen.de)  
URL: <http://www.biba.uni-bremen.de>

detaillierter Ziele für jedes Objekt bestimmt. Dazu erforderliche Fähigkeiten werden durch zusätzliche Komponenten an den vorhandenen logistischen Objekten realisiert, z.B. durch Sensoren, Rechnerhardware, Software und Aktoren. Diese bilden die Infrastruktur des selbststeuernden logistischen Systems.

Selbststeuerung ist ein adaptives Steuerungsverfahren und kann als Agentensystem modelliert werden [6, 9], wobei jedes logistische Objekt durch einen Agenten repräsentiert wird [10]. In Analogie zu den selbststeuernden logistischen Objekten weisen die Agenten gleiche Eigenschaften auf: Sie handeln dezentral, autonom und selbstorganisierend. Gemäß ihren individuellen Fähigkeiten können sie verschiedene Rollen einnehmen. Sie treten als Dienstnehmer, -geber oder -broker auf [11] und können ihre Umwelt manipulieren oder Informationen verwalten [12-13]. Weiterhin können sie die Struktur eines Logistiksystems erkennen, andere Agenten finden und mit ihnen interagieren, um ihre eigenen Ziele zu erreichen [11, 14]. Agentensysteme eignen sich sowohl zur Beschreibung regulärer (planmäßiger) als auch irregulärer Prozesse (vorhersehbar oder unvorhersehbar). Beide Prozesstypen unterscheiden sich nach den zur Lösungsfindung verwendeten Kooperationsmechanismen und den dabei verfügbaren Freiheitsgraden. Irreguläre Prozesse und Systemzustände bedürfen hierbei größerer Freiheitsgrade als reguläre Prozesse [6]. In diesem Verständnis sind selbststeuernde logistische

Objekte als eine Art von Agenten in der Lage, Veränderungen des Produktionssystems in ihren Entscheidungen zu berücksichtigen.

## Infrastruktur selbststeuernder Systeme

Infrastruktur umfasst alle Systemelemente, die künstlich in ein gegebenes System eingefügt werden und zur Realisierung dezidiert Funktionalitäten essenziell sind. Die Realisierung der Funktionalitäten erfordert die Integration neuer Elemente in das gegebene System [15]. Infrastruktur ist durch ihren Basischarakter, die Künstlichkeit der Integration zusätzlicher Elemente, ihre Unabdingbarkeit für eine bestimmte Funktionalität und ihre Veränderbarkeit im Zeitverlauf charakterisiert [16]. Netzbasierte Infrastruktur verlangt überdies zueinander kompatible Komponenten. Die Schaffung von Infrastruktur bedarf Ressourcen und führt aus ökonomischer Sicht zu Sunk Costs. Infrastrukturkomponenten können hierarchisch in einem Schichtenmodell angeordnet werden. Jede Schicht enthält Elemente, die für die Realisierung dezidiert Funktionalitäten in der nächst höheren Schicht erforderlich sind. Die unterste Schicht enthält die Elemente des gegebenen Systems.

Die Infrastrukturkomponenten selbststeuernder Systeme werden aus der Koordinationsfunktion des Kontrollsystems abgeleitet und nach den drei Systemebenen selbststeuernder logistischer Sys-

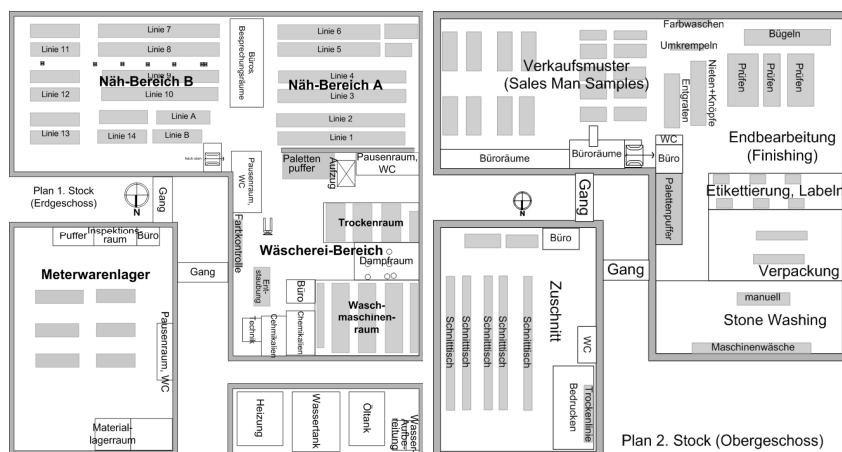
teme (Management, Information, Ausführung) geordnet [15]. Sie erweitern logistische Objekte um Hardware- und Softwarekomponenten zur Informationsbeschaffung, -verarbeitung und -verteilung für die Entscheidungsfindung und -ausführung sowie um dafür erforderliche Hilfsfunktionen. Selbststeuernde logistische Kontrollsysteme sind eingebettete Systeme [17]: Sie sind Teil größerer Systeme, realisieren dezidierte Funktionen und besitzen sensorische und aktorische sowie Rechen- und Kommunikationsfähigkeiten [18]. Die Managementebene umfasst Algorithmen und Regeln zur Entscheidungsfindung und bestimmt die Art der Informationsverarbeitung in der zweiten Ebene. Diese beinhaltet Komponenten zum Sammeln, Verarbeiten und Verteilen von Informationen. Die Ausführungsebene umfasst Sensoren und Aktoren zur Interaktion mit der Umgebung.

## Fallstudie Bekleidungsindustrie

Die Einsatzmöglichkeiten einer Selbststeuerung lassen sich an einem produktionslogistischen Beispiel eines Bekleidungslieferanten von Jeanswaren erläutern, welches durch eine gemischte Werkstatt- und Linienfertigung und einen traditionell sehr hohen Anteil an maschinell unterstützten, aber manuellen Prozessschritten geprägt ist. Die Produktion befindet sich in der chinesischen Provinz Guangdong und wird von einer Einkaufsagentur in Hongkong betreut. Der Lieferant betreibt Distributionszentren in Deutschland, England und Spanien, welche die regionale, saisonal schwankende Nachfrage bedienen [19].

Fällt der Bestand eines Artikels in einem Distributionszentrum unter eine festgelegte Grenze, löst dieses Zentrum einen Produktionsauftrag aus. Die Bestellbestandsgrenze und die Menge der zu bestellenden Artikel werden mithilfe des Durchschnittsverbrauchs des Artikels über die Wiederbeschaffungszeit prognostiziert. Hierbei dienen die Werte der gleichen Monate aus mehreren vergangenen Jahren als Referenz. Zusätzlich wird ein Sicherheitspuffer berücksich-

Bild 1: Layout der Fertigung im Werk [19].



tigt [20]. Darauf aufbauend erstellt das Werk in China einen Produktionsplan mit einem Planungshorizont von zwei Monaten. Die Produktionsabfolge basiert auf der geschätzten Reichweite der im Distributionszentrum vorhandenen Artikel sowie der Verfügbarkeit der Rohmaterialien.

Die Produktion der Textilien besteht aus drei Teilprozessen. Die Herstellung beinhaltet das Schneiden und Vernähen der Stoffe sowie das Besticken und Verzieren der Kleidungsstücke. In der nachfolgenden Endbearbeitung werden die Halbzeugnisse gewaschen und gebügelt, Etiketten, Knöpfe und andere Kleinteile angebracht und überstehende Fäden gekürzt. Sowohl zwischen als auch nach den beiden Prozessschritten findet eine Qualitätskontrolle statt. Die Produktionsschritte werden streng sequenziell durchgeführt.

Die Arbeitsstationen sind nach dem Werkstattprinzip in Arbeitsbereiche zusammengefasst (Bild 1). Innerhalb einiger Arbeitsbereiche, z.B. beim Nähen, sind die Stationen nach dem Linienprinzip angeordnet. Der Materialfluss zwischen den Arbeitsbereichen folgt einer Standard-Sequenz. Halbzeugnisse werden mithilfe von Handwagen zwischen den Arbeitsstationen transportiert. Zwischen und nach den Produktionsschritten wird die Qualität der Textilien in Qualitätszonen per Hand kontrolliert, bevor die Bearbeitung fortgesetzt oder abgeschlossen wird.

In [21] wurde eine Smart Box genannte Hardwarekomponente vorgestellt, die selbststeuernde logistische Fertigungsprozesse in der Bekleidungsindustrie ermöglicht (Bild 2). Die Boxen leiten in Handwagen transportierte Lose von Textilien durch die Fertigung. Dazu kommunizieren sie mit den Fertigungslinien oder einzelnen Maschinen und wählen die jeweils am besten zum nächsten Produktionsschritt passende Ressource aus. Während der Kommunikation mit den Ressourcen tauscht eine Smart Box produktionsrelevante Daten zur Maschinenwahl sowie Informationen über die Historie des Loses aus. Smart Boxen besitzen Schnittstellen zur kabellosen Energieversorgung und

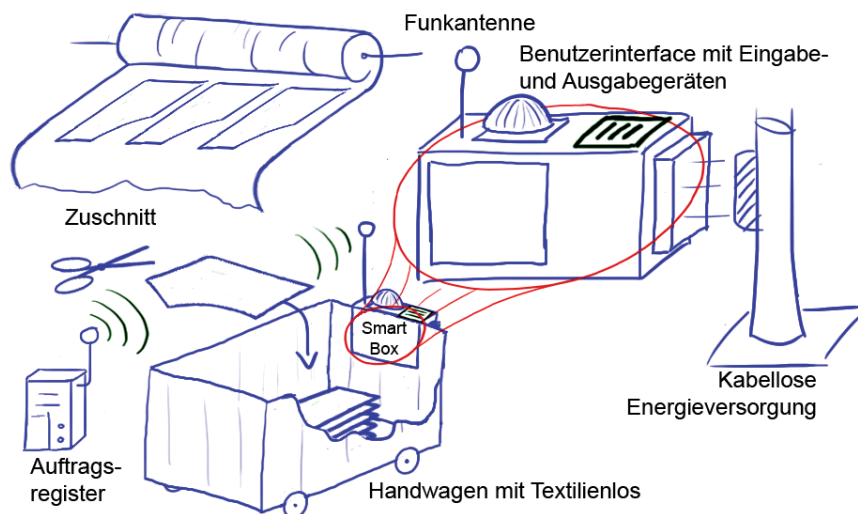


Bild 2: Dezentrales Kontrollsystem als Smart Box [21].

Datenübertragung sowie ein universelles Benutzungsinterface.

### Wandlungsbefähiger und Wandlungsobjekte in der Fallstudie

Während selbststeuernde Produktionssysteme operativ auf Ereignisse reagieren, wirken Wandlungen des Systems in einem taktisch-strategischen Zeithorizont. Änderungen können das Ausführungs-, das Informations- oder das Entscheidungssystem betreffen: Materialflüsse können ebenso verändert werden wie die Regeln und Komponenten des Steuerungssystems. Anpassungen des Zielsystems der logistischen Objekte wirken darüber hinaus auch auf das Ausführungssystem. Würde bspw. im Fabriklayout die Linie 1 im Näh-Bereich A entfernt (Bild 1), könnten selbststeuernde Güter alternativ Linie 2 wählen. Ist hingegen das Steuerungssystem das Wandlungsobjekt, muss es seine Regeln und die dazu erforderlichen Infrastrukturkomponenten von selbst an die neuen Gegebenheiten anpassen. Dabei ist es unwichtig, ob die Anpassungsfähigkeit wegen dem Auftreten stochastischer Ereignisse, der Inanspruchnahme vorhandener Mengen- oder Terminflexibilitäten oder wegen struktureller Änderungen des Produktionssystems benötigt wird. Stets induzieren Wandlungstreiber qualitative und quantitative Änderungen an

Wandlungsobjekten, z.B. Produktmischen, Produkt- und Funktionsumfängen, Ressourcenkapazitäten, dem Automatisierungsgrad logistischer Systeme und der logistischen Zielerreichung [14].

Bild 3 stellt die Wandlungsbefähiger für die Steuerungsebene dar und beschreibt jeweils die Anforderungen, die daraus für die Smart Box genannte Komponente des Steuerungssystems entstehen [9]. Hierbei können die Wandlungsobjekte der Steuerungsebene nach den Fähigkeiten selbststeuernder Systeme gegliedert werden. Zur Informationsverarbeitung gehören Komponenten für die Berechnung und Ausführung von Algorithmen sowie Methoden zur Erhebung und Verteilung von Informationen zwischen logistischen Objekten. Daneben werden die Wandlungsobjekte des Steuerungssystems durch ihre Anzahl, Funktion und Verteilung, ihre Anordnung zu einer Steuerungsarchitektur sowie die eingesetzte Selbststeuerungsmethode beschrieben. Zusätzlich bilden die Ziele, ihre Verrechnungsmetrik und vorgehaltene Datenfelder wandlungsfähige Objekte des Steuerungssystems. Eine kluge Auswahl der Objekte und ihrer Fähigkeiten kann ein performantes, wandelbares Produktionssystem erzeugen.

### Fazit und Ausblick

Am Beispiel einer Bekleidungsfertigung wurde erläutert, wie Selbst-



Steuerungsebene	Neutralität	Modularität	Kompatibilität	Einstellbarkeit	Skalierbarkeit
	Ungebundenheit gegenüber Szenariospezifika.	Existenz abgegrenzter, gekapselter Funktionen.	Konsistente Verwendung von Modellelementen.	Logik an verschiedene Algorithmen und Ziele anpassbar.	Unabhängigkeit von der Komplexität der Objekte.
Box frei programmierbar, einsetzbar in jedem Szenario, in dem Boxen dieser Größe befestigt und versorgt werden können	Funktionale Kapselung: Sensorik, Aktorik, Informationsverarbeitung, Kommunikation, Benutzungsinterface	Netzwerkeffekte bei Funktionen beachten: Kommunikation, Energieversorgung	Ziele und Steuerungsmethode frei programmierbar; ggf. müssen Module höhere Leistungsanforderungen erfüllen	Dem Lastszenario angepasste Verfahren zur Ressourcenallokation wählen (Kommunikation, Verkehrswege, usw.)	

Nach Wiendahl et. al. 2007 (Keynote Paper Changeability)

*Bild 3: Anforderungen an die Gestaltung von Smart Boxen in der Fallstudie eines Textilproduzenten nach Wandlungsbefähigern [9].*

steuerung die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen bei Veränderungen ihrer Ressourcen sowie der logischen Produktstruktur unterstützt. Die selbststeuernden Objekte eines in dieser Art veränderten Produktionssystems operieren solange weiter, wie sie mindestens eine gültige Handlungsoption zur Erfüllung ihres Ziels haben. Weiterhin wurden die Wandlungsbefähiger des Steuerungssystems am Beispiel der Steuerungskomponente Smart Box detailliert.

Es bestehen aber auch Rigiditäten für die Wandlung einer Selbststeuerung. Dies betrifft strukturelle Veränderungen des Steuerungssystems, z.B. Wechsel zwischen Steuerungssystemarchitekturen, der Selbststeuerungsmethode oder des Zielsystems. Forschungsbedarf besteht u.a. hinsichtlich der Möglichkeiten zur automatischen Umstrukturierung eines Steuerungssystems im laufenden Betrieb, d.h. Fragen zur Wandlungsfähigkeit der Steuerungssysteme selbst.

## Literatur

[1] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Abele, E.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. In: wt Werkstatttechnik online 98 (2008) 1/2, S. 85-91.

[2] Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L.: Square Foot Manufacturing – in wandlungsfähiges Produktionssystem für die Fertigung von Mikroteilen. In: wt Werkstatttechnik online 98 (2008) 5, S. 338-344.

[3] Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Ergebnisse der BMBF-Vorstudie „Wandlungsfähige Produktionssysteme“. In: wt Werkstatttechnik online 99 (2009) 4, S.205-210.

[4] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. München 2005.

[5] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. München Wien 2000.

[6] Westkämper, E.; Zahn, E. (Hrsg): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin 2009.

[7] Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Griernitz, V.: Planung wandlungsfähiger Fabriken – Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 97 (2002) 1-2, S. 12-17.

[8] Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg): Understanding of Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Berlin 2007.

[9] Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Záh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing – Classification, Design and Operation. In: CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 783-809.

[10] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: Schuh, G. (Hrsg): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung, Konzepte. Berlin 2006, S. 745-780.

[11] Feldmann, K.; Weber, M.; Wolf, W.: Modulare intelligente Steuerungssysteme – Selbstorganisation und Wandlungsfähigkeit flexibler Montageanlagen. In: wt Werkstatttechnik online 97 (2007) 9, S. 683-688.

[12] Wang, L.-C.; Lin, S.-K.; Huang, L.-P.: A RFID Based Agile Manufacturing Planning and Control System. In: Goebel, R.; Siekmann, J.; Wahlster, W. (Hrsg): Rough Sets and Knowledge Technology Bd. 5589. Berlin Heidelberg 2009, S. 441-451.

[13] Wang, L.-C.; Lin, S.-K.: A multi-agent based agile manufacturing planning and control system. In: Computers & Industrial Engineering 57 (2009) 2, S. 620-640.

[14] Weber, M. A.: Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg 2007.

[15] Scholz-Reiter, B.; Sowade, St.; Rippel, D.: Modeling the Infrastructure of Autonomous Logistic Control Systems. In: Mladenov, V.; Psarris, K.; Matorakis, N.; Caballero, A.; Vachtsevanos, G. (Hrsg): Advances in Communications, Computers, Systems, Circuits and Devices.

European Conference of Systems (ECS'10) 2010.

[16] Klaus, S.: Deregulierung der netzbasierten Infrastruktur. Dissertation, Universität Zürich 2009.

[17] Varsakelis, D. H.; Levine, W.S.: Handbook of Networked and Embedded Control Systems. Boston 2005.

[18] Holzmann, C.: Spatial Awareness of Autonomous Embedded Systems. Wiesbaden 2009.

[19] Scholz-Reiter, B.; Rippel, D.; Sowade, St.; Teucke, M.: Selbststeuerung als Ansatz in der Praxis manuell getriebener Logistik. In: Deutscher Logistik Kongress 2009.

[20] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen. Berlin 2000.

[21] Scholz-Reiter, B.; Sowade, St.; Rippel, D.; Teucke, M.; Özsahin, M.; Hildebrandt, T.: A Contribution to the Application of Autonomous Control in Manufacturing. In: International Journal of Computers 3 (2009) 3, S. 279-291.

## Schlüsselwörter:

Wandlungsfähigkeit, Wandlungsbefähiger, Infrastruktur selbststeuernder Steuerungssysteme, Bekleidungsindustrie

*Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Teilprojekts B2 des Sonderforschungsbereichs 637: „Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert wird.*

### Changeability by Autonomously Controlled Manufacturing Systems – An Example of the Apparel Industry

Several internal and external factors influence the performance of manufacturing systems. They increase the requirements for the logistic system's flexibility, robustness and adaptability. Changeable manufacturing and autonomous control of logistic processes are capable to cope with the complexity and dynamic induced by these factors. Using a case study of an apparel manufacturing company, this article explains how autonomous control can be used to enable changeable manufacturing. It describes five enablers for changeability for the control system solution presented in the case study.

#### Keywords:

enabler for changeability, apparel industry, infrastructure of autonomous control systems