

## Der Beitrag der Selbststeuerung zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

*Prof. Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter, Dipl.-Ing. Steffen Sowade*

### 1 Einleitung

Heutige Produktionssysteme befinden sich in einem komplexen, dynamischen Umfeld interner und externer Faktoren, welche ihre Leistungsfähigkeit permanent beeinflussen und zu immer höheren Anforderungen an ihre Flexibilität, Robustheit und Anpassungsfähigkeit führen (Nyhuis et al. 2008, Wulfsberg et al. 2008). Daher ist sowohl die Gestaltung flexibler und wandlungsfähiger Produktionssysteme, als auch die Entwicklung neuer Steuerungsansätze, wie Selbststeuerung, Gegenstand intensiver Forschung.

Unter Wandlungsfähigkeit wird hierbei die Fähigkeit des Produktionssystems verstanden, sich internen oder externen Einflüssen anpassen zu können. Während flexible Systeme in einem definierten Korridor arbeiten, zeichnen sich wandlungsfähige Systeme durch die Fähigkeit zur Veränderung des Korridors selbst aus. Wandlungsfähigkeit lässt sich nach den Systemebenen eines Produktionssystems, den Fabrikelementen, Fabrikmodulen, Fabrikstrukturen oder höheren Aggregaten davon, gliedern (Wiendahl et al. 2005). Für jedes Element bestehen Gestaltungsmöglichkeiten hinsichtlich der Wahl der Betriebsmittel, der Organisationsstruktur sowie der Raum- und Gebäudetechnik. Die Ausstattung der Elemente mit den Wandlungsbefähigern, Universalität, Modularität, Kompatibilität, Mobilität und Skalierbarkeit, schafft wandlungsfähige Produktionssysteme, die zu einem geringen monetären und zeitlichen Aufwand eine bestimmte Stärke an Wandlung durchführen können. Die Größenordnung an Wandlungsfähigkeit wird in der strategischen Fabrikplanung „fest“ in die Produktionssysteme geplant, kann aber auch zu einem späteren Zeitpunkt an neue Anforderungen angepasst werden. Auf der operativen Ebene werden die Wandlungstreiber beobachtet und Wandlungsbedarfe abgeleitet. Je nach Art des Wandlungsbedarfs kann dieser in operativen, taktischen oder strategischem Zeithorizont sowie an den Betriebsmitteln, der Organisationsstruktur oder der Raum- und Gebäudetechnik umgesetzt werden (Grundig 2005, Westkämper/Zahn 2009, Wiendahl et al. 2002).

Demgegenüber realisiert Selbststeuerung eine dezentrale Steuerung von Prozessen mittels autonom agierender logistischer Objekte, welche über die Fähigkeiten Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und -ausführung verfügen. Zu den logistischen Objekten gehören z. B. Güter, Aufträge und

Ressourcen. Selbststeuerung wird auf strategischer Ebene durch eine Entscheidung für eine Steuerungssystemarchitektur und für konkrete Selbststeuerungsstrategien definiert, aber operativ von den autonomen Objekten ausgeführt. Die Befähigung der logistischen Objekte zu autonomen Handeln ermöglicht eine Erhöhung der Flexibilität eines logistischen Systems durch positive Emergenz aus dem Verhalten der Systemelemente (Hülsmann/Windt 2007). Selbststeuerung kann als Organisationsprinzip begriffen werden und könnte aus Sicht der Fabrikplanung als Konzept zur operativen Realisierung von Wandlungsfähigkeit eingesetzt werden. Beide Konzepte soll ein Produktionssystem zur Bewältigung der gestiegenen Anforderungen befähigen.

#### 1.1 Problemfelder der Wandlungsfähigkeit

Bisher konnten einige Fragen zur Wandlungsfähigkeit noch nicht hinreichend beantwortet werden bzw. es haben sich aus der Praxis heraus neue Problemstellungen ergeben. In einer Vorstudie für das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gliedern Nyhuis et al. (2009) offene Forschungsfragen in technologische, logistische sowie organisatorische/personelle. In der technologischen Sicht liegt der Schwerpunkt auf Schnittstellen und Standards, welche schnelle Veränderungen des Produktionssystems ermöglichen, u. a. physisch für die Ver- und Entsorgung der Produktionsmittel aber auch informationstechnischer Art in Form langfristiger Versionskompatibilität und der Durchgängigkeit von Produktions- und Kontrolldaten. Aus logistischer Sicht müssen nicht nur einzelne Fabriken zur Wandlung befähigt, sondern vielmehr ganze Wertschöpfungsketten betrachtet werden. Hierbei ist u. a. der optimale Grad an Wandlungsfähigkeit zu klären. Zudem sollen Methoden zur Steuerung von Wandlungsprozessen entwickelt werden. Als wesentliches Forschungsfeld sehen Nyhuis et al. (2009) weiterhin Methoden zur Bewertung des ökonomischen Nutzens der Wandlungsfähigkeit, da getätigte Investitionen ökonomisch gerechtfertigt sein müssen.

#### 1.2 Fragestellung des Beitrags

Vor dem Hintergrund dieser Fragestellungen untersucht der Beitrag, welches Potential Selbststeuerung als Befähiger für die Planung und Realisierung wandlungsfähiger Produktionssysteme bietet bzw. inwiefern Selbststeuerung wandlungsfähige Produktionssysteme unterstützen kann. Basis der Untersuchung bildet eine Erläuterung der Begriffe Wandlungsfähigkeit und Selbststeuerung und ihre Reflektion am Beispiel einer Werkstattfertigung von Stückgütern. An dieser Stelle wird die Vereinbarkeit von Selbststeuerung und Wandlungsfähigkeit als operatives bzw. taktisch-strategisches Konzept für die Gestaltung produktionslogistischer Systeme kurz erläutert. Für den Einsatz

von Selbststeuerung in wandlungsfähigen Produktionssystemen werden geeignete Ebenen und Systemelemente wandlungsfähiger Produktionssysteme bestimmt. Die Systemelemente werden in das Szenario eingeordnet und ihre Intelligenz beschrieben.

## 2 Grundlagen wandlungsfähiger Produktionssysteme

### 2.1 Ausgangssituation und Herausforderungen

Die Deregulierungspolitik der Industriestaaten seit den 70er Jahren trug zusammen mit dem Ende des Kalten Krieges und der steigenden Verfügbarkeit leistungsstarker informationsverarbeitender Systeme zu einer starken Zunahme der privaten Wirtschaftsaktivität bei. Kulturelle und legislative Unterschiede der Absatz- und Beschaffungsmärkte dämpften die Erschließung der neuen Märkte kaum (Hale 1995). Dieses wirtschaftliche Engagement führte zu einer Zunahme des globalen Wettbewerbs, in dem Kundenbedürfnisse diversifizierter und unter steigenden Anforderungen, z. B. hinsichtlich Produktvarianten und -verfügbarkeit, befriedigt werden müssen. Vor dem Hintergrund des sich beschleunigenden technologischen Wandels, der sich intensivierenden Handelsbeziehungen und der sich verringernenden staatlichen Regulierung, nimmt die Vorhersehbarkeit der Marktentwicklung weiter ab (Koren 1999).

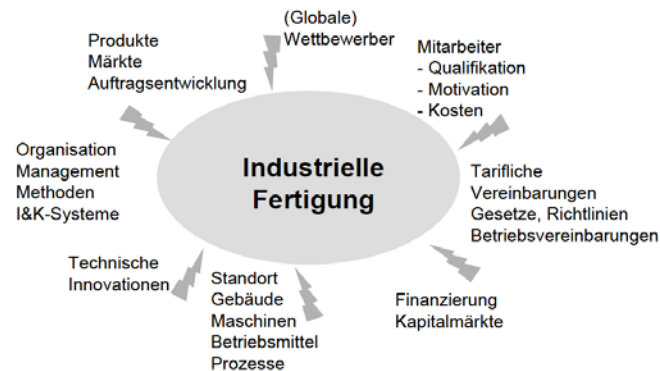


Abbildung 1 Wandlungstreiber der industriellen Fertigung (Westkämper/Zahn 2009)

Aus der globalen wirtschaftlichen Vernetzung heraus entstehen kontinuierlich schnell wirkende Turbulenzen in den Märkten. Hierunter verstehen Nyhuis et al. (2008) und Wiendahl et al. (2005) sich überlagernde interdependente Einflüsse auf Unternehmen, insbesondere auf ihre Produktionssysteme, und

fassen sie unter dem Begriff Wandlungstreiber zusammen. Die Treiber lassen sich u. a. nach ihrer Herkunft, dem Zeithorizont ihrer Wirkung, dem Grad der Beeinflussbarkeit durch Unternehmen sowie der Stärke des von ihnen ausgehenden Wandlungsdrucks charakterisieren. In der Literatur wird vor allem zwischen internen und externen Treibern differenziert (Westkämper/Zahn 2009, Wiendahl et al. 2007). Intern meint Treiber, die durch das Produktionssystem begründet werden, z. B. durch Mitarbeiter, Produkte und Technologien sowie Methoden und Netzwerkstrukturen. Externe Treiber wirken hingegen von außen auf das Unternehmen. Hierzu gehören u. a. das Marktverhalten sowie ökonomische, soziale, politische und gesellschaftliche Faktoren, technologische Entwicklungen und Umweltaspekte (Abbildung 1). Eine Darstellung der Wandlungstreiber findet sich u. a. in Westkämper/Zahn (2009), Wiendahl et al. (2007) und Nyhuis et al. (2008 und 2009).

Aus Sicht der exportorientierten deutschen Unternehmen sind weltwirtschaftlich tiefgreifende Veränderungen besonders wichtig, z. B. von Marktstrukturen, Technologien, der Vernetzung von Güter- und Kapitalströmen sowie der Fragmentierung und Dynamisierung von Wertschöpfungsketten (Nyhuis et al. 2009). Produzierende Unternehmen müssen den für sie relevanten Treibern durch Wandlung ihrer Strukturen und Abläufe begegnen (Nyhuis et al. 2008). Schwierigkeiten ergeben insbesondere durch unterschiedliche Lebenszyklen der zu wandelnden Objekte, z. B. Prozesse, Produkte und Gebäude (Wiendahl et al. 2007). Nach Koren et al. (1999) mangelt es an ganzheitlichen Methoden zur Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme und ihrer Module für die jeweilige Fabrikebene sowie der inbegriffenen Schnittstellen. Der Umfang der erforderlichen Wandlungsfähigkeit kann zwar mithilfe szenariobasierter Ansätze bestimmt werden (Wiendahl et al. 2002, Heger/Holzer 2004, Gerst et al. 2007), jedoch wären aufwandsärmere Verfahren praktikabler.

### 2.2 Ziele der Wandlungsfähigkeit

Unternehmen müssen daher das Ziel verfolgen, diesem dynamischen Umfeld durch inneren Wandel vorsorgend, rechtzeitig und bedarfsorientiert zu begegnen sowie die dazu notwendigen Fähigkeiten zu entwickeln (Wiendahl et al. 2007). Sie müssen sich hinsichtlich der Zielgrößen Kosten, Produktivität, Qualität und der zur Wandlung benötigten Zeit optimal aufstellen (Koren et al. 1999) und eine Balance zwischen maximaler und wirtschaftlich idealer Wandlungsfähigkeit finden (Wiendahl et al. 2007, Nyhuis et al. 2009).

### 2.3 Definition von Wandlungsfähigkeit

Wandlungsfähigkeit bezeichnet die Möglichkeit zur Veränderung der grundlegenden Struktur aller Ebenen eines Produktionssystems. Das System wird

hinsichtlich seiner Leistungsfähigkeit, z. B. Kapazität und Funktionalität, unter gegebenen oder angenommenen Einflüssen transformiert (Koren et al. 1999). Dies setzt nach Wiendahl et al. (2007) die Fähigkeit zum frühzeitigen Erkennen von Änderungsbedarfen in allen Fabrikebenen voraus. Dabei müssen neben der Struktur des Produktionssystems auch dessen Technologien, Prozesse und Organisationsprinzipien berücksichtigt und der Wandel ökonomisch durchgeführt werden. Die angestrebte Veränderung soll schnell, nachhaltig und aufwandsarm durchführbar sein sowie im Idealfall eine aufwandsneutrale Rückbauoption beinhalten (Nyhuis et al. 2009, Spath et al. 2007). Es wird nicht die maximal mögliche Wandlungsfähigkeit angestrebt, sondern die zu den Anforderungen passende (Nyhuis et al. 2008). Der jeweilige Wandlungsumfang bestimmt sich nach der Menge der zu wandelnden Objekte und dem Ausmaß der Veränderungen im Produktionssystem (Breite und Tiefe des Wandels, Keijzer 2007). Das folgende Unterkapitel strukturiert Wandlungsfähigkeit begrifflich und grenzt sie gegenüber verwandten Begriffen ab. Anschließend werden Wandlungsobjekte von Produktionssystemen vorgestellt sowie Wandlungsbefähiger und Wandlungshemmer benannt.

#### 2.4 Klassifizierung und Strukturierung der Wandlungsfähigkeit

Wandlungsfähigkeit wird in der Literatur in Relation zu unterschiedlichen aber eng zusammenhängenden Begriffen rund um die *Veränderungsfähigkeit von Produktionssystemen* diskutiert (Koren et al. 1999, Wiendahl et al. 2002 und 2007, ElMaraghy 2006, Nyhuis et al. 2008 und 2009, Wulfsberg et al. 2008 und 2010, Franke et al. 2010). Ausgehend von klassischen, nicht wandlungsfähigen Produktionssystemen (Koren et al. 1999) werden die einzelnen Begriffe nach den Ebenen der Produktionsleistung und der Marktleistung hierarchisch zueinander in Beziehung gesetzt (Abbildung 2, Wiendahl 2002, Wulfsberg et al. 2010). *Umrüstbarkeit* bezieht sich auf die operative zeitnahe Veränderung einzelner Arbeitssysteme für bereits bekannte Produkte zu minimalen Kosten. *Rekonfigurierbarkeit* bezeichnet die operative Fähigkeit einzelner hochspezialisierter Fertigungseinrichtungen, ihre funktionalen Systemelemente (Hardware und Software) zur Bearbeitung anderer definierter Produktfamilien reaktiv verändern zu können. Demgegenüber bietet *Flexibilität* die taktische Möglichkeit, Teile des Produktionssystems für die Bearbeitung neuer, aber zu bekannten Produktfamilien passenden Produkten unter mittleren zeitlichen und finanziellen Aufwand umzustellen. Flexibilität ist strukturell fest in das Produktionssystem integriert und ermöglicht die Anpassung vorgegebener Größen innerhalb eines definierten Korridors. Nach Franke et al. (2010) betrifft Flexibilität eher die Prozesse als die Struktur eines Produktionssystems. Eine Darstellung unterschiedlicher Flexibilitätstypen liefert ElMaraghy (2006). Demgegenüber ermöglicht *Wandlungsfähigkeit*

eine Veränderung der Lage oder der Größenordnung des Korridors. Aufwände entstehen erst im Wandlungsfall. Wandlungsfähigkeit betrifft Strukturen, Prozesse und Organisationsprinzipien in allen Ebenen eines Produktionssystems, ist lösungsneutral und lässt Freiräume in der Ausgestaltung des Wandlungsprozesses. An oberster Stelle der Veränderungsmöglichkeiten steht die *Agilität*. Sie beinhaltet die strategische Ausrichtung des Unternehmens und übersteigt den Umfang der Wandlungsfähigkeit deutlich (Nyhuis et al. 2008).

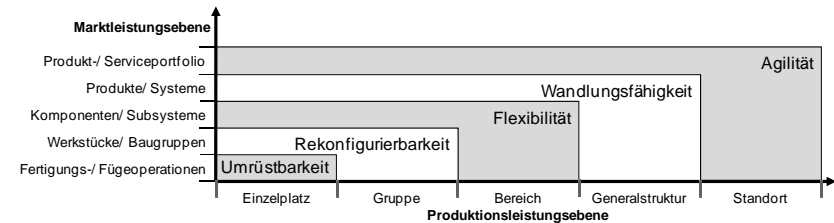


Abbildung 2 Veränderungstypen der Fabrik (Wiendahl 2002)

#### 2.5 Wandlungsobjekte im Produktionssystem

Für die Wandlung von Produktionssystemen müssen diejenigen Objekte festgelegt werden, die zur Erreichung der logistischen Ziele verändert werden können. Diese Objekte werden Wandlungsobjekte genannt. Wiendahl et al. (2007) beschreiben ein Vorgehen zur Auswahl von Wandlungsobjekten durch Analyse der Wandlungstreiber und durch Festlegung des Wandlungsfokus (intern, extern), der Wandlungsstrategie (reaktiv oder vorsorgend) sowie des geforderten Umfangs der Wandlung. Grundsätzlich sind Objekte aller Funktionsbereiche und -ebenen von Produktionssystemen wandelbar: Montage, Produktion, Steuerungssystem, Organisation, Anlauf bzw. Güter, Maschinen, Produktionsnetzwerke (Koren et al. 1999, Keijzer 2007, Spath/Scholtz 2007, Wiendahl et al. 2007). Wandlungsobjekte lassen sich nach sachlichen Aspekten (Fabrikelement und -ebene, Typ des Produktionsmittels bzw. Produktions- und Steuerungssystem), nach Materialität und nach Zeithorizont gliedern sowie den Gestaltungsbereichen einer Fabrik (Betriebsmittel, Organisation und Raum- und Gebäudetechnik) zuordnen (Nyhuis et al. 2009).

Je nach Konkretisierung der Objekte werden Wandlungsobjekte erster und zweiter Ordnung unterschieden. Wandlungsobjekte erster Ordnung sind einer Detaillierungsebene und einem Gestaltungsbereich eines Produktionssystems zugeordnet. Wandlungsobjekte zweiter Ordnung ergeben sich durch eine weitere Aufgliederung der Objekte erster Ordnung. Nach Heger (2005) sind Wandlungsobjekte erster Ordnung zu vage, da statt Klassen konkrete Objekte gewandelt werden müssen. Dennoch hilft die systematische Kategorisierung,

noch nicht erfasste Wandlungsmöglichkeiten im Produktionssystem zu identifizieren und anschließend zu beschreiben. Abbildung 3 zeigt Wandlungsobjekte erster Ordnung, gegliedert nach den Gestaltungsbereichen und der Ebene eines Produktionssystems, wie sie von u. a. von Heger (2005), Wiendahl et al. (2007) und Nyhuis et al. (2009) vertreten werden. Einen detaillierten Überblick gestaltbarer Fabrikelemente liefern Wiendahl et al. (2005) (S. 265ff). Specht/Stefanska (2007) erweitern die Systematik der Wandlungsobjekte um den zeitlichen Horizont ihrer Änderung (kurz-, mittel- bzw. langfristige).

Gestaltungsbereiche der Wandlungsfähigkeit Detaillierungsebene des Produktionssystems	Betriebsmittel	Organisation	Raum- und Gebäudetechnik
Produktionsstätte •Fabrik	•Gebäude •Bereitstellung von Medien- und Energiezentralen	•Organisationsstruktur	•Grundstück •Bebauung •Außenanlagen
Segment •Produktionssystem •Logistikbereich	•Bereitstellung von Medien- und Energieverteilung •Informationstechnologie IT	•Produktionskonzept •Logistikkonzept •Arbeitsorganisation •Struktur	•Fabriklayout •Produktionslayout
System/ Zelle •Produktionssystem •Logistiksystem	•Transportmittel •Lagermittel •IT-Hardware •IT-Software	•Aufbau- und Ablauforganisation aller Bereiche •Produktionsorganisation	•Ausrüstung
Station •Arbeitsstation	•Produktionsverfahren •Produktionsmittel, z.B. für Handarbeitsplatz, Qualitätssicherung, ...	•Qualitätssichtungskonzept •Arbeitsbedingungen	•Arbeitsplatzgestaltung

Abbildung 3 Wandlungsobjekte 1. Ordnung (nach Heger 2005, Wiendahl et al. 2007)

Eine Unterscheidung in physische und logische Wandlungsobjekte ist für die Betrachtung von Wandlungsprozessen relevant, da der zeitliche und monetäre Wandlungsaufwand für beide Objekttypen unterschiedlich groß ist. Physische Wandlungsobjekte sind z. B. Maschinen und ihre Elemente sowie die sie verbindenden Subsysteme zur Materialhandhabung. Logische Wandlungsobjekte umfassen Organisationsprinzipien und Methoden, z. B. zur Planung und Steuerung von Routing, Terminierung und Augmentation (Koren et al. 1999, ElMaraghy 2006, Westkämper/Zahn 2009).

Obwohl auch die Mitarbeiter im Unternehmen veränderungsfähig sind und der Erfolg eines Wandlungsprozesses stark von ihnen abhängt, zählen sie nicht zu den Wandlungsobjekten. Stattdessen werden sie als rein partizipativ betrachtet und ihre Veränderungsfähigkeit mittels Methoden der Mitarbeiterführung koordiniert (Nyhuis et al. 2009).

2.6 Wandlungsbefähiger und Wandlungshemmer

Produktionssysteme sind nicht von sich aus wandlungsfähig sondern müssen mit Funktionen und Eigenschaften ausgestattet werden, welche sie zur Bewältigung von Wandlungsprozessen befähigen. Diese Funktionen und Eigenschaften werden als Wandlungsbefähiger bezeichnet (u. a. Wiendahl et al. 2007). Abbildung 4 zeigt eine Auswahl an Wandlungsbefähigern aus Sicht verschiedener Autoren (Koren et al. 1999, Wiendahl et al. 2007, Nyhuis et al. 2008, Wulfsberg et al. 2008).

Wandlungsbefähiger nach	Wiendahl et al. 2007					Koren et al. 1999	Wulfsberg et al. 2008
	Physisch			Logisch		für wandlungsfähige Produktionssysteme allgemein	
Wandelbares System	RFS	RMS	TRF	APPS	RPP		
Wandlungsbefähiger	X	X	X	X		X	X
Modularität	X	X	X	X			
Skalierbarkeit	X	X	X	X			X
Konvertierbarkeit	X	X					
Kundenanpassbarkeit	X					X	
Mobilität		X	X				X
Automatisierbarkeit		X			X		
Universalität			X			X	X
Kompatibilität			X	X			X
Neutralität				X			X
Einstellbarkeit				X	X		
Erkennungsfähigkeit					X		
Entwicklungsfähigkeit					X		
Granularität					X		
Integrierbarkeit						X	
Diagnosefunktion						X	
Schnelligkeit						X	

**Legende**

**RFS:** Rekonfigurierbares Fertigungssystem

**RMS:** Rekonfigurierbares Montagesystem

**TRF:** Transformierbare Fabrik

**APPS:** Adaptive Produktionsplanung und -steuerung

**RPP:** Rekonfigurierbare Prozessplanung

Abbildung 4 Wandlungsbefähiger im Überblick

Wesentliche, mindestens dreimal genannte, Wandlungsbefähiger sind Modularität, Skalierbarkeit, Mobilität, Universalität, Kompatibilität, Neutralität, Kundenanpassbarkeit, Automatisierbarkeit, Einstellbarkeit und Konvertierbarkeit. Den physischen und logischen Subsystemen von Fabriken werden unterschiedliche Sets an Wandlungsbefähigern zugeordnet. Die jeweils relevanten Wandlungsbefähiger werden in Abhängigkeit von den betrachteten Wandlungstreibern und den gewählten Wandlungsobjekten des Produktionssystems spezifiziert. Eine wesentliche Rolle spielen hierbei Schnittstellen zwischen den Elementen und Systemen der Fabrik. Sie betreffen die logische, physikalische und physische Kompatibilität von Informationen, Aktuatoren, Sensoren, Manipulatoren, Kinematik sowie der infrastrukturellen Ver- und Entsorgung der Fabrikssysteme mit Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen (Koren et al. 1999). Mitarbeiter werden hingegen nicht zu den Wandlungsbefähigern

gezählt, sind aber für erfolgreiche Wandlungsprozesse von hoher Bedeutung (Olivella et al. 2008).

Neben den Wandlungsbefähigern gibt es Faktoren, welche die Wandlungsfähigkeit begrenzen. Diese so genannten Wandlungshemmer sind Ursache für Wandlungsrigiditäten und finden sich in allen Unternehmenselementen wieder (Westkämper/Zahn 2009). Wandlungshemmer resultieren u. a. aus der getrennten Betrachtung soziologischer und technokratischer Aspekte in der Praxis und verhindern die Ausschöpfung des logistischen Leistungspotentials (Wiendahl 2008). Besonders problematisch sind nach Nyhuis et al. (2009) unklare, starre und teure Schnittstellen, eine schlechte Koordination in Wertschöpfungsnetzen sowie eine unpräzise ökonomische Bewertung der Wandlungsfähigkeit, die schließlich Investitionen in Wandlungsfähigkeit verhindert. Grenzen für die Wandlungsfähigkeit liegen auch in der mentalen Verträglichkeit des Wandels sowie in der Fähigkeit zum Handeln in komplexen Systemen (Keijzer 2007). Im ersten Fall müssen Mitarbeiter zur erfolgreichen Umsetzung eines Wandlungsimpulses ausreichend Wandlungskompetenz, -bereitschaft und -möglichkeiten besitzen. In letztem Fall können die Folgen des Handelns nicht mehr eingeschätzt werden, weil die vorhandenen Informationen unvollständig oder falsch sind (Keijzer 2007). Zudem ist jede Wandlung mit Verzögerungen bei der Erkennung des Wandlungsbedarfs, der Einsteuerung der Maßnahmen und der Entfaltung ihrer Wirkung verbunden.

### 3 Selbststeuerung als Antwort auf Turbulenzen

#### 3.1 Begriffsbestimmung

Die Erforschung von Autonomie und Selbstorganisation bildet die Basis für die Formulierung selbststeuernder logistischer Systeme (Scholz-Reiter/Höhns 2006). Hierbei wird Selbststeuerung als eine Option zur Bewältigung steigender Komplexität und Dynamik in diesen Systemen gesehen. Der Sonderforschungsbereich (SFB) 637 definiert Selbststeuerung als „Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-vorhersagbaren Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen.“ (Hülsmann/Windt 2007). Der Systemtheorie folgend werden Kompetenzen zur Bewältigung logistischer Aufgaben von der Systemebene auf die einzelnen Systemelemente übertragen. Die Systemelemente werden als intelligente logistische Objekte bezeichnet, wenn sie über die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung verfügen sowie Entscheidungen treffen und umsetzen können (Hülsmann/Windt 2007). Eine grundlegende Annahme der Selbststeuerung ist, dass eine Optimierung der Entscheidungen und Aktionen einzelner logistischer Objekte zu einer positiven Emergenz für das gesamte System führt.

Hierunter wird eine verbesserte Zielerreichung des logistischen Systems durch das Zusammenspiel der einzelnen Systemelemente verstanden. Allerdings kann kein bestimmtes globales Systemverhalten garantiert werden (Scholz-Reiter/Freitag 2007), auch wenn verschiedene Simulationsstudien positiven Effekte einer Selbststeuerung zeigen (Scholz-Reiter 2006, 2007). Die wichtigste Voraussetzung für die autonome Entscheidungsfindung durch intelligente logistische Objekte ist das Vorhandensein von Entscheidungsknoten im logistischen Szenario (Scholz-Reiter et al. 2005). Entscheidungsknoten sind Situationen, in denen ein logistisches Objekt aus mehreren möglichen Handlungsalternativen diejenige auswählen kann, die sein lokales Zielsystem am besten erfüllt. Hierzu benötigen die intelligenten logistischen Objekte Entscheidungskompetenz in Form von Wissen über Entscheidungsmethoden und den lokalen Systemzustand. Die Entscheidungsmethoden werden vom Systementwickler normativ in den logistischen Objekten implementiert. Zu deren Anwendung müssen die intelligenten Objekte den lokalen Systemzustand erfassen und auswerten können.

#### 3.2 Charakterisierung

Zur Charakterisierung selbststeuernder logistischer Systeme entwickelte Windt (2008) einen Kriterienkatalog zur Bestimmung des Grads der Selbststeuerung eines logistischen Systems, ein vektorielles Verfahren zur Ermittlung seines Komplexitätsniveaus sowie ein Mess- und Regelsystem zur Bestimmung seiner logistischen Zielerreichung.

Der Kriterienkatalog ordnet jeder der drei Systemebenen, Entscheidungssystem, Informationssystem und Ausführungssystem, bestimmte Charakteristika zu (Tabelle 1). Die relative Wichtigkeit der Kriterien zueinander wird über einen paarweisen Vergleich ermittelt. Jedes Kriterium ist eine Teilkomponente des Grads der Selbststeuerung. Die Kriterien beschreiben das maximale Niveau, das ein selbststeuerndes System haben kann (Hülsmann/Windt 2007). Die grau schattierten Felder zeigen eine mögliche Ausprägung eines selbststeuernden logistischen Systems. Eine detaillierte Diskussion der einzelnen Kriterien und des Selbststeuerungsgrads geben Böse/Windt (2007).

Zur Untersuchung der Auswirkung des Komplexitätsniveaus auf die logistische Zielerreichung wurde ein Komplexitätsmaß definiert, welches die Komplexität eines logistischen Systems zeitlich, organisational und systemisch gliedert. Die zeitliche Komplexität beschreibt sowohl dynamische Veränderungen als auch den Systemstatus zu einem bestimmten Zeitpunkt oder -raum. Die organisationale Komplexität umfasst die prozessuale und strukturelle Komplexität nach Anzahl und Verschiedenheit der Elemente sowie ihrer Relationen und Eigenschaften. Die systemische Komplexität unterscheidet Faktoren innerhalb und außerhalb der Systemgrenzen. Jede Komplexitätsart wird durch einen Komplexitätsvektor beschrieben. Die drei Komplexitätsdi-

mensionen werden gewichtet zu einem Skalar zusammengefasst (Windt 2008).

Kriterienkategorie $K_i$	Kriterium $K_{ij}$	Gewichtung $G_{ij}$	Ausprägung $A_{ij}$		
<b>Entscheidungsfindungs-Kriterien</b> Auslösung des Entscheidungsprozesses, Identifikation und Bewertung der Entscheidungsalternativen, Anweisung und Kontrolle der ausgewählten Entscheidungsalternative	Zeitliches Verhalten des Zielsystems	9	statisch <sup>0</sup>	überwiegend statisch <sup>1</sup>	dynamisch <sup>3</sup>
	Organisationsstruktur	12	hierarchisch <sup>0</sup>	überwiegend hierarchisch <sup>1</sup>	heterarchisch <sup>3</sup>
	Anzahl Entscheidungsalternativen	12	keine <sup>0</sup>	einige <sup>1</sup>	unbegrenzt <sup>3</sup>
	Art der Entscheidungsfindung	8	statisch <sup>0</sup>	regelbasiert <sup>1.5</sup>	lernend <sup>3</sup>
	Ort der Entscheidungsfindung	15	Systemebene <sup>0</sup>	Subsystemebene <sup>1.5</sup>	Systemelementebene <sup>3</sup>
	Vorhersagbarkeit des System-/Elementenverhaltens	11	SV und EV deterministisch <sup>0</sup>	EV nicht-/SV deterministisch <sup>1</sup>	SV nicht-/EV nicht-deterministisch <sup>3</sup>
<b>Informationsverarbeitungs-Kriterien</b> Erfassung, Speicherung, Transformation und Übertragung von Informationen	Ort der Datenhaltung	1	zentral <sup>0</sup>	überwiegend zentral <sup>1</sup>	dezentral <sup>3</sup>
	Ort der Datenverarbeitung	6	zentral <sup>0</sup>	überwiegend zentral <sup>1</sup>	überwiegend dezentral <sup>2</sup>
	Interaktionsfähigkeit	14	keine <sup>0</sup>	Datenbereitstellung <sup>1</sup>	Kommunikation <sup>2</sup>
<b>Entscheidungsausführungs-Kriterien</b> Umsetzung der getroffenen Entscheidung auf der Materialflussebene	Flexibilität	2	unflexibel <sup>0</sup>	wenig flexibel <sup>1</sup>	flexibel <sup>2</sup>
	Identifizierbarkeit	4	keine Elemente identifizierbar <sup>0</sup>	einige Elemente identifizierbar <sup>1</sup>	viele Elemente identifizierbar <sup>2</sup>
	Fähigkeit zur Zustandsmessung	6	keine <sup>0</sup>	andere <sup>1</sup>	selbst <sup>2</sup>
	Mobilität	1	stationär <sup>0</sup>	gering mobil <sup>1</sup>	mobil <sup>2</sup>

<b>Selbststeuerungsgrad</b>	$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m G_{ij} \cdot a_{ij} = 220$	$K_i$ = Kriterienkategorie $K_{ij}$ = Kriterium $G_{ij}$ = Gewichtung des Kriteriums	$A_{ij}$ = Ausprägung des Kriteriums $a_{ij}$ = Erfüllung des Kriteriums
-----------------------------	---	--	---

Tabelle 1 Kriterienkatalog der Selbststeuerung

Zur Ermittlung der resultierenden logistischen Zielerreichung für ein konkretes selbststeuerndes System schlägt Windt (2008) vor, die Zielerreichung des Gesamtsystems über die Zielerreichung seiner Elemente sowie der jeweiligen Alternativen an den Entscheidungsknoten zu bestimmen. Hierzu werden im selbststeuernden System Messpunkte zur Ermittlung der logistischen Zielerreichung festgelegt und aus dem Gesamtziel die jeweiligen Objektklassen der lokalen Zielgrößen abgeleitet. Über einen Regler wird die lokale Zielabweichung erfasst sowie der Beitrag jeder Entscheidungsalternative zur Zielerreichung prognostiziert. Ein Stellglied setzt die Entscheidung für eine Alternative um. Abschließend wird der Zielerreichungsgrad jedes logistischen Objekts ermittelt und zur Bestimmung des Grads der Zielerreichung für einen Referenzzeitraum des gesamten logistischen Systems aggregiert.

### 3.3 Systemgestaltung

Selbststeuerung kann in logistischen Systemen auf unterschiedliche Art und Weise realisiert werden. Die einzelnen Möglichkeiten unterscheiden sich in der Art der Implementierung der Kontrollsystemelemente, nach dem Ausmaß

der Verlagerung von Fähigkeiten zu den logistischen Objekten sowie dem Grad der Verteilung der Fähigkeiten. Je größer die beiden letztgenannten sind, desto ausgeprägter ist das Konzept der Selbststeuerung in den einzelnen Systemelementen umgesetzt und desto größer ist die technologische Komplexität des Systems. Abbildung 5 stellt den Bereich klassischer PPS-Systeme sowie partiell- und voll-verteilter Steuerungsarchitekturen dar.

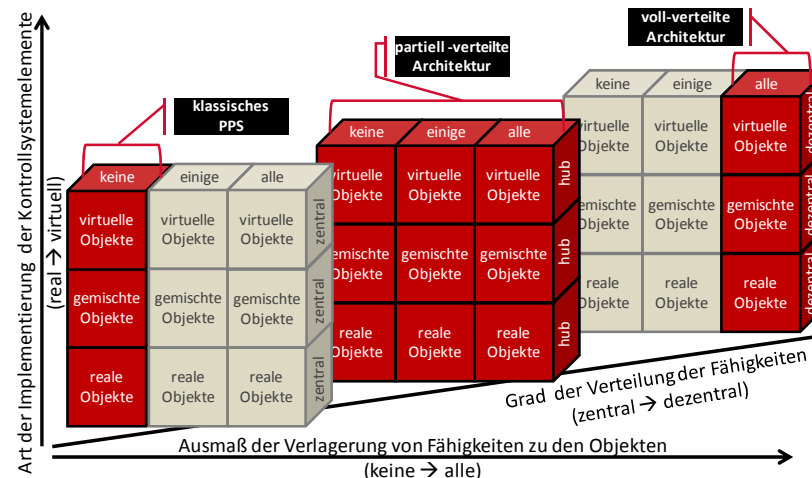


Abbildung 5 Architekturen selbststeuernder logistischer Systeme

In der *voll-verteilten Architektur* wird jedes Objekt des Systems als intelligentes logistisches Objekt umgesetzt, d. h. es wird mit der Fähigkeit ausgestattet, selbstständig Entscheidungen zu treffen und auszuführen. In logistischen Systemen können hierzu drei Arten von Objekten genutzt werden: Güter (z. B. fertige Produkte, Halbzeugnisse, Einzelteile und Rohmaterialien), Ressourcen (z. B. Produktionszentren, Maschinen und Transportmittel) und Aufträge (z. B. Kundenaufträge oder Produktionsaufträge). Hierbei konsumieren Güter produktive Dienste, die von Ressourcen angeboten werden. Die produktiven Dienste können von der Art Transport, Fertigung, Montage oder Lagerung sein. Aufträge bilden den Soll-Zustand der Güter und den Pfad ihrer Verarbeitung ab. Eine voll-verteilte Steuerungssystemarchitektur ermöglicht ein flexibles und anpassbares Materialflusssystem, da die Entscheidungskompetenz im System stark verteilt ist. Die resultierende technische und logische Komplexität kann aber zu hohen Anschaffungskosten führen. In der *partiell-verteilten Architektur* werden nur bestimmte Objekte als intelligente logistische Objekte realisiert. Diese Objekte sind aber zusätzlich in der Lage ihre Fähigkeiten weniger intelligenten Objekten anzubieten, d. h. zwi-

schen ihnen besteht eine Client-Server-Beziehung. Clients müssen lediglich ihre Ziele und die gewünschte Entscheidungsmethodik speichern, beides an einen Server übertragen sowie die von ihm getroffene Entscheidung umsetzen können. Server sind z. B. Maschinen, die alle Selbststeuerungsfähigkeiten besitzen. Clients können kleine Güter sein, die nur Daten speichern und senden können. Eine partiell-verteilte Architektur hat vor allem in solchen Szenarien Vorteile, deren Elemente über freie Rechen- und Netzwerkkapazität verfügen, oder in denen es unökonomisch, impraktikabel oder unzweckmäßig ist, jedes Systemelement mit allen Steuerungsfähigkeiten auszustatten. Die Komplexität des Systems konzentriert sich an den Servern. Die Kosten für die Ausstattung ausgewählter Systemelemente mit den jeweiligen Fähigkeiten werden als geringer eingeschätzt als bei der voll-verteilten Steuerungsarchitektur.

In beiden Fällen folgen die selbstgesteuerten logistischen Objekte eigenen Zielen und handeln, abstrakt gesehen, als Agent für sich selbst. Dies gilt auch dann, wenn ein Server eine Entscheidung für einen Client nach dessen Vorgaben hinsichtlich der Steuerungsmethode und der zu verwendenden Informationen trifft. Im Gegensatz dazu basiert Fremdsteuerung in *klassischen PPS-Systemen* auf einem Agenten, der nicht für die jeweiligen lokalen Zielsysteme handelt (selbst wenn sie vorhanden wären), sondern ein fremdes, systemexternes globales Zielsystem an den Objekten umsetzt.

In allen Steuerungssystemarchitekturen können die Elemente des Kontrollsystems (die Träger der Steuerungsfähigkeiten) *real oder virtuell implementiert* werden. Sie sind real implementiert, wenn die Steuerungsfunktionalitäten an den einzelnen logistischen Objekten realisiert sind. Werden sie hingegen fern von den logistischen Objekten realisiert, bspw. als Agenten in einem zentralen Computer, sind sie in Bezug auf die Objekte virtuell. Die Agenten übermitteln den realen Objekten die in Echtzeit getroffenen Entscheidungen und bestimmen ihr Verhalten. Sind alle Elemente als Agenten in einem solchen zentralen System abgebildet, so sind alle Informationen zentral vorhanden und stehen allen Agenten zur Verfügung. Die Entscheidung für eine Architektur richtet sich nach den vorhandenen und für die Selbststeuerung verwendbaren Systemelementen und ihren Funktionalitäten, dem Grad der Selbststeuerung, der Art der Realisierung von Selbststeuerungsstrategien sowie sozialen, betrieblichen und ökonomischen Faktoren (Scholz-Reiter 2009).

### 3.4 Entwicklung selbststeuernder logistischer Systeme

Die Entwicklung selbststeuernder logistischer Systeme umfasst die Schritte: Spezifikation des Systems, Simulation seines Verhaltens, Konfiguration der Steuerungsinfrastruktur und Kosten-Nutzen-Analyse. Basis für die Systementwicklung ist die detaillierte Spezifikation der Ziele des logistischen Systems. Die anschließende Modellierung des konkreten Szenarios bildet die Grundlage für die Auswahl geeigneter Entscheidungsmethoden, der Steue-

rungssystemarchitektur und der Infrastrukturkomponenten. Die Lauffähigkeit und Umsetzbarkeit der Spezifikation wird mittels Simulation überprüft. Danach werden geeignete Infrastrukturkomponenten auf Basis der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen und der vorhandenen Systemelemente ausgewählt. Mit der abschließenden Kosten-Nutzen-Analyse wird das System ökonomisch und hinsichtlich seines Grads der Zielerreichung bewertet.

Zur Unterstützung der Entwicklung selbststeuernder Systeme wurde im SFB 637 die Autonomous Logistic Engineering Methodology (ALEM) entwickelt. Sie besteht aus einem Vorgehensmodell, welches Logistikprozessexperten durch die einzelnen Schritte der Modellierung führt, einem Sichtenkonzept zur Modellstrukturierung und einer graphischen Notation zur Darstellung selbststeuernder logistischer Systeme. Alle drei Modellierungselemente werden durch die prototypische Modellierungssoftware unterstützt.

### 3.5 Nutzen von Selbststeuerung und Untersuchungsszenario

Die positiven Auswirkungen des Einsatzes von Selbststeuerung wurden in mehreren Simulationsstudien gezeigt. Das verwendete Szenario entspricht einer Werkstattproduktion mit neun Maschinen, die jeweils mit einem Eingangspuffer ausgestattet sind. Die Maschinen sind in drei Produktionsstufen mit je drei gleichartigen Maschinen angeordnet (Abbildung 6). Die eingesteuerten Aufträge durchlaufen die einzelnen Stufen sequenziell. Nach jeder Stufe wählt das zugehörige Gut eine der drei Maschinen der nächsten Stufe aus. An dem Szenario wurden verschiedene prognose- und erfahrungsbasierte Selbststeuerungsmethoden simuliert. Beide Methodenarten zeigten beim Auftreten zufälliger Störungen (z. B. Maschinenausfälle oder Eilaufträge) sowie bei Änderungen der Gütertypen, eine große Robustheit und Flexibilität. Allerdings antizipieren Prognosemethoden eine hohe Dynamik besser, als auf Erfahrungswerten basierende Methoden (Scholz-Reiter et al. 2006 und 2007).

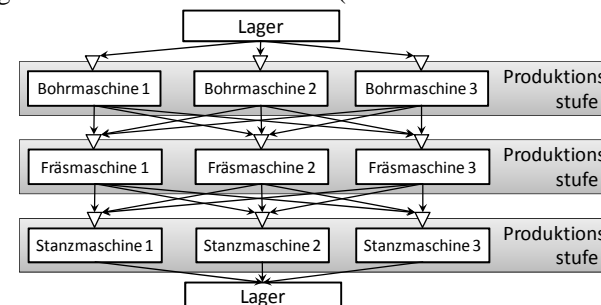


Abbildung 6 Materialflüsse im 3x3 Maschinenmodell (nach Scholz-Reiter et al. 2006)

Für die weiteren Ausführungen wird die prognosebasierte Selbststeuerungsmethode Queue Length Estimator angenommen. Bei dieser werden die Güter zu intelligenten logistischen Objekten erweitert. Während die Maschinen die geplante Fertigstellungszeit des letzten Gutes im Puffer speichern und diese Information an die Güter weitergeben können, fragen die Güter die Information ab und nutzen sie zur Entscheidungsfindung. Die Güter wählen die Maschine mit der frühesten Startzeit für sich aus. Den Maschinen genügt hingegen eine geringere Intelligenz als die der Güter.

#### 4 Selbststeuerung als Wandlungsbefähiger

Während Selbststeuerung ein operatives Konzept ist, mit dem Produktionssysteme schnell auf aktuelle Ereignisse reagieren können, wirkt Wandlungsfähigkeit eher mittelfristig und hat einen taktisch-strategischen Charakter. Beides lässt sich gut vereinbaren, da strategisch motivierte Änderungen eines Produktionssystems operativ umgesetzt werden müssen. Hierbei muss zwischen einer Änderung des Produktionssystems und seiner Steuerung unterschieden werden. Ändert sich z. B. das Fabriklayout und mit ihm die möglichen Wege für den Materialfluss, so adaptiert Selbststeuerung die neue Fabrikstruktur und passt den Materialfluss entsprechend an. Würde bspw. Fräsmaschine 2 in Abbildung 6 entfernt, so würden die Güter eine der zwei verbliebenen Handlungsalternativen wählen. Falls das Steuerungssystem selbst das Veränderungsobjekt ist, ist es nur dann adaptionsfähig, wenn es seine Komponenten selbstlernend an die neuen Gegebenheiten anpassen kann. Hierbei spielt es keine Rolle, ob die Anpassungsfähigkeit wegen dem Auftreten stochastischer Ereignisse, wegen geplanter Inanspruchnahmen vorhandener Flexibilität, z. B. von Mengen oder Terminen, oder wegen struktureller Änderungen des Produktionssystems benötigt wird. Selbststeuerung eignet sich somit zur Realisierung wandlungsfähiger Produktionssysteme, auf der Ebene veränderter Strukturen der physischen Leistungserbringung und wird nachfolgend in diesem Kontext betrachtet.

##### 4.1 Selbststeuerung, adaptive Steuerung und Agentensysteme

Selbststeuerung zählt zu den adaptiven Steuerungsverfahren (Wiendahl et al. 2007, Westkämper/Zahn 2009), kann Veränderungen in der Materialflussebene leicht handhaben und mittels (Software-)Agenten modelliert werden (Scholz-Reiter/Höhns 2006). Analog zu den selbststeuernden logistischen Objekten, operieren die Agenten dezentral, autonom und selbstorganisierend. Sie repräsentieren jeweils ein Objekt und routen es durch das logistische Szenario. Hierbei nehmen die Agenten verschiedene Rollen ein (Dienstnehmer, -geber oder Broker) und können mit allen anderen Agenten verhand-

lungsorientiert interagieren. Neben der Kommunikationsfunktion verfügen sie über Mechanismen zur Erkennung von Agentenanwesenheit, Produktionssystemstruktur, -hierarchie und Netzwerkkonfiguration (Feldmann et al. 2007). Wang et al. (2009) und Wang/Lin (2009) strukturieren die Agentenrollen hingegen in Softwareagenten (execution agent, information agent) und mobile Agenten, die sich im Produktionsnetz frei bewegen und mit anderen Agenten über Verhandlungsprotokolle kommunizieren können. Das Scheduling ist in solchen Agentensystemen aber komplex, da einzelne Agenten stark in funktionale Blöcke aufgeteilt sind. Agentensysteme eignen sich sowohl zur Beschreibung regulärer (planmäßiger), als auch irregulärer Prozesse (vorhersehbar oder unvorhersehbar). Beide unterscheiden sich nach den zur Lösungsfindung verwendeten Kooperationsmechanismen und den dabei verfügbaren Freiheitsgraden. Da irreguläre Prozesse außerhalb des ursprünglichen Plans arbeiten, müssen die Freiheitsgrade bei der Lösungsfindung im Turbulenzfall größer sein (Westkämper/Zahn 2009). Nach Weber (2007) können die einzelnen Elemente des Steuerungssystems mit jedem anderen Element kommunizieren. Insbesondere bei strukturfesten Elementen zeigt sich eine strukturelle Dualität der physischen Elemente und ihrer Modelle. Die Fähigkeiten der Elemente werden aus einem Verbund von Mechanik, Rechnerhardware und Software realisiert.

##### 4.2 Wandlungstreiber, Wandlungsbefähiger und Wandlungsobjekte

Alle Wandlungstreiber können qualitative und quantitative Änderungen von Produktmischen, Produkt- und Funktionsspektren, Kapazitäten und des Automatisierungsgrads in logistischen Systemen induzieren sowie die logistische Zielerreichung beeinflussen (Weber 2007). Sie können auf das Materialflusssystem anders wirken, als auf das Steuerungssystem. Für Steuerungssysteme sind insbesondere die Wandlungsbefähiger, Kompatibilität, Modularität, Skalierbarkeit, Einstellbarkeit und Neutralität wichtig (Wiendahl et al. 2007). Wie dargelegt sind sowohl das Materialflusssystem, als auch das Steuerungssystem wandelbar. Bezogen auf das Beispiel aus Abbildung 6 können in der Materialflussebene einzelne Knoten (Maschinen) oder Kanten (Transportwege zwischen den Knoten) verändert werden. Dies betrifft sowohl ihre Präsenz und Einbindung in das Produktionsnetzwerk, als auch ihre Attribute und Funktionen, z. B. Puffergrößen, Bearbeitungskapazitäten und die Art ihrer Fähigkeiten zur qualitativen Bearbeitung der Güter. Auf der Ebene des Steuerungssystems können die Wandlungsobjekte nach den drei Grundfähigkeiten der logistischen Objekte gegliedert werden (Informationsverarbeitung, Entscheidungsfindung und Entscheidungsausführung). Zur Informationsverarbeitung gehören auch Methoden zu deren Erhebung und Propagation zwischen den logistischen Objekten. Anzahl, Funktion und Verteilung der Infrastruk-



turkomponenten der Steuerung, ihre Anordnung zu einer Steuerungsarchitektur sowie die eingesetzte Selbststeuerungsstrategie zählen ebenso zu den Wandlungsobjekten eines Steuerungssystems. Weiterhin können auch die Ziele und ihre Verrechnungsmetrik sowie die vorgehaltenen Datenfelder als wandlungsfähige Objekte des Steuerungssystems betrachtet werden. Durch kluge Auswahl der Objekte wird ein performantes adaptives System erzeugt. In Abbildung 7 stellt Franke et al. (2010) automatisierte, selbstorganisierende und selbstlernende Produktionssysteme mit ihren Inputs (links) und Outputs (rechts) dar. Selbststeuernde Produktions(steuering)systeme werden der mittleren Ebene zugeordnet, da sie sich nach vorgegebenen Regeln eigenständig organisieren, aber nicht selbstlernend sind. Die Inputs der zweiten Ebene können explizit um den Begriff Wandlungsfähigkeit ergänzt werden, da die Anwendung von Selbststeuerungsmethoden (Regeln im Steuerungssystem) die physische Wandlungsfähigkeit des kontrollierten Produktionssystems unterstützt. Das Steuerungssystem selbst bleibt regelbasiert. Ein größerer Umfang an Wandlungsfähigkeit (einschließlich des Steuerungssystems) verlangt hingegen ein selbstlernendes Produktionssystem.

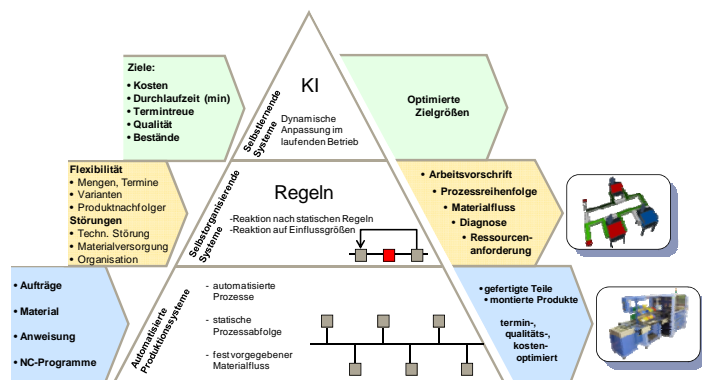


Abbildung 7 Transformationspyramide der Produktionssysteme (Franke et al. 2010)

## 5 Fazit und Ausblick

Anhand einer beispielhaften Werkstattfertigung wurde erläutert, wie Selbststeuerung als adaptives Steuerungskonzept die Wandlung von Produktionssystemen hinsichtlich ihrer Ressourcen (Räume, Gebäude und Betriebsmittel) sowie der logischen Produktstruktur nativ unterstützt: Wird ein Produktionssystem in dieser Art verändert, operieren die selbststeuernden logistischen Objekte solange weiter, wie sie mindestens eine gültige Handlungsoption zur Erfüllung ihres Produktionsauftrags haben. Die Qualität der getroffenen Ent-

scheidungen und das Ausmaß der logistischen Zielerreichung hängen vom konkreten logistischen Szenario und seiner Selbststeuerungsstrategie ab. Es bestehen aber auch Rigiditäten für die Wandlung einer Selbststeuerung. Dies betrifft insbesondere strukturelle Veränderungen des Steuerungssystems, z. B. einen Wechsel von einer partiell- zu einer voll-verteilten Steuerungssystemarchitektur, die Adaption einer veränderten oder einer neuen Selbststeuerungsstrategie oder das Zielsystem und dessen Datenmodell. Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich von Möglichkeiten zur automatischen Umstrukturierung eines Steuerungssystems im laufenden Betrieb. Fragen dieser Art sollten daher in künftigen Forschungsarbeiten untersucht werden, um die Wandlungsfähigkeit der Steuerungssysteme selbst zu verbessern.

## Literatur

- Andresen, K.; Gronau, N.; Schmid, S. (2005): Ableitung von IT-Strategien durch Bestimmung der notwendigen Wandlungsfähigkeit von Informationssystemarchitekturen. In: Ferstl, O. K.; Sinz, E. J.; Eckert, S.; Isselhorst, T. (Hrsg.): Wirtschaftsinformatik 2005 - eEconomy, eGovernment, eSociety. Physica-Verlag, Heidelberg
- Böse, F.; Windt, K. (2007): Catalogue of Criteria for Autonomous Control. In: Hülsmann, M.; Windt, K.: Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Springer, Berlin
- Dashchenko, A. I. (Hrsg.) (2005): XXI century technologies: Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories. Springer, Berlin u.a.
- Deif, A. M.; ElMaraghy, W. H. (2006): Architecture for Decision Logic Unit in Agile Manufacturing Planning and Control Systems. In: 2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision (Band 1). IEEE Computer Society, Singapore
- ElMaraghy, H. A. (2006): Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In: International Journal of Flexible Manufacturing Systems (Band 17), Springer, Netherlands
- Feldmann, K.; Weber, M.; Wolf, W. (2007): Modulare intelligente Steuerungssysteme - Selbstorganisation und Wandlungsfähigkeit flexibler Montageanlagen. In: wt Werkstattstechnik online (Band 9), Springer VDI Verlag
- Franke, J.; Merhof, J.; Fischer, C.; Risch, F. (2010): Intelligente Steuerungskonzepte für wandlungsfähige Produktionssysteme. In: Industrie-Management : Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse (Band 2)
- Gerst, D.; Kolakowski, M.; Nyhuis, P. (2007): Neue Wege der Fabrikplanung. In: Industrie-Management : Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse (Band 2)
- Grundig, C.-G. (2000): Fabrikplanung. Hanser, München, Wien
- Hale, D. D. (1995): Globale Wirtschaftsintegration. Neue Herausforderungen für die Industriestaaten. In: Internationale Politik : IP / Deutsche Gesellschaft für Auswärtige Politik e.V. (Band 50, Ausgabe 3)
- Heger, C. L. (2005): Kostend der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. In: Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Hanser, München, Wien, S. 129-140.
- Hülsmann, M.; Windt, K. (Hrsg.) (2007): Understanding of Autonomous Cooperation and Control in Logistics – The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication and Material Flow. Springer Verlag, Berlin

- Keijzer, W. C. (2007): Wandlungsfähigkeit von Entwicklungsnetzwerken – ein Modell am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation. Technische Universität, München
- Kircher, C.; Meitzner, M.; Heisel, U.; Wurst, K.-H. (2004): Wandelbare, zielvariable Bearbeitungssysteme. In: *Industrie-Management : Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse*, (Band 2)
- Kolditz, J. (2009): Fachkonzeption für selbststeuernde logistische Prozesse. Dissertation. Universität Bremen, Bremen
- Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; Van Brussel, H. (1999): Reconfigurable manufacturing systems. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* (Band 48 Ausgabe 2)
- Luczak, H.; Eversheim, W.; Schotten, M. (Hrsg.) (2001): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung, Konzepte*. Springer Verlag, Berlin
- Nofen D.; Klußmann, J. H.; Löllmann, F. (2005): Komponenten und Aufbau einer wandlungsfähigen modularen Fabrik. In: *Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.* (Hrsg.): *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. Hanser, München, Wien, S. 17-30
- Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Abele, E. (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. *wt Werkstattstechnik online* (Band 1/2)
- Nyhuis, P.; Fronia, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Wulf, S. (2009): Wandlungsfähige Produktionssysteme - Ergebnisse der BMBF-Vorstudie „Wandlungsfähige Produktionssysteme“. *wt Werkstattstechnik online* (Band 4)
- Olivella, J.; Cuatrecasas, L.; Gavilan, N. (2008): Work organisation practices for lean production. *Journal of Manufacturing Technology Management* (Band 19 Ausgabe 2)
- Pawellek, G. (2008): *Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung*. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg
- Prothmann, H.; Rochner, F.; Tomforde, S.; Branke, J.; Müller-Schloer, C.; Schmeck, H. (2010): Organic Control of Traffic Lights. In: *Lecture Notes in Computer Science* (Band 5060/2010)
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M. (2007): Autonomous processes in assembly systems. In: *CIRP Annals* (Band 56 Ausgabe 2)
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, C.; Jagalski, T. (2006): Modelling and Simulation of a Pheromon based Shop Floor Control. In: *Cunha, P.; Maropoulos, P.* (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd International CIRP Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology - DET2006*. University of Setubal
- Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.; de Beer, C.; Jagalski, T. (2007): Analysing the Dynamics caused by Autonomously Controlled Logistic Objects. In: *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production*. Toronto, Canada
- Scholz-Reiter, B.; Höhns, H. (2006): Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: *Schuh, G.* (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung, Konzepte*. Springer Verlag, Berlin
- Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.; Kolditz, J.; Hildebrandt, T. (2005): Autonomous Supply Net Coordination. In: *Proceedings of 38th CIRP Manufacturing Systems Seminar*. Florianopolis, Brazil
- Scholz-Reiter, B.; Kolditz, J.; Hildebrandt, T. (2007): The Autonomous Logistics Engineering Methodology (ALEM). In: *Maropoulos, P. G.; Newman, S. T.* (Hrsg.): *Proceedings of 4th International CIRP-Sponsored Conference on Digital Enterprise Technology (DET2007)*. University of Bath, Bath
- Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.; Hildebrandt, T.; Rippel, D. (2009): Modelling of Autonomous Control explicitly considering Orders as a kind of Immaterial Logistic Objects in Manufactur-

- ing Processes. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009)*. München
- Scholz-Reiter, B.; Sowade, S.; Rippel, D.; Teucke, M.; Özahin, M.; Hildebrandt, T. (2009): A Contribution to the Application of Autonomous Control in Manufacturing. In: *International Journal of Computers* (Band 3)
- Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Kolditz, J.; Böse, F.; Hildebrandt, T.; Philipp, T.; Höhns, H. (2005): New Concepts of Modelling and Evaluating Autonomous Logistics Processes. In: *Chryssolouris, G.; Mourtzis, D.* (Hrsg.): *Manufacturing, Modelling, Management and Control 2004*. IFAC Workshop Series. Elsevier Science, Amsterdam
- Spath, D.; Scholtz, O. (2007): Wandlungsfähigkeit für eine wirtschaftliche Montage in Deutschland. In: *Industrie-Management : Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse* (Band 2)
- Specht, D.; Stefanska, R. (2007): Wandlungsfähige Fabrikstrukturen als Strategie - Zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen. In: *ZWF- Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (Band 5)
- Wang, L.-C.; Lin, S.-K. (2009): A multi-agent based agile manufacturing planning and control system. In: *Computers & Industrial Engineering* (Band 57)
- Wang, L.-C.; Lin, S.-K.; Huang, L.-P. (2009): A RFID Based Agile Manufacturing Planning and Control System. In: *Goebel, R.; Siekmann, J.; Wahlster, W.* (Hrsg.): *Rough Sets and Knowledge Technology*. Lecture Notes in Computer Science (Band 5589). Springer, Berlin, Heidelberg
- Weber, M. A. (2007): Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme. Dissertation. Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Nürnberg
- Westkämper, E.; Zahn, E. (Hrsg.) (2009): *Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell*. Springer, Berlin
- Windt, K. (2008): Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik – Grenzen der Selbststeuerung. In: *Nyhuis, P.* (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 349-372
- Wiendahl, H.-P. (2005): *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Carl Hanser Verlag, München
- Wiendahl, H.-H. (2008): Stolpersteine der PPS – ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement. In: *Nyhuis, P.* (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Springer, Berlin, Heidelberg
- Wiendahl, H.-P. (2002): Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. In: *wt Werkstattstechnik online* Band (2)
- Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M. (2007): Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals* (Band 56 Ausgabe 2)
- Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Grienitz, V. (2002): Planung wandlungsfähiger Fabriken - Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements. In: *ZWF- Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (Band 1-2)
- Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.) (2005): *Planung modularer Fabriken: Vorgehen und Beispiele aus der Praxis*. Hanser, München, Wien
- Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P. (2009): *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. Hanser, München u.a.
- Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Lehmann, J.; Bruhns, F.-L. (2008): Square Foot Manufacturing - Ein wandlungsfähiges Produktionssystem für die Fertigung von Mikroteilen. In: *wt Werkstattstechnik online* (Band 5)
- Wulfsberg, J. P.; Redlich, T.; Kohrs., P. (2010): Square Foot Manufacturing: a new production concept for micro manufacturing. In: *Production Engineering* (Band 4)