Autonomie als Planungsparameter von Industrie 4.0-Fabriken

Norbert Gronau

Cyber-physische Systeme ermöglichen die Reduzierung zentraler Planungs- und Steuerungsentscheidungen durch dezentrale Koordination zwischen den Elementen eines Produktionssystems. Theoretische Ansätze zur Ermittlung des benötigten Grades an Autonomie existieren [1], allerdings bleibt unklar, inwieweit Autonomie tatsächlich zur besseren Erreichung der Ziele des Produktionssystems dient. Dieser Beitrag stellt ein in der Praxis validiertes Verfahren vor, mit Hilfe dessen die Bereiche eines Produktionssystems, die von einem größeren Maß an Autonomie profitieren können, ermittelt werden können.

In diesem Beitrag lesen Sie:

- ✓ wie Autonomie in Produktionssystemen gemessen werden kann,
- ✓ welchen praktischen Nutzen Autonomie in Fabrikumgebungen hat und
- ✓ wie der optimale Grad an Autonomie bestimmt werden kann.

Messung von Autonomie

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, Autonomie zu beschreiben und zu messen [2,3].

Grundsätzlich ist Autonomie anzusehen als die Fähigkeit einer Einheit, ihre eigenen Handlungen zu strukturieren und ihre Umgebung unabhängig und ohne ungewünschten Einfluss von außen zu beeinflussen. Verfahren, Autonomie zu messen, existieren heute im Wesentlichen im Bereich von Medizin und Psychologie. In der künstlichen Intelligenz wurden autonome Agenten entwickelt, die Ziele unabhängig von den Zielen anderer Agenten verfolgen [4]. Ein autonomer Agent hat die Kontrolle über seinen internen Zustand und sein Verhalten [5].

Auf Produktionssysteme angewendet, liegt Autonomie vor, wenn das autonome Element in der Lage ist, einen bestimmten Stil der Entscheidungsfindung und des Verhaltens in einer agentenbasierten Organisation auszuwählen. Zur Koordination einer Agentenumgebung gibt es verschiedene Konzepte von einer emergenten Koordination, wo die Akteure autonom sind und die Koordination implizit erfolgt, bis hin zur expliziten Koordination wie in hierarchischen Organisationen, wo die Akteure keine Entscheidungsautonomie haben, sondern lediglich den Anweisungen ihrer Vorgesetzten folgen. Im Kontext von logistischen Prozessen beschreibt autonome Steuerung, Abläufe dezentralisierter Entscheidungsfindung in sogenannten heterarchischen Strukturen. Dazu sind miteinander in Verbindung stehende Elemente erforderlich, die die Fähigkeit besitzen, Entscheidungen unabhängig voneinander zu treffen. Das Ziel autonomer Kontrolle ist es, die Robustheit und das positive Systemverhalten zu verbessern, im Wesentlichen um mit der Dynamik und Komplexität solcher Systeme besser umgehen zu können [6].

Autonomie in Produktionssystemen hat in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung gewonnen, weil Objekte wie Halbfertigprodukte, Maschinen, Werkzeuge oder Transportmittel heutzutage durch Cyber-Physische Systeme grundsätzlich in der Lage sind, Informationen zu verarbeiten, Entscheidungen vorzubereiten und auszuführen [7, 8]. Dies stellt eine wichtige Fähigkeit eines Produktionssystems für Industrie 4.0 oder Smart Production dar.

Angebot und Nachfrage nach Autonomie

Der Bedarf an Autonomie kann z. B. durch ein Marktmodell ermittelt werden, bei dem ein Bedarf an Autonomie einem Angebot gegenübergestellt wird (Bild 1). Dabei ist zu beachten, dass in Produktionssystemen unterschiedliche Arten von Systemelementen vorliegen: solche, die keine Autonomie haben, Systemelemente, die eine gewisse Autonomie haben und solche, die einen hohen Grad an Autonomie haben. Daher muss anstelle eines gesamthaften Absatzes des optimalen Grades von Autonomie für das gesamte Produktionssystem, also etwa ein Werk oder eine Fabrik, eine spezialisierte

Prof. Dr. -Ing. Norbert Gronau ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik insb. Prozesse und Systeme an der Universität Potsdam und wissenschaftlicher Direktor des Forschungs- und Anwendungszentrums Industrie 4.0.

www.industrie40-live.de

https://doi.org/10.30844/FS19-1_29-32

Attribute	Attributwerte			
Produktspektrum	kunden-spezifisch ++	Serienprodukt mit kundenspezifischen Varianten +	Standard-produkt mit Varianten 0	Standard-produkt ohne Varianten -
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)			✓	
Produktstruktur	Einteilig	Mehrteilig mit einfacher Struktur o	Mehrteilig mit komplexer Struktur +	
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)			✓	
Auftragsauslösung	Einzelauftrags-bezogen ++	Auftragsbezogen mit Rahmenaufträgen +	Fertigung auf Lager o	
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)	✓			
Endkontrolle Unternehmen 1	✓			
Lackiererei Unternehmen 2	✓			
Disposition	Dem Kunden-auftrag folgend ++	Überwiegend dem Kundenauftrag folgend +	Überwiegend MRP o	Reine MRP-Disposition -
Unternehmen 1 (gesamt)			✓	
Unternehmen 2 (gesamt)				✓
Endkontrolle Unternehmen 1	✓			
Lackiererei Unternehmen 2				✓
Bedarfsplanung	Kein relevanter externer Bedarf o	Relevanter externer Bedarf +	Umfassender externer Bedarf ++	
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)			✓	
Endkontrolle Unternehmen 1	✓			
Lackiererei Unternehmen 2	✓			
Fertigungsablauf	Einzelfertigung ++	Einzel- und Kleinserien-fertigung +	Serienferti-gung o	Massen-fertigung -
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)			✓	
Endkontrolle Unternehmen 1		✓		
Lackiererei Unternehmen 2			✓	
Fertigungsorganisation	Baustelle +	Werkstattprinzip ++	Gruppen-/ Linienprinzip +	Fließband -
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)				✓
Endkontrolle Unternehmen 1				✓
Lackiererei Unternehmen 2		✓		
Eigenfertigungsanteil	Niedrig o	Mittel +	Hoch ++	
Unternehmen 1 (gesamt)		✓		
Unternehmen 2 (gesamt)	✓			

Tabelle 1: Ausprägungen der Fallstudie

Berechnung für unterschiedliche Einheiten erfolgen.

Validierung in der Praxis

Die Ermittlung des optimalen Grads an Autonomie wird im folgenden anhand einiger Fallstudien erläutert.

In Tabelle 1 sind vier Fallstudien aufgezeigt. Die unternehmensweite Betrachtung stammt dabei aus [1], die Betrachtung je eines Ausschnittes aus dem Produktionssystem wurde für diesen Beitrag ergänzt. Fallstudie 1 zeigt die Anforderungen an Autonomie einer Fabrik für künstliche Kniegelenke, während Fallstudie 2 eine Montagefabrik für Traktoren darstellt.

Die Ergebnisse der Untersuchung des kompletten Produktionssystems von Unternehmen 1 und 2 wurden mit Leitungspersonal der beiden Unternehmen diskutiert. In Unternehmen 1 handelte es sich um das für die Fertigung verantwortliche Mitglied der Geschäftsführung, in Unternehmen 2 um den Werksleiter. Beide stimmten zu, dass der vorgeschlagene Ansatz eine zutreffende Einschätzung ermöglicht, ob eine Investition in CPS sinnvoll ist. Ebenfalls wiesen beide Manager darauf hin, dass das jeweils betrachtete Produktionssystem aus mehreren Bereichen und Subsystemen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften besteht. Daher wurde eine Disaggregation der Berechnung in beiden Unternehmen vorgenommen, in Unternehmen 1 im Bereich der Qualitätskontrolle der Endprodukte, in Unternehmen 2 im Bereich der Lackiererei.

Diese Untersuchung resultierte in einer Autonomiekarte, die auf das Fabriklayout projiziert werden kann. Bild 2 zeigt eine schematische Darstellung einer solchen Landkarte.

Tabelle 2: Bewertung der Nachfrage nach Autonomie

	Unternehmen 1		Unternehmen 2	
Attribute	Produktionssystem als Ganzes	Arbeitsstation Qualitätsmanagement	Produktionssystem als Ganzes	Lackiererei
Produktspektrum	0,67	0,67	0,33	0,33
Produktstruktur	0,33	0,67	0,33	0,67
Auftragsauslöser	0,67	1	1	1
Disposition	0,33	1	0	0
Bedarfsplanung	0,67	0	1	0
Fertigungsprozess	0,67	0,33	0	0
Fertigungsorganisation	1	0	0	0,67
Fertigungstiefe	0,67	0,67	0	0
Summe	5,01	4,34	2,66	2,67
Nachfrage nach Autonomie	62,6 %	54,3 %	33,3 %	33,4 %
Schlüssel: ++ = 1, + = 0,67, o = 0,33, - = 0				

In vielen Fällen wird es nicht möglich sein, in realen Produktionssystemen Simulationsstudien mit unterschiedlichen Graden an Autonomie durchzuführen, da diese Produktionssysteme nur im Bereich der beteiligten Menschen ein sofort aktivierbares Autonomiepotenzial aufweisen.

Daher ist eine Untersuchung in einem simulativen Umfeld sinnvoll, etwa dem Forschungs- und Anwendungszentrum Industrie 4.0, in dem beliebige Elemente des Produktionssystems unterschiedliche Grade an Autonomie erhalten können, um das Zusammenspiel herkömmlicher Planungs- und Steuerungsansätze mit teilautonomen Ansätzen erproben zu können [9, 10]. In diesem Zusammenhang ist es auch erforderlich, das Zusammenspiel menschlicher mit maschinellen Entscheidungen zu üben, um die Mitarbeiter im Produktionssystem an Entscheidungen treffende maschinelle Elemente zu gewöhnen.

Praktische Anwendungen

In Fabriken weltweit wird gegenwärtig in Digitalisierung investiert [11]. Maschinen, Logistiksysteme und einige High-Tech-Maschinen verfügen jetzt bereits über umfassende Rechenleistung und eine Schnittstelle zu Menschen und dem Internet. Obwohl dieses die grundlegenden Zutaten sind, die ein emergentes Verhalten des Produktionssystems gestalten würden, bleiben diese Investitionen

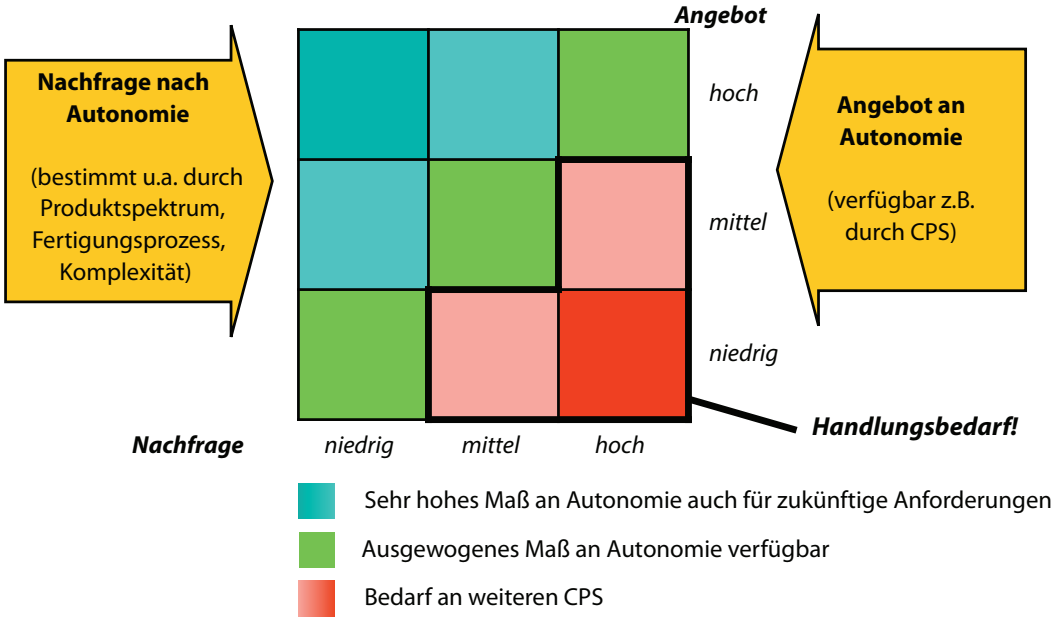

Bild 1: Marktmodell zur Bestimmung des angemessenen Grads an Autonomie [1]

Literatur

[1] Gronau, N.: Der angemessene Grad von Autonomie in Cyber-Physischen Produktionssystemen, Industrie Management 34 (2018) 6, S. 7-12

[2] Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W. u. a. (Ed.): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (HWProd), 2. Auflage Stuttgart 1996.

[3] Bellgran, M.; Säfsten, K.: Production Development: Design and Operations of Production Systems. London 2010.

[4] Kreimeier, D. u. a.: Konfiguration modularer Produktionssysteme. In: Industrie Management 29 (2013) 4, S. 18-22.

[5] ten Hompel, M.; Liekenbrock, D.: Autonome Objekte und selbst organisierende Systeme. Anwendung neuer Steuerungsmethoden in der Intralogistik. Industrie Management 21 (2005) 4, S. 15-18.

[6] Veigt, M. u. a.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. In: Industrie Management 29 (2013) 1, S. 15-18.

[7] acatech (ed.): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION). Heidelberg u. a. 2011.

https://doi.org/10.30844/FS19-1_29-32

[8] Bousbia, S. and Trentesaux, D: Self-organization in distributed manufacturing control: state-of-the-art and future trends. In: Systems, Man and Cybernetics, 2002 IEEE International Conference on. IEEE, vol. 5, 2002. S. 6.

[9] Lass, S., Theuer, H., Gronau, N.: A New Approach for Simulation and Modeling of Autonomous Production Processes. In: Proceedings of the 45th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2012), Maui, Hawaii, S. 1247-1256.

[10] Gronau, N., Theuer, H., Lass, S.: Evaluation of Production Processes using Hybrid Simulation. In: K. Windt (ed.), Robust Manufacturing Control, Lecture Notes in Production Engineering, Berlin Heidelberg 2013.

[11] Ignat, V.: Digitalization and the global technology trends. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 227 (2017) 1, S. 012062.

[12] Zäh, Michael F. et al.: The cognitive factory. In Changeable and reconfigurable manufacturing systems, London, 2009, S. 355-371.

[13] Mason, R.B.: Coping with complexity and turbulence - an entrepreneurial solution. Journal of Enterprising culture, 14 (2006) 4, S. 241-266.

[14] Leitão, P. and Restivo, F.: ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. Computers in industry, 57 (2006) 2, S.121-130.

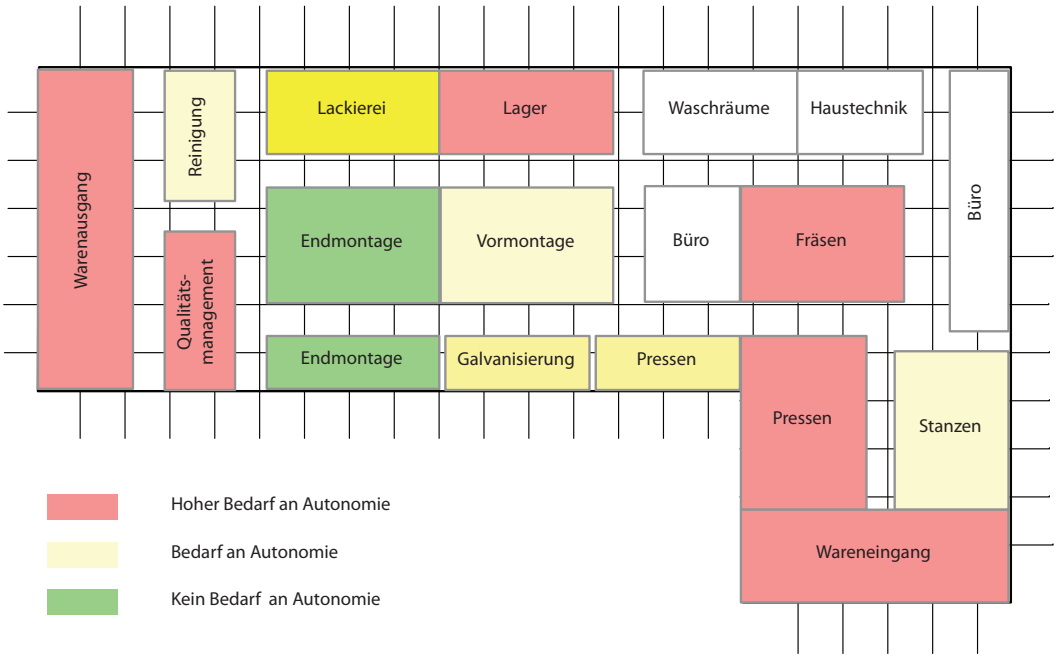

Bild 2: Autonomielandkarte eines Produktionssystems (schematisch)

derzeit isoliert, zufällig und nicht durch die Verbesserung der Eigenschaften des Produktionssystems als Ganzes motiviert.

Bisher war es nicht möglich, Investitionen in CPS unter Berücksichtigung möglicher Verbesserungen für das gesamte Produktionssystem zu planen. Der hier vorgestellte Ansatz zielt auf die Beeinflussung von Investitionsentscheidungen, um nicht nur einzelne Elemente des Produktionssystems zu verbessern, sondern die Fähigkeit, mit Komplexität umgehen zu können. Dies erfolgt, indem die Bereiche des Produktionssystems deutlich gemacht werden, in denen der vorhandene Grad an Autonomie verbessert werden sollte.

Mit der Nutzung dieses Ansatzes können neue oder zu überarbeitende Produktionssysteme genau auf den Grad an Autonomie eingestellt werden, den sie zur Zielerfüllung benötigen werden. Autonomie ist eine äußerst wichtige Eigenschaft für die Wandlungsfähigkeit [12]. Zudem ist es möglich, den Wunsch nach höherer Wandlungsfähigkeit des Produktionssystems dadurch zu erfüllen, dass besonders diejenigen Elemente verbessert werden, die insbesondere zu höherer Wandlungsfähigkeit beitragen. Die zusätzliche Fähigkeit könnte dann abgerufen werden, wenn der Bedarf dafür erkannt wird. Durch Vergleich klassischer und angemessen autonomer Produktionssysteme können die Kosten für eine höhere Wandlungsfähigkeit erstmalig beziffert werden.

Eine noch größere Rolle spielt die Zugabe von autonomen Eigenschaften in der Betriebsphase des Produktionssystems. Autonomes Verhalten erlaubt eine einfachere Reaktion auf Turbulenzen [13] ebenso wie einen schnelleren Wiederanlauf nach Störungen [14]. Ohne die Verfolgung des hier vorgestellten Ansatzes existiert kein Benchmark für die Bemessung des zusätzlichen Investitionsvolumens. Die theoretische Alternative, einfach alle Elemente des Produktionssystems mit CPS auszurüsten, scheidet aufgrund der sehr hohen Kosten aus. Zudem kann der vorgestellte Ansatz als Alternative zu den üblichen Reifegradmodellen angesehen werden, die typischerweise keine Zerlegung ihrer Empfehlung bzw. Einschätzung auf einzelne Elemente des Produktionssystems ermöglichen. Daher stellt die Ermittlung des angemessenen Grads an Autonomie eine Hilfe auf dem Weg zur selbstorganisierenden Fabrik dar.

Schlüsselwörter:
Autonomie, Industrie 4.0, Cyber-Physische Systeme, Marktmodell

Autonomy as a Planning Parameter for the Design of Industrie 4.0 Factories

Cyber-physical systems enable the reduction of central planning and control decisions through decentralized coordination between the elements of a production system. Theoretical approaches for determining the required degree of autonomy exist [1], but it remains unclear to what extent autonomy actually serves to better achieve the goals of the production system. This paper presents a method validated in practice with the help of which the areas of a production system that can profit particularly from a greater degree of autonomy can be determined.

Keywords:
Autonomy, Industrie 4.0, Cyber-Physical Systems, Market Model