

# Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen

Norbert Gronau, Universität Potsdam

## The Effects of Cyber-Physical Systems (CPS) on Production Systems

The contribution describes seven effects of cyber-physical systems (CPS) on production systems. These effects encompass the influence of CPS on adaptability, the intensified usage of more available factory data and the de-hierarcization of planning and control. Additionally a research approach is presented for investigating the effects of CPS on production systems using a controlled laboratory environment. The contribution ends with a description of further research questions.

**Keywords:**  
adaptability, industrial internet, lab approach

Der Beitrag beschreibt insgesamt sieben Wirkungen von Cyber-Physical Systems auf Produktionssysteme, darunter den Einfluss auf die Wandlungsfähigkeit, die Nutzung der dann deutlich umfangreicheren verfügbaren Fertigungsdaten sowie die Dehierarchisierung von Planung und Steuerung. Abschließend wird ein Forschungsansatz vorgestellt, mit dem die Wirkung von Cyber-Physical Systems auf Produktionssysteme anhand einer Laborsituation erforscht werden kann. Der Beitrag endet mit einer Beschreibung des weiteren Forschungsbedarfs.

Ein Produktionssystem ist ein komplexes sozio-technisches System von Leistungseinheiten [1], das Input in wertschöpfenden und assoziierten Prozessen zu Output transformiert [2, 3]. Dabei wirken Organisation, Ressourcen, Menschen und Methoden mit der Aufgabe der Outputgenerierung zusammen [4]. Der Aufbau und die Steuerung der Prozesse stellen eine durch Ablauf- und Aufbauorganisation definierte Aufeinanderfolge von Transformationen dar [5], welche sowohl die Herstellung als auch die Montage von Hilfsstoffen umfasst [6]. Dabei enthalten Produktionssysteme technische, organisatorische und personelle Elemente (in Anlehnung an [7]). Der Einsatz von Cyber-Physical Systems in Produktionssystemen kann zu einer deutlich höheren Anpassungsfähigkeit führen. Fertigungsanlagen können nun selbst auf Veränderungen im Markt und in der Lieferkette reagieren, Produkte nach kundenindividuellen Vorgaben können rascher hergestellt und angepasst werden; auch auf Anlagen, die nicht speziell für die kundenindividuelle Produktion ausgelegt sind. Der Ablauf kann über ein Netzwerk kooperierender adaptiver Produktionseinheiten optimiert werden, um dem Zielpolylemma der Produktion aus Durchlaufzeit, Beständen, Auslastung und Kosten besser gerecht zu werden. Schließlich kann das Arbeitssystem an den Wandel der menschlichen Arbeitskraft, etwa aufgrund demografischer Faktoren, angepasst werden.

## Produktionssysteme und Cyber-Physical Systems

Produktionssysteme bestehen aus technischen, menschlichen und organisationalen Komponenten. Zu den technischen Elementen gehört nicht nur die Fabrikhülle und der Raum, den das Produktionssystem einnimmt, sondern auch die Betriebsmittel und die eingesetzten Informations- und Automatisierungssysteme. Organisationale Komponenten sind neben Methoden, Maßnahmen und Werkzeugen vor allem die Aufbauorganisation (Hierarchie) und die Organisation des Ablaufs (Prozesse). Zu den menschlichen Elementen gehören die dessen Einsatz beschreibende Stelle sowie das Wissen und die Erfahrung des Stelleninhabers.

Daher sind bei der Betrachtung der Wirkung von Cyber-Physical Systemen stets alle drei Dimensionen von Elementen zu berücksichtigen. Eine rein technisch orientierte Betrachtung wird der Problemlage nicht vollständig gerecht und kann u. U. zu Fehlschlüssen führen, weil Nebeneffekte auf Organisation und Mensch nicht betrachtet und beachtet wurden.

Cyber-Physical Systems (CPS) als eingebettete softwareintensive Systeme in Produkten und Komponenten der Hochtechnologie sind mittels digitaler Netze verbunden. Damit wird es möglich, weltweit verfügbare Daten und Dienste global zu nutzen. Cyber-Physical



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau ist Inhaber des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government an der Universität Potsdam und Herausgeber von Industrie 4.0 Management.

ngronau@iswi.de  
www.iswi.de

Systeme verfügen über multimodale Mensch-Maschine-Schnittstellen. RFID wird z. B. genutzt, um Transportvorgänge zu überwachen. Ehemals geschlossene Systeme öffnen sich und sind mit anderen Systemen zu vernetzten Anwendungen verbunden. Die physikalische reale Welt wird durch diese Systeme nahtlos mit der Welt der IT zu einem Internet der Dinge, Dienste und Daten verknüpft. Dabei erfassen Sensoren physikalische Daten und wirken mittels Aktoren auf physikalische Vorgänge ein [8, 9]. Auf der Basis der gespeicherten und ausgewerteten Daten agieren die Cyber-Physical Systems mit der physikalischen Welt.

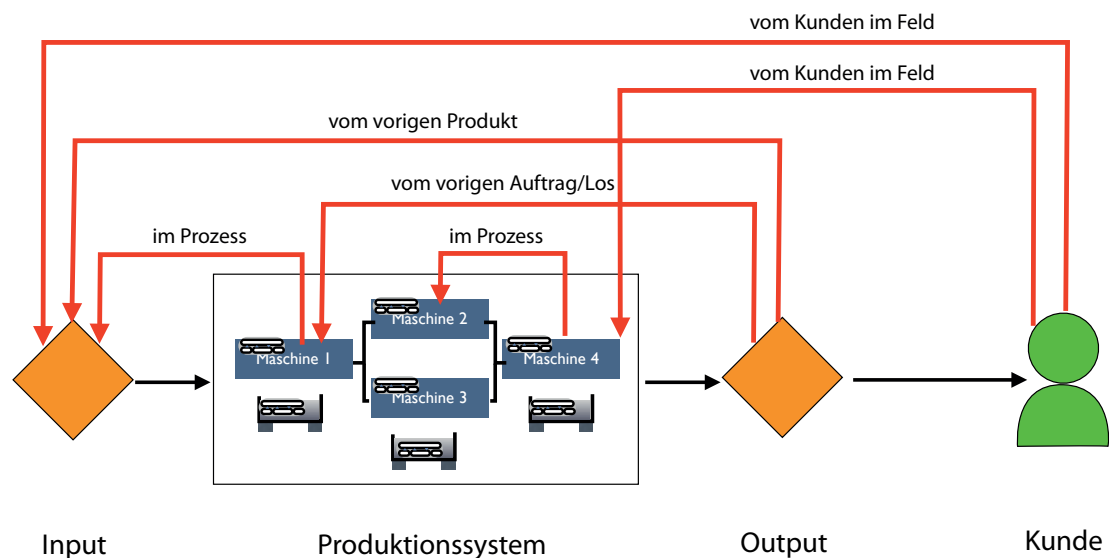
Wesentliche Wirkungen des Einsatzes von CPS liegen in der globalen Vernetzung von Anlagen und Werken unterschiedlicher Betreiber, in neuen Formen der Ablaufoptimierung sowie in einer gesteigerten Anpassungsfähigkeit an Veränderungen im Markt und in der Lieferkette [10].

### Globale Vernetzung

CPS machen Objekte weltweit lokalisierbar und ermöglichen eine nahezu durchgängige Positionserfassung und Zustandsabfrage in Echtzeit. Mithilfe dieser Technologien kann z. B. wirkungsvoll das Einschleusen von Plagiaten und Duplikaten in die Medikament-, Rohstoff- oder Ersatzteilversorgung verhindert werden. Die durch die globale Vernetzung mögliche Anlagenkoordination kann z. B. für ein übergreifendes Produktionsmanagement oder eine übergreifende Lagerplanung genutzt werden (etwa durch Umrouten von Fertigungs- oder Nachfüllaufträgen zur Laufzeit) oder zur besseren Ausnutzung von unterschiedlichen Energiepreisen durch Einplanung von Aufträgen oder Teilmengen dort, wo gerade die niedrigsten Energiekosten zu finden sind. Anzustrebende Ziele der globalen Vernetzung können neben der Energiekostenoptimierung auch die Schaffung einer gleichmäßigen Auslastung oder die Schaffung höherer mengenmäßiger Flexibilität weltweiter Produktionsverbunde sein.

### Ablaufoptimierung

Die mit CPS ausgestatteten Elemente des Produktionssystems kennen ihre Einsatzgebiete,



Konfigurationsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen und kommunizieren eigenständig und drahtlos miteinander [10]. Diese Fähigkeiten können dazu führen, dass die Montageaufträge selbständig fehlendes Material melden können und den Nachschub auch selbst organisieren können. In Wartung befindliche Anlagenelemente teilen selbst mit, wann sie neue Aufträge annehmen können. Neue Aufträge können sich durch Kombination von virtuellen und realen Komponenten selbst am Produktionssystem anmelden, ihre benötigten Ressourcen disponieren, Fertigungsaufträge einsteuern und Störungen teilweise selbst beheben, etwa durch Fortsetzung des Arbeitsplans an einer nicht von der Störung betroffenen Ressource.

### Anpassungsfähigkeit

Bereits im Abschnitt Ablaufoptimierung wurde deutlich, dass die mit CPS ausgestatteten Elemente des Produktionssystems mit Fähigkeiten zur zumindest partiellen Selbstorganisation ausgestattet sind. Diese Fähigkeiten helfen Fertigungsanlagen, auf Veränderungen im Markt (z. B. der Nachfrage) und der Lieferkette (bei drohendem Abriss des Nachschubs) zu reagieren [13].

Eine weitere Fähigkeit liegt in der beschleunigten Herstellbarkeit von Produkten nach kundenindividuellen Vorgaben, da die individuellen Produkteigenschaften dem Produkt und seinen Baugruppen mitgegeben werden können, ohne dass die Komplexität zentraler Entwurfs- und Planungsverfahren weiter steigt. Produkteigenschaften, Kosten, Logistik, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Zeitbedarf und Nachhaltigkeit des Produkts können nunmehr, unabhängig von Restriktionen zur Entwurfs-

**Bild 1: Mögliche Rückkopplungen durch CPS.**

zeit, auch noch zur Laufzeit an kundenindividuelle Bedarfe angepasst werden.

Damit ist jetzt greifbar nahe gerückt, was die Anbieter von Lösungen zur Produktionsplanung und -steuerung immer versprochen haben: Diese Fähigkeiten können auch werksübergreifend zur Koordination eines Netzwerks von mit adaptiven Eigenschaften ausgerüsteten Produktionseinheiten ausgenutzt werden.

Schließlich ist es möglich, das Arbeitssystem individuell an die menschliche Arbeitskraft anzupassen, sei es durch Veränderung der Kräfte, Zeiten, Bedienungsoberflächen oder Kommunikation mit dem Bediener.

Wirkungen von CPS auf Produktionssysteme

Aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten für CPS

zeichnen sich die in Bild 1 aufgeführten Wirkungen von CPS auf Produktionssysteme ab. Diese Wirkungen umfassen alle drei Dimensionen von Produktionssystemen und können sich teilweise gegenseitig verstärken.

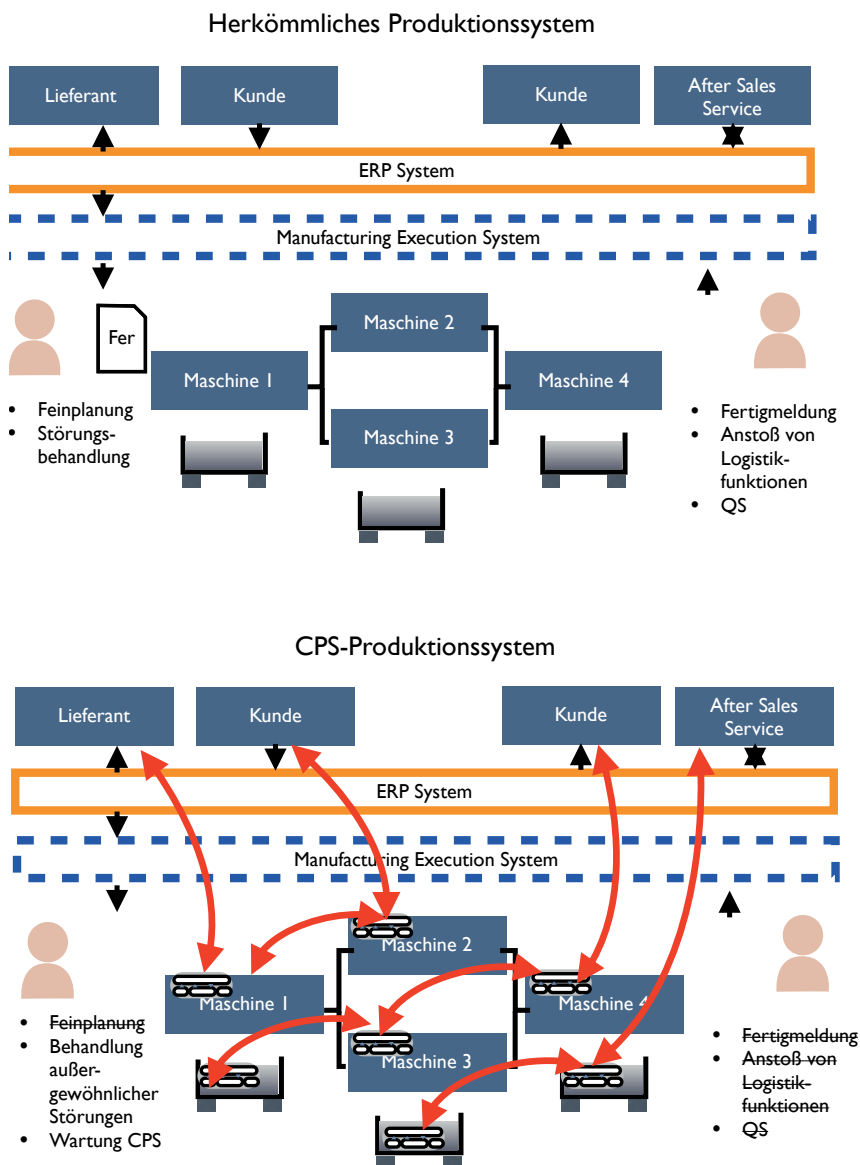
Wandlungsfähigkeit wird insbesondere durch Selbstkonfiguration, Selbstwartung und Selbstorganisation erreicht; da CPS die Elemente von Produktionssystemen zu Self-X-Funktionen befähigen, tragen sie unzweifelhaft zu einer höheren Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen bei.

Die globale Vernetzung und die Möglichkeit der Kommunikation auch zwischen Produkten und Fertigungseinrichtungen erhöht die Möglichkeit von Rückkopplungen und deren Auswertung bzw. Nutzung für die zukünftige Gestaltung von Produkten und Fertigungseinrichtungen (Bild 3).

So können z. B. Lebensdauerinformationen aus dem Feld zur Neujustierung von Eingriffsgrenzen an Produktionseinrichtungen genutzt werden. Ebenso kann eine Veränderung von Kundenpräferenzen für eine äußerst schnelle Umstellung von Variantenkonfigurationen genutzt werden. Bereits jetzt nutzen amerikanische Automobilhersteller Auswertungen von Social Media-Plattformen, um die meist nachgefragten Farbkombinationen zu ermitteln und übertragen diese Information direkt in die Auslastungsplanung der Lackiererei. All diese Rückkopplungen sind auf direktem Wege möglich, ohne über Hierarchien von Informationssystemen zu gehen. Gegenwärtig existieren oberhalb der SPS-Ebene keine Möglichkeiten zur Verarbeitung dieser Informationen. Um die Trennung von Build-Time und Run-Time aufheben zu können und damit die Fertigung zu entdiskretisieren und zu entserialisieren (durch stärkere Individualisierung), werden Fähigkeiten zum Umgang mit diesen Informationen benötigt, die auch zeitverzögert eintreffen können.

Das oben angeführte Beispiel kann auch zur Illustration einer anderen Wirkung von CPS in Produktionssystemen dienen: Erstmals stehen schnell ausreichend granulare Ist-Informationen über den Zustand und Aufenthaltsort jedes einzelnen Elements eines Produktionssystems zur Verfügung. Daten, die bisher nur gespeichert wurden, um die Anforderung der Traceability zu erfüllen, können jetzt, kombiniert mit anderen internen und externen Daten, ausgewertet werden. Diese neuen Möglichkeiten der Auswertung

**Bild 2: Hierarchische Produktionsplanung (oben) und mit CPS (unten).**



von Fertigungsdaten zum Zweck der Simulation, Optimierung, Vorhersage werden als Manufacturing Analytics bezeichnet.

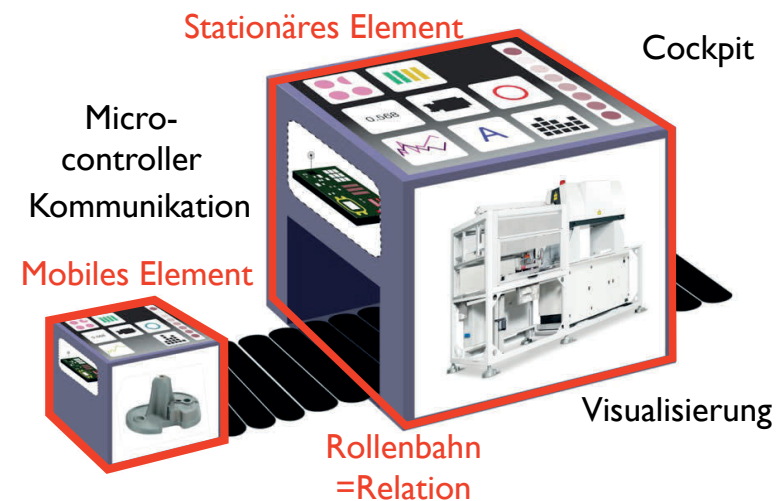
Die Individualisierung der Produkte lässt sich auf die Individualisierung der Fertigungsabläufe übertragen. Keineswegs ist es mehr selbstverständlich, dass zwei gleiche Produkte auch den gleichen Weg durch die Fertigung nehmen.

Der zunehmende Grad an Selbstorganisation führt dazu, dass klassische zentrale und hierarchische Ansätze der Planung und Steuerung des Produktionssystems stark an Bedeutung verlieren (Bild 2).

Viele Unternehmen nutzen nur ein ERP-System zur Planung und ansatzweisen Steuerung der Fertigung. Jeder Fertigungsauftrag durchläuft papierbasiert die Fabrik; die Aufgaben der Feinplanung und Störungsbehebung werden durch Menschen erledigt. Durch Einsatz von CPS ändert sich das Bild. Die Aufgaben der in der Produktion tätigen Menschen ändern sich umfassend in Richtung der Wartung der CPS und Behebung außerordentlicher Störungen. Für die Einführung von CPS sind existierende Informationssysteme eine echte Barriere, da sie mit der Individualität und Mobilität des neuen Produktionssystems nicht mithalten können. So ist es in einigen Systemen nicht einmal möglich, den Standort der Maschine zu speichern. Das System würde daher auch eine Verlagerung einer Maschine nicht bemerken.

Nach Ansicht des Autors liegt hier einer der tatsächlich revolutionären Auswirkungen der Einführung von CPS in Produktionssysteme. Wenn wesentlich bessere Reaktionsmöglichkeiten zur Laufzeit bestehen, verliert die vorherige Planung des Fertigungsdurchlaufs stark an Bedeutung. Wenn mehr Elemente sich untereinander autonom koordinieren, verlieren zentrale Planungssysteme ebenfalls erheblich an Bedeutung. Die Konsequenzen dieser Entwicklung können jetzt noch gar nicht in vollem Umfang eingeschätzt werden. Grundsätzlich erscheint es jedoch denkbar, dass einige bisher als zentral und wesentlich geltende Prinzipien der Gestaltung von Produktionssystemen nicht mehr gelten oder sogar in ihr Gegenteil verkehrt werden.

Der Einsatz von CPS erhöht die Komplexität von Produktionssystemen erheblich. Sowohl die Beschreibung von Zustandsräumen als auch von Steuerungsmechanismen wird erheblich aufwendiger, wenn nicht gar unmöglich. Störungen durch Ausfall einzelner Kom-



ponenten zeigen zwar weniger Wirkung als der Ausfall zentraler Komponenten, jedoch wird die Suche nach Fehlern und deren Behebung aufwendiger und erheblich besser geschultes Personal ist zu dieser Störungsbehebung erforderlich, da im wahrsten Sinne des Wortes alles mit allem auf der mechanischen, elektronischen oder Software-Ebene zusammenhängt.

Schließlich bringt der umfassendere IT-Einsatz global vernetzter Komponenten erheblich höhere Sicherheitsrisiken mit sich. Bisherige Lösungen für Sicherheitsprobleme, die im Wesentlichen in einer Kanalisierung von Zugriffsrouten bestehen, sind für CPS ungeeignet. Vielmehr muss der Mensch in seiner ambivalenten Rolle als von der Technik Bedrohter und als Sicherheitsrisiko stärker betrachtet werden.

Wie können diese Herausforderungen ziel führend und effizient erforscht werden? Um Handlungsempfehlungen für die Praxis geben zu können, ist der Wandel von klassischen Produktionssystemen hin zu Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) sorgfältig und effizient zu erforschen. Eine Erprobung am realen Objekt, also der laufenden Produktion, scheidet wegen der Nebenwirkungen vollständig aus. An eine Laborumgebung zur Erforschung Cyber-Physischer Produktionssysteme sind daher mindestens folgende Anforderungen zu stellen:

- Es muss der Vielfalt existierender Ausprägungen von Produktionssystemen angemessen gegenübergetreten werden. Daher scheidet Ansätze aus, die von vielen herkömmlichen Modellfabriken vertreten werden, aber nur ein Produkt herstellen können oder nur einen Leistungs- oder Organisationstyp der Fertigung abbilden können. Sie sind zur Erforschung der im vorigen Kapitel dargestellten Wechselwirkungen zwischen technischen, organisatorischen und huma-

**Bild 3: Relationen, stationäre und mobile Elemente des Labors für CPPS.**

Literatur

[1] Neumann, M.; Constantinescu, C.; Westkämper, E.: A Method for Multi-Scale Modeling of Production Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada 2011, S. 471-475.

[2] Heinen, T.; Rimpau, C.; Wörn, A.: Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis u. a. (Hrsg): Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Berlin 2010.

[3] Billaut, J.-C.; Moukrim, A.; Sanlaville, E.: Introduction to Flexibility and Robustness in Scheduling. In: Billaut, J.-C.; Moukrim, A.; Sanlaville, E. (Hrsg): Flexibility and Robustness in Scheduling. London 2008, S. 15-34.

[4] Habicht, C.; Neise, P.; Cisek, R.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: ZWF (2002) 9, S.441-445.

- [5] Eversheim, W.: Produktionstechnik und -verfahren. In: Kern, W. u. a. (Hrsg): Handwörterbuch der Produktionswirtschaft (HWProd), 2. Auflage. Stuttgart 1996.
- [6] Bellgran, M.; Säfsten, K.: Production Development: Design and Operations of Production Systems. London 2010.
- [7] Kreimeier, D. u. a.: Konfiguration modularer Produktionssysteme. In: Industrie Management 29 (2013) 4, S. 18-22.
- [8] ten Hompel, M.; Liekenbrock, D.: Autonome Objekte und selbst organisierende Systeme. Anwendung neuer Steuerungsmethoden in der Intra-logistik. In: Industrie Management 21 (2005) 4, S. 15-18.
- [9] Veigt, M. u. a.: Entwicklung eines Cyber-Physischen Logistiksystems. In: Industrie Management 29 (2013) 1, S. 15-18.
- [10] acatech (Hrsg): Cyber-Physical Systems. Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion (acatech POSITION). Heidelberg u. a. 2011.
- [11] Lass, S.; Gronau, N.: Efficient Analysis of Production Processes with a Hybrid Simulation Environment. In: Proceedings of the 22nd International Conference of Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2012), Helsinki, Finland.
- [12] Gronau, N.; Theuer, H.; Lass, S.: Evaluation of Production Processes using Hybrid Simulation. In: Windt, K. (Hrsg): Robust Manufacturing Control, Lecture Notes in Production Engineering. Berlin Heidelberg 2013.
- [13] Gronau, N.: Wandlungsfähigkeit in Produktion und Logistik. In: Productivity Management 19 (2014) 2, S. 23-26.
- [14] 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.

Der Autor ist Mitglied der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation WGAB.

nen Elementen des Produktionssystems durch Einsatz Cyber-Physischer Systeme ungeeignet.

- Um praxisrelevante Antworten auf Fragen wie den ‚richtigen‘ Grad an Autonomie finden zu können, ist eine schnelle Anpassbarkeit an neue Entwicklungen bei den Komponenten Cyber-Physischer Systeme notwendig, also ein modularer Aufbau.
- Schließlich müssen die in vielen Unternehmen bereits vorhandenen Informationssysteme (z. B. ERP, PPS, CAQ, BDE, MES...) als reale Rahmenbedingung integriert werden können, denn kein Unternehmen wird CPS einführen und dabei gleichzeitig eine komplette Neuentwicklung der IT-Landschaft vornehmen. Der Autor geht vielmehr davon aus, dass die bestmögliche Integration von CPS in vorhandene Informationssysteme eine wesentliche Forschungsfrage darstellt.
- Insbesondere um die Rolle des Menschen in der Cyber-Physischen Produktion zu erforschen, ist eine Laborumgebung erforderlich, die einem realen Produktionssystem ähnelt.

## Forschungsansatz

Um die oben skizzierten Anforderungen an ein Forschungslabor für die Erforschung der Auswirkungen Cyber-Physischer Systeme auf Produktionssysteme zu bewältigen, wurde ein systemorientierter Ansatz gewählt. Dabei sollten reale und virtuelle Elemente vertreten sein. Maßgebend für die Entscheidung, ob es sich um ein reales oder ein virtuelles Element handeln soll, war die Erfüllbarkeit der oben skizzierten Anforderungen. In einer ersten Annäherung wurde festgelegt, als reale Elemente des CPPS die CPS-Komponenten selbst, die IT-Infrastruktur wie Steuerungen und Informationssysteme sowie die Logistikausrüstung, mit der verschiedene Arbeitsstationen verbunden werden, zu realisieren.

Als virtuelle Elemente hingegen wurden Maschinen und Werkstücke („Cubes“), Aufträge und Störungen realisiert (Bild 3) [11, 12, 14].

Um reale und virtuelle Elemente miteinander zu verbinden, war die Entwicklung einer Simulationsbetriebsumgebung erforderlich. Diese Eigenentwicklung differenziert in eine Modellierungsumgebung, die das jeweilige Modell des Produktionssystems administriert („rote Ebene“) und die eigentliche Betriebsumgebung, in der das simulierte Produktionssystem

unter Einbeziehung von Störungen seiner bestimmungsgemäßen Aufgabe nachgeht („grüne Ebene“). Dieses Konzept ermöglicht einen sehr schnellen Wechsel zwischen verschiedenen Szenarien, Fertigungsabläufen und Autonomiegraden, um dann durch den Vergleich verschiedener Varianten hinsichtlich Kennzahlen die Reaktionsgeschwindigkeit oder Durchlaufzeit Vorteilhaftigkeitsüberlegungen anstellen zu können.

Die Abbildung unterschiedlicher Abläufe gelingt durch Vorhaltung von logistischen Elementen zur Repräsentation wie Puffer, Verzweigung und Synchronisation oder Schleifen. Dieselbe Infrastruktur kann gleichermaßen für innerbetriebliche Untersuchungen und für zwischenbetriebliche Fragestellungen eingesetzt werden.

Da ein Realisierungskriterium des Labors die Wandlungsfähigkeit war, sind die einzelnen Elemente mobil und interoperabel und können schnell zu neuen Layouts zusammengesetzt werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Labor für CPPS wurde eine Infrastruktur geschaffen, mit der u. a. folgende Forschungsfragen gegenwärtig bearbeitet werden:

- Durch welche cyber-physischen Komponenten werden reale Prozessketten wandlungsfähig?
- Wie können existierende Produktionssysteme effizient in CPPS überführt werden?
- Wie kann die Koordination des Produktionssystems mit den während der Produktion entstehenden Daten(mengen) optimiert werden?
- Wie müssen sozio-mechatronische Systeme gestaltet werden, um u. a. einer Überforderung des Menschen in der Fabrik zu begegnen?
- Welcher Grad an Autonomie der Elemente von Produktionssystemen eignet sich für welche Anforderungen durch Prozesse und Produkte?
- Wie kann ein Notbetrieb von CPS-Komponenten bzw. ein Wiederanlauf nach Ausfall kritischer Komponenten erfolgen?
- Wie werden bioanaloge Produktionssysteme adäquat abgebildet?

Schlüsselwörter:

Wandlungsfähigkeit, Industrie 4.0, Laboransatz