

Simulation von Cyber-Physischen Produktionssystemen in einer Forschungsinfrastruktur

Simulation of cyber-physical production systems in a research infrastructure

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Alexander Pöhler, M.Sc.

Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, 33102 Paderborn, Deutschland
iris.graessler@hni.upb.de, alexander.poebler@hni.upb.de

Kurzfassung

Der Beitrag beschreibt die Erweiterung eines Produktionslabors als Experimentier- und Validierungsumgebung: Alle relevanten Elemente des Produktionslabors wurden mit Computersystemen, sogenannten „Industrie 4.0-Boxen“, ausgestattet und über ein Peer-to-Peer-Funknetzwerk miteinander verbunden. Die „Industrie 4.0-Boxen“ dienen der Nachrüstung dedizierter Sensorik zur Erfassung des Maschinenverhaltens und von Kommunikationstechnik zur Einbindung in die dezentrale Produktionssteuerung. Zusätzlich wurden digitale Zwillinge implementiert, welche das Maschinen- und Benutzerverhalten abbilden, die Steuerung ermöglichen sowie die Informationserfassung und -verarbeitung unterstützen. Damit wird eine Infrastruktur geschaffen, in der Forschung zu den Potenzialen von Cyber-Physischen Produktionssystemen möglich wird. Erkenntnisse werden als Entscheidungsgrundlage für Unternehmen und zur Validierung von Produktionsoptimierungen dienen. In diesem Beitrag werden Konzept und Umsetzung von Industrie 4.0-Funktionalitäten beschrieben und daraus ein Entwurf der Simulationsplattform für CPPS abgeleitet.

Abstract

The article describes the setup of an experimentation and validation environment by extending a production laboratory: All relevant elements of the production laboratory were equipped with computer systems, so-called "industry 4.0 boxes", and interconnected via a peer-to-peer radio network. The "industry 4.0 boxes" are used to upgrade dedicated sensors for recording machine behaviour and communication technology to be integrated into decentralized production control. In addition, digital twins were implemented to map machine and user behaviour, enable control and support information acquisition and processing. Thereby, a research infrastructure is created for research on potentials of cyber-physical production systems. Research outcomes will be used as a decision basis for companies and for validation of production optimizations. This paper describes the concept and implementation of industry 4.0 functionalities and derives a general concept of simulation platforms for CPPS.

1 Einleitung

Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) sind durch die Anwendung cyber-physischer System-Elemente zur industriellen Herstellung von Produkten gekennzeichnet [1]. Die Anwendung in der Industrie scheitert häufig an unternehmensspezifischen Restriktionen, branchentypischen Eigenschaften und individuellen Gegebenheiten. Forschungsinfrastrukturen helfen dabei, Struktur und Verhalten von CPPS in Bezug auf ihre Entwicklung, ihre Einführung und ihre Erweiterung zu simulieren [2]. Damit wird der Transfer in die industrielle Praxis vorbereitet. Die Entscheidung zur Anwendung von CPPS in Unternehmen erfordert einen Nachweis der wirtschaftlichen Potenziale [3]. Dieser Nachweis muss auf Grund unterschiedlicher Prozesse, Rahmenbedingungen und Gegebenheiten unternehmensspezifisch erfolgen. Die Bewertung von Optimierungsmaßnahmen wird in der Literatur sehr unterschiedlich vorgenommen und häufig auf eindimensionale Betrachtungen mit der Erreichung eines defi-

nierten Zieles (z.B. Senkung der Bestände um 20%) herunter gebrochen [4]. Wegen der Komplexität von Produktionssystemen und der zahlreichen Optimierungsmöglichkeiten sind Ursache-Wirkungs-Beziehungen in der Einführung von CPPS häufig aber nicht eindeutig belegbar. Eine Steigerung der Flexibilität kann zum Beispiel zu einer Verringerung der Auslastung, zu einer Erhöhung der Bestände oder zu einer geringeren Liefertreue führen. Die Wirksamkeit und Effizienz von Optimierungsmaßnahmen in der Produktion ist zudem schwer zu messen und von vielen Faktoren abhängig [4]. Eine Forschungsinfrastruktur muss somit die Validierung einer CPPS-basierten Produktion anhand von Konfigurationen ermöglichen, die spezifische Umgebungs- und Randbedingungen eines betrachteten Unternehmens reflektieren. Zusätzlich zur Simulation am Computer bietet eine Laborinfrastruktur die Möglichkeit zum Erleben der Veränderungen durch Teilnehmer, zur Simulation von Szenarien mit menschlicher Beteiligung und zur immersiven Demonstration. [2]



Bild 1 Smart Automation Laboratory

Die Laborumgebung ermöglicht es hierbei, Szenarien der Produktion des betrachteten Unternehmens durchzuführen ohne Störung der realen Produktion oder Abbildung aufwändiger Gegebenheiten wie zum Beispiel Security-Voraussetzungen einer realen Produktion. [5]

In diesem Beitrag wird die Umsetzung einer solchen Forschungsinfrastruktur für die Simulation von CPPS beschrieben. In dem nachfolgenden Abschnitt werden hierzu die Grundlagen zur Simulation von CPPS dargestellt. Anschließend wird auf Modellfabriken zur Simulation von Produktionssystemen eingegangen. Aufbauend auf dieser Analyse und der bisherigen Umsetzung in dem Smart Automation Laboratory (siehe Bild 1) werden die Anforderungen zur Simulation von CPPS beschrieben. In Abschnitt 5 wird das Konzept der Simulationsplattform und in Abschnitt 6 dessen Umsetzung und prototypische Validierung beschrieben.

2 Simulation von CPPS

CPPS wurden konzipiert, um den Herausforderungen einer individualisierten und flexiblen Produktion gerecht zu werden [6, 7]. Ein CPPS besteht aus vernetzten, zusammenarbeitenden cyber-physischen System-Elementen. Diese Elemente sind eingebettete Systeme, die über Schnittstellen verfügen, um mit anderen Systemen mittels Internettechnologien zu kommunizieren. [8]

Ihre Aufgabe ist es, die Produktionsprozesse durch Sensoren und Aktoren zu beobachten und zu steuern. Mit Hilfe von Sensoren können cyber-physische Systeme Daten direkt erfassen, verarbeiten und auswerten, während Aktoren mit der realen Umgebung interagieren und digitale Kommunikationseinrichtungen die Interaktion mit anderen cyber-physischen Systemen ermöglichen. [9]

Die Implementierung von CPPS wird zu erheblichen Veränderungen insbesondere in den Fertigungsprozessen und Produktionssteuerungssystemen führen [1]. Verbindungen mit Diensten helfen CPPS beim Zugriff auf Informationen, die in Planungssystemen (wie ERP, MES) und Web-Services (z.B. für Material- und Energiepreise) verfügbar sind.

Unter Zuhilfenahme ganzheitlicher Informationen über ihre Aufgaben treffen CPPS Entscheidungen über die Produktionssteuerung selbstständig. Damit ist das Produk-

tionssystem in der Lage, seine Produktionsreihenfolge selbst zu bestimmen und autonom zu agieren [10]. Das aktuelle Dogma einer zentralen Produktionssteuerung, welches durch die Automatisierungspyramide veranschaulicht wird, wird hierdurch in Frage gestellt. Daher müssen zentrale Unternehmenssteuerungselemente wie Enterprise Resource Planning System (ERP), Produktionsplanungssystem (PPS) und Manufacturing Execution System (MES) keine Aufträge auf die einzelnen Produktionsprozesse und -einheiten herunterbrechen [11]. Diese Umwandlung der Automatisierung ist in Abbildung 2 dargestellt.

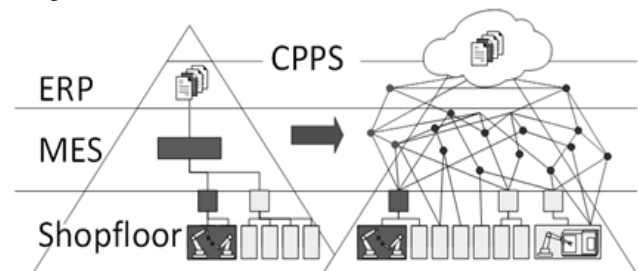


Bild 1 Dezentralisierung von Produktionsplanung und -steuerung durch CPPS [11]

Die sich daraus ergebenden Veränderungen zielen im Wesentlichen auf eine Flexibilisierung der Produktion und eine Möglichkeit zur automatisierten Steuerung des Produktionssystems ab. [12]

Die Simulation von Produktionssystemen wird im Rahmen der Konzepte „Virtuelle Fabrik“ und „Digitale Fabrik“ behandelt. Die Digitale Fabrik bildet dabei einen Oberbegriff für Methoden, Modelle und Werkzeuge zur Simulation der Produktion. Zweck der Simulation ist eine ganzheitliche Planung und laufende Verbesserung.

Mit Hilfe von Software kann die Fertigung simuliert sowie relevante Strukturen und Prozesse modelliert und überprüft werden. Die Simulation von CPPS und deren dezentralen Strukturen ist prinzipiell mit den Werkzeugen der digitalen Fabrik möglich. Dies gilt jedoch nicht für die sozio-technischen Zusammenhänge, die mit Bezug zu den genannten Eigenschaften von CPPS besondere Bedeutung haben. [13] Die Simulation des Menschen kann nur stark vereinfacht vorgenommen werden, weswegen zur Einführung und Verbreitung andere Ansätze zur Bewertung und

Simulation von CPPS erforderlich sind. Das Ziel dieses Beitrags ist die Entwicklung einer Umgebung, bzw. Infrastruktur in der CPPS in einer simplifizierten Umgebung getestet werden können, um deren Vorteile zu veranschaulichen und einen Einsatz im Unternehmen zu validieren.

3 Stand der Forschung bestehender Simulationsumgebungen

Simulationsumgebungen für Produktionssysteme sind häufig Teil von Lern- oder Lehrfabriken, in denen diese als Modellfabriken zur Veranschaulichung in der Ausbildung und Lehre eingesetzt werden. Die Teilnehmer darin durchgeführter Workshops sollen in Simulationen praktisches Wissen und Kompetenzen über Themen der Produktionsplanung, -gestaltung und -optimierung erarbeiten. Da CPPS ein dominanter Forschungsaspekt in der Produktionstechnik sind, haben viele akademische Institutionen Elemente dieses Konzepts in ihren Modellfabriken umgesetzt. Im Folgenden werden Modellfabriken mit dem Schwerpunkt auf Elementen von CPPS vorgestellt. Aus der Analyse dieser Einrichtungen sowie einer literaturbasierten Absicherung werden Anforderungen abgeleitet und priorisiert.

Die SmartFactoryKL (TU Kaiserslautern) ermöglicht ein flexibles Produktionsszenario auf Basis modularer Fertigungseinheiten, die flexibel verändert und angepasst werden. Hauptelemente der Cyber Physical Systems wie Anpassungsfähigkeit, Plug & Produce und dezentrale Steuerung über RFID sind in diesem Konzept implementiert. Über standardisierte Schnittstellen können verschiedene Module montiert und demontiert werden, um die gewünschte Produktlinie zu schaffen. Jedes Modul dient für eine bestimmte Aufgabe wie Montage, Lagerung, Produktion etc. [14]

Die Demonstrationsfabrik der RWTH Aachen zeigt einen kompletten Produktionsprozess für motorlose Go-Cars. In [15] wird ein Modell vorgestellt, das beschreibt, wie verschiedene Elemente von CPPS in der Demonstration Factory gezeigt und trainiert werden können. Das zugrundeliegende Learning-Factory-Konzept zielt darauf ab, Studierenden den Umgang mit den Folgen von CPPS zu vermitteln.

Die IFA Learning Factory der Universität Hannover hat ein Konzept für die Implementierung von CPPS in ihrer Lernfabrik in Kombination mit logistischen Modellen vorgestellt. [16]

Das Fraunhofer IML in Dortmund betreibt eine Modellfabrik zu dem Thema Intralogistik [17]. Die Fertigungsprozesse werden hierbei auf Shuttle und Rollenförderer reduziert und die Produktionsprozesse durch Wartezeiten simuliert. Ein Produkt wird somit nicht gefertigt, aber die Produktionsabläufe in einem CPPS können dennoch gut veranschaulicht werden.

Das Unternehmen Festo betreibt eine Lernfabrik als Trainingsplattform mit dem Fokus auf der Anwendung von Industrie 4.0-Informationstechnologien. Die Produktion

besteht aus flexiblen Modulen, die unterschiedlich aufgebaut werden können. [18]

Das Anwendungszentrum Industrie 4.0 der Universität Potsdam [19] behandelt die Idee der Simulationsplattform für Produktionssysteme am weitesten. Hierin repräsentieren sogenannte „Cubes“ sowohl Produkte als auch Produktions- und Logistikelemente. Über Fördererlemente werden die Cubes durch die Produktion geleitet und über Bildschirme auf den Cubes wird der Produktionsfortschritt und weitere Informationen zu dem Durchlauf durch die Produktion veranschaulicht. Durch dieses variable Konzept lassen sich unterschiedliche Produktionsszenarien in dem Anwendungszentrum simulieren [2].

4 Ausgangssituation und Anforderungen

Die Anforderungsfestlegung beruht auf einer Literaturanalyse, die insbesondere Publikationen zu den genannten Simulationsumgebungen einbezieht. Auf dieser Grundlage beschreibt dieser Beitrag die Erweiterung eines Produktionslabors zu einer Forschungsinfrastruktur zur Simulation von CPPS: Das Smart Automation Laboratory dient direkt der Forschung und Lehre in den Bereichen Produktions- und Automatisierungstechnik und indirekt der anwendungsnahen Untersuchung von Geschäftsprozessen. Im Wesentlichen besteht das Labor aus drei Fertigungszellen (einer Drehmaschine, einem 3D-Drucker und einer Fräsmaschine), einem Materialflusssystem für die Logistik in dem Produktionssystem, einem Montageroboter und weiteren Industrierobotern, die die Fertigungszellen und den Montageroboter mit dem Materialflusssystem verbinden. Alle Komponenten sind mit Rechnersystemen ausgestattet, so dass diese ihren eigenen Status kennen und mit anderen Komponenten und Diensten kommunizieren können. Die dezentralen Rechnersysteme erweitern die bestehenden Steuergeräte (S7-SPS für die CNC-Maschinen und das Materialflusssystem und die ROS- und ABB-Steuerungen für die Roboter) hinsichtlich Konnektivität und Zustandsüberwachung. Jede ausgestattete Maschine kennt ihren eigenen Status und hat Zugriff auf Informationen des Produktionssystems. Durch die Hinzufügung von Planungs- und Verhandlungsalgorithmen zu jedem einzelnen Bordcomputer wird ein selbststeuerndes Produktionsplanungs- und Steuerungssystem erreicht. Verwendet wurden Linux- und Windowscomputer und Einplatinencomputer wie Raspberry Pi und BeagleBone. Selbstprogrammierte Dienste wie Auftragsmanagement, Energiemanagement und Qualitätsüberwachung übernehmen zentrale Aufgaben des Produktionssystems. Diese Dienste werden auf einem Computer ausgeführt mit verschiedenen Skripten ausgeführt. Die Produktionssteuerung findet über ein agentenbasiertes System mit Hilfe eines dezentralisierten Scheduling statt. Zusätzlich per Internet gewonnene Daten, wie z.B. Material- und Energiepreise, werden bei der Planung berücksichtigt. Ein wichtiger Aspekt der Forschung in dem Labor ist die Untersuchung der Rolle des Beschäftigten in einer solchen Umgebung. Zentraler Untersuchungsgegenstand ist hier-

bei, wie Informations- und Kommunikationstechnologie eingesetzt werden kann, um die Arbeit für Beschäftigte zu erleichtern. Zahlreiche Produkte können in dem Labor gefertigt werden, um unterschiedliche Produktionskonzepte zu veranschaulichen. Die Umsetzung des CPPS in dem Labor selber wird in [20] beschrieben. Weitergehende Beiträge aus dem Labor beschäftigen sich mit der Entwicklung einer intelligenten Montagestation [21], der Umsetzung der Produktionssteuerung [22] und der Umsetzung eines digitalen Zwilling des Menschen als integralen Bestandteil des Produktionssystems [23]. In diesen Beiträgen wurde jedoch nur die Umsetzung der dezentralen Steuerung und nicht die Umsetzung des Produktionssystems zur Nutzung als Simulationsplattform beschrieben.

Zur Anwendung des Produktionslabors als Forschungsinfrastruktur für CPPS sind zahlreiche zusätzliche Anforderungen zu erfüllen. Neben der Voraussetzung, dass mit Hilfe der Forschungsinfrastruktur sowohl zwischen einem CPPS, als auch zwischen bestehenden Lösungen gewechselt werden kann, hat Lass [2] weitere Anforderungen für Modellfabriken zur Simulation von CPPS definiert. Diese beinhalten ein breites Anwendungsspektrum, um unterschiedliche Einsätze simulieren zu können. Eine aufwandsarme Modellierung, um eine Übertragbarkeit zu gewährleisten und die Möglichkeit zur Einbeziehung der relevanten betrachteten Stakeholder.

Zusätzlich zu dem Ausbauzustand als Anschauungsbeispiel muss es somit möglich sein, unterschiedliche Szenarien in dem Labor umzusetzen. Das in [20] beschriebene Produktionslabor muss entsprechend um diese Möglichkeit einer Abbildung unterschiedlicher Produktionssysteme sowie Planungs- und Steuerungsformen erweitert werden. Die Erweiterung wird hierbei nur auf die planerischen und steuerungstechnischen Aspekte des Produktionssystems übertragen, da mit diesen die Hauptvorteile von CPPS einhergehen.

Das Konzept der Forschungsinfrastruktur wird auf Basis der ausgestatteten Rechnersysteme [20] umgesetzt. Die Möglichkeit zur Simulationsplattform wird zusätzlich zu der in [21] beschriebenen bestehenden Lösung für das CPPS geschaffen. Durch Rekonfiguration soll es möglich sein, flexibel Produktionsszenarien zu simulieren und damit die Anwendung auf abgebildete Unternehmen hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte zu validieren. Jedes Teilsystem des Produktionssystems erhält die Möglichkeit, die für den eigenen Betrieb notwendigen Informationen zu sammeln und den eigenen Status an andere Geräte weiterzugeben.

5 Konzeption des Ausbaus zur CPPS-Simulationsplattform

Ein Peer-to-Peer-Framework ermöglicht es den Elementen des Produktionssystems (CNC-Maschinen, Drucker, Industrieroboter, Materialflusssystem, Shuttles, Lagereinheiten, Montagestation und Steuerungseinheiten) mit an-

deren Geräten zu kommunizieren und so zur Koordination der Produktion beizutragen. Jedes Gerät hat die Möglichkeit, Nachrichten direkt an andere Geräte zu senden (via UDP) und Nachrichten an alle Geräte zu senden (via TCP). In dieser Kommunikationsstruktur übernimmt jedes Gerät eine Rolle. Jede Einheit in dem Labor kann eine der folgenden Rollen einnehmen:

- Logistik als Teil des Materialflusssystems mit der Aufgabe, Material und Werkstücke zwischen den Fertigungsstationen zu bewegen.
- Fertigungsstation (reale Systeme Fräsmaschine, Drehmaschine und 3D-Drucker sowie zusätzlich simulierte Systeme)
- Montagestationen
- Lagereinheiten als Zentrallager und Pufferstationen

Es gibt eine zentrale Einheit, auf dem sich eine Datenbank befindet und welche die Initialisierung des Gesamtsystems vornimmt. Zusätzlich existieren für die Beschäftigten weitere Einheiten, welche die Planung für diese abbilden. Dieser digitale Zwilling wird in [23] präsentiert. Diese verschiedenen Rollen bzw. Teilnehmer und das gesamte Labor sind in Abbildung 3 dargestellt.

Die interne Steuerung umfasst dabei einen digitalen Zwilling des realen Gerätes, eine Industrie 4.0-Box die die Steuerung übernimmt und in der die gesamte Interaktion abgebildet ist und die Kontrolle der Maschinensteuerung. Dieser Aufbau ist für alle Rollen gleich. Werden Systeme simuliert, existieren die realen Gegenparts zur Maschinensteuerung und dem digitalen Zwilling nicht.

Das Konzept der Industrie 4.0-Box folgt der Konzeption von [2] und erweitert diese um das Konzept des digitalen Zwilling, so dass die Boxen auch als Ergänzung zu real existierenden Systemen eingesetzt werden können. Bei Einsatz als Ergänzung zu real existierenden Systemen ist derzeit eine Programmierung zum direkten Datenaustausch erforderlich. Hierbei wurde diese über I/O-Schnittstellen und OPC-UA realisiert. Hierdurch können Aufträge und Anweisungen von den Industrie 4.0-Boxen an die Maschinen (Materialflusssystem, Roboter und Fertigungsmaschinen) übergeben und Betriebszustände erfasst werden. Der Simulationsbetrieb wird über die Simulation der Betriebszustände realisiert. Die Simulation wird über die Initialisierungsprozedur eingepflegt. Die Steuerung der realen Maschinen verändert sich dabei nicht, die Prozesszeiten und die Ausführung des Protokolls werden im Initialisierungsvorgang den einzelnen Elementen übergeben. Als Konzept für die Simulation wurde eingestellt, dass die Produktion auf Basis der eingepflegten Aufträge erfolgt. Die Reihenfolgeplanung wird über die Zuweisung der Maschinen zu den Aufträgen festgelegt. Um die Auswirkung unterschiedlicher Ansätze zu überprüfen ist es möglich, im Initialisierungsvorgang die Art des Scheduling und die Art der Planung zu konfigurieren, so dass diese unterschiedlich ausgeführt werden. Somit sind komplett unterschiedliche Konzepte von der Massenproduktion bis hin zu einer Einzelfertigung umsetzbar.

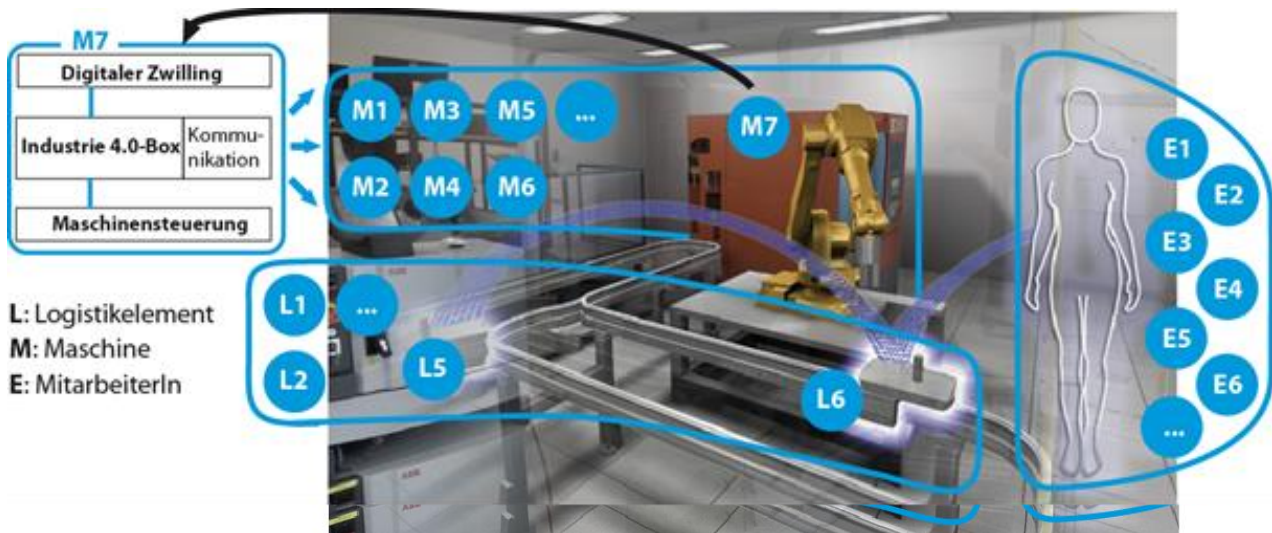


Bild 3 Struktur des Produktionssystems und darin enthaltene Rollen.

6 Prototypische Umsetzung

Kernelement der Simulation bilden die unterschiedlichen Demonstratoren, welche durch die Industrie 4.0-Boxen realisiert werden. Die Elemente der Simulationsumgebung können dabei wie beschrieben eine Rolle als Fertigungs-, Montage-, Logistik- und Lagereinheit einnehmen. Die prototypische Umsetzung wurde mit dem in [20] beschriebenen Demonstrator „Fernsteuerungsauto“ realisiert.

Das Fernsteuerungsauto besteht aus einem additiv gefertigten Karosserie, einem gefrästen Chassis, gedrehten Felgen und zusätzlichen Zukaufteilen.

Die Aufgabe der Produktion ist es, Aufträge für diese Teile automatisch auszuführen. Jedes Gerät sammelt Informationen über Bestellungen aus einer Datenbank. Das Kommunikationsprogramm ist ein Peer-to-Peer-basiertes Programm, das für die Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten und damit für die Ausführung übergeordneter Aufgaben verantwortlich ist. Die Hauptaufgabe besteht darin, Fertigungsaufträge über Termine und Prioritäten zu steuern und auszuführen.

Die prototypische Umsetzung beinhaltet dabei reale und simulierte Elemente. Die herzustellenden Bauteile werden einerseits real auf den Maschinen gefertigt. Die Anbindung der Maschinen geschieht über die Industrie 4.0-Boxen. Über Schnittstellen werden den Maschinen die vorher dort abgespeicherten Ausführungsanweisungen mitgeteilt, so dass die Produktionspläne ausgeführt werden können. Ein Umrüsten der realen Maschinen wird derzeit nicht betrachtet. Dies gilt für den 3D-Drucker, die Fräsmaschine, die Drehmaschine und abschließend für die Montage. Andererseits werden die gleichen Systeme durch virtuelle Systeme abgebildet, in denen die Produktion anhand im Initialisierungsvorgang festgelegter Eigenschaften simuliert wird. Diese Eigenschaften umfassen die Art der Fertigung bzw. Montage, also welche Produkte überhaupt dort gefertigt werden können, die Bearbei-

tungs- und Rüstzeiten, die Art der Planung und inwieweit eine Interaktion mit den Beschäftigten erforderlich ist.

Durch die im Initialisierungsvorgang übergebenen Parameter ist eine Abbildung anderer Planungsformen möglich. So kann durch eine initiale Festlegung eine nicht dynamische, zentrale Engpassplanung der Produktion in dem Labor implementiert werden. Bei der Fertigung des Fernsteuerungsautos wurden hierbei die Bearbeitungszeiten des abschließenden Montageprozesses so angepasst, dass diese den Engpass bildet und somit die Produktionspläne für alle Stationen von dem der Montagestation abgeleitet werden. Im Rahmen der prototypischen Umsetzung wurden mehrere realistische Auftragsszenarien eingespielt. Der Vergleich zwischen der zentralen Engpassplanung und der neuen dezentralen Planung im Rahmen des CPPS haben dabei die folgenden Punkte gezeigt:

- Gewonnene Flexibilität durch die Möglichkeit der dynamischen Umplanung im CPPS. Beim Auftreten von Fehlern (z.B. Ausfall einer Maschine) kann automatisch eine Umplanung stattfinden.
- Die initialen Planungsergebnisse zwischen dem Ausgangssystem der Engpassplanung und der dezentralen Planung durch CPPS entscheiden sich nur geringfügig. Bei der Engpassplanung wurden Logistikzeiten als Durchschnittswert hinzugerechnet, während diese im CPPS geplant werden. Dieser Unterschied hat zu kleinen Veränderungen geführt. Die Vorteile der CPPS ergeben sich erst durch die dynamische Anpassung des Systems im Betrieb.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Erweiterung eines Produktionslabors als Experimentier- und Validierungsumgebung: Hierzu wurden neue Funktionalitäten mit Hilfe sogenannter „Industrie 4.0-Boxen“ hinzugefügt und Möglichkeiten zur Simulation bestehender Ausprägungen von Produktionssystemen und deren Planung und Steuerung geschaffen. Die Infrastruktur soll in Zukunft durch die Durchführung von Workshops in Forschung und In-

dustrie Anwendung finden. Es wurden hierfür neue Elemente des CPPS zur Simulationen weiterer Maschinen entwickelt. Diese bieten zudem die Möglichkeit einer Mensch-Maschine-Interaktion und damit der Durchführung von Testszenerien und Workshops zur Veranschaulichung von Produktionsoptimierungen in dem Labor.

8 Literatur

- [1] Reinhart G., et al.: *Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. Hanser Verlag, 2017, S. 1-14
- [2] Lass, S.: *Nutzenvalidierung cyber-physischer Systeme in komplexen Fabrikumgebungen*. GITO Verlag Berlin, 2018
- [3] BMBF: *Zukunftsbild Industrie 4.0*. Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2014
- [4] Brecher, C.; Kozielski, S.; Karmann, O.: *Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer*. In: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Shaker Verlag Aachen, 2011
- [5] BMWI: *Förderinitiative Mittelstand 4.0 – weitere Kompetenzzentren für innovative Lösungen für die Digitalisierung und Vernetzung der Wirtschaft*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2016
- [6] Lee, E. A.: *Cyber Physical Systems: Design Challenges*, Technical Report No. UCB/EECS-2008-8, 2008, Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley.
- [7] ACATECH: *acatech Studie: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems*. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Berlin, 2012
- [8] Kagermann, M., Wahlster, W.; Helbig, K.: *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften Berlin, 2013
- [9] Pantförder, D.; Mayer, F.; Diedrich, C.; Göhner, P.; Weyrich, M.; Vogel-Heuser, B.; Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen – Evolution statt Revolution. In: Bauernhansl, T.; Ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B.: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*. Springer Berlin. 2014. S. 145-148
- [10] Kletti, J.: *Industrie 4.0: MES ermöglicht Dezentralisierung*. In: *Productivity Management* 20. 2015
- [11] VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*, 2013
- [12] Wahlster, W.: *Künstliche Intelligenz als Grundlage autonomer Systeme*. In: *Informatik-Spektrum*, 2017, Vol.40(5), S.409-418
- [13] Lang, F.P.: *Quo Vadis Digitale Revolution?* In: Heupel, T.; Fichtner-Rosada, S.; Hermeier, B.: *Arbeitswelten der Zukunft - Wie die Digitalisierung unsere Arbeitsplätze und Arbeitsweisen verändert*. Springer, Wiesbaden 2018
- [14] Hennecke, A.; Ruskowski, M.: *Design of a flexible robot cell demonstrator based on CPPS concepts and technologies*. In: *Proceedings of 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems*, S. 534-539
- [15] Schuh, G., Gartzten, T., Rodenhauer, T. Marks, A. – *Promoting work-based learning through Industry 4.0*. In: *Procedia CIRP*, Vol. 32, S. 82 – 87
- [16] Seitz, K.F.; Nyhuis, P.: *Cyber-Physical Production Systems Combined with Logistic Models – A Learning Factory Concept for an Improved Production Planning and Control*. In: *Procedia CIRP*, Vol. 32, S. 92 – 97
- [17] Kipouridis, O.; Roidl, M.; Günthner, W.; ten Hompel, M.: *Cloud based Platform for Collaborative Design of Dezentralizes Controlled Materials Flow Systems*. In: *Facility Logistics 4th. International Conference on Dynamics in Logistics (LDIC 2014)*, Bremen, 10.-14.02.2014, S. 313-322
- [18] Marks, P.; Hoang, X.; Weyrich, M.; Fay, A.: *A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines*. In: *Research in Engineering Design*, 2018, Vol.29(4), S.621-641
- [19] Ullrich, A., Lass, S., Hein, T: *Reconfigurable Production Systems - An Appraisal of Applied Production Breakdown Solution Strategies*. In: Zaeh, M.F. (ed.) *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability: Proceedings of the 5th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production 2013*, Munich, Germany, October 6th-9th, 2013. Springer, S. 105-110.
- [20] Graessler, I.; Poehler, A.; Pottebaum, J.: *Creation of a Learning Factory for Cyber Physical Production Systems*. In: *Procedia CIRP*, Volume 54, 2016, S. 107-112,
- [21] Graessler, I.; Poehler, A.: *Intelligent devices in a decentralized production system concept*. In: *Proceedings of 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, *Procedia CIRP* 2017
- [22] Graessler, I.; Poehler, A.: *Intelligent control of an assembly station by integration of a digital twin for employees into the decentralized control system*. In: *Procedia Manufacturing - Proceedings of 4th International Conference on System-integrated Intelligence*, 2018
- [23] Graessler, I.; Poehler, A.: *Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system*. In: *Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, 2017