

**SCHÄFFER**  
**POESCHEL**

## 1 Einleitung

Europa befindet sich in einer tiefgreifenden wirtschaftlichen Krise. Insbesondere in den Mittelmeeranrainern offenbart sich ein umfassender Handlungsnotstand. Dort, wo jahrzehntelang die Abwertung der eigenen Währung das bevorzugte Mittel zum Ausgleich von Wettbewerbsnachteilen war, wird das rigide Regime der Gemeinschaftswährung Euro beklagt. Wie groß dabei jeweils der innenpolitische Handlungsdruck ist, kann an den jüngsten, auf die deutschen Exporterfolge zielenden Vorwürfen abgelesen werden. Dabei hatte selbst das offenbar beneidenswerte Deutschland im Jahr 2013 lediglich ein reales volkswirtschaftliches Wachstum von 0,4 % aufzuweisen.

Die wirtschaftliche Überlegenheit Deutschlands stimuliert vielfältige Analysen zu den möglichen Ursachen. Weil nicht nur hierzulande der Erfolgsbeitrag der Agenda 2010 gerne verdrängt wird – vor gerade einmal zehn Jahren bezeichnete der britische Economist Deutschland noch als »kranken Mann Europas« – wendet sich der Blick dabei vor allem auf offensichtliche strukturelle Unterschiede. Während ausländische Interessenten dabei kurzfristig imitierbare Erfolgsfaktoren identifizieren wollen, bemüht sich die deutsche Politik, nationale Stärken gezielt auszubauen.

Zu den Wettbewerbsvorteilen Deutschlands zählt die industrielle Produktion. Im Jahre 2012 entfielen auf das produzierende Gewerbe 26 % der Bruttowertschöpfung, während dies im Durchschnitt der EU (einschließlich Deutschland) lediglich 19 % waren. Folgerichtig ist das Thema »Industrie 4.0« auch eines von zehn Zielen im Rahmen der von der Bundesregierung formulierten Hightech-Strategie. Es war nicht nur Leitthema der Hannover-Messe 2014, sondern bestimmt – im Dreiklang von »Elektrifizierung, Automatisierung und Digitalisierung« – erkennbar auch die »Vision 2020« des größten deutschen Technologiekonzerns. Vor diesem Hintergrund sollen nachfolgend wesentliche Implikationen von Industrie 4.0 für die Unternehmenssteuerung einer Hochleistungsfertigung in Deutschland aufgezeigt werden.

## 2 Industrie 4.0

Im Nachhinein ist man immer schlauer. Insofern erfolgt die Verbindung der drei ersten industriellen Revolutionen mit den Begriffen Mechanisierung (Webstühle, Dampfmaschine), Elektrifizierung (Fließband, Taylorismus) und Automatisierung (NC-Technik, Computer) im Konsens. Mutig erscheint dagegen die Zusammenfassung absehbarer Entwicklungen in der Produktion als »Vierte Industrielle Revolution«:

- Revolutionen ereignen sich in vergleichsweise kurzer Zeit und bewirken nachhaltig wirksame, umfassende Strukturveränderungen. Weil Industrie 4.0 in der Gegenwart ansetzt, sind Zeitraum und Wirkmächtigkeit ex ante noch gar nicht bestimmbar. Industrie 4.0 mutiert insofern zunächst zu einem Schlagwort, mit dem sich Politik und Geschäft machen lässt.
- Die ex post vergleichsweise sehr kurz erscheinende Phase von Industrie 3.0 (Automatisierung) sowie die enge technologische Verbindung zwischen Elektronischer

Datenverarbeitung (EDV) und Cyber-Physischen Systemen (CPS) weckt unmittelbar die Assoziation einer Evolution. Auch dürfte die breite Akzeptanz der neu zu schaffenden Technologien in der Industrie (Datensicherheit, Führungsleitbild) wohl sicherlich noch ein Jahrzehnt beanspruchen.

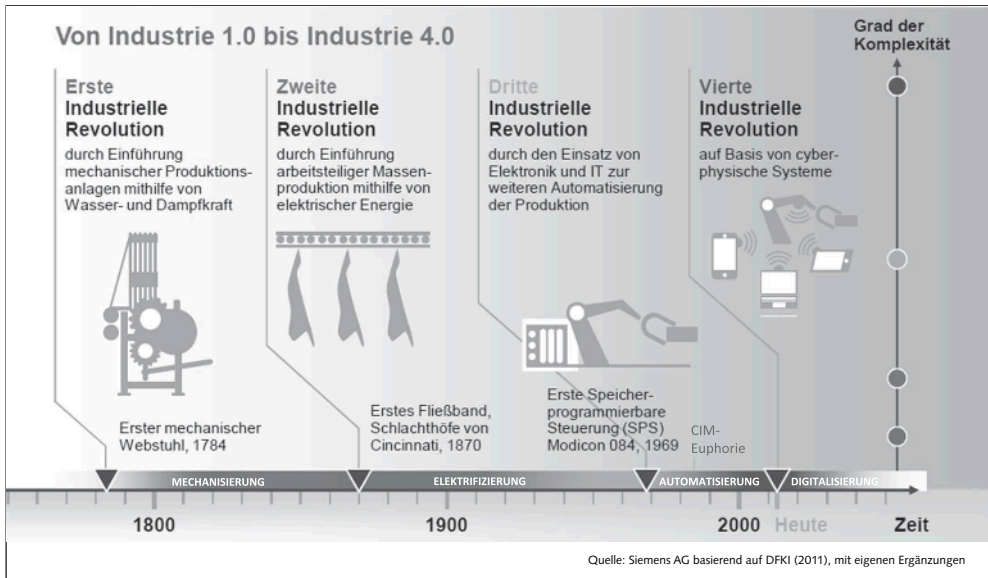


Abb. 1: Stufen der industriellen Revolution (Quelle: Siemens AG/DFKI mit eigenen Ergänzungen)

Für die global tätige Maschinenfabrik Reinhausen GmbH (MR) ist eine hohe Fertigungstiefe am Standort Deutschland Teil der Differenzierungsstrategie. Seit über zwanzig Jahren beschäftigen sich Mitarbeiter unserer immer stärker integrierten Fertigung damit, die alltägliche Komplexität in der Koordination horizontaler (Fertigung) und vertikaler (ERP-System) Prozesse bei steigender Qualität, Produktivität, Flexibilität und Mitarbeiterzufriedenheit sowie sinkenden Herstellkosten systematisch u. a. mittels Datenmodellierung und -anreicherung zu bewältigen. Diese lange Phase der praktischen Ausreifung einer vordergründig an der Optimierung des Werkzeugumlaufs ansetzenden Steuerungsphilosophie ermöglichte einerseits die Hervorbringung eines marktfähigen Produkts (das Manufacturing Execution System MR-CM<sup>®</sup> sowie begleitende Dienstleistungen werden unter der Marke ValueFacturing<sup>®</sup> vertrieben), andererseits den Gewinn des im Jahre 2013 erstmals von der Fachzeitschrift Produktion ausgelobten »Industrie 4.0 Award«.

Vor diesem Hintergrund definieren wir Industrie 4.0 als Web-basierte Integration beliebiger Fertigungsobjekte zu Subsystemen (Modulen), die jeweils durch intelligente Koordination in Quasi-Echtzeit zur Selbstorganisation befähigt und somit weitgehend vom ERP-System entkoppelbar werden. Die Verbindung von physischer (Fertigungseinrichtungen, Produkte) und virtueller Welt (Internet der Dinge, Aufträge) ermöglicht

dabei eine verbesserte Form der horizontal-vertikalen Ablaufkoordination. Auf diese Weise wird eine wirtschaftliche Produktion realisiert, in der die besonderen Fähigkeiten des Menschen als Sensor, Entscheider und Akteur besser zur Geltung kommen.

So gesehen wird sich Industrie 4.0 zwangsläufig evolutionär ausbreiten, und sollte bezüglich der Wettbewerbsfähigkeit einer Hochleistungsfertigung dabei auch revolutionäre Wirkungen entfalten können. Vor dem Hintergrund wachsender demographischer Probleme gilt es insbesondere am Standort Deutschland die Attraktivität und Produktivität industrieller Arbeitsplätze weiter zu steigern. Neben einer Aufrechterhaltung des hohen Anteils der Industrieproduktion an der nationalen Wirtschaftsleistung könnte hierdurch auch der Export weiter profitieren.

### **3 Komplexitätsbewältigung**

Komplexität beschreibt die Undurchdringlichkeit der Wechselwirkungen eines Systems aus analytisch-planerischer Sicht. Selbst nach bestmöglicher Schaffung von Transparenz, weitgehender Standardisierung sowie konsequenter Auflösung von Zielkonflikten verbleibt in einem solchen System ein hinreichend großer, bezüglich seiner Beeinflussbarkeit nicht aufklärbarer und damit einem Entscheidungsmodell unzugänglicher Rest an Zusammenhängen. Dabei nimmt diese Definition, in Anerkennung des Moore'schen Gesetzes (Verdoppelung der Transistoren je Flächeneinheit eines Prozessors spätestens alle zwei Jahre), auf die zur Bewältigung der Komplexität notwendige Rechenleistung bewusst keinen Bezug.

Bereits die Euphorie zum Computer Integrated Manufacturing (CIM) der 1980er-Jahre wurde durch die Erkenntnis gebremst, dass eine exponentiell steigende Rechnerleistung und sinkende Speicherkosten allein die Komplexität in der Fertigung nicht entscheidend zu bewältigen vermögen. Aus der Theorie ist bekannt, dass die Komplexität eines Systems mit der Anzahl der Elemente, der Vielfältigkeit ihrer Verknüpfung sowie deren nicht-linearem Verhalten ansteigt. Für ein System mit lediglich fünf wechselseitig interagierenden Elementen errechnen sich bereits zwanzig Schnittstellen. Eine erste »Beruhigung« ist durch eine koordinierende Instanz erzielbar – bei in der Fertigung leicht erreichbaren 100 Systemelementen lässt sich die Zahl der Schnittstellen so von 9.900 auf 200 reduzieren.

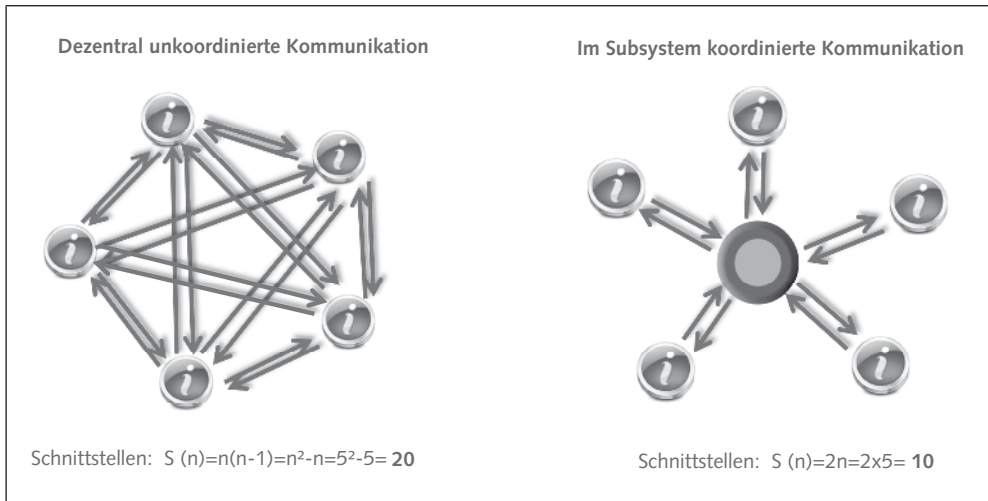
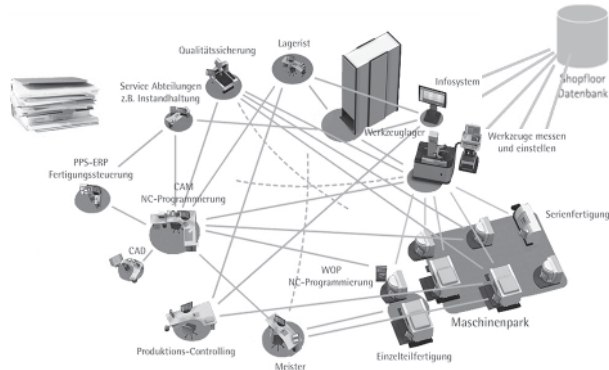


Abb. 2: Komplexitätsreduktion durch eine koordinierende Instanz

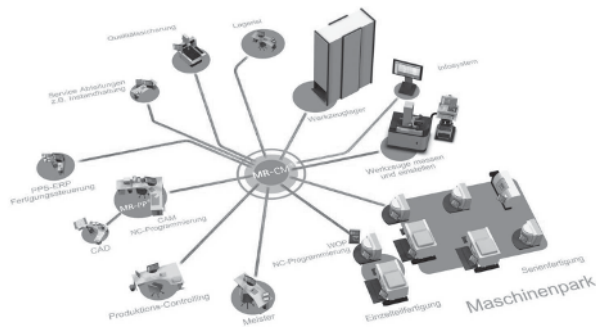
## 4 Erfolg durch ValueFactoring<sup>®</sup>

Ein richtig konzipiertes Manufacturing Execution System (MES) nimmt nicht nur die Rolle einer die Kommunikation der Systemelemente koordinierenden Instanz ein. Zugleich befähigt es durch zielorientierte Datenanreicherung die Fertigungssteuerung zu einer holistischen Optimierung sowie einer aufwandsarmen und wertschöpfenden Rückkopplung mit dem übergeordneten ERP-System. Werden diese Aufgaben quasi in Echtzeit bewältigt, ohne zusätzliche Eingaben (Fehleranfälligkeit, Kosten) und unter Nutzung bereits vorhandener Steuerungen (Industrie 3.0), wird das hierdurch erschließbare Optimierungspotential greifbar. Der bekannte Widerspruch zwischen Effektivität von Simultan- und Effizienz von Sukzessivplanung vermindert sich erheblich.

Das bei MR praktizierte ValueFactoring<sup>®</sup> erfüllt die genannten Anforderungen im Sinne von Industrie 4.0 und bietet darüber hinaus vielfältige Leistungsmerkmale für die Unternehmenssteuerung in der Hochleistungsfertigung. Hiervon profitiert nicht zuletzt auch das Controlling. Allerdings setzt die Implementierung eines solcherart umfassend wirksamen MES das Schaffen organisatorischer Voraussetzungen voraus (gepflegte Werkzeugdatenbank, Entscheidungskompetenz Fertigungsmitarbeiter). Besonders gute Ergebnisse lassen sich dabei in Kombination mit einer Fertigungssegmentierung sowie den Methoden des Lean Managements erzielen.



Das ist die Wirklichkeit  
in der deutschen produzierenden  
Industrie!



Das ist die Wirklichkeit dort,  
wo ValueFacturing® bereits wirkt  
– und das papierlos!



Abb. 3: Industrie 4.0 am Beispiel von ValueFacturing®

## Literatur

- Obermaier, R./Hofmann, J./Kellner, F.* (2010), Webbasierte Fertigungssteuerung in der Praxis, HMD 272 Materialwirtschaft & Produktion, S. 49–59
- Spath, D.* (Hrsg.) (2013), Produktionsarbeit in der Zukunft – Industrie 4.0, 2013

# 1 Zukunftsleitbild Industrie 4.0

Die Herausforderungen für die Zukunft der Produktion und der damit verbundenen Automatisierungstechnologien münden in Lösungen, die »Industrie 4.0« bereitstellen kann. Darin sind sich viele Fachleute einig. Beobachter der Szene sehen allerdings auch eine Vielfalt des Grundverständnisses und unterschiedliche Ausprägungen möglicher Realisierungen.

Wofür steht der Begriff »Industrie 4.0«?

Die Fachwelt diskutiert unter dem Stichwort »Industrie 4.0« den grundlegenden Wandel, der derzeit in der Welt der Produktion im Gang ist. Reale und virtuelle Welt wachsen weiter zusammen; moderne Informations- und Kommunikationstechnologien sollen mit klassischen industriellen Prozessen verschmelzen und verändern damit die verschiedenen Produktionsbereiche.

Als bisherige industrielle Revolutionen werden definiert (s. Abbildung 1):

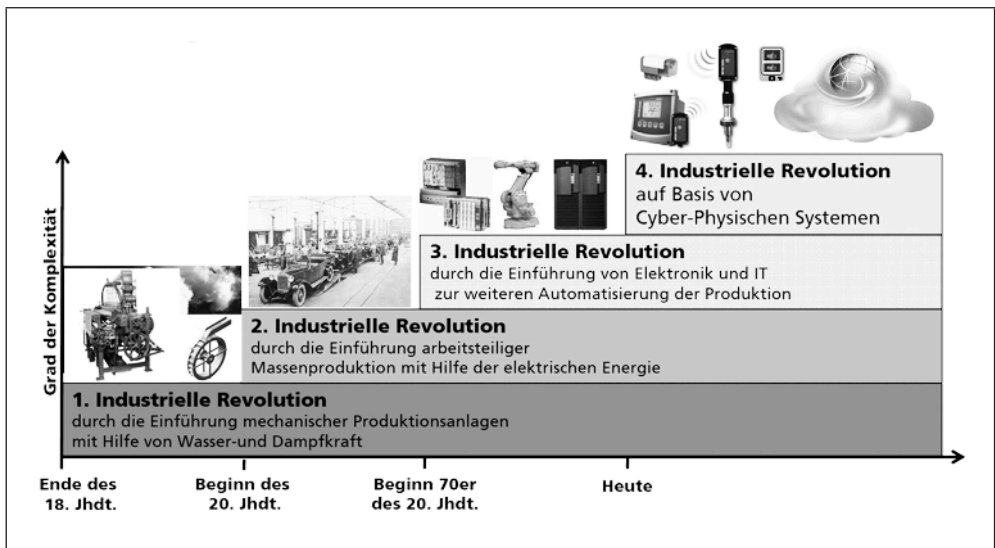


Abb. 1: Die vier Stufen der industriellen Revolution (Quelle: DFKI, 2011)

1. die Einführung mechanischer wasser- oder dampfbetriebener Produktionsanlagen (1784 erster mechanischer Webstuhl)
2. die Einführung elektrischer Hilfsmittel in der Massenproduktion (1870 erstes Fließband)
3. die Automatisierung durch Elektronik und IT (1969 erste Speicherprogrammierbare Steuerung)
4. Industrie 4.0 bezeichnet nun eine weitere grundlegende Veränderung der Produktionswelt. Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien vereinen sich mit klassischen industriellen Prozessen zu sogenannten cyber-physischen Systemen.



Durch das Internet getrieben, wachsen reale und virtuelle Welt immer weiter zusammen. Dabei muss der unter diesem Stichwort diskutierte Wandel in der Produktionswelt ganzheitlich aus unterschiedlichen Perspektiven betrachtet werden. Neben der Technologie sind auch weitere Gesichtspunkte wie die Interaktion zwischen Mensch und Technik und das Thema Ausbildung und Qualifizierung zu berücksichtigen. Gemeinsam mit Partnern aus unterschiedlichen Schwerpunkten der Wirtschaft und Wissenschaft wird derzeit an neuen Lösungen und Technologien für die Produktion der Zukunft geforscht (s. Abbildung 2) (Kagermann/Wahlster/Helbig 2013).



Abb. 2: Die drei Säulen der Industrie 4.0-Strategie (Quelle: Festo AG & Co. KG)

Für die Anwender in der Industrie ist Industrie 4.0 ein hochinterdisziplinäres Zukunftsprojekt, welches sich kontinuierlich weiterentwickelt und damit die bekannte Automatisierungspyramide (s. Abbildung 3) evolutionär verändern wird. Funktionen aus den höheren Ebenen der Automatisierungspyramide werden sich nach unten verlagern und Komponenten werden somit die Fähigkeit erhalten, Aufträge der überlagerten Steuerungsebene auszuführen. Durch diese digitale Veredelung werden zunehmend intelligente Produkte entstehen, die den Produktionsprozess dank erhöhter Funktio-

nalität – von der autarken Energieversorgung bis hin zu Condition Monitoring – aktiv unterstützen können.

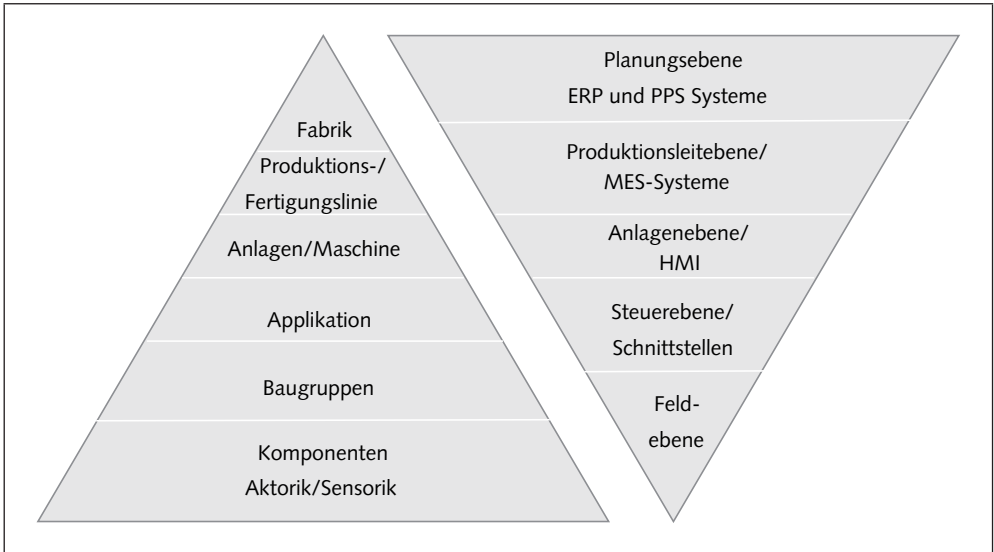


Abb. 3: Automatisierungspyramide (Quelle: Festo AG & Co. KG)

## 2 Initiativen und Forschungsaktivitäten

Unter der Koordination von Acatech entwickelte das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 den Rahmen für das gleichnamige Zukunftsprojekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung als Bestandteil der Hightech-Strategie. Wesentliches Ergebnis waren die Handlungsempfehlungen an die Bundesregierung, die auf der Hannover Messe 2013 an Bundeskanzlerin Angela Merkel übergeben wurden.

Die Ergebnisse des Arbeitskreises Industrie 4.0 führten in der Folge zur Gründung der Initiative »Plattform Industrie 4.0«. Die dort vertretenen Unternehmen arbeiten gemeinsam mit Partnern aus Verbänden und Wissenschaft aktiv an der Entwicklung von Technologien, Standards, Geschäfts- und Organisationsmodellen zu Industrie 4.0 und deren praktischen Umsetzung. Insbesondere ist das Engagement für die Erstellung einer Referenzarchitektur für Industrie 4.0 sowie für die Entwicklung von verbindlichen Standards und Normen hervorzuheben (*Plattform Industrie 4.0*).

So sind vor allem auch die Steuerungssysteme konzeptionell von zentralen zu dezentralen Architekturen auf der Basis von mechatronischen Agenten weiter zu entwickeln. Die hier existierenden Lösungen befinden sich noch im frühen Entwicklungsstadium und werden derzeit auf Forschungsplattformen einer Evaluation unterzogen.

Zum Beispiel ist hier die Initiative SmartFactory des DFKI in Kaiserslautern zu nennen. Die herstellerunabhängige Lernfabrik dient als Demonstrator für Funktionsprinzipien und als Transferfunktion in das Umfeld der Fabrikautomation (*Smart Factory*).

Die industrielle Relevanz der im Kontext von Industrie 4.0 diskutierten Lösungen kann anhand einiger Projekte aufgezeigt werden, an denen u. a. das Automatisierungsunternehmen Festo aus Esslingen beteiligt ist. D. h. konkrete Anwendungen zeigen: Schon heute sind erste Lösungsansätze in der Praxis angekommen. Dennoch besteht noch viel Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

## IDEAS

Im bereits abgeschlossenen europäischen Verbundprojekt IDEAS wurden Steuerungskonzepte für Produktionsanlagen der Zukunft entwickelt. Mit Hilfe neuer technologischer Ansätze können die Kosten für Inbetriebnahme und Konfiguration stark reduziert werden. Außerdem wird die Flexibilität und Adaptivität erhöht. Produktionsanlagen sollen sich schnell und möglichst selbstständig auf neue oder veränderte Produkte einstellen können (Hanisch/Hoos 2012).

## AutoPnP

Das Projekt AutoPnP hat sich das Ziel gesetzt, Konzepte zur Plug&Play-Fähigkeit im industriellen Kontext zu entwickeln. Um künftigen Anforderungen an die Produktion gerecht zu werden, ist es erforderlich, Wandlungsfähigkeit in der Produktion und im speziellen im Steuerungskonzept umzusetzen. Ausgangsbasis dafür bilden die Strukturen der Steuerungsprogramme. Zur Unterstützung von Wandlungsfähigkeit ist es notwendig, die Steuerungsprogramme zuerst zu modularisieren, indem man die Algorithmen für die Ansteuerung der Sensoren und Aktoren in wiederverwendbare Module mit höherer Funktionalität kapselt, wie z. B. Modul *Zylinder* mit *fahreAufPosition*, Modul *Sensor* mit *messeWert*; aufbauend auf diesen Modulen wurde eine Rezeptfahrweise umgesetzt, die es ermöglicht, Steuerungsprogramme während der Laufzeit zu tauschen. Da nicht die gesamten Steuerungsprogramme während der Laufzeit getauscht, sondern lediglich übergeordnete Rezepte eingespielt werden, wird sichergestellt, dass es zu keinen Schäden an der Anlage kommen kann. Zusätzlich zu diesem Themenbereich gibt der Beitrag einen Einblick in weitere Ergebnisse des Forschungsprojekts »AutoPnP – Plug & Play für Automatisierungssysteme«, das für die Ableitung der Anforderungen an die neue Steuerungsarchitektur herangezogen wurde (AutoPnP).

## OPAK

Die acht Forschungspartner entwickeln im Projekt OPAK eine offene Engineering-Plattform für autonome, mechatronische Automatisierungskomponenten in funktionsorientierter Architektur. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Zuge des AUTONOMIK für Industrie 4.0 Programmes gefördert (OPAK). Mit den Forschungsergebnissen von OPAK sollen komplexe Systeme einfacher, schneller und kosteneffizienter entwickelt und angepasst werden können. Gleichzeitig soll die Einbindung und Konfiguration neuer Komponenten in bestehende Systeme mit geringem Aufwand möglich werden. Ziel ist es, den Automatisierer zu entlasten, so dass er möglichst wenig mit abstrakten Größen zu tun hat, sondern vielmehr mit den Funktionalitäten des Automatisierungssystems und dessen Komponenten interagieren kann.

Unter anderem werden in OPAK kompakte CoDeSys-Steuern (so genannte Effektoren) entwickelt, durch die Komponenten völlig autonom arbeiten können – ohne Anbindung an eine übergeordnete Steuerungsebene. Diese werden bereits in der Demonstrationsanlage der SmartFactory eingesetzt (Hoos/Terzi/Gaissert 2014).

### **ESIMA**

Im Projekt ESIMA (Energieautarke Sensorik und Interaktion mit mobilen Anwendern), das innerhalb des Rahmenprogramms Mikrosysteme des BMBF angesiedelt ist, entwickeln die Projektpartner einen Ansatz zur Optimierung der Ressourceneffizienz in der Produktion, bei dem energieautarke Sensoren eine zentrale Rolle spielen. Ziel von ESIMA ist es, den Energieverbrauch von Maschinen mit Hilfe von drahtlosen Sensoren einfacher zu erfassen und die ermittelten Werte auf einem mobilen Endgerät im Produktionsumfeld darzustellen. Die Mensch-Technik-Kommunikation soll über ein dezentrales Informationssystem erfolgen. Zur Visualisierung der Energiekennwerte und Verbrauchstrends werden mobile Geräte wie Tablet PCs verwendet (ESIMA).

Im Vorgängerprojekt MIKOA wurden energieautarke Sensoren entwickelt, die bereits in der Transfer-Factory der Festo Didactic Verwendung finden.

### **MetamoFAB**

Im ebenfalls vom BMBF geförderten Verbundprojekt MetamoFAB werden Lösungen entwickelt, um in bestehenden Betrieben die Metamorphose zu intelligenten und vernetzten Fabriken zu ermöglichen. Es wird wissenschaftlich untersucht, wie viel Industrie 4.0 sinnvoll ist. Alle beteiligten Akteure wie Menschen, Maschinen, Werkstücke und Informationstechnik müssen dabei einbezogen werden. Gemäß der Vision von cyber-physischen Systemen (CPS) können dadurch signifikante Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerungen erreicht werden (MetamoFAB).

## **3 Konkrete Lösungsansätze aus Industrie 4.0 für die Produktion der Zukunft**

Auch künftig wird es die Massenproduktion von Produkten mit sehr hohen Stückzahlen geben, daneben aber zunehmend individualisierte Produkte mit der Konsequenz, niedrige Losgrößen mit den (kosten)effizienten Methoden der Massenproduktion herstellen zu können. Dafür werden Technologien benötigt, die sich nicht nur kontinuierlich an veränderte Bedingungen anpassen, sondern sich auch darauf einstellen, dass der Mensch jederzeit eingreifen möchte, um bestimmte Parameter zu ändern. Es wird also in Zukunft nicht nur vollautomatisierte Produktionsprozesse geben, sondern zunehmend adaptive Konzepte bis hin zu selbstregulierenden und sogar selbstplanenden Produktionssystemen. Voraussetzung dafür sind intelligente Komponenten mit hoher Funktionenintegration – also Komponenten, die zum Beispiel die Funktionen übernehmen, die ursprünglich in der übergeordneten Steuerungsebene angesiedelt waren. Neben der Informationstechnologie spielen hierbei die Feinwerktechnik und die Mikrosystemtechnik eine wichtige Rolle (Hoos/Helbig 2014).

Durch Komponenten, die sich selbstständig vernetzen, sich selbst konfigurieren und somit Plug & Produce fähig sind, können die Anlagen den ständig wechselnden Anforderungen sofort gerecht werden. Wesentliche Fähigkeiten hinsichtlich Vernetzung, Flexibilität und Adaptivität in der Automatisierung werden zukünftig somit durch autonome, selbstlernende und wissensbasierte Systeme erfüllt.

Für solche Systeme, Subsysteme und Komponenten wurde der Begriff der Cyber Physical Systems (CPS) geprägt. CPS sind hochintegrierte, meist mechatronische Module, die zusätzlich über leistungsfähige Kommunikationsmodule in der Lage sind, miteinander und mit den Maschinensteuerungen zu kommunizieren.

Für das Verständnis der CPS-Funktionsweise und deren Optimierung im ganzheitlichen Kontext sind mathematisch-physikalische Modellbildungsmechanismen der Mechatronik unerlässlich. Ebenso ist für die Planung und Inbetriebnahme von Anlagen umfangreiche Ingenieurexpertise erforderlich. Diese Methoden müssen dringend hinsichtlich Handhabung und Aufwand vereinfacht werden. Hier besteht erheblicher Forschungsbedarf (Kainz/Keddis/Pensky/Buckl/Zoiti/Pittschellis/Kärcher 2013).

Sensorintegration, Kognition und Weiterentwicklung der Kommunikationstechnologien für autonome Systeme sind Impulsgeber für zukünftige Entwicklungen mit folgenden Schwerpunkten:

- *Funktionsintegration* für intelligente mechatronische Automatisierungskomponenten
- *Modellbasierte, effiziente Funktionsentwicklung* für kognitive mechatronische Produkte/Systeme
- *Angepasste Steuerungsarchitekturen* für zentrale/dezentrale Automatisierung und schnelle Regelungstechnik
- *Mensch-Maschine-Interaktion* für Benutzerfreundlichkeit und sicheres Verhalten von Systemen in Inbetriebnahme und Anwendung
- *Einfachheit* in der Konstruktion, Herstellung und Anwendung durch gekapselte Komplexität

Industrie 4.0 zeigt also prinzipiell die Vision einer voll vernetzten, adaptiven Produktion. Heute verfügbare Komponenten bringen bereits teilweise die notwendigen hard- und softwareseitigen Voraussetzungen mit, auch wenn es sich derzeit um Insellösungen handelt, die noch nicht im größeren Maßstab vernetzt sind.