



# Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik

## Requirements on CPS from the Viewpoint of Automation

Birgit Vogel-Heuser\*, TU München,  
Christian Diedrich, Institut für Automatisierungstechnik (IFAT), Magdeburg,  
Manfred Broy, TU München

\* Korrespondenzautor: [vogel-heuser@ais.mw.tum.de](mailto:vogel-heuser@ais.mw.tum.de)

**Zusammenfassung** Die Entwicklung von CPS zeichnet sich durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Disziplinen, wie der Informatik und der Automatisierungstechnik (AT), aus. Methoden der Informatik versprechen einen hohen Mehrwert in der Entwicklung zukünftiger CPS, wenn sie auf die Anforderungen der AT, wie z. B. Lebenszyklusaspekte, angepasst werden. Im Folgenden werden vielversprechende Ansätze vor dem Hintergrund der Anforderungen aus der AT beleuchtet.

**▶▶▶ Summary** The development of CPS is marked by the interaction of different disciplines such as software engineering and automation engineering. Methods developed for software engineering, when adapted in conformance to requirements coming from automation engineering such as life-cycle aspects, promise benefits in the development of future CPS. In the following promising approaches are analyzed taking requirements from automation engineering into consideration.

**Schlagwörter** CPS in der Automatisierungstechnik, Anforderungen der AT, IT-Technologien in der AT, Anlagenautomatisierung, CPS Szenario, Engineering **▶▶▶ Keywords** CPS in automation, requirements of automation, IT-technologies in automation, production automation, CPS scenario, Engineering

## 1 Einleitung

Rechner werden immer kleiner und leistungsfähiger und der Einzug der Prozessoren und Geräte aus dem Consumer Bereich in die Produktion ist mit den Smart Phones und Tablets bereits erfolgt. Bereits geförderte EU-Projekte FP7 IMC-AESOP [1] prognostizieren, dass kleinste heterogene vernetzte Prozessoren bald auf der Feldebene Einzug halten. Der Beitrag verdeutlicht die besonderen Randbedingungen und Herausforderungen vor dem Hintergrund der raschen Innovation solcher Gerätetechnik.

Ausgehend von einer Begriffsklärung von CPS und den besonderen Randbedingungen der Produkt- und Anlagenautomatisierung werden anhand von zwei Szenarien die Herausforderungen für CPS erläutert und die technischen Voraussetzungen für CPS abgeleitet. Der Beitrag

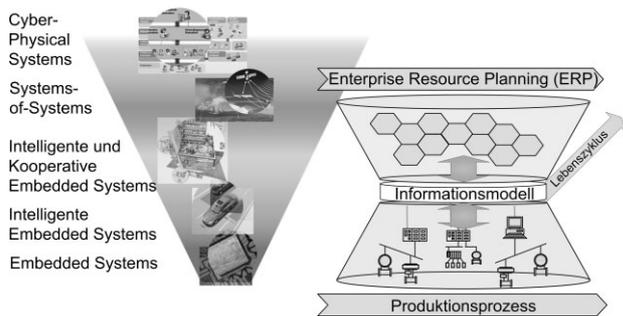
schließt mit einer Sammlung von interdisziplinär zu bearbeitenden Forschungsfragen ab.

### 1.1 Begriffsklärung Cyber-Physical System

Die vertikale und horizontale Integration und die Schaffung von Cyber-Physical Systems (CPS) (definiert nach [2]) im Bereich der Produktion sind die Trends der Zukunft.

Begriffsklärung **Cyber-Physical Systems** [2]: **Cyber-Physical Systems** umfassen typischerweise eingebettete Systeme (als Teil von Geräten, Gebäuden, Verkehrsmitteln, Verkehrswegen, Produktionsanlagen, Logistik- und Managementprozessen, etc.), die

- mittels Sensoren und Aktoren unmittelbar physikalische Daten erfassen und auf physikalische Vorgänge einwirken,



**Bild 1** Gegenüberstellung der Ebenen der Automatisierungspyramide und der CPS-Ebenen [2; 3].

- mit digitalen Netzen verbunden sind (drahtlos, drahtgebunden, lokal, global),
- weltweit verfügbare Daten und Dienste nutzen
- und über eine Reihe multimodaler Mensch-Maschine-Schnittstellen (dediziert in Geräten, unspezifisch etwa über Browser, etc.) verfügen.

Die Gegenüberstellung der CPS-Ebenen und der Informationspyramide der Automatisierungstechnik bzw. dem weiterentwickelten Diabolo zeigt die Ähnlichkeit der Einteilung der Ebenen (Bild 1). Auf der rechten Seite ist die Automatisierungsarchitektur, wie sie heute bereits zum Teil besteht, dargestellt [3]. Die unterste Ebene bildet hier der technische Prozess, z. B. der Produktionsprozess. Der untere Kegel repräsentiert eine Produktionseinheit. In ihm sind verschiedene intelligente, über eine Kommunikationsinfrastruktur vernetzte, Feldgeräte dargestellt. Der obere Teil des Kegels repräsentiert die MES-Ebene, die an ERP-Systeme angebunden wird. Die weitere Vernetzung ist bisher nicht Bestandteil der automatisierungstechnischen Betrachtung. Aus Sicht der Informatik (Bild 1, linke Seite) werden als CPS Systeme verstanden, die Systems of Systems vernetzen aber auch inkludieren. Die einzelnen Systeme haben dabei ihre eigene spezifische Architektur, welche im Idealfall schon beim Engineering des Systems

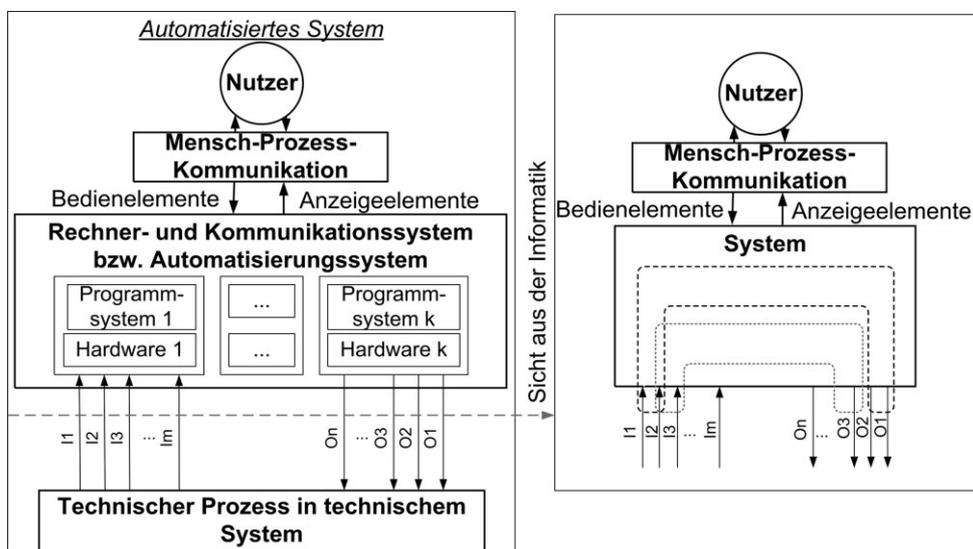
vor ihrer Komposition berücksichtigt wird. Bei der Evolution von automatisierten Systemen zu CPS gilt es ebenso die dargestellte Architektur zu berücksichtigen.

## 2 Randbedingungen für CPS in der Anlagenautomatisierung

Nach Klärung der wesentlichen Begriffe eines Automatisierungssystems und seiner Schnittstellen, werden die Aspekte Lebenszyklus und Nutzergruppen, Automatisierungsplattformen und abschließend IT-Aspekte betrachtet.

### 2.1 Begriffsklärung Automatisierungssystem

Automatisierte Systeme bzw. Prozessautomatisierungssysteme bestehen aus einem technischen System, (technisches Produkt oder technische Anlage) in dem ein technischer Prozess abläuft, einem Rechner- und Kommunikationssystem zur Erfassung, Verarbeitung und Darstellung von Informationen und dem Prozessbedienpersonal (Bild 2, linke Seite) [4]. Der Anteil der Software des technischen Systems steigt durch zunehmende Forderungen nach zusätzlichen Funktionalitäten. Unter einem technischen Prozess wird die Umwandlung, der Transport oder die Speicherung von Energie, Materie oder Information verstanden. Die Eigenschaften des technischen Prozesses spielen bei der Entwicklung automatisierter Systeme eine große Rolle, da während der Entwicklung mit Kenntnissen über diesen über die Auslegung der Hardware und Software entschieden werden muss (beispielsweise Sicherheitsanforderungen). Die Automatisierungstechnik bezieht bewusst die funktionalen und nicht funktionalen Merkmale über mögliche Rechner- und Kommunikationssysteme in der Automatisierungstechnik mit ein. In der Informatik wird das Systemverhalten bei Systemen häufig nur durch die Beschreibung von Sensorsignalen und daraus resultierenden Aktorsignalen beschrieben. Roth erreicht für kleine Sys-



**Bild 2** Prinzipieller Aufbau eines automatisierten Systems in Gegenüberstellung der Steuerung von Systemen der Informatik (in Anlehnung an [4]).

teme (140 Ein-/Ausgänge) ebenfalls eine Erstellung eines Modells des Systemverhaltens auf Basis der Analyse von Eingangs- und Ausgangsdaten [5]. Für CPS ist in Zukunft eine Integration der momentan getrennten Elemente (Mensch, System, Prozess) zu einer ganzheitlichen Beschreibung einzelner funktionaler Einheiten der CPS zu erwarten.

**2.2 Lebenszyklusaspekte**

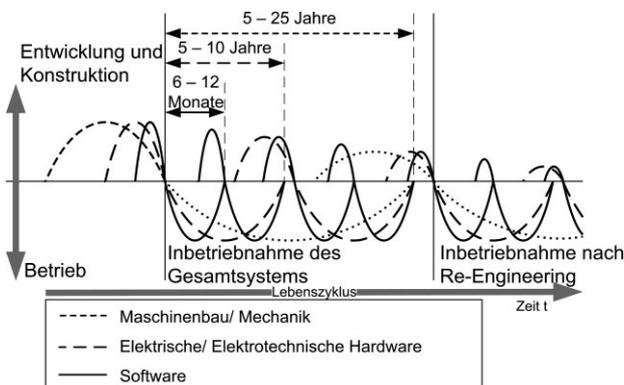
Während in der Anlagenautomatisierung Maschinen und Anlagen häufig 5 bis 25 Jahre betrieben werden [6], wird die automatisierungstechnische Hardware im Anlagenbau maximal alle 5 bis 10 Jahre ausgetauscht und die Software maximal alle 6 bis 12 Monate aktualisiert (siehe Bild 3, Zeiträume für Produktautomatisierung deutlich kürzer).

Diese Herausforderungen und die zeitlichen Abhängigkeiten im Life-Cycle der Systeme müssen bereits im Software-Engineering berücksichtigt werden, um zur Laufzeit entsprechend flexibel zu sein.

Ein wichtiges Element bei der Automatisierung ist der Nutzer beziehungsweise die Nutzergruppen, die das System entwickeln, einsetzen, warten und pflegen. Während der Entwicklung sind dies in der Regel Ingenieure verschiedener Disziplinen und in der Wartung häufig Facharbeiter und Techniker. Der gesamte Entwicklungsprozess von der Investitionsentscheidung bis zur Inbetriebnahme sowie der operative Betrieb mit Wartung und Instandsetzung wird als Engineering bezeichnet. Das Management der Innovationszyklen von mechatronischen Systemen mit ihren unterschiedlichen Frequenzen wird im SFB 768 untersucht und modelliert, um auf kurzfristige Abkündigungen von Hardware zu reagieren oder notwendige Softwareupdates mit ihren Interdependenzen zu den anderen Gewerken systematischer durchführen zu können [7].

**2.3 Engineering-Umgebungen**

„Der Planungsprozess automatisierter industrieller Produktionsanlagen ist geprägt durch die interdisziplinäre



**Bild 3** Zusammenwirken der verschiedenen Disziplinen in der Anlagen- und Produktautomatisierung in Anlehnung an Li et al. [7] (Zeiten für Produktautomatisierung abweichend).

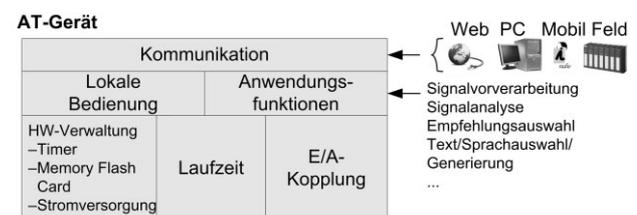
Zusammenarbeit verschiedenster Disziplinen bzw. Gewerke. Die Gemeinsamkeiten im Engineering fertigungs- und verfahrenstechnischer Anlagen liegen dabei vor allem in einer starken Phasenausprägung mit phasenbezogener Werkzeug-Unterstützung, Verwendung unterschiedlicher Modelle und Vorstellungen sowie einem wachsenden Engineering-Anteil bei zunehmender Anzahl von Zulieferern und fehlenden Datenaustauschlösungen“ [8]. Die Kombination aus fehlenden Datenaustauschlösungen und einer heterogenen Werkzeuglandschaft verhindert ein transparentes Anforderungsmanagement.

Daraus resultieren ein erhöhtes Fehlerpotential bei der Anlagenplanung, Ineffizienz und hohe Kosten im Engineering und eine schlechte Performanz bei Aktualisierungen. Die Einbettung der verschiedenen Werkzeuge in eine integrierte Werkzeuglandschaft ist zwar punktuell für Sensoren und Aktoren realisiert, aber eine umfassende Lösung, die sowohl den Anforderungen der agilen Softwareentwicklung als auch den Anforderungen aus der Automatisierungstechnik genüge trägt und für alle Komponenten und Werkzeuge in allen Disziplinen geeignet ist, ist weiterhin Gegenstand von Forschung und Entwicklung [7]. Die Überprüfung der Einhaltung von Konsistenzregeln bei der Modellierung interdisziplinärer Systeme ist ein wichtiges Hilfsmittel, welches diese Anforderung unterstützt und erste Lösungen hierfür bereits umsetzt [9]. Weitere aktuelle Arbeiten beschäftigen sich zum Beispiel mit der Entwicklung intelligenter, fehlertoleranter Echtzeitsoftware (Agenten) unter Berücksichtigung der speziellen Anforderungen der industriellen Produktionsautomatisierung [10].

**2.4 Plattformen der Automatisierungstechnik – Stand der Technik**

Die Automatisierungsfunktionen sind das zentrale Element eines automatisierten Systems. Sie resultieren aus den gewünschten Anlagenfunktionen und werden heute in der Regel durch Software auf speziellen Plattformen realisiert.

Plattform wird hier als Oberbegriff für Hardware als eingebettetes System mit optionalen Sensor-, Aktor-, Mensch-orientierten Eingabe- und Anzeigeelementen sowie der Firmware, der kommunikativen Kopplung und hardwarespezifischen Automatisierungsfunktionen verstanden. Bild 4 zeigt ausschnittsweise typische Plattformkomponenten, wie sie z. B. bei Antrie-



**Bild 4** Typische Plattformkomponenten eines Automatisierungsgeräts [4].

ben, Bedienpaneelen oder Steuerungen zu finden sind. Im Rahmen von CPS ist in der Zukunft mit einer weiterhin und sprunghaft steigenden Anzahl und Heterogenität der Plattformen zu rechnen. Diese müssen im Engineering beherrscht werden.

Plattformen in der Automatisierungstechnik werden auch zukünftig folgende generelle Aspekte zu erfüllen haben bzw. aufweisen müssen:

1. Aus dem technischem Kontext (T)
  - Große Vielfalt an  $\mu$ -Prozessoren und Echtzeitbetriebssystemen (verglichen mit Plattformen aus dem Consumer-Bereich allerdings noch homogen aufgrund des gleichen Paradigmas)
    - Es gibt keine Vereinheitlichungstendenzen für die AT. Hauptgrund sind die unterschiedlichen funktionalen Umfänge in den Geräten; von einfachen binären Sensoren zu hoch komplexen Antriebsumrichtern und Analysengeräten
    - Beachtung der zeitlichen AT-Funktionsausführung nach dem Abtasttheorem (T1), da AT-Funktionen typischerweise auf zeitkontinuierliche Systeme wirken
    - Parallele synchrone und asynchrone AT-Funktionsausführung in einem Gerät
    - Änderung der Anwendungs-AT-Funktionen während des operativen Betriebs (T2)
  - Mehrere AT-Geräte gekoppelt durch industrielle Kommunikationssysteme erbringen gemeinschaftlich in einem Abtasttakt eine Funktion, z. B. in einem geschlossenen Regelkreis
    - Nutzung deterministischer industrieller Kommunikationssysteme (T3)
    - Synchronisierung über Gerätegrenzen im  $\mu$ s bis ms-Bereich (z. B. Antriebe) (T4)
  - Zugriff auf AT-Funktionen im operativen Betrieb parallel von verschiedenen Hostsystemen mit unterschiedlichen zeitlichen und funktionalen Randbedingungen (z. B. von der Steuerung, Parametrierung und Service/Diagnose im laufenden Betrieb)
    - Unterschiedliche QoS (Quality of Service) der Kommunikation in einem Gerät (T5)
    - Konkurrierender Zugriff auf gleiche Funktion von verschiedenen Hosts
    - Bedienung unterschiedlicher Funktionalitäten durch Bediener mit unterschiedlichen Rechten und unterschiedlicher Qualifikation (T6)
    - Bewahrung der Konsistenz der Funktionsparametrierung (T7)
2. Aus dem betrieblichen Kontext (B)
  - Geringer Energieverbrauch (mW, z. B. 100 mW) für Geräte im Explosionsgefährdeten-Bereich oder Einsatz von elektrischen Komponenten in Hochtemperaturbereichen (spezifische Anforderungen an eingesetzte AT-Geräte in kritischen Bereichen)

- Zum Teil sehr hohe Anforderungen an numerische Berechnungsgenauigkeiten (z. B. Durchflussberechnung mit Float 64)
  - Erfüllung der funktionalen Sicherheit (z. B. Software-in-the-Loop (SIL)-Entwicklung) (B1)
    - Die CPS-Plattformen dürfen auch bei unvorhersehbaren Ereignissen, wie Ausfällen, und bei Einwirkungen von außen die Menschen und Umwelt (safety) nicht gefährden (B1a)
  - Gemeinsame Kommunikations- und Energieversorgungsleitungen für Geräte der Verfahrenstechnik
3. Aus dem methodischen Kontext (M)
    - Domänenspezifische Sprachen zur Konfiguration, Parametrierung und Programmierung der AT-Geräte (M1)
    - Funktionale Modularisierung und Hierarchisierung sind für die Gewährleistung von Determinismus in der Abarbeitung trotz komplexer Zusammenhänge in den zum Teil großen Systemen ( $> 10.000$  E/As) wesentlich (M2)
    - Technologien zur vertikalen und horizontalen AT-Geräteintegration und damit auch Interoperabilität der kooperativen Funktionen sind von herausragender Bedeutung [11] wegen bereits benannten Änderungen im laufenden Betrieb und sehr langen Gerätelebenszyklen (M3).

## 2.5 IT-Aspekte der Automatisierungstechnik

In der Automatisierungstechnik ist ein stetiger Zuwachs von der Entwicklung und Anwendung von IT-Technologien zu beobachten. Exemplarisch kann beispielsweise der Einsatz von Datenmodellierungs- und Datenkopplungsansätzen wie XML-Schemata für die Integration von Geräten in Leitsysteme und Steuerungen genannt werden.

Um weitere technische Herausforderungen und Voraussetzungen für die Umsetzung der CPS in der AT aufzuzeigen, werden in den folgenden Kapiteln zunächst CPS-Szenarien in der Anlagenautomatisierung vorgestellt und darauffolgend anhand dieser die wichtigsten technischen Voraussetzungen zusammengefasst.

## 3 Szenarien Anlagenautomatisierung CPS

Im Folgenden wird das Szenario eines zunächst unbemerkten Ventilausfalls in einer verfahrenstechnischen Anlage (S1) dargestellt. In einem Leitstand wird die Störmeldung eines fehlenden Zulaufs für eine Pumpe angezeigt und automatisch auf das Smart Phone des Prozessleittechnik (PLT)-Wartungsmitarbeiters weitergeleitet, mit der Information, dass das Zulaufventil als angesteuert diagnostiziert wird. Der Wartungsmitarbeiter prüft vor Ort die Filter sowie das Zulaufventil mit der Ansteuerung desselben (SPS, I/O und Ventil selbst) und erkennt, dass das Ventil, selbst wenn es geforced (Ansteuerung wird erzwungen) ist, nicht öffnet. Daraufhin werden dem Wartungsmitarbeiter die aktuellen

Engineering-Informationen, wie Datenblätter, Stromlaufpläne und Wartungsanleitungen, für diese PLT-Stelle auf seinem mobilen Endgerät zur Verfügung gestellt (S1/1). Mit Hilfe der Wartungsanleitung baut er den Ventildeckel ab und findet ein defektes Stellungspotentiometer. Eine Anfrage an das Plant Asset Management System (PAM) ergibt, dass an dieser PLT-Stelle bereits mehrere baugleiche Ventile deutlich vor der im Datenblatt angegebenen MTBF (Mean Time Between Failures)-Zeit ausgefallen sind (S1/2). Über die CPS-Plattform kann der Mitarbeiter auf Ausfalldaten ähnlicher Anlagen beim Anlagenhersteller ebenso wie auf Ventilausfallsdaten des Ventilherstellers zugreifen (S1/3) und die Analyse ergibt, dass die Ausfälle in der eigenen Anlage deutlich über den durchschnittlichen Ausfällen liegen. Eine Analyse möglicher Ursachen zeigt, dass der Hersteller den Einsatz in den vorliegenden Betriebsbedingungen nicht empfiehlt, sondern ein Ventil einer anderen Baureihe besser geeignet wäre (S1/3a), welches allerdings erst in 3 Tagen lieferbar ist (S1/4). Da der nächste Wartungsstillstand erst in 3 Monaten geplant ist (S1/5) und, unter den vorliegenden ungünstigen Einsatzbedingungen, die Lebensdauer des im Zentrallager verfügbaren, bisher eingesetzten, Ventils 4 Monate beträgt, entscheidet sich daraufhin der Wartungsmitarbeiter dieses Ventil bis zum geplanten Wartungsstillstand einzubauen und veranlasst die Einplanung des Ventiltausches in den Wartungsplan (S1/6a) sowie die rechtzeitige Bestellung des Ersatzventils (S1/6b). Die Information über den eingeschränkten Einsatzbereich des Ventils wird dem unternehmenseigenen Engineering und dem Engineering des Anlagenlieferanten zur Verfügung gestellt (S1/3b). Als Folge der Eingabe werden alle unter ähnlichen Einsatzbedingungen betriebenen Ventile gleicher Bauart früher getauscht (S1/7). Das ausgefallene Ventil wird zum Hersteller eingeschickt, dort analysiert und das Ergebnis geht in die Aktualisierung der MTBF-Datenbank des Herstellers ein (S1/3c). Dieses Szenario erfordert den offenen Austausch von Informationen zwischen Betreiber, Anlagenlieferanten sowie Komponentenlieferant bzw. -hersteller trotz potentieller Rückforderungen und Kostenübernahmen.

Das zweite Szenario (S2) beschreibt die Verlagerung der Produktion an einem verfahrenstechnischen Beispiel. Aufgrund eines eingefrorenen Temperaturwertes in der Produktionseinheit 1 (PE 1) wird eine Charge durch die falsche Regelung der Temperatur unbrauchbar. PE 1 berechnet den voraussichtlichen Produktionsausfall und fragt Produktionseinheiten des Unternehmens weltweit, welche ähnliche Dienste anbieten, nach einer Übernahme des berechneten Wertes an. 4 Produktionseinheiten melden sich und die Übernahme der Produktion wird nach vordefinierten Kriterien (Kapazität, Logistik) verhandelt (S2/1). PE 3 und PE 4 übernehmen daraufhin die Produktion (S2/2) solange bis PE 1 repariert und gesäubert wurde und wieder anfahren kann. Die Nachricht über den defekten Temperatursensor geht auch in diesem Fall an den Wartungsmitarbeiter (S2/3). Da leider kein

identischer Sensor, sondern nur ein Sensor mit neuerer Softwareversion auf Lager ist, wird dieser eingebaut, ist jedoch inkompatibel zur Steuerung. Um eine Produktion zu ermöglichen erfolgt der Lösungsansatz über einen Agenten, der die neue Softwareversion kapselt (S2/4).

Viele Aspekte dieser Szenarien sind bereits realisierbar oder realisiert. Im Folgenden werden einige der wesentlichen Hemmnisse, die sich aus dem Feedback der Diskussion über die Szenarien mit einer Vielzahl von Industrievertretern ergeben haben, erläutert.

Das Pumpenszenario S1 setzt den offenen Datenaustausch auch über potentielle Schwachstellen des Gerätes bzw. seiner Einsatzbedingungen zwischen Anlagenbetreiber, Anlagenlieferant sowie Geräteleiferant voraus, die einerseits durch kommerzielle Interessen (Back-Charges) und andererseits durch die Sorge des Technologieschutzes (des technischen Prozesses) ebenso wie der Security (Viren) erschwert werden. Außerdem fehlen Betreiber- und Geschäftsmodelle für Plattformen zum Informationsaustausch. Als Voraussetzung ist die semantische Abstraktion der Gerätedaten gemeinsam von allen Stackholdern zu erarbeiten.

Die Produktionsverlagerung im Szenario S2 wurde im Rahmen von PABADIS bzw. PABADIS'PROMISE [12] auf den oberen Ebenen des AT-Diabolos ohne die Anpassung der SPS-Programme zur Laufzeit realisiert. Die Herausforderung ist allerdings, die bisher nicht realisierte für den Einsatz des neuen Sensors notwendige geänderte Sensoreinbindung mittels eines Übersetzungsagenten zur Laufzeit zu implementieren.

#### 4 Ableitung der technischen Merkmale von CPS in der Anlagenautomatisierung anhand der Szenarien

Im Folgenden werden zunächst die wichtigsten technischen Merkmale anhand der vorhergehend beschriebenen Teilszenarien (S1/1–7) und (S2/1–4) aufgeführt. Anschließend werden wichtige technische Voraussetzungen zur Implementierung dieser beschrieben.

##### 4.1 Technische Merkmale von CPS

Als wesentliche technische Merkmale werden Folgende angesehen:

1. Verfügbarkeit von weltweit verteilten Daten und Dienste, auf die mit hoher Verfügbarkeit auch ortsunabhängig zugegriffen werden kann (S1/2, S1/3, S1/4).
2. Zugriffsschutz (Know-how Schutz) auf Produktions- und Technologiedaten (Know-how) der beteiligten Unternehmen (B1a, S1/3).
3. Datendurchgängigkeit über verschiedene, am Geschäftsprozess beteiligte, Unternehmen (S1/3). Nutzung und Entwicklung internationaler Standards für die Integration von Geräten in verschiedenen Engineering-Phasen und Engineering-Gewerken zur Datenintegration (siehe [8]) (S2/4).
4. Digitale Netze und Schnittstellen für die Kommunikation zwischen Geräten der Anlagenautomatisierung

- (T3, T4, T5, S2/1, S2/2), Mensch und Anlage (S2/3) sowie Anlage und Anlage (B1a, S2/1). Erstere beiden sind selbstverständlich in der Automatisierungstechnik (siehe Diabolo), letztere ist bisher nur in einem Unternehmen bzw. zu Wartungszwecken über Teleservice üblich (S2/2).
5. Funktionale ganzheitliche Modelle, welche alle notwendigen Aspekte der verschiedenen Disziplinen des Systems enthalten bzw. die Kopplung dieser disziplinen-spezifischen Modelle und der Beschreibung des zu fertigenden Produkts unter Nutzung einer entsprechenden Ontologie würden eine eigenständige Analyse, Darstellung, Organisation und Ausführung eines Produktionsablaufs für das Produkt erlauben (S2/2). Weiterhin können Produkte diese und weitere Informationen, wie z.B. historische Daten, in einem digitalen Produktgedächtnis speichern.
  6. Flexible Produktionseinheiten, die auf geänderte Produktanforderungen unmittelbar adaptierbar bzw. rekonfigurierbar sind (z.B. per Konfiguration oder Neuparametrierung), aber auch strukturelle Änderungen ihrer Eigenschaften und Fähigkeiten erlauben (M2, M3, S2/1, S2/2).
  7. Produktionseinheiten mit inhärenter Fähigkeit zur autonomen Steuerung, zur Diagnose, zur Neukonfiguration und Interaktion mit der realen und digitalen Welt (S2/2). Die PE kennen ihre Zustände und Fehlerfälle und können sich in einen fehlervermeidenden Zustand bringen im besten Fall sogar selbst reparieren während des Betriebs bzw. ggf. den Operator über notwendige Eingriffe zur Störungsbeseitigung informieren.
  8. Bereitstellung notwendiger Daten für Konfiguration, Produktion, Verhandlung von Auftragsbearbeitungen (T6, T7, S2/2).
  9. Nutzerangemessenheit im Engineering und sichere Änderbarkeit von Software und teilweise auch Hardware (Verfahrenstechnik) während des Betriebs (T2, T6, M1, M2).

#### 4.2 Technische Voraussetzungen von CPS

Um die Vision CPS, wie in Kapitel 4.1 und in den Szenarien beschrieben, zu verwirklichen gibt es einige technische Voraussetzungen.

Für das autonome Handeln und Verhandeln von CPS, wie beispielsweise die zeitweise Verlagerung der Produktion von einer Produktionseinheit auf eine andere, ist es notwendig, dass die CPS kognitive Fähigkeiten, wie Wahrnehmung, Lernen usw. in Kombination mit Algorithmen für das adaptive Verhalten erhalten. Die Fähigkeit Lernen ist notwendig um beispielsweise auf Basis von bisherigen Reaktionen auf Störungen in einer Anlage eine entsprechende Handlungsempfehlung an den Operator oder eine selbstständige Entscheidung für eine Reaktion treffen zu können. Eine weitere Anwendung ist die Analyse von Prozessdaten und Alarmdaten um zu erlernen wie sich die Anlage unter dem Einfluss verschie-

dener externer Faktoren aus der Umwelt verhält, welche Umwelteinflüsse (Störungen) dies sind und daraus anlagenspezifische Diagnosesysteme zu identifizieren. Auch Prozessgütern könnten hiermit anlagen- und ortsübergreifend bestimmt werden.

Im Bereich der Interoperabilitätsstandards gibt es in der Automatisierungstechnik viele Gebiete, in denen die Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Wie im Szenario beschrieben muss der Datenaustausch sowohl in der vertikalen Richtung, wie der Zugriff und Austausch von Engineering-Dokumenten, MTBF Informationen und Anleitungen, als auch horizontal zwischen den verschiedenen Geräten auf der Feldebene (SPS bis hin zu Sensoren und Aktoren) stattfinden. Um dies zu ermöglichen werden zum einen Informationsmodelle für die Interoperabilität des Datenaustausches benötigt und zum anderen Modelle für die Kommunikationsinfrastruktur. Die Informationsmodelle gliedern sich wiederum in Modelle mit entsprechend definierten Metamodellen zur Gerätebeschreibung, CAE-Beschreibung, Beschreibung angebotener Services der Geräte und je nach Anwendungsfall weiteren Beschreibungen. Eine plattformunabhängige Entwicklung, die hier zum Einsatz kommen kann, ist die OPC Unified Architecture, welche sowohl der Anforderung einer Kommunikationsinfrastruktur als auch der Anforderung der Spezifikation eines Informations-Metamodells nachkommt [13]. Die Kommunikationsinfrastruktur basiert auf dem Server-Client Prinzip und ermöglicht sowohl die Änderung der Struktur des Adressraumes, was durch das sich ständig im Wandel befindende CPS wichtig ist, als auch den Lese- und Schreibzugriff auf Daten und historische Ereignisse [13]. Für die Informationsmodelle können domänenspezifische Profile in das OPC UA Informationsmodell eingebunden werden. Für die Gerätebeschreibung wird der Field Device Integration (FDI) Standard als Profil integriert, welcher die Electronic Device Description Language (EDDL) und die Field Device Tool (FDT) Beschreibungen zusammenführt [13]. Auf dem Bereich der Engineering-Werkzeuge bietet AutomationML einen vielversprechenden Ansatz [8]. Die AutomationML wird derzeit zunehmend weiter spezifiziert und standardisiert und bietet durch die Einbindung weiterer XML-basierter Standards, wie COLLADA für die geometrische Beschreibung und PLCopen für die Beschreibung des Verhaltens, bereits weitreichende Möglichkeiten einen semantischen und syntaktischen Konsens zur Beschreibung von Engineering-Dokumenten zu finden. Die Standardisierung der semantischen Beschreibungen weiterer Informationsmodelle ermöglicht außerdem die Anwendung formaler Methoden, wie beispielsweise die von Estévez et al. vorgeschlagene Definition von Regeln durch MathML und die Überprüfung ihrer Einhaltung an verschiedenen XML-basierten Modellen [14].

Eine weitere wichtige Voraussetzung für CPS in der Automatisierung ist der Ausbau und die Nutzung von

Entwicklungs- und Betreiberplattformen. Gerade die Offenheit bzw. Datendurchgängigkeit von CPS wird als großes Risiko bezüglich der Anlagen-Security angesehen (B1a). Dieses Risiko ist bisher durch andere Betriebssysteme und fehlende Internetanschlüsse verringert worden.

Durch die Vernetzung und Nutzung von Clouds und Multicore Architekturen und die sich daraus ergebende gemeinsame Nutzung von Ressourcen und offenen Schnittstellen entstehen zahlreiche Sicherheitsrisiken, die bisher durch die Abschirmung der Anlagen und Nutzung proprietärer Schnittstellen weitestgehend nicht vorhanden sind [15]. Voraussetzung für die Einführung von CPS in der Industrie sind folglich Strategien zur Sicherung von Engineering Know-How und die Verhinderung von Angriffen von außen.

#### 4.3 Zusammenfassung der besonderen Anforderungen der Automatisierungstechnik an CPS

Die Besonderheiten beim Einsatz von CPS in der Anlagenautomatisierung sind die zu erfüllenden Anforderungen an die Automatisierungsplattform bzw. ggf. deren schrittweise Ablösung. Unter der Annahme das Technologien aus den Consumer Electronics, wie eingangs beschrieben, nicht nur in die Produktautomatisierung und unkritische Bereiche der Anlagenautomatisierung Einzug halten, sind diese Technologien und Methoden auf die Domänenanforderungen, insbesondere der in Kapitel 2.4 beschriebenen Anforderungen der Plattformen, wie der zeitlichen Funktionsausführung (T1), anzupassen. Beim Einsatz solcher schnelllebigen Geräte und sich permanent weiter entwickelnden Software wird die notwendige Versionspflege, Validierbarkeit und Stabilität der Anlagen durch externe, für die Anlage nicht notwendige und auch nicht vorteilhafte, Einflüsse gefährdet. Die Gefährdung der Anlagenstabilität kann erhebliche schädliche Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt haben. Wie solche Technologien dennoch sinnvoll und beherrschbar eingesetzt werden können, bleibt zu erfordern.

#### 5 Interdisziplinäre offene Forschungsfragen

Informatikmethoden werden bereits partiell in der Automatisierungstechnik eingesetzt. Im Zuge der Durchdringung von CPS wird sich dieser Einsatz verändern bzw. erweitern. Für den erfolgreichen Einsatz der Informatikmethoden in der Automatisierungstechnik ist die Adaption auf die Domäne eine Voraussetzung.

Für die Diagnose müssen beispielsweise Data Mining-Ansätze für die Automatisierungstechnik umgesetzt werden. Ein Ansatz wird in [16] vorgestellt, bei dem mit Hilfe einer formalen Analyse und durch Mustererkennung häufig wiederkehrende Meldungsmuster in den aufgezeichneten Alarmdaten gefunden werden konnten. Auch die Schnittstellenbeschreibung von adaptiven Systemen und die Identifikation des Systemzustands aufgrund

des Modellwissens und dem Data Mining, der Analyse und der Mustererkennung von Prozess- und Meldedaten und die Informationsanalyse bietet erhebliches Potential in der AT.

Weitere Beispiele sind serviceorientierte und agentenorientierte Ansätze, welche Datenkapselung nutzen und Adaptivität zur Laufzeit erlauben sowie Ontologien, welche das Auffinden ähnlicher Funktionen unterstützen.

Vielversprechende Ansätze sind weiterhin bei der Entwicklung von Methoden zum Lernen, z. B. mit Hilfe von Agenten und idealerweise zur Laufzeit bzw. mit Algorithmen, die zur Laufzeit anwendbar sind, zu finden.

Andere wichtige Forschungsfelder sind Techniken zur Kopplung von Datenmodellen proprietärer Werkzeuge für verschiedene Phasen und Disziplinen. Bei diesen sind jedoch auch noch Änderungen zu erwarten, da im Zuge der Einführung von CPS neue funktionsorientierte Modellierungsansätze, also die Kapselung von Steuerungsfunktionalität und deren dafür notwendige Hardwarekomponenten, sowie damit verbunden eine Beschreibung vonnöten sind. Erste Ansätze, die solche Modellierungsansätze entwickeln sind bereits in der Forschung in der AT angekommen und ermöglichen in Verbindung mit Informationen wann entsprechende Funktionen durch ein CPS realisiert werden kann eine Verbesserung der Wandlungsfähigkeit von Fertigungssystemen [17].

Diese Vorarbeiten können als Basis für die Umsetzung von CPS in der Anlagenautomatisierung dienen. Auch für die weitere Entwicklung der CPS ist eine weitere Anwendung und Durchdringung von IT-Technologien in der Automatisierungstechnik zu erwarten.

Die AT verfügt über eine jahrzehntelange Erfahrung im modellbasierten Entwurf und Betrieb automatisierter Produkte und Anlagen unter Einbeziehung der technischen Prozesse und technischen Systeme und kennt die Grenzen der Abstraktion solcher Systeme. Hiervon kann sicherlich die Informatik profitieren.

#### Literatur

- [1] F. Jammes, B. Bony, P. Nappey, A. W. Colombo, J. Delsing, J. Eliasson, R. Kyusakov, S. Karnouskos, P. Stluka, und M. Tilly: Technologies for SOA-based Distributed Large Scale Process Monitoring and Control Systems. – In: IECON (2012), S. 5083–5808.
- [2] M. Broy (Hrsg.): Cyber-Physical Systems. Innovation durch Software-Intensive Eingebettete Systeme. acatech diskutiert. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2010.
- [3] B. Vogel-Heuser, G. Kegel, K. Bender und K. Wucherer: Global Information Architecture for Industrial Automation. – In: atp – Automatisierungstechnische Praxis 51 (atp) (2009) Nr. 1, S. 108–115.
- [4] B. Vogel-Heuser, C. Diedrich, A. Fay und P. Göhner: Anforderungen an das Software-Engineering in der Automatisierungstechnik. – In: Software Engineering Kongress (2012), S. 51–66.
- [5] M. Roth: Identification of Fault Diagnosis of Industrial Closed-Loop Discrete Event Systems. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern 2005.
- [6] ZVEI e. V.: Life-Cycle-Management für Produkte und Systeme der Automation. ZVEI Automation, Frankfurt, 2010.

- [7] F. Li, G. Bayrak, K. Kernschmidt und B. Vogel-Heuser: Specification of the Requirements to Support Information Technology-Cycles in the Machine and Plant Manufacturing Industry. – In: 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (2012), S. 482–487.
- [8] T. Jäger, L. Christiansen, M. Strube und A. Fay: Durchgängige Werkzeugunterstützung von Anforderungserhebung bis zur Anlagenstrukturbeschreibung mittels formalisierter Prozessbeschreibung und AutomationML. – In: 11. Fachtagung zu dem Entwurf komplexer Automatisierungssysteme (EKA) (2012), S. 239–252.
- [9] M. Rauscher und P. Göhner: Konsistenzprüfung im frühen mechatronischen Entwurf. – In: at – Automatisierungstechnik, 61 (2013) Nr. 2, S. 109–113.
- [10] D. Schütz, A. Wannagat, C. Legat und B. Vogel-Heuser: Development of PLC-based software for increasing the dependability of production automation systems. – Akzeptierter Beitrag in: IEEE Transactions on Industrial Informatics, IEEE, 2012, doi: 10.1109/TII.2012.2229285.
- [11] C. Diedrich: Feldgeräte-Instrumentierungstechnologien – Integration intelligenter Feldgeräte in PLS. – In: Handbuch der Prozessautomatisierung, Oldenbourg Industrieverlag, München 2009, S. 290–322.
- [12] H. Kühnle: Distributed Manufacturing: Paradigms, Concepts, Solutions and Examples. Springer, London 2010.
- [13] U. Enste und W. Mahnke: OPC Unified Architecture, – In: at – Automatisierungstechnik 59 (2011), Nr. 7, S. 397–404.
- [14] E. Estévez und M. Marcos: Model-Based Validation of Industrial Control Systems. – In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 8 (2012), Nr. 2, S. 302–310.
- [15] C. Eckert und T. Kittel: Sicherheitsaspekte von Multicore Architekturen am Beispiel Automotive. – In: it – Information Technology 55 (2013), Nr. 1, S. 5–9.
- [16] J. Folmer und B. Vogel-Heuser: Computing Dependent Industrial Alarms for Alarm Flood Reduction. – In: 9th IEEE Conference on Systems, Analysis and Automatic Control (2012), S. 1–6.
- [17] C. Legat, D. Schütz und B. Vogel-Heuser: Automatic generation of field control strategies for supporting (re-)engineering of manufacturing systems. – In: Journal of Intelligent Manufacturing, Springer, 2013, S. 1–11.

Manuskripteingang: 21. Dezember 2012



**Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser** leitet seit 2009 den Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme (AIS) der Technischen Universität München. Ihre Arbeitsgebiete umfassen die System- und Softwareentwicklung, insbesondere die Modellierung verteilter, verlässlicher eingebetteter Systeme.

Adresse: TU München, Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching bei München, Tel.: +49 89-289 16400, Fax: +49 89-28916410, E-Mail: [vogel-heuser@ais.mw.tum.de](mailto:vogel-heuser@ais.mw.tum.de)



**Prof. Dr.-Ing. Christian Diedrich** ist seit 1992 am Institut für Automation und Kommunikation (ifak) e. V. Magdeburg als Bereichsleiter und stellvertretender Institutsleiter tätig. Seit 2006 leitet er den Lehrstuhl „Integrierte Automation“ und ist geschäftsführender Leiter des Instituts für Automatisierungstechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Adresse: Institut für Automatisierungstechnik (IFAT), 39106 Magdeburg, Gebäude 05, Universitätsplatz 2, G05-15, Tel.: +49 391-67-18499, Fax: +49 391-67-11186, E-Mail: [christian.diedrich@ovgu.de](mailto:christian.diedrich@ovgu.de)



**Prof. Manfred Broy** ist seit 1989 Ordinarius für Informatik an der TUM. Und Gründungsdekan der Fakultät für Informatik der TUM. Er forscht auf dem Gebiet der Modellierung und Entwicklung komplexer softwareintensiver Systeme auf wissenschaftlicher Grundlage.

Adresse: TU München, Institut für Informatik, Boltzmannstr. 3, 85748 Garching, Tel.: +49 89-289-17304, Fax: +49(89)289-17307, E-Mail: [broy@in.tum.de](mailto:broy@in.tum.de)