

# Flexibles Management einer dezentralen Automatisierungsverbundanlage als Beispiel für Industrie 4.0

Aspekte der Systemmodellierung und dezentralen Architektur

Prof. Dr.-Ing. **Michael Weyrich**, Institut für Automatisierungs- und  
Softwaretechnik, Universität Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. **Christian Diedrich**, Institut für Automatisierungstechnik,  
Otto-von-Guericke-Univ. Magdeburg

Prof. Dr.-Ing. **Alexander Fay**, Institut für Automatisierungstechnik,  
Helmut-Schmidt-Universität Hamburg

Prof. Dr.-Ing. habil. **Martin Wollschlaeger**, Professur für  
Prozesskommunikation, Technische Univ. Dresden

Prof. Dr.-Ing. **Stefan Kowalewski**, Software für eingebettete Systeme,  
RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. **Peter Göhner**, Institut für Automatisierungs- und  
Softwaretechnik, Univ. Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. **Birgit Vogel-Heuser**, Automatisierung und  
Informationssysteme, Technische Univ. München

## **Kurzfassung**

Das Thema Industrie 4.0 verspricht umwälzende Veränderungen in der automatisierten Fertigung, der Produktionsorganisation und den Prozessen in der Industrie.

Anhand einer automatisierungstechnischen Verbundanlage im Sinne eines Zusammenschlusses von Teilanlagen der beteiligten Institute werden Potentiale von Industrie 4.0 aufgezeigt und in Bezug auf die Automatisierungstechnologien diskutiert. Anhand des Anlagenverbundes werden insbesondere Aspekte des Managements von Flexibilität sowie die Möglichkeiten des Informationsaustausches aufgrund von Dezentralität und Vernetzung verdeutlicht.

## **Abstract**

Industrie 4.0 promises revolutionary change in the automated manufacturing, production organisation and in industrial processes.

The potentials of Industry 4.0 will be demonstrated and discussed in terms of automation technologies on the basis of an integration of the distributed facilities of the institutes. Concepts for managing flexibility and communication will be elucidated on that basis of the manufacturing systems which are decentralised and networked.

## **1. Einleitung und Motivation**

Das flexible Management von Produktionsanlagen ist ein zentrales Thema der Automatisierungstechnik. Schneller neue Produkte am Markt zu platzieren, Produktionsanlagen optimal auslasten, Spitzenlasten bei der Produktion abfedern oder Schwierigkeiten in den Zulieferketten rasch begegnen zu können sind wichtige Anforderungen an die Produktion, die erfolgskritisch für die Zukunft ganzer Industriestandorte sein können. Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten befasst sich daher seit Dekaden mit Themen der Flexibilisierung bzw. mit der Erhöhung der Agilität von Produktionssystemen aus den unterschiedlichen Perspektiven des Produktionsmanagements, der Automatisierungstechnik und des Maschinenbaus.

Die neuen technologischen Möglichkeiten wie ad-hoc Vernetzung und intelligente Steuerungen, die unter den Schlagworten Industrie 4.0 mit Hilfe von Cyber-Physischen Systemen (CPS) subsumiert werden, bieten viele Chancen. Eine Zukunftsaufgabe ist es, Produktionsmaschinen, Betriebsmittel, Logistik im Sinne einer Industrie 4.0 zu organisieren [1]. Daher entstand die Idee, anhand des Zusammenschlusses der einzelnen Automatisierungsanlagen der Institute der Autoren typische Szenarien von Industrie 4.0 aufzuzeigen.

## **2. Ansatz der Automatisierungsverbundanlage für Industrie 4.0**

Um die Herausforderungen und den Nutzen von Industrie 4.0 zu demonstrieren, sollen die damit verbundenen Verfahren und Konzepte der Automatisierungstechnik am Beispiel der Individualproduktion vorgestellt werden [2, 6]. Auf dieser Basis sollen Kopplungsansätze, Datenmodellierung, dezentrale Steuerung sowie die interaktive Zuteilung automatischer Teilanlagen diskutiert werden [5, 7].

### **2.1 Szenarien der Anwendung**

Im Anwendungsszenario kann ein Kunde ein konfigurierbares Produkt – einen Joghurt in verschiedenen Geschmacksvariationen – bestellen. Dieser Auftrag wird dann auf den unterschiedlichen Anlagen des Verbundes an den beteiligten Universitätsinstituten dezentral und über Deutschland verteilt produziert. Dabei dient das Konzept von Joghurt, der individuell und auf Kundenwunsch produziert wird, als Musterbeispiel für kundenindividuelle, den rasch sich ändernden Wünschen des Marktes sich anpassende Produktion und verfolgt keineswegs den Anspruch auf eine verfahrenstechnische Umsetzung, sondern dient als Szenario, um die Möglichkeiten der Automatisierungstechnik aufzuzeigen.

## 2.2 Die dezentrale Verbundanlage

Die Verbundanlage besteht aus einzelnen Produktionsanlagen, die in den Laboren der Institute bereits existieren. Bild 1 zeigt den entstehenden Produktionsverbund sowie den Informationsfluss zwischen den Systemen.

Dabei sind die Anlagen bzw. Teilanlagen mit unterschiedlichster Steuerungstechnik versehen, wie z. B. SPS, Mikrokontroller oder Industrie-PC.

Alle Anlagen sind mit dem Internet verbunden und können miteinander kommunizieren. Auch die Unterstützung des Betriebspersonals durch Informationsaufbereitung und der Einsatz von Apps sind mit diesem Ansatz möglich.

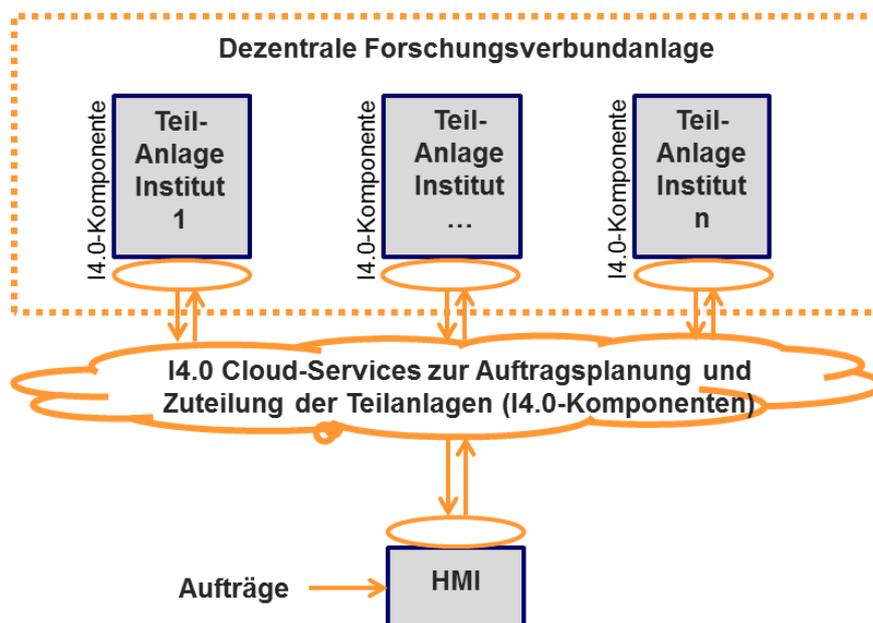


Bild 1 - Konzept des informationstechnischen Zusammenschluss einzelner Anlagen zu einem virtuellen Produktionsverbund

Es ist das Ziel, bestehende Anlagen weiter zu verwenden und diese auf der Feldebene nicht umzubauen, sondern diese Teilanlagen quasi zu kapseln und so in den Industrie-4.0-Verbund einzufügen. Eine Neukonzeption der Teilanlagen, z. B. auf Basis von einheitlichen Standards, ist nicht vorgesehen. Auf diese Weise soll eine einfache Integration bestehender Teilanlagen im Sinne von Industrie-4.0-Komponenten ermöglicht werden.

## 2.3 Anforderungen an die Automatisierungstechnik

Aus Sicht des Produktionsszenarios bestehen eine Reihe von Anforderungen an die Automatisierungstechnologie. Dabei sind die Kernanforderungen, die in einem ersten Schritt realisiert werden müssen, folgende:

Anforderung 1: Einfache Vergabe des Auftrages für eine bestimmte Produktkonfiguration und Menge per Handy-App oder Internet.

Anforderung 2: Automatische Auftragsplanung und Zuteilung der geeigneten Anlage, möglichst ohne manuelle Koordination eines Produktionsplaners

Auch der verteilte Anlagen-Verbund sollte einfach konfigurierbar sein. Benötigt wird daher ein flexibles und möglichst offenes Planungssystem zur Verwaltung der Produktionsanlagen, die ihre aktuelle Kapazität anbieten, da diese ggf. kurzfristig aufgrund anderer Aufträge belegt sein könnten.

Anforderung 3: Einfaches An- und Abmelden von Produktionsanlagen und deren Kapazität im Gesamtsystem.

Bei der Planung der jeweiligen Produktion, also dem Scheduling von Aufträgen, ergibt sich eine weitere Anforderung:

Anforderung 4: Möglichkeit der Berücksichtigung von besonderen Kriterien wie Energieverbrauch von Anlagen, Wegstrecken in der Logistik etc. bei der Produktionsplanung.

Auch kann es notwendig werden, bereits zugewiesene Aufträge durch die Anlagen direkt weiter- bzw. unterzuvergeben, um z. B. unmittelbar auf Störungen reagieren zu können. Dabei kann die Auftragsvergabe durchaus auf gleicher Ebene erfolgen oder als teilweise Untervergabe ausgeführt werden. Diese Vergabe sollte bilateral über die Industrie 4.0-Cloud ausgehandelt werden, ohne die anderen Teilnehmer behelligen zu müssen.

Anforderung 5: Möglichkeit der Bildung von Produktionsclustern mit autarkem Auftragsmanagement und der Möglichkeit der Untervergabe.

Nicht zuletzt ist eine Anforderung zur Betriebssicherheit der Kommunikation wichtig, die die Zuverlässigkeit des Kommunikationsprozesses betrifft.

Anforderung 6: Falls die Internetverbindung kurzzeitig nicht verfügbar ist bzw. unterbrochen wird, so dürfen keine Planungsinformationen verloren gehen.

Weitere Anforderungen wie die einfache Bedienbarkeit durch Anwender, Möglichkeiten der Diagnose oder Anforderungen an die IT-Sicherheit sind ebenfalls relevant, werden aber hier nicht betrachtet.

### 3 Konzeption

#### 3.1 Systemmodellierung

Die Modellierung der Verbundanlage soll mit den Konzepten der VDI-Richtlinie 3682 beschrieben werden. Hierbei entspricht es dem Stand der Technik, den Prozess formalisiert in die Bestandteile Produkt, Prozess und Ressourcen zu untergliedern. Diese sogenannte PPR-Methodik bildet die Basis für eine Vielzahl von industriellen Planungssystemen.

Dabei erfolgt die Prozessbeschreibung der folgenden Einteilung: Produkt (P), Prozesse bzw. Prozessoperatoren (O), Technische Ressource (T) sowie Bilanzgrenze (B).

Im Rahmen des Produktionsbeispiels zeigt Bild 2 die einzelnen Vor- und Zwischenprodukte des Joghurts wie Geschmackstoffe oder Verpackungsmaterialien, die mit P1 bis P8 gekennzeichnet sind. Diese Produkte werden in den einzelnen Prozessstufen O11 bis O14 im Sinne der Herstellung bzw. Veredelung oder der Fertigung von Verpackungen und der Gravur der Deckel produziert. Diese einzelnen Produktionsschritte unterliegen jedoch Restriktionen in Bezug auf die Reihenfolge der Produktion bzw. müssen unmittelbar zusammenhängend in einzelnen Chargen (Batches) erfolgen. So kann natürlich die Veredelung mit Früchten erst erfolgen, wenn der Joghurt hergestellt wurde, und die Abfüllung des Joghurts sollte in einem Verfahrensschritt erfolgen.

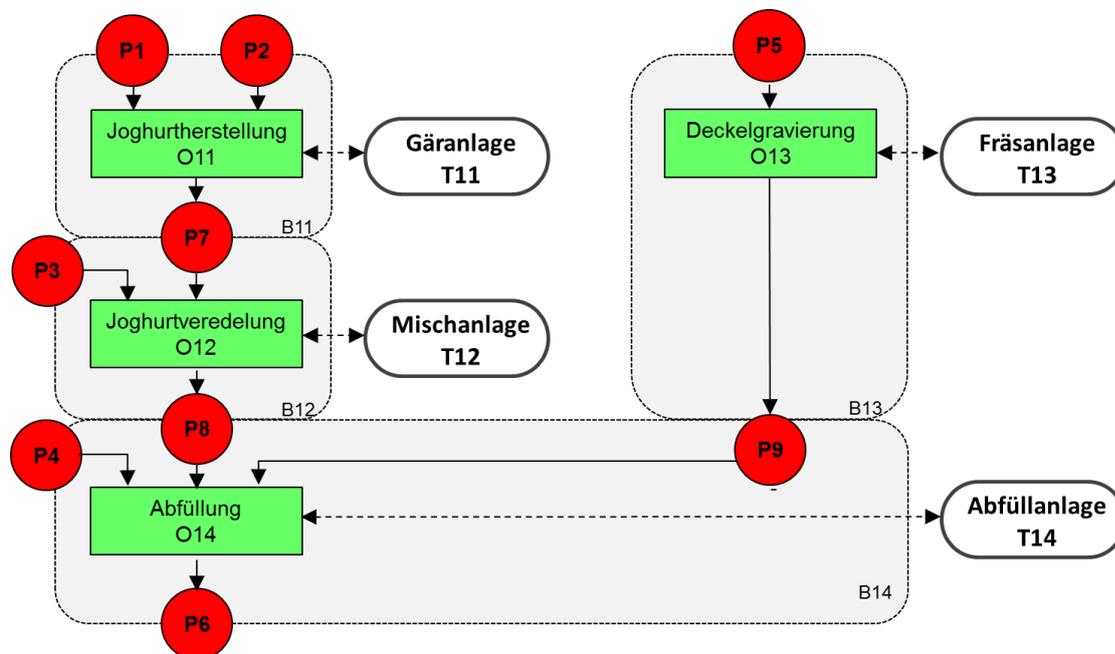


Bild 2 - PPR Model der Verbundanlage

Mit Blick auf Bild 1 sind P1 und P2 Vorprodukte für P7. Allerdings kann P8 erst nach Verfügbarkeit von P7 durch Zugabe von P3 produziert werden. Unabhängig davon ist die Produktion von P9, die parallel, davor oder danach erfolgen kann.

Reihenfolgerestriktionen sind besonders bei der Verteilung der Prozesse auf die Ressourcen zu beachten. Beim sogenannten Scheduling, also dem Einplanen von konkreten Produktionsaufträgen auf Produktionsanlagen, müssen zudem auch weitere Aspekte (z. B. die Logistik) berücksichtigt werden.

Für einfache Produktionsprozesse sind diese Zuteilungen u. U. sehr einfache direkte Relationen: So kann die Herstellung des Joghurts aufgrund von Ressourcenverfügbarkeiten womöglich nur auf einer bestimmten Produktionsanlage erfolgen. Mit einer zunehmenden Verfügbarkeit von redundanten Ressourcen ergeben sich unterschiedliche Varianten für den Produktionsprozess. Aufgrund von konkurrierenden Produktaufträgen ergeben sich jedoch rasch komplexe Planungsaufgaben, die zudem mit einer Vielzahl von Restriktionen versehen sein können, die die Zuteilung von Prozessen komplex macht, da die Frage ist, wann welche Teilanlage gewählt werden soll.

### 3.2 Auswahl von Teilanlagen

Die einzelnen Teilanlagen stehen über Deutschland verteilt zur Verfügung und bieten ihr Leistungsspektrum in einem virtuellen Marktplatz an.

Bild 3a zeigt die Grundstruktur, die als Stern organisiert die einzelnen Anlagenkomponenten zentral verwaltet. Im Mittelpunkt steht der Marktplatz, in dem sich alle beteiligten Teilanlagen listen lassen können. Die Anlagen sind dabei sehr unterschiedlich und erlauben die Realisierung unterschiedlicher Prozesse oder können auch identische Prozessschritte redundant abdecken, wenn sie an einer Auftragsvergabe teilnehmen. Auf dem Marktplatz sind somit alle Teilanlagen bekannt, wobei jeder Teilanlage ein Leistungsprofil zugeordnet ist, in dem die möglichen Fähigkeiten bzw. Dienste beschrieben sind.

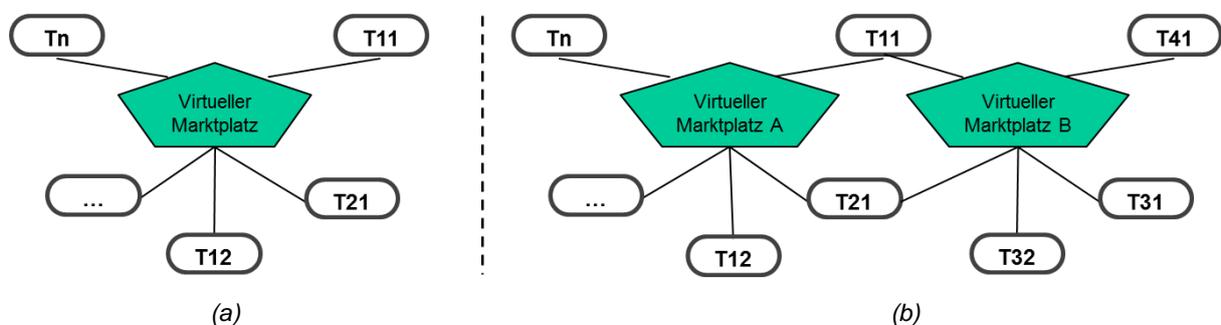


Bild 3 - Virtueller Marktplatz der Ressourcen

(a) Zentraler Marktplatz mit Ressourcen; (b) Unterschiedliche Marktplätze mit geteilten Ressourcen

Erfolgt nun eine Anfrage bzgl. der Herstellung einer Charge eines Produkts, so wird zunächst anhand des Leistungsprofils geprüft, welche Teilanlagen diese Aufgabe ausführen könnten. Sobald entsprechende Teilanlagen identifiziert wurden, muss eine konkrete Anfrage erfolgen, ob bzw. wann die Teilanlage auch tatsächlich zur Verfügung steht, da diese beispielsweise durch Wartungsarbeiten außer Betrieb sein könnte.

Bild 3b visualisiert ein Konzept, in dem zwei Marktplätze vorhanden sind, die teilweise dieselben Ressourcen gelistet haben. Solche Konzepte sind praktikabel, da es aus Sicht des einzelnen Anlagenbetreibers sinnvoll ist, um ihre Anlagen möglichst komplett auszulasten. Mit Blick auf einen einzelnen Marktplatz wäre es womöglich sonst nicht möglich, die Teilanlagen vollständig auszulasten, da die Kapazität gar nicht vollständig gebraucht wird. Das Spektrum der Aufträge und die Verfügbarkeit der Teilanlagen entscheiden über die tatsächliche Belegung der Teilanlagen.

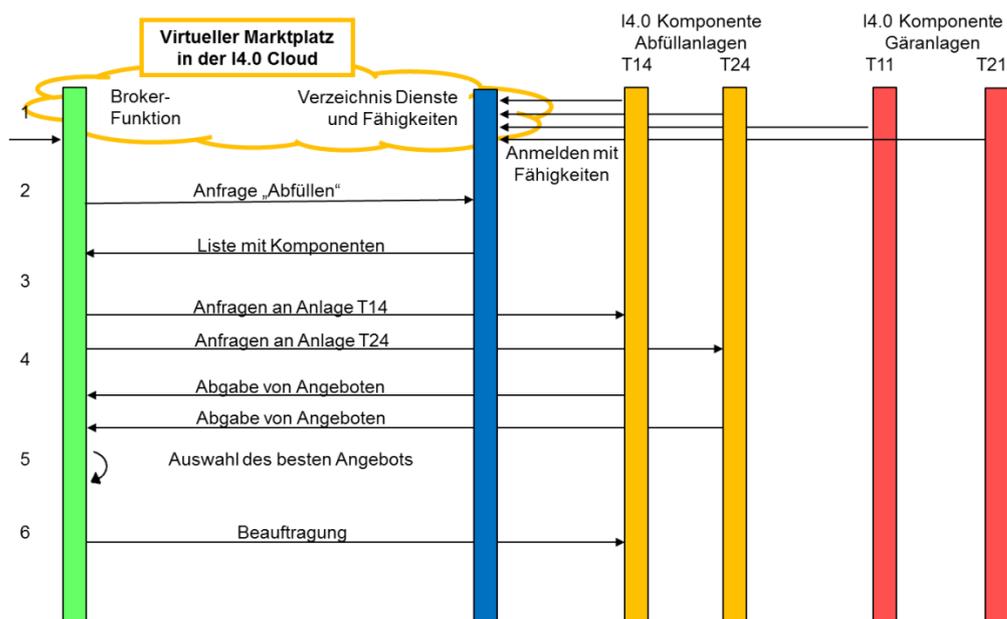


Bild 4 - Kommunikationszyklus zur Belegung

In Bild 4 wird der Anmelde- und Anfrageprozess für die vier Teilanlagen T14, T24, T11, T21 an einem Marktplatz dargestellt. Dabei werden zwei Hauptfunktionen unterschieden, die am Marktplatz ausgeführt werden: Zum einen die Funktion, die Leistungen im Sinne von Fähigkeiten oder Diensten zu listen, d. h. ein Verzeichnis zu erstellen, in dem alle technischen Möglichkeiten der Teilanlage bzw. Industrie-4.0-Komponente dokumentiert sind. Zum anderen

der Vorgang eines Auftragsvermittlers (Brokers), der Anfragen stellt, Angebote dazu erhält und dann schließlich die Wahl der Beauftragung trifft.

Der Kommunikationszyklus am Marktplatz sieht wie folgt aus: In einem ersten Schritt melden sich alle Teilanlagen in einem Verzeichnis der Dienste und Fähigkeiten an. In einem zweiten Schritt kommt eine Vermittler, d. h. eine Brokerfunktion zum Zuge, die ermittelt, welche Industrie-4.0-Komponenten bzw. Teilanlagen geeignet sind. Im Schritt 3 und 4 werden diese Komponenten zunächst um ein Angebot gebeten, das dann durch die jeweiligen Industrie-4.0-Komponenten abgegeben wird.

Schließlich erfolgt in Schritt 5 die Auswahl des Angebots, das dann abschließend (Schritt 6) beauftragt wird.

Dieses Vorgehen mit einer zentralen Stellung Marktplatz in einer Stern-Struktur bzw. Mehrstern-Struktur hat Realisierungsvorteile, da jeweils nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zum Marktplatz aufgebaut werden müssen und jeder Marktplatz über eine zentrale Prozessplanung und Steuerung verfügt.

Allerdings müssen im Zentrum des Sterns immer alle Informationen vorliegen. Dies hat Nachteile im Sinne der Informations- als auch der Ausfallsicherheit.

Es besteht die Möglichkeit, weitere Kommunikationskanäle auch zwischen den einzelnen beteiligten Ressourcen herzustellen, wenn es um die Untervergabe von Aufträgen oder die Abgabe von aggregierten Angeboten geht. Beispielsweise kann im Fall einer Störung einer Industrie-4.0-Komponente eine andere Industrie-4.0-Komponente unterbeauftragt oder informiert werden, ohne sich erneut an den zentralen Marktplatz wenden zu müssen. Offensichtlich wird auf diese Weise Flexibilität aufgrund der Möglichkeit von Nebenabreden zwischen einzelnen Industrie-4.0-Komponenten gewonnen.

Bild 5 zeigt eine solche Struktur, in der auch zwischen einzelnen Industrie-4.0-Komponenten direkte Kommunikation stattfindet.

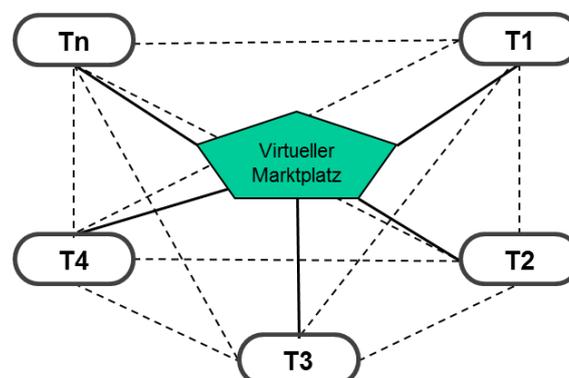


Bild 5 - Systemtopologie mit Verbindung der Ressourcen untereinander und zentralem Marktplatz

Allerdings wirft eine solche Kommunikationsstruktur Fragen in Bezug auf die Koordination der einzelnen Industrie-4.0-Komponenten auf, bei der die Rollen der Kommunikationspartner und womöglich Hierarchien definiert werden müssen.

Zudem besteht die Möglichkeit, in einem hoch-vernetzten Szenario quasi in jedem Knoten einen virtuellen Marktplatz zu duplizieren, wodurch ein z. B. sehr ausfallsicheres System entsteht, aber ein Synchronisationsmechanismus notwendig wird.

Die Wahl der Architektur ist vom Use Case der Anwendung abhängig: So können Daten lokal verwaltet werden, um den Zugriff durch andere zu verhindern. Oder es kann ein robustes System erstellt werden, dessen Funktion auch beim Ausfall aufgrund von Redundanz weiterarbeitet.

### **3.3 Kommunikationsarchitekturen**

Die Kommunikation zwischen den Teilsystemen kann auf Basis unterschiedlicher Konzepte aufgebaut werden. Die Kommunikationsanbindung einzelner Systeme bzw. Industrie-4.0-Komponenten kann heute mit Hilfe unterschiedlicher Infrastruktur erfolgen. Es existieren auf einer syntaktischen Ebene bereits Standards und Verfahren zur Nachrichtenübermittlung. Allerdings ist bei der Auswahl eine Vielzahl von Rahmenbedingungen zu bedenken:

*Kommunikationsgeschwindigkeit:* Die Verzugszeit, mit der Informationen von Sender zu Empfänger übertragen werden müssen, kann stark variieren. Handelt es sich wie in diesem Fall um den Austausch von leittechnischen Informationen, so sind Antwortzeiten im Bereich von Sekunden oder Millisekunden üblich. Hingegen unterlägen Maschinensteuerungen und Antriebsregelungen harten Echtzeitanforderungen im Millisekunden-Bereich, was aufgrund der Anlagenstruktur hier so nicht gegeben ist.

*Übertragungsrate:* Auch die Länge der zu übertragenden Botschaft kann unterschiedlich sein und ist grundsätzlich bei der Auswahl des Übertragungsprotokolls zu beachten. Allerdings ist der Übertragungsrate im Beispiel der Verbundanlage und den dort herrschenden zeitlichen Rahmenbedingungen nicht von zentraler Bedeutung.

*Kapselung von Informationen:* Einzelne Informationen lassen sich je nach Anwendung zu einem Portfolio aus Services zusammenfassen. Diese sog. Orchestrierung im Sinne einer Service-orientierten Architektur (SOA) ist dabei abhängig von der Art der Anwendung und den sinnvollen Möglichkeiten der Bündelung von Diensten.

*Zuverlässigkeit der Übermittlung:* Insbesondere bei der Übermittlung über Medien wie das Internet kann nicht immer davon ausgegangen werden, dass alle Informationen vom Sender zum Empfänger gelangen. Um sicherzustellen, dass alle gesendeten Nachrichten auch

tatsächlich ankommen, können sog. Messaging-Systeme zum Einsatz gebracht werden, die die Zustellung einer Nachricht sicherstellen.

*Einheitliche Architektur:* Ideal ist, ein einheitliches Systemprotokoll im Sinne von OPC-UA (Unified Architecture) zu nutzen, um einen möglichst strukturierten Austausch von Informationen sicherzustellen, d. h. nicht nur Daten zu übertragen, sondern auch maschinenlesbar semantische Informationen zu übermitteln.

Zudem gibt es Möglichkeiten, mit Hilfe einer *Agentenbasierten Architektur* dezentrale Systeme zu steuern. Solche Agentensysteme bieten die Chance, dezentral organisierte Steuerungen bzw. Optimierungen aufzubauen. Hierzu gibt es Standards der FIPA, die die Kommunikation zwischen Agenten regeln.

Neben technischen Überlegungen in Bezug auf die grundsätzlichen Fähigkeiten sind auch Realisierungsaspekte von Bedeutung, da die Standards und Verfahren einen unterschiedlichen Reifegrad erreicht und unterschiedliche Verbreitung in der Praxis gefunden haben.

## **4 Realisierung**

Zur Realisierung der Verbundanlage wurden solche Verfahren ausgewählt, die unmittelbar umsetzbar sind. Die bestehenden Teilsysteme sollen als Industrie-4.0-Komponenten im Verbund sichtbar werden, um diese unmittelbar in eine Industrie-4.0-Gesamt-Architektur zu integrieren.

### **4.1 Realisierung mit Agentensystem**

Um die sehr unterschiedlichen Anlagen in den Verbund flexibel einzubinden, kommt ein Agentensystem zum Einsatz.

Agenten sind dynamische und gekapselte Module, die mit anderen Agenten und ihrer Umgebung interagieren können. Dabei verfolgen die Agenten eigene Ziele und haben Handlungsoptionen zur Verfügung, wodurch ein autonomes Verhalten entsteht. Somit bringt der Ansatz der Agentensysteme viele Voraussetzungen zur Realisierung komplexer Kommunikationsstrukturen, bei denen die Teilnehmer unterschiedliche Rollen haben, mit.

In Bild 6 ist die Topologie des verwendeten Agentensystems dargestellt.

Einzelne Anlagen werden durch Agenten vertreten, die diese nach innen kapseln, um dann eine einheitliche Schnittstelle nach außen als Industrie-4.0-Komponente darzustellen. In der sog. Industrie-4.0-Cloud sind alle wichtigen Informationen zu den beteiligten Agenten, den Fähigkeiten und Dienstangeboten der Komponenten verzeichnet sind. Die Kommunikation

zwischen den Agenten ist abhängig von der Aufgabe, welche diese erfüllen sollen, und den Fähigkeiten der einzelnen Agenten.

Innerhalb des Verbundes gibt es verschiedene Agententypen, die unterschiedliche Ziele verfolgen und Aufgaben wahrnehmen:

*Anlagenagent:* Dieser repräsentiert die jeweilige automatisierte Maschine oder Teilanlage im Verbund über eine einheitliche Schnittstelle. Jeder dieser Agenten verfügt über eine spezifische Verbindung zu dem von ihm vertretenen automatisierten System nach innen und vertritt diese als Industrie-4.0-Komponente und deren Ziele im Verbund. Zur Repräsentation der Industrie-4.0-Komponente verfügen die Agenten über die Informationen, über welche Fähigkeiten das System verfügt bzw. welche Aufgaben es erledigen kann. Ziele könnten z. B. die maximale Auslastung oder die Belegung zu ganz bestimmten Zeitpunkten sein.

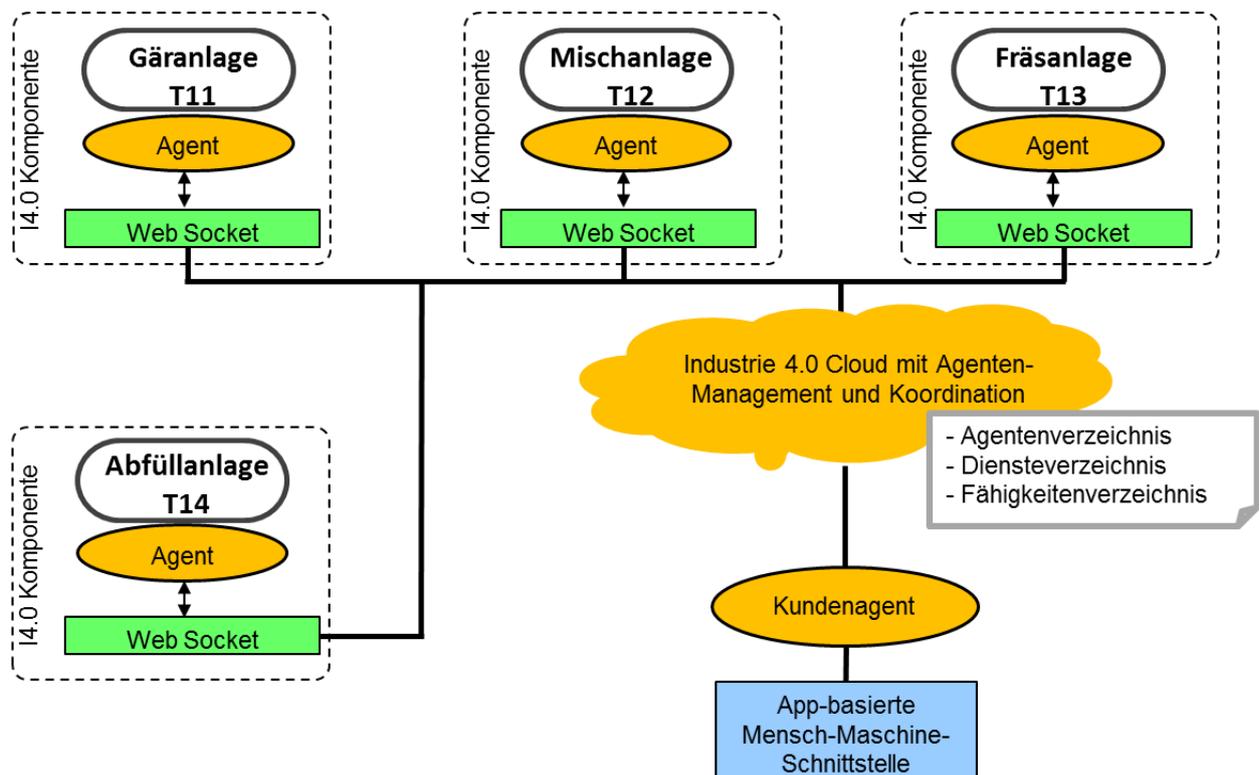


Bild 6 - Agententopologie der Verbundanlage

Benötigt ein Agent des Verbundes eine besondere Fähigkeit einer anderen Industrie-4.0-Komponente, so verhandeln diese Agenten untereinander. Ziel der Verhandlung ist es, eine für beide Seiten möglichst optimale Lösung, unter Berücksichtigung der Fähigkeiten und Randbedingungen der Einzelsysteme, zu finden.

*Koordinationsagent:* Die Aufgabe dieser Agenten ist die Koordination komplizierterer Abläufe innerhalb des Verbundes, welche nicht von einem einzelnen System im Sinne einer bilateralen Kommunikation durchgeführt werden können. Die Koordination der Produktion des Joghurts im Verbund durch einen Broker auf dem virtuellen Marktplatz ist eine solche Aufgabe.

Dabei müssen die verschiedenen Arbeitsschritte organisiert werden und aufeinander abgestimmt werden. Dazu erfragt der Koordinationsagent bei der Industrie-4.0-Cloud, welche Agenten die benötigten Fähigkeiten anbieten, und verhandelt anschließend mit diesen Agenten die Bedingungen für die Durchführung der Produktion.

*Kundenagent:* Dieser Agent stellt die Schnittstelle des Verbundes zum Menschen dar, damit der Koordinationsagent bei den Verhandlungen auch die Interessen der Kunden berücksichtigen kann. Über den Kundenagenten kann ein Kunde neue Aufträge in das System eingeben. Dazu interagiert der Kundenagent mit dem Koordinationsagenten und teilt dem Kunden schließlich mit, wann mit der Joghurt-Produktion zu rechnen ist.

Die Agenten in der Anwendung sind teilweise sehr unterschiedlich implementiert. Einerseits gibt es eigenentwickelte Agenten, die auch auf SPS ablauffähig sind. Hierzu wurde auf eine besonders effiziente Programmierung geachtet. Zum anderen wurden auch die Agenten auf der Plattform Jade implementiert, da manche Systeme ohnehin mit einem Industrie-PC ausgestattet sind und durch den Einsatz von offenen Plattformen Agentenfunktionalitäten in unterlagerten Industrie-4.0-Komponenten genutzt werden können.

Die Verbindung zum System kann individuell verschieden sein und von einer einfachen Feldbusverbindung bis zu einer vollständigen Integration in die Steuerung des Systems reichen.

#### **4.2 Realisierung der Verzeichnisse in einer Industrie-4.0-Cloud**

In einer Industrie-4.0-Cloud sind die Managementinformationen für den Agentenverbund enthalten.

In einem Agentenverzeichnis sind alle am Verbund beteiligten Agenten und deren Adressen aufgeführt. Damit dieses Verzeichnis stets aktuell ist, überprüft das Agentensystem in regelmäßigen Intervallen, ob die eingetragenen Agenten noch erreichbar sind, und aktualisiert entsprechend das Agentenverzeichnis.

Ein weiterer Bestandteil der Industrie-4.0-Cloud ist das Dienste- und Fähigkeitsverzeichnis, aus dem mit entsprechenden Nachrichten Informationen abgefragt werden können. Dort ist hinterlegt, welcher Agent welche Fähigkeiten anbietet. Ein Agent, welcher für die Erfüllung

seines Ziels eine Fähigkeit von einem anderen Agenten benötigt, kann durch eine Abfrage der Verzeichnisse eine Liste mit Agenten erhalten, die die geforderte Fähigkeit besitzen bzw. einen Dienst dazu anbieten.

In der Industrie-4.0-Cloud ist zusätzlich noch das Botschaftsverzeichnis enthalten. In diesem Verzeichnis ist enthalten, welche Botschaften zur Erbringung einer bestimmten Fähigkeit benötigt werden, dazu gehören auch die Botschaften, die bei der Verhandlung benötigt werden.

Die Industrie-4.0-Cloud wurde mit einem klassischen zentralen Aufbau realisiert, d. h. die Verzeichnisse werden von einem zentralen Agenten zur Verfügung gestellt. Vorteil dieses Aufbaus ist, dass keine komplizierten Synchronisationen notwendig sind. Allerdings wird die Cloud dadurch zu einem sicherheitskritischen Punkt, da bei einem Ausfall der Verbund nur noch sehr eingeschränkt funktionsfähig ist. Alternativ könnte die Industrie-4.0-Cloud auch auf mehrere Agenten verteilt werden, dabei ist eine Schwierigkeit, die Synchronisation sicherzustellen, damit die Verzeichnisse der einzelnen Agenten dieselben Informationen enthalten.

#### **4.3 Realisierung der Mensch-Maschine-Schnittstelle**

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle wurde in Form eines Kundenportals umgesetzt. Über das Kundenportal werden Anfragen und Aufträge in die Industrie-4.0-Verbundanlage eingebracht. Dies können Produktionsaufträge, Diagnoseanfragen etc. sein. Das Kundenportal besteht aus einem Kundenagenten und einer entsprechenden Benutzungsschnittstelle. Der Kundenagent ist dafür verantwortlich, mit den anderen Agenten des Industrie-4.0-Verbunds zu kommunizieren und entsprechende Daten auszutauschen. Für die Einbringung eines Auftrags sucht der Kundenagent in der Industrie-4.0-Cloud nach passenden Anlagen- bzw. Koordinationsagenten, die den gewünschten Auftrag erledigen können, und kontaktiert diese im Anschluss mit der Bitte um Zusendung eines Angebots.



Bild 7: Benutzungsschnittstelle des Kundenportals von myJoghurt

Die Benutzungsschnittstelle, welche direkt an den Kundenagenten angebunden ist, erlaubt das Einbringen von externen Aufträgen in den Verbund. Die Benutzungsschnittstelle kann als klassische Desktopanwendung realisiert sein, als mobile App für Smartphones und Tablets oder auch als mobile Webseite. Klassische Desktopanwendungen oder mobile Apps haben den Nachteil, dass für jedes Betriebssystem meist eigene Anwendungen entwickelt werden müssen, was in einem recht hohen Aufwand resultiert.

Der prototypische Aufbau der Benutzungsschnittstelle wurde daher als mobile Webseite ausgeführt. Das Design orientiert sich an Anwendungen für mobile Endgeräte, besteht jedoch aus einer Webseite, die auf sämtlichen Zielplattformen (Windows, iOS, Google, etc.) aufgerufen werden kann (siehe Bild 7). Die Benutzungsschnittstelle wurde mit HTML5 und Java Skript realisiert und ist sowohl per Maus als auch per Finger bedienbar und passt sich den verschiedenen Endgeräten (z. B. Smartphone, Tablet, Desktop) automatisch an.

Über das Kundenportal können auch Rückmeldungen und Informationen zu aktuellen Prozessen eingesehen werden. So kann es einem Anwender ermöglicht werden, eine Bestellung über den gesamten Produktionsprozess zu verfolgen oder gar nachträglich Änderungen an der Bestellung vorzunehmen.

#### **4.4 Realisierung der Kommunikationsinfrastruktur**

Das System kommuniziert auf Basis von Web-Sockets über das Internet. Das Protokoll verwendet TCP-Sockets für das Senden bzw. Empfangen von Nachrichten.

Alle Agenten, die eine Industrie-4.0-Komponente vertreten, verwenden dasselbe Kommunikationsprotokoll nach außen, um mit den anderen Agenten des Verbundes Nachrichten auszutauschen. Der Anlagenverbund verwendet nach außen ein Protokoll, welches in den Grundzügen mit dem von der FIPA definierten Protokoll zur Agentenkommunikation vergleichbar ist. Nach innen zur jeweiligen Anlagenkomponente erfolgt die Kommunikation hingegen sehr unterschiedlich und ist spezifisch auf die jeweilige Teilanlage abgestimmt.

In der vorliegenden Realisierung wird jeder Agent innerhalb des Protokolls über die IP-Adresse und den Port des Sockets identifiziert. Die eigentlichen Nachrichten werden als einfache Zeichenfolgen im ASCII-Format übertragen und nicht im HTTP-Protokoll. Eine Nachricht besteht dabei aus einzelnen Abschnitten, welche durch bestimmte Zeichen voneinander getrennt sind. Die Reihenfolge der einzelnen Abschnitte ist fest definiert.

Dies erlaubt es, eine Nachricht auch auf Systemen mit nur eingeschränkten Fähigkeiten (z. B. SPS) als Zeichenkette zu verarbeiten, da der Inhalt eines Feldes erst nach dem Zerlegen geparkt werden muss.

Dieses Protokoll wird sowohl für die Kommunikation zwischen den Agenten als auch mit der Industrie-4.0-Cloud verwendet. Hauptanteil der Kommunikation mit der Cloud ist die Klärung der Frage, welche Agenten eine bestimmte Fähigkeit zur Verfügung stellen, bzw. unter welcher Adresse dieser Agent erreichbar ist. Damit diese Informationen in der Cloud vorhanden sind, muss sich jeder teilnehmende Agent an der Cloud mit einer entsprechenden Nachricht anmelden. Dabei überträgt er neben seinem Namen und seiner Adresse auch eine Liste mit Fähigkeiten, die er erfüllen kann.

## **5 Möglichkeiten zur Verbesserung der Kommunikationsinfrastruktur**

Die Verfügbarkeit der Kommunikationsinfrastruktur ist eine essentielle Voraussetzung für die Flexibilität, durch die Industrie-4.0-gerechte Applikationen gekennzeichnet sind. Dies erfordert leistungsfähige Lösungen zum Management dieser Kommunikationsinfrastruktur, der vernetzten Industrie-4.0-Komponenten selbst und der durch sie angebotenen Dienste. Die Anforderungen aus der Applikation können herangezogen werden, um das Themenfeld Quality of Service zu spezifizieren. Hierzu gehören beispielsweise die garantierte Bereitstellung von Bandbreite, die Zusicherung von Prioritäten, die Einhaltung von Zeitschranken und schließlich auch die Einhaltung von Kommunikationskosten.

Die Integration von IT und Automatisierungsfunktionalität erfordert eine Erweiterung des Netzwerkmanagements dahingehend, dass es in der Lage sein muss, die automatisierungsspezifischen Anforderungen in einer zunehmend heterogenen

Kommunikationsstruktur handhaben zu können und dabei möglichst existierende bzw. etablierte Technologien zu integrieren.

Derzeit wird in der Automation das Simple Network Management Protocol (SNMP) als de-facto-Standard eingesetzt. Dies reicht jedoch nicht aus, um die gestiegenen Anforderungen effizient erfüllen zu können.

Im Rahmen der Automatisierungsverbundanlage sollen neue Entwicklungen wie Web Based Enterprise Management [3] in den Anwendungskontext eingeführt werden [4]. So nutzt Web Based Enterprise Management Technologien wie http und XML, trägt aber auch Sicherheitsüberlegungen Rechnung. Anders als bei SNMP sind sowohl Authentifikation, Autorisation, Integrität, Verschlüsselung und auch Logging fester Bestandteil der WBEM-Infrastruktur.

WBEM ist kein monolithischer Standard, sondern bezeichnet eine Gruppe von Technologien zum System-Management.

Auf Basis dieses objektorientierten Ansatzes werden die für das Management relevanten Eigenschaften der einzelnen Anlagenkomponenten, wie z. B. Verfügbarkeit, Auslastung, nutzbare Dienste, Diagnoseinformationen usw. modelliert. Die funktionale Verknüpfung der so entstandenen Objekte bildet die Basis für ein Funktionsmodell, das die eigentlichen Managementaktivitäten umsetzt.

## **6. Zusammenfassung und Ausblick**

Im vorliegenden Beitrag wurde mit Hilfe von Agententechnologie eine dezentrale Industrie-4.0-Verbundanlage exemplarisch realisiert.

Der Ansatz, ein Agentensystem zu benutzen, hat sich in der praktischen Umsetzung als zukunftsfruchtig und leistungsfähig erwiesen. Dabei wurden sowohl Eigenentwicklungen betrieben als auch die Agentenplattform Jade eingesetzt. Der Einsatz der existierenden Agentenplattform Jade benötigt viele System-Ressourcen. Daher müssten zur Realisierung von Agenten auf SPS-Systemen eigene Entwicklungen durchgeführt werden.

In Bezug auf die eingangs formulierten Anforderungen lassen sich am Beispiel folgende Realisierungen resümieren.

Die Vergabe von Aufträgen (Anforderung A1) wird auf Basis eines Web-Interfaces für Smart Phones realisiert und konnte mit verfügbaren Techniken implementiert werden.

Die automatische Auftragsplanung (Anforderung A2) erfolgt auf Basis eines einfachen Verfahrens zur Zuteilung von Angeboten. Dabei kommt ein Zuteilungsverfahren zum Einsatz, das zentral ausgeführt wird. Weiterführende Fragen der dezentralen Zuteilung (Scheduling)

sind noch zu erforschen. Daher ist auch die Berücksichtigung von komplexen Kriterien bei der Produktionsplanung (Anforderungen A4) ebenfalls Gegenstand zukünftiger Untersuchungen. Ein einfaches An- und Abmelden von Produktionsanlagen (Anforderung A3) ist auf Basis der Agenten-Architektur umgesetzt, da derzeit keine Veränderung an den Teilanlagen erfolgt und nur ein An- bzw. Abmelden erforderlich ist. Weitergehende Untersuchungen mit Blick auf Re-Konfiguration im Sinne einer Anpassung der Anlagen an geänderte Marktanforderungen wären eine sinnvolle Weiterentwicklung [7].

Ein autarkes Auftragsmanagement, d. h. die Möglichkeit der Untervergabe von Aufgaben, die Teilanlagen bereits erhalten haben (Anforderung A5), kann in der Verbundanlage durch die Jade-Agenten-Plattform erfolgen. Diese Untervergabe ist jedoch noch weiter auszubauen, um beispielsweise auf Störungen schnell reagieren zu können.

Somit steht heute eine verteilte Demonstrationsanlage zur Verfügung, mit der die Grundkonzepte von Industrie 4.0 dargestellt werden können.

Die Anforderung nach einem sicheren Zustellen von Botschaften (Anforderung A6) ist derzeit noch nicht realisiert, da Web-Sockets zum Einsatz kommen. Die sichere Nachrichtenübermittlung im Sinne der garantierten Zustellung von Botschaften sowie einer effizienten Implementierung wird zukünftig noch eingehender betrachtet werden. Dabei kommt dem WBEM-Konzept besondere Aufmerksamkeit zu. Auch spielt die Verwendung von effizienten Kommunikationsprotokollen (wie z. B. MQTT) eine Rolle.

Es ist geplant, das Szenario in einem Folgeschritt auch als Referenz zur verteilten Anlagen-Diagnose einzusetzen. Bei Ausfall von ähnlichen Teilkomponenten könnte nachgefragt werden, wie dieser Ausfall gelöst wurde. Für dieses Szenario wird eine Nutzung von OPC-UA erwogen, um einen einheitlichen Datenaustausch im Anlagenverbund zu ermöglichen.

## **Literatur**

- [1] M. Weyrich: Intelligenz und Vernetzung in der Fertigung - Perspektiven aus der Forschung. Vortrag auf dem VDI Zukunftskongress "Industrie 4.0 - Chancen für den Produktionsstandort Deutschland" , 30. Januar 2013, Düsseldorf ([http://www.ias.uni-stuttgart.de/service/vortraege/weyrich/2013-01-30\\_VDI-Zukunftskongress.pdf](http://www.ias.uni-stuttgart.de/service/vortraege/weyrich/2013-01-30_VDI-Zukunftskongress.pdf))
- [2] Ch. Diedrich, A. Fay, J. Grützner, P. Göhner, B. Vogel-Heuser, M. Weyrich, M. Wollschlaeger: Automatisierungstechnischer Forschungsanlagenverbund für Industrie 4.0. Markt & Technik, Industrie 4.0 Summit 2013, 16.-17. Oktober 2013, München
- [3] Distributed Management Task Force, Web-Based Enterprise Management (WBEM) Initiative 2011, (<http://www.dmtf.org/standards/wbem/>)

- [4] R. Lehmann, R. Frenzel, M. Wollschlaeger, "Integriertes System- und Dienst-Management", In atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, Jahrgang 54, Heft. 3, S. 50-56, 2012.
- [5] M. Bordasch, P. Göhner: Fault prevention in industrial automation systems by means of a functional model and hybrid abnormality identification concept. IECON 2013 – 39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, S. 2845-2850.
- [6] D. Pantförder, F. Mayer, Ch. Dietrich, P. Göhner, M. Weyrich, B. Vogel-Heuser: Agentenbasierte-dynamische Rekonfiguration von vernetzten, intelligenten Produktionsanlagen. In: Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in der Produktion, Automatisierung und Logistik. Berlin, Springer-Verlag 2014.
- [7] M. Weyrich, I. Wior, D. Bchennati, A. Fay: Flexibilisierung von Automatisierungssystemen: Systematisierung der Flexibilitätsanforderungen von Industrie 4.0. Werkstatttechnik wt-online, Jahrgang 104 (2014), Heft 3, S. 106-111.