

# Kollaborative Fertigung mittels eines Multiagentensystems zur Vernetzung anlagenspezifischer Echtzeitsysteme

Daniel Regulin, Michael Schneider und Birgit Vogel-Heuser

Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme  
Technische Universität München  
{regulin, schneider, vogel-heuser}@ais.mw.tum.de

## 1 Einleitung

Die kollaborative Fertigung eines gemeinsamen Produktes auf unterschiedlichen Fertigungsmaschinen, die sowohl örtlich im Unternehmen verteilt oder unternehmensübergreifend stattfindet, ist eine Herausforderung der zukunftsgerichteten Produktion im Rahmen von Industrie 4.0. Dies umfasst die Verkettung von Produktionsanlagen und Robotern mit einer heterogenen Steuerungsarchitektur bei gleichzeitiger dynamischer Verwaltung der an der Produktion und Wartung beteiligten Produktionseinheiten. Ein weiteres Ziel neben der Vernetzung von Anlagen und Steuerungen ist die Integration aus dem Multimedia-Bereich bekannter Komponenten zur Einbindung des Menschen. Der Beitrag beschreibt die Integration der Aspekte Vernetzung und Auftragsmanagement mit der Losgröße eins und Berücksichtigung der Echtzeit-Randbedingung bei Produktionsmaschinen, hier roboterbasierten Produktionsmaschinen. Zur Umsetzung der genannten Aspekte wird ein Multiagentennetzwerk angewandt, welches intelligente, heterogene Softwareteile vernetzt und eine Optimierung der Abläufe ermöglicht.

## 2 Stand der Technik

Die unternehmensweite Vernetzung von Produktionsmaschinen und Aggregation von Prozess- und Produktionsdaten wird heute bereits produktiv eingesetzt und durch viele kommerzielle Werkzeuge unterstützt. Manufacturing Execution Systeme (MES) beispielsweise leisten die Koordination, Führung und Lenkung automatisierter Maschinen und Anlagen eines Unternehmens nach zuvor definierter Architektur sowie implementierten Regeln bzw. Algorithmen [1].

ERP- und PDM- Systeme bieten die Möglichkeit zur Unterstützung des Engineerings sowie zur Planung der Produktion und Disposition von Werkstücken und Produkten. Eine direkte Anbindung von Produktionsanlagen unter Berücksichtigung der Anforderungen, zum Beispiel Echtzeit, Eingriff in den Steuerungscode, Rekonfiguration und Bedien- sowie Wartungsunterstützung ist jedoch nicht vorgesehen. Lee et al. beschreibt die Vorteile der Digitalisierung von Produktionsprozessen basierend auf der Verbindung von Daten der ERP- und PDM-

Systeme [2]. Die ausgeführten Operationen finden jedoch nicht auf der Feldebene statt, sondern greifen für die Aggregation von Produktionsdaten lediglich auf Schnittstellen von Leitsystemen der Fertigungstechnik zurück.

Beobachtung sowie aktiver Eingriff in den Steuerungscode ist bisher nur über Fernwartungsoptionen zur Fehlerdiagnose oder zur Aktualisierung möglich, die zum Großteil durch die Steuerungshersteller vertrieben bzw. durch den Maschinenhersteller betrieben und über proprietäre Schnittstellen angebunden sind. Daher ist initial meist keine Anbindung an übergeordnete Planungs- bzw. Managementsysteme vorgesehen. Lerch et al. beschreibt die Optionen zur Erfassung von Messdaten basierend auf Steuerungsprogrammen und verweisen gleichzeitig auf die Bindung an spezielle Schnittstellen sowie Bussysteme (z.B. MODBUS-TCP) [3]. Eine weitere Einschränkung besteht in der Echtzeitfähigkeit der Datenübertragung. Eingriffe in den Steuerungscode von regelungstechnischen Komponenten sowie die Rekonfiguration, bspw. durch Ausfall einer Anlage oder Anlagenkomponente (z.B. Sensor) erfordert die Rekonfiguration der Anlage bzw. die Änderung des Produktionsprozesses in Echtzeit. Sollen mehrere Anlagen mit heterogener Steuerungsarchitektur verkettet werden, ist ein durchgängiges Konzept erforderlich, um die Stabilität des Prozesses aufrecht zu halten und Optimierungen hinsichtlich des Verhaltens sowie der Effizienz der durchzuführen.

Für diese Klasse von Problemen sind Agentensysteme Gegenstand der aktuellen Forschungsaktivitäten im industriellen Umfeld. Technische Agenten sind nach der VDI-Richtlinie 2653 definiert als eine abgrenzbare Hardware- oder/und Software-Einheit mit definierten Zielen, welche sie durch selbstständiges Verhalten erreichen. Dabei interagieren sie mit ihrer Umgebung und anderen Agenten. Eine weitere Eigenschaft eines Agenten ist, dass er über Wissen bzgl. der jeweils vom ihm gesteuerten technischen Komponente, zum Beispiel Maschine oder Anlage verfügt. Dieses „Wissen“ ist Teil seines Modells bzw. Programmcodes und ermöglicht es dem Agenten, das technische System gezielt zu beeinflussen. Softwareagenten können die Zusammenführung der Kernkompetenzen im Sinne von Fertigungsanlagen oder Maschinen verschiedener Unternehmen bei der Bearbeitung eines gemeinsamen Produktes unterstützen und ermöglichen somit die Fertigung komplexer, kundenindividueller Produkte. Die betrachteten Einheiten des technischen Systems sind in der Regel Maschinen bestehend aus einer Modulararchitektur, welche aus einer vom Softwarearchitekt gewählten Granularität der Abstraktion des Systems entspringt. Auf Basis von Maschinendaten, einer auftragsbezogenen Produktkonfiguration sowie dem aktuellen Auftragsstatus kann somit zur Laufzeit eine Problemlösung mittels des Agentenwissens für neue Anforderungen bewertet werden, um das Produkt nach geforderten Kriterien (z.B. Energie, Zeit) optimal zu fertigen [4, 5].

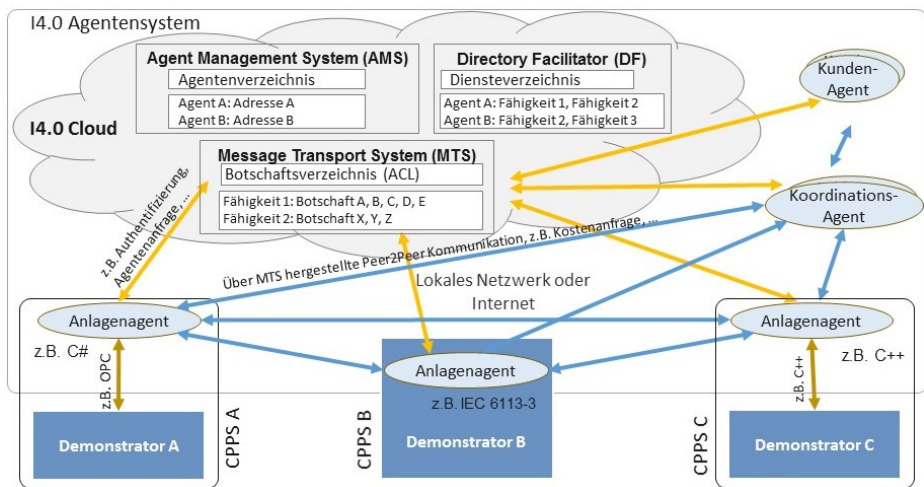
Leitao et al. [6] und Göhner [7] beschreiben die Entwicklungen sowie den Einsatz von Agentensystemen in verschiedenen Domänen. Während die Sektoren E-Commerce, Business-Anwendungen und Logistik bereits über das Stadium der Versuchsdurchführung unter akademischen Laborbedingungen hinaus reale Implementierungen von Agentensysteme aufweisen, sind produktiv eingesetzte Lösungen im Umfeld der Produktion selten [6]. Im Forschungsumfeld liegen

zahlreiche Konzepte bzw. Ansätze für den Einsatz von Agenten und Nutzung des Potentials zur Erhöhung der Flexibilität, Adaptivität sowie der Effizienz von Produktionsprozessen vor [8–12].

In Kooperation des Lehrstuhls AIS der TU München, dem ifak und IFAT Magdeburg sowie dem IAS der Universität Stuttgart konnte eine Agenten-Architektur sowie ein Netzwerkprotokoll implementiert werden [13]. Ein gemeinsam entwickeltes Szenario, welches als prototypisches Produktions-Evaluationsbeispiel dient, ist der deutschlandweite Industrie 4.0-MyJoghurt-Demonstrator.

### 3 Agentenframework MyJoghurt

Die Referenzarchitektur für das Agentenframework wurde basierend auf den erarbeiteten Konzepten und Erfahrungen des MyJoghurt-Demonstrators entwickelt. Dabei sollen mit dem Agentenframework die verschiedenen Aspekte der kollaborativen Produktion im Rahmen der aktuellen Entwicklung von Industrie 4.0 abgedeckt werden. Die Referenz-Architektur besteht dazu aus Anlagenagenten, Koordinations-Agenten, Kunden-Agenten sowie deren Kommunikationswege im Netzwerk und zur I4.0-Cloud (Abbildung 1).



**Abb. 1.** Architektur des Agentennetzwerkes [14]

Die Anlagenagenten besitzen dabei eine direkte Schnittstelle zu den Echtzeit-Steuerungen der Produktionsanlagen und können somit Prozessdaten erfassen. Diese anlagennahen Agenten knüpfen auf der Echtzeitebene an und berechnen aus den erhobenen Daten einen Preis für Auftragsanfragen des Netzwerkes und geben ein entsprechendes Gebot ab. Die Koordination des Fertigungsprozesses, bzw. Konfiguration und Parametrierung der Prozessschritte für die Fertigung eines Produktes wird von Koordinationsagenten übernommen. Diese koordinieren

die Verkettung der Produktionsinstanzen nach den nutzerspezifischen Aufträgen sowie den Zielen (technischer Prozess) im Verhältnis zu vorhandenen Ressourcen und verwalten zur Laufzeit einen Verhandlungsmechanismus mit Angebot und Nachfrage. Resultierend aus den Verhandlungen passt sich der Produktionsprozess optimal an die gestellten Anforderungen an [7]. Grundlage ist die echtzeitfähige Implementierung sowie die Einschränkung der Handlungsmöglichkeit durch den Handlungsspielraum [15]. Eine Rekonfiguration der Agenten zur Echtzeit, zum Beispiel in Folge eines Sensorausfalls weist Wannagat et al. [15] am Beispiel einer Sortieranlage sowie einer kontinuierlichen Thermo-Hydraulikpresse nach und stellt ein Konzept vor, mit dem Agenten auf echtzeitfähigen Plattformen der IEC 61131 implementiert werden können. Die Implementierung der Agenten auf den im Agentenframework integrierten Steuerungen wird durch das modellbasierte Vorgehen erleichtert. Schütz et al. [16] beschreibt die werkzeugunterstützte Erstellung von Agenten auf Basis der Systems Modeling Language (SysML) mit Abbildungsregeln für den Code der Software. Zur Darstellung werden Parameter-, Aktivitäts- und Blockdefinitionsdiagramme verwendet. Der Ansatz von Legat et al. [17] zur Rekonfiguration der IEC- Software durch den Agenten auf Basis dieser Modellgrundlage [18] optimiert die Reihenfolge des Produktionsprozesses in Folge geänderter Anforderungen. Der Kundenagent repräsentiert die Schnittstelle zu den Kunden bzw. am Fertigungsprozess beteiligten Personen. Kundenagenten kommunizieren über Anwenderprogramme, Websites, Apps oder andere interaktive Interfaces mit den Menschen und unterstützten so eine Repräsentation der verschiedenen Rollen im Agentennetzwerk.

Das Netzwerk kann dynamisch Agenten integrieren oder entfernen. Die selbstständige Anmeldung im Netzwerk ist dabei eine grundlegende Funktionalität eines jeden Agenten. Auf diese Weise können für Unternehmen besonders nützliche Teilaspekte der Produktion als Ressource in der I4.0-Cloud angeboten werden. Je nach Angebot verändern sich damit der Weg bzw. die eingesetzten Produktionsmittel während des Fertigungsprozesses. Das Management der Verbindungen übernimmt die I4.0 Cloud, welche das Wissen über die Konfiguration des Netzwerkes und die Namen bzw. Beschreibungen der am Netzwerk teilnehmenden Agenten besitzt. Publiziert sind die Informationen über unterstützte Dienste des Frameworks im „Directory Facilitator“ (DF). Eine Zuordnung der Dienste erfolgt durch das Mapping auf das „Agent Management System“ (AMS), welches die aktuellen Ressourcen dynamisch verwaltet, indem sich die Agenten dort registrieren oder abmelden. Aus den I4.0-Cloud-Informationen von DF und AMS resultieren die für den Kunden aktuell konfigurierbaren Ausprägungen eines Produktes, welche für Nutzer durch den Kundenagenten zugänglich sind. Da zur Kommunikation der Agenten im Framework ein einheitlicher Wortschatz notwendig ist, verwaltet das „Message Transport System“ (MTS) die zuvor definierten Botschaften. Der zum Austausch verwendete Wortschatz zur Abdeckung der grundsätzlichen Funktionalität lässt sich in folgende Kategorien einteilen:

1. Statusbotschaften (ca. vier) der Produktionsanlagen und Roboter,
2. Botschaften (ca. sechs) zur Realisierung des Werkstück austauschs,
3. Botschaften (ca. vier) zur Beschreibung von Werkstückspezifikationen,

4. Botschaften (ca. vier) zur Angebotsab- bzw. Auftragsvergabe,
5. Botschaften (ca. sechs) zur Koordination und Kundeninteraktion.

Eine Zeitabhängigkeit als Randbedingung aller Produktionsprozesse zwingt zur Überwachung der nachrichtenbasierten Kommunikation und Einhaltung einer maximalen Latenz zur Sicherstellung eines echtzeitfähigen Produktionsprozesses.

## 4 Aspekt der Echtzeit

Nach Lauber/Göhner bedeutet Echtzeit im Umfeld der Automatisierungstechnik die „Erstellung von Programmen so, dass bei der Datenverarbeitung im Computer die zeitlichen Anforderungen an die Erfassung der Eingabedaten, an die Verarbeitung im Computer und an die Ausgabe der Ausgabedaten erfüllt werden“ [19]. Das Agentennetzwerk umfasst Komponenten mit verschiedenen Anforderungen an die Kommunikation. Besonderer Fokus liegt daher auf der Einordnung der Bestandteile des Agentennetzwerkes in die korrekte Kategorie unter Berücksichtigung der Randbedingungen Kommunikationszeit und Datenmenge. Die hardwarenahen Elemente des Agentennetzwerkes sind den Dienstklassen entsprechend des Ansatzes von Jasperneite [20] zuordenbar (Tabelle 1). Das Kriterium ist hier die Anforderung an die Übertragungsgeschwindigkeit.

**Tabelle 1.** Einordnung der Elemente des Agentensystems bezüglich Echtzeitanforderungen in die Klassifikation nach Jasperneite [20]

Entität im Agentennetzwerk	Komplexität der übermittelten Information	Reaktionszeit	Dienstklasse
mechatr. Einheit (eine Steuerung)	gering (analog/digital)	$\leq 1$ ms	3
Anlage (mehrere Steuerungen)	gering (Echtzeitprot.)	10–100 ms	2
Agent-Anlagenseite	gering (Echtzeitprot.)	10–100 ms	2
Agent-Cloudseite	mittel (W/LAN, mobil)	1–5 s	–
Koordinator-Agent	mittel (W/LAN, mobil)	1–5 s	–
Kunden-Agent	hoch (W/LAN, mobil)	5–10 s	–
Agent Management System (AMS)	mittel (W/LAN, mobil)	1–5 s	–
Directory Facilitator (DF)	mittel (W/LAN, mobil)	1–5 s	–
Message Transport System (MTS)	mittel (W/LAN, mobil)	1–5 s	–

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen sind Schnittstellen zwischen den Ebenen der klassifizierten Elemente zu definieren. Regelungstechnische Anwendungen fordern die Festlegung einer maximalen Latenzzeit. In mechatronischen Systemen der Automatisierungstechnik setzt sich diese sowohl aus den dynamischen Eigenschaften des Systems sowie den Zeiten für Datenübertragung und Berechnung zusammen. Aus den automatisierungstechnischen Anteilen resultiert eine Latenz bestehend aus den Zeitspannen für die Digitalisierung der Sensorwerte, Übertragung der Signale zur Steuerung, Verarbeitung in der Steuerung sowie Übermittlung der Stellgrößen an die Aktorik. Die Summe dieser

Zeiten darf eine aus regelungstechnischer Sicht existierende maximale Zeitdauer nicht überschreiten, um die Steuerbarkeit und Regelbarkeit des Systems zu gewährleisten. Abhängig von der Dynamik der Anwendung liegen die Zeitkonstanten im Bereich weniger Millisekunden. Eine Überschreitung der definierten maximalen Totzeit hat aufgrund der Zeitabhängigkeit dynamischer Systeme die Instabilität zur Folge. Auf dieser Ebene sind Echtzeitbussysteme bzw. eine direkte Verdrahtung erforderlich, um die Echtzeitbedingung bei dem Transport von analogen oder digitalen Signalen zu garantieren. Eine Integration geregelter Strecken in übergeordnete Systeme, welche physikalische Verknüpfungen besitzen, müssen Führungsgrößen für die Regler zum korrekten Zeitpunkt bereitstellen sowie Informationen des geregelten Systems verarbeiten und interpretieren. Da in Produktionsanlagen viele dieser geregelten Systeme existieren, sind auch auf dieser Aggregationsebene Echtzeitanforderungen einzuhalten. Je nach Anwendung liegt die maximale Latenz hier im Bereich unter 100 Millisekunden (Tabelle 1). Alle über dieser Ebene angeordneten Kommunikationswege verarbeiten komplexere Informationen, welche weniger direkten Einfluss auf Aktoren und Sensoren sondern Planungs- bzw. Managementcharakter besitzen. Aufgrund der Flexibilität und Anbindungsoptionen finden LAN-, WLAN oder Mobilfunk-Protokolle wie Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP), Dynamic Host Configuration Protocol (DHCP), User Datagram Protocol (UDP) bzw. Global System for Mobile Communications (GSM) Anwendung. Die Agenten als Kommunikationsteilnehmer dieser Ebene stellen selbst Anforderungen, zu welchem Zeitpunkt Informationen durch das Netzwerk bzw. die Cloud bereitgestellt werden müssen. Die definierten Botschaften enthalten Rückantworten über die erfolgreiche Nachrichtenübermittlung bzw. die Interpretation des Agenten. Können Informationen nicht rechtzeitig bereitgestellt werden, existiert eine Rückfallebene, welche basierend auf einer Standard- Betriebsstrategie die Anlagenfunktionalität aufrecht erhält. Die über die Ebenen zunehmende Intelligenz der Kommunikationsteilnehmer sorgt demnach für die Fähigkeit zur Fehlerbehandlung und Einsatzmöglichkeit universeller Protokolle, welche Informationen im Regelfall sogar bei Verwendung des Internets als Transportmedium innerhalb eines Sekundenbereiches bereitstellen, jedoch durch den architekturbedingt fehlenden Determinismus keine Garantie für eine feste Zykluszeit aufweisen.

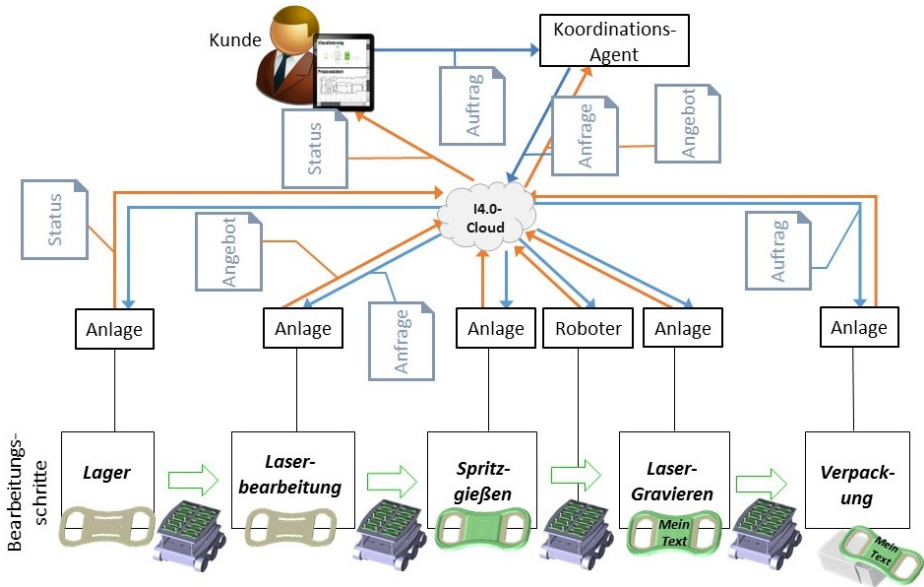
## 5 Evaluation des Agentennetzes zur Roboterkooperation

Die Evaluation des Ansatzes zur agentenbasierten Kollaboration konnte im Rahmen eines Demonstrators auf der Automatica 2014 im industriellen Umfeld durchgeführt werden. Das Ziel, die Vernetzung heterogener Produktionsanlagen und Roboter in einem Netzwerk zur gemeinsamen kundenindividuellen Produktion zeigte, dass auch bestehende Systeme durch das Agentenframework zur Erhöhung der Effizienz und Aggregation verschiedener Kernkompetenzen verknüpft werden können. Das Framework „Robot Integrated Agent Network“ (RIAN) baut auf der Referenzarchitektur des MyJoghurt-Demonstrators auf und zeigt die Allgemeingültigkeit sowie Erweiterbarkeit des Ansatzes.



**Gemeinsame Produktion mit RIAN** Der Demonstrator „Robot Integrated Agent Network“ (Abbildung 2) zeigte die Produktionslinie eines individualisierten Flaschenöffners, bestehend aus Lager, Simulation Laserschneiden, Spritzgießen, Lasergravieren, Verpacken und Kundenübergabe. Die örtliche Verteilung von Produktionsstationen ist üblicherweise bei einer Vielzahl verschiedener Wertschöpfungsketten gegeben. Für den Demonstrator von dem Framework RIAN konnte dieser Aspekt durch die gegebene Verteilung der Produktionsflächen der partizipierenden Unternehmen auf der Automatica nachgestellt werden. Eine Verkettung der Standorte stellten autonome sowie operatorgeführte mobile Transportroboter her. Die Nutzer konnten über eine Bestell-Website den Flaschenöffner mit einem Merkmal, dem frei definierbaren Schriftzug, individualisieren und eine Lieferzeit in Abhängigkeit der vorliegenden Produktionsauslastung wählen. Die intelligente Verkettung dieser Produktionsanlagen zur kollaborativen Fertigung eines gemeinsamen Werkstückes der Losgröße eins, sowie direkte web- bzw. app-basierte Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine repräsentierten die Aspekte der Fertigung im Rahmen der vierten industriellen Revolution. Der Koordinationsagent wies den Transportrobotern initial Aufträge aus dem Lager zu und knüpfte die Information über die auszuführenden Prozessschritte sowie die entsprechenden Merkmale logisch an die Werkstücke. Ausgehend vom Lager beförderten die Transportroboter die Werkstücke zu der jeweils nächsten Station im Produktionsprozess. Zwischen mobilen Transportrobotern und Anlagen existierte eine Hardwareschnittstelle, welche die genaue Positionierung der Werkstücke in der Anlage bzw. deren Detektion durch Visionssysteme sicherstellte. Über das Agentennetzwerk kommunizierten Transportroboter und Anlagen, um die nötigen Bearbeitungsschritte sowie Freigaben zur Manipulation auszutauschen. Der aktuelle Produktionsfortschritt war sowohl für den Auftraggeber als auch für das Wartungs- und Betriebspersonal auf Basis der aggregierten Meldungen der einzelnen Entitäten verfolgbar. Nach dem Durchlauf aller Bearbeitungsschritte erfolgte die Übergabe an den Kunden mittels einer Mensch-Roboter-Kollaboration.

**Steuerungsarchitekturen** Eine Hauptanforderung des Agentennetzwerkes im Kontext von Industrie 4.0 ist Verknüpfung heterogener Steuerungen, um die proprietären Steuerungen mit ggf. proprietären Betriebssystemen der verschiedenen Roboteranbieter über die Industrie 4.0 Plattform kooperieren zu lassen (z.B.: Raspberry Pi (Raspbian-Linux), Reis Roboter Controller (VX-Works), Fanuc Roboter Controller (FANUC-OS)). Dabei ist sowohl die Implementierung auf der proprietären Steuerung als auch auf externen Rechnern möglich, welche vom Hersteller definierte Schnittstellen zum Datenaustausch der Agenten mit den Steuerungen auf der Feldebene nutzen. Somit kann der Aufwand für Änderungen an der Software auf den proprietären Steuerungen minimiert werden. Die Repräsentation sowie der Eingriff in die Steuerungssoftware erfolgt abhängig von der herstellerepezifischen Schnittstelle durch den Aufruf von Funktionen, die Änderung von Parametern oder Variablen zur Laufzeit. Der Agent ruft Statusinformationen über die Steuerungen, den Zustand der Anlage sowie den Bearbeitungsfortschritt ab und legt auf Basis dieser Informationen die Strategie für



**Abb. 2.** Übersicht des implementierten Multiagentensystems auf der Messe

eine Produktionseinheit fest. Während der Agent umfangreiches Wissen über die Prozessdaten besitzt, existiert eine Kapselung zu den im Netzwerk bereitgestellten Informationen. Über LAN, W-LAN bzw. mobile Datenverbindungen werden die aktuelle Produktionszeit sowie der Preis einer Leistung für alle teilnehmenden Agenten bereitgestellt. Das Produktions-Knowhow sowie Maschinen- und Prozessdaten bleiben durch Repräsentation und Kapselung der Maschinensoftware und -daten eines Agenten unangetastet. Über das Netzwerk sind z.B. der aktuelle Produktionsfortschritt und ein Liefertermin abrufbar, zudem können nutzerspezifisch konfigurierte Aufträge durch internetfähige Endgeräte an das Agentensystem übergeben werden.

**Integration von Smart Devices** Ein weiterer Aspekt von Industrie 4.0 ist die Integration von sogenannten Smart Devices in das Produktionsumfeld. Die aus dem Multimedia-Bereich bekannten Geräte wie Tablets, Smartphones und Smart-TVs bieten umfangreiche Optionen für die Steuerung und Visualisierung über webbasierte Funktionen. Im Sektor der Industrie unterstützt der Transfer dieser Technologie Maintenance- und Analytics-Funktionen für Anlagen bzw. den Status des Agentennetzwerks. Im Rahmen des Messedemonstrators RIAN wurde eine App entwickelt, welche die Steuerung der verschiedenen Anlagen und Transportroboter durch eine einheitliche Bedienoberfläche auf einem Tablet ermöglichte. Zwei Modi trennen die Sichtweisen für Bediener und Wartungs- bzw. Inbetriebnahmepersonal. Die Bedienersicht zeigt dem Operator die im Produktionsprozess folgenden Aktionen an und kommuniziert über textuelle Nachrichten. Eine Wartungssicht ermöglicht die Aufnahme und Zuordnung von Produktions-



bzw. Transportmitteln in das Agentennetzwerk. Im Gegensatz zu der App für an der Produktion beteiligtes Personal ist die Verfolgung von Aufträgen und Statusmeldungen über den Auftragsfortschritt plattformunabhängig für Kunden sowie Disponenten erforderlich. Der Zugang für das Monitoring des Demonstrators RIAN dieser Funktionen steht über Webdienste basierend auf HTML 5 zur Verfügung. Die Implementierung wurde im Kunden-Agent vorgenommen.

## 6 Zusammenfassung

Der Beitrag beschreibt die Umsetzung verschiedener Aspekte von Industrie 4.0 sowie deren Anforderungen an die Echtzeit auf Basis eines Multiagentensystems. Im Fokus steht die Verkettung von Robotern und Produktionsanlagen zur Optimierung der Produktion, die Migrationsmöglichkeit für bestehende Anlagen sowie die Einbindung des Menschen durch Smart-Devices aus dem Multimedia-Bereich. Die Grundlage bildet die anhand des MyJoghurt-Demonstrators entwickelte Referenzarchitektur.

Die Integration und Evaluation im industriellen Umfeld wurde anhand des Demonstrators auf der Messe Automatica vorgestellt. Der Demonstrator weist die Fähigkeit des Agentenansatzes zur Vernetzung von Produktionsanlagen verschiedener Produzenten, Steuerungen und Hardwareschnittstellen nach. Auf diese Weise ist es möglich, den gesamten Produktionsprozess zu steuern und nutzerspezifische Aufträge variierender Priorität zu managen. Die Begrenzung zeitlicher Latenzen innerhalb einer Produktionsanlage ist durch klassische Methoden der Datenübertragung bzw. Vernetzung (z.B. direkte Verdrahtung, Profinet) sichergestellt, während die rechtzeitige Verarbeitung von komplexeren Nachrichten durch die höhere Intelligenz von Sender und Empfänger gewährleistet wird. Das Verhalten des Agentennetzwerkes im Betrieb realer Produktionsanlagen erweist sich durch vorhandene Schnittstellen der Steuerungen verschiedenster Hersteller als leicht implementierbar. Die Ausführung des Codes in C ermöglicht es Steuerungsentwicklern den Agenten plattformunabhängig zu kompilieren und eine proprietäre Ausführung zur Anbindung an das Netzwerk auszuführen. Grundlage ist die echtzeitfähige Ausführung der Agenten, nachgewiesen durch Wannagat et al. [15] anhand von Implementierungen auf IEC 61131-Steuerungen. Die werkzeugunterstützte modellbasierte Beschreibung inklusive der Abbildungsregeln in SysML nach Schütz et al. [18] baut auf diesen Erkenntnissen auf und bildet die Basis für den Ansatz von Legat et al. [17] zur Rekonfiguration der IEC-Software in Folge von Änderungen im Produktionsprozess zur Laufzeit. Die Ausstellung auf der Messe bestätigte zudem den einfacheren Zugang von Besuchern im Umgang und Bedienung von Automatisierungsanlagen und Robotern auf dem neuesten Stand der Technik durch Smart Devices und entsprechende Apps. Sowohl an der Implementierung beteiligte als auch externe Experten und Fachbesucher begrüßen die reale Implementierung des Demonstrators RIAN als eine der wenigen Möglichkeiten, Industrie 4.0 live zu erleben.

## Literaturverzeichnis

1. R. Y. Zhong et al., “RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 2, pp. 283–292, 2013.
2. C. Lee et al., “PDM and ERP integration methodology using digital manufacturing to support global manufacturing”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, no. 1–4, pp. 399–409, 2011.
3. I. R. Lerch, “Meßdatenerfassung im Feld”, in *Elektrische Messtechnik*. Springer, 2010, pp. 539–588.
4. T. Wagner, “An Agent-Oriented Approach to Industrial Automation Systems”, in *Agent Technologies Infrastructures Tools and Applications for E-Services*. Springer, 2003, vol. 2592, pp. 314–328.
5. W. Shen et al., “Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review”, *Advanced Engineering Informatics*, vol. 20, pp. 415–431, 2006.
6. P. Leitão, P. Vrba, “Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents”, in: *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing – 5th Intl. Conf. on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*, Toulouse, 2011.
7. P. Göhner, *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik*. Xpert.press, 2013.
8. M. Bussmann et al., *Multiagent Systems for Manufacturing Control: A Design Methodology*. Springer Series on Agent Technology, 2004.
9. P. Leitão, N. Rodrigues, “Multi-Agent System for On-demand Production Integrating Production and Quality Control”, *Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing*, vol. 6867, pp. 84–93, 2011.
10. A. Colombo et al., “A collaborative automation approach to distributed production systems”, *2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics*, 2004.
11. A. Lüder et al., “Distributed intelligence for plant automation based on multi-agent systems: the padadis approach”, pp. 201–212, 2004.
12. U. Epple, “Agentenmodelle in der Anlagenautomation”, in: *Agentensysteme in der Automatisierungstechnik*. Springer, 2013, pp. 95–110.
13. F. Mayer et al., “Deutschlandweiter I4.0-Demonstrator”, 2013. <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1178726>
14. D. Pantförder et al., “Agentenbasierte dynamische Rekonfiguration von vernetzten intelligenten Produktionsanlagen – Evolution statt Revolution”, in: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, Springer, 2014, pp. 145–158.
15. A. Wannagat, B. Vogel-Heuser, “Agent-oriented software development for networked embedded systems with real-time and dependability requirements the domain of automation.” in: *17th IFAC World Congress*, 2008, pp. 4144–4149.
16. D. Schütz, B. Vogel-Heuser, *Werkzeugunterstützung der Entwicklung SPS-basierter Softwareagenten zur Erhöhung der Verfügbarkeit*. Springer, 2013, pp. 291–302.
17. C. Legat, B. Vogel-Heuser, “A Multi-Agent Architecture for Compensating Unforeseen Failures on Field Control Level”, in: *3rd Intl. Workshop on Service Orientation in Holonic and Multi Agent Manufacturing and Robotics*, Frankreich, 2013.
18. D. Schütz, C. Legat, B. Vogel-Heuser, “On Modelling the State-Space of Manufacturing Systems using UML”, in: *14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Bucharest, 2012.
19. R. Lauber, P. Göhner, *Prozeßautomatisierung 1*. Springer, 1999.
20. J. Jasperneite, “Echtzeit-Ethernet im Überblick”, *atp*, vol. 3, 2005.