

Ganzheitliche flexible Vernetzung durch Erweiterung bestehender IT-Strukturen zu Serviceorientierten Architekturen mithilfe von Agentensystemen zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung – Ein Konzept zur RAMI Umsetzung

Christian Block, Friedrich Morlock, Bernd Kuhlenkötter

Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

Die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist ein kontinuierlicher Prozess zur Planung, Steuerung und Überwachung der Produktion, welcher ständig sich stets verändernden Rahmenbedingungen ausgesetzt ist. Wachsender Wettbewerb und damit einhergehende kurzzyklische Anpassungen der Produkte sowie kundenindividuelle Produktanforderungen führen zu organisatorischen Herausforderungen, die sich von den Fragestellungen der Massen- und Serienproduktion unterscheiden. Die hohe Anzahl an Veränderungen, die zudem schwer planbar sind, erfordert vom Planungspersonal häufiger komplexere Entscheidungen in der PPS. Dies betrifft alle Bereiche eines Produktionssystems. Die Betriebsorganisation muss sicherstellen, dass die wichtigen in Relation stehenden Zielgrößen der Produktion (Durchlaufzeit, Auslastung, Bestände und Termintreue) trotz des Zielkonflikts erreicht werden. Um hierbei zielführende Entscheidungen für die Produktion zu treffen, werden von Industrie und Forschung diverse Assistenzsysteme entwickelt, die die Mitarbeiter bei der Entscheidungsfindung unterstützen sollen. Kern dieser Systeme sind Daten, die über verschiedene Schnittstellen zwischen den Systemen ausgetauscht werden. Diese Assistenzlösungen und der damit verbundene verstärkte Einsatz von Informationstechnik führen zu einer höheren Komplexität in der eingesetzten Informations- und Kommunikationstechnik in den Unternehmen. Dies wird dadurch verursacht, dass Unterstützungssysteme mit anderen Softwaresystemen wie z. B. Enterprise Resource Planning, Manufacturing Execution System, Maschinen- und Betriebsdatenerfassung sowie Qualitätsdatenerfassung oder den Maschinen direkt kommunizieren müssen. Offen bleibt bei den aktuellen Systemen jedoch, wie die Daten im laufenden Betrieb kontinuierlich ausgetauscht werden können, um eine effiziente Assistenz zu liefern. Für diese Fragestellung soll in diesem Beitrag zunächst ein einheitliches Verständnis zum Datenaustausch geschaffen werden. Darauf aufbauend soll ein Agentensystem dargestellt werden, das als flexible und kommunizierende Schnittstelle zwischen allen Softwaresystemen sowie den Mitarbeitern einer Organisation dienen kann und somit die

Betriebsorganisation von produzierenden Unternehmen unterstützt. Fokus dieses Systems ist die Offenheit und Interaktionsfähigkeit mit bestehenden Systemen mit der Leitlinie „Integrieren statt Revolutionieren“, welches die historisch gewachsenen IT-Landschaften der Unternehmen berücksichtigt. Hierdurch wird ein Auflösen der Ebenen innerhalb der Automatisierungspyramide und somit eine horizontale sowie vertikale Integration von bestehenden Strukturen möglich.

1 Einleitung

Die Digitalisierung erhält durch Entwicklungen wie Industrie 4.0 zunehmend Einzug in die Produktion (Bauernhansl et al. 2014). Neben den technologischen Änderungen ergeben sich durch die Digitalisierung insbesondere für die Mitarbeiter und die Organisation neue Herausforderungen (Block et al. 2015b). Hierauf muss die Arbeits- und Betriebsorganisation der Unternehmen eine Antwort finden. Die CIM (Computer Integrated Manufacturing)-Welle der 1980er Jahre, die ähnliche Ziele wie innerhalb der vierten industriellen Revolution hinsichtlich der Digitalisierung unter anderen technischen Randbedingungen verfolgt hat, hat gezeigt, dass eine erfolgreiche Digitalisierung eine zielführende Anpassung der Organisation erfordert (Hirsch-Kreinsen/Weyer 2014). Unter Schlagworten wie „Integrated Industry“, „Digital Factory“ oder „Smart Factory“ werden die Ideen weiter verfolgt und mit neuen Aspekten wie der Dezentralisierung sowie der Integration des Menschen wieder aufgegriffen. Jedoch kann diese Digitalisierung auch heute nicht in einem Schritt umgesetzt werden.

Häufig wird im Kontext von Industrie 4.0 nur die Vernetzung von physischen Systemen auf der Shopfloor-Ebene betrachtet. Aber auch auf den höheren Ebenen wie der Unternehmensleitebene und der Fertigungsleitebene innerhalb der Automatisierungspyramide besteht Optimierungspotential bei der Vernetzung zwischen bestehenden Softwaresystemen, zu denen alle datenerfassenden und datenverarbeitenden Systeme in einem Unternehmen zählen, sowie Organisationseinheiten. Eine wichtige Aufgabe der Arbeits- und Betriebsorganisation ist unter anderem die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) im laufenden Produktionsbetrieb, da hierdurch die entscheidenden Zielgrößen der Produktion Bestände, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue sowie ihr Zielkonflikt untereinander, beeinflusst werden (Nyhuis/Wiendahl 2012). Zur Unterstützung der PPS und der dazugehörigen Prozesse werden Softwarewerkzeuge wie z. B. Manufacturing Execution Systeme (MES) eingesetzt (Kletti/Schumacher 2011). Neben dem Einsatz diverser Softwaresysteme (z. B. Enterprise-Resource-Planning (ERP), Maschinendatenerfassung (MDE), Betriebsdatenerfassung (BDE) oder Simulationen) unterschiedlicher Anbieter werden zudem Eigenentwicklungen eingesetzt, was zu einer heterogenen und historisch gewachsenen Softwarelandschaft in den Unternehmen führt (Kreimeier et al. 2015).

Der Megatrend Digitalisierung wird diesen Effekt noch verstärken, da immer mehr Softwaresysteme zum Einsatz kommen sowie Maschinen und weitere Elemente in der Produktion zu cyber-physischen Systemen (CPS) weiterentwickelt werden. Dies erfordert eine

organisationale und informationstechnische Systemvernetzung in der Produktion. Dieser Effekt erhöht sich zusätzlich durch die Auflösung der Automatisierungspyramide hin zu Cyber-Physischen-Produktionssystemen (CPPS) (VDI/VDE-GMA 2013). Es wird in Zukunft weniger zentrale Insellösungen als Datendrehscheiben wie ERP oder MES geben, sondern es werden Teilaufgaben in dezentrale Systeme ausgelagert. Die aktuell vorhandenen Grenzen zwischen den Funktionsumfängen der Softwaresysteme verschwimmen mehr und mehr, was eine horizontale sowie vertikale Integration erfordert. Diese Integrationsformen gilt es in einem Unternehmen sowie in einem Unternehmensnetzwerk umzusetzen. In diesem Beitrag wird zunächst nur ein Unternehmen bzw. ein Produktionssystem betrachtet.

Es ist somit die Frage zu beantworten, wie eine durchgehende homogene Integration aller Komponenten wie z. B. zwischen ERP, MES, Simulation, Qualitätsdatenerfassung, MDE und BDE, Steuerungen, Sensoren und vor allem dem Menschen zu realisieren ist, ohne dabei Daten redundant zu halten. Gleichzeitig soll allen Elementen die Möglichkeit gegeben werden, auf einer aktuellen Echtzeit-Datengrundlage zu arbeiten. Dieser Beitrag stellt hierzu ein Agentensystem als ganzheitliches Schnittstellensystem vor, welches eine dezentrale, vertikale und horizontale Kommunikation von allen Akteuren in der Produktion ermöglicht. Hierzu wird im folgenden Kapitel zunächst erörtert, warum ein durchgehender Datenaustausch im Hinblick auf organisatorische Prozesse nötig ist und wie Daten mit Entscheidungsprozessen in Unternehmen zusammenhängen. Daraufhin wird im dritten Kapitel der aktuelle Vernetzungsstand analysiert. Hierzu wird ein umfassender Überblick über die Grundlagen des Datenaustausches präsentiert und verwendete Begriffe wie z. B. der Begriff Schnittstelle erörtert. Dies bündelt in eine Forschungs- und Entwicklungslücke, die durch den im vierten Abschnitt vorgestellten agentenbasierten Ansatz geschlossen werden soll.

Neben der Darstellung einer homogenen und durchgängigen Lösung ist das Ziel dieser Veröffentlichung der Abgleich zwischen dem innerhalb des Forschungsprojektes SOPHIE (siehe Kapitel 5) entwickelten agentenbasierten Ansatz und dem vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie (ZVEI) in Zusammenarbeit mit dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) u. a. parallel entwickelten Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (Hankel 2015). Mit diesem Referenzmodell wurde ein erster wichtiger Beitrag zur Standardisierung und Normung im Bereich Industrie 4.0 erarbeitet. Die aktuell wichtigste Komponente von RAMI bildet die Verwaltungsschale, die von Adolphs et al. (2016) genauer ausgearbeitet wird. Die allgemeine Konzeptbeschreibung von RAMI, die es zu implementieren gilt, wird im Anschluss mit dem dargestellten Agentenkonzept verglichen, um die Einbindung des Agentensystems in eine Industrie 4.0-Referenzarchitektur zu demonstrieren, welche für eine industrielle Anwendung existenziell ist. Abgeschlossen wird dieser Beitrag durch ein Fazit und einen Ausblick auf offene Fragestellungen und weiteren Forschungsbedarf im Kontext Digitalisierung und Automatisierung der Betriebsorganisation.

2 Grundlagen und Motivation

2.1 Digitalisierung

Die Digitalisierung ist kein neuer Trend. Bereits 2013 werteten nach einer durch die SAS Institute GmbH (2013) in Auftrag gegebenen Forsa-Umfrage 80 % der Unternehmen mit mehr als 600 Mitarbeitern und 71 % der Unternehmen mit weniger als 600 Mitarbeitern Maschinen-, Sensor- und Servicedaten aus, um damit in 81 % der Fälle in Produktionsprozesse eingreifen zu können. Erstaunlich hierbei ist, dass nur ca. 60 % der Daten genutzt wurden.

Doch was bedeutet Digitalisierung genau? Nach Hess (2013) besitzt der Begriff zwei Bedeutungen. Zum einen ist die Digitalisierung die Konvertierung von analogen Daten in digitale Speicher, zum anderen wird darunter die Veränderung bestehender Prozesse durch digitale Daten sowie neue Technologien und Systeme verstanden. Besonders der zweite Aspekt adressiert die Betriebsorganisation produzierender Unternehmen und wird daher in diesem Beitrag fokussiert. Bestehende Prozesse, wie die Planungs- und Entscheidungsprozesse der PPS, werden digitalisiert, um Entscheidung zu erleichtern und eine bessere Datenbasis zur Entscheidungsfindung zur Verfügung zu stellen. Dies führt zu einer notwendigen Anpassung der Prozesse.

Im Kontext aktueller Entwicklungsbestrebungen und der fortschreitenden Digitalisierung von Produktionssystemen wird häufig der Begriff Digitale Fabrik genutzt, der nach VDI 4499 Blatt 1 (2008) wie folgt definiert ist: „Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen - u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung -, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden.“ Auch dieser Begriff wird bereits seit einigen Jahren verwendet. Die VDI Richtlinie 4499 beispielsweise stammt aus dem Jahre 2008. Die durchgängige Digitale Fabrik hat sich jedoch bis heute nicht durchgesetzt. Modelle, Methoden und Werkzeuge sind auf dem kommerziellen Markt vorhanden und werden von der Industrie bereits eingesetzt. Eine komplette Durchgängigkeit meint hier jedoch den problemlosen Austausch zwischen bestehenden Systemen. Es fehlen vor allem Basiswerkzeuge wie universelle Schnittstellen und Datenmodelle. Um ein Netzwerk aus den vorhandenen Werkzeugen aufzubauen, fehlen geeignete und verbindliche Standards. Durch den Megatrend Digitalisierung erhalten der Begriff und die dahinterliegenden Konzepte jedoch einen neuen Stellenwert für Forschung und Industrie. Die steigende Aufmerksamkeit und neue Bestrebungen in dem Bereich machen die Vision der Digitalen Fabrik damit real und greifbar (Kreimeier et al. 2015) (Barthelmey et al. 2015) (Lenkenhoff et al. 2016).

Eine durchgehende digitalisierte Fabrik impliziert jedoch keine menschenleere Fabrik. Produktionssysteme sind und bleiben soziotechnische Systeme, in denen Mensch und Maschine sowie Softwaresysteme miteinander interagieren. Durch Digitalisierung, Entwicklung von CPS und Nutzung von CPPS kann der Mensch nicht ersetzt werden. Der Mensch steht aufgrund seiner Flexibilität sowie seines Wissens weiter im Fokus der Organisation und wird als bewertende sowie bestimmende Instanz seine Rolle als oberster Entscheider innerhalb der Betriebsorganisation behalten. (Block et al. 2015b)

2.2 Entscheidungen innerhalb der Betriebsorganisation

Im Rahmen der Betriebsorganisation sind beispielsweise zur Auftragsabwicklung bzw. Durchführung eines Produktionsprozesses kontinuierlich Entscheidungen zu treffen. Entscheidungen sind nach Rademacher (2014) Prozesse, bei denen alle beteiligten Organe aus zwei oder mehr Alternativen eine auswählen, um ihr Ziel zu erreichen bzw. ihre Aufgabe umzusetzen. Dabei existieren unterschiedliche Entscheidungsarten. Rademacher (2014) gibt hierzu einen ausführlichen Überblick. Kurz zusammengefasst können Entscheidungen unter Sicherheit oder Unsicherheit bzw. Risiko, komplizierte Entscheidungen und komplexe Entscheidungen unterschieden werden. Durch die zunehmende Komplexität in Produktionssystemen zählen die Entscheidungen in der Produktion zweifellos zu den komplexen Entscheidungen, bei denen eine große Anzahl von sich gegenseitig beeinflussenden Alternativen gegeben ist (Rademacher 2014). Ein Beispiel hierfür ist die hohe Anzahl an möglichen Reihenfolgen bei der Fertigungssteuerung. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass die Entscheidungen in Produktionssystemen ohne einen konstanten Datenaustausch zwischen Systemen und Menschen unter Unsicherheit getroffen werden.

Ferner arbeiten Müller und Riedel (2014) heraus, dass Entscheidungen erheblich von den konkreten Aufgaben des einzelnen Mitarbeiters in Planung und Betrieb abhängen. Darüber hinaus stellen die beiden Autoren dar, dass Entscheidungen immer eine Informationsverarbeitung beinhalten. Basis einer jeden Entscheidung sind somit Informationen, die im Kontext der Digitalisierung aus erfassten Daten generiert werden müssen.

Hinzu kommt, dass Entscheidungen vernetzt sind. Dies beinhaltet nicht nur die Abhängigkeit von verschiedenen Parametern in mehrere Alternativen, sondern viel mehr die Entscheidungen in organisationaler Sicht. Der Erfolg einer Entscheidung kann durch andere Entscheidungen in derselben oder einer anderen Abteilungen innerhalb einer Organisation beeinflusst werden. Es besteht ein Zielgrößenkonflikt der von Mayer und Nyhuis (2015) genauer analysiert wird. Zur Lösung solcher Entscheidungsproblematiken ist ein geeignetes Daten- bzw. Informationsmanagement in eine Organisation zu integrieren. Durch ein solches Informationsmanagement können den Mitarbeitern die für die jeweils zu treffende Entscheidung nötigen Informationen zur Verfügung gestellt werden. (Rehäuser/Krcmar 1996)

Informationen alleine reichen allerdings nicht aus. Hinzu kommt, dass Menschen grundsätzlich Angst vor Entscheidungen haben, da niemand einen Fehler begehen bzw. die Konsequenzen tragen möchte (Höhmann 2016). Daher sind Entscheidungen vor einer Aktion nach Möglichkeit abzusichern.

2.3 Zwischenfazit

Am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) der Ruhr-Universität Bochum (RUB) werden in mehreren Forschungsprojekten Assistenzsysteme entwickelt. Die Erfahrungen dabei zeigen, dass Tätigkeiten und Entscheidungen der Mitarbeiter einer Organisation durch die gezielte Informationsbereitstellung sehr gut unterstützt werden können. Zur effizienten Mitarbeiterunterstützung müssen dafür jedoch Daten ausgetauscht werden und dies regelmäßig, automatisiert und im Idealfall ohne Medienbrüche. Genau hier liegen die Schwächen der aktuellen Konzepte zur Mitarbeiterunterstützung. Entweder werden während der Entwicklungsphase feste Testdaten implementiert oder Schnittstellen zu starr konzeptioniert, so dass eine Überführung auf andere Anwendungsfälle schwierig und zeitaufwendig ist. Des Weiteren wird die Komplexität von Prototypen reduziert indem nur wenige Datenquellen integriert werden. Problematisch ist auch, dass die Grenze zwischen Unterstützung und Autonomie der Assistenzsysteme bzw. Automatisierung der Entscheidungen nicht mehr zu erkennen sind und daher die Akzeptanz dieser Systeme zu hinterfragen ist. Dies belegen auch Vernim und Reinhart (2015) mit ihrer Arbeit. Die Systeme müssen verständlich, beherrschbar und dürfen nicht vollständig autonom sein, um die Akzeptanz bei den Mitarbeitern zu erhalten.

Auch die von vielen Forschern fokussierte Bestrebung der Systemerweiterung um eine App-Landschaft oder webbasierte Oberflächen sowie mobile Endgeräte können den Manager, den Meister oder Werker nicht zwangsläufig unterstützen. Erst wenn alle Daten zur Verfügung stehen, kann eine gute Entscheidung getroffen werden. Dies bestätigen auch Nägele et al. (2015), wonach erst eine Vernetzung zum Mehrwert führt. Den aktuellen Forschungsbestrebungen im Bereich der Mitarbeiterunterstützung fehlt es an einem ganzheitlichen Ansatz, bei dem auch der Datenaustausch im Betrieb der Lösungen genauer betrachtet wird und nicht auf Entwicklungen sowie neue Ergebnisse im Bereich der IuK-Technologien spekuliert wird. Um das Begriffsverständnis zwischen der IT-Welt und den Betriebsorganisationsthemen zu vereinheitlichen, sollen im Folgenden die grundlegenden Mechanismen der aktuellen Technologien zum Datenaustausch dargestellt werden.

3 Aktueller Datenaustausch

Wie auch Müller und Riedel (2014) herausstellen, wird für die Mitarbeiterunterstützung eine erweiterte Vernetzung aller Elemente innerhalb eines Produktionssystems benötigt. Grundlage hierfür ist ein Verständnis des aktuellen Zustandes zum Datenaustausch in der Industrie. Daher soll in diesem Kapitel analysiert werden, wie die vertikale und horizontale Vernetzung aktuell umgesetzt wird und wo die Grenzen der aktuellen Architekturen im Betrachtungsbereich von Produktionssystemen liegen.

Grundlegend für jeden Datenaustausch sind die Präsenz eines Senders und einer bzw. mehrerer Empfänger. Der Sender besitzt Daten, die zu einem Empfänger transportiert werden müssen. Bei diesen Daten kann es sich auch um die Beschreibung einer Anfrage handeln.

Zur Übermittlung sind diese Daten in eine Form zu überführen, die übertragen werden kann. Des Weiteren sind diese gewandelten Daten für das gewählte Übertragungsmedium, auch Kanal genannt, anzupassen. (Meyer 2014)

Zum besseren Verständnis soll dieser Prozess in den folgenden Abschnitten näher betrachtet werden. Dazu werden die Begriffe Schnittstelle, Protokoll sowie Datenmodell definiert und mithilfe einiger Beispiele voneinander abgegrenzt. Ein zusammenfassender Überblick auf die kaum zu überblickende Heterogenität in diesem Bereich und speziell im Bereich der IT von Betriebsorganisationen kann nicht im Detail wiedergegeben werden. Es werden beispielhaft einige Konzepte aus Wissenschaft und Praxis genannt. Abgeschlossen wird dieser Abschnitt mit der Erläuterung einer konkreten Forschungslücke, für die in den folgenden Kapiteln ein Lösungsansatz dargestellt werden soll. Zunächst werden im Folgenden jedoch die grundlegenden Anforderungen an den Datenaustausch in Produktionssystemen beschrieben.

3.1 Anforderungen an den Datenaustausch

Aus der dargestellten Motivation lassen sich einige Anforderungen an den Datenaustausch innerhalb von Produktionssystemen ableiten. Zunächst sollte der Datenaustausch aufgrund der aktuell vorherrschenden heterogenen Systemwelt plattformunabhängig und offen für Erweiterungen sein. Des Weiteren geben 27 % Prozent der Unternehmen in der bereits erwähnten Forsa Studie der SAS Institute GmbH (2013) als Gründe gegen die Auswertung von Maschinendaten Kostengründe an. Daher sind Schnittstellen so zu konzeptionieren, dass diese einfach in Betrieb zu nehmen sowie zu warten sind. Eine Leitlinie sollte hier sein, dass eine Konfiguration anstelle einer Programmierung anzustreben ist. Daraus ergibt sich eine Kostenreduktion. Weitere grundlegende Basisanforderungen sind die Geschwindigkeit oder die Sicherheit. Des Weiteren sind im Kontext von Industrie 4.0 Autonomie,

Flexibilität sowie Dezentralität zu nennen, so dass alle Elemente ohne zentrale Vermittlungsplattformen oder Datenbanken Daten austauschen können.

3.2 Schnittstellen

Zum Datenaustausch bedarf es einheitlicher Schnittstellen zwischen den Systemen. Aus organisationaler Sicht kann eine Schnittstelle nach Greiling und Dudek (2009) wie folgt definiert werden: „Eine Schnittstelle ist eine Übergangs- bzw. Verbindungsstelle zwischen im Prozess verbundenen organisatorischen Einheiten, Abteilungen bzw. Mitarbeitern, die unterschiedliche Aufgaben-, Kompetenz- oder Verantwortungsbereichen unterliegen und durch die Wertschöpfungskette verbunden sind. Die Schnittstelle überträgt Informationen, Materialien und/oder Dienstleistungen.“

Neben diesem sehr allgemeinen Verständnis im Kontext der Betriebsorganisation, muss der Begriff im Kontext der Digitalisierung weiter spezifiziert werden. So ist eine Schnittstelle im Duden folgendermaßen definiert: Eine Schnittstelle ist eine „Verbindungsstelle zwischen Funktionseinheiten eines Datenverarbeitungs- oder -übertragungssystems, an der der Austausch von Daten oder Steuersignalen erfolgt“ (Duden 2016).

Darüber hinaus wird der Begriff im MES-Fachlexikon des MES-Dachverbandes e.V. wie folgt dargestellt: „Eine Schnittstelle ist eine genormte Plattform, die die Kommunikation zwischen verschiedenen Hardware- bzw. Software-Komponenten ermöglicht.“ (Glück 2014)

Zusätzlich können nach Lipinski et al. (2016b) die Schnittstellentypen Maschinen bzw. Hardwareschnittstelle, Netzwerkschnittstelle, Daten- bzw. Softwareschnittstelle und Benutzerschnittstelle unterschieden werden. Im Folgenden werden nur Softwareschnittstellen, die einen direkten Datenaustausch zwischen Programmen ermöglichen, betrachtet und mit dem Begriff Schnittstelle gleichgesetzt. Wie eine Datenübertragung zwischen Softwareeinheiten funktioniert, wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

3.3 Datenübertragung zwischen Systemen

Grundlegend für den Datenaustausch zwischen zwei oder mehr Systemen kann das von der ISO (Internationale Standardisierungsorganisation) standardisierte OSI (Open Systems Interconnection) Schichtenmodell herangezogen werden. Auf sieben Schichten wird die Kommunikation zwischen Netzwerkteilnehmern beschrieben, indem die Datenübertragung in sieben Teilprobleme heruntergebrochen wird. Das OSI-Modell ist in der Tabelle 1 dargestellt. Die ersten vier unteren Ebenen beschreiben den Datentransport, die obersten drei Schichten die Anwendungsorientierte Datenverarbeitung. (Wellenreuther/Zastrow 2015) Die unterste Ebene bildet den Übergang zum Typ Netzwerkschnittstelle.

Tabelle 1: OSI-Schichtenmodell nach (Wellenreuther/Zastrow 2015)

| Schicht | Beschreibung | Beispiel |
|-------------------------------------|---------------------|----------------|
| 7 – Anwendungsschicht | Anwendung | XML |
| 6 – Datenerstellungsschicht | Datenformate | Datenmodell |
| 5 – Kommunikationssteuerungsschicht | Verwaltung | HTTP |
| 4 – Transportschicht | Datenpakettransport | TCP |
| 3 – Vermittlungsschicht | Routing | IP |
| 2 – Sicherungsschicht | Netzgriff | MAC-Adresse |
| 1 – Bitübertragungsschicht | Übertragungstechnik | Ethernet-Kabel |

3.3.1 Protokoll

Basis einer jeden digitalen Kommunikation sind Protokolle. Ein Protokoll ist eine Sammlung von Vereinbarungen und Regeln zwischen Kommunikationsteilnehmern. Wobei ein Protokoll speziell eine Funktion erfüllt und somit je nach Komplexität eine oder mehrere Schichten des OSI-Modells abbilden kann. (Lipinski et al. 2016a)

Ein Protokoll bildet somit die Schnittstelle zwischen unterschiedlichen Ebenen der Datenübertragung. Vorteilhaft hierbei ist vor allem, dass eine Schicht im OSI Modell direkten Zugriff auf die unteren Schichten besitzt.¹ Daraus resultiert, dass im Bereich der Anwendungsorientierten Datenverarbeitung nur die hier nötigen Schichten betrachtet werden müssen. (Wellenreuther/Zastrow 2015) Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch ein Protokoll der Kommunikationskanal beschrieben wird.

3.3.2 Datenmodell

Damit Systeme jedoch nicht nur kommunizieren können, sondern sich auch verstehen, ist auch eine einheitliche Sprache notwendig. Diese Sprache ist eine weitere Komponente einer Schnittstelle und enthält Semantik sowie Syntax der zu kommunizierenden Daten, die auf der obersten Schicht des OSI-Modells von der jeweiligen Software verstanden werden kann. Dies wird als Datenmodell bezeichnet. Durch das Datenmodell wird beschrieben, wie die einzelnen Daten zusammenhängen. Des Weiteren können die Daten erst durch die Fest-

¹ Beispiele: Das Internet Protocol (IP) beispielsweise definiert den Transport einer Nachricht innerhalb eines Netzwerks an einen per IP-Adresse definierten Teilnehmer. Das Transmission Control Protocol (TCP) wiederum definiert den Transport einer eingehenden Nachricht beim jeweiligen Teilnehmer an ein per Port definiertes Programm. (Wellenreuther und Zastrow 2015)

legung eines Schemas automatisiert interpretiert und weiter verarbeitet werden. Zur Datenübertragung definiert jeder Kommunikationskanal zunächst ein eigenes Datenmodell, das den Nachrichtenaufbau festlegt. Darüber hinaus ist für den zu übertragenden Datensatz ein spezifisches Datenmodell notwendig, das im Inhaltsbereich einer Nachricht transportiert werden kann. (Wellenreuther /Zastrow 2015)

3.3.3 Aktuelle Schnittstellen, Protokolle und Integrationsansätze

Die klassische Datenübertragung in der Automatisierungstechnik mithilfe von analogen Spannungs- und/oder Stromwerten entspricht nicht dem Megatrend Digitalisierung. Einen ersten Schritt bilden Bussysteme wie z. B. PROFIBUS oder INTERBUS, bei denen eine Master-Slave Beziehung zwischen den Busteilnehmern realisiert wird und Daten digital ausgetauscht werden. In heutigen Systemen müssen darüber hinaus auch Daten zwischen Anlagen, das heißt zwischen Steuerungen ausgetauscht werden. Dies kann innerhalb der Bussysteme über Master-Master Beziehungen umgesetzt werden. (Wellenreuther/Zastrow 2015)

Mit fortschreitender Vernetzung reicht diese Kommunikation jedoch nicht mehr aus. Anlagen müssen mit anderen Systemelementen eines Produktionssystems wie Leitrechnern oder anderen Bereichen außerhalb der Fertigung Daten austauschen. Die Kommunikation wird komplexer und es wird eine zweite Kommunikationstechnologie benötigt. Hier hat sich das im Bürobereich verbreitete Netzwerk auf Ethernet-TCP/IP Basis etabliert. (Wellenreuther/Zastrow 2015) Aufgrund dieses De-facto Standards wird in diesem Beitrag ebenfalls nur ein Ethernet-basierter Datenaustausch betrachtet. Eine Überführung auf drahtlose W-LAN-basierte Netzwerke ist aber gegeben. Für den Datenaustausch zwischen Softwaresystemen sind somit nur Fragen oberhalb der vierten Ebene des OSI-Modells zu beantworten (siehe Tabelle 1).

Zur weiteren Datenübertragung bzw. beim Zugriff auf Steuerungsdaten hat sich in den letzten Jahren das OPC (OLE for Process Control) Protokoll etabliert, welches den Datenaustausch zwischen Automatisierungssystemen unterstützt (Wellenreuther/Zastrow 2015). Im Kontext von Industrie 4.0 wird die neueste OPC Version OPC-UA (Unified Architecture) als die universelle Schnittstelle zum Austausch von Maschinendaten zwischen Maschinen sowie zum Transport in die höheren Systeme wie ERP und MES angesehen. (OPC

Foundation 2015) Weitere Protokolle zum Austausch von Maschinendaten sind unter anderem MQTT (MQ Telemetry Transport) oder MTConnect (Lu et al. 2016).

Auf den höheren Ebenen werden als Schnittstellen zwischen Softwaresystemen beispielsweise ein dateibasierter Datenaustausch, direkte Datenbankzugriffe sowie REST (Representational State Transfer) eingesetzt. Auf eine genaue Definition muss hier verzichtet werden. Neben der eins zu eins Schnittstelle zwischen zwei Systemen existieren im Zuge der Digi-

talisierung und dem Dezentralisierungsgedanken mehrere Architekturen zur Enterprise Application Integration (EAI). Neben der Client-Server Architektur, existieren die Web-Architektur sowie Serviceorientierte Architekturen (SOA). Zur Umsetzung dieser groben Architekturen existieren diverse Muster. (Balzert/Liggemeyer 2011)

Besonders SOA werden im Kontext Industrie 4.0 durch den Fokus auf Dienste besonders häufig genannt. SOAs resultieren aus dem Bedarf einer hohen Flexibilität in Unternehmen, die sowohl organisatorisch als auch technisch motiviert ist. Bei SOAs handelt es sich um eine Architektur, bei der die IT-Struktur in Dienste zerlegt ist, die lose gekoppelt werden können. Dabei wird die Kopplung über definierte sowie offene Standards und Protokolle wie z. B. SOAP hergestellt. Zur technischen Umsetzung einer solchen Architektur kommen in Unternehmen Enterprise Service Bus (ESB) Systeme zum Einsatz. Solche softwaretechnischen Bussysteme dienen der durchgängigen Vernetzung der einzelnen Services. Der ESB übernimmt dabei als zentrale Instanz die vollständige Kommunikation zwischen allen Einheiten. (Starke 2015)

Als Standard zum Datenaustausch zwischen der Leitungs- und Steuerungsebene der Automatisierungspyramide definiert z. B. die ISA 95 des Datenmodell zwischen ERP und MES (ANSI/ISA 95). Zur einheitlichen Beschreibung von Maschinendaten ist in OPC-UA unter anderem bereits ein Datenmodell enthalten. Damit das UA-Modell automatisiert verarbeitet werden kann, wurde ein Companion-Standard zwischen OPC und AutomationML erarbeitet. AutomationML ist wiederum ein Datenmodell zur semantischen Beschreibung von Engineering-Daten von Maschinen und Anlagen. Innerhalb dieser Vereinbarung werden die OPC Daten mit den Sensoren in einer Maschine innerhalb von AutomationML referenziert. (AutomationML consortium/OPC Foundation 2016) Neben der Notwendigkeit der Verknüpfung von bestehenden Datenmodellen, existieren darüber hinaus für die unterschiedlichen Phasen des Produktionszyklus unterschiedliche Standards zur offenen Beschreibung der Informationen. Für eine durchgängige Digitale Fabrik sind Referenzmodelle zu definieren. Eine ausführliche Studie über Standards und Datenmodell wurde von Lu et al. (2016) durchgeführt.

3.4 Zwischenfazit

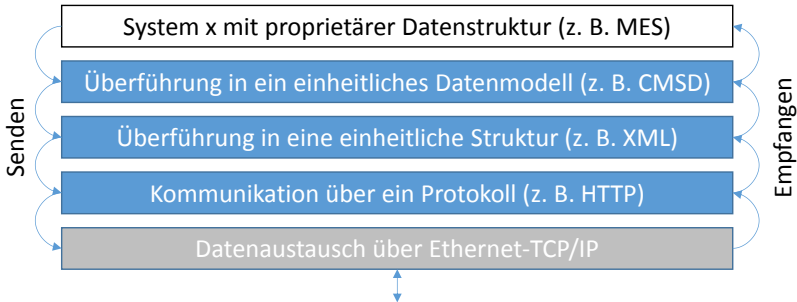


Abbildung 1: Notwendige Komponenten für eine durchgängige Kommunikation

In diesem Kapitel wurden die allgemeinen Grundlagen zum Datenaustausch zwischen Softwaresystemen und eingebetteten Systemen wie z. B. CPS analysiert. Hierzu werden einheitliche Schnittstellen benötigt. Dabei wurde Ethernet-TCP/IP als Basis definiert. Die fehlenden Komponenten für einen Datenaustausch sind in der Abbildung 1 zusammengefasst. Essentiell für eine funktionierende Kommunikation sind somit die Definition eines Protokolls, eines Datenmodells und einer Repräsentationsform dieses Datenmodells.

Innerhalb dieses Kapitels konnte die Heterogenität der Schnittstellen und Standards, wie durch Lu et al. (2016) erarbeitet, nicht in Gänze aufgezeigt werden. Es existiert aktuell kein De-Facto Standard zur Systemvernetzung und, da immer neue anwendungsorientierte proprietäre Lösungen entstehen, nimmt die Heterogenität weiter zu. Deshalb kommt es bei aktuellen IT-Architekturen zu Medienbrüchen sowie inkonsistenten und redundanten Daten und damit zu einem Verlust der Datenqualität mit weitreichenden Folgen auf die Effizienz der Prozesse. Gleichzeitig kann kein Integrationsansatz die Anforderung aus Kapitel 3.1 erfüllen.

Die Betriebsorganisation steht nun vor zwei großen Herausforderungen. Zum einen vor der steigenden Variabilität der Produktion durch veränderte Marktbedingungen. Dies führt direkt zur zweiten Problematik, da die weitere Flexibilisierung der Produktionssysteme mithilfe der Digitalisierung unterstützt werden soll. Hierbei ergeben sich jedoch Probleme durch das sehr unsichere Umfeld.

3.5 Forschungslücke

Zur Unterstützung der fortschreitenden Digitalisierung und um alle Elemente von Produktionssystemen miteinander zu vernetzen, müssen alle Elemente dieselbe Schnittstelle besitzen. Da dies für bestehende IT-Strukturen nicht gilt und auch in Zukunft aufgrund fehlender Einigung auf Standards nicht schnell ohne großen zeitlichen und finanziellen Aufwand umzusetzen ist bzw. die Systeme nicht aktualisiert werden können, fehlt ein Konzept zur einheitlichen sowie dezentralen Integration bestehender Systeme, das eine vertikale sowie horizontale Integration ermöglicht und die Ebenen in ihrer jetzigen Form auflöst. Problematisch hierbei ist auch, dass Produktionssysteme zu komplex und variabel sind, um sich in ein einheitliches Architekturmuster überführen zu lassen. Wie in Kapitel 3.3.3 dargestellt, existieren für viele Teilprobleme individuelle Lösungen und Standardisierungsansätze. Dies ist auch nicht zu revolutionieren. Denn individuelle Bedürfnisse und Anforderungen an die Schnittstellen können nicht alle gleichzeitig erfüllt werden. Hier ist beispielsweise die Echtzeitfähigkeit zu nennen. Diese Anforderung besitzt innerhalb einer Anlage höchste Priorität. In Bezug auf größere Datenmengen auf höheren Ebenen ist harte Echtzeit jedoch kaum realisierbar und nicht zwingend erforderlich. Hier kann allerhöchstens ein Kompromiss gefunden werden. Daher ist die Bündelung verschiedener Architekturen notwendig, bei der bestehende Schnittstellen bestehen bleiben und Systeme ergänzt werden. Die Teillösungen sind zu verbinden und so die Lücke zwischen horizontal und vertikal verteilten Elementen zu schließen.

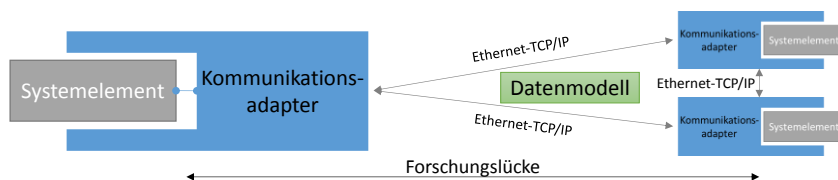


Abbildung 2: Bestehende Forschungslücke – Kommunikationsadapter & Datenmodell

Hieraus ergibt sich eine bedeutende Lücke für die industrielle Umsetzbarkeit der durchgängigen Digitalisierung von Produktionssystemen und eine große Herausforderungen für die Wissenschaft und Forschung. Die Forschungslücke ist in Abbildung 2 dargestellt und liegt in zwei stark voneinander abhängigen Bereichen. In erster Instanz fehlt es aktuell an einem Konzept, das alle in einer Organisation vorhandenen Daten bereitstellt, gleichzeitig Redundanzen vermeidet, autonom interagiert und den Datenaustausch ohne zu programmierende Anpassungen flexibilisieren kann. Es sind daher Kommunikationsadapter zu entwickeln. In zweiter Instanz wird zum durchgängigen Engineering, wie es auch Drumm et al. (2016) darstellen, eine einheitliche Syntax und Semantik d. h. ein Datenmodell benötigt, welches ebenfalls fehlt. Im Folgenden soll ein Konzept zur Schließung der Kommunikationslücke vorgestellt werden, dass die Kommunikationsbasis für das Datenmodell bildet.

4 Agentensystem zur horizontalen und vertikalen Integration

Digitalisierung und Vernetzung der Systeme bedeutet, dass die Elemente miteinander kommunizieren können. Wie zuvor herausgearbeitet, sind hierfür eine Kommunikationsgrundlage sowie ein einheitliche Sprache zu schaffen. Hierfür sind Übersetzungen von proprietären Datenstrukturen in eine offene Semantik und Syntax nötig. Damit die Systeme unabhängig von einer Sprache kommunizieren können, benötigen sie eine einheitliche Schnittstelle bestehend aus einer grundlegenden Nachrichtenstruktur und einem Übertragungsprotokoll.

Zur Umsetzung von verteilten Systemen und der Kommunikation zwischen Systemen existieren spezielle Message-Oriented Middleware (MOM) Softwaresysteme. Hiermit können Nachrichten über verschiedene Protokolle zwischen Systemen ausgetauscht werden. Problematisch ist hierbei vor allem die zentrale Komponente des Nachrichtenservers, der die Nachrichten verwaltet. Es existiert hier ein ähnliches Problem wie beim ESB (vgl. 3.3.3), da kein dezentrales System entsteht. Zusätzlich sollten die Kommunikationsadapter einige Funktionen wie z. B. die Übersetzung zwischen Datenstrukturen integrieren können, einfach zu erweitern sowie die Kommunikation einfach zu steuern sein. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung von Agenten, die nachfolgend betrachtet wird.

4.1 Agenten

In den letzten Jahren wurden viele Ansätze im Bereich der agentenorientierten Softwareentwicklung erarbeitet, da Agenten viele Potentiale für verteilte Systeme bieten. Zum Agentenbegriff existiert in der Literatur keine einheitliche Definition. Im Bereich der Automatisierungstechnik wird ein Agent nach VDI/VDE 2653 wie folgt definiert: „Ein Agent ist eine abgrenzbare (Hardware-oder/und Software-) Einheit mit definierten Zielen. Ein Agent ist bestrebt, diese Ziele durch selbstständiges Verhalten zu erreichen und interagiert dabei mit seiner Umgebung und anderen Agenten. Agenten sind ein Modellierungskonzept zur Lösung von technischen Aufgabenstellungen unabhängig von einer bestimmten Realisierungsform.“ (VDI/VDE 2653-1) Darüber hinaus besitzen Agenten eine gewisse Form von Autonomie, können reaktiv sowie proaktiv handeln und haben Kommunikationseigenschaften zur losen Kopplung mit anderen Agenten (Bellifemine et al. 2007).

Die Struktur von Agenten sowie die Kommunikation zwischen Agenten wurden von der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) spezifiziert. Unter anderem wurde neben grundlegenden Nachrichtenverlaufsprotokollen die Agent Communication Language (ACL) definiert, die die Grundlage jeder zwischen Agenten ausgetauschten Nachricht ist. Jede Nachricht enthält zu Beginn einen von 22 definierten Begriffen, der die Intention der Nachricht angibt. So können komplexe Kommunikationsstrukturen und Verhandlungen abgebildet werden. Zusätzlich sind Felder definiert, die die Nachricht mit Metainformationen wie z. B. Sender und Empfänger beschreiben. Die zu übertragenden Daten können über den Content-Slot innerhalb einer ACL-Nachricht abgebildet werden. (Wooldridge 2009)

4.2 Agentensystem

Ein Agent alleine ist wenig zielführend, daher werden mehrere Agenten in einem Agentensystem zusammengefasst, welches in der genannten VDI-Richtlinie folgendermaßen definiert ist: „Ein Agentensystem besteht aus einer Menge von Agenten, die interagieren, um gemeinsam eine oder mehrere Aufgaben zu erfüllen. Laufzeitumgebungen, Ablaufsysteme und Plattformen für technische Agenten sind eine mögliche Basis zur Realisierung von Agentensystemen, sie sind selbst keine Agentensysteme.“ (VDI/VDE 2653-1)

Eine solche Plattform ist beispielsweise JADE (JAVA Agent DEvelopment Framework). Das Framework kapselt viele Funktionen wie den Kommunikationsprozess für den Anwender im Hintergrund. JADE implementiert den FIPA-Standard und besitzt bereits einige wichtige Verwaltungsagenten wie z. B. einen Agent-Management-System (AMS)-Agenten und den Serviceverwalter-Agent als Directory Facilitator (DF)-Agent. Die Agenten kommunizieren Peer-to-Peer. Dabei wird zur plattformübergreifende Kommunikation der Agenten HTTP (Hypertext Transfer Protocol) genutzt. JADE unterstützt ebenfalls den HTTPs (HTTP Secure) Standard, so dass der Datenaustausch auch über einen verschlüsselten Kanal erfolgen kann. (Bellifemine et al. 2007)

4.3 Anwendungsbereiche von Agentensystemen

Agenten werden in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern eingesetzt. Der Einsatzbereich reicht von einfachen Unterstützungssystemen bis zu vollständig autonomen Systemen. Die wohl verbreitetste Form ist die Anwendung in Simulationen, in denen autonome Einheiten als Agenten modelliert werden. Im E-Commerce und Finanzsektor übernehmen Agenten die Aufgabe von Verhandlungen zwischen Käufern und Verkäufern bis hin zu Auktionen. Darüber hinaus verwalten Agenten Netzwerke oder überwachen Flugbewegungen. (Block et al. 2015a) (Wooldridge 2009)

Im Hinblick auf Produktionssysteme stellt Vogel-Heuser (2014) einige Agentensysteme im Kontext von Industrie 4.0 dar. Auffällig ist hierbei das Agentensysteme in Produktionssystemen aktuell primär auf der Shopfloor-Ebene als Teil eines CPS betrachtet werden. Eine Ausnahme im Bezug zur Fertigung stellen Ferrarini und Lüder (2012) vor. Die beiden Autoren beschreiben ein vollkommen agentenbasiertes Fertigungssteuerungssystem. Dieses System bildet die komplexeste Stufe. Durch die Nutzung von Agenten zur vollständigen Automatisierung von Terminierungs- sowie Planungs- und Steuerungs-Problematiken. Auf Basis autonomer Verhandlungen zwischen Agenten wird die IT-Infrastruktur vollkommen revolutioniert.

4.4 Agenten als Schnittstelle

Die aktuellen Ansätze fokussieren entweder die Maschinenkommunikation oder revolutionieren die vorhandenen IT-Systeme. Zusätzlich fokussiert keines der bekannten Konzepte den Menschen bzw. berücksichtigt die Mitarbeiterunterstützung. Daher ist der Ansatz in diesem Beitrag der Einsatz von Agenten zum Datenaustausch in bestehenden Strukturen im Kontext einer EAI zur Unterstützung von Mitarbeitern.

Im Allgemeinen bildet ein Agent eine Softwarehülle mit Kommunikationseigenschaften innerhalb eines Agentensystems. Diese Hülle kann flexibel ausgestaltet werden und moduliert vorhandene Problemstellungen. Hierdurch lassen sich proprietäre Schnittstellen innerhalb eines Agenten implementieren. In Abbildung 3 ist das Agentenkonzept mit seiner inneren Struktur dargestellt. Ein Agent stellt die Verbindung zwischen einem System oder einem Teilsystem her. Diese Aufgabe übernimmt die Gateway Komponente. Besteht die Verbindung zu einem System und der Agent hat Zugriff auf die Daten, müssen diese von einem Konverter in ein einheitliches Datenmodell übersetzt werden. Die Daten werden dann innerhalb des Nachrichtefeldes einer ACL-Nachricht transportiert. Ein Agent bildet damit den geforderten Kommunikationsadapter. Das nötige Datenmodell ist in dieser Konzeptversion noch anwendungsspezifisch zu wählen. Genauso wie die Codierung der Daten innerhalb einer Nachricht wie z. B. XML (Extensible Markup Language) oder JSON (JavaScript Object Notation).

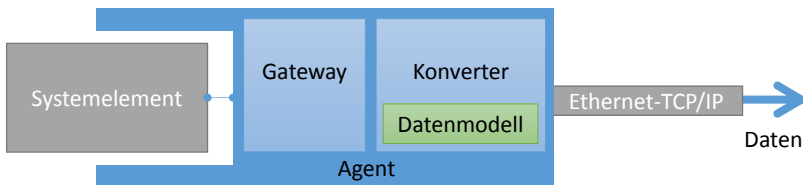


Abbildung 3: Agent als Schnittstelle

4.5 Agenten zum Aufbau einer SOA

Jeder Agent kapselt somit den Datenzugriff auf ein System. Darüber hinaus kann ein Agent weitere Funktionen wie z. B. die Verarbeitung von Daten integrieren. Diese Funktionalitäten können die Agenten als Dienste anbieten. Innerhalb eines Agentensystems entsteht hierdurch ein Dienstsysteem und somit eine SOA. Bereits vor einigen Jahren wurde die Eignung von Agenten für den Aufbau und die Umsetzung von SOAs angedacht. Beispielsweise arbeiten Petsch et al. (2008) Anwendungspotentiale für Agenten in SOAs heraus. Im

Bereich der ebenenübergreifenden industriellen IT-Strukturen sind hierzu keine Konzepte veröffentlicht.

Sind nun mehrere Agenten verfügbar, entsteht eine sehr flexible SOA, in der die Agenten als einzelne Module hinzugefügt werden können. Durch die Kommunikationsfähigkeit können die Agenten lose miteinander gekoppelt werden. Zur Ausführung muss dafür auf jedem System eine Agentenplattform laufen, die bestimmte Standarddienste, welche ebenfalls in Agenten gekapselt sind, mitbringt. Zu diesen Standarddiensten gehört ein Agent pro Plattform, der die Dienste der Agenten listet und verwaltet (DF-Agent). Darüber hinaus gehört zum Konzept noch ein weiterer Standardagent, der andere Agentenplattformen sucht und den Serviceverwalter-Agenten triggert sich mit dieser Plattform zu verbinden.

Auf dieser Plattform können nun weitere Agenten gestartet werden, die beispielsweise eine Schnittstelle zu einem spezifischen Softwaresystem anbieten. Idealerweise befindet sich diese Software auf derselben Plattform wie der Agent. Durch die einzelnen Agenten stehen die Softwaresysteme dann als Service zur Verfügung. Meldet der Agent den Systemservice beim Serviceverwalter-Agenten an, können andere Agenten den Serviceverwalter anfragen und nach bestimmten Services fragen. Der Serviceverwalter antwortet dann mit einer Liste von Agenten inklusive Namen und Adressen, die diesen Service anbieten. Es ist somit eine Orchestrierung von Diensten innerhalb einer jeden Agentenplattform und zwischen mehreren Agentenplattformen möglich. Das bedeutet, dass sich für jeden Anwendungsfall die nötigen Dienste via Kommunikation zu einem Netzwerk zusammenschließen und das Problem lösen können. (Balzert/Liggesmeyer 2011) Daraufhin kann eine Peer-2-Peer Kommunikation zwischen zwei oder mehr spezifischen Agenten ablaufen.

5 Prototypische Implementierung im Projekt SOPHIE

Der dargestellte agentenbasierte Datenaustausch wird im Forschungsprojekt SOPHIE (Synchrone Produktion durch teilautonome Planung zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung) entwickelt (Kreimeier et al. 2015). Hintergrund des Konzeptes ist die Synchronisierung von realer und virtueller Welt zur Unterstützung der PPS. Der Aufbau einer Digitalen Fabrik, welche hier als Materialflusssimulation nach VDI 3633 (2014) angesehen wird, soll als Basis eines Entscheidungsunterstützungssystems alle PPS relevanten Systeme wie z. B. ERP, MES und Simulationssoftware vernetzen. Mithilfe dieser Simulationen sollen Entscheidungsalternativen der Mitarbeiter validiert und die Ergebnisse wieder an den Mitarbeiter zurückgeführt werden. Wichtig für solche kontinuierlichen Simulationen im Betrieb ist, dass das Simulationsmodell aktuell ist. Bei Materialflusssimulationen gilt die 40-20-40 Regel, welche besagt, dass 40 % der Zeit für das Datensammeln, 20 % der Zeit für das Modellieren und für die Auswertung 40 % der Zeit einer Simulationsstudie benötigt werden (Barlas/Heavey 2014).

Dafür bietet sich die agentenbasierte Vernetzung an. Der Prozess des Datensammelns zu Simulationsvorbereitung ist ein langwieriger Prozess ohne direkte Wertschöpfung. Dieser

wird mithilfe einer agentenbasierten SOA automatisiert. Die Autonomie der Agenten ermöglicht es zusätzlich, aktiv auf Veränderungen von Daten zu reagieren und so eventuell neue Simulationen zur Bewertung definierter Alternativen zu starten. Eine beispielhafte Plattformkonstellation und die Vernetzung von datenliefernden Systemen (z. B. MES), datennutzenden Elementen (z. B. Simulation) sowie dem Menschen als Ergebnisinterpretier ist in der folgenden Abbildung 4 dargestellt.

5.1 Prototyp

Eine prototypische Implementierung wurde bereits erfolgreich umgesetzt und wird nun bei industriellen Anwendern in der Produktion erprobt. Das Agentensystem wird mithilfe des Frameworks JADE umgesetzt. Der vorhandene DF-Agent wurde dahingehend erweitert, dass eine Kopplung von mehreren unabhängigen Plattformen automatisiert erfolgt. Jede Plattform repräsentiert dabei primär ein Softwaresystem und seine Nutzer. Die Plattformen finden sich selbst via Broadcast mithilfe eines integrierten Webservers. Ein Auffinden via Multicast ist generell möglich, hängt jedoch von der Offenheit der Anwender-IT ab.

Die Agenten dienen innerhalb des Projektes wie beschrieben sowohl als System-Connector, als auch als Hülle für zusätzliche Dienste innerhalb des Workflows zur Verarbeitung der Daten. Beispielhaft ist der DataCollector-Agent zu nennen, der den Dienst kapselt, auf Anfrage eines Simulationsagenten bei allen Systemen relevante Simulationsdaten abzurufen, die Antworten zusammenzufügen und einen gebündelten Datensatz an die Simulation zurückzusenden. Die Aufgaben Simulieren und Datensammeln wurden nach dem Prinzip Separation of Concerns in zwei Agenten und Dienste getrennt.

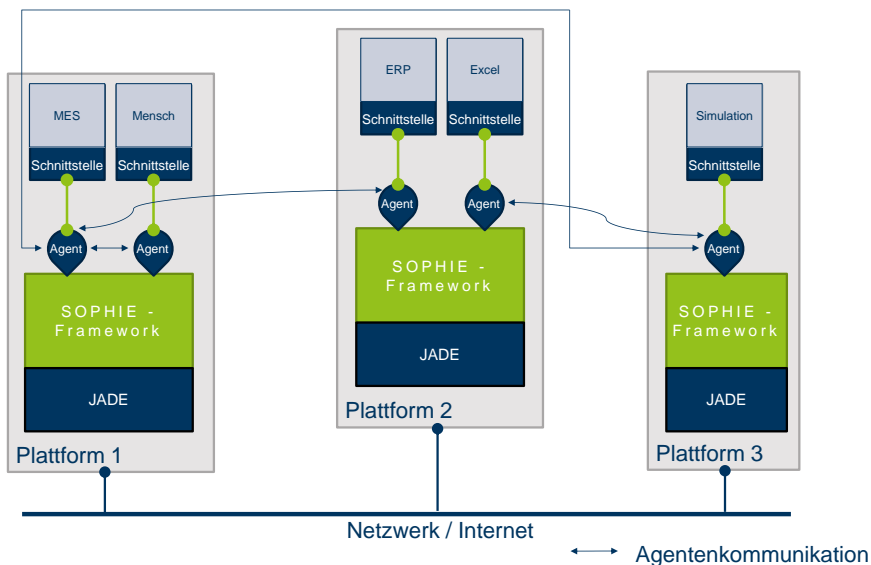


Abbildung 4: Agentenbasierte SOA innerhalb von SOPHIE

5.1.1 Schnittstellen

Zur Realisierung wurden in der ersten Phase die Schnittstellen zur Simulationsumgebung PlantSimulation und zwei datenliefernden Systemen implementiert. Der Gateway zur Simulation des Simulationsagenten wird mittels einer Socket-Verbindung und einer dateibasierenden XML-Schnittstelle realisiert. Zusätzlich wurden zwei Agenten, die eine Schnittstelle zu ERP und MES darstellen sollen, umgesetzt. ERP und MES werden in der aktuellen Phase durch zwei Excel-Tabellen dargestellt, so dass eine Schnittstelle zu Excel implementiert wurde. Dabei wird mittels einer Library direkt auf die Excel-Datei zugegriffen. Die dateibasierten Schnittstellen werden nun bei den Anwendern auf reale Datenbanksysteme überführt. Die Offenheit und Flexibilität des agentenbasierten Konzeptes und die Möglichkeit auch Datensätze aus verschiedenen Systemen zu bündeln vereinfacht die Einführung und Anpassung an bestehende industrielle Strukturen.

5.1.2 Datenmodell

Zum Datenaustausch zwischen IT-Systemen und Materialflusssimulationen existiert ein Datenmodell namens Core Manufacturing Simulation Data (CMSD), welches im Rahmen des Projektes ausgewählt wurde. CMSD ist primär zum Austausch zwischen Softwaresys-

temen und Simulationsanwendungen entwickelt worden. CMSD enthält dabei Bereiche zur Beschreibung von Produkten und deren Verknüpfungen, die Abbildung von Aufträgen mit Arbeitsplänen ist möglich, Kalender und Aufgabenliste können abgebildet werden und Ressourcen inklusive der simulationsrelevanten Eigenschaften und Status-Informationen können modelliert werden. Das Datenmodell stammt von der Simulation Interoperability Standards Organization (SISO) und steht sowohl als UML Spezifikation (SISO 2010), als auch als XML Beschreibung zur Verfügung (SISO 2012). Die Daten aus ERP und MES werden innerhalb der spezifischen Konverter der Agenten in die XML Darstellung von CMSD überführt und als ACL-Nachricht zwischen den Agenten ausgetauscht.

5.2 Integration des Menschen

Das Alleinstellungsmerkmal des Agentensystems innerhalb des Projektes SOPHIE ist die Integration des Menschen. Aufgrund der Offenheit des Konzeptes sowie der gewählten Plattform JADE können zusätzliche Komponenten in den Agenten sowie Agentenplattformen integriert werden. Zusätzlich zu den Systemschnittstellen und der Kommunikation zwischen den Agenten konnte auch die Mensch-Maschine-Schnittstelle integriert werden. In Form von webbasierten grafischen Oberflächen kann auch der Mensch mit einem Agenten kommunizieren. Dazu wurde die Agentenplattform um einen Webservice erweitert. Der Mitarbeiter kann hierüber auch über mobile Endgeräte mit einem Agenten, der für den Mitarbeiter spezifische Dienste ausführt, oder mit anderen Agenten wie dem Simulationsagenten kommunizieren und so beispielsweise eine Simulation starten und die Ergebnisse visualisieren. Eine ausführliche Beschreibung hierzu ist in (Block et al. 2016) zu finden.

5.3 Zwischenfazit

Innerhalb des SOPHIE-Projekts konnte der agentenbasierte Schnittstellenansatz bereits erfolgreich getestet werden. Im Weiteren sind vor allem Agenten mit Schnittstellen zu anderen kommerziellen Systemen sowie Anbindungen an Maschinen zu implementieren, um direkt Maschinendaten in Simulationen nutzen zu können. Ferner sind Sicherheitsmechanismen innerhalb der Agentenkommunikation genauer zu untersuchen. Zum anderen zeigt die Nutzung des CMSD erste Hürden. So herrscht trotz einer Spezifikation eine hohe Komplexität beim Datenformat. Es ist nicht immer eindeutig, wie die Daten von Struktur A auf B zu übertragen sind. Oft existieren mehrere Möglichkeiten oder bestimmte organisationsspezifische Daten lassen sich überhaupt nicht abbilden. Eine Erweiterung wird im Rahmen des Projektes umgesetzt. Dieses ist vor allem beim Rücktransport von Simulationsergebnissen notwendig, da Simulationsergebnisse aktuell nicht abgebildet werden können (Bergmann/Strassburger 2015).

6 Potentiale

Das dargestellte agentenbasierte Konzept zur ganzheitlichen Vernetzung bietet viele Potentiale. Aufgrund der Modularität und Autonomie der Softwareeinheiten kann mit der Dezentralität ein wichtiges Ziel von Industrie 4.0 umgesetzt werden. Durch die Agenten können nun die einzelnen Teilbereiche innerhalb der Automatisierungspyramide aufgelöst bzw. die Lücken geschlossen und Verbindungen zwischen den Bereichen hergestellt werden. Eine Auflösung der Ebenen wird hierdurch möglich. Zusätzlich werden die aktuellen Konzepte und Systeme durch diese Vernetzung effizienter, da der zeitaufwendige Prozess des Datensammelns entfällt und mögliche Fehler bei manueller Verarbeitung reduziert werden können. Darüber hinaus können neue Ansätze und Möglichkeiten für neue Werkzeuge sowie Assistenzsysteme wie z. B. die dargestellte simulationsbasierte Planungsunterstützung entstehen.

Der erste ganzheitliche Standardisierungsansatz im Kontext Industrie 4.0 wurde vom ZVEI in Zusammenarbeit mit anderen Gremien entwickelt. Dieser Ansatz bündelte im Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), welches im April 2015 vorgestellt wurde. Das grundlegende Konzept von RAMI ist in Abbildung 5 dargestellt. Auf drei Achsen, nämlich den „Hierarchy Levels“, dem „Life Cycle & Value Stream“ sowie „Layers“ lassen sich alle Entwicklungsrichtungen der vierten industriellen Revolution lokalisieren und schaffen so ein gemeinsames Verständnis über die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der Lösungen. (Hankel 2015) Ein Jahr später wurde die DIN SPEC 91345 (2016) zu RAMI veröffentlicht.

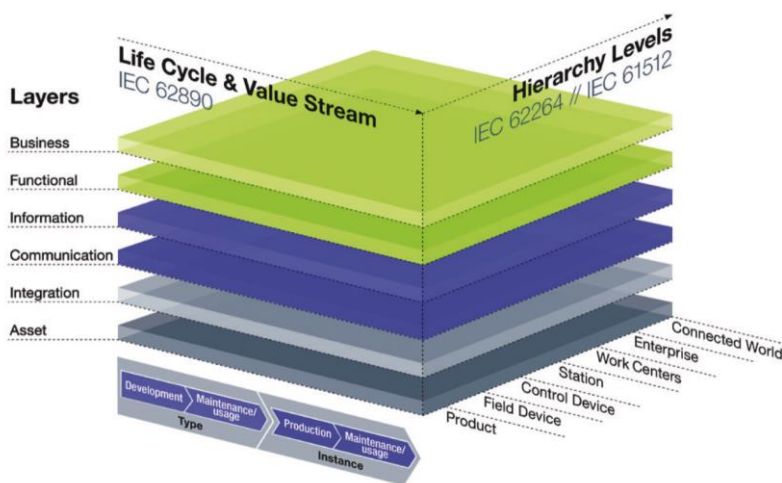


Abbildung 5: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) - (Hankel 2015)

Das Referenzarchitekturmodell dient der Verortung einer „Industrie 4.0 Komponente“ im Hinblick auf die vertikale sowie horizontale Integration im Produktlebenszyklus. Ein wichtiger Bestandteil zur Umsetzung der Vernetzung aller technischen Gegenstände, die in RAMI Assets genannt werden, bildet die so genannte Verwaltungsschale. Zur Überführung eines Assets in die Informationswelt muss das Asset eine einzigartige sowie identifizierbare Einheit mit Kommunikationsfähigkeiten bilden, die durch Daten seine Funktion beschreibt. Zur Umsetzung dient die Verwaltungsschale, die zusammen mit dem Asset die „Industrie 4.0 Komponente“ bildet. Die Verwaltungsschale bildet das Bindeglied zum Asset und erweitert das Asset so um die angestrebten Anforderungen wie z. B. die Kommunikationsfähigkeit. Die technische Realisierung dieser Verwaltungsschale wird in der Spezifikation nur mit „I4.0-konform“ beschrieben. Hinzu kommt, dass die Schalen nicht zwangsläufig auf der Asset-Hardware ausgeführt werden müssen. Die Schalen können auch auf anderen Systemen betrieben oder sogar auf mehreren Systemen geschachtelt betrieben werden. (DIN SPEC 91345 2016) RAMI bildet somit eine Architektur zur softwaretechnischen Implementierung.

Das in diesem Beitrag dargestellte Agentenkonzept erfüllt unabhängig vom Datenmodell die aktuellen RAMI Anforderungen. Dabei kann die Verwaltungsschale mit allen Anforderungen durch einen Agenten umgesetzt werden. Die Ergebnisse im Projekt SOPHIE bilden somit einen ersten Entwurf zur Umsetzung des Referenzmodells. Innerhalb von SOPHIE wird aktuell nur ein Teilbereich von RAMI, der durch die Achsen „Hierarchy Levels“ und „Layers“ aufgespannt wird, betrachtet. Die Offenheit des Agentenkonzeptes bietet jedoch das Potential auch unternehmensübergreifend zu vernetzen sowie den Produktlebenszyklus zu berücksichtigen und so den vollen Umfang von RAMI darzustellen.

Ein wichtiger Aspekt von Industrie 4.0, der auch in der DIN SPEC 91345 (2016) integriert ist, ist die besondere Betrachtung des Menschen. Dem Mensch wird eine übergreifende Intelligenz und Entscheidungsfreiheit zugesprochen. Daher sind geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen zu integrieren, die den Menschen mit den vorhandenen digitalen Informationen vernetzt und diese gezielt visualisiert werden, so dass der Mensch in seiner jeweiligen Rolle das System weiter beherrschen kann. Auch diese Anforderung ist mittels webbasierter Oberflächen innerhalb des dargestellten Agentensystems bereits integriert worden.

7 Fazit und Ausblick

7.1 Fazit

In diesem Beitrag wurden zu Beginn die Grundlagen zu einem durchgängigen Datenaustausch herausgearbeitet und Systemgrenzen für die durchgängige Vernetzung in Produktionssystemen aufgezeigt. Für die Schwachstellen der aktuellen Vernetzung wurde daraufhin ein Konzept zum agentenbasierten Datenaustausch vorgestellt. Die agentenorientierte Denkweise bündelt die Vorteile aller bisher präsentierten Ansätze und erweitert diese.

Durch dieses Konzept können alle Softwaresysteme miteinander kommunizieren und müssen nicht verändert oder angepasst werden. Darüber hinaus lassen sich auch andere Dienste in einem solchen Agenten kapseln und können so wiederum anderen Agenten bzw. Systemen zur Verfügung gestellt werden. Beispielhaft ist hier z. B. ein OPC Client zu nennen, der dann die Brücke zwischen der OPC Kommunikation und den verteilten Agenten bilden kann. Agenten bilden somit die Möglichkeit zum Aufbau flexibler ganzheitlicher CPPS, wobei das in diesem Beitrag dargestellte Agentensystem kein vollständig autonomes System bildet, das den Menschen ersetzt. Es ist ein Unterstützungssystem zur durchgängigen Digitalisierung und Vernetzung aller cyber-physischen Elemente. Durch das dargestellte Systemkonzept und die Umsetzung im Projekt SOPHIE können alle Elemente miteinander kommunizieren und Daten austauschen. Dies unterstützt menschliche Rollen (z. B. Fertigungssteuerer, Meister, Produktionsplaner) bei ihren täglichen Arbeiten, da alle relevanten Informationen für ihre Entscheidungen bedarfs- und rollengerecht zur Verfügung stehen.

7.2 Ausblick

Im vorherigen Kapitel 6 wurde ein kurzer Vergleich zwischen RAMI und dem agentenorientierten Ansatz dargestellt. Hierbei wurde festgestellt, dass der Agent einen ersten Entwurf für die Umsetzung eines Teils der Verwaltungsschale innerhalb von RAMI bildet und aktuelle Anforderungen erfüllt. Innerhalb dieses Beitrags wurde in Kapitel 3 als zweite Forschungslücke das fehlende Datenmodell herausgearbeitet. Innerhalb von SOPHIE wird CMSD verwendet. Um aber weitere Aspekte und andere Phasen zu betrachten, ist ein übergreifendes Datenmodell oder die Verknüpfung bestehender Modelle zwingend erforderlich. Zusätzlich ist zu hinterfragen, ob Standards wie z. B. die ISA 95, die häufig als Grundlage für Implementierungen und Systemstrukturen genutzt werden, in Zukunft mit dem langsamen Auflösen bzw. Überlappen der aktuellen Schichten der Automatisierungspyramide weiter Bestand haben können oder hier grundlegende Überarbeitungen bestehender Standards notwendig sind. In diesem Kontext werden von Adolphs et al. (2016) bereits einige Ansätze beschrieben. Diese gilt es nun mit den aktuellen Bestrebungen zu vergleichen und weitere Aspekte von RAMI in die Agentenarchitektur zu überführen sowie den Menschen mittels Visualisierungen noch stärker zu integrieren.

Danksagung

Die Fragestellung in diesem Artikel wird im Rahmen des Forschungsprojektes „SOPHIE“ (Kennzeichen 01IM14005H), welches vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) als Projektträger betreut wird, untersucht.

Literatur

- Adolphs, P.; Auer, S.; Bedenbender, H.; Billmann, M.; SE, B.; Coskun, G. et al., 2016.
Statusreport - Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0 - Komponente. Struktur der Verwaltungsschale. Düsseldorf, Frankfurt am Main: VDI, ZVEI.
- ANSI/ISA 95, 2000.
Enterprise-Control System Integration - Part 1: Models and Terminology. USA.
- AutomationML consortium; OPC Foundation, 2016.
AutomationML Whitepaper: OPC Unified Architecture Information Model for AutomationML.
- Balzert, H.; Liggesmeyer, P., 2011.
Lehrbuch der Softwaretechnik: Entwurf, Implementierung, Installation und Betrieb. 3. Aufl.. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Barlas, P.; Heavey, C., 2014.
TOWARDS AUTOMATED SIMULATION INPUT DATA. In: Tjahjono, B.; Heavey, C.; Onggo S.; van der Zee, D-J. (Hg.): Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop.
- Barthelme, A.; Lemmerz, K.; Lenkenhoff, K.; Brambach, T.; Nuding, W.; Deuse, J.; Kuhlenkötter, B., 2015.
Konzept zur technischen Dokumentation mit AML - Automatisierte Generierung und Bereitstellung komplexer Maschinen- und Anlagenstrukturen. In: wt Werkstattstechnik online, 11/12-2015, S. 843-848.
- Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hg.), 2014.
Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologie, Migration. Wiesbaden: Springer.
- Bellifemine, F. L.; Caire, G.; Greenwood, D., 2007.
Developing multi-agent systems with JADE. Chichester, u.a.: John Wiley.
- Bergmann, S.; Strassburger, S., 2015.
On the Use of the Core Manufacturing Simulation Data (CMSD) Standard. In: Experiences and Recommendations. In: Fall Simulation Interoperability Workshop. SISO.

Block, C.; Morlock, F.; Kreimeier, D.; Kuhlenkötter, B. 2015.

Intelligente Systemvernetzung durch Agentensysteme zur ganzheitlichen dezentralen Produktionsplanung und -steuerung. In: E. Müller (Hg.): Planung und Betrieb von Produktionssystemen im digitalen Zeitalter, Vernetzt planen und produzieren. Chemnitz: Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme. S. 207-216.

Block, C.; Freith, S.; Kreggenfeld, N.; Morlock, F.; Prinz, C.; Kreimeier, D.; Kuhlenkötter, B. 2015.

Industrie 4.0 als soziotechnisches Spannungsfeld. Ganzheitliche Betrachtung von Technik, Organisation und Personal. In: ZWF, 10/2015, S. 657-660.

Block, C.; Morlock, F.; Dorka, T.; Kuhlenkötter, B. 2016.

A Human Centered Multi-Agent-System for Production Planning and Control. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hg.): Applied Mechanics and Materials. Switzerland: Trans Tech Publications. S. 132-139.

DIN SPEC 91345, 2016.

Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Berlin: Beuth Verlag.

Drumm, O.; Eckardt, R.; Fay, A.; Gutermuth, G.; Krumsiek, D.; Löwen, U. et al., 2016.

Statusreport - Durchgängiges Engineering in Industrie 4.0-Wertschöpfungsketten. Düsseldorf: VDI.

Duden, 2016.

Schnittstelle. Hg. v. Bibliographisches Institut GmbH. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/node/712790/revisions/1151882/view> (abgerufen am 26.04.2016).

Ferrarini, L.; Lüder, A., 2012.

Agent-based technology manufacturing control systems. Research Triangle Park: ISA.

Glück, M., 2014.

Fachlexikon MES. Manufacturing Execution Systems - mehr als 600 Akronyme, Bezeichnungen und Schlüsselwörter aus der Begriffswelt Manufacturing Execution Systems. Offenbach: VDE-Verlag.

Greiling, M.; Dudek, M., 2009.

Schnittstellenmanagement in der Integrierten Versorgung. Eine Analyse der Informations- und Dokumentationsabläufe. Kohlhammer Verlag.

Hankel, M., 2015.

Industrie 4.0: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Hannover: ZVEI.

Hess, T., 2013.

Digitalisierung. Hg. v. Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik und Electronic Government. Online verfügbar unter <http://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/lexikon/technologien-methoden/Informatik--Grundlagen/digitalisierung> (abgerufen am 26.04.2016). Universität Potsdam.

Hirsch-Kreinsen, H.; Weyer, J., 2014.

Wandel von Produktionsarbeit – „Industrie 4.0“. Soziologisches Arbeitspapier Nr. 38/2014. Technische Universität Dortmund

Höhmann, M., 2016.

„Big Data ist ein Ausdruck von Unsicherheit.“. In: Harvard Business Manager, 4/2016, S. 76-79.

Kletti, J.; Schumacher, J., 2011.

Die perfekte Produktion. Manufacturing Excellence durch Short Interval Technology (SIT). Berlin: Springer.

Kreimeier, D.; Müller, E.; Morlock, F.; Jentsch, D.; Unger, H.; Börner, F.; Block, C., 2015.

Die synchrone Produktion. Ansatz mit teilautonomer Produktionsplanung/-steuerung und humanzentrierter Entscheidungsunterstützung. In: wt Werkstatttechnik online, 4/2015, S. 204-208.

Lenkenhoff, K.; Barthelmey, A.; Lemmerz, K.; Kuhlenkötter, B.; Deuse, J., 2016.

Communication Architecture for Automatic Plant Documentation Updates. In: Procedia CIRP 44 6th Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), Elsevier, S. 365-370.

Lipinski, K.; Lackner, H.; Laué, O. P.; Kafka, G.; Niemann, A.; Raasch, E. et al., 2016.

Protokoll. ITWissen - Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie. Online verfügbar unter <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Protokoll-protocol.html> (abgerufen am 03.05.2016)

Lipinski, K.; Lackner, H.; Laué, O. P.; Kafka, G.; Niemann, A.; Raasch, E. et al., 2016.

Schnittstelle. ITWissen - Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie. Online verfügbar unter <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/Schnittstelle-IF-interface.html> (abgerufen am 03.05.2016).

Lu, Y.; Morris, K. C.; Frechette, S., 2016.

Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. USA: U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology (NIST)

Mayer, J.; Nyhuis, P., 2015.

Kybernetische Modellierung abteilungsübergreifender Wirkzusammenhänge. In: ZWF 10/2015, S. 603-607.

Meyer, M., 2014.

Kommunikationstechnik. Konzepte der modernen Nachrichtenübertragung, 5. Aufl.. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Müller, E.; Riedel, R., 2014.

Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen. In: Kersten, W.; Koller, H.; Lödding, H. (Hg.): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Berlin: Gito Verlag, S. 211-237.

Nägele, J.; Stich, P.; Reinhart, G., 2015.

Intelligenter Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in der Produktion. In: ZWF, 10/2015, S. 649-652.

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P., 2012.

Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl.. Berlin, Heidelberg.

OPC Foundation, 2015.

OPC Unified Architecture. Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things. Scottsdale, u.a.: OPC Foundation.

Petsch, M.; Nissen, V.; Traub, T., 2008.

Anwendungspotenziale von Intelligenten Agenten in Service-orientierten Architekturen. In: Volker N.; Petsch; M.; Schorcht, H. (Hg.): Service-orientierte Architekturen. Wiesbaden: Gabler, S. 167-182.

Rademacher, U., 2014.

Leichter führen und besser entscheiden: Psychologie für Manager. Wiesbaden: Springer Gabler.

Rehäuser, J.; Krcmar, H., 1996.

Wissensmanagement im Unternehmen. In: Conrad, P.; Schreyögg, G. (Hg.): Wissensmanagement, Band 6. Berlin, New York: de Gruyter, S. 1-40.

SAS Institute GmbH, 2013.

Auswertung von Maschinendaten. Ergebnisse einer Befragung von Unternehmen des verarbeitenden Gewerbes. Industrie 4.0 - Wettbewerbsvorteile durch Analytics (Forsa-Umfrage).

Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), 2010.

Standard for: Core Manufacturing Simulation Data - UML Model. Orlando: SISO.

Simulation Interoperability Standards Organization (SISO), 2012.

Standard for: Core Manufacturing Simulation Data - XML Representation. Orlando: SISO.

Starke, G., 2015.

Effektive Softwarearchitekturen. Ein praktischer Leitfaden. 7. Aufl.. München: Hanser.

VDI 3633-1, 2014.

Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag.

VDI 4499-1, 2008.

Digitale Fabrik - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag.

VDI/VDE 2653-1, 2010.

Agentensysteme in der Automatisierungstechnik - Grundlagen. Berlin: Beuth Verlag.

VDI/VDE-GMA, 2013.

Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. Thesen und Handlungsfelder. Düsseldorf: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik.

Vernim, S.; Reinhart, G., 2015.

Production Planning and Control in Complex, Autonomous Systems - Acceptance by the Planner as Factor of Success for the Cooperation with such Systems. In: Wulfsberg, J. P.; Röhlig, B.; Montag, T. (Hg.): WGP Congress 2015 - Progress in Production Engineering. Pfaffikon, Switzerland: Trans Tech Publications, S. 453-460.

Ganzheitliche flexible Vernetzung durch Erweiterung bestehender IT-Strukturen zu Serviceorientierten Architekturen mithilfe von Agentensystemen zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung - Ein Konzept zur RAMI Umsetzung 259

Vogel-Heuser, B., 2014.

Agenten im Umfeld von Industrie 4.0. [6. Expertenforum, 07./08. Mai 2014]. Göttingen: Sierke-Verl.

Wellenreuther, G.; Zastrow, D., 2015.

Automatisieren mit SPS - Theorie und Praxis. Programmieren mit STEP 7 und CoDeSys, Entwurfsverfahren, Bausteinbibliotheken. 6. Aufl.. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Wooldridge, M. J., 2009.

An introduction to multiagent systems. 2. Aufl.. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons.