Industrie 4.0: Technologieentwicklung und sicherheitstechnische Bewertung von Anwendungsszenarien

baua: Bericht

baua:
Bundesanstalt für Arbeitsschutz
und Arbeitsmedizin

B. Kasper

Industrie 4.0: Technologieentwicklung und sicherheitstechnische Bewertung von Anwendungsszenarien

1. Auflage 2019
Dortmund/Berlin/Dresden

Die Veröffentlichung ist zum Thema "Aktueller Stand der Technologieentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 basierend auf verfügbaren Anwendungsszenarien (Use Cases) im Maschinen- und Anlagenbau und deren sicherheitstechnische Anforderungen" in der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin entstanden. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Autor: Björn Kasper
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelgrafik: Björn Kasper
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail *info-zentrum@baua.bund.de*
Internet *www.baua.de*

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

doi:10.21934/baua:bericht20190204 (online)

www.baua.de/dok/8813396

Inhaltsverzeichnis

Industrie 4.0: Technologieentwicklung und sicherheitstechnische Bewertung von Anwendungsszenarien

Kurzreferat

Im Rahmen der Literaturrecherche werden insgesamt neun Anwendungsszenarien (Use Cases) ausgewählt, um den aktuellen Stand der Technologieentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 für ausgewählte Industriebereiche darzustellen. Dazu werden zunächst die Konzepte, Grundlagen und Zusammenhänge von Industrie 4.0, die technologischen Basiskomponenten sowie die erforderlichen Referenzarchitekturen vorgestellt.

Die der aktuellen Literatur entnommenen Anwendungsszenarien werden danach inhaltlich zusammengefasst und in die beschriebenen Industrie 4.0-Konzepte eingeordnet hinsichtlich der in ihnen adressierten Paradigmen und der angewandten Basiskomponenten. Dabei konzentriert sich die Studie insbesondere auf Anwendungsszenarien aus den Bereichen der Fertigungs- und Produktionstechnik im Maschinen- und Anlagenbau. Darüber hinaus werden die Szenarien an den drei Dimensionen der Referenzarchitektur RAMI 4.0 als makroskopische Sicht gespiegelt sowie die vorgestellten Aspekte hinsichtlich der Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht herausgearbeitet.

Abschließend werden die Anwendungsszenarien dahin gehend bewertet, ob in ihnen grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte der funktionalen Sicherheit (Safety), der industriellen Angriffssicherheit (Security) sowie deren Wechselwirkungen untereinander betrachtet bzw. berücksichtigt werden. Diese Bewertungen basieren auf den Darstellungen der jeweils zitierten Literaturquellen.

Schlagwörter:

Industrie 4.0 (Smart Manufacturing), Anwendungsszenarien (Use Cases), Stand der Technologieentwicklung, technologische Basiskomponenten, Industrie 4.0-Paradigmen, Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0, Industrie 4.0-Komponente, funktionale Sicherheit (Safety), industrielle Angriffssicherheit (Security), Wechselwirkungen

Industry 4.0 (cf. smart manufacturing): Technology development and safety-security assessment of use cases

Abstract

In the context of a literature review, a total of nine application scenarios (use cases) are chosen in order to present the current status of technology development in the context of Industry 4.0 (cf. smart manufacturing) for selected industrial sectors. To this end, the concepts, fundamentals and relationships of Industry 4.0, the basic technological components as well as the required reference architectures will be presented.

The application scenarios taken from the current literature are then summarized with respect to content and classified into the described Industry 4.0 concepts with regard to the paradigms they address and the basic components used. The study concentrates in particular on application scenarios from the fields of manufacturing and production technology in mechanical and plant engineering. In addition, the scenarios are mirrored in the three dimensions of the reference architecture RAMI 4.0 as a macroscopic view, and the aspects regarding the Industry 4.0 component are worked out as the microscopic view.

Finally, the application scenarios are evaluated as to whether they fundamentally consider or take into account aspects related to functional safety, industrial security and their interactions with each other. These evaluations are based on the descriptions in the quoted literature sources.

Key words:

Industry 4.0 (smart manufacturing), use cases, status of technology development, basic technological components, Industry 4.0 paradigms, reference architecture model RAMI 4.0, Industry 4.0 component, functional safety, industrial security, interactions

1 Einleitung

„Industrie 4.0“ verknüpft modernste Informations- und Kommunikationstechnik mit der industriellen Produktion und Fertigung. Als treibende Kraft dieser Entwicklung wirkt die rasant zunehmende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft. Der Einzug der Digitalisierung in die industrielle Produktion und Fertigung könnte die Art und Weise, wie zukünftig in Deutschland produziert und gearbeitet wird, nachhaltig verändern und wird als vierte Industrielle Revolution bezeichnet. Nach der Dampfmaschine (1. Industrielle Revolution), dem Fließband (2. Industrielle Revolution), der Elektronik und der Informationstechnik (3. Industrielle Revolution) bestimmen nun intelligente Fabriken (sogenannte „Smart Factories“) die Entwicklung (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017a).

Als technische Grundlage für diese Veränderung in der Arbeitswelt werden intelligente, digital vernetzte Systeme gesehen. Mit ihrer Hilfe soll eine weitestgehend selbstorganisierte Produktion möglich werden: Menschen, Maschinen, Anlagen, Logistik und Produkte kommunizieren und kooperieren in der Industrie 4.0 direkt miteinander. Produktions- und Logistikprozesse zwischen Unternehmen im selben Produktionsprozess können intelligent miteinander verzahnt werden, um die Produktion noch effizienter und flexibler zu gestalten (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017a).

Auf diese Art und Weise könnten intelligente Wertschöpfungsketten entstehen. Diese schließen alle Phasen des Lebenszyklus eines Produktes mit ein – von der Idee eines Produkts über die Entwicklung, Fertigung, Nutzung und Wartung bis hin zum Recycling. Dadurch ließen sich Kundenwünsche von der Produktidee bis hin zum Recycling einschließlich der damit verbundenen Dienstleistungen mitdenken. Darüber hinaus könnten Unternehmen leichter als bisher maßgeschneiderte Produkte nach individuellen Kundenwünschen produzieren (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017a). Hieraus ergeben sich für die Industrie neuartige Möglichkeiten der Flexibilisierung sowie die Chance einer weitergehenden Qualitäts- und Effizienzsteigerung.

Um auch im Kontext der zukünftig denkbaren Industrie 4.0-Szenarien das heutige Sicherheitsniveau für die Beschäftigten erreichen oder steigern zu können, ergeben sich bei der Umsetzung der Konzepte von Industrie 4.0 für den Arbeitsschutz zahlreiche Herausforderungen bei der sicheren Gestaltung von Maschinen- und Anlagenteilen.

Hinsichtlich der *Sicherheit* von Maschinen und Anlagen der Industrie 4.0 werden zwei Aspekte unterschieden: zum einen die Produkt- und Betriebssicherheit (engl. *Safety*) sowie zum anderen die Angriffs- und Manipulationssicherheit der verwendeten Informations- und Netzwerk-Technologie (engl. *Security*). Beide Aspekte können sich gegenseitig beeinflussen. Aus Sicht des Arbeitsschutzes gilt es, diese Zusammenhänge zu betrachten. So kann beispielsweise mangelhafte Angriffssicherheit durch Manipulation der Maschinensteuerung(en) zum Ausfall von Schutzfunktionen führen und damit zur Gefahr für die Beschäftigten werden. Diese beiden Sicherheitsaspekte werden bislang von verschiedenen Fachdisziplinen mit unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen einzeln betrachtet, indem Risikobeurteilungen getrennt für die Aspekte Safety und Security durchgeführt werden.

Heutige sicherheitstechnische Konzepte (vor allem bezüglich Safety) gehen in der Konstruktions- und Designphase von definierten Anlagen aus, in denen zwar variable aber vorab klar definierte Prozesse ablaufen. Die sicherheitstechnischen Beurteilungsmethoden legen die Annahme zugrunde, dass die Maschine oder Anlage nach der Inbetriebnahme und der sicherheitstechnischen Abnahme nicht mehr verändert wird, ohne dass eine erneute sicherheitstechnische Überprüfung erfolgt.

Sich selbst konfigurierende Anlagen der Industrie 4.0 ergeben allerdings durch ihre flexible Vernetzung zur Laufzeit *Systeme von Systemen*, deren Struktur und Gesamtverhalten zur Entwicklungszeit der Einzelsysteme nicht oder nur schwer vorhergesagt werden können. All diese Eigenschaften führen zu Unsicherheiten in der Aussage über das zu erwartende Gesamtsystemverhalten. Damit stehen diese im Widerspruch zur heutigen Sicherheitsnachweisführung, die zentral auf der Annahme eines deterministischen, vorhersagbaren Systemverhaltens beruht (vgl. Liggesmeyer und Trapp 2016).

Zur Einordnung der in der Studie vorgestellten Industrie 4.0-Technologien sowie den sicherheitstechnischen Implikationen wird im Folgenden zwischen Betriebsfunktionen und Sicherheitsfunktionen von Maschinen und Anlagen differenziert.

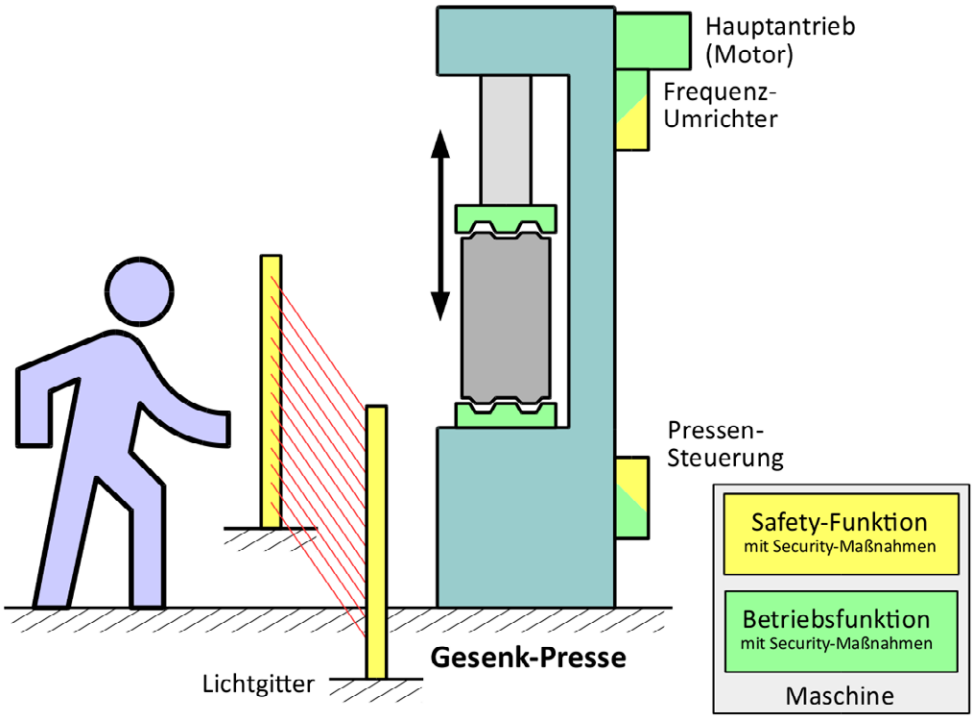

Abb. 1.1 Betriebsfunktionen und Sicherheitsfunktionen von Maschinen (Grafik: Kasper)

Jede Maschine oder Anlage beinhaltet *Betriebsfunktionen.* Diese werden von der Maschinensteuerung ausgeführt und tragen zur eigentlichen Wertschöpfung bei. Dies soll anhand des in Abb. 1.1 dargestellten Umform-Bearbeitungsprozesses durch eine Gesenk-Presse veranschaulicht werden.

Zur Ausübung der wesentlichen Betriebsfunktion der Presse „Umformen eines Halbzeuges (Rohling)“ wird das werkstück-spezifische Bearbeitungsprogramm auf der Pressensteuerung abgearbeitet. Dieses Programm steuert beispielsweise, welche

Verfahrbewegungen des Pressenstempels erforderlich sind, um die für das gewünschte Umformverhalten (plastische Verformung des Halbzeuges im Werkzeug) notwendigen Kräfte und Drücke zu erzeugen. Dieser Funktionszusammenhang wird in Abb. 1.2 in Form eines Blockschaltbildes dargestellt. Weiterhin gehören zur Betriebsfunktion die beteiligten formgebenden Pressenwerkzeuge (Ober- und Untergesenk) sowie der Hauptantriebsmotor mit dem Frequenzumrichter für die Strom- und Momentenregelung. Diese werden vom Bearbeitungsprogramm mit Hilfe auf der Steuerung vorhandener, prozessspezifischer Technologie-Konfigurationsdaten ausgewählt und konfiguriert (vgl. Abb. 1.1).

Mit dem Umformvorgang und den notwendigen Schließbewegungen der Pressenwerkzeuge unter Anwendung großer Kräfte und Drücke sind erhebliche Risiken für den Maschinenbediener verbunden. Um diese zu reduzieren, sind neben den klassischen Sicherheitsmaßnahmen, wie z. B. feststehenden trennenden Schutzeinrichtungen, sog. *Sicherheitsfunktionen* (engl. *Safety Functions*) als Maßnahmen der funktionalen Sicherheit integraler Bestandteil der Maschine (vgl. Abb. 1.1). Sicherheitsfunktionen werden von dem sicherheitsgerichteten Teil der Maschinensteuerung ausgeführt. Sie überwachen den Bearbeitungsprozess und führen die Maschine bei Erkennen eines gefährlichen Vorfalles in einen festgelegten sicheren Zustand und halten diesen aufrecht (vgl. DIN EN 61508-4:2011-02, VDE 0803-4:2011-02). Diese Überwachungsfunktion wurde im Blockschaltbild in Abb. 1.2 gezeigt. Wenn beispielsweise ein Mensch während der Bearbeitung in das Lichtgitter der Presse hineingreift, sorgt die diesbezügliche Sicherheitsfunktion dafür, dass die Schließbewegung der Pressenwerkzeuge umgehend gestoppt wird, bevor der Mensch die Gefahrenstelle physisch erreichen kann. Die Bewegung stoppt, bevor die Hand das Werkzeug erreicht.

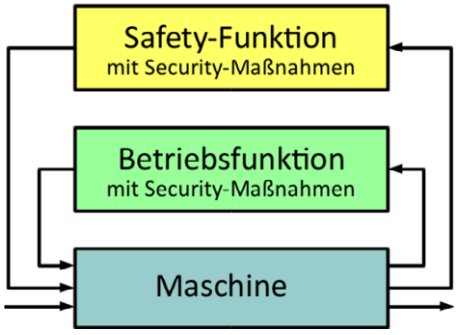

Abb. 1.2 Betriebs- und Sicherheitsfunktionen steuern und überwachen den Bearbeitungsprozess der Maschine (Grafik: Kasper)

Es ist daher essentiell, zwischen den Betriebs- und Sicherheitsfunktionen einer Maschine zu unterscheiden (siehe Abb. 1.3). Sicherheitsfunktionen dienen der Erreichung des „funktional sicheren Zustandes“ einer Maschine (verkürzt als *funktionale Sicherheit*) und werden oft als *Safety-Funktionen* bezeichnet.

Sicherheitsfunktionen bestehen stets aus sicherheitsgerichteten Sensoren (bspw. Lichtgitter, Laserscanner), der sicherheitsgerichteten Logik (Sicherheitsprogramm auf der Maschinensteuerung) sowie der sicherheitsgerichteten Aktorik (schnelles Stillsetzen gefahrbringender Maschinenbewegungen mit definierten und überwachten Bremsrampen). Damit wird gewährleistet, dass Fehlerzustände im Bearbeitungspro-

zess erkannt werden können und die vorgesehene Schutzwirkung für den Menschen eintritt.

Die sicherheitsgerichtete Logik wertet die Signale der Sensorik (Lichtgitter) aus und veranlasst im Fehler- bzw. Gefahrenfall den Aktor (Maschinenantrieb) in einen sicheren Zustand (Stillstand) zu gehen und diesen nicht zu verlassen. Besonders wenn diese sicherheitsgerichteten Signale über weite Strecken, über das allgemein zugängliche Internet oder im Kontext der Industrie 4.0-Konzepte über ungesicherte Medien (z. B. funkbasierte Netzwerke) übertragen werden, müssen geeignete Maßnahmen zur Manipulationsvermeidung ergriffen werden. Entsprechende *Security-Maßnahmen* sind z. B. eine Ende-zu-Ende-Verschlüsselung der Kommunikation oder die anwendungsspezifisch gezielte Reduktion von Funk-Reichweiten.

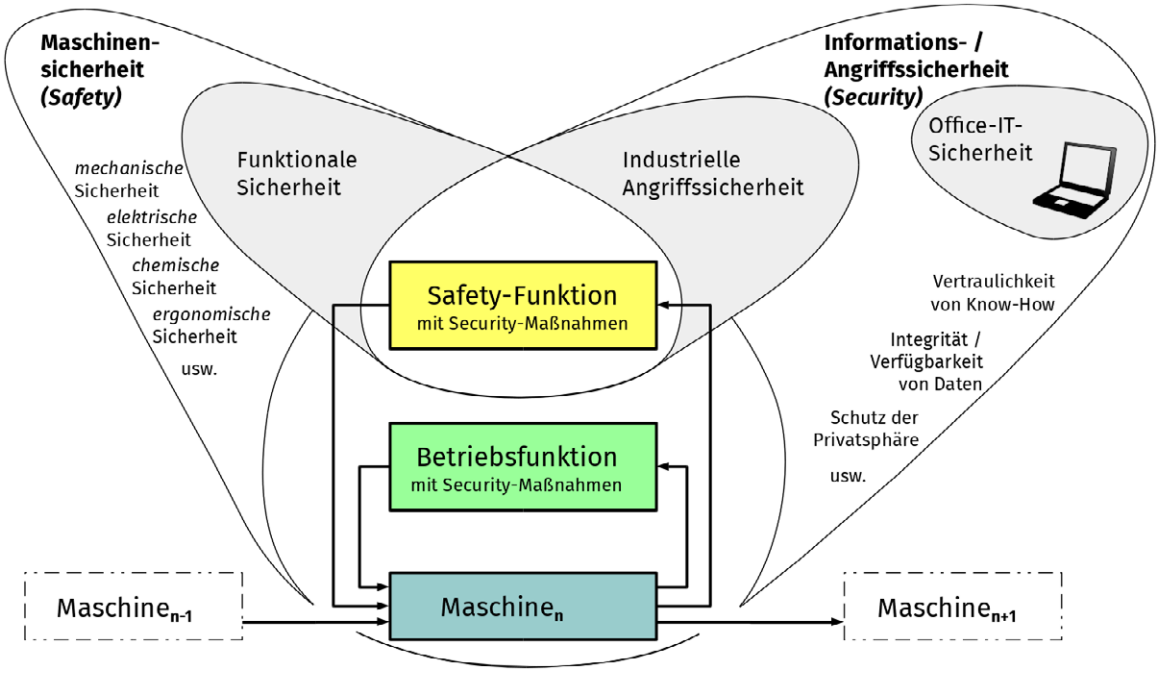

Abb. 1.3 Unterscheidung von Betriebs- und Sicherheitsfunktionen und Einordnung in die Schutzziele der Maschinen- und Angriffssicherheit (Grafik: Kasper; angelehnt an VDE-AR-E 2802-10-1:2017-04)

Obwohl auch Betriebsfunktionen Security-Maßnahmen erfordern können (z. B. Know-how-Schutz für Prozess- und Technologiewissen) fokussiert diese Studie ausschließlich auf den gemeinsamen Anwendungsbereich der *funktionalen Sicherheit* sowie der *industriellen Angriffssicherheit* (siehe Schnittmenge in Abb. 1.3) mit den jeweils repräsentierenden Basisnormen ISO 13849, IEC 61508 sowie IEC 62443. Nicht betrachtet werden in der Studie die Aspekte und Maßnahmen zur Erreichung der *Office-IT-Sicherheit* auf Basis der Normenreihe ISO 27000. Dies basiert auf der Erkenntnis, dass die Anforderungen der Sicherheitsfunktion an die Angriffssicherheit und die Anforderungen der Betriebsfunktion an die Angriffssicherheit getrennt ermittelt werden können. Weiterhin lassen sich die aus den Anforderungen abgeleiteten Maßnahmen der Angriffssicherheit der Sicherheitsfunktion und der Betriebsfunktion separat zuordnen (vgl. VDE-AR-E 2802-10-1:2017-04).

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, folgt der bisherige Stand der Sicherheitstechnik dem deterministischen Sensor-Logik-Aktor-Prinzip. Es steht allerdings zu erwarten,

dass in der stärksten Ausprägung von Industrie 4.0 Algorithmen aus dem Bereich des Maschinellen Lernens zukünftig auch im Maschinen- und Anlagenbau Verwendung finden werden, um die Produktionsprozesse flexibel und intelligent miteinander zu verknüpfen (vgl. Wickert 2017).

Darüber hinaus ist denkbar, dass auch Signale aus sicherheitsgerichteten Funktionen und Steuerungen in diese Entwicklung einbezogen werden könnten. Die sicherheitsgerichtete Reaktion ergibt sich dann nicht mehr deterministisch aufgrund zuvor definierter und reproduzierbarer Zustände, sondern auf der Grundlage einer Wahrscheinlichkeitsanalyse zur Laufzeit. Dazu müssen die verwendeten Signale und Daten noch nicht einmal wie bisher zwingend aus sicherheitsgerichteten Quellen stammen. Die Zuverlässigkeit könnte durch algorithmische Plausibilitäten, d. h. einen Abgleich mit anderen Signalen und Daten sichergestellt werden. Damit wird die Sicherheit einer Maschine zukünftig primär von der Sicherheit und Zuverlässigkeit lernfähiger Softwarealgorithmen abhängen. Neben vielen sich dadurch ergebenden Herausforderungen (insbesondere in Bezug auf die Sicherheitsnachweisführung) besteht auch die Chance, durch Auswertung der vorhandenen Datenmenge zurückliegender Ereignisse und Situationen mithilfe stochastischer Methoden des maschinellen Lernens, in jedem Moment potenziell gefährliche Situationen „vorhersehen“ zu können (vgl. Wickert 2017).

In vorliegender Studie wird der aktuelle Stand der Technologieentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 anhand ausgewählter Anwendungsszenarien (*Use Cases*) unter den Aspekten der sicherheitstechnischen Anforderungen für ausgewählte Industriezweige auf Basis einer Literaturrecherche dargestellt. Dazu werden zunächst die Konzepte, Grundlagen und Zusammenhänge von Industrie 4.0, die technologischen Basis-Komponenten sowie die erforderlichen Referenzarchitekturen eingeführt.

Danach werden in der aktuellen Literatur veröffentlichte Anwendungsszenarien inhaltlich kurz zusammengefasst sowie auf Grundlage der im vorigen Kapitel beschriebenen Industrie 4.0-Konzepte hinsichtlich der adressierten Eigenschaften und technologischen Basiskomponenten eingeordnet. Dabei konzentriert sich die Studie insbesondere auf Anwendungsszenarien aus den Bereichen der Fertigungs- und Produktionstechnik im Maschinen- und Anlagenbau.

Weiterhin werden die betrachteten Anwendungsszenarien dahin gehend bewertet, ob in ihnen (laut Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte der funktionalen Sicherheit (Safety), der industriellen Angriffssicherheit (Security) sowie deren Wechselwirkungen untereinander betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. In diesem Zusammenhang wird auf die Frage eingegangen, welche sicherheitstechnischen Anforderungen über die Darstellung in der Literaturquelle hinausgehend von Bedeutung sind. Abschließend wird eine fachliche Einschätzung dahin gehend gegeben, ob die z. T. neuen sicherheitstechnischen Anforderungen an derartige Systeme, Anlagen oder Maschinen mit den heutigen Mitteln des technischen Arbeitsschutzes erfüllt werden können bzw. inwieweit angemessene Methoden der Sicherheitstechnik zur Verfügung stehen.

2 Industrie 4.0: Grundlagen und Zusammenhänge

In diesem Kapitel sollen die wesentlichen Grundlagen und Zusammenhänge der Industrie 4.0-Konzepte erläutert werden. Dies erfolgt mit dem Ziel, die im nachfolgenden Kapitel darzustellenden Anwendungsszenarien (*Use Cases*) daran reflektieren und hinsichtlich ihrer Durchdringungsgrade bewerten zu können.

2.1 Industrie 4.0: Definitionen und historische Einordnung

Der Begriff *Industrie 4.0* beschreibt stark verdichtend formuliert die vollständige Durchdringung der industriellen Produktion und Fertigung mit Netzwerk- und Kommunikationstechnologien. Verwendet wurde der Begriff erstmals 2011 zur „Hannover Messe Industrie“. Im Oktober 2012 wurden der Bundesregierung Umsetzungsempfehlungen des Arbeitskreises „Industrie 4.0“ der Promotorengruppe „Kommunikation“ der Forschungsunion „Wirtschaft und Wissenschaft“ gegeben (Schäfer 2015).

In diesem ersten Positionspapier beschreiben die Autoren die gravierenden Änderungen für die Produktion in Industriestaaten, welche sich aufgrund der Einführung des sogenannten *Internet der Dinge und Dienste* in der industriellen Produktion und Fertigung ergeben werden (Schäfer 2015). So entstehen laut den Umsetzungsempfehlungen von Kagermann, Wahlster und Helbig (2012) „sogenannte *Cyber-Physical Production Systems (CPPS)* mit intelligenten Maschinen, Lagersystemen und Betriebsmitteln, die eigenständig Informationen austauschen, Aktionen auslösen und sich gegenseitig selbstständig steuern.“ Nach Ansicht der Autoren könnten CPPS industrielle Prozesse in der Produktion, dem Engineering, der Materialverwendung sowie des Lieferketten- und Lebenszyklusmanagements enorm verbessern.

Außerhalb Europas wurde die enorme Tragweite dieser vollständig durchdringenden Vernetzung und Digitalisierung aller industriellen Prozesse bereits etwas früher erkannt. So hat die US-Regierung schon im Jahr 2011 das Programm *Advanced Manufacturing* mit dem erklärten Ziel gestartet, wieder vermehrt industrielle Produktion in die USA zurückzuholen (The White House 2011).

Industrie 4.0 ist ein Marketingbegriff, der auf die Forschungsunion der deutschen Bundesregierung und ein gleichnamiges Projekt in der Hightech-Strategie 2020 der Bundesregierung zurückgeht (BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung 2017) – gleichzeitig bezeichnet er eine Forschungs-, Entwicklungs- und Netzwerkplattform (siehe www.plattform-i40.de). Ziel dieses Zukunftsprojektes ist es, die Wettbewerbsfähigkeit des Produktionsstandortes Deutschland durch den Einsatz innovativer Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) zu sichern und zu steigern sowie deutsche Unternehmen als Industrieausrüster im Weltmarkt zu positionieren (Roth 2016). International bzw. insbesondere in Nordamerika wird der Begriff meist mit *Smart Manufacturing* inhaltlich gleichgesetzt.

2.1.1 Historische Einordnung

Der Begriff *Industrie 4.0* steht für die 4. Industrielle Revolution. Diese ist nach der Einführung mechanischer Produktionsanlagen unter Nutzung der Wasser- und Dampfkraft (1. Revolution), der Einführung der arbeitsteiligen Massenproduktion mit

Hilfe der elektrischen Energie (2. Revolution), des Einsatzes der Elektronik und IT zur Automation (3. Revolution), nun durch untereinander vernetzte und kommunizierende Systeme mittels der neuesten Internettechnologien gekennzeichnet. Es wird durch die Kombination dieser mit der Produktions- und Automatisierungstechnik eine neue Stufe der Organisation und Steuerung der gesamten Wertschöpfungskette über den kompletten Lebenszyklus von Produkten angestrebt. Ziel ist die signifikante Flexibilisierung und Verbesserung der Wertschöpfung sowie eine Individualisierung der Produkte (vgl. Bauernhansl (2014), Roth (2016) und Dorst (2017)).

2.1.2 Evolution oder Revolution?

Eigentlich ist Industrie 4.0 nichts grundsätzlich Neues. Viele der unter Industrie 4.0 subsumierten Konzepte stellen eine Kombination oder eine konsequente Weiterentwicklung bekannter Konzepte aus der Automation, dem *Computer-Integrated Manufacturing (CIM)* der siebziger Jahre oder z. B. dem *Lean Production* dar. Vor diesem Hintergrund ist Industrie 4.0 eher als eine *Evolution* statt einer *Revolution* einzustufen (vgl. Abb. 2.1) (Soder (2014) und Roth (2016)). Zusätzlich ist heute schon absehbar, dass die damit verbundenen technologischen (und gesellschaftlichen) Umwälzungen, deren Anfänge wir gerade erleben, nicht innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit vonstattengehen werden. Dieser Prozess wird sich vielmehr über Jahrzehnte hinziehen. Und die Elemente der Technologie, die sie auslösen – insbesondere Software und Elektronik wie Sensoren und Aktoren – sind nicht neu, sondern existieren spätestens schon seit der dritten Industriellen Revolution (Sendler 2013).

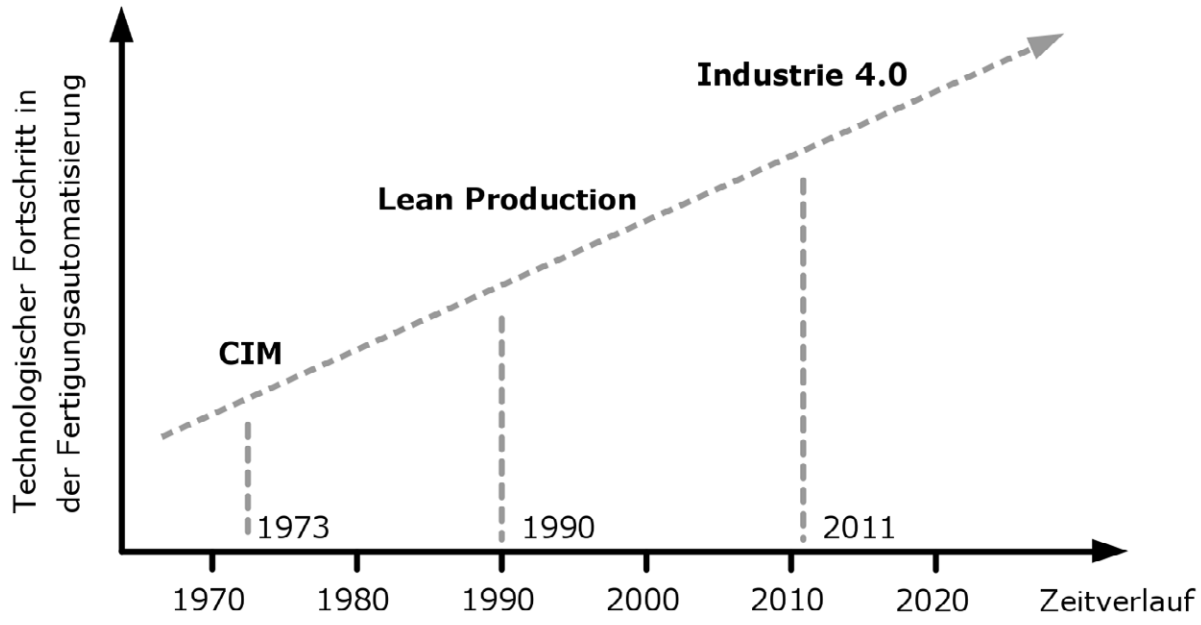

Abb. 2.1 Entwicklung des CIM bis zur Industrie 4.0 (vgl. Soder (2014))

Aus einem etwas anderen Blickwinkel betrachtet, ist im Kontext von Industrie 4.0 charakteristisch, dass sehr viele, unterschiedliche und vormals getrennt bearbeitete Fachdisziplinen konsequent zusammengeführt werden sollen (z. B. klassischer Maschinenbau, Internet-Netzwerktechnologien und mathematische Methoden des maschinellen Lernens). Diese Vereinigung könnte insgesamt einen deutlichen Innovationssprung bedeuten, der einem Paradigmenwechsel (und damit quasi einer *Revolution*) gleichkommt – verbunden allerdings mit großen Herausforderungen und derzeit

nur unzureichenden Lösungsansätzen an den Schnittstellen dieser Fachdisziplinen (sowohl technologisch, gesetzlich und normativ).

2.1.3 Industrie 4.0: Unterschiedliche Beschreibungen und deren Schnittmenge

Industrie 4.0 und der damit sehr eng in Zusammenhang stehende Begriff *Smart Factory* war anfangs sicherlich unscharf beschrieben. Dies hat sich aber in letzter Zeit stark geändert – eine in der Fachwelt allgemein anerkannte *Definition* fehlt jedoch noch immer. Daher werden zunächst die wichtigsten Begrifflichkeiten sowie gebräuchliche Beschreibungen aus diesem Themengebiet wiedergegeben. Abschließend werden die wichtigsten Kerneigenschaften von Industrie 4.0 zusammengefasst.

Im Mittelpunkt von Industrie 4.0 steht die echtzeitfähige[1], intelligente, horizontale und vertikale Vernetzung von Menschen, Maschinen, Objekten und IKT-Systemen zum dynamischen Management von komplexen Systemen (vgl. Bauer u. a. (2014) und Roth (2016)).

Bei *Smart Factory* handelt es sich um ein einzelnes oder einen Verbund von Unternehmen, das/der IKT zur Produktentwicklung, zum Engineering des Produktionssystems, zur Produktion, Logistik und Koordination der Schnittstellen zu den Kunden nutzt, um flexibler auf Anfragen reagieren zu können (Kagermann, Wahlster und Helbig 2013). Nach Ansicht der Autoren beherrscht die Smart Factory die damit einhergehende Komplexität, ist weniger störanfällig und soll die Effizienz in der Produktion steigern. In der Smart Factory kommunizieren Menschen, Maschinen und Ressourcen selbstverständlich miteinander ähnlich einem sozialen Netzwerk (Kagermann, Wahlster und Helbig 2013). Eine Smart Factory zeichnet sich darüber hinaus durch die Wandlungsfähigkeit seiner Produktionskapazitäten unter anderem durch eine dezentrale Steuerung, Effizienz der eingesetzten Ressourcen inklusive angestrebter Nachhaltigkeit, ergonomische Gestaltung der Arbeitsplätze und der internen/externen Integration von Wertschöpfungsprozessen vom Lieferanten bis zum Endkunden aus. *Cyber Physical Systems (CPS)* spielen hierbei eine zentrale Rolle (vgl. Bauernhansl (2014) und Kagermann, Wahlster und Helbig (2013)). Diese ermöglichen eine ständige und zunehmend erforderliche Anpassung der Produktion durch *Rekonfiguration* und *Selbstoptimierung* der komplexen Automatisierungslösungen (Verl und Lechler 2014).

Ein weiterer im Kontext von Industrie 4.0 wichtiger Begriff umfasst die *Smart Products*. Hierbei handelt es sich um intelligente Produkte, die über das Wissen ihres Herstellungsprozesses und künftigen Einsatzes verfügen. Sie unterstützen aktiv den Fertigungsprozess z. B. hinsichtlich der Fragen „wann wurde ich gefertigt, mit welchen Parametern muss ich (weiter-)bearbeitet werden und wohin soll ich ausgeliefert werden?“. Mit ihren Schnittstellen zu *Smart Mobility*, *Smart Logistics* und dem *Smart Grid* ist die intelligente Fabrik ein wichtiger Bestandteil zukünftiger intelligenter Infrastrukturen (Kagermann, Wahlster und Helbig 2013).

Von grundlegender Bedeutung für Industrie 4.0 ist die Kooperation und Kollaboration technischer Gegenstände untereinander sowie mit dem Menschen. Dazu wird deren

---

[1] vgl. Abschnitt 2.5.1 „Echtzeitsysteme, Echtzeitbetrieb und Realzeitverarbeitung“

virtuelle Repräsentation (sog. *digitaler Zwilling*) und deren Vernetzung zwingend voraussetzt. Ein technischer Gegenstand in diesem Sinn ist ein Gegenstand, der einen Wert für eine Organisation hat, also nicht nur physisch anfassbare Gegenstände, sondern auch nicht anfassbare Gegenstände wie Ideen, (Daten-)Archive, Software usw. (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04). In weitergehenden Modellierungen wird die Rolle des Menschen in der soziotechnischen Systemgestaltung berücksichtigt.

Verkürzt ausgedrückt handelt es sich somit bei Industrie 4.0 um die Verknüpfung von intelligenten Produkten (Smart Products) mit einer intelligenten Fabrik und Produktion (Smart Factory) (Huber 2016a). Daher wird *Smart Factory* vielfach als Synonym für *Industrie 4.0* verwendet.

Obige Literaturquellen zusammenfassend und in Anlehnung an die beschreibende Arbeitsdefinition des Spiegelgremiums der ISO/SAG „Industry 4.0 / Smart Manufacturing N 10“ (Oktober 2015) können folgende Kernaussagen getroffen werden:

Industrie 4.0 bzw. *Smart Manufacturing* wird charakterisiert durch:

- eine systematische Verkopplung erweiterter Fertigungskapazitäten, digitaler Technologien und hochwertiger Dienstleistungen aus dem *Internet of Things (IoT),*
- eine weitgehende Integration von Kunden und Geschäftspartnern in Geschäfts- und Wertschöpfungsprozesse und
- eine Zusammenarbeit von Menschen, eingebetteten Systemen, voll- oder teilweise autonomen Maschinen sowie Systemen aus Systemen.

Dies erfordert:

- eine hoch flexibilisierte, wandelbare, zunehmend sich selbstständig rekonfigurierende und zugleich effiziente Produktion und
- eine Weiterentwicklung der funktionalen Sicherheit (Safety), der netzwerktechnischen Angriffssicherheit (Security), der Arbeitsorganisation und der Arbeitsgestaltung.

Das führt zu:

- einer Individualisierung von Produkten (bis zur sog. „Losgröße 1“ in Massenproduktionen), Diensten und Prozessen,
- einer Vernetzung von Technologien, die in hoch komplexen Strukturen und *Cyber Physical Systems (CPS)* münden,
- neuen Formen der Wertschöpfung, Geschäftsmodellen und unterlagerten Dienstleistungen, die in so genannten hybriden Produkten münden (z. B. Verkauf von „Mobilität“ anstatt Fahrzeugen) und
- einen hohen Einfluss auf die menschliche Produktivität, Innovationszyklen sowie weiteren Aspekten.

Im Zusammenhang mit den Konzepten von Industrie 4.0 verschwinden die Grenzen zwischen den vormals getrennten IKT-Bereichen der *Produktions-IT* und der *Office-IT*. Diese werden vernetzt, wodurch IT-Systeme mit ganz unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen verbunden werden. Daraus ergeben sich neue *Verwundbarkeiten* (Security-Aspekte) und den Angreifern eröffnen sich neue Möglichkeiten, in Systeme einzudringen und *Schäden auch in der physischen Welt* (Safety-Aspekte) zu verursachen. So können sich beispielsweise Computerviren, die man von Desktop-PCs kennt, auf Produktionsanlagen ausbreiten, oder Maschinen werden zur Fernwartung freigegeben, ohne diese Zugänge angemessenen abzusichern (vgl. Fallenbeck und Eckert 2014).

Von besonderem Interesse ist daher, welche sicherheitstechnischen (neuen) Implikationen bezüglich der *funktionalen Sicherheit (Safety)* sowie der *netzwerktechnischen Angriffssicherheit (Security)* abzuleiten sind. Dabei sollten die Wechselwirkungen der zuvor getrennten Systeme systematisch und wissensbasiert in entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten untersucht werden.

2.2 Industrie 4.0: Zentrale Paradigmen

In aktuellen Fachdiskussionen wird der Begriff „Industrie 4.0“ oft auf den bloßen Einsatz neuartiger Technologien reduziert. Die meisten dieser Technologien, darunter Kleinstcomputer (sog. *embedded systems*), intelligente[2] Gegenstände, (mobile) Breitband-Internetzugänge und die *Radio Frequency Identification (RFID)* sind auch tatsächlich von essentieller Bedeutung für die Realisierung der Industrie 4.0-Konzepte, allerdings existieren sie bereits seit Jahren auf dem Markt und werden stetig weiterentwickelt.

Das wirklich Neue an Industrie 4.0 ergibt sich vielmehr durch die Zusammenführung dieser, für sich in ihrer Funktionalität individuell entwickelten Technologien im industriellen Umfeld zu einer einheitlichen, gemeinsam agierenden Lösung. Dieser Verbund standardisierter Kommunikations- und Steuerungstechnik führt im Ergebnis zu der Verwirklichung der Idee hinter Industrie 4.0 und wird im Folgenden anhand von *fünf zentralen Paradigmen*[3] beschrieben (vgl. Siepmann und Graef (2016) und Gentner und Oßwald (2017)).

In diesem Abschnitt sollen die im Kontext von Industrie 4.0 diskutierten zentralen Paradigmen zunächst vorgestellt werden. Im folgenden Abschnitt werden die technologischen Basiskomponenten als „Bausteine“ zu deren Umsetzung beschrieben.

2.2.1 Vertikale und horizontale Integration

Durch ein effizientes Zusammenspiel der *vertikalen* und *horizontalen* Integration im Kontext von Industrie 4.0 können sich enorme Vorteile in der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens ergeben. So könnte beispielsweise durch geringere Rüstzeiten

---

[2] Eine Differenzierung des Intelligenzbegriffes, eine Einordnung hinsichtlich intelligenter Steuerungssysteme sowie eine Abgrenzung zu menschlicher Intelligenz erfolgt in Abschnitt 2.2.2.

[3] Gemeint sind hier grundsätzlich veränderte Denkweisen im Vergleich zu traditionellen Produktionsansätzen.

und -kosten flexibel auf Kundenwünsche im Sinne einer massenproduktionstauglichen Produktindividualisierung eingegangen werden. Cyber-physische Systeme (CPS) sind dabei selbstständig in der Lage, Produktionsvorgänge auch in kurzen Zeitabständen anforderungsgerecht anzupassen und Leerlaufzeiten sowie Produktionsausfälle zu vermeiden. Zudem ergeben sich durch neuartige Regelungs- und Steuerungstechniken Vorteile im Ressourcen- und Energieverbrauch, die im Ergebnis zu einer höheren Produktivität des gesamten Wertschöpfungsnetzwerkes führen (vgl. Brossardt (2014) sowie Siepmann und Graef (2016)).

Die beiden folgenden Abschnitte stellen einige Aspekte der vertikalen und horizontalen Integration näher dar.

2.2.1.1 Vertikale Integration

- **Ziele:**
  - Einordnung aller unternehmensinternen Systeme in eine (vertikale) Hierarchie und Aufbau von Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen den entstehenden Hierarchieebenen
  - Entstehung eines einheitlichen und durchgängigen Systems, in welchem sich die Richtungen von Datenflüssen an der Hierarchieordnung orientieren
  - wird durch das Modell der klassischen *Automatisierungspyramide* (siehe Abb. 2.2) beschrieben
  - automatisierte Erhebung und Sammlung produktionsrelevanter Daten, wie Betriebsdauern oder -zustände
  - Verdichtung, Bereinigung und Auswertung dieser Daten über entsprechende hochwertige Dienste entlang der vertikalen Hierarchie und damit Extraktion von Informationen, Erkenntnissen und Wissen aus den ursprünglichen Rohdaten
- **Voraussetzungen:**
  - Einsatz einheitlicher Schnittstellen und Standards für Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M-Kommunikation) erforderlich
  - alle beteiligten Komponenten und Engineeringtools (z. B. Sensoren, Aktoren, eingebettete Systeme, ganze Produktionsanlagen sowie Planungs- und Steuerungssysteme) müssen sich *herstellerunabhängig* miteinander verbinden lassen

Allein diese beiden Voraussetzungen stehen in erheblichem Widerspruch zu den aktuellen Geschäftsmodellen der meisten großen Hersteller von Steuerungs- und Automatisierungslösungen. Diese versuchen seit Jahrzehnten, den Kunden (hier: Maschinen- und Anlagenbauer) in proprietären und in sich geschlossenen Systemen „gefangen“ zu halten, um einen Hersteller- bzw. Zuliefererwechsel möglichst zu erschweren. Daher könnte die Erfüllung dieser Voraussetzungen eine der größten zu nehmenden Hürden auf dem Weg in Richtung Industrie 4.0 darstellen.

2.2.1.2 Horizontale Integration

- **Ziele:**
  - Einbindung von Systemen von Kunden, Lieferanten, verteilten Unternehmensstandorten sowie externen Dienstleistern und Produzenten entlang der Wertschöpfungskette, zwischen denen ein Material-, Energie- und Informationsfluss verläuft
  - neue und für den eigenen Geschäfts- und Wertschöpfungsprozess relevante Komponenten oder Akteure sollen jederzeit hinzugefügt werden können
- **Voraussetzungen:**
  - klar definierte und untereinander kompatible Schnittstellen der Akteure entlang der Wertschöpfungskette (dies betrifft neben rein technologisch geprägten auch Aspekte des Vertragsrechtes, Lizenzrechtes sowie des Datenschutzes)

2.2.2 Dezentrale Steuerung und Intelligenz

Klassische Steuerungs- und Automatisierungssysteme der industriellen Fertigung sind meist dadurch gekennzeichnet, dass sie aus einem zentral angeordneten Schaltschrank bestehen, welcher neben anderen Automatisierungskomponenten eine zentrale *speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)* enthält. Die SPS bzw. deren Logik-Programm in ihrem Ablaufsystem liefert auf Basis von Sensordaten aus der Produktion entsprechende Anweisungen zur Steuerung und Regelung einer Anlage oder Maschine an diese zurück. Allerdings sind die Produktionsanlage und die SPS aufwändig über eine Vielzahl an Aktor- und Sensorkabeln parallel beziehungsweise seriell fest verbunden. Das führt zu einer unflexiblen und ortsgebundenen Struktur (vgl. Siepmann und Graef 2016). Der Einbauort der SPS (im Schaltschrank) und die darauf ausgeführten Steuerungsfunktionen sind heute meist identisch. Dieser klassische *monolithische Steuerungsansatz* hat stets limitierte Ressourcen bzgl. Programmspeicher, Anzahl adressierbarer Sensoren/Aktoren sowie seiner Rechengeschwindigkeit und damit der minimal möglichen Reaktionszeit auf z. B. externe, sensorisch erfasste Ereignisse.

Die Ideen von Industrie 4.0 benötigen allerdings unter anderem neuartige Konzepte zur Steuerung von Produktionsprozessen, welche klassischen, monolithischen Steuerungen mit zentralen Entscheidungsmechanismen (Logik-Programm) und seinen starren Grenzen bzgl. des Einbauortes, der Verkabelung usw. entgegenstehen. Daher müssen *dezentral verteilte Systeme* zum Einsatz kommen, welche z. B. über das Internet der Dinge und Dienste eine geografisch verteilte Steuerung der Produktionsanlagen ermöglichen. Diese Entwicklung, weg von einer ortsgebunden, unflexiblen Steuerung, wird als *dezentrale Steuerung* bezeichnet (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Weiterhin müssen die heute in einem monolithischen Steuerungssystem vorhandenen aufwändigen und teuren (besonders bzgl. der Instandhaltung) starren klassischen Verkabelungen zu Sensoren und Aktoren in die Maschine bzw. Anlage durch

ortsunabhägige Vernetzung über evtl. sogar kabellose (aber industrietaugliche) Kommunikationstechnologien ersetzt werden.

Im Gegensatz zur monolithischen Steuerung kann eine dezentrale Steuerung nach Bedarf skaliert werden, indem Rechenfunktionen (z. B. dezentrale Datenerfassung, -speicherung, -analyse und dezentrale Regelung) auf andere verbundene Steuerungskomponenten ausgelagert werden. Diese müssen dafür als kleine unabhängige und jederzeit vernetzbare Steuerungsmodule vorliegen (sog. Modularisierung). Damit wird eine dynamische Anpassung der aktuell benötigten Rechenleistung im Sinne von Industrie 4.0 ermöglicht. Der Einbauort und die Steuerungsfunktionen (z. B. ausgeführte Regelungsalgorithmen) sind nicht mehr zwingend identisch – es wird eine *weitgehende Ortsunabhängigkeit* erreicht.

Zur Realisierung der dezentralen Steuerungen werden u. a. neue softwaretechnische Ansätze benötigt, um sensorische Ereignisse mit den aktorischen Reaktionen im verteilten System in hoher Geschwindigkeit mit harten Anforderungen an die Echtzeiteigenschaften[4] kommunizieren und untereinander zeitlich synchronisieren zu können. Zusätzlich müssen neu hinzugekommene oder nicht mehr benötigte Steuerungskomponenten bzw. -module von sich zur Laufzeit dynamisch rekonfigurierenden Maschinenteilen in das Gesamtsystem eingebunden oder abgemeldet werden können. Dies wird als *dezentrale Intelligenz* bezeichnet.

Allerdings muss bei dem Intelligenzbegriff feiner differenziert werden, da die Konzeption dessen was Intelligenz ist – oder was sie nicht ist – Bücher füllt (Jeschke 2015, Kap. 3.5 „Der Intelligenzbegriff – eine pragmatische Annäherung"). Laut der Autorin liegen die Deutungsextreme zwischen dem sogenannten „Biological chauvinism" (verkürzt: „nur biologische Gehirne sind intelligent", angelehnt an C. Sagan in den sechziger Jahren) und dem „Liberal functionalism" (verkürzt: „jedes verhaltensfähige System ist intelligent") (vgl. Jeschke 2015).

Im Wesentlichen besteht in der wissenschaftlichen Community inzwischen disziplinen-übergreifend Einigkeit darüber, dass ein „intelligentes System" typischerweise durch drei zentrale Komponenten gekennzeichnet ist (Jeschke 2015):

1. **Sensorik:** die Fähigkeit zur Wahrnehmung der Umgebung und ihrer Veränderungen, also der Besitz sensorischer Komponenten zur Wahrnehmung externer Stimuli,

2. **Kognition:** die Fähigkeit zur Prozessverarbeitung, also das Prozessieren der externen Daten, deren Analyse und schließlich die Anpassung des eigenen Verhaltens an die Umwelt und

3. **Aktuatorik:** die Fähigkeit zur Reaktion, also die Möglichkeit zur unmittelbaren physikalischen Interaktion mit der Umgebung.

---

[4] In der allgemeinen Automatisierungs- und Steuerungstechnik müssen üblicherweise Zeittakte von wenigen Millisekunden sehr genau eingehalten werden, um Echtzeit-Anforderungen zu erfüllen. Der Signalaustausch der digitalen Antriebstechnik erfolgt sogar im Bereich von Mikrosekunden. Für nähere Erläuterungen zum Thema Echtzeit vgl. Abschnitte 2.5.1 und 2.5.2.

In Abgrenzung zu intelligenten technischen Systemen ist in der Psychologie die *Intelligenz* (von lat. intellegere „verstehen“, wörtlich „wählen zwischen …“ von lat. inter „zwischen“ und legere „lesen, wählen“) ein Sammelbegriff für die kognitive Leistungsfähigkeit des Menschen (Wikipedia 2017a). Intelligente Funktionen sind in diesem Fall die Ausprägungen und Merkmale der *kognitiven Leistungsfähigkeit des Menschen*.

Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik, welches sich mit der Automatisierung intelligenten Verhaltens befasst. Dabei wird versucht, eine menschenähnliche Intelligenz nachzubilden. Dazu werden Rechnerarchitekturen oder Softwarealgorithmen entworfen, damit diese eigenständig Probleme bearbeiten können (vgl. Wikipedia 2017b). Im Verständnis des Begriffs *KI* spiegelt sich oft die aus der Aufklärung stammende Vorstellung vom „Menschen als Maschine“ wider, dessen Nachahmung sich die sogenannte *starke KI* zum Ziel setzt. Dabei soll eine Intelligenz erschaffen werden, die das menschliche Denken mechanisiert. Dazu muss eine Maschine konstruiert und gebaut werden, die intelligent reagiert oder sich wie ein Mensch verhält, kreativ nachdenken sowie Probleme lösen kann und die sich durch eine Form von Bewusstsein beziehungsweise Selbstbewusstsein sowie Emotionen auszeichnet. Die Ziele der starken KI sind nach Jahrzehnten der Forschung weiterhin visionär (vgl. Wikipedia 2017b; Görz, Schneeberger und Schmid 2013; Görz, Schneeberger und Schmid 2003). Dieser auf die möglichst exakte Nachahmung des menschlichen Denkens abzielende Ansatz der *kognitiven Simulation* wird in der *Kognitionswissenschaft* bearbeitet und sollte im weiteren Zusammenhang vom Gebiet der künstlichen (technischen) Intelligenz eher abgegrenzt betrachtet werden (vgl. Schmidt-Schauß und Sabel 2016; Schmidt-Schauß und Sabel 2013).

Im Gegensatz zur starken KI geht es der schwachen KI darum, konkrete Anwendungsprobleme des menschlichen Denkens zu meistern. Das menschliche Denken soll hier in Einzelbereichen unterstützt werden (vgl. Wikipedia 2017b). Die *Fähigkeit zu lernen* ist eine Hauptanforderung an technische KI-Systeme und muss ein integraler Bestandteil sein, der nicht erst nachträglich hinzugefügt werden darf. Ein zweites Hauptkriterium ist die Fähigkeit eines KI-Systems, *mit Unsicherheit und probabilistischen Informationen umgehen* zu können (vgl. Wikipedia 2017b). Diese beiden Fähigkeiten der schwachen KI sollen in den hier betrachteten intelligenten Systemen ausgenutzt werden.

Mit Hilfe *eingebetteter Systeme* (sog. *Embedded Systems*) sowie deren Vernetzung zu dezentralen Steuerungs- und Regelungskonzepten lassen sich Daten (z. B. Prozessdaten) *erfassen*, *speichern* (z. B. in Datenbanken) und verarbeiten (z. B. Analyse, Prozesssteuerung und -regelung). Bei *Embedded Systems* handelt es sich um Computer-Chips (auch als *Einplatinenrechner* bezeichnet), die in physischen Gegenständen integriert sind und ihre Anwendungs- und Umgebungssituation erfassen können. Die Verbindung über das Internet erlaubt es, mit diesen intelligenten Komponenten Daten in hoher Geschwindigkeit auszutauschen, selbstständig eine Reaktion auf veränderte Anforderungen einzuleiten und dadurch eine lokale Situation aktiv zu beeinflussen. Sie bilden die technologische Grundlage für *cyber-physische Systeme (CPS)* (vgl. Gentner und Oßwald 2017). Cyber-physische Systeme arbeiten dadurch einerseits situations- und kontextgebunden, andererseits aber auch ortsunabhängig, multifunktional, teilautonom und teilautomatisiert.

Dezentral verteilte CPS stellen daher mit ihrer Kombination aus Sensorik, Aktorik und embedded Systemen eine entscheidende technische Grundlage für *intelligente Steuerungssysteme* dar. Mit ihrer angestrebten Adaptivität sowie der hohen Wandelbarkeit der Komponenten könnten diese flexibel auch auf „unerwartete“ Ereignisse reagieren.

Jedoch sind dezentrale Steuerungsparadigmen bisher industriell noch wenig verbreitet (Jeschke 2015). Einerseits liegt das an den dahinterliegenden theoretischen und inzwischen veralteten Modellen. Neuere Architekturen sowie praxistaugliche Erkenntnisse sind erst seit der Verfügbarkeit hoher Rechenleistungen auf kleinstem Raum möglich (siehe *embedded Systeme*) (vgl. Jeschke 2015). Andererseits stehen die dezentralen und situativ vernetzbaren Bottom-Up-Logiken in diametralem Gegensatz zur Erwartungshaltung der Industrie. Nicht zuletzt auch zur Bewertung der funktionalen Sicherheit werden dort bisher Systeme erwartet, deren Verhalten zu jedem Zeitpunkt strikt transparent und vorhersagbar ist (siehe Abschnitt 2.5.3).

2.2.3 Durchgängiges digitales Engineering

Als *durchgängiges digitales Engineering* wird die digitale Abbildung eines kompletten physischen Produktionsprozesses unter Einbeziehung des Menschen als Teil des Arbeitssystems bezeichnet. Dabei greifen die *physische* und *virtuelle Welt* nahtlos ineinander und es werden alle Prozesse von der Entwicklung bis zur Produktionsplanung als Gesamtprozess visualisiert. Das durchgängig digitale Engineering kann durch drei wesentliche Aspekte beschrieben werden (vgl. Siepmann und Graef 2016):

digitale Fabrik:

- *digitale Abbildung* der realen Fabrik mit all ihren relevanten technischen Komponenten (Maschinen und Anlagen, Produkte, Fertigungsprozesse sowie Modelle der Betriebsmittel) sowie des Menschen als Teil des Arbeitssystems (sog. *digitale Mensch-Modelle*)

- Abbildung der realen Welt erfolgt über entsprechende Design- und Konstruktionswerkzeuge wie *Computer Aided Design (CAD)* (rechnergestützte Konstruktion) oder das *Computer Aided Manufacturing (CAM)* (rechnergestützte Fertigung)

virtuelle Fabrik:

- *dynamische Betrachtung* der digitalen Fabrik im CAD-System durch die Einbeziehung der Dimension „Zeit“ (z. B. Simulation von dynamischen Fertigungsabläufen)

Datenmanagementsystem:

- stellt die *Datenbasis* für die Projektion der realen auf die digitale sowie die virtuelle Fabrik; diese wird für verschiedenste Planungs- und Visualisierungswerkzeuge benötigt

- Daten müssen nur *einmalig gepflegt* und können für unterschiedlichste Aufgaben wie Prozess-, Materialfluss- und Logistikplanung genutzt werden

- neue oder veränderte Daten müssen zeitnah überführt werden, um die Abbildung der realen auf die digitale Welt stets synchron zu halten

Ein durchgängig digitales Engineering ermöglicht es, reale Anwendungsfälle digital zu simulieren und das Verhalten der einzelnen Systemkomponenten im Zeitverlauf zu analysieren. Weiterhin können über diverse Einstellungen von Modellparametern gezielte Maßnahmen gegen zu erwartende Probleme in der Fertigung, wie zu hohe Durchlaufzeiten, Produktionsengpässe oder eine zu niedrige bzw. zu hohe Auslastung von Maschinen oder Anlagen getroffen werden (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Aggregate oder ganze Anlagenteile können gezielt ausgeblendet (Komplexitätsreduktion) oder Perspektiven gewählt werden, die in der realen Welt nicht möglich sind. In Kombination mit Visualisierungswerkzeugen wie *Virtual Reality (VR)* und *Augmented Reality (AR)* kann ein Anwender, Techniker oder Konstrukteur über geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen wie Datenbrillen oder Tablets ein neu entwickeltes Produkt oder eine noch nicht existierende Produktionsanlage vierdimensional[5] untersuchen. Dadurch können im Produktionsprozess auftretende Probleme schon in der Planungsphase allgemeinverständlich visualisiert und dadurch vermieden werden (vgl. Siepmann und Graef 2016). Damit ist das entstehende digitale Modell im Gegensatz zu der komplexen Fabrik in der realen Welt für den Menschen viel leichter erfassbar.

2.2.4 Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS)

Ein *cyber-physisches Produktionssystem (CPPS)* beschreibt die Gesamtheit einer Produktionsanlage im Kontext von Industrie 4.0. Es besteht zum einen aus Produktionssystemen, die über Sensoren und Aktoren Daten an (dezentrale) Steuerungssysteme weiterleiten, die diese auswerten und an die Produktion zurückgeben. Zum anderen beinhaltet ein CPPS intelligente Produktionsmittel, welche Informationen zu ihrem individuellen Produktionsprozess besitzen. Die Einbindung des Menschen in den Steuerungsprozess wird durch eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle ermöglicht. Daten und Dienste sind über das Internet der Dinge und Dienste sowie Cloud-Dienste weltweit nutzbar (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Im Industrie 4.0-Ansatz müssen alle Objekte eines Produktionsverbundes über das Internet zukünftig eine neue Identität erhalten. Sämtliche produktionsrelevante Systeme werden über herstellerunabhängige Schnittstellen miteinander verschaltet, damit diese integriert, virtuell optimiert und getestet werden können (vgl. Bauernhansl (2014)). Für ein CPPS ist des Weiteren die vertikale Integration sämtlicher Systeme

[5] Gemeint sind die 3 räumlichen Dimensionen erweitert um die Dimension „Zeit“.

zu einer einheitlichen und durchgängigen Systemlandschaft Voraussetzung. Zusätzlich ist die horizontale Integration *cyber-physischer Systeme (CPS)* über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk notwendig.

Über ein entsprechendes Steuerungs- und Planungssystem sind die dezentral verteilten CPS eines Produktionsverbundes in der Lage, benötigte Informationen über den aktuellen Produktionsprozess, Wartungs- oder Rüstzustand sowie die Auslastung (Kapazitätsplanung und -steuerung) abzurufen, auf Basis dessen selbstständig Entscheidungen zu treffen und situationsbedingt zu reagieren. Dadurch präsentieren sie sich als ein kooperierendes Gesamtsystem im Kontext von Industrie 4.0 (vgl. Siepmann und Graef 2016).

2.2.5 Betrachtung gesamter Produktlebenszyklus

Die Aufgabe des Produktmanagements ist die Steuerung des Produkterfolgs über den kompletten Produktlebenszyklus. Er reicht von der Idee für ein neues Produkt über die Produktspezifikation, Entwicklung, Produktion, Markttest, Markteinführung, Vertrieb, der Nutzung bis hin zum sog. Phase-Out, der Herausnahme eines Produktes vom Markt sowie seiner Verwertung (vgl. Gentner und Oßwald 2017).

Die kontinuierliche Verbesserung von Produkten und Dienstleistungen wird im Kontext von Industrie 4.0 über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg vollzogen. Digitale Produktgedächtnisse zeichnen dafür ständig Daten auf und stellen sie für die Produkt- und Prozessoptimierung allen verantwortlichen Unternehmensbereichen zur Verfügung (vgl. Gentner und Oßwald 2017). Daher sind herstellerunabhängige Datenhaltungen sowie ein durchgängiger Informationsfluss über den gesamten Produktlebenszyklus notwendige Voraussetzungen.

2.3 Industrie 4.0: Technologische Basiskomponenten

In der Industrie 4.0 ist das Zusammenspiel verschiedenster Technologien und Dienste notwendig. So muss neben der Erhebung und Verarbeitung von Daten und Information auch eine geeignete Maschine-zu-Maschine-Kommunikation zwischen allen Systemen, Anlagen und Komponenten geschaffen werden. Eine ganzheitliche Vernetzung aller relevanten Produktionsfaktoren ist nur unter Verwendung einheitlicher sowie herstellerübergreifender Schnittstellen, Standards und Normen realisierbar (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Um die im vorigen Abschnitt dargestellten zentralen Paradigmen von Industrie 4.0 umsetzen zu können, müssen die in diesem Abschnitt beschriebenen technologischen Basiskomponenten als „Bausteine“ zu einem Gesamtkonzept verknüpft werden.

2.3.1 Dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung

Das heutige grundlegende Konzept der industriellen Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung wird durch die *Automatisierungspyramide* dargestellt. Diese wurde über mehrere Jahrzehnte aus den ersten Ansätzen der sogenannten „CIM-Pyramide“ der siebziger und achtziger Jahre ständig weiterentwickelt. Sie hat das Ziel, die Komplexität der industriellen Fertigung durch die Unterteilung der anfallenden Prozesse zur Datenerhebung und -verarbeitung in einzelne Ebenen zu verringern und in

eine leicht verständliche, visuelle Darstellung der industriellen Fertigung zu überführen. Im Folgenden werden die Ebenen und deren Funktionen kurz beschrieben, da die Automatisierungspyramide für das weitere Konzeptverständnis grundlegend ist und im Kontext von Industrie 4.0 stark weiterentwickelt wurde (siehe RAMI 4.0). Die Ebenen werden von unten nach oben beschrieben (siehe Abb. 2.2):

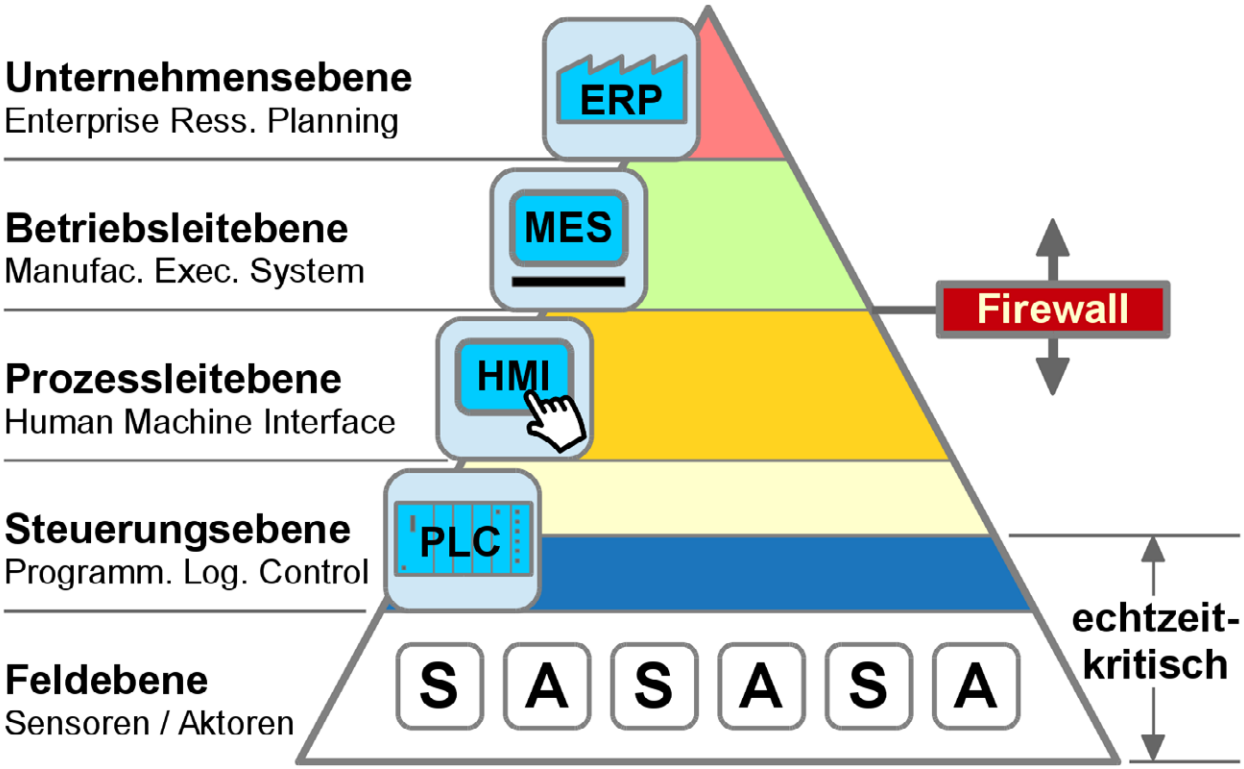

Abb. 2.2 Vertikale Integration durch die Automatisierungspyramide (Grafik: Kasper)

- Feldebene (Shopfloor):
  - beschreibt den Produktionsbereich beziehungsweise die Produktionsstätte, also den Ort der Wertschöpfung
  - beinhaltet neben Sensoren (z. B. Temperaturfühler, Lichtschranken) auch Aktoren (z. B. Schaltschütze, elektronische Antriebssteller)
  - liefert und verarbeitet produktionsrelevante Daten in Form von Ein- und Ausgangssignalen

- Steuerungsebene:
  - wertet über eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) Eingangssignale (Sensordaten) aus und sendet entsprechende Ergebnisdaten (Ausgangssignale) an die Feldebene zurück
  - über Aktoren werden diese elektrischen Ausgangssignale verarbeitet und bspw. durch Druckluft/Hydraulik oder elektrische Stellantriebe in mechanische Bewegungen umgewandelt
  - die Gestaltung der Steuerungsebene trägt damit entscheidend zur Umsetzung einer dezentral gesteuerten Maschinen- und Anlagensteuerung bei
- (Prozess-) Leitebene:
  - dient unter anderem zur Visualisierung produktionsrelevanter Vorgänge
  - Steuerung sowie für den Anwender leicht verständliche Darstellung von Warnmeldungen über sog. Prozessleit-, HMI-[6] und SCADA-[7]Systeme
  - kann in Form einer Mensch-Maschine-Schnittstelle die Funktion eines Bedien- und Beobachtungssystems übernehmen
- Betriebsleitebene:
  - umfasst Betriebs-, Maschinen- und Personaldatenerfassung als Basis für das *Manufacturing Execution System (MES)* für die Steuerung, Lenkung und Kontrolle der Produktion
  - Bindeglied zwischen Maschinensteuerung und Unternehmensebene (Topfloor)
  - dient der Produktionsfeinplanung sowie -datenerfassung
  - Weiterleitung entsprechender Daten für zukünftige Planungen an das *Enterprise Resource Planning-System (ERP-System)*
- Unternehmensebene (Topfloor):
  - zuständig für die Produktionsgrobplanung und Bestellabwicklung der industriellen Fertigung

Heutzutage laufen die Prozesse einer automatisierten Produktion sowie deren Zwischenschritte längst nicht mehr über nur eine dieser oben dargestellten Ebenen. Dies erzeugt die Notwendigkeit, geeignete Standards und Normen zu verwenden, so dass

---

[6] *Human machine interface (HMI):* englisch für Mensch-Maschine-Schnittstelle

[7] Unter *Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)* versteht man das Überwachen und Steuern technischer Prozesse mit Hilfe industrieller PC- und Servertechnik in Leitstandssystemen.

zwischen den klar getrennten Ebenen sowie den darin enthaltenen Komponenten eine ganzheitliche Kommunikation möglich ist.

Die Grenzen der klassischen Automatisierungspyramide liegen dabei vor allem in der Performance der Datenübertragung und -verarbeitung, da eine immer weiter voranschreitende Vernetzung industrieller Komponenten über das Internet der Dinge und Dienste (IoTS) auch Auswirkungen auf die Menge der zu übertragenden und zu verarbeitenden Daten nach sich zieht (vgl. Siepmann und Graef 2016). Erschwerend kommt hinzu, dass die Kommunikation zwischen den Ebenen heute über eine sehr heterogene und untereinander z. T. inkompatible Schnittstellen- und Feldbus-Landschaft erfolgt (vgl. Hoppe 2014). So gilt es, durch geeignete Standards eine einheitliche und herstellerunabhängige Kommunikation zwischen der Prozess- bis hin zur Unternehmensebene zu schaffen, um eine sich teilweise selbststeuernde und -organisierende Produktion im Kontext von Industrie 4.0 zu ermöglichen.

Eine weitere Ungenauigkeit der derzeitigen Automatisierungspyramide entsteht dadurch, dass sich der Trend weg von einer zentralen hin zu einer dezentralen Steuerung der Fertigungsmaschinen bewegt. Dies führt unweigerlich dazu, dass das aktuell genutzte Modell zukünftig durch geeignete Maßnahmen auf die Anforderungen der Industrie 4.0 angepasst werden muss (vgl. VDI / VDE-GMA 2013). Durch die immer weiter zunehmende Autonomie der Fertigungsanlagen im Kontext von Industrie 4.0 wandern zukünftig typische MES-Funktionen in die Steuerungs- und Feldebene. Die Fertigungsplanung hingegen wird in der Industrie 4.0 sukzessiv in die ERP-Ebene verlagert werden. Auch könnte die klassische speicherprogrammierbare Steuerung in der intelligenten Fabrik z. T. durch den Einsatz Cloud-basierter SPS-Lösungen ersetzt werden (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Ein zentrales Element zur *Datenerhebung und -verarbeitung* im Kontext der bereits behandelten Automatisierungspyramide können neben klassischen Sensoren sogenannte *Radio Frequency Identification-Chips (RFID)* darstellen. Sie dienen der Speicherung von kleinen Datenmengen direkt am zu fertigenden Produkt in Form von intelligenten Etiketten (sog. *Smart Labels* oder *Smart Tags*). Sie funktionieren ohne eigene Energieversorgung und werden mit Hilfe von RFID-Lesegeräten gelesen oder geschrieben. Dazu werden sie vom Lesegerät während des Lese-/Schreibvorgangs per Induktion mit der benötigten Energie versorgt. Sie sind sehr kostengünstig, langlebig und flexibel einsetzbar. Sie können zur Lokalisierung, Überwachung, Steuerung, Autorisierung, Identifikation, Dokumentation und Authentifikation aus der Prozessebene heraus eingesetzt werden (vgl. Siepmann und Graef 2016).

Einen wesentlichen Bestandteil zur *Verarbeitung aus der Produktion erhobener Daten* bilden Cloud-basierte *Big Data-* und *Analytics-Dienste*. Unter dem Begriff Big Data werden Daten verstanden, die über das normale Maß in Bezug auf Datenmenge, Heterogenität der Daten und der Frequenz des Datenanfalls hinausgehen. Über den Einsatz von speziellen mathematischen Methoden aus dem Bereich von Big Data kann diese im Millisekundentakt aufkommende Datenmenge verdichtet und im Anschluss durch entsprechende Analytics-Dienste effizient und zeitnah verarbeitet werden. Das Ziel dieser Analyseverfahren liegt darin, basierend auf verdichteten Daten, für ein Unternehmen betriebswirtschaftlich relevante Aussagen treffen zu können (vgl. Siepmann und Graef 2016). Die Ergebnisse dieser verarbeiteten Daten können anschließend über die Cloud an die cyber-physischen Produktionssysteme zurückgesendet werden. Damit können sie dem Unternehmen, neben einer Verbesserung

der Produkte, auch zur Optimierung der eingesetzten Produktionsprozesse dienen. Durch vorausschauende Analysen im Sinne der *Predictive Analytics* können sogar zukünftige Fehler an Maschinen oder Anlagen schneller vorhergesagt und somit effizient behoben werden. Das ist z. B. die technische Grundlage für *Predictive Maintenance* (vorbeugende Instandhaltung).

Unter dem Begriff *Cloud Computing* kann eine bedarfsgesteuerte Bereitstellung von *Datenverarbeitungsressourcen* (Speicherung und Verarbeitung von Daten) jeglicher Art über das Internet verstanden werden. Das Cloud Computing bildet hier ein entscheidendes Werkzeug zur Bereitstellung verschiedenster Dienstleistungen zur Datenerhebung und -verarbeitung über das Internet, um eine offene Kommunikation der eingesetzten Automatisierungssysteme über die klassischen Unternehmensgrenzen hinweg zu ermöglichen (vgl. Zühlke 2013). Aus der Sicht eines Unternehmens bedeutet dies konkret, dass sich ein Teil oder auch die gesamte IT-Infrastruktur nicht mehr lokal im Unternehmen befindet, sondern dass diese bei externen Anbietern angemietet wird, wobei diese Cloud-Dienstleister geografisch fern angesiedelt sein können (vgl. Siepmann und Graef 2016).

2.3.2 Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M-Kommunikation)

Der automatisierte Informationsaustausch zwischen technischen Systemen wie Maschinen und Geräten wird als *Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M-Kommunikation)* bezeichnet. Die M2M-Kommunikation verfolgt das Ziel, sämtliche IT- und Produktionssysteme zu einem intelligenten Netzwerk zusammenzufügen, welches Daten generiert und diese unter Verwendung einheitlicher und standardisierter Schnittstellen weiterverarbeitet. Damit ergeben sich dezentrale Steuerungen in Verbindung mit dem Einsatz des Cloud Computing sowie Big Data- und Analytics-Diensten.

Über verschiedene Sensoren gewonnene Daten werden durch internetbasierte Dienste verarbeitet, um daraus autonome Regelprozesse zu generieren. Dies führt schließlich zu einer Dezentralität, also eine nicht an einen geografischen Ort gebundene Steuerung der Produktionsanlagen.

Voraussetzung für die M2M-Kommunikation ist eine Basisintelligenz in allen zum Einsatz kommenden Netzwerkkomponenten. Jede einzelne dieser Komponenten ist wiederum meist Teil einzelner separater Netze, welche unter Verwendung geeigneter Standards im Kontext von Industrie 4.0 zu einem kommunikationsfähigen Gesamtnetz zusammenzufügen sind.

Um die Kombinierbarkeit der in der M2M-Kommunikation eingesetzten Anwendungskomponenten verschiedenster Hersteller sicherzustellen, sind branchenspezifische Standards in der Automatisierungstechnik zu beachten oder, falls notwendig, neu festzulegen. Einer dieser dafür in Frage kommenden industriellen Kommunikations-Standards ist *OLE for process control - Unified Architecture (OPC UA)* und gilt inzwischen als Industriestandard (De-facto-Standard) zur plattformunabhängigen Kommunikation sowie zum Daten- und Informationsaustausch zwischen Industrieanlagen unterschiedlichster Hersteller (vgl. Siepmann und Graef 2016). Der Einsatz des OPC UA-Standards ermöglicht eine Verbindung der Prozessebene bis zum ERP-System (Topfloor). Die Vision hinter dieser *vertikalen Integration* besteht darin, dass ein Produkt auf Basis von Informationen selbstständig erkennen kann, welche aufeinander

folgenden Produktionsschritte für seine Fertigung notwendig sind. Der Einsatz einheitlicher Schnittstellen auf Basis von OPC UA ermöglicht eine nahtlose Verbindung zwischen ERP-System, MES und dem Shopfloor eines Unternehmens. Das intelligente Produkt kann über Smart Labels (z. B. RFID-Tags) in jedem Arbeitsschritt durch eine eindeutige Produktsteuerungsnummer (PSN) identifiziert werden und zudem qualitäts- und produktionsrelevante Daten weitergeben. Auch für die *horizontale Integration* kann der Kommunikationsstandard OPC UA verwendet werden mit dem Ziel, eine vernetzte und dezentral verteilte Intelligenz aller beteiligten Wertschöpfungskomponenten zu schaffen.

Wichtige internationale Normungsgremien, welche sich mit Themen der Automatisierungstechnik (Feldebene bis Unternehmensebene) auseinandersetzen, sind das IEC/TC 65 „Industrial-Process, measurement, control and automation“ sowie das ISO/TC 184 „Automation Systems and Integration“ sowie deren jeweilige nationale Spiegelgremien. Die Ergebnisse dieser Gremien können dazu beitragen, der Umsetzung einer einheitlichen M2M-Kommunikation zur Verwirklichung von Industrie 4.0 einen erheblichen Schritt näher zu kommen (vgl. Siepmann und Graef 2016).

2.3.3 Mensch-Maschine-Interaktion (MMI)

Nach den Industrie 4.0-Paradigmen werden alle Gegenstände der Fabrikwelt mit integrierter Rechenleistung und Kommunikationsfähigkeit ausgestattet sein (vgl. Abschnitte 2.2.4 und 2.4.2). Damit ergeben sich auch weitreichende Folgen für das Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014). Auch durch die Integration weiterer neuer Technologien in den Arbeitsprozess entsteht ein völlig neues Anforderungs- und Aufgabenspektrum für den Menschen. Anders als im Ansatz des *Computer Integrated Manufacturing (CIM)* der 80er Jahre sieht die Industrie 4.0 somit keine menschenleeren Produktionshallen, sondern die direkte und indirekte Einbindung des Menschen in das *cyber-physische Gefüge* der Produktion vor (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Das cyber-physische Gefüge abstrahiert die Beziehung zwischen Mensch und cyber-physischem System. In diesem theoretischen Erklärансatz gibt es eine physische und virtuelle, d. h. digitale Komponente. Die Wechselwirkung zwischen Mensch und CPS erfolgt dabei entweder durch *unmittelbare Manipulation* (umfasst die Beziehung Mensch und physikalische Komponente) oder mit Hilfe einer vermittelnden Benutzungsschnittstelle (Mensch und virtuelle, digitale Komponente) (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Dieses enge Zusammenspiel zwischen Mensch und CPS wirft allerdings auch soziotechnologische Fragen bezüglich der Autonomie und Entscheidungsbefugnis auf (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014). Sehr deutlich wird diese Problematik bei der *Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)* als Spezialform der MMI. Die dabei auftretenden verschiedenen Interaktionsformen und Aufgabenverteilungen in Mensch-Roboter-Teams in einem geteilten Arbeitsraum sind Gegenstand aktueller Forschungsprojekte (vgl. Onnasch, Maier und Jürgensohn 2016).

Nach dem *Gesetz von der erforderlichen Varietät* aus der Kybernetik können in einem Steuerungsprozess umso mehr Störungen ausgeglichen werden, je größer die Handlungsvarietät des übergeordneten Steuerungsprozesses ist. Als flexibelste Entität im cyber-physischen Gefüge wird dem Menschen genau diese Rolle der überge-

ordneten Steuerungsinstanz zuteil (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014). Der Grund hierfür ist, dass der Mensch weitaus besser dazu fähig ist, Störungen im Steuerungsprozess teil-autonom agierender Systeme zu erkennen als die Systeme selbst. Der *Maschinenanwender* kann damit (neben anderen Rollen und Aufgaben) als eine Art *Problemlöser* in der letzten Instanz beschrieben werden, der innerhalb sich selbst organisierender Produktionsprozesse eine angepasste Produktionssteuerung vorgibt und die korrekte Durchführung dieser überwacht. Im Zusammenspiel CPPS und Mensch bildet der Mitarbeiter in der Industrie 4.0 eine übergeordnete Entscheidungs- und Steuerungsinstanz (vgl. Siepmann und Graef 2016). Dies wird voraussichtlich zu einer Verlagerung weg vom traditionell ortsgebundenen Arbeitsplatz hin zu mobilen Überwachungs-, Steuerungs- und Entscheidungsaufgaben führen. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass der Mensch neben der klassischen Handarbeit, wie beispielsweise dem Auswechseln defekter Komponenten, in der intelligenten Fabrik einen weitaus größeren Verantwortungs- und Wirkungsbereich übernehmen wird (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Insgesamt ist davon auszugehen, dass in einer Industrie 4.0 jeder einzelne Mitarbeiter ein breiteres Aufgabenspektrum übernehmen wird, welches sich überwiegend – aber nicht ausschließlich – durch planerisch-schöpferische Tätigkeiten („Kopfarbeit“) auszeichnet. Ebenso ist es allerdings vorstellbar, dass der Mensch – wann immer erforderlich – am Ort des Geschehens mit seinen Fertigkeiten in die Prozesse eingreift („Handarbeit“), um beispielsweise ein defektes Feldgerät auszutauschen (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Immer mehr automatisierungstechnische Komponenten besitzen mechatronische Fähigkeiten, die parametriert und überwacht werden können und damit einer Benutzungsschnittstelle bedürfen. Anstatt jedes einzelne CPS mit einem proprietären Bedienpanel sowie entsprechenden Eingabegeräten auszustatten, erfolgt der Zugriff auf eine Vielzahl unterschiedlicher Komponenten und Anlagen zukünftig mittels einer mobilen, funkübertragenen Benutzungsschnittstelle (sog. 1:m-Zugriff) beispielweise auf industrietaugliche Tablets (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Die Benutzungsschnittstelle stellt damit das zentrale vermittelnde Element zwischen Mensch und CPS dar. Sie muss dem Menschen transparente Einblicke in Status und Funktionsweise von CPS gewähren und ihm Möglichkeiten bieten, damit zu interagieren (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Da der in der Benutzungsschnittstelle abzubildende Funktionsumfang von automatisierungstechnischen Komponenten kontinuierlich zunimmt, steigt auch die Komplexität, mit der sich der Mensch als Benutzer des Systems auseinandersetzen muss. Aufgrund der stärkeren Verteiltheit und Vernetzung von automatisierungstechnischen Komponenten und den Möglichkeiten zur drahtlosen Kommunikation wird es immer wichtiger, die Position dieser Komponenten (z. B. Einbauort) zu kennen und dem Menschen darzustellen. Gleichzeitig steigt die Mobilität des Menschen als flexibler Problemlöser. Daher muss auch seine Position bekannt sein, um ihm bedarfsgerecht die aktuell benötigten Informationen direkt am Ort des Geschehens (z. B. auf einem mobilen Endgerät bei einem Service-Einsatz) bereitzustellen (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Eine vermittelnde Schnittstelle zwischen Mensch und CPS kann mit Hilfe der virtuellen und erweiterten Realität geschaffen werden. Die *Virtual Reality (VR)* befähigt den

Menschen durch das Nachbilden eines möglichst realistischen Abbilds des Produktionsprozesses, das Verhalten eines cyber-physikalischen Produktionssystems zu simulieren und auf interaktive Weise zu explorieren. Weitere Impulse werden durch die Fortschritte im Bereich der *Augmented Reality (AR)* gesetzt, welche die computergestützte Erweiterung der menschlichen Wahrnehmung mittels virtueller Objekte darstellt. Damit können relevante Informationen unmittelbar in das Sichtfeld des Arbeiters eingeblendet werden (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014).

Eingebettet in Assistenzsysteme werden die aggregierten und aufbereiteten Informationen wiederum einen direkten Weg zu den Akteuren in der Produktion finden müssen und könnten damit eine Vielzahl an unterschiedlichen Anwendungsszenarien unterstützen (Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014). Dazu gehören:

- *Instandhaltung* (d. h. Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Erweiterung) von Produktionsanlagen durch Bereitstellen von interaktiven und virtuellen Handlungsanweisungen

- *Überwachung* von Produktionsprozessen sowie Qualitätskontrolle durch das kontextsensitive Abrufen und Bereitstellen von Informationen, z. B. bezüglich des Status eines CPS

- *Planung* und *(Co-)Simulation* von Produktionsprozessen, indem z. B. das Verhalten von CPS (z. B. Verfahrbewegungen von Linearachsen oder Materialfluss von Produkten) vorgezeichnet wird.

2.3.3.1 Virtual Reality (VR):

Das Ziel der VR ist eine für den Menschen leicht verständliche Visualisierung von komplexen Daten. Es besteht damit die Möglichkeit, eine realistische Abbildung des Produktionsprozesses nachzubilden und diese auf interaktive Weise zu simulieren (vgl. Gorecky, Schmitt und Loskyll 2014). Weiterhin kann sie in den Phasen des durchgängig digitalen Engineerings bis hin zur Planung und Überwachung der Produktionsprozesse zum Einsatz kommen. Für eine vollständige Simulation/Virtualisierung des Arbeitsprozesses muss eine möglichst nahe Abbildung der Realität unter dem Einsatz einer computergesteuerten dreidimensionalen Welt erreicht werden.

Um diese virtuelle Darstellung glaubwürdig zu gestalten, muss der Mensch getäuscht werden. Das Ziel liegt darin, dass in der VR alle Sinne des Menschen so arbeiten, als bewege er sich in der natürlichen Umwelt. Die Ausgabe dieser virtuellen Realität erfolgt unter dem Einsatz unterschiedlichster Hard- und Software. Durch eine vollständige Rundumsicht kann der Mensch interaktiv in diese virtuelle Realität eintauchen, welche unter anderem Maschinen- oder Bauteilsimulationen ermöglichen. Somit kann das Verhalten cyber-physischer Produktionssysteme im Sinne des durchgängigen digitalen Engineering sehr realistisch simuliert und auf eine interaktive Weise erkundet und gesteuert werden (vgl. Siepmann und Graef 2016).

2.3.3.2 Augmented Reality (AR):

Das Ziel der AR ist eine Unterstützung des Menschen durch zusätzliche Informationen, die ergänzend zu denen der realen Welt visuell wiedergegeben werden. Dabei interagiert der Mensch mit einem mit Simulationsdaten angereicherten Realbild (Kamerabild). Industrielle Anwendung findet AR z. B. in der Anlagen-, Produkt- und Produktionsplanung sowie Instandhaltung und Wartung.

Die AR-Technologie wurde in der Vergangenheit meist mit Datenbrillen und -handschuhen in Verbindung gebracht. Durch den Einsatz modernster mobiler Geräte wie Smartphones oder Tablets, welche mit relativ großen Displays, Touch-Funktionen und Kameras ausgestattet sind, ist es möglich, die „reale Welt“ zu erfassen und diese durch das Einblenden zusätzlicher Informationen zu erweitern. Dabei kommen Technologien wie Navigations- und Ortungsdienste, Bilderkennung und der Blickwinkel des Betrachters zum Einsatz. Das so angereicherte Kamerabild kann Informationen anzeigen, die mobil eingesehen werden können und aus verschiedensten Datenquellen stammen (vgl. Mayer und Pantförder 2014).

Für die Darstellung der virtuellen Objekte, welche mit einem Programm zur Erstellung von 3D-Computergrafiken generiert werden, wird zunächst ein geeignetes Display benötigt. Dazu zählen Computerbrillen, traditionelle Monitore, Videoprojektoren oder Smartphones (vgl. Tönnis 2010). Das Tracking übernimmt durch das Ermitteln und Verfolgen von Positionen und Rotationen, die Bestimmung des Standortes des Betrachters und wichtiger Objekte seiner Umgebung. Dabei kommt zum einen das visuelle Tracking (per Kamera) und zum anderen das nichtvisuelle Tracking (per gyroskopische Sensoren und GPS) zum Einsatz (vgl. Tönnis 2010). Die Interaktion kann u. a. über Gesten, wie Finger- oder Handbewegungen sowie über physische und visuelle Tasten erfolgen.

Beispielsweise kann ein AR-Tool einem Techniker auf dem Display seines Tablets, welches er in Richtung der Arbeitsumgebung dreht, automatisch alle zur Montage oder Reparatur benötigten Ressourcen wie Werkzeuge und Anleitungen einblenden und ihn intuitiv durch die notwendigen Arbeitsschritte leiten (vgl. Siepmann und Graef 2016). Im Bereich der Fertigung lassen sich z. B. Status- und Störungsmeldungen visualisieren.

2.4 Industrie 4.0: Referenzarchitekturen

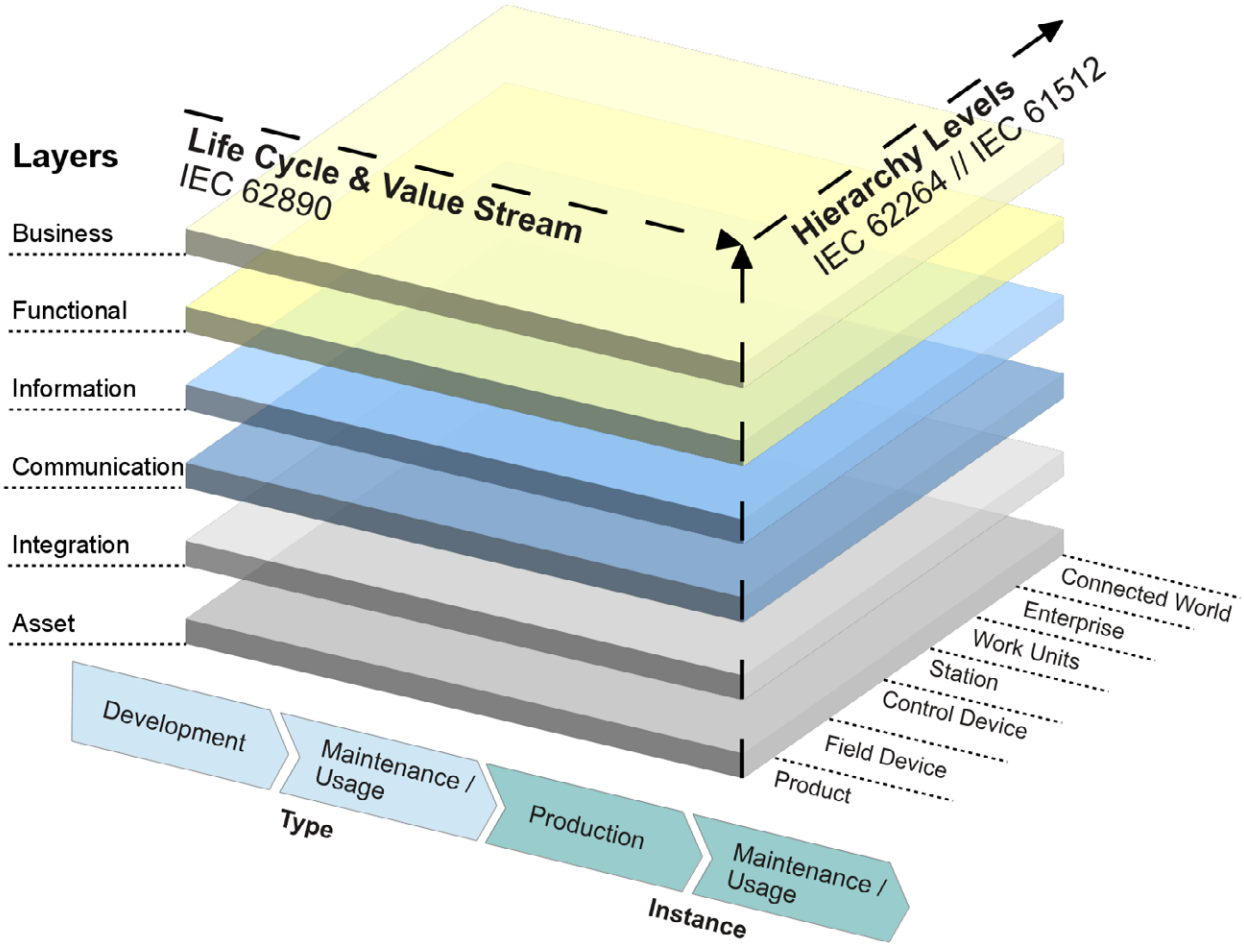

Abb. 2.3 RAMI 4.0: Referenzarchitektur-Modell für Industrie 4.0 – makroskopische Sicht (Grafik: Kasper; angelehnt an DIN SPEC 91345:2016-04)

Heutige Unternehmensstrukturen weisen im Allgemeinen mindestens zwei Ebenen auf: den *Office Floor* mit starkem Verwaltungs- und Organisationscharakter und den *Shop Floor* zur Produktion von Produkten. Diese beiden Ebenen operieren heute meist noch getrennt (Heidel u. a. 2017). Das gilt für die Planung und Durchführung von Prozessen, für das Management und für Verantwortlichkeiten, was sich in der IT anhand unterschiedlicher Datenmodelle für beide Ebenen widerspiegelt (Heidel u. a. 2017). Damit ist eine *Durchgängigkeit* von Daten sowie deren Austauschbarkeit zwischen beiden Ebenen nur unzureichend gegeben.

Industrie 4.0 hat daher als vorrangiges Ziel, ein allgemein gültiges Datenmodell zu spezifizieren, das alle Geschäftspartner entlang der Wertschöpfungskette nutzen. Damit könnten zukünftig umständliche, kostenintensive und fehleranfällige Parallelstrukturen einschließlich nötiger Überführungen entfallen (vgl. Heidel u. a. 2017).

Um die in den vorigen Abschnitten beschriebenen zentralen Industrie 4.0-Paradigmen sowie die als Bausteine fungierenden technologischen Komponenten ganzheitlich betrachten zu können, werden sie in Form eines Gesamtkonzeptes auf Basis eines gemeinsamen theoretischen Modells (sog. *Referenzarchitekturen*) zu-

sammengeführt. Sowohl die vertikale und horizontale Integration innerhalb der Fabrik als auch die Reflexion des durchgängigen Engineerings über die ganze Wertschöpfungskette sollen in einem Modell dargestellt werden (vgl. ZVEI/VDI/VDE-GMA 2015).

Industrie 4.0 spezifiziert mit dem sog. *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)* nicht „die eine allgemein anzuwendende" Architektur schlechthin und damit eine Festlegung auf konkrete einzusetzende Technologien, sondern lediglich den Rahmen mit Mindestanforderungen. Damit kann die Referenzarchitektur eher als Modellmuster aufgefasst werden – also als idealtypisches Modell für eine *Klasse der zu modellierenden Architekturen* sowie eine Beschreibung von *Metastrukturen* (vgl. Heidel u. a. 2017; vgl. Huber 2016b; ZVEI/VDI/VDE-GMA 2015).

RAMI 4.0 soll daher auch im Rahmen dieser Studie als theoretische Idealvorstellung zur grundsätzlichen Einordnung der im nächsten Kapitel (siehe Kapitel 3) darzustellenden Anwendungsszenarien (sog. *Use Cases*) dienen sowie ihrer Bewertung hinsichtlich des technologischen Erfüllungs- bzw. Durchdringungsgrades bezogen auf die Industrie 4.0-Konzepte.

Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 wurde in den letzten Jahren von den Akteuren der Plattform Industrie 4.0 entwickelt. Das Modell besteht aus einem Koordinatensystem, in dem die komplexen Zusammenhänge der Industrie 4.0 in drei Dimensionen aufgegliedert werden: IT, Lifecycle und Automatisierungshierarchie. RAMI 4.0 soll Unternehmen Orientierung bieten und verdeutlicht Überschneidungen und Lücken in der konkreten Standardisierung. Das Modell wird aktuell in der DIN-Spezifikation DIN SPEC 91345:2016-04 und im IEC PAS 63088:2017-03 beschrieben und findet nun mit Unterstützung des Standardisation Council auch international große Beachtung. RAMI 4.0 wird inzwischen in den internationalen Normungsorganisationen *International Organization for Standardization (ISO)* und *International Electrotechnical Commission (IEC)* als Vornorm anerkannt. Das geht auf die Initiative der Plattform und ihrem Partner „Standardization Council Industry 4.0" zurück (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017c).

Ziel ist die Anerkennung von RAMI 4.0 als internationaler Standard. Weiterführende Aktivitäten und die Harmonisierung auf der internationalen Ebene werden in der neu gegründeten gemeinsamen Arbeitsgruppe ISO/IEC/JWG 21 diskutiert (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017c).

Die Ziele von RAMI4.0 lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (vgl. Heidel u. a. 2017; vgl. Huber 2016b):

- anschauliches und einfaches Architekturmodell als Referenz für den gesamten Industrie 4.0-Lösungsraum als Basis für
- die Zuordnung und Integration *bestehender Normen und Standards*, die Minimierung der Zahl der eingesetzten Normen und Standards durch Evaluierung von Überschneidungen inklusive dem Aufzeigen von gegebenenfalls vorhandenen normativen *Lücken* sowie

- die Evaluierung von Untermengen einer Norm bzw. eines Standards zur schnellen Umsetzung von Teilinhalten für Industrie 4.0 sowie die Integration von *Use Cases*.

2.4.1 Referenzarchitektur Industrie 4.0 (makroskopische Sicht)

Die **senkrechte Achse** des dreidimensionalen Modelles (siehe Abb. 2.3) stellt Layer/Schichten dar, angefangen auf der Ebene von Geschäftsprozessen (Business Layer), Funktionalitäten, Daten (Informationen) bis hin zu Hardware/Software (Assets). Hierbei kann es sich um konkrete Anlagen, Maschinen oder Rechnersysteme handeln. Auf der **waagerechten Achse** erfolgt die Darstellung des Produktlebenszyklus inklusive der Wertschöpfungsketten. Auf der **dritten Achse** werden Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten innerhalb einer Fabrik oder Anlangen definiert (funktionale Hierarchie) (vgl. Huber 2016b).

Die einzelnen Dimensionen werden im Folgenden näher beschrieben (vgl. Heidel u. a. 2017; vgl. Huber 2016b; ZVEI/VDI/VDE-GMA 2015):

- **Layers:** Mit Hilfe der sechs Schichten auf der *vertikalen Achse* des Modells wird die IT-Repräsentanz strukturiert Schicht für Schicht beschrieben. Bei dieser Repräsentanz handelt es sich um das digitale Abbild beispielsweise einer Maschine. Die Darstellung in Form von Schichten stammt aus der Informations- und Kommunikationstechnologie. Dort ist es üblich, Strukturen komplexer Produkte in Schichten aufzugliedern. Jede Schicht umfasst die anderen beiden weiter unten beschriebenen Dimensionen *Life Cycle & Value Stream* bzw. *Hierarchy Levels*.

- **Life Cycle & Value Stream:** Auf der *horizontalen Achse* werden alle Schritte über den gesamten Produktlebenszyklus inklusive der Wertschöpfungsketten (von der Konstruktion bis zur Verschrottung) beschrieben.

- **Hierarchy Levels:** Die *dritte Achse* kann im weitesten Sinn als die bekannte Automatisierungspyramide verstanden werden, (ERP - MES - Shopfloor). Die Funktionalitäten und Verantwortlichkeiten wurden um das Werkstück („Product“) sowie den Zugang in das Internet der Dinge und Dienste („Connected World“) ergänzt, um die Industrie 4.0-Umgebung abzubilden.

Innerhalb der einzelnen **Layer/Schichten** soll eine starke Kopplung der Komponenten und Technologien vorherrschen und zwischen den einzelnen Layers/Schichten hingegen eine lose Kopplung. Somit ist ein Ereignis- und Informationsaustausch ausschließlich zwischen zwei benachbarten Layers beziehungsweise innerhalb einer Schicht erlaubt. Dies entspricht dem klassischen abstrahierenden Ansatz der Informations- und Kommunikationstechnologie, netzwerkbasierte Kommunikation verteilter Systeme in Schichten darzustellen (siehe das sog. „ISO/OSI-Referenzmodell“ bzw. auch „7-Schichten-Modell“ genannt). Darüber hinaus ist natürlich auch eine *Modularisierung* erlaubt. Mehrere RAMI 4.0-konforme Systeme können zu einem größeren Gesamtsystem verbunden werden (vgl. Huber 2016b) – es entsteht ein *System aus Systemen*. Der *Asset Layer* beispielsweise bildet in RAMI 4.0 die unterste Schicht. Er reflektiert die physische Welt. Die fünf Schichten darüber sind der Informationswelt zugeordnet. Der *Integration Layer* ist das Bindeglied zwischen der physischen Welt eines Assets und der Informationswelt von Industrie 4.0. Er stellt

eine Art Übersetzer zwischen physischer Welt und Informationswelt dar (vgl. Heidel u. a. 2017).

Bei Einkauf, Logistik und Produktion oder auch in der Entwicklung mit Simulation von Produkten und Maschinen erfolgt eine immer stärkere Vernetzung in Form der *horizontalen Integration*. Dazu müssen **Lebenszyklen und Wertschöpfungsketten** immer stärker herstellerübergreifend digitalisiert und stärker vernetzt werden. Zusätzlich werden aus den teilweise linearen Wertschöpfungsketten immer mehr ineinander vernetzte Wertschöpfungsnetzwerke, die sehr schnell digital ihre Informationen untereinander austauschen. Daher wird das digitale Abbild in der Informationswelt hierfür immer wichtiger (vgl. Heidel u. a. 2017).

Die **Hierarchy Levels** als dritte Dimension dienen der *vertikalen Integration* innerhalb einer Anlage oder Fabrik. Sie reflektieren im Wesentlichen die bisherige Automatisierungspyramide. Zusätzlich wurde sie um zwei neue Ebenen erweitert: *Product* und *Connected World*. Das Produkt wurde hinzugefügt, weil es künftig seinen eigenen Fertigungsprozess beeinflussen kann und somit Teil des Lösungsraums von Industrie 4.0 ist. Damit soll den Paradigmen von Industrie 4.0 Rechnung getragen werden, dass im Gegensatz zu früheren Ansätzen nicht mehr das Produkt durch den Fertigungs- und Verarbeitungsprozess entsteht bzw. definiert wird, sondern die Produkt-Metadaten den Prozess und damit die Entstehung des realen Produktes steuern.

Produktionsstandorte der Industrie 4.0 sind nicht mehr autarke Fertigungs-„Inseln“ – Standorte einzelner Werke und Firmen sind vielmehr untereinander über die Unternehmensleitebene hinaus global vernetzt. Daher wurde die Achse nach oben um die vernetzte Welt in Form der *Connected World* als Zugang in das Internet der Dinge und Dienste ergänzt. Damit können die Kooperationen über Firmengrenzen hinweg im Modell abgebildet werden. Allerdings geht es im Gegensatz zur klassischen Automatisierungspyramide um eine *funktionale Hierarchie* und nicht um Geräteklassen oder Hierarchieebenen (vgl. Heidel u. a. 2017; vgl. Huber 2016b).

Das Modell RAMI 4.0 vereint so die unterschiedlichen Nutzerperspektiven und schafft ein gemeinsames Verständnis für Industrie 4.0-Technologien. Anhand dessen können die Anforderungen der Anwenderbranchen – von der Fertigungsautomatisierung über den Maschinenbau bis hin zur Verfahrenstechnik – in den entsprechenden Gremien der Verbände und Normungsgremien diskutiert werden. Das Modell schafft ein gemeinsames Verständnis für Standards, Normen und praktische Anwendungsszenarien (vgl. Hofmann 2016).

Eine Migration von Industrie 3.x nach Industrie 4.0 kann erfolgen, indem alle in der Integrationsschicht vorhandenen nicht Industrie 4.0-konformen Daten, Funktionen, Kommunikationssysteme usw. nach und nach durch I4.0-konforme Daten, Funktionen, Kommunikationssysteme ersetzt und dann den jeweiligen höheren Schichten zugeordnet werden (Heidel u. a. 2017). Alle bestehenden Anlagen könnten nach Meinung der genannten Autoren nach und nach für Industrie 4.0 nachgerüstet werden. Entweder können die Anlagen erste Daten und Funktionen für Industrie 4.0 selbst bereitstellen oder in Form einer „Gateway“-Lösung mit einer Zusatzhardware Daten und Funktionen aus Anlagen für das Industrie 4.0-Netzwerk zur Verfügung stellen (Heidel u. a. 2017). Ein konkretes Beispiel hierzu liefert der *Use Case 4* im Abschnitt 3.4.

2.4.2 Industrie 4.0-Komponente mit Verwaltungsschale (mikroskopische Sicht)

Die mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird durch den Aufbau und die Arbeitsweise sogenannter *Industrie 4.0-Komponenten* beschrieben (siehe Abb. 2.4).

Der wesentliche Gedanke von Industrie 4.0 ist die verstärkte und direkte Kommunikation zwischen Komponenten, Produkten und Maschinen auf dem Shopfloor mit den IT-Systemen des Unternehmens, z. B. dem ERP-System. Dies setzt aber die Kommunikationsfähigkeit der Komponenten (sog. Assets) auf dem Shopfloor voraus.

Ein Klemmenblock im Schaltschrank, eine einfache Pumpe in einer chemischen Anlage oder ein Linearmotor in einer Fertigungsmaschine können aber im Regelfall nicht untereinander oder mit IT-Systemen kommunizieren. Allerdings können einfache Produkte und Komponenten, zum Beispiel mittels eines 2D-Barcode oder eines RFID-Transponders, eineindeutig und automatisch identifiziert werden. Mit Hilfe dieser eineindeutigen Identifikation kann der jeweiligen Komponente (z. B. Klemmenblock, Pumpe, Motor) eine *virtuelle Repräsentation* (sog. *digitaler Zwilling*) zugeordnet werden. Diese enthält die Beschreibung der relevanten Eigenschaften und Funktionalitäten der zugeordneten Komponente. Diese virtuelle Repräsentation wird im RAMI 4.0 als *Verwaltungsschale* bezeichnet (vgl. Regtmeier und Kaufmann 2016). Während das Asset in der realen Welt verhaftet ist, reflektiert die Verwaltungsschale das Asset in der Informationswelt auf den oberen fünf RAMI-Schichten (Integration, Kommunikation, Information, Funktionen, Geschäftsprozesse) (Heidel u. a. 2017).

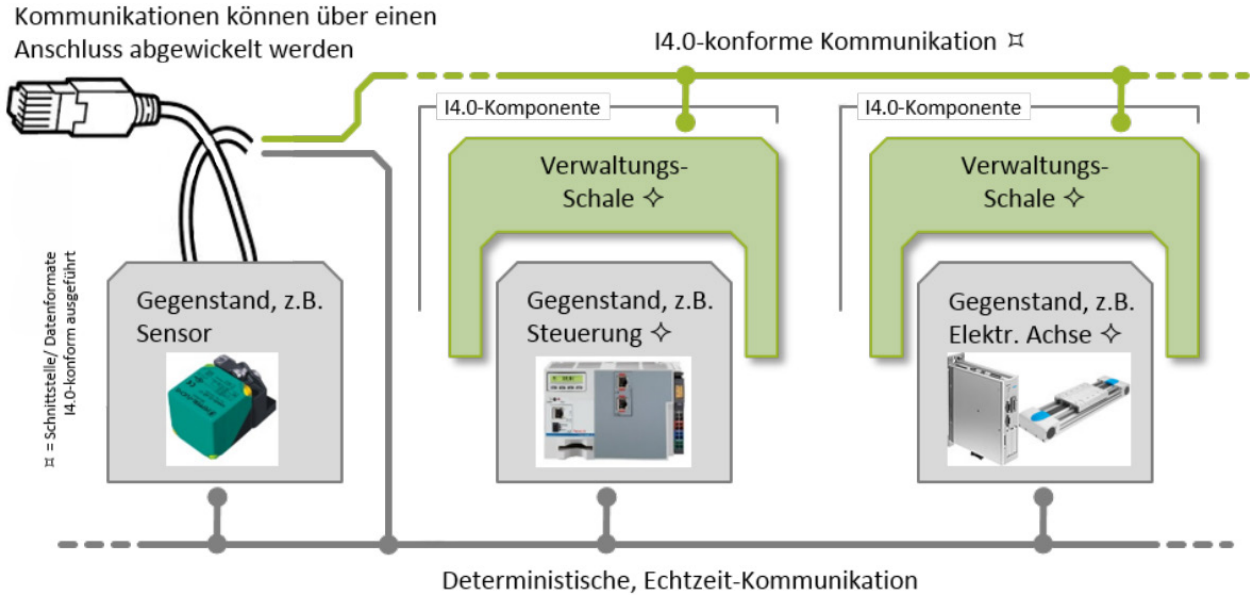

Abb. 2.4 RAMI 4.0: I4.0-Komponente mit Verwaltungsschale – mikroskopische Sicht (vgl. DIN SPEC 91345:2016-04)

Somit können einem Bauteil, z. B. einer einzelnen Kontakt-Klemme, einem wichtigen Maschinenelement oder einer ganzen Maschine jeweils eine eigene Verwaltungsschale zugeordnet werden. Dies gilt für den gesamten Lebenszyklus der Komponente. Hierbei werden kontinuierlich Daten gesammelt, verarbeitet und ausgetauscht. Mit diesen Verwaltungsschalen können dann die IT-Systeme einzeln auf Basis ihrer eigenen Identität kommunizieren. Dieser Gedanke, dass nachträglich auch einfache

Komponenten zu *Industrie 4.0-Komponenten* nachgerüstet werden können, erlaubt es auch, ältere Maschinen, Produkte und Komponenten in moderne Industrie 4.0-Lösungen zu integrieren (vgl. Regtmeier und Kaufmann 2016; Huber 2016b).

Bei den *Daten* in der Verwaltungsschale kann es sich um Handbücher, CAD-Zeichnungen, Produktionskennzahlen (zum Beispiel Soll- und Ist-Werte), Wartungsinformationen usw. handeln. Bei den *Funktionen* handelt es sich etwa um die Themen Bedienung, Geschäftslogik und Konfigurationsinformationen (vgl. Huber 2016b).

Das in Abschnitt 2.4.1 beschriebene Referenzmodell RAMI 4.0 gibt für jede Verwaltungsschale eine ganze Reihe von Anforderungen vor, welche einen einheitlichen Aufbau und Ansatzpunkte für Interoperabilität und Kooperation bieten. Die Verbindung zu anderen Verwaltungsschalen erfolgt mittels der I4.0-konformen Kommunikation (Heidel u. a. 2017).

Eine komplexe reale Maschine lässt sich hierüber in der virtuellen Welt durch die Komposition von verschiedenen Industrie 4.0-Komponenten darstellen und bildet damit ein *System aus Systemen* einschließlich ihrer kaskadierten digitalen Repräsentanz. Auch diese Komposition ist ein in der Informatik wohl bekannter und vertrauter Ansatz in Form einer Dekomposition beziehungsweise *Modularisierung* (vgl. Heidel u. a. 2017; vgl. Huber 2016b).

2.4.3 Modellfabriken und Testzentren

Es gibt heute zahlreiche kleine und mittelständische *Maschinen- und Anlagenbauer*, die für Industrie 4.0 bereits neue Komponenten entwickeln. Sie suchen nach realitätsnahen, komplexen und vernetzten *Testzentren*, um ihre Neuentwicklungen möglichst praxisnah zu erproben und ihre Ideen zur Anwendungsreife zu bringen. Genauso benötigen die *Anwender* der neuen, digitalen Technologie passende Möglichkeiten, um innovative Systemansätze und vernetzte Geschäftsmodelle ohne größere Eintrittsbarrieren testen und bis zur Marktreife weiterentwickeln zu können (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017b). Weiterhin kann durch die Umsetzung beispielhafter Implementierungen in Testzentren die Interoperabilität und *Standardisierung von Technologien* unterstützt werden.

Was ist ein Testzentrum (Hahn 2016)?

- Testzentren verfügen sowohl über die technische Infrastruktur als auch Mitarbeiter mit der entsprechenden fachlichen und methodischen Kompetenz.
- Testzentren bieten langjährige Anwendungsexpertise in Bezug auf die Digitalisierung der produzierenden Industrie.
- Darüber hinaus helfen die Testzentren bei der Erstellung und Umsetzung der Testszenarien.

Wofür kann man Testzentren nutzen (Hahn 2016)?

- Ableiten und Prüfen eigener Ideen bezüglich neuer Produkte, Geschäftsmodelle und deren Umsetzung in einem realen Umfeld

- Hilfe bei der frühen Bewertung der Auswirkungen der Digitalisierung auf das jeweilige Unternehmen, insbesondere im Hinblick auf Technologie, Prozesse und Geschäftsmodelle

- Aufbau neuer Technologie- und Methodenkompetenz in den beteiligten Unternehmen

- Herausforderungen können angegangen werden: eigene Innovationen können mit minimalem finanziellen und technischen Risiko auf Marktreife geprüft werden.

An besonderen Schwerpunkten in Hochschulen und Forschungseinrichtungen existieren in Deutschland eine Reihe von Testzentren, in denen komplexe Produktions- und Logistikanlagen unter realistischen Bedingungen erprobt, getestet und weiterentwickelt werden. Durch eine Vernetzung der Testzentren untereinander lässt sich zudem die Möglichkeit schaffen, verteilte Produktions- und Anwendungsprozesse in mehreren Testumgebungen realitätsnah nachzubilden (Plattform Industrie 4.0 2017b).

Auf der *Landkarte Testzentren*[8] sind deutschlandweit Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen aufgezeigt, in denen Industrie 4.0-Anwendungen getestet werden können (Plattform Industrie 4.0 2017b).

Neben der Kooperation mit dem „Standardization Council Industry 4.0“ arbeitet die Plattform Industrie 4.0 auch mit dem „Labs Network Industrie 4.0 e. V.“ zusammen. Der Verein etabliert mit dem amerikanischen „Industrial Internet Consortium (IIC)“ gemeinsam genutzte Testzentren, in denen Industrie 4.0-Anwendungen kontrolliert erprobt werden. Damit wollen die Partner unter anderem Normungslücken identifizieren und Impulse für neue Projekte und die internationale Standardisierungsarbeit geben (vgl. Plattform Industrie 4.0 2017c).

2.5 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf die allgemeinen Industrie 4.0-Konzepte

Die heute in der industriellen Automation verwendeten digitalen Steuerungssysteme sind im Allgemeinen *Echtzeitsysteme* mit garantierten Reaktionszeiten und zeichnen sich durch einen hohen Aufwand an manueller Konfiguration aus. Da diese Konfiguration nach der Inbetriebnahme fest ist, sind die Steuerungssysteme während des Produktionsbetriebes in der Regel nicht an sich verändernde Prozessparameter oder veränderte Kommunikationsstrukturen flexibel anpassbar (vgl. Schriegel, Jasperneite und Niggemann 2014). Die Konzepte von Industrie 4.0 beschreiben hingegen flexible Produktionssysteme, die schnell und einfach umgebaut und an neue Anforderungen angepasst werden können. Hier sollen in Zukunft automatische Konfigurationstechnologien Basis für adaptive Echtzeitsysteme und somit für wandlungsfähige Produktionssysteme sein, was auch als *Plug and Work* bezeichnet wird (Schriegel, Jasperneite und Niggemann 2014).

---

[8] https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/Karte/SiteGlobals/Forms/Formulare/karte-testbeds-formular.html (Zugegriffen: 18. Januar 2019)

Digitale Steuerungssysteme ermöglichen neben der reinen Datenerfassung und -ausgabe z. B. auch das lagegeregelte Verfahren von Maschinenachsen in einem Interpolationsverbund einer Werkzeug- oder Produktionsmaschine (sog. *Motion Control*) – dies sind *nicht-sicherheitsgerichtete Betriebsfunktionen*. Zusätzlich erfüllen sie häufig auch *sicherheitsgerichtete Funktionen* wie z. B. das Erfassen eines Not-Halts und das Überführen der Maschine in den Zustand „Sicherer Betriebshalt“. Hierfür sind die Anforderungen hinsichtlich zeitlicher Genauigkeit und Zuverlässigkeit in diesem *Echtzeitsystem* ungleich höher.

Sicherheitsgerichtete Steuerungsfunktionen zur Erreichung der funktionalen Sicherheit von Maschinen und Anlagen werden auf Basis *sicherheitsgerichteter Echtzeitsysteme* umgesetzt, um verlässliche Reaktionen auf sicherheitsrelevante Ereignisse zu garantieren. Beispielsweise kann das Auswerten eines menschlichen Eingriffes in einen Lichtvorhang und das auszulösende sichere Stillsetzen einer Antriebsbewegung einer Maschine nur von einem sicherheitsgerichteten Echtzeitsystem geleistet werden.

Daher sollen in diesem Abschnitt begriffliche Grundlagen wie z. B. *Echtzeitbetrieb* für ein weiteres Verständnis von Sicherheitsfunktionen erklärt werden.

2.5.1 Echtzeitsysteme, Echtzeitbetrieb und Realzeitverarbeitung

Bei *sicherheitsgerichteten* und im Kontext von Industrie 4.0 über mehrere Steuerungsrechner *verteilten* Echtzeitsystemen handelt es sich um hoch verlässliche, programmierbare, elektronische Systeme für sicherheitsbezogene Automatisierungsanwendungen. Dies ist ein vergleichsweise neues Gebiet der Informationstechnik, das sich erst am Anfang seiner gründlichen Bearbeitung in der Forschung befindet (vgl. Halang und Konakovsky 2013).

Die Bedeutung dieses Faches ergibt sich aus dem wachsenden Sicherheitsbewusstsein in unserer Gesellschaft. Daraus entsteht eine verstärkte Forderung nach verlässlichen technischen Systemen, um menschliches Leben nicht in Gefahr zu bringen und Umweltkatastrophen zu verhindern. Andererseits kann damit der technische Trend hin zu flexibleren, d. h. programmgesteuerten, Steuer- und Regelgeräten für Automatisierungs- und Überwachungsfunktionen unter Echtzeitbedingungen bedient werden, um der Industrie einen Wettbewerbsvorsprung durch gesteigerte Produktivität, Flexibilität und Qualität zu geben. Es muss daher der Zustand erreicht werden, dass informationsverarbeitende Systeme mit einem hinreichenden Grad an Vertrauen in ihre Verlässlichkeit erstellt werden können. Nur dann kann ihre Zulassung für sicherheitsbezogene Automatisierungsaufgaben durch die Aufsichtsbehörden auf der Basis formeller Abnahmen erlaubt werden (vgl. Halang und Konakovsky 2013).

Im Zusammenhang mit der *Erfassung*, *Speicherung* und *Verarbeitung* von Prozessdaten wird in Veröffentlichungen im Kontext von Industrie 4.0 sehr gern und häufig der Begriff „Echtzeit“ benutzt, um auszudrücken, dass diese Aufgaben in sehr hoher Geschwindigkeit mit minimalen Verzögerungen durchzuführen sind. Daher ist es erforderlich, die Definition von *Echtzeit* bzw. des damit eng verbundenen *Echtzeitbetriebes* von Steuerungssystemen aus automatisierungstechnischer Fachsicht genauer zu betrachten.

Von anderen Formen der Datenverarbeitung unterscheidet sich der Echtzeitbetrieb durch das explizite Hinzutreten der Dimension *Zeit* (vgl. Benra und Halang 2009). Ereignisse werden gemäß dem Kant'schen Zeitbegriff in einer Reihenfolge (d. h. einer Vorher-Nachher-Beziehung) angeordnet. Ein Echtzeitsystem besteht aus Hardware- und Softwarekomponenten, welche interne und externe Daten und Ereignisse erfassen und verarbeiten. Die Ergebnisse der Informationsverarbeitung müssen zeitrichtig (bzgl. Reihenfolge und Zeitpunkt) an den Prozess, an andere Systeme bzw. an den Nutzer weitergegeben werden (vgl. Wörn und Brinkschulte 2005).

Herausragende Eigenschaften von Echtzeitsystemen sind die von den jeweiligen Anwendungen (z. B. die zu regelnden Prozessgrößen einer verfahrenstechnischen Anlage) vorgegebenen Zeitbedingungen. So eine Anwendung besteht typischerweise darin, dass ein technischer Vorgang mit Hilfe eines Rechensystems erfasst, behandelt und gesteuert werden muss. Aus der Sicht der Informatik ergibt sich damit eine markante Aufteilung in ein *externes System* (der Prozess), das die anwendungsspezifischen Zeitbedingungen vorgibt, und ein *internes System*, das die vorgegebenen Zeitbedingungen zu beachten hat (vgl. Zöbel 2008). Diese Art, ein Rechensystem zu betreiben, heißt *Echtzeitbetrieb* (genau genommen *Realzeitbetrieb*) und ist nach DIN 44300-1:1995-03 wie folgt definiert:

> *Echtzeitfähigkeit ist die Fähigkeit eines Prozessrechensystems, die Rechenprozesse ständig derart ablaufbereit zu halten, dass sie innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls auf Ereignisse im Ablauf eines technischen Prozesses reagieren können.*

Da oben genannte Norm ohne Nachfolger zurückgezogen wurde, kann aktuell für die identisch lautende Definition von *Echtzeitfähigkeit* das „Internationale Elektrotechnische Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik" herangezogen werden (DIN IEC 60050-351:2014-09, Definition 351-54-06).

Bei Echtzeitsystemen ist neben der Korrektheit der Ergebnisse genauso wichtig, dass klar definierte Zeitbedingungen erfüllt werden (vgl. Wörn und Brinkschulte 2005).

Definitionsgemäß ist es also Aufgabe für in dieser Betriebsart arbeitende Digitalrechner, Programme auszuführen, die mit externen technischen Prozessen in direktem Zusammenhang stehen. Da die Programmabläufe mit den in den *externen Prozessen* auftretenden Ereignissen zeitlich synchronisiert sein und mit diesen Schritt halten müssen, werden Echtzeitsysteme auch als *reaktive Systeme* bezeichnet. Und da sie stets in größere Automatisierungsumgebungen (die „einbettenden Systeme") eingebettet sind, werden sie auch eingebettete Systeme genannt (vgl. Benra und Halang 2009).

Entsprechend der Anforderungen der einbettenden Systeme teilt man Umgebungen in solche mit *harten* und *weichen* Echtzeitbedingungen ein. Diese unterscheiden sich durch die Konsequenzen, die Verletzungen der Rechtzeitigkeitsforderung nach sich ziehen. Weiche Echtzeitumgebungen sind durch Kosten oder durch Einschränkungen bei der Benutzbarkeit charakterisiert, die in der Regel mit zunehmender Verspätung der Rechenresultate stetig ansteigen bzw. sich verschlechtern. Dagegen sind solche Verspätungen in *harten* Echtzeitumgebungen *unter keinerlei Umständen hinnehmbar*, da verspätete Rechnerreaktionen entweder nutzlos oder sogar für Menschen oder den externen Prozess *gefährlich* sind. Mit anderen Worten, der Schaden

bei Nichteinhaltung vorgegebener Zeitschranken in harten Echtzeitumgebungen ist nicht akzeptabel. Auf der anderen Seite sind vorzeitig eintreffende Resultate zwar korrekt, aber nicht qualitativ besser. Harte Zeitbedingungen können exakt bestimmt werden und ergeben sich typischerweise aus den physikalischen Gesetzen (z. B. Grenzfrequenz von Sensoren oder Signal-Laufzeiten bei Datenübertragungen) bzw. die im Prozess zu steuernden / zu regelnden physikalischen Prozessgrößen (vgl. Benra und Halang 2009).

> ***Beispiel 1:*** *Ein Onlineportal zur Buchung von Flügen enthält typischerweise weiche Echtzeitanforderungen und soll Folgendes leisten: Die Buchung eines Sitzplatzes in einem Flugzeug soll in 90 % der Fälle weniger als 10 Sekunden und in 99 % der Fälle weniger als 20 Sekunden dauern. Wenn der Buchungsvorgang länger dauert, kann das aus Benutzersicht ärgerlich sein: die Transaktion dauert länger als erwartet oder der Sitzplatz ist im schlimmsten Fall inzwischen durch einen anderen Passagier belegt. Ansonsten haben Verletzungen der Zeitschranken keine gefährlichen Auswirkungen.*
>
> ***Beispiel 2:*** *Die Strom- und Drehzahlregelung eines digitalen Antriebssystems (in Form einer Reglerkaskade) einer Maschine stellt ein mechatronisch schwingungsfähiges System dar. Um die Drehzahl des Antriebes auch unter mechanischer Belastung durch die Arbeitsmaschine auf einem vorgegebenen Drehzahl-Sollwert konstant zu halten (sog. Störgrößen-Regelung), muss der Antriebsregler die aktuellen Strom- und Drehzahl-Istwerte erfassen, die notwendigen Stellgrößen bezogen auf die Sollwerte errechnen und an den Antriebssteller (Frequenzumrichter) ausgeben. Diese Erfassung (Input), Berechnung (Logic) und Ausgabe (Output) muss in einem fest vorgegebenen Zeitraster in sehr hoher Geschwindigkeit (typischerweise im Bereich von wenigen Mikrosekunden) erfolgen, damit die Stellgrößen (Ausgaben) stets mit den Istgrößen (Eingaben) korrespondieren. In diesem Antriebs-Regelungssystem bestehen also harte Echtzeitanforderungen. Werden Stellgrößen zu spät oder zu zeitig ausgegeben (Verletzung der Echtzeitbedingungen), kann sich dieses schwingungsfähige System im ungünstigen Fall bis zu seiner endgültigen mechanischen Zerstörung aufschaukeln (sog. Anregung mit Resonanzfall). Je nach im System vorhandenen kinetischen Energien (z. B. große Massen rotieren mit hoher Geschwindigkeit) können dabei erhebliche Schäden an Mensch, Technik und Umwelt entstehen. Verletzungen der Zeitschranken sind daher bei diesem System nicht tolerierbar und haben negative Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit der Maschine.*

Wie in Beispiel 2 gezeigt, treten bei der Steuerung und Regelung von technischen Prozessen in der Automatisierungstechnik die härtesten Echtzeitbedingungen auf. Rechnergestützte Steuerungs- und Regelungssysteme sind meistens um eine Größenordnung komplexer als Nicht-Echtzeitsysteme (vgl. Wörn und Brinkschulte 2005).

Es geht also bei einem Echtzeitsystem im Kern darum, bei der Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Echtzeitdaten einen möglichst *genauen Zeittakt* (definierte Zeitintervalle) einzuhalten. Wie lang oder kurz diese Takte sind, hängt von den Erfordernissen der jeweiligen Anwendung ab – in der Regel wird die Dynamik der Prozessdaten (Werteänderungen pro Zeiteinheit) für die Auslegung der maximal zulässigen Zeitintervalle zugrunde gelegt (für weiterführende Informationen siehe das „Nyquist-Shannon-Abtasttheorem“).

2.5.2 Anforderungen an Echtzeitsysteme

Auf Anforderung durch den externen Prozess müssen die Erfassung und Auswertung von Prozessdaten sowie geeignete Reaktionen rechtzeitig ausgeführt werden. Dabei steht *nicht die Schnelligkeit* der Bearbeitung im Vordergrund, sondern die *Rechtzeitigkeit der Reaktionen* innerhalb *vorgegebener und vorhersehbarer Zeitschranken*. Echtzeitsysteme sind also dadurch charakterisiert, dass die funktionale Korrektheit eines Systems nicht nur vom Resultat einer Berechnung bzw. einer Verarbeitung, sondern auch von der Zeit abhängt, wann dieses Resultat produziert wird (vgl. Benra und Halang 2009).

Folgende Anforderungen an Echtzeitsysteme gibt es:

- Die *Rechtzeitigkeit* fordert, dass das Ergebnis für den zu steuernden Prozess rechtzeitig vorliegen muss. Zum Beispiel müssen Zykluszeiten und Abtastzeitpunkte (siehe „Nyquist-Shannon-Abtasttheorem“) genau eingehalten werden.

- *Gleichzeitigkeit* bedeutet, dass viele Aufgaben parallel, jede mit ihren eigenen Zeitanforderungen bearbeitet werden müssen. Eine Robotersteuerung muss z. B. parallel das Anwenderprogramm interpretieren, daraus die Führungsgrößen für die Bewegungs-Trajektorie berechnen, die entsprechende Anzahl an Antriebsachsen regeln, Abläufe überwachen usw.

- *Spontane Reaktion auf Ereignisse* heißt, dass das Echtzeitsystem auf zufällig auftretende interne Ereignisse oder externe Ereignisse aus dem Prozess innerhalb einer definierten Zeit reagieren muss.

Die weiter oben aus der Norm DIN IEC 60050-351:2014-09 zitierte Definition des Echtzeitbetriebs hat bedeutende Konsequenzen für die Verlässlichkeit von Echtzeitsystemen, weil die dort geforderte ständige Betriebsbereitschaft nur von *fehlertoleranten* und – vor allen Dingen gegenüber unsachgemäßer Handhabung – *robusten Systemen* gewährleistet werden kann. Diese Verlässlichkeitsanforderungen gelten sowohl für die Hardware als auch für die Software. Sie sind insbesondere für solche Anwendungen wichtig, bei denen Rechnerfehlfunktionen nicht nur zum Verlust von Daten führen, sondern auch Menschen und größere Investitionen gefährden (Benra und Halang 2009).

Diese Betrachtung zeigt, dass *Vorhersehbarkeit* des Systemverhaltens von zentraler Bedeutung für den Echtzeitbetrieb ist. Sie ergänzt die Rechtzeitigkeitsforderung, da letztere nur dann garantiert werden kann, wenn das Systemverhalten exakt vorhersehbar ist, und zwar sowohl in der Zeit als auch bzgl. der Reaktionen auf externe Ereignisse (vgl. Benra und Halang 2009). Dies ist gleichzeitig die Voraussetzung zur Bewertung von Sicherheitsfunktionen im Kontext der funktionalen Sicherheit.

Daher müssen folgende zusätzliche Anforderungen erfüllt werden:

- *Verlässlichkeit:* das System muss zuverlässig, sicher und verfügbar sein. Das ist die Voraussetzung für Sicherheitsfunktionen zur Erreichung der funktionalen Sicherheit.

- *Vorhersagbarkeit:* alle Reaktionen des Systems müssen planbar und deterministisch sein für eine Nachvollziehbarkeit im Fehlerfall.

Da das zeitliche Verhalten heute verfügbarer und in Steuerungen und Leitsystemen eingesetzten Rechensystemen höchstens in Ausnahmefällen vorhersehbar ist, ist bei der Konzeption und Entwicklung von Echtzeitsystemen äußerste „Vorsicht und Sorgfalt“ geboten (vgl. Benra und Halang 2009).

Im Gegensatz zu weit verbreiteten Fehlinterpretationen muss also deutlich betont werden, dass aufgrund der Definition in DIN IEC 60050-351:2014-09 einfach nur sehr schnelle Systeme *nicht* notwendigerweise Echtzeitsysteme sind. *Rechtzeitiges Reagieren* ist viel wichtiger als bloße *Geschwindigkeit* (vgl. Benra und Halang 2009).

In vielen Veröffentlichungen zum Thema Industrie 4.0 finden sich sehr häufig Formulierungen wie „Bedienereingaben in Echtzeit“ oder „echtzeitnahe Verarbeitung“ o. ä. Solche verkürzenden und z. T. fachlich fehlerhaften Darstellungen können zu Missverständnissen besonders im Hinblick auf sicherheitstechnische Aspekte führen.

2.5.3 Sicherheitsnachweismethoden für Maschinen und Anlagen im Kontext von I4.0

Bei der Sicherheit von Maschinen und Anlagen der Industrie 4.0 werden zwei Aspekte unterschieden: die Produkt- und Betriebssicherheit (engl. *Safety*) sowie die Angriffs- und Manipulationssicherheit der verwendeten Informations- und Netzwerk-Technologie (engl. *Security*). Beide Aspekte können sich gegenseitig beeinflussen. So kann beispielsweise mangelhafte Angriffssicherheit durch Manipulation der Maschinensteuerung(en) zum Ausfall von Schutzfunktionen führen und damit zur Gefahr für die Beschäftigten werden. Diese beiden Sicherheitsaspekte werden bislang von verschiedenen Fachdisziplinen mit unterschiedlichen methodischen Herangehensweisen einzeln betrachtet, indem Risikobeurteilungen getrennt für die Aspekte Safety und Security durchgeführt werden.

In heutigen Produktionsanlagen werden marktbedingte Absatz- und Variantenschwankungen meist mit einem *Ressourcenvorhalt* berücksichtigt. Die damit erreichbare *Flexibilität* einer Anlage umfasst die Änderungsmöglichkeiten, die eine Anlage von sich aus mitbringt, um auf zum jeweiligen Planungszeitpunkt bekannte Änderungen reagieren zu können. Innerhalb zuvor vereinbarter Grenzen kann die flexible Anlage sehr schnell und mit geringem Aufwand auf die geänderten Randbedingungen angepasst werden (Steegmüller und Zürn 2016).

Zukünftig werden deutlich dynamischere und volatilere Märkte erwartet, wodurch der dafür erforderliche Flexibilitätsvorhalt nicht mehr wirtschaftlich wäre. Aus diesem Grund werden im Kontext von Industrie 4.0 wandlungsfähige Fertigungsanlagen durch auftragsbezogene Rekombination von Fertigungsmodulen diskutiert. Die *Wandlungsfähigkeit* einer Anlage beschreibt dabei ihr Vermögen und Potenzial, mit

minimalem Aufwand beliebig umgestaltet zu werden (Steegmüller und Zürn 2016). Diese Wandlungsfähigkeit wird erreicht, indem einzelne Fertigungsmodule auftragsbezogen zu Fertigungsinseln rekombiniert, vernetzt und automatisch konfiguriert werden (grüne Pfeile in Abb. 2.5[9]). Einzelmodule (sog. Industrie 4.0-Komponenten) werden dazu flexibel und zumeist funkbasiert miteinander vernetzt. Erst dadurch kann das zu fertigende Produkt seinen eigenen Herstellungsprozess steuern (blaue Pfeile in Abb. 2.5). Diese automatisch ablaufenden Prozesse der Rekombination, Vernetzung und Konfiguration von Einzelmodulen zu einem dynamischen Gesamtsystem können durch Algorithmen des maschinellen Lernens unterstützt werden.

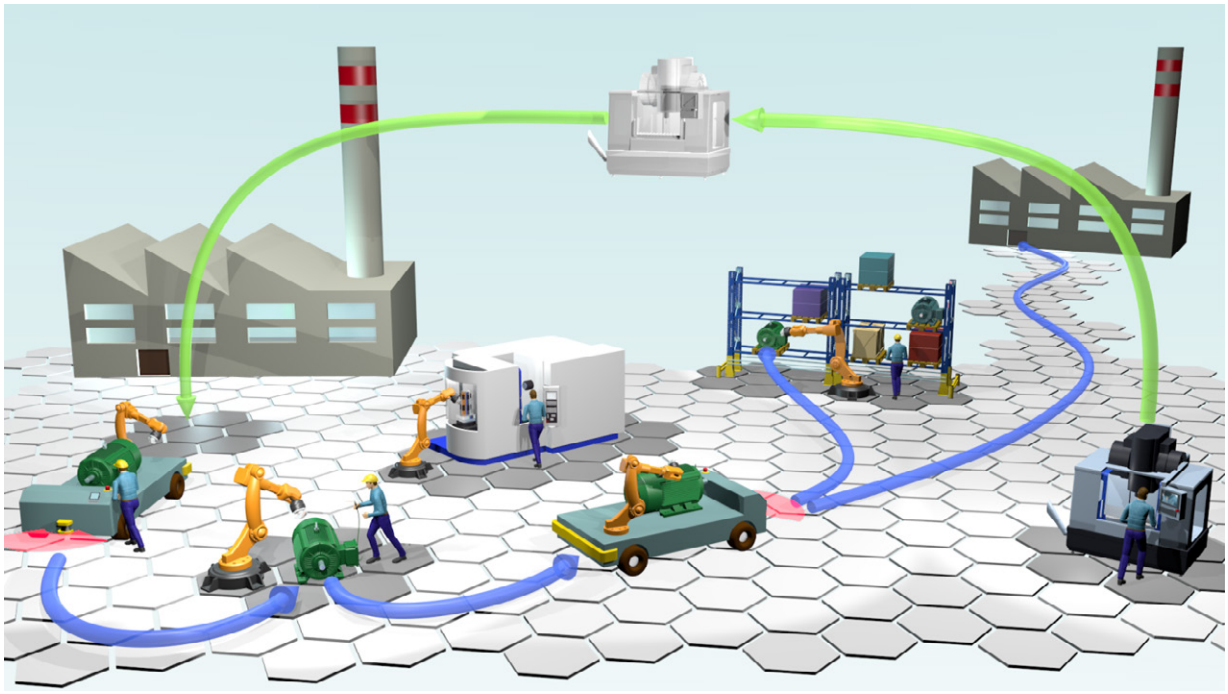

Abb. 2.5 **Modularisierung** der Produktion durch vernetzte Fertigungsinseln (blaue Pfeile) sowie **Wandelbarkeit** der Produktion: Produkt steuert seinen Fertigungsprozess (grüne Pfeile) (Grafik: Kasper)

Dadurch ergeben sich zur Laufzeit der Anlage Systeme aus (Teil-)Systemen, die zu einer grundlegenden Steigerung der kombinatorischen Komplexität des Gesamtsystems führen. Damit verbunden ist die Tendenz eines stetig sinkenden Systemverständnisses durch einzelne Experten (vgl. Leopold 2015). Die Struktur und das Gesamtverhalten sowie die Abhängigkeiten der Systemkomponenten untereinander können zur Entwicklungszeit der Einzelsysteme nicht oder nur schwer vorhergesagt werden.

Die heutigen sicherheitstechnischen Konzepte (vor allem bezüglich Safety) sowie die Methoden zur Sicherheitsnachweisführung beruhen bislang zentral auf der Annahme eines deterministischen, vorhersagbaren Systemverhaltens (vgl. Liggesmeyer und Trapp 2016). Von diesem deterministischen Verhalten konnte bisher ausgegangen werden, wenn in der Konstruktions- und Designphase definierte Anlagen zugrunde gelegt werden, in denen zwar variable aber vorab klar definierte Prozesse ablaufen.

[9] angelehnt an Abbildung von SmartFace, Fraunhofer IML

Die sicherheitstechnischen Standards gehen heute davon aus, dass ein System vor seiner sicherheitstechnischen Abnahme und Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. insbesondere DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Danach dürfen keine sicherheitsrelevanten Veränderungen (auch Reparaturen) vorgenommen werden, ohne dass eine erneute sicherheitstechnische Überprüfung und Abnahme zumindest der betroffenen Teilsysteme erfolgt.

Sich selbst konfigurierende Anlagen der Industrie 4.0 ergeben allerdings durch ihre flexible Vernetzung zur Laufzeit Systeme von Systemen, deren Struktur und Gesamtverhalten zur Entwicklungszeit der Einzelsysteme nicht oder nur schwer vorhergesagt werden können. All diese Eigenschaften führen zu Unsicherheiten in der Aussage über das zu erwartende Gesamt-Systemverhalten. Damit stehen sie im Widerspruch zur heutigen Sicherheitsnachweisführung, die zentral auf der Annahme eines deterministischen, vorhersagbaren Systemverhaltens beruht (vgl. Liggesmeyer und Trapp 2016). Dadurch kommen die heute verfügbaren Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit an ihre Grenzen, da solche dynamischen Systeme bzw. Szenarien von den aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst werden.

Dies wird auch durch die hierfür zur Anwendung kommenden aktuellen Sicherheitsnormen reflektiert, die eine dynamische Rekonfiguration sicherheitsrelevanter Funktionen zur Laufzeit „ausdrücklich nicht empfehlen“ (vgl. DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Besonders dieser für Software relevante Teil 3 der Norm und darin der Abschnitt 7.8 „Softwaremodifikation“ sowie die Tabelle A.2-6 „Dynamische Rekonfiguration“ machen deutlich, dass der Standard davon ausgeht, dass ein System vor seiner Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist. Jegliche Mechanismen, die das System zur Laufzeit noch einmal ändern, würden zu einer Invalidierung der Zulassung führen und sind daher nicht erlaubt (Liggesmeyer und Trapp 2016).

Darüber hinaus kommt es bereits heute allzu oft vor, dass erst bei der Inbetriebnahme von Maschinen und Anlagen die Aspekte der Angriffssicherheit (Security) „nachgebessert“ werden. Innerhalb der analytischen, methodischen und nicht zuletzt auch normativen Betrachtungsweisen ist deshalb eine Definition von Schnittmengen und Schnittstellen zwischen Safety und Security erforderlich.

2.5.4 Neue Anforderungen an sicherheitstechnische Analyse- und Bewertungsmethoden

Vor dem Hintergrund der Konzepte von Industrie 4.0 ist es erforderlich, die Sichtweisen hinsichtlich der betrachteten Steuerungs-Strukturen einerseits sowie der für ihre sicherheitstechnische Analyse und Bewertung angewendeten Methoden andererseits, zu differenzieren (siehe Abb. 2.6).

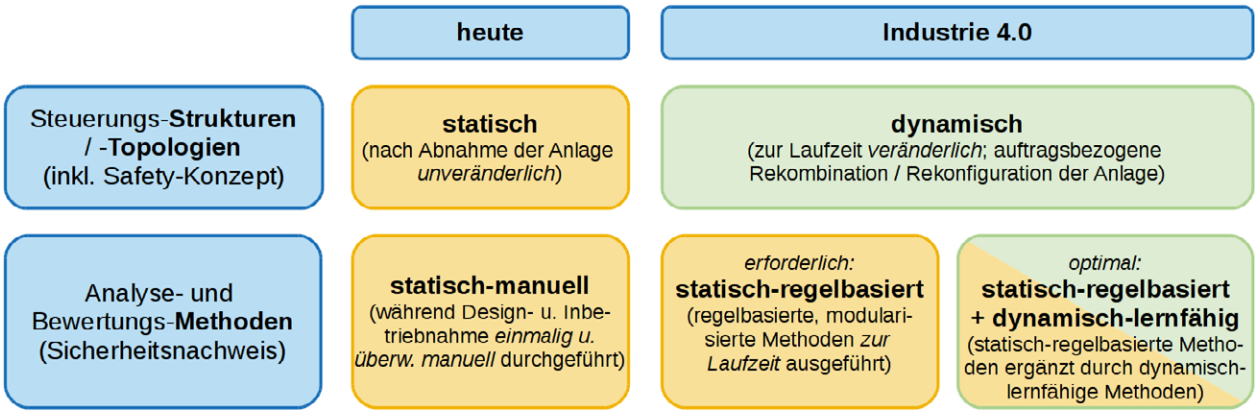

Abb. 2.6 Gegenüberstellung statischer und dynamischer Steuerungsstrukturen sowie der entsprechenden Analyse- und Bewertungsmethoden (Grafik: Kasper)

Maschinen und Anlagen gemäß der Konzepte von Industrie 4.0 in der Fertigungs- und Produktionstechnik und insbesondere deren Steuerungsstrukturen müssen zur Laufzeit des Fertigungsprozesses veränderlich (dynamisch) sein. Nur dadurch wird eine auftragsbezogene Rekombination der Anlagen erst ermöglicht.

Heutige Sicherheitsfunktionen zur Erreichung der funktionalen Sicherheit (einschließlich der Angriffssicherheit) werden meist durch eine zentralisierte Steuerungsstruktur realisiert (siehe Abb. 2.7). Sicherheitsfunktionen setzen sich dabei immer aus den sicherheitsgerichteten Teilfunktionen *Sensorik* (z. B. Lichtvorhang, Laserscanner), *Logik* (z. B. Safety-SPS) sowie *Aktorik* (z. B. Abbremsen und Stillsetzen eines Antriebssystems) zusammen. Damit lassen sich Sicherheitsfunktionen wie z. B. „Sicherer Betriebshalt (SOS)“ oder „Sicherer Stopp (SS1/2)“ nach DIN EN 61800-5-2: 2008-04, VDE 0160-105-2:2008-04 umsetzen.

Mit der auftragsbezogenen Rekombination der Maschinen und Anlagen geht eine Dezentralisierung der Steuerungsstrukturen und damit notwendigerweise auch der Sicherheitsfunktionen einher. Diese werden in Zukunft dezentralisiert (verteilt über viele Steuerungskomponenten) als modulare, zur Laufzeit und situationsbezogen vernetzbare Sicherheitsmodule vorliegen müssen. Sicherheitsmodule bestehen in diesem Kontext aus vernetzbarer, sicherheitsgerichteter Hardware und Software, welche die sicherheitsgerichteten Teilfunktionen Sensorik, Logik oder Aktorik erfüllen können.

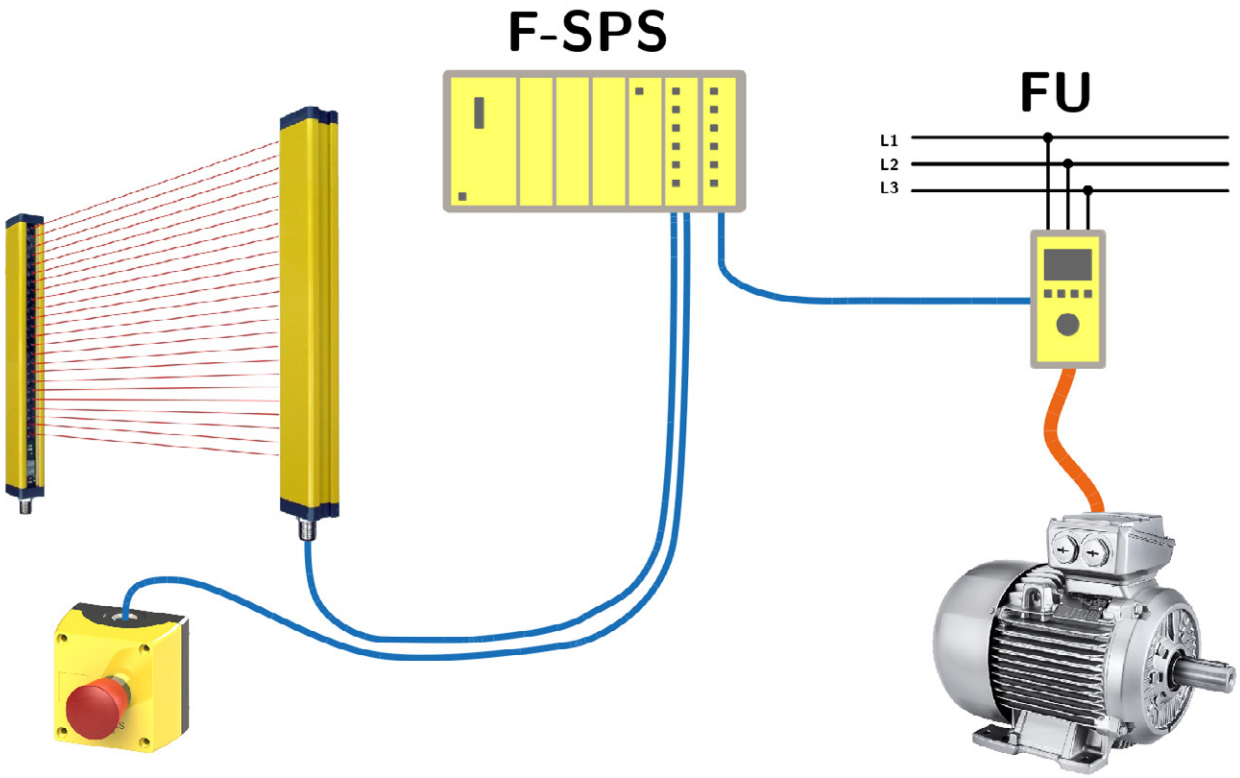

Abb. 2.7 Sicherheitsfunktion „Sicherer Betriebshalt (SOS)“ nach DIN EN 61800-5-2:2008-04, VDE 0160-105-2:2008-04 (Grafik: Kasper)

Damit ergeben sich die für den sicheren Betrieb der Maschine bzw. Anlage erforderlichen Sicherheitsfunktionen durch situationsbezogene Vernetzung zur Laufzeit. Nach der Vernetzung muss die mit der neuen Kombination *erreichbare* Sicherheitsstufe (vgl. z. B. *Safety Integrity Level (SIL)* nach DIN EN 61508-4:2011-02, VDE 0803-4:2011-02 bzw. *Performance Level (PL)* nach DIN EN ISO 13849-1:2016-06) mit der für die konkrete Betriebsfunktion der Maschine bzw. Anlage *geforderten* Sicherheitsstufe abgeglichen werden. Dieser Prozess wird als *Validierung* bezeichnet und muss in Zukunft zur Laufzeit durchgeführt werden können. Damit geht einher, dass die heute weitgehend als manuelle Abläufe vorliegenden Methoden zur Risikoanalyse und -bewertung steuerungstechnisch automatisierbar und vernetzbar werden müssen. Nur so kann das heutige Sicherheitsniveau bzgl. der Aspekte Safety und Security für die Beschäftigten aufrechterhalten oder verbessert werden.

Daher ist es zunächst notwendig, heute verfügbare, meist *manuell durchgeführte* Analyse- und Bewertungsmethoden durch Implementierung in Software grundlegend zu *automatisieren* (siehe Abb. 2.8). Damit die Software-methoden später auf die einzelnen CPPS-Komponenten eines Gesamtsystems verteilt werden können, müssen sie gleichzeitig *modularisiert* werden (vgl. Abb. 2.6). Hierzu werden aktuell in den entsprechenden Fachgremien Ansätze und theoretische Modelle diskutiert, wie sich die so entstehenden kleinen Softwarebausteine mit Hilfe *statischer* Entscheidungsregeln (Boolesche Logik) und deren Grenzen (sog. „regelbasierte Systeme“) realisieren lassen (vgl. „Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0, Version 2“ (DKE und VDE 2015)).

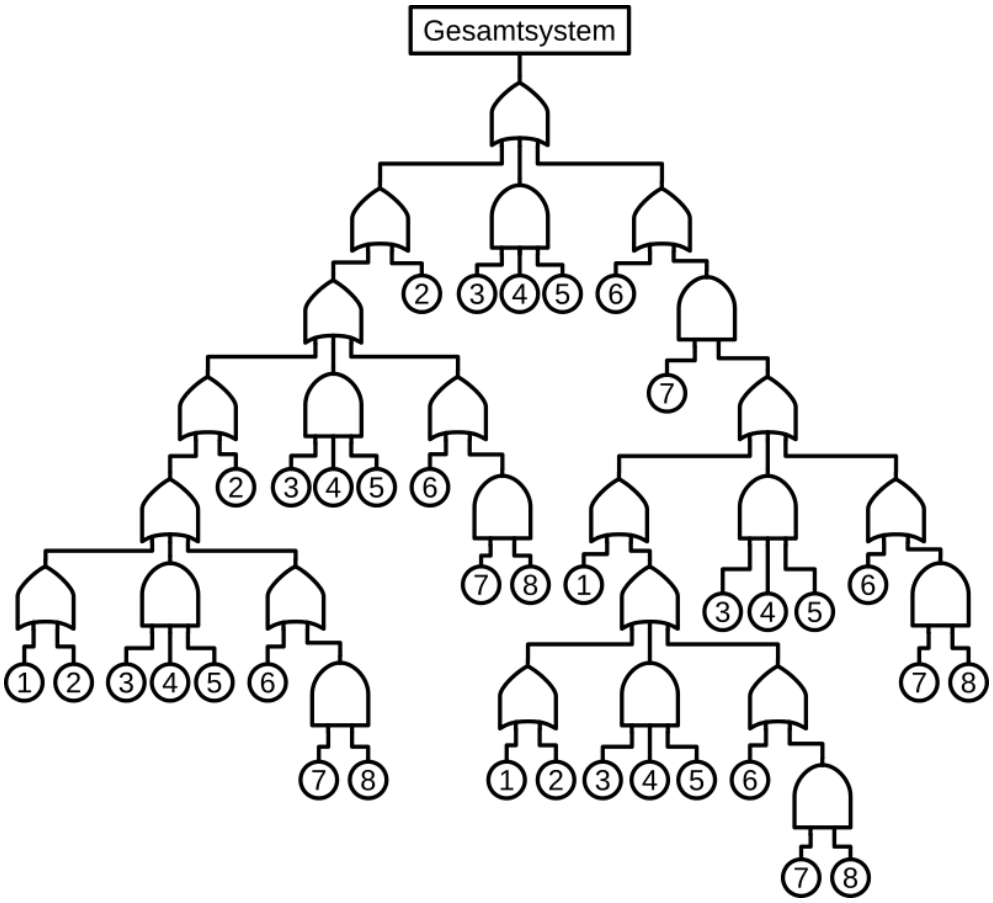

Abb. 2.8 Zentrale, manuell durchgeführte Validierungsmethoden (hier: Fehlerbäume) während System-entwurf und -abnahme: Reaktionen auf Struktur-änderungen zur Laufzeit sind nicht möglich (Grafik: Kasper)

Die statischen Entscheidungs-regeln könnten hierbei Teil-Fehlerbäume des jeweiligen CPPS beschreiben und sich innerhalb der sog. *Verwaltungsschale (Administration Shell)* der Industrie 4.0-Komponente befinden (vgl. DIN SPEC 91345 „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)“, Abschnitt 6.2 „Verwaltungsschale der I4.0-Komponente (Administration Shell)“ (DIN SPEC 91345:2016-04)).

In der Fachwelt wird weiterhin diskutiert, dass sich nach der Rekombination der Anlage (Neuvernetzung vieler CPPS zu einem Gesamtsystem) die einzelnen Teil-Fehlerbäume zu einem Gesamt-Fehlerbaum des Gesamtsystems verbinden lassen können (siehe Abb. 2.9). Damit ließe sich die Sicherheit des Gesamtsystems *zur Laufzeit* trotz dynamisch veränderlicher Steuerungstopologien validieren (vgl. Liggesmeyer und Trapp 2014; Roth und Liggesmeyer 2013; Steiner und Liggesmeyer 2013). Diese Verknüpfung von Teilsystemen (hier Teil-Fehlerbäumen) basiert auf dem Ansatz der Schachtelbarkeit von Industrie 4.0-Komponenten unter Anwendung von Industrie 4.0-konformen Kommunikationsschnittstellen (vgl. DIN SPEC 91345, Abschnitt 6.1.7 „I4.0-System (I4.0 System) aus I4.0-Komponenten“ sowie Abschnitt 6.1.8 „Schachtelbarkeit“ (DIN SPEC 91345:2016-04)).

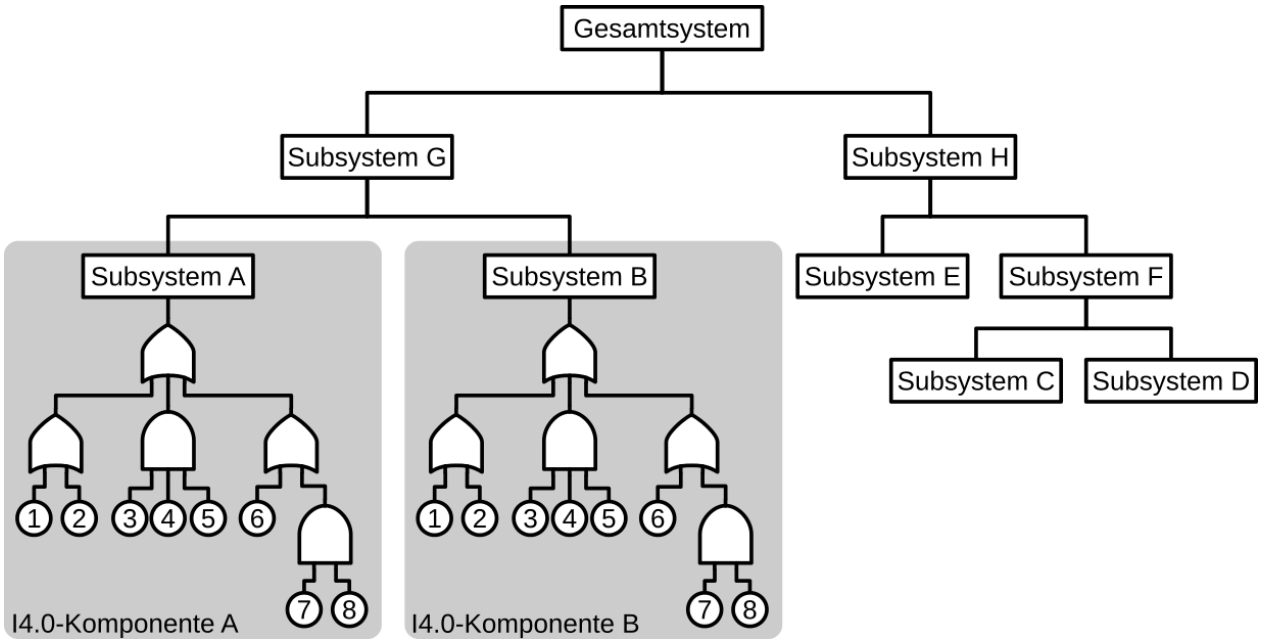

Abb. 2.9 Dezentrale, automatisierte Validierungsmethoden (hier: modularisierte Fehlerbäume): Reaktionen auf Strukturänderungen zur Laufzeit sind möglich (Grafik: Kasper)

Der Vorteil von *statisch-regelbasierten Methoden* wird sein, dass zu jedem Zeitpunkt (besonders nach System-/Anlagenstart) das Systemverhalten (z. B. sicherheitsgerichtete Reaktion auf erkannte Fehler) durch die Deterministik (es treten nur definierte und reproduzierbare Zustände auf) und die bekannten Ausfallwahrscheinlichkeiten einzelner Komponenten weitgehend vorhersagbar ist. Allerdings ist eine sicherheitsgerichtete Reaktion auf zum Zeitpunkt des Systementwurfs unbekannte Fehler nicht möglich.

Daneben gibt es Ansätze für *dynamisch-lernfähige Methoden* (z. B. Heuristiken, Anomalieerkennungen, Künstliche Intelligenz, Künstliche Neuronale Netzwerke, Maschinelles Lernen (vgl. Nusser 2009)). Um diese zur sicherheitsgerichteten Analyse und Bewertung verwenden zu können, müssen sie zunächst auf ihre prinzipielle Eignung untersucht und bewertet werden. Da die dynamischen Methoden das „richtige“ Verhalten (gemeint ist eine angemessene sicherheitsgerichtete Reaktion auf erkannte Fehler) zur Laufzeit des Gesamtsystems zunächst *erlernen* müssen, unterliegen diese Verhaltensmuster einer stetigen Veränderung. Im Idealfall konvergiert das Systemverhalten. Das heißt, es gibt zunächst eine *unruhige* Trainings- bzw. Lernphase mit *fehlenden Alarmen* (Fehler werden nicht erkannt) sowie *Fehl-Alarmen* (Auslösen von Fehlerreaktionen ohne objektive Ursache). Erst nach einer hinreichend langen Lernphase werden unter Berücksichtigung eines geeigneten Abbruchkriteriums stabile sicherheitsgerichtete Entscheidungen möglich sein.

Der Vorteil der *dynamisch-lernfähigen Methoden* wird sein, dass sicherheitsgerichtete Reaktionen auf zum Zeitpunkt des System-Entwurfs unbekannte Fehler durch Erlernen möglich werden. Allerdings steht zu erwarten, dass besonders in der Trainings- bzw. Lernphase die sicherheitsgerichteten Reaktionen auf (vermeintlich) erkannte Fehler unzuverlässig sein werden.

Aus heutiger Sicht werden die *dynamisch-lernfähigen* daher die *statisch-regelbasierten* Methoden wahrscheinlich nicht *ersetzen,* sondern eher *ergänzen* können. Dazu muss durch weitere Untersuchungen eine Methode zur lernzustandsabhängigen Wichtung der Entscheidungsergebnisse beider Methoden-Gattungen (statisch/dynamisch) gefunden werden, um so deren jeweilige Vorteile kombinieren zu können.

Allerdings „empfiehlt“ die derzeitige Normenlage den Einsatz von Methoden der künstlichen Intelligenz zur Validierung der funktionalen Sicherheit „ausdrücklich nicht“ (vgl. DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02, Tabelle A.2-5 „Künstliche Intelligenz – Fehlerkorrektur“). Dieser kategorische Ausschluss von lernfähigen Validierungsmethoden erfolgt im Normenwerk ohne erklärende Begründung und sollte daher einer Neubewertung hinsichtlich des aktuellen Standes der Technik unterzogen werden.

Die Weiterentwicklung und Modularisierung der heute verfügbaren (manuellen) *statisch-regelbasierten* sowie *dynamisch-lernfähigen* Analyse- und Bewertungsmethoden wird durch einschlägige Forschung erfolgen müssen. Die daraus ableitbaren Ergebnisse sollten anschließend geeigneten Normungsgremien vorgestellt werden mit dem Ziel, dass die weiterentwickelten Methoden in die strategische und inhaltliche Normungsarbeit einfließen.

Damit sich möglichst viele Interessensgruppen aktiv an dem Weiterentwicklungs- und Normungsprozess beteiligen können, sollte die Forschung von Beginn an als *Open-Source*-Prozess etabliert werden. Entsprechend (quell-)offen sollten die Ergebnisse in Form von Prinziplösungen publiziert werden. Dadurch werden unterschiedliche Steuerungshersteller in die Lage versetzt, die in Form von Open-Source-Software vorliegenden weiterentwickelten und modularisierten Methoden in eigener Verantwortung auf ihre konkrete Steuerungsarchitektur zu portieren und zu einem industriell einsetzbaren und sicheren Produkt weiterzuentwickeln.

Oben beschriebene Überlegungen zur möglichen Weiterentwicklungen der Analyse- und Bewertungsmethoden wurden von Kasper (2017a) und Kasper (2017b) aufgezeigt.

2.5.5 Sicherheitstechnische Anforderungen an funkbasierte industrielle Kommunikationstechnik der Industrie 4.0

Für die Umsetzung der Industrie 4.0-Konzepte wird ein ständiger Informationsaustausch zwischen allen beteiligten Einheiten in der sich selbst organisierenden Produktion von zentraler Bedeutung sein, da Maschinen und deren Komponenten intensiv miteinander kommunizieren werden müssen (vgl. Weczerek 2014, vgl. Kunze (2015)). Diese Kommunikation wird oft zwischen Tausenden von einzelnen Sensoren, Aktoren und Steuerungseinheiten in einer dynamisch veränderlichen Produktionsumgebung und mit zum Teil beweglichen Maschinen wie Robotern stattfinden – dies wird nur mit Hilfe drahtloser Kommunikationstechnologien lösbar sein. Jedoch existieren derzeit keine Funktechnologien, welche die harten Anforderungen im Industrieeinsatz bezüglich Echtzeitfähigkeit, Reaktionsgeschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Flexibilität in vollem Umfang erfüllen (vgl. Kunze 2015).

Bei der Betrachtung einer typischen Fertigungsanlage lassen sich sofort zahlreiche Applikationen erkennen, die von einer drahtlosen Kommunikation profitieren oder diese sogar voraussetzen. Als Beispiele seien der Datenaustausch mit mobilen Transportsystemen wie Lager-Shuttles oder Paletten-Wickelmaschinen sowie mit Kränen, die mobile Wartung von Anlagen oder die flexible Integration von Terminals und Maschinen in das Produktionsnetzwerk genannt. In den meisten Fällen steht nicht die Einsparung von Verkabelungskosten im Vordergrund. Vielmehr ergeben sich aus einer schnelleren und zuverlässigeren Funkkommunikation Kostenvorteile, die aus der vereinfachten Konstruktion, größeren Flexibilität oder höheren Produktivität resultieren (Weczerek 2014).

Neben dem Datenaustausch zwischen Maschinen und Anlagenteilen (vgl. Abschnitt 2.3.2) spielt die Weiterleitung von Informationen zwischen Mensch und Maschine (vgl. Abschnitt 2.3.3) eine zunehmend wichtige Rolle. Die Maschine stellt dem Mitarbeiter die relevanten Daten immer öfter über mobile Geräte wie Tablet-PCs oder Smartphones zur Verfügung (Weczerek 2014).

Zusätzlich erwartet der Maschinen- oder Anlagenbauer von der eingesetzten Funklösung allerdings nicht nur eine hohe Zuverlässigkeit und Datensicherheit, sondern will auch seine Anforderungen an die funktionale Sicherheit erfüllt wissen. Dies gilt insbesondere, wenn sicherheitsgerichtete Signale über die Funkstrecke zu übertragen sind (z. B. Not-Halt-Signale eines mobilen Bedienpanels an die Maschinensteuerung). Diese vielschichtigen Ansprüche müssen Funksysteme unabhängig davon erfüllen, ob sie speziell für industrielle Anwendungen entwickelt wurden oder auf Standardtechnologien wie *WLAN 802.11* oder *Bluetooth* aufbauen (vgl. Weczerek 2015).

Allerdings stellen die verschiedenen Applikationen unterschiedliche oder teilweise gegensätzliche Anforderungen an die Funktechnologie, weshalb für einzelne Anwendungsbereiche häufig separate drahtlose Netze aufgebaut werden müssen und eine Integration in ein allgemeines Funknetzwerk nicht möglich ist. Denn gerade echtzeitkritische Automatisierungsaufgaben wie die Übertragung von sicherheitsgerichteten Signalen sollten immer über jeweils eigene Funknetzwerke umgesetzt werden (vgl. Weczerek 2014).

Unkontrollierbare Maschinenbewegungen können zu einer Gefahr für die Beschäftigten werden. Wenn die Steuersignale (z. B. von mobilen Bedienpanels) zu den bewegten Teilsystemen per Funk übertragen werden, muss diese Datenübertragung funktional sicher sein. Das ist zwingende Voraussetzung, um diese Systeme im Notfall in einen sicheren Zustand überführen zu können (vgl. Weczerek 2015).

Eine funktional sichere Kommunikation zu mobilen oder bewegten Teilnehmern ist prinzipiell über Wireless LAN und Bluetooth möglich. Nur durch zuverlässige Fehleraufdeckungsmaßnahmen in Form von *Safety-Kommunikations-Stacks* (sog. *Safety-Layer*) bei beiden Kommunikationspartnern ist die Nutzung von Wireless-Übertragungsstrecken für die Übertragung sicherheitsgerichteter Signale zulässig. Dabei wird geprüft, ob bei der Übertragung ein Fehler oder eine Zeitüberschreitung aufgetreten ist. Bei einem entdeckten Fehler wird die Anlage sofort in den sicheren Zustand versetzt. Dieser unabhängige Übertragungskanal auf einem als nicht sicher zu betrachtenden Übertragungsmedium wird als *Black Channel* bezeichnet und setzt keine Validierung nach IEC 61508 voraus (vgl. Weczerek 2015).

Die Fehlererkennung durch den Safety-Layer führt allerdings schnell dazu, dass das Steuerungssystem bei Fehlern oder Zeitüberschreitungen in der Funkkommunikation die Maschine oder Anlage in den sicheren (in der Regel nicht verfügbaren) Zustand versetzt und damit zum Anlagenstillstand führt. Daher ist der Einsatz einer robusten und zuverlässigen Funkübertragung Voraussetzung für einen stabilen Betrieb und eine hohe Anlagenverfügbarkeit (vgl. Weczerek 2015).

Im Gegensatz zu einem geschlossenen Kabelnetzwerk wird bei der Wireless-Kommunikation ein öffentliches Übertragungsmedium in Form von lizenzfreien Funkfrequenzen und -kanälen genutzt. Diese lassen sich auch räumlich nur schwer begrenzen. Neben anderen möglichen physikalischen Störeinflüssen im industriellen Umfeld (Interferenzen, Reflexionen und Dämpfungen) besteht ein erhöhtes Risiko, dass Unberechtigte in das Funknetzwerk eindringen, um Manipulationen an den Safety-Funktionen der Anlage vorzunehmen. Daher sind entsprechende Sicherheitsmaßnahmen wie eine wirkungsvolle Verschlüsselung der Datenübertragung aber auch der Schutz der eingesetzten Wireless-Geräte vor unbefugter Änderung der Konfiguration zwingend vorzusehen (vgl. Weczerek 2015). Allerdings können diese Security-Maßnahmen (z. B. Verschlüsselung von Feldbussen) negative Auswirkungen u. a. auf das Echtzeitverhalten des dezentralen Steuerungssystems haben. Das würde im ungünstigen Fall auch die funktionale Sicherheit des Systems beeinträchtigen und sollte im Rahmen von Forschungsprojekten eingehender untersucht werden.

3 Anwendungsszenarien (Use Cases) im Maschinen- und Anlagenbau sowie sicherheitstechnische Bewertung

In diesem Kapitel werden ausgewählte in der Literatur beschriebene Anwendungsszenarien (sog. *Use Cases*) der Industrie 4.0-Konzepte im Maschinen- und Anlagenbau dargestellt. Die *Use Cases* werden zunächst zusammenfassend wiedergegeben.

In einem zweiten Schritt werden die *Use Cases* in die im vorigen Kapitel beschriebenen Industrie 4.0-Konzepte hinsichtlich der adressierten Paradigmen (vgl. Abschnitt 2.2), der zum Einsatz kommenden technologischen Basiskomponenten (vgl. Abschnitt 2.3) sowie in die theoretische Idealvorstellung RAMI 4.0 (vgl. Abschnitt 2.4) eingeordnet.

In einem dritten Schritt werden die *Use Cases* dahin gehend bewertet, ob in ihnen (laut Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. In diesem Zusammenhang wird auf die Frage eingegangen, welche sicherheitstechnischen Anforderungen über die Darstellung in der Literaturquelle hinausgehend hätten betrachtet werden können (vgl. Abschnitt 2.5.3). Abschließend wird eine fachliche Einschätzung dahin gehend gegeben, ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können (vgl. Abschnitt 2.5.4).

3.1 Use Case 1: Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronik Werk Amberg (EWA)

3.1.1 Steckbrief

- Branche: Produzierende Industrie, Hersteller von Automatisierungskomponenten
- Entwicklungsstadium: Marktreife / produktiver Einsatz
- Literaturquellen:
  - Büttner und Brück (2016)
  - https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Anwendungsbeispiele/076-elektronikwerk-amberg-die-digitale-fabrik/beitrag-elektronikwerk-amberg-die-digitale-fabrik.html (Zugegriffen: 14. November 2018)
  - https://www.siemens.com/innovation/de/home/pictures-of-the-future/industrie-und-automatisierung/digitale-fabrik-die-fabrik-von-morgen.html (Zugegriffen: 14. November 2018)
  - https://www.merkur.de/wirtschaft/merkel-besuch-siemens-amberg-zr-4758778.html (Zugegriffen: 14. November 2018)

3.1.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Büttner und Brück 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Im Siemens Elektronikwerk Amberg (EWA) werden speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und damit im Zusammenhang stehende Automatisierungsgeräte (z. B. Human-Machine-Interfaces (HMIs)) der Produktfamilie *Simatic* gefertigt. Diese Automatisierungskomponenten kommen auf allen Ebenen der Automatisierungspyramide – von der Steuerungs- bis zur Produktionsleitebene inklusive der zugehörigen Engineeringsoftware – zum Einsatz. Aufgrund des vielfältigen Einsatzes gibt es eine sehr hohe Produktvarianz (über 1000 Produktvarianten). Als Lieferzeit für weltweit 60.000 Kunden strebt Siemens 24 Stunden an. Gleichzeitig werden ständig neue Varianten und Produktfamilien neu in die Fertigung eingeführt. Das führt zu einer weiter steigenden Varianz und zunehmenden Individualisierung der Produkte.

Als Ausgangsbasis für Automatisierung, Produktivität und für Industrie 4.0 sieht Siemens die *automatisierungsgerechte Gestaltung der Produkte*. Dafür werden im EWA drei wichtige Informationsströme genutzt: die *Kundenanforderungen*, die *Innovationen aus Entwicklung und Fertigung* und die *Innovationen von Lieferanten*. Diese gemeinsame Betrachtung der Informationen von Anfang an erspart Nachbesserungen durch verspätete Erkenntnisse. Um das zu erreichen, wird im EWA im Sinne der *vertikalen Integration* eine durchgehende Informationstechnik von der Produktentstehung über Entwicklung und Fertigung bis zum Kunden umgesetzt.

Die permanenten Datenübergaben aus Produktdesign an das CAM-System und das Manufacturing Execution System (MES) werden im EWA automatisch ausgelöst. Das MES und die darunter liegenden Automatisierungssysteme generieren zyklisch Daten für die Kontrollebene: Null- und Vorserienworkflows, NC-Programme für Bestücken, Test, Optische Inspektionsprogramme, Laserbeschriftung, Etikettendaten, automatische Arbeitsplangenerierung, vereinheitlichte Stückliste etc. Die Schnittstellen zu den vielfältigen Services in den Automatisierungssystemen sind webbasiert und sollen damit für den jeweiligen Anwender hochflexibel gestaltbar sein.

„Die Verantwortlichen in der Produktion werden über die neu generierten NC-Programme überwiegend nur noch informiert. Nur bei einem ganz geringen Anteil der Programme sind Ergänzungen durch die Maschinenexperten erforderlich. Dabei entscheidet die Technologie vor Ort, z. B. in welcher Form die Daten verfügbar gehalten werden. Die Zuordnung der Programme zu den Produkten wird vollständig über die Produktidentifizierung (Barcode, RFID) gesteuert.“ Durch diese eineindeutige Zuordnung steuert das entstehende Produkt seinen eigenen Fertigungsprozess im Sinne von Industrie 4.0.

Um diesen hohen Grad der Fertigungsautomatisierung zu erreichen, müssen im Sinne der digitalen Fabrik alle Dinge durchgehend identifizierbar sein. Dies betrifft alle Produkte, Materialgebinde, alle Transportbehälter und alle Maschinen und Anlagen sowie wichtige Anlagenteile. Beim Prozessschritt „Bestücken der Platinen“ werden im EWA z. B. die Zuführsysteme für die Bauelemente durchgehend codiert und in Lebensläufen dokumentiert. In der bestehenden Struktur werden dafür unterschiedliche

Codes auf Basis der RFID-Technologie an den Maschinensteuerungen und PCs sowie als Standard für verfügbare Sensorik eingesetzt. Prozesswerte, wie z. B. Prüfergebnisse, aktuell genutzte NC-Programme, Temperaturen, aktuelle Hersteller, Bearbeitungszeitpunkte etc. werden flächendeckend erfasst. Die gewonnenen Daten werden immer auf das jeweilige Individuum Produkt, Materialgebinde, Behälter oder Maschine bezogen.

Laut Siemens ist ein Ausbau von flexibel verketteten Systemen und deren Wandlungsfähigkeit als Voraussetzung für die Nutzung der zunehmenden Autonomie anzustreben. In der Transportlogistik sind z. B. alternative Transportwege erforderlich, um für den autonomen Transportbehälter Entscheidungsraum zu bieten. In flexiblen Fertigungslinien werden daher im EWA für den jeweils nächsten Bearbeitungsschritt eines Produktes unterschiedliche Produktionsmodule angeboten. Entsprechend der jeweiligen Produktionssituation kann aus diesen ausgewählt werden, z. B. Anzahl zu fertigender Produkte der unterschiedlichen Typen, Aufwandsminimierung für Rüsten, Verfügbarkeiten für Material, erforderlicher Aufwand für Umbau/Wartung eines Produktionsmoduls. Dieser Ausbau führt zu rekombinierenden Fertigungs- und Logistiksystemen.

An den Produktprüfplätzen des EWA wird *Augmented Reality* eingesetzt, damit der Prüfer die Übereinstimmung der Bauteil-Polung aus den CAD-Daten und der aktuellen Fotografie des Prüflings sicherstellen kann. Dazu werden ihm Ist- und Soll-Informationen in demselben Bild übereinander geblendet, wodurch die anstrengende und fehlerträchtige Bilderzuordnung im Kopf entfällt.

Durch die bisher beschriebenen Maßnahmen werden sehr viele Prozessdaten erfasst. Aus diesem Datenpool können für das Unternehmen interessante fachbezogene Informationen selektiert werden. Diese können z. B. für sog. *Prozess-Watchdogs* benutzt werden. Dabei handelt es sich um hinterlegte fertigungsprozessbezogene Ober- und Unterschranken als Warngrenzen, bei deren Überschreiten die Verantwortlichen für den jeweiligen Prozessschritt automatisch eine E-Mail erhalten. Durch so ein Ereignis wird ein Watchdog-Prozess ausgelöst, der erst beendet ist, wenn das Problem im Prozess behoben ist. Das ständige Überwachen von Verläufen durch einen verantwortlichen Mitarbeiter oder das manuelle Generieren von Auswertungen kann damit entfallen.

3.1.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale Integration der gesamten Fabrikautomation, eine durchgängige Datenerfassung und Datenhaltung über den gesamten Produktfertigungszyklus sowie ein durchgängiges digitales Engineering adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung, die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M)

sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in Form von Augmented Reality an den Produktprüfplätzen eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden Produktengineering (Produktentwicklung, Fertigung und Lieferung) die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ angesprochen. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die automatische Erfassung von Prozesswerten und die menschenunterstützte Extraktion von Prüfergebnissen adressiert. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die eineindeutige Zuordnung der Fertigungsprogramme zum Produkt über RFID bzw. Barcode beschrieben. Dadurch kann das Produkt seinen eigenen Fertigungsprozess im Sinne von Industrie 4.0 steuern.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* indirekt thematisiert, indem fertigungsrelevante Daten (z. B. NC-Programme, optische Inspektionsprogramme, Prüfergebnisse, Beschriftungsdaten und Stücklisten) eineindeutig dem Produkt zugeordnet und im Fertigungsprozess mitgeführt werden.

3.1.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden keine sicherheitstechnischen Aspekte betrachtet bzw. diskutiert.

Allerdings kommen durch die im *Use Case* angestrebte und teilweise umgesetzte Wandlungsfähigkeit von Fertigungs- und Logistiksystemen durch auftragsbezogene Rekombination von Fertigungsmodulen die heute verfügbaren und hierfür zur Anwendung kommenden Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit stark an ihre Grenzen. Solche Systeme bzw. Szenarien werden von den aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst, da der Standard davon ausgeht, dass ein System vor seiner sicherheitstechnischen Abnahme und Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. vor allem DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3: 2011-02). Dieser *Use Case* ist mit den heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit nur mit erheblichen Einschränkungen hinsichtlich der Dynamik, Variabilität und Wandelbarkeit der Fertigungs- und Logistiksysteme validierbar (vgl. Abschnitt 2.5.4). Die Sicherheitsnachweisführung für diesen *Use Case* ist auf Basis heutiger Sicherheitsnormen nur für fest zu definierende Kombinationen von Maschinen- und Anlagenteilen während der Planungsphase und vor der sicherheitstechnischen Abnahme möglich. Dies würde den im *Use Case* beschriebenen dezentralen Lösungsansätzen auf Basis von zur Laufzeit wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen entgegenstehen.

Auch die Aspekte der Angriffssicherheit sowie mögliche Security-Maßnahmen werden im *Use Case* nicht adressiert. Aufgrund der beschriebenen hohen Kommunikati-

vität der Maschinen- und Anlagenkomponenten untereinander sowie der Integration des Menschen in den Fertigungsprozess sind bei mangelhafter Angriffssicherheit (Security) negative Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit (Safety) zu erwarten.

Die dargestellten Ergebnisse der im *Use Case* zitierten Veröffentlichungen erlauben keine Aussagen zu Details der Sicherheitsnachweisführung, insbesondere nicht im Zusammenhang mit offenen Fragestellungen zu Industrie 4.0-Anwendungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die derzeitige Ausbaustufe der vorgestellten I4.0-Konzepte sich auf eine während der Planungsphase festgelegte und begrenzte Anzahl von Variationsmöglichkeiten beschränkt und somit eine sicherheitstechnische Abnahme auf Basis des normativen Standes der Technik ermöglicht wird.

3.2 Use Case 2: Enabling Industrie 4.0 – Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie

3.2.1 Steckbrief

- Branche: Prozessindustrie, Verfahrenstechnik
- Entwicklungsstadium: theoretische Vorüberlegungen und Forschungsansätze
- Literaturquelle: Pötter, Folmer und Vogel-Heuser (2016)

3.2.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Pötter, Folmer und Vogel-Heuser 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Ein wesentlicher Grundgedanke von Industrie 4.0 ist, dass intelligente Produkte ihre Informationen und Parameter an die sie fertigenden oder bearbeitenden Maschinen übermitteln und damit ihren eigenen Fertigungsprozess steuern. Nach Auffassung der Autoren sind diese Ansätze allerdings in der Prozessindustrie bisher kaum umzusetzen, da die Produkte durch Batch- oder kontinuierliche Prozesse gefertigt werden. In solchen Prozessen gibt es keine Bauteile oder Bauteilträger, denen die notwendigen Informationen mitgegeben werden können. Dennoch können die Ansätze der vertikalen und horizontalen Integration (vgl. Abschnitt 2.2.1) – und die dadurch gesteigerte Datendurchgängigkeit für die Prozessindustrie – z. B. im Bereich der Wartung, Diagnose und für eine deutlich flexiblere Produktion verfolgt werden. Weiterhin gibt es auch im Bereich der Prozessindustrie diskrete Produktionsschritte, wie beispielsweise die Verpackung oder den Transport der fertigen Güter.

Laut Autoren des *Use Cases* verlangen neben Kundenanforderungen auch regulatorische Auflagen eine zunehmende Dokumentation von Produktionsinformationen im Detail. Es wird festgestellt, dass im pharmazeutischen Umfeld über die „US Food and Drug Administration (FDA)“ und die „European Medicines Agency (EMA)“ das *Quality by Design-Konzept* vorangetrieben wird. Der Grundgedanke ist dabei, dass die Produktqualität einschließlich der Fertigungsprozesse *gestaltet* und nicht erst am Endprodukt *getestet* werden sollte. Messwerte aus dem Prozess müssen dazu auch aufgrund internationaler Richtlinien über Jahre von jedem Betrieb oder Werk archiviert

werden. In der praktischen Umsetzung der Prozessautomation bedeutet dies eine noch stärkere Vernetzung von Onlineanalysemethoden, um Schwankungen über den gesamten Produktionsprozess ausregeln zu können. Damit geht nach Auffassung der Autoren einher, dass der Automatisierungsgrad weiter steigen wird und dadurch Simulations- und Prognoseverfahren bedeutsamer und realisierbarer werden.

Die Anlagenplanung, der Anlagenbau, die Inbetriebnahme und der Betrieb könnten durch Industrie 4.0-Technologien beispielweise durch die Betrachtung des gesamten *Anlagen Life Cycle* als transparenter Prozess unterstützt werden. Dazu muss nach Meinung der Autoren ein Disziplinen-übergreifender und transparenter Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Gewerken (z. B. Verfahrenstechnik und Prozessleittechnik) und den einzelnen Phasen des Lebenszyklus erreicht werden (z. B. Engineering und Maintenance inkl. der automatischen Nachbestellung von Sensoren).

Als weiterer Nutzen für die Verfahrenstechnik wird von den Autoren des *Use Cases* eine Flexibilisierung der Produktion gesehen. Diese Flexibilisierung könnte durch sich selbst konfigurierende, selbst organisierende, flexible Produktionsanlagen, hochverfügbare Informationsdienste sowie eine optimierte Produktion über Firmengrenzen hinweg entstehen. Im Beitrag wird hinsichtlich *diskreter* und *kontinuierlicher* Produktion in der Prozessautomatisierung differenziert. Da die diskrete Prozessautomatisierung grundsätzliche Ähnlichkeiten mit diskreten Fertigungs- und Produktionsprozessen aufweist, lassen sich auch die Erwartungen bzgl. der erreichbaren Vorteile durch Anwendung der Konzepte von Industrie 4.0 übertragen (z. B. Dezentralisierung und Modularisierung). Offen bleibt jedoch die Frage, ob diese Erwartungshaltung auch für die kontinuierliche Verfahrenstechnik gerechtfertigt ist.

Als wichtig wird von den Autoren die Abwärtskompatibilität von Industrie 4.0 erachtet, d. h. die mögliche Migration von bestehenden Systemen allein aufgrund des langen Betriebs von Anlagen in der Verfahrenstechnik. Diese werden nicht selten mehrere Jahrzehnte genutzt. Industrie 4.0 könnte so auch die Grundlage schaffen, um Anlagendaten von den langlebigen Systemen interpretierbarer und aggregierbar zu machen.

Aus Sicht der Autoren wäre es wünschenswert, dass bei der Prozessführung nur in Ausnahmesituationen wie Wartung, Inbetriebnahme, Rezeptwechsel usw. menschliche Eingriffe nötig sein sollten. Gleichzeitig sind die Produktionsstandorte zunehmend über die gesamte Welt verteilt. „Im Regelfall sind nur die Enterprise Ressource Planning- (ERP) und andere IT-Systeme standardisiert mit einheitlichen und unternehmensweiten Geschäftsprozessen. Im Gegensatz hierzu ist die standortabhängige Produktion mit unterschiedlichen Systemen lokal und heterogen ausgerichtet, d. h. grob vereinfacht, jeder Produktionsbetrieb ist ein Unikat.“

Im Beitrag wird festgestellt, dass seitens der Hersteller der zur Prozesssteuerung verwendeten Geräte häufig nur wenige Informationen über Störungen mit detaillierteren Informationen vorliegen, da der Rückfluss an Informationen bisher nur sehr schleppend verläuft. Hauptursache dafür ist, dass die Daten, die Aufschluss über die Ursache des Ausfalls von Komponenten geben können, in der Regel sensible Prozessdaten sind. Gleichzeitig stellen sie Technologiedaten /-wissen des Betreibers der Anlage dar. Bei diesen für den Komponentenhersteller interessanten aber nicht zugänglichen Daten handelt es sich z. B. um Prozesswerte (inkl. Betriebsmedium und

Betriebskennlinien), Einbaudaten und ortsabhängige Umwelteinflüsse. Dieser Interessenskonflikt kann nur im Einvernehmen zwischen Betreibern, Herstellern von Geräten und Anbietern von Anlagen bzw. Planern erfolgreich aufgelöst werden.

Die Autoren schlagen als einen Lösungsansatz vor, dass eine Gerätehistorie mit den Gerätedaten wie der Temperatur sowie den Umgebungsbedingungen in den Anlagenprozess konsequent eingebunden wird. Bei den Gerätedaten handelt es sich um die Prozessdaten, die das Gerät selbst erfahren hat sowie die vor- und nachgelagerten Prozessbedingungen. Dadurch könnten sich die Geräte selbst überwachen, diagnostizieren sowie sich ggf. mit gleichen Geräten oder Geräten gleichen Gerätetyps über standortübergreifende Vernetzung austauschen und damit Fehler aufdecken. Dabei könnten ausgewählte Methoden aus dem Bereich Data-Mining zum Einsatz kommen. Fehler oder ungünstige Einstellungen von Geräten und Anlagenteilen werden anderen gleichen oder gleichartigen Geräten bzw. Anlagenteilen übermittelt. Die Geräte können also voneinander lernen. Allerdings wird festgestellt, dass die automatische Übernahme von Geräteparametern sicherlich unter Sicherheitsaspekten kritisch bzw. nur in bestimmten Grenzen möglich ist.

Als großes Hindernis für die Umsetzung dieser Ideen in der Prozessautomation sehen die Autoren die zur Zeit unzureichende Daten-Aggregation, den mangelnden standort-, betreiber- und branchenübergreifenden Informationsaustausch sowie die bisher nur sehr begrenzt ausgeprägte logische Vernetzung der diversen IT-Systeme.

3.2.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* sowohl die vertikale als auch die horizontale Integration des gesamten Fertigungsprozesses, eine durchgängige Datenerfassung und Datenhaltung über den Produktlebenszyklus sowie ein durchgängiges digitales Engineering adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung sowie die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden Produkt- und Anlagenengineering die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ adressiert. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch den Interessenskonflikt angesprochen, bei dem Komponentenhersteller auf sensible Prozessdaten (z. B. Betriebsmedien und Betriebskennlinien) des Betreibers der Anlage nur sehr eingeschränkten Zugriff haben. Diese Daten stellen einerseits häufig Technologiedaten bzw. -wissen des Betreibers dar und wären aber andererseits für den Hersteller interessant, um Ursachen von Komponentenausfällen ermitteln zu können. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die anlagenübergreifende Vernetzung über mehrere Produktionsstandorte hinweg sowie die Erfassung von Prozessdaten in den Automatisierungskomponenten beschrieben.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* in Form von Automatisierungskomponenten thematisiert, die mit einer Gerätehistorie und Gerätedaten ausgerüstet sind. Diese könnten sich selbst überwachen, mit Hilfe ausgewählter Methoden aus dem Bereich Data-Mining selbst diagnostizieren sowie sich ggf. mit gleichen Geräten oder Geräten gleichen Gerätetyps über standortübergreifende Vernetzung austauschen und damit Fehler aufdecken.

3.2.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden sicherheitstechnische Aspekte nur sehr kurz angesprochen im Zusammenhang mit der von den Autoren als kritisch eingeschätzten automatischen Übernahme von gelernten Geräteparametern. Besonders diesem Aspekt sollte mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden, da falsch gelernte oder im Rahmen eines Angriffs bewusst manipulierte Konfigurationsparameter (z. B. Alarmgrenzen, Stoffmengendurchflüsse, Ventil- und Schieberstellungen) zu kritischen Situationen im Prozess führen und damit die funktionale Sicherheit der Anlage grundlegend gefährden können.

Solche dynamisch-lernfähigen (d. h. zur Laufzeit des Prozesses veränderlichen) Systeme werden von den hierbei zur Anwendung kommenden aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst, da der Standard davon ausgeht, dass ein System vor seiner Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. vor allem DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Dieser *Use Case* ist mit den heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit nur mit starken Einschränkungen hinsichtlich der Dynamik und Variabilität der Anlage bzw. des verfahrenstechnischen Prozesses validierbar (vgl. Abschnitt 2.5.4).

3.3 Use Case 3: Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform

3.3.1 Steckbrief

- Branche: Logistik, mobile Assistenzsysteme
- Entwicklungsstadium: Forschungsansätze, Pilotprojekte
- Literaturquelle: Bubeck u. a. (2016)

3.3.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Bubeck u. a. 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit*

werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.

Im Beitrag wird festgestellt, dass *Fahrerlose Transportsysteme (FTS)* hauptsächlich für verschiedene Intralogistikaufgaben zum Einsatz kommen. Weiterhin beschränkt sich deren Anwendung nicht nur auf industrielle Anlagen, sondern schließt z. B. auch die Krankenhausautomatisierung ein. Das Transportspektrum für die FTS kann dabei sehr umfangreich sein. Die Autoren nennen Installationen, bei denen FTS kleine Container transportieren sowie mit Hilfe von Manipulatoren auf den autonomen Fahrzeugen Montageschritte durchgeführt werden.

Laut der Autoren spiegelt sich das große Anwendungsspektrum für FTS auch in den Fahrzeugen selbst wider: die meisten Hersteller bieten Grundsysteme an, die sie jedoch je nach Kundenwunsch stark modifizieren und somit für jede Installation eine Sonderkonstruktion anbieten können. Die Vielfalt schließt die Antriebskinematik selbst sowie die eingesetzten Sensoren und Aufbauten ein. Diese werden vom Hersteller für jede Installation spezifisch konfiguriert. Bezüglich der Energieversorgung gibt es sowohl batteriebetriebene Fahrzeuge als auch Fahrzeuge mit Kondensatoren, die in regelmäßigen Abständen an installierten Ladestationen aufgeladen werden müssen.

Die Autoren weisen in ihrem Betrag darauf hin, dass die Navigation eine Schlüsseltechnologie im Bereich FTF darstellt. Das heute am weitesten verbreitete Verfahren zur Navigation von FTS ist die *Liniennavigation*[10]. Je nach Ausführung folgt das FTS dabei einer optischen, magnetischen oder induktiven kontinuierlichen Linie mithilfe entsprechender Sensorik (z. B. Kamera, Hallsensor oder Antenne). Die Liniennavigation ist vergleichsweise einfach einzusetzen und seit Langem erprobt. Darüber hinaus sind die verwendeten Komponenten preiswert und sehr robust. Als Nachteil sehen die Autoren, dass ein erhöhter Aufwand bei der Inbetriebnahme und Wartung (Erstellen, Ändern, Reparieren der Leitlinien) zu erbringen ist. Damit stellt insbesondere die geringe bzw. nicht vorhandene Flexibilität den größten Nachteil dieses Verfahrens dar.

Neben der Liniennavigation nennen die Autoren die *Rasternavigation* sowie die auf Reflektormarken basierende *Lasernavigation*. Im Gegensatz zur Linien- und Rasternavigation haben die Reflektormarken keinen direkten Bezug zum Fahrkurs, sondern werden z. B. an Wänden und Regalen montiert. Somit können neue Fahrspuren einfach hinzugefügt und vorhandene schnell abgeändert werden, ohne dass weitere Arbeiten in der Umgebung notwendig sind. Allerdings sehen die Autoren bei all diesen Verfahren als klaren Nachteil, dass die Fahrspuren im Voraus festgelegt werden müssen, was wiederum die Flexibilität bei der Pfadplanung einschränkt. Sollte eine Fahrspur durch ein Hindernis blockiert sein, stoppen die autonomen Fahrzeuge und die Produktion kann nicht aufrechterhalten werden. Ein selbstständiges Umfahren des Hindernisses ist mit diesen Navigationsverfahren nicht möglich.

---

[10] Anmerkung: Da sich FTS meistens autonom durch geschlossene Industriehallen bewegen müssen, sind satellitengestützte Navigationsverfahren (z. B. GPS) in der Regel nicht einsetzbar oder zu ungenau.

Die Erfahrung der Autoren hat zeigt, dass die hohe Produktvielfalt, kürzere Laufzeiten von Fertigungsanlagen sowie die dynamische Rekombination von Fertigungsanlagen im Kontext von Industrie 4.0 es erfordern, dass bestehende FTS-Installationen modifiziert und kostengünstig umgesetzt werden können. Zudem müssen FTS stärker in die eigentliche Fertigung integriert werden können. Sie dienen nicht mehr nur zum Transport der Werkstücke, sondern greifen direkt und aktiv in die Produktion ein. Dazu befinden sich Manipulatoren auf dem autonomen Fahrzeug, mit denen Fertigungsschritte abgearbeitet werden können, während sich das Werkstück auf dem autonomen Fahrzeug befindet.

Für die Absicherung der autonomen Fahrzeuge gegen Kollisionen mit Hindernissen haben sich Laserscanner-Systeme durchgesetzt. Daher sind die FTS in der Regel mit sicherheitsgerichteten Laserscannern und weiteren Sicherheitssensoren ausgerüstet, die auch in dynamischen Umgebungen Schäden an Personen und Gegenständen verhindern können. Beim Eindringen eines Hindernisses in das Sicherheitsfeld des Fahrzeugs werden alle Motoren sofort gestoppt, sodass Kollisionen vermieden werden. Nach dem Notstopp muss die Beseitigung der sicherheitskritischen Situation jedoch vom Operator derzeit manuell bestätigt (quittiert) werden.

Die Autoren stellen daher fest, dass ein effizienter und reibungsloser Betrieb eine möglichst statische Umgebung auf den Fahrwegen der FTS voraussetzt. Um größere Eingriffe in die betrieblichen Abläufe zu vermeiden, werden daher in der Regel Anpassungen der Soft- und Hardware am FTS selbst vorgezogen. Daraus resultieren jedoch Systeme, die auf einen bestimmten Anwendungszweck und ein bestimmtes Einsatzumfeld spezialisiert sind. Als Nachteil sehen die Autoren, dass solche Systeme in der Regel sehr unflexibel sind und sich aufgrund der vielen in sie fest einprogrammierten betrieblichen Randbedingungen nur schwer warten lassen. Die einfache Inbetriebnahme und ein intuitives Bedienen, z. B. mit einem Tablet-PC, sowie die einfache Anbindung an die betriebliche IT-Infrastruktur sollten daher essenzielle Voraussetzungen für eine stärkere Verbreitung dieser Systeme auf dem Markt sein.

Der derzeit geringe Standardisierungsgrad sowohl bei Software- als auch bei Hardwaresystemen von FTS erzeugt aus Sicht der Autoren hohe Entwicklungskosten, die im Widerspruch zu den neuen Kundenanforderungen stehen. Die kunden- und applikationsspezifisch entwickelten FTS können derzeit nicht für andere Produktionsprozesse wiederverwendet werden.

Nach Meinung der Autoren adressiert das Open-Source-*Roboterentwicklungssystem ROS* viele der oben genannten Herausforderungen. Darüber hinaus ist es in der Roboterforschung und Vorentwicklung bereits weit verbreitet. Eine besondere Stärke von ROS ist dabei sowohl die Austauschbarkeit von Hardware- als auch von Softwarekomponenten aufgrund standardisierter Schnittstellen sowie komponenten- und rechnerübergreifender Kommunikationsstrukturen. Zustandsinformationen und Nutzerschnittstellen sind webbasiert verfügbar.

Als für eine stärkere Verbreitung von ROS im industriellen Umfeld wichtigen Aspekt erwähnen die Autoren, dass die „ROS Industrial Initiative“ die in ROS vorhandenen Funktionalitäten aufgreift und diese im industriellen Kontext anwendet. Um den Technologietransfer aus der Forschung in die industrielle Anwendung zu forcieren und die Entwicklungsaktivitäten zu koordinieren, hat das „South West Research Institute (SwRI)“ im März 2013 das „ROS Industrial Konsortium Nord Amerika (RIC-NA)“

gegründet. Der Aufbau eines europäischen Pendants, ein „ROS Industrial Konsortium Europa (RIC-EU)“, wird vom Fraunhofer IPA forciert.

Aus Sicht der Autoren sollten im Gegensatz zu den klassischen Navigationsverfahren, die im FTS-Bereich angewandt werden, mobile Automatisierungsplattformen ohne Änderungen und Anpassungen der Umgebung navigieren können. Sie sollten folglich adaptiv und flexibel sein, um die Anforderungen von Industrie 4.0 zu erfüllen. Daher kommt nach Einschätzung der Autoren die linien-, raster- und reflektormarkenbasierte Lasernavigation nicht infrage. Ihr Lösungsansatz basiert somit darauf, dass nicht spezielle Marker zur Lokalisierung verwendet werden, sondern die FTS sich direkt in der Umgebung orientieren. Dabei wird im Allgemeinen von der *Navigation mit natürlichen Landmarken* gesprochen. Da auf den meisten FTS-Plattformen aus Sicherheitsgründen (Kollisionsvermeidung) ein 2D-Laserscanner schon vorhanden ist, könnte dieser auch für die Navigation verwendet werden.

Im Beitrag wird angesprochen, dass insbesondere für die Kollisionsvermeidung, aber auch zunehmend für die Lokalisierung, in letzter Zeit verschiedene 3D-Sensoren in den Fokus der Entwicklungen geraten. Heutige, mit 2D-Sicherheitslaserscannern ausgestattete FTS, können ihre Umgebung nur flächig auf einer bestimmten Höhe (meist Fuß- oder Schienbeinhöhe) erfassen und Hindernisse erkennen. Dagegen ermöglichen es 3D-Sensoren, die Umgebung komplett zu erfassen und damit auch Hindernisse in verschiedenen Höhen zu erkennen. Nach Auffassung der Autoren kann erst durch die Erfassung der kompletten dynamischen dreidimensionalen Umgebung eine sichere und flexible Navigation sichergestellt werden.

Als weiteren wichtigen Baustein für flexible Navigationssysteme sehen die Autoren die in ROS vorhandene Möglichkeit der freien Pfadplanung. Während klassische autonome Fahrzeuge sich immer auf vordefinierten Bahnen bewegen, ist dies bei sich ständig ändernden Umgebungen nicht erstrebenswert, da andernfalls die Pfade permanent angepasst werden müssten. Daher werden Algorithmen eingesetzt, die es den mobilen Plattformen erlauben, sich selbst den Weg zu ihrem vorgesehenen Ziel zu suchen. Dabei werden nicht nur bekannte Karten, sondern auch der aktuell erfasste Zustand der Umgebung in die Pfadplanung einbezogen. Dies ermöglicht es den FTS-Plattformen, nicht nur von Punkt A zu Punkt B zu gelangen, sondern gegebenenfalls erkannte Hindernisse zu umfahren und auch sich bewegende Gegenstände und Personen zu berücksichtigen. Somit sinkt die Gefahr einer Kollision des FTS mit Personen, der Umgebung und anderen FTS-Plattformen. Darüber hinaus kann die Logistikaufgabe zuverlässiger erfüllt werden, da bei blockierten Routen geeignete Ausweichrouten automatisch berechnet und abgefahren werden können. Zudem sind die Systeme adaptiv und erfüllen die Anforderungen im Kontext von Industrie 4.0, da mit der automatischen Kartierung der Umgebung ein Werkzeug für die ständige Rekonfiguration in dynamischen Umgebungen zur Verfügung steht.

In gleichem Maße wird zurzeit die Standardisierung auf diesem Gebiet vorangetrieben, die ebenfalls eine Hauptherausforderung für die Umsetzung einer hochflexiblen Industrie 4.0-Produktion ist. Nach Beobachtung der Autoren findet die Plattform ROS immer mehr Verbreitung im industriellen Umfeld und damit auch im Bereich FTS. Durch die Vermengung von proprietären und offenen Softwaremodulen schätzen die Autoren, dass auch klassische Hersteller von FTS dazu bewegt werden könnten, ihre Schnittstellen offenzulegen. Durch diese Offenlegung und Standardisierung könnte

sich das Investitionsrisiko für die Kunden reduzieren, da sich die Systeme leicht auf andere Teile der Produktion portieren und adaptieren lassen.

3.3.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale Integration des gesamten fahrerlosen Transportsystems, die horizontale Integration durch die Einbettung des FTS in den Produktionsprozess, eine dezentrale Steuerung und Intelligenz sowie das cyberphysische Produktionssystem adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung, die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden Produkt- und Anlagenengineering sowie der Portier- und Adaptierbarkeit von flexiblen, ROS-basierten FTS die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ beschrieben. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die Extraktion von sog. Merkmalsdaten (erkannte Hindernisse) aus den Laserscanner-Daten sowie der dynamischen Pfadplanung zur Hindernis-Umfahrung adressiert. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die Einbettung in den gesamten Produktionsprozess angesprochen.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* nur indirekt durch das modulare Anlagenkonzept thematisiert.

3.3.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden sicherheitstechnische Aspekte an mehreren Stellen angesprochen – immer im Zusammenhang mit der Vermeidung von Kollisionen zwischen dem autonomen Fahrzeug, dem Menschen oder der Umgebung.

Weiterhin werden verschiedene Navigationsverfahren (u. a. lernfähige Verfahren) vorgestellt, die das Fahrzeug befähigen, selbstständig durch weitgehend bekannte aber dynamisch-veränderliche Umgebungen zu navigieren sowie autonome Entscheidungen treffen zu können. Beispielsweise können Hindernisse erkannt und es kann ihnen über einen alternativen Pfad ausgewichen werden. Passiert dabei ein Fehler, kann es zur Kollision mit Hindernissen oder Menschen kommen.

Solche zur Laufzeit hinsichtlich ihrer Reaktionen veränderlichen, da dynamisch-lernfähigen Systeme, die zusätzlich autonome Entscheidungen mit Sicherheitsrelevanz treffen dürfen, werden von den hierbei zur Anwendung kommenden aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst. Der Standard geht davon aus, dass ein System vor seiner Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. vor allem DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Dieser *Use Case* ist mit den heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit nur mit sehr starken Einschränkungen hinsichtlich seiner Dynamik validierbar (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Wie im *Use Case* beschrieben, kommt die Softwareplattform *ROS* auf den FTS zum Einsatz. Diese stellt zwar eine sehr mächtige Algorithmen- und Kommunikationsplattform für Roboter dar – bei ihrem Softwaredesign wurden bislang allerdings keinerlei Sicherheitsaspekte bedacht. Dies ist insofern fatal, da die Betriebssicherheit eines Robotersystems von der Angriffssicherheit seiner modularen, vernetzten Teilkomponenten abhängt (vgl. Kirsch und Pohl 2017). Das im *Use Case* angesprochene Unterprojekt „ROS Industrial“ als Transition aus dem Forschungs- und Laborbetrieb in die Industriepraxis sollte zuallererst ein gründliches Re-Design bezüglich der ROS Konzepte unter Berücksichtigung der Sicherheitsziele Vertraulichkeit, Integrität, Verfügbarkeit und Authentizität (vgl. Einschätzung von Kirsch und Pohl 2017) sowie der Gewährleistung der funktionalen Sicherheit zum Ziel haben.

Es wird abschließend deutlich darauf hingewiesen, dass die heutige Implementierung von ROS *keinen* sicheren Betrieb eines Roboters oder eines FTS erlaubt, da sicherheitstechnische Maßnahmen hinsichtlich Security oder Safety derzeit auf Basis von ROS nicht bzw. nicht angemessen umgesetzt werden können.

3.4 Use Case 4: MICA – Die modulare Embedded Plattform der Firma HARTING für Industrie 4.0

3.4.1 Steckbrief

- Branche: Hersteller von Automatisierungskomponenten
- Entwicklungsstadium: Marktreife / produktiver Einsatz
- Literaturquelle: Regtmeier und Kaufmann (2016)

3.4.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Regtmeier und Kaufmann 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Die Autoren stellen fest, dass in den neuesten Maschinen neue Steuerungsgenerationen und Kommunikationsmodule enthalten sind, die das Internet der Dinge und Industrie 4.0 prinzipiell ermöglichen. Allerdings besitzen gerade ältere Maschinen oft keine moderne Steuerung und keine oder nicht geeignete Kommunikationslösungen. Bei Maschinenlaufzeiten von 20 bis 50 Jahren (in einigen Bereichen sogar noch länger) besteht laut Autoren die Herausforderung, ältere Maschinen „Industrie 4.0-fähig“ zu machen und eine Kommunikation mit anderen Maschinen, Werkstücken oder IT-

Systemen zu ermöglichen. Die Firma *Harting* widmet sich dieser Herausforderung, indem sie ein modulares embedded-Konzept entwickelt hat – die sogenannte *HAIIC MICA (Harting Integrated Industry Computing – Modular Industry Computing Architecture)*.

Diese MICA kann nachträglich an einer Maschine oder einem Gerät angebracht werden, um die Kommunikation mit der Außenwelt und zusätzlich benötigte Rechenleistung direkt an der Maschine zu ermöglichen. Laut Autoren kann ein solches System immer dann zum Einsatz kommen, wenn eine vorhandene Steuerung zu inflexibel und zu starr ist oder bei alten Anlagen nicht nachgerüstet werden kann.

Die MICA wird durch die Firma Harting als offene Plattform für Hardware und Software entwickelt, auf der Partner, Kunden (z. B. Maschinenbauer) und theoretisch auch Wettbewerber ihre eigenen Anwendungen entwickeln und implementieren können.

Im Beitrag wird beschrieben, dass das Gesamtsystem komplett modular aufgebaut ist. Einzelne Bestandteile der Komponenten sind wiederum modular aufgebaut und gegeneinander austauschbar. Durch die softwaretechnische Kapselung der Inhalte und Applikationen in sog. *Containern* entsteht eine sehr modulare, wart- und pflegbare Softwarearchitektur, die Industrie 4.0-Anwendungen leicht realisierbar macht.

Mit MICA unterstützt Harting das *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)* der Plattform Industrie 4.0 (vgl. Abschnitt 2.4.1). In RAMI 4.0 werden *Industrie 4.0-Komponenten* beschrieben (vgl. Abschnitt 2.4.2). Wesentlich für Industrie 4.0 ist die verstärkte und direkte Kommunikation zwischen Komponenten, Produkten und Maschinen auf dem Shopfloor mit den IT-Systemen des Unternehmens, z. B. dem ERP-System (Enterprise Resource Planning). Dies setzt aber die Kommunikationsfähigkeit der Komponenten auf dem Shopfloor voraus.

Mit Hilfe einer eineindeutigen Identifikation kann laut Autoren der jeweiligen Komponente (z. B. Klemmenblock, Pumpe, Motor) eine virtuelle Repräsentation (digitaler Zwilling) im Sinne einer Industrie 4.0-Komponente zugeordnet werden. Diese enthält die relevanten Eigenschaften und Funktionalitäten der zugeordneten Komponente. Diese virtuelle Repräsentation wird im RAMI 4.0 als *Verwaltungsschale* bezeichnet. Einem einzelnen Bauteil kann damit jeweils eine eigene Verwaltungsschale zugeordnet werden.

Da mit MICA laut Autoren auch einfache oder alte Komponenten nachträglich zu „Industrie 4.0-Komponenten“ nachrüstbar sind, können auch ältere Maschinen, Produkte und Komponenten in moderne Industrie 4.0-Lösungen integriert werden.

Im Beitrag wird darauf hingewiesen, dass nicht alle Rechenoperationen aus Performance-Gründen auf einem lokalen Steuerungssystem direkt an der Maschine möglich sind. Dies betrifft z. B. bestimmte Algorithmen für das Erkennen von Fehlermustern und daraus abgeleitete Vorhersagen für die vorbeugende Instandhaltung. Dafür ist eine große Anzahl an Prozessdaten von vielen ähnlichen Maschinen erforderlich. Deshalb wurde MICA darauf vorbereitet, mit einem Cloud-System (z. B. einer Maschinen-Cloud) kommunizieren zu können.

Auch wurde vom Hersteller eine Datenhaltung in Form einer Datenbank in der MICA vorgesehen. Dies kann für eine Datenpufferung sinnvoll und notwendig sein, falls z. B. eine Cloud-Anwendung vorübergehend nicht verfügbar ist.

Da das System nachträglich an Altmaschinen und -geräte angebaut werden kann, bekommen laut Hersteller produzierende Unternehmen mit einem über viele Jahre gewachsenen Maschinenpark die Möglichkeit, sich nachträglich an Industrie 4.0-Anwendungen anzuschließen.

MICA soll sich in die RAMI 4.0-Architektur integrieren. Verschiedenste Verwaltungsschalen (virtuelle Repräsentationen) mehrerer realer Komponenten oder Maschinen können daher voneinander unabhängig und gegeneinander gekapselt auf der MICA betrieben werden.

3.4.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale Integration einer Industrie 4.0-Komponente im Sinne von RAMI 4.0, eine dezentrale Steuerung und Intelligenz sowie das cyber-physische Produktionssystem adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung sowie die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit der Nachrüstbarkeit von Altmaschinen die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ angesprochen. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die nun mögliche Gewinnung von Prozessdaten, deren Vernetzung mit anderen ähnlichen Maschinen sowie die Ableitung neuer Erkenntnisse (Fehlermuster und abgeleitete Vorhersagen) adressiert. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die maschinenübergreifende Vernetzung von älteren Steuerungssystemen mit bis dahin keiner oder nur sehr eingeschränkter Kommunikationsfähigkeit beschrieben.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* in Form einer speziellen Automatisierungskomponente thematisiert, die alte Maschinen oder Komponenten mit Industrie 4.0-tauglichen Kommunikationsschnittstellen nachrüstet. Darüber hinaus können auf ihr mehrere voneinander unabhängige und gekapselte Verwaltungsschalen betrieben werden.

3.4.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden keine sicherheitstechnischen Aspekte betrachtet bzw. diskutiert.

Aufgrund der hohen Kommunikativität der im *Use Case* beschrieben Industrie 4.0-Komponente sollten mindestens die Maßnahmen zur Erreichung der Angriffssicherheit (Security) betrachtet werden. Die für dieses System und seinen gedachten Einsatz angemessenen Security-Maßnahmen stehen heute weitestgehend zur Verfügung. Da im *Use Case* allerdings keine zur Laufzeit veränderlichen (rekombinierenden) Maschinen angesprochen werden, sollten auch die heute verfügbaren Methoden zur Analyse und Bewertung der Angriffssicherheit anwendbar sein.

Im *Use Case* wird weiterhin nicht angesprochen, ob über das Modul MICA sicherheitsgerichtete Daten (im Sinne von Safety) mit anderen Maschinen- und Anlagenteilen kommuniziert werden sollen – es geht vorwiegend um die Erfassung von Prozessdaten zur Auswertung im ERP. Daher sind bei der kombinierten Risikobeurteilung die Schutzziele von Safety zunächst nachrangig zu betrachten.

3.5 Use Case 5: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft

3.5.1 Steckbrief

- Branche: Automobilindustrie, Mensch-Roboter-Kooperation
- Entwicklungsstadium: z. T. produktiver Einsatz (Pilotprojekte) und weiterführende Forschungsansätze
- Literaturquelle: Steegmüller und Zürn (2016)

3.5.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Steegmüller und Zürn 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

In diesem Anwendungsfall werden wandlungsfähige Produktionslösungen für einen laufenden Produktionsbetrieb vorgestellt, darunter kooperierende Roboter, skalierbare Produktionssysteme und Montagemodule zur Automatisierung im Fließbetrieb. Ein Schwerpunkt stellt dabei die *sensitive Robotik* dar mit der Schilderung einer ersten Serienlösung sowie von umfassenden Mensch-Roboter-Kooperationslösungen.

Laut Autoren werden heute marktbedingte Absatz- und Variantenschwankungen von Produkten in der Fertigung meist mit einem sog. *Ressourcenvorhalt* in den Produktionsanlagen berücksichtigt, wodurch später eine hohe Flexibilität gewährleistet werden soll. Dadurch können in der Planungsphase festgelegte Produktvarianten und Stückzahlen sehr schnell innerhalb der Anlage ohne Mehraufwand hergestellt werden. Die Flexibilität einer Anlage beschreibt dabei diejenigen Änderungsmöglichkeiten, die eine Anlage von sich aus mitbringt, um auf geänderte Anforderungen reagieren zu können. Es wird allerdings darauf hingewiesen, dass diese Änderungen zum jeweiligen Planungszeitpunkt bereits bekannt sein müssen. Innerhalb vereinbarter

Grenzen kann damit die Anlage mit geringem Aufwand und in kürzester Zeit flexibel auf die vorhergesehenen neuen Randbedingungen angepasst werden. Laut Autoren müssen jedoch Ressourcen vorgehalten werden, um auf die Änderungen reagieren zu können – dies wird *Flexibilitätsvorhalt* genannt.

Die Autoren stellen fest, dass die Bedürfnisse des beliebig schwankenden Marktes zu dynamisch sind und bisherige Strategien nicht mehr wirtschaftlich wären. In Zukunft muss mit viel volatileren Märkten gerechnet werden. Daher reicht der heutigen Anlagen zugrunde liegende Flexibilitätsvorhalt nicht mehr aus. Auf unvorhersehbare Änderungen muss eine Produktionsanlage daher nicht *flexibel*, sondern *wandlungsfähig* reagieren können, um weiterhin wirtschaftlich zu sein. Die Wandlungsfähigkeit einer Anlage beschreibt dabei das Vermögen und das Potenzial, mit minimalem Aufwand *beliebig* umgestaltet zu werden. Damit sollen auch Anlagenkombinationen möglich und zulässig sein, die zum Planungszeitpunkt noch unbekannt waren und daher nicht im Voraus betrachtet werden konnten. Ziel ist es, mit nur geringem finanziellen und zeitlichen Aufwand zwischen verschiedenen Zuständen zu wechseln. Als weiteren Vorteil sehen die Autoren, dass im Gegensatz zur Flexibilität die Wandlungsfähigkeit ohne einzuplanenden Ressourcenvorhalt auskommt.

Im *Use Case* wird ein neuartiges Anlagen- und Montagekonzept zur Hinterachsmontage der C-Klasse bei der Firma *Daimler AG* beschrieben. Laut Autoren galt es, neue Lösungen für die manuellen und damit zeitintensiven Montagestationen zu finden, welche die vorhandenen Mechanisierungen bisher in ihrem Takt bestimmten. Weiterhin sollten schlankere Lösungen für den Werkstücktransport gefunden werden, als feste Materialbänder mit einer Vielzahl von Werkstückträgern.

Im Beitrag wird ein komplett neues Anlagen- und Technologiekonzept zur Hinterachsmontage als Lösungsansatz beschrieben, bei welchem insbesondere die Automation der Montage durch Industrieroboter und eine klare Trennung von wertschöpfenden Montageinhalten und nichtwertschöpfenden Logistik- und Materialbereitstellungstätigkeiten im Fokus standen. Zur Maximierung des wirtschaftlichen Potenzials war es laut Autoren notwendig, sich auf die wertschöpfenden Elemente zu konzentrieren und möglichst die nichtwertschöpfenden Elemente vollständig zu entfernen.

Laut Autoren wird die komplette Hinterachse schon heute mit über 45 kooperierenden Robotern montiert. Bis zu sechs Roboter sind jeweils miteinander vernetzt und arbeiten im neuen Konzept in einem Roboterverbund Hand in Hand. Während so die Werkstücke in fliegendem Wechsel von einer Bearbeitungszelle zur nächsten wandern, entfallen praktisch die Totzeiten (nichtproduktive Zeiten) des Werkstücktransfers. Der Ausbringungstakt und die Wertschöpfung steigen in der Folge.

Ziel war es, die Bestände innerhalb der Montagelinie und damit auch die Durchlaufzeit auf ein Minimum zu reduzieren. Gleichzeitig werden die kompletten Montagedaten für jede einzelne Achse in einer Qualitätsdatenbank gespeichert, um eine lückenlose Dokumentation und Rückverfolgbarkeit zu gewährleisten.

Die Autoren machten die Erfahrung, dass während der Laufzeit der Anlage neue Varianten zeitnah und kostengünstig integriert werden können. Die kurzen Reaktionszeiten auf nicht vorhersehbare Produktänderungen und -varianten bestätigen die verbesserte Wandlungsfähigkeit der Anlage. Weiterhin stellten sie fest, dass bei ähnlicher produzierter Stückzahl der finanzielle Aufwand sogar kleiner ist als bei einer

vergleichbaren Großanlage bei gleichzeitiger Flächeneinsparung von mehr als 30 Prozent. Durch eine Modulstrategie konnten die erforderlichen Investitionen in den Anlagenaus- und -umbau zeitnah je nach aktuellem Marktbedarf nacheinander getätigt werden.

Im Unterschied zur typischen Fertigungslinie wurde im Anwendungsfall ein Basislayout gewählt, das Prozessmodule ohne fest installierte Fördertechnik in einer Matrixform anordnet, um Modularität, Skalierbarkeit, Flexibilität in Bezug auf die eingesetzten Betriebsmittel und eine lose Verkettung der Fertigungsschritte zu ermöglichen. Dabei durchlaufen verschiedene Fahrzeugvarianten die Produktion auf verschiedenen Wegen. Sie werden somit zu cyber-physischen Systemen (CPS), d. h., die verschiedenen Fahrzeugmodelle und -varianten können sich selbstständig und flexibel ihren Weg durch die Prozessmodule suchen und via Cloud den Zeitpunkt ihrer Bearbeitung verhandeln. Im Sinne von Industrie 4.0 steuert damit das Produkt seinen eigenen Fertigungsprozess.

Die Autoren stellen fest, dass sich Unternehmen bisher entscheiden mussten zwischen flexiblen, manuellen Produktionsabläufen einerseits oder hochproduktiver, repetitiver Automatisierung mit geringer Flexibilität andererseits. Es galt der Grundsatz: Automatisierte Produktionssysteme sind hoch produktiv, aber starr und kapitalintensiv. Manuelle Produktionssysteme sind flexibel, aber wenig produktiv. Diesen bisher unvereinbaren Gegensatz soll laut *Use Case* eine neuartige Generation von Leichtbaurobotern aufheben.

Nach Darstellung der Autoren sind diese Art Roboter klein, leicht und teils mit Sensoren ausgestattet, die es ihnen ermöglichen, sehr feinfühlig auf ihre Umwelt zu reagieren. Sie können nahezu jede Montagetätigkeit ausführen und dank ihrer Sensorik darüber hinaus bei voller Arbeitssicherheit ohne Schutzzäune mit Menschen an einer Station zusammenarbeiten.

Die Autoren stellen fest, dass sich sensitive Leichtbauroboter von bisherigen Roboterkonzepten vor allem durch ihre „Feinfühligkeit“ unterscheiden, also ihre Fähigkeit, die Kräfte und Momente, die in der Interaktion mit Gegenständen oder Menschen auftreten, mit integrierten Sensoren sehr präzise zu messen und darüber hinaus auch situationsentsprechend zu reagieren. Die Art der Reaktion bei einer Berührung zwischen Mensch und Roboter (z. B. Zurückweichen oder Innehalten) ist frei programmierbar. Durch diese Eigenschaften können sensitive Leichtbauroboter Montageaufgaben auch in nur teilweise bekannten Umgebungen präzise und zuverlässig ausführen. Nach Auffassung der Autoren ist dies ein radikaler Paradigmenwechsel in der Automatisierung. Es wurde im Beitrag festgestellt, dass ein solcher Ansatz viel zuverlässiger funktioniert als das bisher übliche „blinde“ Anfahren über programmierte oder eingelernte Bahnen bisheriger Robotik-Systeme.

Als Vorteil der neuen Leichtbauroboter sehen die Autoren auch den vergleichsweise geringen Investitionsbedarf in die Arbeitsumgebung. Die Roboter können dieselben Werkzeuge bedienen wie ein Mensch. Zudem sind sie klein, leicht und entsprechend mobil. Ohne aufwendige Vorbereitungen lassen sie sich an eine andere Arbeitsstation transportieren und sind dort rasch einsatzbereit. Je nach geforderten Stückzahlen und Fertigungsumfängen kann ein Mitarbeiter einen oder mehrere Roboter hinzunehmen. Dazu setzt er sie mal an der einen, mal an der anderen Station ein oder

kann sogar ohne Schutzzäune mit ihnen in einem gemeinsamen Arbeitsbereich zusammenarbeiten.

Die Autoren beschreiben, wie in so einer kollaborativen Arbeitssituation die kognitiven und physischen Fähigkeiten des Menschen mit der Wiederholgenauigkeit, Präzision und Ausdauer der Roboter kombiniert werden. Dieses sog. *Robot Farming* kann eine deutliche Steigerung der Wandlungsfähigkeit der Produktionsprozesse bedeuten. Anders als in bisherigen Automatisierungen sind beim Robot Farming mit Leichtbaurobotern keine Sonderwerkzeuge oder spezielle Vorrichtungen mehr nötig. Das reduziert die Investitionskosten bei gesteigerter Produktivität.

Weiterhin empfehlen die Autoren, die Möglichkeiten künftiger Mensch-Roboter-Kooperationen für „gleitende“ Automatisierungsgrade von „manuell“ über „assistierend“ (Mensch-Roboter-Interaktion) bis zu „vollautomatisch“ auszunutzen. Die sichere Mensch-Roboter-Interaktion ohne trennende Schutzeinrichtungen („zaunlose Fabrik“) kann hierdurch schlanke, dynamisch veränderbare Produktionslayouts ermöglichen. Für die erste praktische Umsetzung einer Montageapplikation mit Leichtbaurobotern wählte Daimler daher eine der anspruchsvollsten und ergonomisch schwierigsten Montageaufgaben aus dem Bereich der Hinterachsgetriebemontage von Mercedes-Benz.

3.5.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* eine dezentrale Steuerung und Intelligenz sowie das cyber-physische Produktionssystem adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden Anlagenengineering und der lückenlosen Speicherung von Montagedaten zur Gewährleistung einer Rückverfolgbarkeit die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ beschrieben. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die Wandlungsfähigkeit der Produktionsanlagen adressiert, um auf beliebig schwankende Märkte flexibel reagieren zu können. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die maschinenübergreifende Vernetzung sowie die flexible Integration von Leichtbaurobotern in veränderliche Arbeitssituationen angesprochen.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* indirekt thematisiert, indem für alle montierten Achsen die kompletten Montagedaten in einer Qualitätsdatenbank gespeichert werden.

3.5.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden sicherheitstechnische Aspekte an mehreren Stellen angesprochen – immer im Zusammenhang mit der Kollaboration zwischen Mensch und sensitivem Roboter ohne Schutzzaun. Als technologischer Vorteil wird gesehen, dass sensitive Roboter auf ihre Umgebung durch z. B. taktile Sensoren flexibel reagieren können. Dadurch können sie auch in einer dynamisch veränderlichen Umgebung oder in einer zum Zeitpunkt des Systementwurfes unbekannten Arbeitsaufgabe eingesetzt werden. Sensitive Leichtbauroboter können hinsichtlich des Kollisionsrisikos bis zu einem gewissen Grad als eigensicher angesehen werden. Diese Einschätzung bedarf aber einer sicherheitstechnischen Überprüfung, wenn der Roboter ein Arbeitswerkzeug aufnimmt. Aufgrund der Masse des Werkzeuges, seiner Geometrie (z. B. spitze Kanten, Schneiden), der Armreichweite des Roboters (großer Hebelarm, Massenträgheit beim Beschleunigen und Abbremsen der Achsen) sowie der Positionierung zum Menschen (z. B. Roboter hantiert in Kopfhöhe des Menschen) können sich erhebliche Gefährdungen ergeben.

Weiterhin werden im *Use Case* die Vorteile dargestellt, die sich aus wandlungsfähigen Produktionsanlagen sowie deren Fertigungs- und Logistiksystemen im Zusammenhang mit unvorhergesehenen Änderungen im Produktionsablauf ergeben.

Solche zur Laufzeit hinsichtlich ihrer Reaktionen veränderlichen, da flexibel anpassbaren oder sogar selbstständig dynamisch-lernfähigen Systeme, die zusätzlich autonome Entscheidungen mit Sicherheitsrelevanz treffen dürfen, werden von den hierbei zur Anwendung kommenden aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst. Der Standard geht davon aus, dass ein System vor seiner Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. vor allem DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Dieser *Use Case* ist mit den heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit nur mit sehr starken Einschränkungen hinsichtlich seiner Wandelbarkeit und Lernfähigkeit validierbar (vgl. Abschnitt 2.5.4). Die Sicherheitsnachweisführung für diesen *Use Case* ist auf Basis heutiger Sicherheitsnormen nur für fest zu definierende Kombinationen von Maschinen- und Anlagenteilen während der Planungsphase und vor der sicherheitstechnischen Abnahme möglich. Dies würde den im *Use Case* beschriebenen dezentralen Lösungsansätzen auf Basis von zur Laufzeit wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen entgegenstehen.

Die Aspekte der Angriffssicherheit werden im *Use Case* nicht adressiert. Aufgrund der beschriebenen hohen Kommunikativität der Maschinen-/Anlagen-Komponenten und der Roboter untereinander sowie der Integration des Menschen in den Fertigungsprozess (ohne Schutzzäune) sind bei mangelhafter Angriffssicherheit (Security) negative Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit (Safety) zu erwarten.

Die dargestellten Ergebnisse der im *Use Case* zitierten Veröffentlichung erlauben keine Aussagen zu Details der Sicherheitsnachweisführung, insbesondere nicht im Zusammenhang mit offenen Fragestellungen zu Industrie 4.0-Anwendungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die derzeitige Ausbaustufe der vorgestellten I4.0-Konzepte sich auf eine während der Planungsphase festgelegte und begrenzte Anzahl von Variationsmöglichkeiten beschränkt und somit eine sicherheitstechnische Abnahme auf Basis des normativen Standes der Technik ermöglicht wird.

3.6 Use Case 6: Innovative Konzepte einer sich selbstorganisierenden Fahrzeugmontage am Beispiel des Forschungsprojekts SMART FACE

3.6.1 Steckbrief

- Branche: Automobilproduktion, Herstellung von Elektrofahrzeugen in Kleinserien
- Entwicklungsstadium: Forschungsprojekt, Erarbeitung von Demonstratoren
- Literaturquelle: Bochmann u. a. (2016)

3.6.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Bochmann u. a. 2016*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Im Beitrag wird das Forschungsprojekt *SMART FACE* beschrieben. Dies ist ein durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördertes öffentliches Forschungsprojekt und steht für *Smart Micro Factory für Elektrofahrzeuge mit schlanker Produktionsplanung*.

Ziel des interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsprojektes ist die Konzipierung und Pilotierung eines dezentral gesteuerten Produktionssystems. „Dieses basiert auf dem Internet der Dinge-Prinzip, in welchem physische Elemente durch integrierte Sensorik (z. B. RFID-Chips) eine Repräsentanz im Internet erhalten. Dort kommunizieren sie miteinander, sodass zum Beispiel Montage- und zu bearbeitende Teile ihren eigenen, optimalen Weg durch den Produktionsfluss finden.“

Laut Autoren stellen sich Produzenten unterschiedlichster Branchen der Herausforderung, große Mengen variantenreicher Produkte in jeweils kleinen Losgrößen den Kundenanforderungen entsprechend, d. h. in der gewünschten Ausführung und zum vereinbarten Liefertermin, wirtschaftlich herzustellen (siehe „Losgröße 1“). Eine modellabhängige, herstellerübergreifende Variantenvielfalt von zum Teil 10^{26} Endvarianten ist inzwischen längst Realität. Die Autoren beobachten, dass dieser Effekt auch durch die weiterhin an Bedeutung gewinnende Produktion von Elektrofahrzeugen verstärkt wird. Diese stellt besondere Anforderungen an die Produktion in der Automobilindustrie, da die technologischen Entwicklungen in der E-Mobilität nur schwer prognostizierbar und die Märkte entsprechend volatil sind.

Die Produktion von Fahrzeugen in Kleinserien, unter besonderer Berücksichtigung der spezifischen Produktionsrandbedingungen bei Elektrofahrzeugen, bildet den zu untersuchenden Anwendungsfall im Projekt SMART FACE. „Im Fokus des Projekts steht die Fahrzeugendmontage, da diese gegenüber der Fertigung besonders große Flexibilisierungspotenziale hinsichtlich der Arbeitsvorgangssequenzen bietet."

Die Autoren stellen fest, dass die heutige variantenreiche Fließproduktion durch hocheffiziente Montagelinien und eine umfassende IT-Infrastruktur bewältigt wird. Dabei folgen alle Fahrzeuge derselben festgelegten Sequenz von Montageabschnitten im Flussprinzip auf Modell-Mix-Montagelinien, wobei die Montageoperationen je nach Modell variieren können.

Nach Meinung der Autoren sind die heute vorhandenen, vor allem auf maximale Produktivität ausgelegten Strukturen prädestiniert für eine deterministische Nachfrage mit hohen Stückzahlen. Durch die kontinuierlich steigenden Flexibilitätsanforderungen sehen sie einen wachsenden Bedarf an leistungsstarken Montagelinien für den Modellmix begründet. Diese können eine möglichst gleichmäßige und hohe Auslastung der Montagearbeiter sicherstellen. Gerade auch infolge der aus heutiger Sicht schwer abzuschätzenden Nachfrage nach Elektrofahrzeugen sehen die Autoren Potenziale, die durch alternative Ansätze zu starr verketteten Fließproduktionen erschlossen werden können. Zu den zentralen Potenzialen zählt für sie eine erhöhte Wandlungsfähigkeit der Montage. Durch diese könnte auf volatile Produktionsanforderungen und ungünstige Auftragssequenzen infolge des Modellmix flexibel und wirtschaftlich reagiert werden.

In heutigen Fertigungsprozessen ist die Reihenfolge der Aufträge zeitlich und räumlich innerhalb der Schicht genau festgelegt. Eine dezentrale Steuerung des Materialflusses ist heute nicht vorgesehen – die Flexibilität der Produktion wird Top-down gelenkt. Darin sehen die Autoren ein Hemmnis, die Reihenfolge von Produktionsaufträgen bzw. Arbeitsvorgängen schnell und flexibel ändern zu können. Gebildete Abarbeitungsreihenfolgen ändern zu müssen, lässt sich z. B. durch kundenseitige Änderungswünsche, durch Eilaufträge oder auch Störungen während der Produktion begründen.

Die Konzepte des Forschungsprojekts sollen eine flexible, schlanke Planung der Produktion mit wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen vereinen. Konzeptueller Kern ist ein dezentral gesteuertes Produktionssystem nach dem Internet-der-Dinge-Prinzip. In diesem sollen Montageobjekte und Bauteile ihren Weg eigenständig von Station zu Station (siehe *Smart Factory*) finden.

Die Autoren heben hervor, dass die Konzepte für die Programmplanung und -steuerung der Smart Factory mit dem Betriebskonzept harmonieren müssen. Nur dann kann die zentrale Planung verschlankt und bis zu einem bestimmten Grad in eine sich selbstorganisierende Steuerung überführt werden. Daher sehen die Autoren als ein zentrales Teilziel des Projekts, den wirtschaftlich möglichen und sinnvollen Grad der Entkopplung zwischen zentraler Planung und dezentraler Steuerung zu identifizieren.

Als konzeptionellen Ansatz wählten die Autoren den innerhalb des Projekts eingeführten *Volumentakt*. Dieser bietet das Potenzial, Aufträge in flexibler Reihenfolge zu

verarbeiten. Weiterhin soll der Zusammenhang von Takt und Volumen analysiert und formal beschrieben werden.

Im Zentrum des im Beitrag dargestellten Projekts steht u. a. die Entwicklung einer kommunikationsorientierten *Middleware*[11] über die verschiedenen Ebenen des Produktionssystems sowie die Konzeptionierung smarter Sensorik und Aktorik. Zur Evaluation der Projektergebnisse sollen auch die innerhalb des Projekts zu entwickelnden Demonstratoren dienen.

Ausgehend von den produktionsrelevanten Rahmenbedingungen werden die Autoren im Projekt das Betriebskonzept entwickeln, dessen Funktionalitäten beispielsweise auf die Festlegung des Montagelayouts, die Bestimmung benötigter Prozessfähigkeiten und die Ermittlung von Kapazitäten zurückzuführen sind. Entscheidender Bestandteil des Betriebskonzeptes soll die Schaffung eines digitalen Abbildes sein, das als Entscheidungsgrundlage für die Produktionsprogrammplanung wie auch die Produktionssteuerung dient. Die Autoren folgen der Idee des durchgängigen digitalen Engineerings, in dem das digitale Abbild anhand von Statusmeldungen kontinuierlich aktualisiert wird. Voraussetzung hierfür ist ein effizientes Zusammenspiel aus Datenmanagementsystem und cyber-physischen Systemen.

So soll die Produktionssteuerung dazu befähigt werden, Entscheidungen auf Basis des aktuellen Systemzustandes des Betriebskonzepts zu treffen. Liegt ein langfristig veränderter Systemzustand des Betriebskonzepts z. B. aufgrund eines Maschinenausfalls vor, soll zur Erhöhung der Planungsgenauigkeit ebenfalls eine Aktualisierung des digitalen Abbildes in der Produktionsprogrammplanung stattfinden.

Resultierend aus einer Bewertung existierender Montagestrukturtypen im Hinblick auf die Eignung in einer dezentral gesteuerten Montage stellen laut Auffassung der Autoren dieses Anwendungsfalls sog. *rekonfigurierbare Maschinensysteme (RMS)* die am besten geeignete Montagestruktur dar. Diese bilden daher die Grundlage für das im Projekt zu entwickelnde Betriebskonzept. RMS sind hinsichtlich der Montagestruktur der Inselfertigung ähnlich und besitzen eine erhöhte Durchlaufflexibilität durch multiple Prozessfähigkeiten einzelner Arbeitsstationen.

Wo ehemals Produktionsleitsysteme für die sequenzgerechte Einsteuerung von Fahrzeugen in das Produktionssystem verantwortlich waren, kann nach Auffassung der Autoren die Produktionssteuerung in der Smart Factory künftig die Reihenfolge von Produktionsaufträgen flexibler wählen. Je Produktionsauftrag erfolgt hierbei eine Übersetzung in Montageaufträge und Transportaufträge. Die Transportaufträge müssen durch ein Transportauftragsmanagementsystem verwaltet werden, wobei die Materialversorgung der Montagestationen auf dem Shopfloor über verschiedene Transportsysteme sichergestellt wird (z. B. fahrerlose Transportfahrzeuge, Stapler, Routenzüge).

---

[11] Als *Middleware* werden in der Informatik anwendungsneutrale Programme bezeichnet. Diese vermitteln entweder zwischen verschiedenen Anwendungen oder zwischen einem unterlagerten Betriebssystem und seinen Anwendungen. Ziel ist, dass die Komplexität der Applikationen und ihrer Infrastruktur voreinander verborgen bleibt und der gegenseitige Zugriff ausschließlich über definierte Daten- und Funktionsschnittstellen – sog. *Application programming interfaces (API)* – erfolgt.

Für die frühzeitige Demonstration und Validierung der konzeptionellen und technischen Projektarbeiten haben die Autoren einen miniaturisierten Demonstrator entwickelt, welcher erstmals auf der Hannover Messe Industrie 2015 präsentiert wurde. Dieser repräsentiert eine miniaturisierte, wandlungsfähige und selbststeuernde Fahrzeugmontage. Dazu wurden exemplarische Teilprozesse der Montage im Demonstrator integriert, die eine weitgehende Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitungsreihenfolgen anbieten.

Als nächsten Schritt auf dem Weg zum Umsetzungspiloten sehen die Autoren die Evaluation des vorgestellten Gesamtkonzepts durch eine praxistreue Simulation. Dazu soll die Skalierung des Minidemonstrators auf eine funktional erweiterte, maßstabsgerechte und praxiskonformere Demonstratorvariante innerhalb des „LivingLab Zellulare Transportsysteme“ am Fraunhofer IML in Dortmund erfolgen. „Innerhalb dieses Experimentierfeldes führen bereits heute über 50 intelligente, miteinander vernetzte, fahrerlose Transportfahrzeuge Transportaufträge zwischen Arbeitsstationen und einem Behälterlager aus. Diese Fahrzeuge koordinieren sich untereinander selbstständig ohne zentrale Steuerung.“

Das Gesamtkonzept des Projekts soll den Weg hin zu einer intelligenten, selbstorganisierenden Fahrzeugproduktion bereiten. Nach Auffassung der Autoren kann diese flexibel auf stark schwankende Systemlasten reagieren und zugleich einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten.

3.6.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale und horizontale Integration, ein durchgängig digitales Engineering, eine dezentrale Steuerung und Intelligenz sowie das cyber-physische Produktionssystem adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung sowie die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden Anlagenengineering und der Schaffung eines digitalen Abbildes als Entscheidungsgrundlage für die Produktionsprogrammplanung die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ beschrieben. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die Wandlungsfähigkeit der modularisierten Produktionsanlagen adressiert, um auf beliebig schwankende Märkte durch flexibel veränderbare Auftragsreihenfolgen reagieren zu können. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die Entwicklung einer kommunikationsorientierten Middleware und die damit verbundene Verknüpfung der verschiedenen Ebenen des Produktionssystems u. a. mit smarter Sensorik und Aktorik angesprochen.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* in Form von Produkten thematisiert, die eine digitale Repräsentanz (Verwaltungsschale) besitzen. Damit können sie z. B. ihre Fertigung, Bearbeitung und

Montage selbstständig dezentral steuern, indem diese ihren eigenen optimalen Weg durch den Produktionsfluss finden.

3.6.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden keine sicherheitstechnischen Aspekte betrachtet bzw. diskutiert.

Aufgrund der hohen Kommunikativität der Maschinen-/Anlagenkomponenten untereinander sowie der Integration des Menschen in den Fertigungsprozess sollten sowohl Maßnahmen zur Erreichung der funktionalen Sicherheit (Safety) als auch der Angriffssicherheit (Security) betrachtet werden.

Zusätzlich kommen durch die konzeptuell angestrebten und in Demonstratoren umgesetzten rekombinierenden Fertigungs- und Logistiksysteme die heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit stark an ihre Grenzen bzw. erzwingen fest zu definierende Kombinationen von Anlagenteilen während der Anlagenplanung. Dies würde den im *Use Case* beschriebenen dezentralen Lösungsansatz auf Basis von wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen ad absurdum führen.

3.7 Use Case 7: Ressourceneffizientes Engineering für die Industrie von morgen – Modulares skalierbares Steuerungskonzept zum Einsatz im dezentralen Wasser- und Abwasserbereich

3.7.1 Steckbrief

- Branche: Verfahrenstechnik, dezentrale Abwasseraufbereitung
- Entwicklungsstadium: Marktreife / produktiver Einsatz in Vorbereitung
- Literaturquelle: Schäfer, Kopp und Schöttke (2015)

3.7.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Schäfer, Kopp und Schöttke 2015*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Im Beitrag weisen die Autoren darauf hin, dass eine Abwasseraufbereitung innerhalb von Ballungsräumen mit den heutigen etablierten Möglichkeiten der zentralen Anla-

gentechnik problematisch ist. Dies betrifft vor allem den Platzbedarf und eine negative Beeinflussung des Ortsbildes sowie die Bildung von unangenehmen Gerüchen in der näheren Umgebung. Sie stellen fest, dass mit dem stetigen Wachstum urbaner Räume bestehende zentrale Infrastrukturen zunehmend an ihre Grenzen der Verfügbarkeit und der Erweiterbarkeit stoßen. Dem entgegen bieten dezentrale Anlagen individuelle Lösungen und ermöglichen eine effizientere Nutzung von Ressourcen.

Laut Auffassung der Autoren können vernetzte dezentrale Systeme verschiedenster Art in zukünftigen Smart Cities in der Lage sein, Anforderungen und Verfügbarkeiten untereinander auszutauschen und sich gegenseitig zu ergänzen. Daher baut der im *Use Case* dargestellte technologische Ansatz der Firma *ecoglobe GmbH* verfahrenstechnisch auf der bewährten Bodenfilter-Technologie auf, stellt diese jedoch in einer neuartigen modularen Bauform zur Verfügung. Standardisierte Filtermodule werden über ein Stecksystem vor Ort zu baulichen Einheiten zusammengesetzt und mit dem Filtermaterial befüllt.

Da die zusammengesetzten Filtermodule eine Tragfähigkeit und Wasserdichtigkeit besitzen, die einen dauerhaften Erdeinbau zulassen, kann durch den Erdeinbau das gewohnte Landschaftsbild erhalten werden. Weiterhin sehen die Autoren den Vorteil, dass keine Verdunstungsverluste oder Gerüche entstehen, wie es bei oberirdischen Anlagen der Fall wäre.

Es wird festgestellt, dass mit dezentralen Wasseraufbereitungsanlagen in unmittelbarer Nähe zu den Erzeugern von Abwasser (z. B. Wohnhäuser, Hausgruppen, Hotels und Gaststätten) die wertvolle Ressource Wasser bereits effizient und wirtschaftlich behandelt wird. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass für deren Integration in die Umgebung von Smart Cities systemübergreifend die Anlagen- und Funktionssicherheit zu berücksichtigen ist. Im *Use Case* werden daher für so eine Anlage die erforderlichen sicherheitstechnischen Anforderungen und die notwendige Steuerungsstrategie erarbeitet.

Im Beitrag wird festgestellt, dass nach dem Einschalten und vor dem Ausschalten der Anlage diese zunächst in einen sicheren Ruhezustand versetzt werden muss. Laut Autoren besteht sonst die Gefahr eines unkontrollierbaren Anlagenverhaltens bis hin zur Zerstörung der Anlagensteuerung und der Aktorik und Sensorik der Anlage, wenn diese im laufenden Betrieb ohne eine Rückführung in den Ruhezustand abgeschaltet würde.

Als Herausforderung sehen die Autoren, dass bei einer in die Erde eingebauten Anlage ein direkter Zugang zur Steuerungstechnik und zum Filtersystem selbst nur bedingt möglich ist. Um Wartungsarbeiten durchzuführen oder das Betriebsverhalten anzupassen, muss daher ein Zugang zur Anlagensoftware auch an schwer zugänglichen Standorten gewährleistet werden. Die gleiche Anforderung ergibt sich für die Autoren für einen direkten Austausch von Prozessdaten und Anlagenzuständen zwischen sich ergänzenden Anlagen innerhalb eines vernetzten urbanen Gebiets. Daher müssen zur Überprüfung und Beeinflussung des Prozessverhaltens und für die Gewährleistung der Anlagensicherheit prozess- und sicherheitsrelevante Messwerte von der Anlage an Benutzer oder andere Geräte bzw. Anlagen übertragen werden können. Sowohl im normalen Betrieb als auch im Fehlerfall werden daher Daten in einem definierten Format von der Anlage abgesetzt bzw. über einen Kommunikationszugangspunkt von dieser abgeholt.

Im Beitrag wird gezeigt, dass neben der zyklischen Übertragung von Statusmeldungen und Prozessdaten Fehlermeldungen sofort nach dem Auftreten von Fehlern an Benutzer, Administratoren oder andere Geräte bzw. Anlagen übertragen werden. Tritt ein Fehler an der Anlage im laufenden Betrieb auf, reagiert die Steuerung mit entsprechenden sicherheitsgerichteten Maßnahmen.

Als weitere Anforderung sehen die Autoren, dass eine dezentrale Anlage in Smart Cities sowohl wartungsarm als auch wartungsfreundlich sein muss. Einerseits ist eine häufige Wartung unter Umständen aufgrund mangelnder Erreichbarkeit der Anlage unmöglich. Andererseits steigern häufige Wartungsarbeiten die Kosten für eine Anlage, was wiederum zu einer sinkenden Effizienz führt.

Die Autoren stellen fest, dass für die Entwicklung einer systemunabhängigen Strategie zur Steuerung von Wasseraufbereitungsprozessen sowohl erlaubte als auch nicht erlaubte Betriebszustände betrachtet werden müssen. Besonders zur Bewertung der funktionalen Sicherheit sind daher die nicht erlaubten Betriebszustände zu untersuchen. Diese umfassen in diesem *Use Case* u. a. die Ansteuerung einzelner Systemkomponenten im Handbetrieb für Administratoren. Weiterhin werden im Beitrag die verschiedenen Betriebszustände als auch der Wechsel zwischen diesen (einschließlich der Transitionsbedingungen) sowie die sicherheitstechnischen Implikationen beschrieben.

Aufgrund ihrer Risikobetrachtung haben die Autoren festgelegt, dass die Ansteuerung einzelner Aktoren (z. B. Hähne, Ventile oder Pumpen) normalen *Benutzern* nicht gestattet ist. Das Risiko, ein falsches Systemverhalten (z. B. Überdruck, Wasser im Pneumatikkreislauf) auszulösen, wäre zu hoch. Mit einem separaten Zugang zum Handbetrieb für *Administratoren* wird ein Zugriff auf einzelne Aktoren ermöglicht, um im Fehlerfall leichter Diagnosen stellen zu können. Zum Schutz vor Schäden an der Anlage sehen die Autoren vor, dass auch im Handbetrieb für Administratoren eine Überwachung kritischer Prozessparameter durch die Sensoren und eine Anpassung des Prozesses im Fehlerfall stattfindet.

Im *Use Case* werden weiterhin die Kommunikationsschnittstellen für den Aufbau von Datenverbindungen zum Benutzer bzw. zu anderen Anlagen beschrieben. Beispielsweise befindet sich neben einem fest eingebauten Ethernetanschluss in der Anlage ein WLAN-Access-Point, der eine Kommunikation mit mobilen Endgeräten in der Nähe der Anlage ermöglicht. Mit Hilfe dieser Schnittstelle soll es berechtigten Benutzern ermöglicht werden, kabellos Meldungen und Anlagendaten zur späteren Bearbeitung abzuholen und Steuerbefehle zu übertragen.

Weiterhin erhält der Benutzer mit der Bedieneinheit Zugang zum Anlagenhauptschalter, dem Not-Aus-Befehlsgerät sowie den LEDs für die Anzeige der Betriebszustände. Die Bedieneinheit wird im Technikschacht befestigt und kann zur Bedienung herausgeführt werden, wodurch die Autoren aus Sicherheitsgründen einen Einstieg in den Technikschacht vermeiden wollen.

Mit dem modularen Aufbau des Filtersystems wollen die Autoren zeigen, dass dieser eine Vorlage für die Entwicklung eines skalierbaren Steuerungsaufbaus und einer modularen Regel- und Steuerungsstrategie bilden kann. Zur Anpassung der Anlagengröße kann auf der Prozessebene der Filterung eine Veränderung der Modulanzahl vorgenommen werden. Es ist vorgesehen, dass je nach Anzahl zu regelnder

Filtervorgänge die notwendigen Steuerungskomponenten modulweise hinzugefügt werden können. Weiterhin kann auf Softwareebene die Anlagengröße neben der Veränderung der Steuerungssoftware auch durch den Benutzer angepasst werden.

Im Beitrag wird gezeigt, dass im Zuge der Prozessüberwachung das Anlagenverhalten analysiert und die gewonnenen Daten zur Optimierung verwendet werden. Gleichermaßen wurden im *Use Case* mögliche Fehler bei einem Filtervorgang und Störungen am Technikmodul im Vorfeld betrachtet und ein Sicherheitskonzept für ein kontrolliertes Verhalten im Fehlerfall entwickelt. Im Störfall einzelner Steuerungskomponenten sehen die Autoren Sicherheitsmaßnahmen vor: unter anderem sind dies ein übergreifendes Störmeldekonzept und eine Rückfallebene zum sicheren Herunterfahren der Anlage.

In Bezug auf Benutzer- und Maschinenschnittstellen bietet die im *Use Case* betrachtete Beispielanlage mit ihrer Fernzugriffs- und Vernetzungstechnik eine effiziente Lösung für die Datenübertragung und Kommunikation mit anderen Anlagen und deren Verwaltung. Der modulare Ansatz der hier vorgestellten Anlage schafft nach Auffassung der Autoren eine Möglichkeit, auf viele verschiedene Anwendungsszenarien und sich ändernde Anforderungen in Bezug auf den Anlagenumfang zu reagieren.

3.7.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale und horizontale Integration sowie eine dezentrale Steuerung und Intelligenz sowie cyber-physische Systeme adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung, die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit der Wartung und Instandhaltung der Anlage die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ beschrieben. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die Skalierbarkeit der einzelnen modularisierten Anlage sowie der dezentralen Vernetzbarkeit mehrerer Anlagen zu Anlagenverbünden adressiert. Dadurch können im Kontext von Smart Cities Anforderungen und Verfügbarkeiten zur gegenseitigen Ergänzung ausgetauscht werden. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch die Entwicklung einer dezentralen Anlagensteuerung angesprochen, die sowohl mit unterlagerter Sensorik und Aktorik kommuniziert als auch Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Prozessbeobachtung und -bedienung zur Verfügung stellt.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem Use Case nicht näher thematisiert.

3.7.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden sicherheitstechnische Aspekte ausschließlich hinsichtlich der funktionalen Anlagensicherheit betrachtet.

Beispielsweise werden zur Bewertung der funktionalen Sicherheit die nicht erlaubten Betriebszustände untersucht und die sicherheitsgerichteten Reaktionen der Anlage mit ihren Rückfallebenen beschrieben. Auch ein Benutzerkonzept mit verschiedenen zustandsabhängigen Berechtigungsstufen wird erarbeitet. Offen bleibt jedoch, mit welchen Methoden diese aus Security-Sicht abgesichert sind bzgl. der Authentifizierung und der Autorisierung (z. B. per Passwort, Schlüsselschalter, 2-Faktor-Authentifizierung). Eine mangelhafte Umsetzung hätte direkte Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit der gesamten Anlage oder im schlimmsten Fall des dezentral vernetzten Anlagenverbundes.

Die Anlage bietet eine hohe Kommunikativität mit den Bedienern vor Ort über funkbasierte Kommunikation (WLAN) auf mobile Endgeräte, um Prozessgrößen und Betriebszustände beobachten zu können. Darüber hinaus existiert die Möglichkeit, Betriebszustände der Anlage über diese direkt steuern zu können. Besonders für diese Steuerfunktionen sollten die Auswirkungen mangelhafter Security-Maßnahmen auf die funktionale Sicherheit (Safety) eingehend untersucht werden. Die für dieses System und seinen gedachten Einsatz angemessenen Security-Maßnahmen stehen heute weitestgehend zur Verfügung.

Da im *Use Case* keine zur Laufzeit veränderlichen (rekombinierenden) Anlagen angesprochen werden, sollten die heute verfügbaren Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit sowie der Angriffssicherheit anwendbar sein.

3.8 Use Case 8: Die langsame Revolution Industrie 4.0 – über die Möglichkeiten zur Vernetzung bestehender Produktions- und Betriebsmittel in KMUs

3.8.1 Steckbrief

- Branche: Werkzeugmaschinen, zerspanende Lohnfertigung
- Entwicklungsstadium: Marktreife / produktiver Einsatz
- Literaturquelle: Müller, Fraas und Brönstrup (2015)

3.8.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Müller, Fraas und Brönstrup 2015*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Im Beitrag stellen die Autoren fest, dass durch die umfassende Vernetzung von Alltags- und Produktionsgeräten (Internet of Things) auch in der Industrie völlig neue Möglichkeiten für die Organisation und Kontrolle von Unternehmenstätigkeiten und die Interaktion mit Mitarbeitern und Kunden entstehen. Allerdings sind sie der Auffassung, dass der potenzielle Mehrwert, den der Einsatz der im Kontext von Industrie 4.0 diskutierten Technologien mit sich bringen könnte, stark mit der Größe des Unternehmens korreliert. Sowohl dieser Umstand, als auch eine traditionsbedingte Hemmschwelle sorgen ihrer Meinung nach dafür, dass die Industrielle Revolution 4.0 in *kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMUs)* deutlich langsamer vonstattengeht als in Großunternehmen.

Die Firma *F&M Maschinenbau GbR* stellt daher im *Use Case* Ansätze vor, wie die Strukturen der Industrie 4.0 auch heute schon mit geringem finanziellen Einsatz in KMUs realisiert werden können. Dafür wurden Lösungen entwickelt, welche die Wertschöpfung im Bereich der Lohnzerspanung effizienter gestalten, einen nachhaltigeren Umgang mit den verwendeten Ressourcen ermöglichen und Störungen im Betriebsprozess vermeiden oder diese regeln sollen.

Dabei legen die Autoren den Schwerpunkt immer auf niedrige Bereitstellungs- und Betriebskosten sowie eine flexible Verwend- und Skalierbarkeit. Die im *Use Case* dargestellten Lösungen fokussieren auf die Bereiche Organisation, Automation und Controlling. Dabei geht es um Infrastruktur und Sensorik zur Erfassung der Daten und um Software zur Verarbeitung von Daten zur Ressourcenplanung, Überwachung von Prozessen und Vorhersage von Produktionsgrößen.

In der im *Use Case* beschriebenen Software werden beim Anlegen der zu fertigenden Bauteile Zeichnungen, Aufspannskizzen, 3D-Modelle und CNC-Programme hinterlegt. Die Software übernimmt die Verwaltung, Sicherung und Archivierung dieser Dateien. Dadurch soll ein einheitliches Dokumentenmanagement geschaffen werden, welches mögliche Redundanzen oder das aufwendige Suchen der für die Fertigung nötigen Daten vermeiden helfen soll.

Die im Beitrag beschriebene Software generiert weiterhin Laufzettel, Fertigungs- und Messprotokolle sowie Lieferscheine, welche sowohl intern als auch für den Kunden verwendet werden können. Die Autoren verfolgen das Ziel, eine durchgängige digitale Verwaltung und Bearbeitung aller Informationen eines Auftrages zu erreichen. Durch das ständige Erfassen der aktuellen Daten aus der Produktion kann der jeweilige Fertigungsfortschritt zu jedem Zeitpunkt verfolgt werden. Weiterhin erlaubt die Auftragsverwaltung, eine beeinflussbare Prioritätenliste der offenen Aufträge zu erstellen. Dadurch kann den Mitarbeitern in der Fertigung eine optimale Abarbeitungsreihenfolge vorgeschlagen werden. Die Autoren legen bei dem Konzept Wert darauf, dass die abschließende Entscheidung über die Bearbeitungsreihenfolge bei dem jeweiligen Mitarbeiter in der Produktion liegt.

Bestimmte Variablen einer effizienten Fertigung bei der Abarbeitung eines Auftrages können nach Auffassung der Autoren durch Software heute nur unzureichend erfasst werden (z. B. der aktuelle Rüstzustand der Maschinen). Der jeweilige Mitarbeiter kennt diese aber und kann dadurch die Rüstzeiten optimieren, indem er eine abweichende Reihenfolge der Abarbeitung festlegt (sog. Rückgabe von Selbstorganisationskompetenz). Bei der Entscheidung, in welchen Grenzen der Mitarbeiter die Reihenfolge selbst beeinflussen kann, unterstützt ihn die im *Use Case* beschriebene Software mit aufbereiteten Daten zu Lieferfristen und Auftragsprioritäten.

Die im Beitrag beschriebene Auftragsverwaltung ist die erste realisierte Komponente zur Generierung von vernetzten Daten. Diese können sowohl zur Ressourcenplanung ausgewertet, als auch nachläufig zur Berechnung und Anpassung von prädiktiven Modellen benutzt werden.

Die im *Use Case* beschriebenen notwendigen geringen Investitionen zur rudimentären Vernetzung von Fertigungsstationen können laut den Autoren für kleine oder mittlere Unternehmen bereits in kürzester Zeit rentabel werden, da Produktionsengpässe schneller erkannt werden, besseres Feedback an Kunden und Mitarbeiter gegeben werden kann und der Zeitaufwand zur Überwachung der Aufträge deutlich geringer wird. Auch die Optimierung des Materialflusses zu einer stärkeren Fokussierung auf eine Just-in-time-Produktion wird unterstützt.

Weiterhin wurde die Software mit einer industrietauglichen Mensch-Maschine-Schnittstelle ausgerüstet, die neben Touchscreens mit großen Schaltflächen auch eine berührungslose Interaktion mit einem speziellen Gestensensor unterstützt. Dieser ist laut der Autoren in der Lage, Hand- und Fingergesten exakt zu detektieren. Dadurch kann der Benutzer die Software benutzen, ohne dafür beispielsweise seine Hände reinigen oder Handschuhe ausziehen zu müssen.

Eine weitere im Beitrag beschriebene Komponente der Auftragsverwaltung stellt das Preiskalkulationsmodul dar. Basierend auf den gesammelten Daten zurückliegender Fertigungsprozesse werden hiermit Modelle berechnet, welche Produktionsgrößen und potenzielle Fehler für die Produktion eines Teils bereits im Vorhinein berechnen. Laut Autoren soll dies der Geschäftsleitung in Zukunft ermöglichen, automatische Angebote zu generieren. Für diese Funktion werden Techniken des maschinellen Lernens angewendet: die Erkennung von Mustern und Regelmäßigkeiten in Daten durch den Computer. Auch die automatische Anbindung an Webshops von Werkzeuglieferanten wurde ermöglicht, um die benötigten Ressourcen für einen Auftrag schon zum Zeitpunkt der Auftragsannahme zu bestellen.

Die gegenwärtige Arbeitsaufgabe der einzelnen Mitarbeiter ist durch die Software bekannt und kann visualisiert werden. Damit soll der Geschäftsleitung ermöglicht werden, eventuelle Schwachpunkte in Produktionsprozessen zu erkennen und entsprechend gegenzusteuern, z. B. wenn ein Fertigungsschritt (z. B. das Rüsten) an einer Maschine signifikant länger dauert als an allen anderen. Gleichwertige Maschinen vorausgesetzt, könnte dies auf einen Fehler in der Bedienung oder einen Schaden der Maschine hinweisen – so die Idee der Autoren. Durch den Vergleich großer Datenmengen könnten bereits kleinste Abweichungen erkannt und behoben werden.

3.8.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale und horizontale Integration der gesamten Fabrikautomation, eine durchgängige Datenerfassung und Datenhaltung über den Produktfertigungszyklus, dezentrale Intelligenz durch maschinelles Lernen (Mustererkennung in großen Produktionsdatensätzen) sowie ein durchgängiges digitales Engineering adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung, die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird mit dem durchgehenden digitalen Engineering durch ein einheitliches Dokumentenmanagement und der ständigen Verfolgbarkeit der jeweiligen Fertigungsfortschritte durch Laufzettel, Fertigungs- und Messprotokolle sowie Lieferscheine die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ beschrieben. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die Ressourcenplanung auf Basis aktueller Prozessdaten adressiert. Damit lässt sich der Fertigungsprozess effektiv organisieren, automatisieren sowie Fertigungsfortschritte einzelner Aufträge verfolgen und steuern. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch den Aufbau einer Infrastruktur mit entsprechender Sensorik zur Erfassung der aktuellen Fertigungsdaten sowie Software zur Verarbeitung der Daten zur Ressourcenplanung angesprochen.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* thematisiert, indem den zu fertigenden Bauteilen fertigungsorientierte Metadaten (z. B. Zeichnungen, Aufspannskizzen, 3D-Modelle und CNC-Programme) in der Verwaltungsschale zugeordnet und im gesamten Fertigungsprozess mitgeführt werden.

3.8.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Im *Use Case* werden keine sicherheitstechnischen Aspekte betrachtet bzw. diskutiert.

Die im *Use Case* beschriebene Software greift nicht direkt in die Maschinensteuerung ein – sie schlägt dem Maschinenbediener lediglich eine Abarbeitungsreihenfolge für die anstehenden Aufträge mit Hilfe von Methoden des maschinellen Lernens vor. Die letztliche Entscheidungskompetenz bleibt beim Mitarbeiter. Daher haben

evtl. vorhandene Mängel in der Angriffssicherheit der Daten- und Kommunikationsschnittstellen keine direkte Auswirkungen auf die funktionale Maschinensicherheit.

Allerdings können Security-Mängel zur Kompromittierung des Daten- und Know-how-Schutzes führen und negative Konsequenzen für das Unternehmen haben. Falls, wie im Beitrag angedeutet, die gesammelten Produktionsdaten zur Leistungsbewertung der eigenen Mitarbeiter herangezogen werden sollen, können sich daraus Konflikte mit dem Datenschutzrecht sowie dem Arbeitsrecht ergeben.

3.9 Use Case 9: Die Methodik für zustandsbasierte Restlebensdauerprognostik

3.9.1 Steckbrief

- Branche: Vorbeugende Instandhaltung von Maschinen und Anlagen, Restlebensdauerprognostik
- Entwicklungsstadium: Marktreife / produktiver Einsatz
- Literaturquelle: Plate (2015)

3.9.2 Technologische Darstellung des Use Cases

In diesem Abschnitt wird der in (Plate 2015*) dargestellte Anwendungsfall (Use Case) überblicksartig zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit werden die übernommenen Gedanken nicht einzeln mit einem Fundnachweis versehen, da sie aus einer einzigen Literaturquelle stammen.*

Im Beitrag stellt der Autor zu Beginn fest, dass vor allem im Industrie-4.0-Umfeld Prognosen von immer größerem Wert sind, da heute übliche Datenanalysen hauptsächlich retrospektiv funktionieren. Daher setzt die im *Use Case* vorgestellte Software der Firma *Cassantec* auf einer neuartigen Kombination mathematischer Methoden auf, um Zustandsentwicklungen, Risikoprofile von Funktionsstörungen und Ausfällen sowie die Restlebensdauer rotierender und nicht rotierender Maschinen zu ermitteln. Bei diesen Methoden handelt es sich um eine Zusammenführung von *Markov-Ketten* und *Bayes'schen Netzen* und damit um Methoden aus dem Bereich des maschinellen Lernens. Als großen Vorteil sieht der Autor, dass im Gegensatz zu anderen Lösungen eine physikalisch exakte Modellierung der Anlage keine notwendige Voraussetzung ist und damit entfallen kann.

Es wird weiter ausgeführt, dass die Resultate der stochastischen Kalkulationen in einem entscheidungsbezogenen Format präsentiert werden. Diese sollen dem Betreiber helfen, seine notwendigen Instandhaltungsstrategien für seine Maschinen und Anlagen zu optimieren. Die Berichte können vom Anlagenbetreiber über ein gesichertes Onlineportal abgerufen werden. Aktualisierungen der Prognosen erfolgen z. B. über eine Cloud-Anbindung der Maschine oder Anlage und einen automatisierten Abruf von Prozessdaten.

Im Beitrag wird erklärt, dass für die Berechnungen Zustandsentwicklungen und Prozessdaten einbezogen werden. So kann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von speziellen (kritischen) Funktionsstörungen im nächsten Monat

prognostiziert werden. Der Betreiber kann dank dieser Daten und des präzise vorhergesagten Zeitfensters fundierte Entscheidungen bezüglich seiner Instandhaltungs- und Betriebsstrategien treffen.

Die im *Use Case* beschriebenen Methoden fallen im Kontext von Industrie 4.0 in das Themenfeld *Predictive Maintenance*. Laut Autor ist der neueste Ansatz in diesem Feld die *Prognostik*, die unter Einsatz moderner stochastischer Methoden den aktuellen und zukünftigen Zustand einer Maschine abbildet. Prognostik bezeichnet eine Technologie zur Datenanalyse, mit der Voraussagen über den zukünftigen Zustand von Maschinen erstellt werden. Prognostik steht also für eine objektive und datenbasierte Vorhersage von zukünftigen Zuständen mit explizitem Zeitbezug. Als besonders vorteilhaft sieht der Autor, dass Prognoseberichte Aufschluss über den zukünftigen Zustand von Anlagen bzw. Anlagenkomponenten für einen Zeitraum von meist Wochen oder Monaten, in besonderen Fällen auch Jahren, geben können.

Der Autor weist im Beitrag darauf hin, dass die Prognostik nicht mit der sogenannten vorausschauenden Diagnostik (oder *Predictive Diagnostics* bzw. *Predictive Analytics*) gleichzusetzen ist. Im Gegensatz zu dieser berechnet die Prognostik nicht nur, ab wann mit einer Fehlfunktion zu rechnen ist, sondern auch, wann in der Zukunft sich das Zeitfenster wieder schließen wird, in dem Gegenmaßnahmen ergriffen werden können – wann also die letzte Chance ist, einen Maschinenausfall zu vermeiden.

Zusätzlich wurde ein Selbstlernmechanismus in das Programm eingebaut, welcher sprunghafte Veränderungen in den Daten, wie zum Beispiel nach einem Ölwechsel, selbstständig erkennen und verarbeiten soll. Das Resultat ist laut Autor ein explizites Risikoprofil, das die Wahrscheinlichkeit von Fehlfunktionen über die Zeit darstellt.

Um die Validität der vorgestellten Prognosetechnologie zu überprüfen, hat der Betreiber eines 1600-MW-Kohlekraftwerks eine retrospektive Analyse mit der im *Use Case* vorgestellten Software initiiert. Laut Autor stellte sich dabei heraus, dass alle Störungen der letzten sechs Jahre mit einem Prognosehorizont von bis zu mehreren Jahren hätten vorhergesagt werden können. Diese Störungen waren vom Betreiber trotz bereits installierter Monitoring- und Diagnosetools nicht erkannt worden.

Der Autor hebt im Beitrag hervor, dass die Prognosen für jede Maschine individuell berechnet werden und nicht auf Durchschnittswerten von anderen Maschinen oder auf Herstellerangaben basieren. Außerdem lässt sich anhand der Prognoseberichte und der Datenaufbereitung transparent und objektiv die Auswirkung verschiedener Betriebsszenarien auf die *Restlebensdauer (RLD)* von Maschinen und deren Komponenten erkennen. Als Vorteil sieht der Autor, dass auf Basis der Prognosen ggf. die Betriebsparameter einer Anlage derart angepasst werden können, um die RLD signifikant zu erhöhen.

Prognostik kann laut Autor in einer Vielzahl von Industrien und Maschinen eingesetzt werden – die einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein einer Datenhistorie. Der mögliche Prognosehorizont hängt dabei von der Vollständigkeit und Länge der Datenhistorie ab. Generell gilt, je länger und vollständiger die Daten, desto länger der zuverlässige Prognosehorizont.

Im Beitrag wird eine Szenario-Analyse eines Generatorenlagers in einem Wasserkraftwerk beschrieben. Im Rahmen dieser wurde die Abhängigkeit der im Lager ge-

messenen Schwingungswerte von der Betriebsleistung ermittelt. So konnte eine neue Betriebsweise für den Generator gefunden werden. Diese hatte deutlich positive Auswirkungen auf die Lebensdauer des Generators, den Wartungsbedarf und seine Zuverlässigkeit. Basierend auf den Ergebnissen, die mit der Prognoselösung erzielt wurden, hat der Betreiber des Wasserkraftwerkes (ein großer europäischer Energieversorger) wertvolle Erkenntnisse über die Beziehung zwischen Betriebsstrategie und der Restlebensdauer des Generators erhalten. Dies geht laut Autor weit über die Informationen hinaus, die vorher mit herkömmlicher Zustandsüberwachung und Diagnose erhoben werden konnten.

3.9.3 Grad der technologischen Durchdringung bezogen auf die I4.0-Konzepte

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, welche Teilkonzepte (Paradigmen) des Industrie 4.0-Gesamtkonzeptes unter Verwendung welcher technologischen Komponenten umgesetzt wurden.

Bezogen auf die Industrie 4.0-Paradigmen werden in diesem *Use Case* die vertikale und horizontale Integration, ein durchgängiges digitales Engineering sowie die Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus adressiert.

Als technologische Basiskomponenten werden die dezentrale Datenerfassung, -speicherung und -verarbeitung, die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (M2M) sowie die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) eingesetzt.

Hinsichtlich RAMI 4.0 wird durch neue stochastische Softwaremethoden aus dem Themenfeld *Predictive Maintenance* zur Bestimmung der Restlebensdauer (RLD) von Maschinen und deren Komponenten sowie Methoden zur Ermittlung geeigneter Betriebsparameter zur Verlängerung der RLD die horizontale Achse „Life Cycle & Value Stream“ thematisiert. Die vertikale Achse „Layers“ wird durch die neue Möglichkeit adressiert, dass Betreiber dank der gewonnenen Daten und des präzise vorhergesagten Zeitfensters fundierte Entscheidungen bzgl. der Instandhaltungs- und Betriebsstrategien ihrer Anlage treffen können. Die dritte Achse „Hierarchy Levels“ wird durch das Zurverfügungstellen der Prognoseberichte in einem Onlineportal, der Cloud-Anbindung der Maschine oder Anlage sowie einem automatisierten Abruf von Prozessdaten angesprochen.

Die Industrie 4.0-Komponente als mikroskopische Sicht auf RAMI 4.0 wird in diesem *Use Case* indirekt thematisiert, indem für Anlagen bzw. Anlagenkomponenten permanent Prozessdaten erfasst, analysiert sowie in Form von Prognostikdaten in der Verwaltungsschale der jeweiligen I4.0-Komponente mitgeführt werden. Damit lassen sich objektive und datenbasierte Vorhersagen von zukünftigen Zuständen dieser Komponenten mit explizitem Zeitbezug ableiten.

3.9.4 Ableitung der sicherheitstechnischen Anforderungen bezogen auf diesen Use Case

In diesem Abschnitt wird der Use Case dahin gehend bewertet, ob in ihm (gemäß Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte betrachtet bzw. berücksichtigt wurden. Darüber hinaus soll auf die Fragen eingegangen werden, welche Anforderungen über die Darstellung der Literaturquelle hinausgehend betrachtet

werden müssten und ob diese Anforderungen mit den heutigen Methoden der Sicherheitstechnik erfüllt werden können.

Die im *Use Case* vorgestellte Software dient der Prognose von kritischen Maschinen- und Anlagenzuständen durch frühzeitiges und unerwartetes Versagen von Bauteilen. Damit lassen sich laut dem Autor finanzielle Verluste für den Betreiber durch ungeplante Anlagenstillstände vermeiden. Einen Zusammenhang mit möglicherweise vermeidbaren Personenschäden durch Zerstörung von großen Anlagen (z. B. Kraftwerksturbinen und Generatoren) aufgrund von unerwartetem Bauteilversagen und dem damit verbundenen Freisetzen hoher kinetischer Energien (große Massen mit hohen Rotationsgeschwindigkeiten im System) stellt der Autor überraschenderweise nicht her. Die Aspekte der funktionalen Sicherheit (Safety) werden daher nur indirekt adressiert.

Weiterhin beschreibt der Autor, dass die Prognoseberichte in einem gesicherten Onlineportal dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt werden. Diese Security-Absicherung bezieht er ausschließlich auf die Wahrung des Know-how-Schutzes beider Geschäftspartner. Weiterhin stellt er als besonderen Nutzen der Software dar, dass mit ihr die Auswirkungen verschiedener Betriebsszenarien auf die Restlebensdauer von Bauteilen simuliert werden können. Durch gezielte Anpassung von Betriebsparametern kann der Betreiber Einfluss auf die Gesamtlebensdauer seiner Anlagen nehmen.

Dadurch, dass die Prognosealgorithmen einerseits mathematisch hochkomplex sind und andererseits dem Know-how-Schutz des Softwareherstellers unterliegen, sind die Prognoseergebnisse für den Betreiber nicht transparent und nachvollziehbar – er muss den Ergebnissen weitgehend blind vertrauen. Diesen Zusammenhang könnte sich ein Angreifer zunutze machen, indem er in das Onlineportal eindringt oder die Kommunikationsverbindung zu diesem kompromittiert. Er könnte die Prognoseberichte derart verfälschen, dass er dem Betreiber neue Betriebsparameter vorgibt, die die Lebensdauer seiner Anlage angeblich erhöht – stattdessen werden sie zu einem vorzeitigen und für den Betreiber zeitlich absolut unerwarteten früheren Ausfall führen (wahrscheinlich einhergehend mit Sach- und Personenschäden).

Die für dieses Softwaresystem und seinen gedachten Einsatz anzuwendenden Methoden zur Analyse und Bewertung der Angriffssicherheit, zur Abschätzung von negativen Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit der betrachteten Maschine oder Anlage sowie die Security-Maßnahmen für die angemessene Absicherung des Onlineportals und der Kommunikationsverbindungen stehen heute weitestgehend zur Verfügung.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen der Literaturrecherche wurden insgesamt neun Anwendungsszenarien (*Use Cases*) ausgewählt, um den aktuellen Stand der Technologieentwicklung im Kontext von Industrie 4.0 für ausgewählte Industriebereiche darzustellen. Dazu wurden zunächst die Konzepte, Grundlagen und Zusammenhänge von Industrie 4.0, die technologischen Basiskomponenten sowie die erforderlichen Referenzarchitekturen vorgestellt.

Die der aktuellen Literatur entnommenen Anwendungsszenarien wurden danach inhaltlich zusammengefasst und in die beschriebenen Industrie 4.0-Konzepte eingeordnet hinsichtlich der in ihnen adressierten Paradigmen und der angewandten Basiskomponenten. Dabei konzentrierte sich die Studie insbesondere auf Anwendungsszenarien aus den Bereichen der Fertigungs- und Produktionstechnik im Maschinen- und Anlagenbau. Darüber hinaus wurden die Szenarien an den drei Dimensionen der Referenzarchitektur RAMI 4.0 als *makroskopische Sicht* gespiegelt sowie die besprochenen Aspekte hinsichtlich der Industrie 4.0-Komponente als die *mikroskopische Sicht* herausgearbeitet.

Dabei wurde deutlich, dass sich alle Anwendungsszenarien sowohl in die Industrie 4.0-Konzepte als auch in die Referenzarchitektur RAMI 4.0 als theoretische Idealvorstellung von Industrie 4.0 sehr gut einordnen lassen. Es ist zu verzeichnen, dass die betrachteten Anwendungsszenarien verschiedene Facetten mit unterschiedlicher Wichtung adressieren. Keines der Anwendungsszenarien beleuchtet alle Aspekte der Industrie 4.0-Konzepte in gleichem Maße.

Abschließend wurden die Anwendungsszenarien dahin gehend bewertet, ob in ihnen (laut Literaturquelle) grundsätzlich sicherheitstechnische Aspekte der funktionalen Sicherheit (Safety), der industriellen Angriffssicherheit (Security) sowie deren Wechselwirkungen untereinander betrachtet bzw. berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang wurde auf die Frage eingegangen, welche sicherheitstechnischen Anforderungen über die Darstellung in der Literaturquelle hinausgehend von Bedeutung sind. Abschließend wurde eine fachliche Einschätzung dahin gehend gegeben, ob die z. T. neuen sicherheitstechnischen Anforderungen an derartige Systeme, Anlagen oder Maschinen mit den heutigen Mitteln des technischen Arbeitsschutzes erfüllt werden können bzw. inwieweit Methoden der Sicherheitstechnik zur Verfügung stehen.

Bei dieser sicherheitstechnischen Bewertung hat sich gezeigt, dass nur einige Anwendungsszenarien die Aspekte der funktionalen Sicherheit (*Use Case* 2: sehr knapp; *Use Case* 3 und 5: an mehreren Stellen; *Use Case* 7: sehr ausführlich) erfasst haben. Jedoch betrachtete keines der untersuchten Anwendungsszenarien inhaltlich die industrielle Angriffssicherheit. Ebenfalls wird in keinem der betrachteten Anwendungsszenarien ein Zusammenhang zwischen funktionaler Sicherheit (Safety) und industrieller Angriffssicherheit (Security) hergestellt bzw. mögliche Wechselwirkungen zwischen beiden Sicherheitsaspekten untersucht. Auch werden keine Risikoanalysen und -bewertungen durchgeführt oder Maßnahmen zur Risikominderung zumindest exemplarisch aufgezeigt.

Es zeigte sich jedoch, dass in allen Anwendungsszenarien die sicherheitstechnischen Aspekte von *Safety* und S*ecurity* eine wichtige Rolle spielen.

Durch die in den meisten Anwendungsszenarien (vgl. *Use Cases* 1, 2, 3, 5, 6 und 9) zentral thematisierte Wandlungsfähigkeit von Fertigungsanlagen durch auftragsbezogene Rekombination von Fertigungsmodulen oder dynamisch lernfähige und damit zur Laufzeit der Maschine bzw. Anlage veränderliche Systeme kommen die heute verfügbaren und hierfür einzusetzenden Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit stark an ihre Grenzen. Solche Systeme bzw. Szenarien werden von den aktuellen Sicherheitsnormen nicht erfasst, da der Standard davon ausgeht, dass ein System vor seiner sicherheitstechnischen Abnahme und Zulassung vollständig entwickelt und konfiguriert ist (vgl. insbesondere DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02). Diese Anwendungsszenarien sind mit den heutigen Methoden zur Analyse und Bewertung der funktionalen Sicherheit nur mit erheblichen Einschränkungen hinsichtlich der Dynamik, Variabilität, Wandelbarkeit und Lernfähigkeit der Maschinen bzw. der verfahrenstechnischen Anlagen validierbar (vgl. Abschnitt 2.5.4). Die Sicherheitsnachweisführung für diese Anwendungsszenarien ist auf Basis heutiger Sicherheitsnormen und Richtlinien nur für fest zu definierende Kombinationen von Maschinen- und Anlagenteilen während der Planungsphase und vor der sicherheitstechnischen Abnahme möglich. Dies würde die in den Anwendungsszenarien beschriebenen dezentralen Lösungsansätze auf Basis von zur Laufzeit wandlungsfähigen Produktions- und Materialflussstrukturen ad absurdum führen.

Die Aspekte der Angriffssicherheit sowie mögliche Security-Maßnahmen wurden in den Anwendungsszenarien in der Regel nicht adressiert. Aufgrund der beschriebenen hohen Kommunikativität der Maschinen- und Anlagenkomponenten untereinander sowie der Integration des Menschen in den Fertigungsprozess sind bei mangelhafter Angriffssicherheit (Security) negative Auswirkungen auf die funktionale Sicherheit (Safety) zu erwarten.

Die dargestellten Ergebnisse der in den Anwendungsszenarien zitierten Veröffentlichungen erlaubten keine detaillierten Aussagen zur Sicherheitsnachweisführung, insbesondere nicht im Zusammenhang mit offenen Fragestellungen zu Industrie 4.0-Anwendungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die derzeitige Ausbaustufe der vorgestellten I4.0-Konzepte sich auf eine während der Planungsphase festgelegte und begrenzte Anzahl von Variationsmöglichkeiten beschränkt und somit eine sicherheitstechnische Abnahme auf Basis des normativen Standes der Technik ermöglicht wird.

Die sicherheitstechnische Bewertung von Industrie 4.0-Prozessen und -Systemen wirft daher zahlreiche offene Fragestellungen auf. Einerseits ist derzeit nicht geklärt, inwieweit die funktionale Sicherheit (Safety) aufgrund der Rekombination von Maschinen und Anlagen im Kontext von Industrie 4.0 gewährleistet werden kann. Andererseits muss untersucht werden, inwieweit die Wechselwirkungen von funktionaler Sicherheit (Safety) und industrieller Angriffssicherheit (Security) zu bewerten sind bzw. ob diese über heute verfügbare sicherheitstechnische Methoden erfasst werden und identifizierte Risiken mit angemessenen Maßnahmen reduziert werden können.

Literaturverzeichnis

Bauer, Wilhelm, Sebastian Schlund, Dirk Marrenbach und Oliver Ganschar. 2014. *Industrie 4.0 – Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland*. Bitkom und Fraunhofer IAO. https://www.bitkom.org/noindex/Publikationen/2014/Studien/Studie-Industrie-4-0-Volkswirtschaftliches-Potenzial-fuer-Deutschland/Studie-Industrie-40.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Bauernhansl, Thomas. 2014. Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 5–35. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_1, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_1 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Benra, Juliane T. und Wolfgang A. Halang. 2009. *Software-Entwicklung für Echtzeitsysteme*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-01596-0, https://www.springer.com/de/book/9783642015953
(Zugegriffen: 13. November 2018).

BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung. 2017. Industrie 4.0. https://www.bmbf.de/de/zukunftsprojekt-industrie-4-0-848.html
(Zugegriffen: 13. November 2018).

Bochmann, Lennart Sören, Lars Gehrke, Nils Gehrke, Christoph Mertens und Oliver Seiss. 2016. Innovative Konzepte einer sich selbstorganisierenden Fahrzeugmontage am Beispiel des Forschungsprojekts SMART FACE. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, 173–191. Springer Berlin Heidelberg, 8. Februar. doi:10.1007/978-3-662-48505-7_4, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48505-7_4
(Zugegriffen: 13. November 2018).

Brossardt, Bertram. 2014. *Dienstleistungspotenziale im Rahmen von Industrie 4.0*. Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft e. V. (VBW). www.forschungsnetzwerk.at/downloadpub/dienstleistungspotenziale-industrie-4.0-mar-2014.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Bubeck, Alexander, Matthias Gruhler, Ulrich Reiser und Florian Weißhardt. 2016. Vom fahrerlosen Transportsystem zur intelligenten mobilen Automatisierungsplattform. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*, hg. von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 85–97. Springer-Verlag GmbH, 25. November. doi:10.1007/978-3-662-53254-6_5, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53254-6_5
(Zugegriffen: 13. November 2018).

Büttner, Karl-Heinz und Ulrich Brück. 2016. Use Case Industrie 4.0-Fertigung im Siemens Elektronikwerk Amberg. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*, hg. von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 45–70. Springer-Verlag GmbH, 25. November. doi:10.1007/978-3-662-53254-6_3, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53254-6_3
(Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN 44300-1:1995-03. *Informationsverarbeitung – Begriffe – Teil 1: Allgemeine Begriffe; DIN 44300-1:1995-03 - Entwurf (zurückgezogen)*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm-entwurf/din-44300-1/2477821 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN EN 61508-3:2011-02, VDE 0803-3:2011-02. *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 3: Anforderungen an Software (IEC 61508-3:2010); Deutsche Fassung EN 61508-3:2010*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61508-3/135505701 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN EN 61508-4:2011-02, VDE 0803-4:2011-02. *Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme – Teil 4: Begriffe und Abkürzungen (IEC 61508-4:2010); Deutsche Fassung EN 61508-4:2010*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61508-4/135405992 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN EN 61800-5-2:2008-04, VDE 0160-105-2:2008-04. *Elektrische Leistungsantriebssysteme mit einstellbarer Drehzahl – Teil 5-2: Anforderungen an die Sicherheit – Funktionale Sicherheit (IEC 61800-5-2:2007); Deutsche Fassung EN 61800-5-2:2007*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-61800-5-2/105745905 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN EN ISO 13849-1:2016-06. *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2015*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-13849-1/230387878 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DIN IEC 60050-351:2014-09. *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch – Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013)*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/norm/din-iec-60050-351/208013542 (Zugegriffen: 19. Juni 2017).

DIN SPEC 91345:2016-04. *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128 (Zugegriffen: 13. November 2018).

DKE und VDE. 2015. *DKE Normungs-Roadmap – Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0, Version 2*. Normungs-Roadmap. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE. https://www.dke.de/de/std/Documents/NR_Industrie%204.0_V2_DE.pdf (Zugegriffen: 30. März 2017).

Dorst, Wolfgang. 2017. Was Industrie 4.0 (für uns) ist. Hg. von Bitkom e.V. https://www.bitkom.org/Themen/Digitale-Transformation-Branchen/Industrie-40/Was-ist-Industrie-40-2.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

Fallenbeck, Niels und Claudia Eckert. 2014. IT-Sicherheit und Cloud Computing. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 397–431. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_20, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-658-04682-8_20 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Gentner, Daniel und Marc Oßwald. 2017. *Industrie 4.0 und resultierende Anforderungen an das Produktmanagement: Theorie und Empirie*. Institut für Technologie- und Prozessmanagement (ITOP) der Universität Ulm. doi:10.18725/OPARU-4207, https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/4246/ITOP_Schriften_6.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Gorecky, Dominic, Mathias Schmitt und Matthias Loskyll. 2014. Mensch-Maschine-Interaktion im Industrie 4.0-Zeitalter. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 525–542. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_26, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_26 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Görz, Günther v., Josef Schneeberger und Ute Schmid. 2003. *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. Gruyter, de Oldenbourg. https://www.degruyter.com/view/product/230985 (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2013. *Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. Gruyter, de Oldenbourg. https://www.degruyter.com/view/product/228938 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Hahn, Thomas. 2016. Vom Referenzarchitekturmodell zum Testbed: Präsentation anlässlich Hannover Messe 2016 im Rahmen des „Forum Industrie 4.0“. Plattform Industrie 4.0, 28. April. https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/ppt-vom-referenzarchitekturmodell-zum-testbed.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

Halang, Wolfgang A. und Rudolf M. Konakovsky. 2013. *Sicherheitsgerichtete Echtzeitsysteme*. 2. Aufl. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-37298-8, https://www.springer.com/de/book/9783642372988 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Heidel, Roland, Michael Hoffmeister, Martin Hankel und Udo Döbrich. 2017. *Industrie 4.0 – Basiswissen RAMI4.0: Referenzarchitekturmodell mit Industrie4.0-Komponente*. Hg. von DIN Deutsches Institut für Normung e. V. VDE Verlag GmbH. https://www.vde-verlag.de/buecher/624247/basiswissen-rami4-0.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

Hofmann, Johann. 2016. *Die digitale Fabrik: Auf dem Weg zur digitalen Produktion – Industrie 4.0*. 1. Aufl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. https://www.beuth.de/de/publikation/digitale-fabrik/245262127 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Hoppe, Stefan. 2014. Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 325–341. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_16, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_16 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Huber, Walter. 2016a. Standortbestimmung. In: *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion*, 7–21. 1. Aufl. 2016. Springer Fachmedien Wiesbaden, 26. August. doi:10.1007/978-3-658-12732-9_2, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-12732-9_2 (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2016b. Standards. In: *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion*, 96–116. 1. Aufl. 2016. Springer Fachmedien Wiesbaden, 26. August. doi:10.1007/978-3-658-12732-9_5, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-12732-9_5 (Zugegriffen: 13. November 2018).

IEC PAS 63088:2017-03. *Smart Manufacturing – Reference Architecture Model Industry 4.0 (RAMI4.0)*. IEC International Electrotechnical Commission. https://webstore.iec.ch/publication/30082 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Jeschke, Sabina. 2015. *Kybernetik und die Intelligenz verteilter Systeme: Nordrhein-Westfalen auf dem Weg zum digitalen Industrieland*. In: *Exploring Cybernetics: Kybernetik im interdisziplinären Diskurs*, 277-370. Springer Fachmedien Wiesbaden, 05. Dezember. doi:10.1007/978-3-658-11755-9_14, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-11755-9_14 (Zugegriffen: 14. November 2018).

Kagermann, Henning, Wolfgang Wahlster und Johannes Helbig. 2012. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0 (Vorabversion)*. Promotorengruppe KOMMUNIKATION der Forschungsunion Wirtschaft und Wissenschaft. www.forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_umsetzungsempfehlungen.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2013. *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. www.forschungsunion.de/pdf/industrie_4_0_abschlussbericht.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Kasper, Björn. 2017a. Weiterentwicklung sicherheitstechnischer Analyse- und Bewertungsmethoden für die Industrie 4.0: Tagungsbeitrag anlässlich „20 Jahre IEC 61508“. VDE Verband Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 17. Februar. http://conference.vde.com/fs/2017/Vortragsfolien/Documents/Beitrag_Bj%C3%B6rn%20Kasper.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2017b. Weiterentwicklung sicherheitstechnischer Analyse- und Bewertungsmethoden für die Industrie 4.0: Vortrag anlässlich „20 Jahre IEC 61508“. VDE Verband Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 23. März. http://conference.vde.com/fs/2017/Vortragsfolien/Documents/Analyse-und%20Bewertungsmethoden%20f%C3%BCr%20die%20Industrie%204.0_B.%20Kasper.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Kirsch, Wilfried und Hartmut Pohl. 2017. Roboter Operating System (ROS): Safe & Insecure: Tagungsbeitrag anlässlich „Forum Safety & Security 2017“, München. Weka Fachmedien GmbH, 6. Juni.

Kunze, Sariana. 2015. Zuverlässig Funken bei Industrie 4.0. *Elektrotechnik Vogel* (5. August). https://www.elektrotechnik.vogel.de/zuverlaessig%2dfunken%2dbei%2dindustrie%2d40%2da%2d500049/ (Zugegriffen: 13. November 2018).

Leopold, Helmut. 2015. Sicherheit im elektronischen Universum: Neue Bedrohungspotenziale brauchen effektive Gegenstrategien und eine gemeinsame gesellschaftliche Anstrengung. Schriftliche Fassung des Vortrags im Rahmen des Workshops „Industrie 4.0“. Palais Epstein, Wien: AIT Austrian Institute of Technology GmbH; Institut für Technikfolgenabschätzung, 24. Juni. http://hw.oeaw.ac.at/0xc1aa5576_0x00328e6f.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Liggesmeyer, Peter und Mario Trapp. 2014. Safety: Herausforderungen und Lösungsansätze. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 433–450. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_21 (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2016. Safety in der Industrie 4.0: Herausforderungen und Lösungsansätze. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion*, 107–123. Springer-Verlag GmbH, 7. Dezember. doi:10.1007/978-3-662-45279-0_34, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-45279-0_34 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Mayer, Felix und Dorothea Pantförder. 2014. Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical-Production-Systems. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 481–491. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_23, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_23 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Müller, Martin, Philipp Fraas und Jonas Brönstrup. 2015. Die langsame Revolution Industrie 4.0 – über die Möglichkeiten zur Vernetzung bestehender Produktions- und Betriebsmittel in KMUs. In: *Industrie 4.0 – Grundlagen und Anwendungen. Tagungsband zum Branchentreffen der Berliner Wissenschaft und Industrie*, 83–93. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 11. Oktober. https://www.beuth.de/de/publikation/industrie-4-0-grundlagen-und-anwendungen/238866547 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Nusser, Sebastian. 2009. Robust learning in safety-related domains: machine learning methods for solving safety-related application problems. Dokument, Universität Magdeburg, Fakultät für Informatik, 10. Juli. http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201012104420 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Onnasch, Linda, Xenia Maier und Thomas Jürgensohn. 2016. *Mensch-Roboter-Interaktion – Eine Taxonomie für alle Anwendungsfälle*. Forschungsbericht. BAuA, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. doi:10.21934/baua:fokus20160630, https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Fokus/Mensch-Roboter-Interaktion.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

Plate, Moritz von. 2015. Die Methodik für zustandsbasierte Restlebensdauerprognostik. In: *Industrie 4.0 – Grundlagen und Anwendungen. Tagungsband zum Branchentreffen der Berliner Wissenschaft und Industrie*, 137–147. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 11. Oktober. https://www.beuth.de/de/publikation/industrie-4-0-grundlagen-und-anwendungen/238866547 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Plattform Industrie 4.0. 2017a. Was ist Industrie 4.0? Die vierte industrielle Revolution: Auf dem Weg zur intelligenten und flexiblen Produktion. https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2017b. Testzentren für Industrie 4.0: Einstiegshilfe für den Mittelstand. https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/In-der-Praxis/Testumgebungen/testumgebungen.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2017c. *industrie 4.0 gestalten: wegweisend. vernetzt. praxisnah. – Fortschrittsbericht*. Plattform Industrie 4.0. https://www.plattform-i40.de/I40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/i40-gestalten.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

Pötter, Thorsten, Jens Folmer und Birgit Vogel-Heuser. 2016. Enabling Industrie 4.0 – Chancen und Nutzen für die Prozessindustrie. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen*, hg. von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 71–83. Springer-Verlag GmbH, 25. November. doi:10.1007/978-3-662-53254-6_4, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53254-6_4 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Regtmeier, Jan und Timothy Kaufmann. 2016. MICA – Die modulare Embedded Plattform der Firma HARTING für Industrie 4.0. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, 163–172. Springer Berlin Heidelberg, 8. Februar. doi:10.1007/978-3-662-48505-7_4, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48505-7_4 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Roth, Armin. 2016. Industrie 4.0 – Hype oder Revolution? In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, 1–15. Springer Berlin Heidelberg, 8. Februar. doi:10.1007/978-3-662-48505-7_1, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48505-7_1 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Roth, Michael und Peter Liggesmeyer. 2013. Modeling and Analysis of Safety-Critical Cyber Physical Systems using State/Event Fault Trees. In: *SAFECOMP 2013 – Workshop DECS (ERCIM/EWICS Workshop on Dependable Embedded and Cyber-physical Systems) of the 32nd International Conference on Computer Safety, Reliability and Security, France (2013)*, hg. von Matthieu ROY, 11. Toulouse, France, 26. Juli. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00848640 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Schäfer, Stephan. 2015. Industrie 4.0 – Ein historischer Aus- und Rückblick. In: *Industrie 4.0 – Grundlagen und Anwendungen. Tagungsband zum Branchentreffen der Berliner Wissenschaft und Industrie*, 1–9. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 11. Oktober. https://www.beuth.de/de/publikation/industrie-4-0-grundlagen-und-anwendungen/238866547 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Schäfer, Stephan, Martin Kopp und Dirk Schöttke. 2015. Ressourceneffizientes Engineering für die Industrie von morgen: Modulares skalierbares Steuerungskonzept zum Einsatz im dezentralen Wasser- und Abwasserbereich. In: *Industrie 4.0 – Grundlagen und Anwendungen. Tagungsband zum Branchentreffen der Berliner Wissenschaft und Industrie*, 51–67. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 11. Oktober. https://www.beuth.de/de/publikation/industrie-4-0-grundlagen-und-anwendungen/238866547 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Schmidt-Schauß, Manfred und David Sabel. 2013. *Einführung in die Methoden der Künstlichen Intelligenz. Skript zur Vorlesung Künstliche Intelligenz*. Institut für Informatik, Goethe-Universität Frankfurt am Main. www.ki.informatik.uni-frankfurt.de/lehre/WS2012/KI/skript/skript11Feb13.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2016. *Einführung in die Methoden der Künstlichen Intelligenz. Skript zur Vorlesung Künstliche Intelligenz, Teil 1*. Institut für Informatik, Goethe-Universität Frankfurt am Main. www.ki.informatik.uni-frankfurt.de/lehre/SS2016/KI/skript/skript-KI.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Schriegel, Sebastian, Jürgen Jasperneite und Oliver Niggemann. 2014. Plug and Work für verteilte Echtzeitsysteme mit Zeitsynchronisation. In: *Industrie 4.0 und Echtzeit*, hg. von Wolfgang A. Halang und Herwig Unger, 11–20. Informatik aktuell. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-662-45109-0_2, https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-45109-0_2 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Sendler, Ulrich. 2013. Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM (Systems Lifecycle Management). In: *Industrie 4.0 – Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM*, hg. von Ulrich Sendler, 1–19. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 13. August. doi:10.1007/978-3-642-36917-9_1, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-36917-9_1 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Siepmann, David und Norbert Graef. 2016. Industrie 4.0 – Grundlagen und Gesamtzusammenhang. In: *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*, 17–82. Springer Berlin Heidelberg, 8. Februar. doi:10.1007/978-3-662-48505-7_2, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-48505-7_2 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Soder, Johann. 2014. Use Case Production: Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 85–102. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_4, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_4 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Steegmüller, Dieter und Michael Zürn. 2016. Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion*, hg. von Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl, und Michael ten Hompel, 27–44. Springer-Verlag GmbH, 7. Dezember. doi:10.1007/978-3-662-45279-0_23, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-45279-0_23 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Steiner, Max und Peter Liggesmeyer. 2013. Combination of Safety and Security Analysis – Finding Security Problems That Threaten The Safety of a System. In: *SAFECOMP 2013 – Workshop DECS (ERCIM/EWICS Workshop on Dependable Embedded and Cyber-physical Systems) of the 32nd International Conference on Computer Safety, Reliability and Security, France (2013)*, hg. von Matthieu ROY, 8. Toulouse, France, 26. Juli. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00848604 (Zugegriffen: 13. November 2018).

The White House. 2011. President Obama Launches Advanced Manufacturing Partnership. Hg. von Office of the Press Secretary. 24. Juni. https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2011/06/24/president%2dobama%2dlaunches%2dadvanced%2dmanufacturing%2dpartnership (Zugegriffen: 13. November 2018).

Tönnis, Marcus. 2010. *Augmented Reality – Einblicke in die Erweiterte Realität*. Bd. 0. Informatik im Fokus. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-14179-9, https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-14179-9 (Zugegriffen: 13. November 2018).

VDE-AR-E 2802-10-1:2017-04. *Zusammenhang zwischen funktionaler Sicherheit und Informationssicherheit am Beispiel der Industrieautomation – Teil 1: Grundlagen*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik. https://www.vde-verlag.de/normen/0800403/vde-ar-e-2802-10-1-anwendungsregel-2017-04.html (Zugegriffen: 13. November 2018).

VDI / VDE-GMA. 2013. *Thesen und Handlungsfelder – Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation*. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. www.vdi.de/uploads/media/Stellungnahme_Cyber-Physical_Systems.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Verl, Alexander und Armin Lechler. 2014. Steuerung aus der Cloud. In: *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, hg. von Thomas Bauernhansl, Michael ten Hompel, und Birgit Vogel-Heuser, 235–247. Springer Fachmedien Wiesbaden, 23. April. doi:10.1007/978-3-658-04682-8_12, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-658-04682-8_12 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Weczerek, Jürgen. 2014. Funkbasierte Automatisierung im Maschinen- und Anlagenbau: Wichtiger Baustein im Zukunftsprojekt Industrie 4.0. *SPS-Magazin Spezial 2014* (19. November). http://www.sps-magazin.de/?inc=artikel/article_show&nr=88453 (Zugegriffen: 13. November 2018).

---. 2015. *Funktionale Sicherheit über Wireless Ethernet*. Whitepaper. Phoenix Contact GmbH & Co. KG. https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/global/web_dwl_promotion/DE_DE_Whitepaper_Funktionale_Sicherheit_Wireless_Ethernet_LoRes.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

Wickert, Karl. 2017. Algorithmen: Chance und Herausforderung für die Maschinensicherheit. *sicher ist sicher*, Nr. 12/2017: 531–533. https://www.sisdigital.de/sis.12.2017.531 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Wikipedia. 2017a. Intelligenz. Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 16. Oktober. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Intelligenz&oldid=169833197 (Zugegriffen: 9. Oktober 2017).

---. 2017b. Künstliche Intelligenz. Wikipedia, Die freie Enzyklopädie, 16. Oktober. https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=K%C3%BCnstliche_Intelligenz&oldid=169592027 (Zugegriffen: 1. Oktober 2017).

Wörn, Heinz und Uwe Brinkschulte. 2005. *Echtzeitsysteme: Grundlagen, Funktionsweisen, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/b139050, https://www.springer.com/de/book/9783540205883 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Zöbel, Dieter. 2008. *Echtzeitsysteme: Grundlagen der Planung*. Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-76396-3, https://www.springer.com/de/book/9783540763956 (Zugegriffen: 13. November 2018).

Zühlke, Detlef. 2013. Die Cloud ist Voraussetzung für Industrie 4.0. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), 25. Juni. https://www.vdi.de/uploads/media/2013-06-25_Statement_Zuehlke_Automation2013_01.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).

ZVEI/VDI/VDE-GMA. 2015. *Statusreport – Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0)*. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI); VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (VDI/VDE-GMA). https://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/Statusreport_Referenzmodelle_2015_v10_WEB.pdf (Zugegriffen: 13. November 2018).