

# Voll integrierte und vernetzte Systeme und Prozesse

Perspektive: Smarte Sensorik, Aktorik und Kommunikation

Unternehmen der chemischen Industrie müssen neue Pfade beschreiten, um in einem veränderten Umfeld erfolgreich bestehen zu können. Dazu gehört insbesondere, das Potenzial digitaler Technologien zu nutzen. Die volle Integration und intelligente Vernetzung von Systemen und Prozessen kommt allerdings nur zögerlich voran. Dieser Beitrag ist ein Loblied auf die Feldebene. Er möchte dazu ermutigen, die Digitalisierung der Prozessindustrie auf Basis smarterer Sensorik, Aktorik und Kommunikation ganzheitlicher zu denken und informiert über aktuelle technische Perspektiven, wie das Ein-Netzwerk-Paradigma, Ad-hoc-Vernetzungen, Edge-Computing, FPGAs, virtuelle Maschinen oder Blockchain. Diese geben smarterer Sensorik, Aktorik und Kommunikation eine völlig neue Perspektive.

**SCHLAGWÖRTER** Smarte Sensoren / Smarte Aktoren / Digitalisierung der Prozessindustrie / Prozess-Sensoren 4.0

## **Fully integrated distributed systems and processes – Perspective: smart sensors, actuators, and communication**

Chemical companies must find new paths to success in a changing environment. In particular, this will involve exploiting the potential of digital technologies. However, the full integration and intelligent interconnection of systems and processes is only making slow progress. This contribution aims to encourage the more comprehensive use of digitization in the process industry based on smart sensors, actuators, and communications, and informs about current technical possibilities such as the “one-network paradigm”, ad-hoc connections, edge computing, FPGAs, virtual machines and blockchain. These offer a new scope for smart sensors, actuators, and communications.

**KEYWORDS** Smart sensors / smart actuators / digitization of process industry / process sensors 4.0

**MICHAEL MAIWALD**, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

**A**utonomes Fahren bedeutet das selbständige, zielgerichtete Fahren eines Fahrzeugs im realen Verkehr, ohne Eingriff des Fahrers. Obwohl es einen Paradigmenwechsel darstellt, steht technisch ein evolutionärer Prozess dahinter: die sukzessive Einführung interagierender smarterer Sensorik, Aktorik und Kommunikation und ihre Einbindung in maschinengestützte Entscheidungsprozesse.

Kamera-, Radar- oder Lasersensoren erfassen ständig die Umgebung sowie weitere Informationen, wie Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Ortskoordinaten des Fahrzeugs. Ein autonomer Computer im Auto fusioniert die Sensordaten. Er setzt sich daraus die Umgebungssituation des Fahrzeugs zusammen. Automatische Fahrentscheidungen werden abgeleitet und an die Aktoren des Fahrzeugs wie Lenkung, Motorsteuerung oder Bremsen gegeben. Hier sind sehr große Datenmengen zu bewältigen. Die Steueralgorithmen basieren auf maschinellem Lernen, angereichert mit Wissen aus der Cloud. Wiederkehrende komplexe Aufgaben werden in Teilaufgaben zerlegt, etwa das Erkennen von Verkehrszeichen [1]. In Vorstufen des autonomen Fahrens unterstützt die Technik die menschliche Reaktion des Fahrers.

So wünscht man sich auch autonomes Fahren von Prozessanlagen – natürlich auf Basis vernetzter smarterer Sensoren und Aktoren, die kontinuierlich Informationen der Prozesse bereitstellen und auch Big- beziehungsweise Smart-Data Ansätze speisen. Feldgeräte sind nicht mehr Einzelmessstellen, sondern bilden Prozesszustände ab oder generieren neue Informationen durch Kombination aller verfügbaren Informationen.

## 1. WIE SMART SIND DIE FELDGERÄTE HEUTE SCHON?

Der Nutzen von smarten Feldgeräten der Prozessindustrie sowie deren Kommunikationsmöglichkeiten wurden erstmals 2015 in der Technologie-Roadmap Prozess-Sensoren 4.0 detaillierter beschrieben [2]. Sie sah voraus, dass schon heute komplexe Messtechnik an Prozesse herangeführt wird.

Die Roadmap erläuterte typische Merkmale smarterer Feldgeräte, die in Bild 1 und nachfolgend erläutert sind. Viele dieser Anforderungen sind inzwischen erfolgreich und zuverlässig umgesetzt worden und bezeugen die sehr gute Zusammenarbeit zwischen den Anwendern der Prozessindustrie und ihren Geräte- und Softwareherstellern in Gremien und gemeinsamen Projekten. Die Digitalisierung wird bei allen als Management-Aufgabe verstanden.

### 1.1 Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit

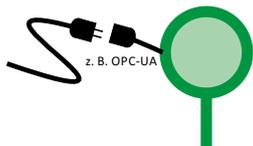
Für die störungsfreie Kommunikation aller Automatisierungskomponenten untereinander werden ein einheitliches Protokoll und ein einheitlicher Feldbus benötigt. Mittlerweile gilt der Standard OPC Unified Architecture (OPC UA, [3]) als gesetzt und kann als ein kleiner Triumph von Industrie 4.0 betrachtet werden. Nicht-Ethernet-Feldbusse sind vor dem Hintergrund einer gewachsenen Landschaft in bestehenden Anlagen und den oft sehr speziellen Anforderungen an Stromversorgung und Explosionsschutz heute weiterhin dominant.

### Eine Semantik für OPC UA

OPC UA ist im übertragenen Sinne vergleichbar mit dem PDF-Standard oder dem HTML-Standard, die die Eigenschaften von graphischen Objekten definieren, beispielsweise von Druckerzeugnissen. Es ist auch unabhängig von Herstellern oder Systemlieferanten, von der Programmiersprache, vom Betriebssystem oder vom Kommunikationsstandard (beispielsweise Feldbus) und vereinheitlicht das zugrundeliegende Datenformat beispielsweise für Online-Messwerte. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) hat 2016 bestätigt, dass mit OPC UA IT sichere Industrie-4.0-Kommunikation umgesetzt werden kann [4].

OPC UA wird bereits zur Verbindung von Automatisierungskomponenten in den höheren Hierarchien eingesetzt, etwa zu ERP- oder Produktionsassistenzsystemen. Zunehmend wird der Standard aber auch auf Geräteebene (beispielsweise für smarte Laborgeräte [5])

Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit



Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen



Traceability und Compliance



Virtuelle Beschreibung



Interaktionsfähigkeit



**BILD 1:** Die wichtigsten smarten Funktionen zukünftiger Prozesssensoren nach [2]

und Feldebene möglich sein. Während heute noch begrenzte Feldbus-Netzwerkinfrastrukturen bestehen, wird die Prozessindustrie der Zukunft daher auf neuen Netzwerkstandards mit der Geschwindigkeit und Flexibilität von Standard-Ethernet- und IP-Technologien basieren, wie beispielsweise beim Standard APL (siehe Kasten Advanced Physical Layer). Gleichzeitig wächst die Rechenleistung in den Automatisierungskomponenten der Feldebene, um OPC-UA-Kommunikation und andere Rechenoperationen energiesparend auszuführen, wie etwa Verschlüsselungsaufgaben oder Datenanalysen (vergleiche 3.2).

Neben der einheitlicheren formalen Beschreibung von OPC UA ist jetzt die semantische Bedeutung für die Anwendungen in der Prozessindustrie wichtig, die sogenannte Companion Specification. Dieses sind Informationsmodelle für die Kernfunktionalität von Automatisierungskomponenten und Anlagen zum Austausch zwischen Automatisierungskomponenten verschiedener Hersteller. Spezifische Alleinstellungsmerkmale können trotz Standardisierung erhalten bleiben, da OPC UA rollenbasierte Berechtigungen und damit die Wahrung der Schutzrechte erlaubt. Beim VDMA findet man einen sehr lesenswerten Leitfaden zur Implementierung von OPC UA im Maschinenbau mit einem Leitfaden zur Abstimmung von Informationsmodellen [6]. Die Prozessindustrie ist aufgerufen, dies nachzuahmen!

### Das „Ein-Netzwerk-Paradigma“

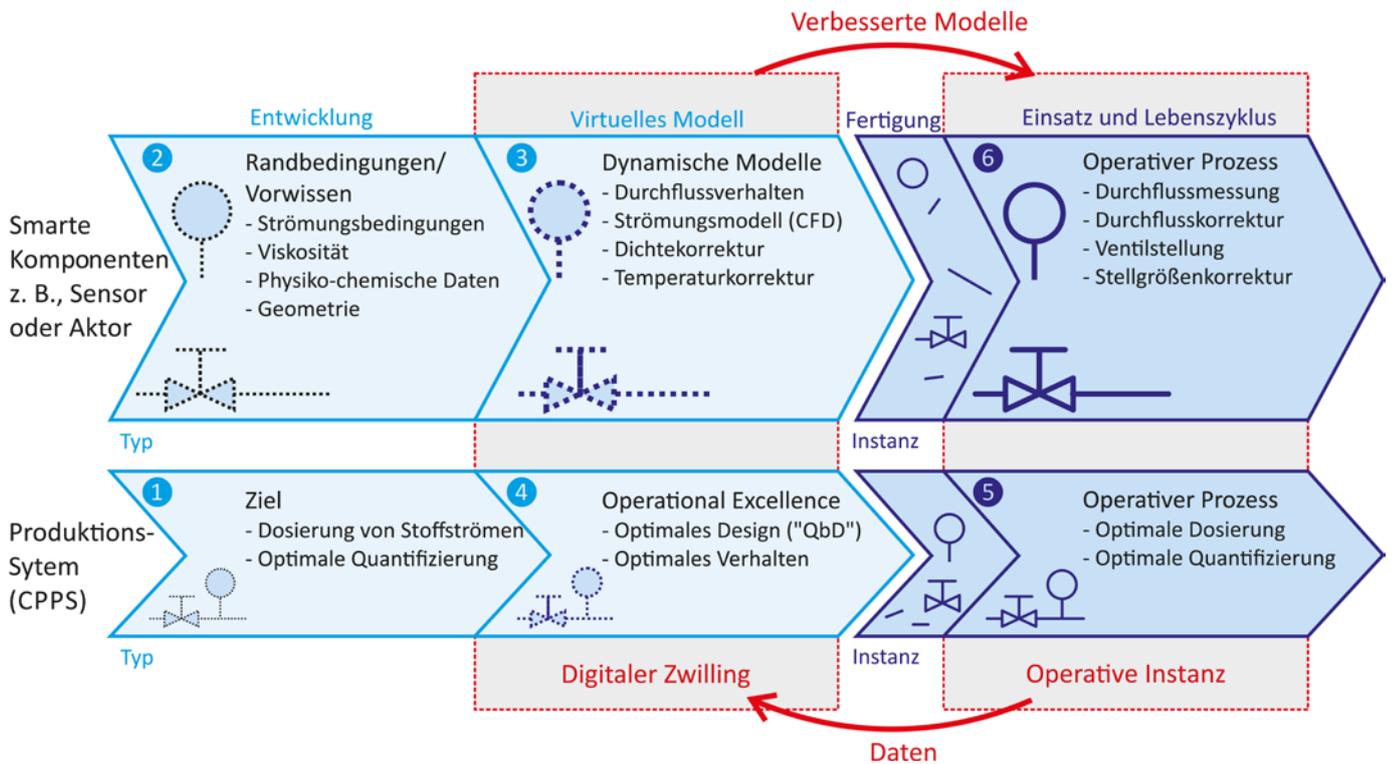
Zu viele Feldbus-Varianten bedeuten eine große Herausforderung für Anwender, da sie viel Fachwissen erfordern und komplex in Installation und Wartung sind. Darüber hinaus ist die Zusammenwirkung mit höheren Automationsebenen meist nur über Gateways möglich, was zusätzlich unübersichtlich ist. Eine durchgängige Ethernet-basierte Kommunikation ist über das Advanced Physical Layer (APL) mit der Geschwindigkeit und Flexibilität von Standard-Ethernet- und IP-Technologien auf der Basis von einfacher Zweileitertechnik in Sicht.

## ADVANCED PHYSICAL LAYER (APL)

- 2011 begonnene, durch die IEEE Standards Association koordinierte Initiative mit Ziel der Fertigstellung 2022 nach Abschluss aller Konformitätstests
- Zweidraht-Ethernet nach 10BASE-T1L auf Basis des Ethernet-Standards IEEE 802.3
- Überwindung der Abhängigkeit von proprietären Protokollen
- Angepasst an die Anforderungen an typische Netzerweiterungen mit Hilfsenergie-Versorgung bis 500 mW pro Gerät für bis zu 50 Geräte
- Installation in explosionsgefährdeten Bereichen der Zonen 0 und 1

### 1.2 Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen

Die Instandhaltungsfunktionen der smarten Feldgeräte ermöglichen inzwischen interaktive Assistenzfunktionen, die Implementierung, Kalibrierung, Fehlersuche oder Instandsetzung stark vereinfachen. Diese Funktionen können, müssen aber nicht im Sensor selbst enthalten sein. In der Regel erfolgt die eindeutige Zuordnung über eine Kennung am Feldgerät (beispielsweise Barcode, RFID, Seriennummer), um Daten und Servicefunktionen aus der eigenen Asset-Datenbank oder vom Hersteller abzurufen (Industrie-4.0-Verwaltungsschale). Der Sensorzugriff erfolgt über gestufte Zugriffsrechte und Benutzergruppen. Hier ist es eine fortwährende Aufgabe von Anwendern und Geräteherstellern, einheitliche Standards für die Sicherheit und die Funktionalität zu schaffen und den aktuellen Anforderungen anzupassen (vergleiche 3.3). Derzeit werden unter anderem Ticket-basierte Zugriffsrechte anstatt von Passwörtern diskutiert, da letztere in einer



**BILD 2:** Digitaler Zwilling als virtuelles Modell (Typ) im Wechselspiel zur operativen Instanz auf der Achse Lebenszyklus und Wertschöpfungskette des RAMI-Modells. Dargestellt ist ein cyber-physisches Produktionssystem (CPPS) bestehend aus einem smarten Aktor (Stellventil) und einem Sensor (Durchfluss-Sensor).

Automatisierungslandschaft von mehreren tausend Geräten und vor dem Hintergrund wechselnden Personals nicht handhabbar sind.

Weil die Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen einen großen Nutzen haben, stanno einige innovative Unternehmen der Prozessindustrie ihre Anlagen derzeit flächendeckend mit zusätzlichen Netzwerkzugängen aus, meist Wireless-Technologien. Ebenso sind die Firmen dazu übergegangen, ihre Asset und Anlagenpläne komplett zu digitalisieren.

Bei den Daten und Servicefunktionen handelt es sich um Bedienungsanleitung oder Videos für die Implementierung, Konfiguration, Wartung, Kalibrierung oder Reparatur von Automatisierungskomponenten und Anlagenteilen. Auch lassen sich Kontextinformationen, wie Referenzwerte, Anlagenzustände oder historische Daten aufrufen. Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen können bei Eignung auch an geeignete Drittanbieter oder den Hersteller übertragen werden, Abrechnungen über Kosten des Feldgeräts oder relevante Leistungen im ERP-System abgebildet werden.

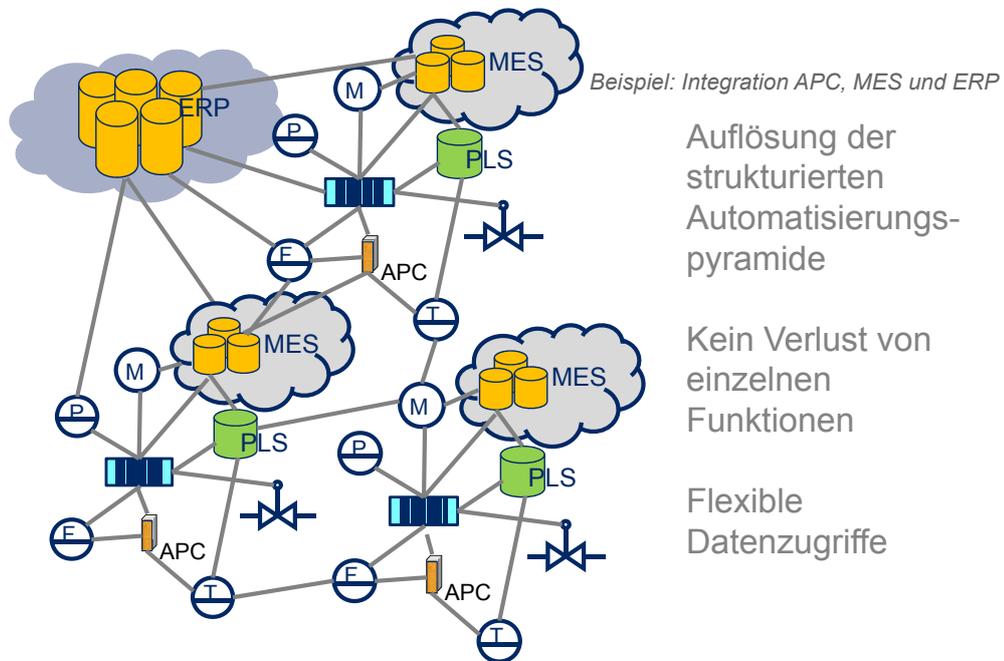
### 1.3 Traceability und Compliance

Die Forderung nach einer Rechtevergabe und Rückverfolgbarkeit aller Änderungen an einem Feldgerät ist eine wichtige Asset-Funktion und kann über Audittrails verfolgt werden – idealerweise außerhalb des Sensors. Häufig sind noch Umparametrierungen oder Updates am Feldgerät selbst nötig, wenn etwa ein Produkt gewechselt wird oder eine aktuelle Firmware aufgespielt wird. Dieses ist im regulierten Umfeld (beispielsweise GMP) schwer abbildbar. Sehr häufig existieren Sicherheitslücken über nicht ausreichend geschützte Wartungskanäle.

Traceability und Compliance werden im Zuge der Digitalisierung enorm vereinfacht. Umparametrierungen oder Updates am Feldgerät können zukünftig virtuell getestet werden, bevor sie auf das Feldgerät ausgerollt werden (vergleiche 3.2).

### 1.4 Virtuelle Beschreibung

Durch die virtuelle Beschreibbarkeit wird das von Industrie 4.0 geforderte „durchgehende Engineering“



**BILD 3:** Auflösung der strukturierten Automatisierungspyramide zur Ermöglichung von Industrie 4.0 (aus dem Vortrag von T. Pötter auf der Namur-Hauptsitzung am 8. November 2013 [8])

unterstützt. Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 [7] und die derzeit überarbeitete IEC 62890 (Life-Cycle Management) beschreiben sowohl dieses durchgehende Engineering als auch weitere Dimensionen des Informationsaustauschs sehr konkret. RAMI 4.0 ist ein Schlüssel für das Verständnis der verschiedenen Hierarchieebenen in Industrie 4.0.

Eine der Achsen des RAMI-Modells ist schematisch in Bild 2 dargestellt: Während der Entwicklung wird die Zielstellung des Gesamtsystems (1) in die Komponenten zerlegt (2) und den Randbedingungen gegenübergestellt. Daraus ergeben sich dynamische virtuelle Modelle (3), die die Einzelkomponenten beschreiben. Auch das CPPS kann als digitaler Zwilling dynamisch virtuell simuliert werden (4). Nach der Fertigung der Einzelkomponenten und des Produktionssystems sind diese operative Instanzen (5) und (6). Aus der Datensammlung während des operativen Prozesses und neuen Anforderungen kann ein aktualisierter und verbesserter digitaler Zwilling der Einzelkomponenten (etwa mit verbesserten Modellen oder Kennlinien) und des Produktionssystems erzeugt werden. Durch kontrollierte Übertragung auf den operativen Prozess kann letzterer optimiert werden.

Allgemein werden durch die Nutzung von digitalen Planungswerkzeugen für Anlagen vermehrt digitale,

einheitliche Beschreibungen der Sensoren notwendig, und ihre technischen Daten oder Funktionalitäten müssen in Form von (dynamischen) Modellen zur Verfügung stehen. Diese Informationen stehen wiederum weiteren Hierarchie-Ebenen zur Verfügung, um etwa eine Produktionseinheit (und später sogar eine ganze Fabrik) zu simulieren, bevor diese zusammengefügt und im Lebenszyklus betrieben werden.

Eine konsequente Anwendung dieses Konzepts steht heute noch aus. Die Schaffung eines digitalen Zwillings einer ganzen Produktionseinheit oder Fabrik erfordert noch mehrjährige Entwicklungs- und Validierungszeit. Für die kontrollierte Übertragung der Information als validiertes Modell auf die operativen Instanzen sind wieder eindeutig festgelegte Funktionen und gestufte Zugriffsrechte erforderlich (vergleiche 3.3).

### 1.5 Interaktionsfähigkeit und Bidirektionalität

Vor fünf Jahren wurde die Prozessindustrie mit der „Auflösung der Automatisierungspyramide“ zur Ermöglichung von Industrie 4.0 konfrontiert (Bild 3 und [8]). Dieses Bild war die konsequente Übersetzung von Industrie 4.0 als flexible Produktion für volatile Märkte mit adaptiven, selbst-konfigurierenden, selbst-organisierenden, flexiblen Produktionsanlagen

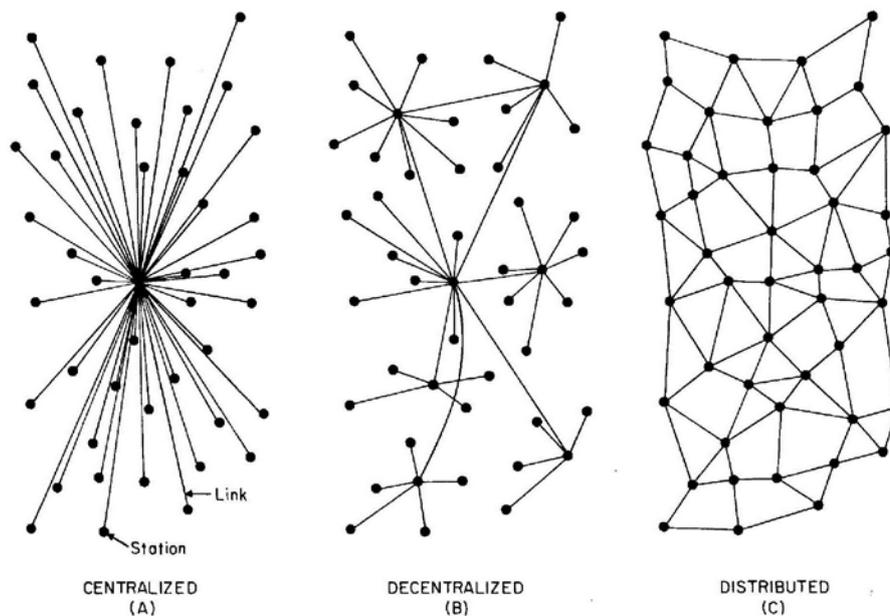


FIG. 1 – Centralized, Decentralized and Distributed Networks

**BILD 4:** Darstellung der drei Schritte von zentralisierten über dezentralisierte hin zu verteilten Netzwerken von Paul Baran aus seiner Publikation „On Distributed Communications“ von 1964 [9]

mit hohem Vernetzungsgrad und hochverfügbaren Informationsdiensten – und den entsprechenden Wertschöpfungsbeiträgen.

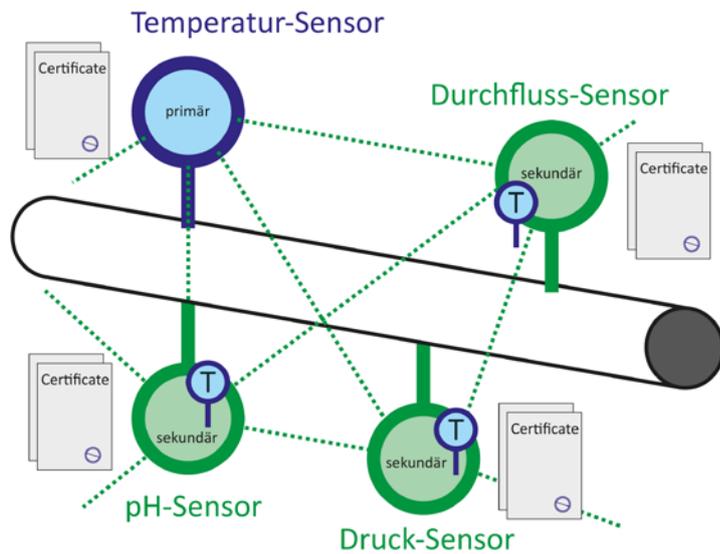
Da drängt sich unweigerlich der Vergleich mit verteilten Netzwerken auf, wie sie 1964 vom Ingenieur Paul Baran (1926–2011) für Kommunikationsnetzwerke von zentralisierten Netzwerken abgeleitet wurde (siehe Bild 4 und [9]). Verteilte Netzwerke sind heute noch die Grundlage für das weltweite Internet sowie die moderne Telekommunikation. Statt einer festen Drahtverbindung zwischen den Teilnehmern in zentralisierten oder dezentralisierten Netzwerken melden sich alle Teilnehmer im System mit ihren Fähigkeiten an und werden optimal ausgelastet.

Verteilte Netzwerke werden durch die Integration des Internets mit physischen Komponenten zu Industrie 4.0. Edward Lee formuliert treffend [10]: „Cyber-Physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa“. Besonders die Feldebene mit hohem Integrationsaufwand profitiert schon heute von einer solchen Vorstellung. Interaktionsfunktionen und Bidirektionalität sind daher aus Sicht der Feldgeräte unverzichtbar – gewiss unter Wahrung von Sicherheitsregeln

(vergleiche 3.3). Nur so funktionieren Advanced Process Control (APC), Soft Sensing oder Selbstkalibrierung.

Warum erzeugen diese Szenarien offenbar großes Unbehagen? Christoph Meinel, der Leiter des Potsdamer Hasso-Plattner-Instituts, nimmt zur Digitalisierung allgemein Stellung: „Digitalisierung ist in der Menschheitsgeschichte etwas ganz Neues. Als das Rad erfunden, die Pyramide erbaut, die Landmaschine geschaffen wurde, fand das immer im Rahmen unserer physikalischen Welt statt. (...) So wie wir das kannten. Wir waren vorbereitet. (...) Die Menschen wussten, dass sie nicht gleichzeitig an verschiedenen Orten Wirkungen erzielen können. Durch die Digitalisierung ändert sich das, es kommt eine zweite Ebene mit ganz anderen Gesetzmäßigkeiten ins Spiel. Wir können über virtuelle Verbindungen Wirkungen am anderen Ende der Welt erzielen. Wir können sekundenschnell Informationen über Zustände dort bekommen und darauf reagieren, auch wenn das ganz weit weg ist. Wir können das; andere können es aber auch bei uns. Das stellt uns vor ganz neue Möglichkeiten und neue Herausforderungen.“ [11]

Wenn wir diese virtuellen Verbindungen sorgfältig und sicher gestalten, offenbaren sich überwiegend Vorteile durch die Digitalisierung. Verteilte Netzwerke sind zuverlässiger, auch bei Ausfall von einzelnen Schaltstellen. Die Auslastung ist besser verteilt.



1) Langzeitbetrachtung der Messwerte aller Temperatursensoren

2) Plausibilitätsbetrachtung im digitalen Zwilling



3) Sicherheitsfunktionen auf Basis risikobasierter Orchestrierung



**BILD 5:** Smarter Temperatursensor und sekundäre Temperatursensoren in seiner Umgebung, die zur Messwertkompensation im Durchfluss-, pH- oder Drucksensor integriert sind

Virtuelle Betriebssysteme und Datenbanken „können nicht mehr ausfallen“ (vergleiche 3.2), was bedeutet, ihre Verfügbarkeit ist so hoch wie die getätigte Hardware-Investition. Diese basiert in der Regel auf einer Risikobetrachtung. Migration von Betriebssystemen und Kompatibilität von Software und Daten müssen uns nicht mehr erschrecken.

## 2. ANSÄTZE ZUR AUFWEITUNG DER BESTEHENDEN AUTOMATISIERUNG

Wie gelingt nun die sichere Interaktion mit der Feldebene, um an die Prozessdaten heranzukommen? Unidirektionale Kommunikation ist unkritisch. Soll es bidirektional sein, müssen adäquate Maßnahmen zur Datensicherheit wie die Vergabe von Zugriffsrechten getroffen werden.

Im NOA-Konzept (Namur Open Architecture [12]) wird dieser Übergangszustand durch Aufweiten der aktuellen Automation per „Datendiode“ aus der bestehenden Automatisierungslandschaft heraus diskutiert. Daten kommen heraus, dürfen aber nicht direkt in die Core-Automatisierung zurück. Zusätzliche Datenquellen können über Clamp-on-Sensoren oder mobile Sensoren (vergleiche 2.3) unter weniger strikten Randbedingungen erfolgen. IP-basierte Kommunikationstechnologien für die Feldebene werden zukünftig als echtzeitfähige Schnittstellen zwischen Feldgeräten und Prozessleitsystem sowie Automatisierungskomponenten

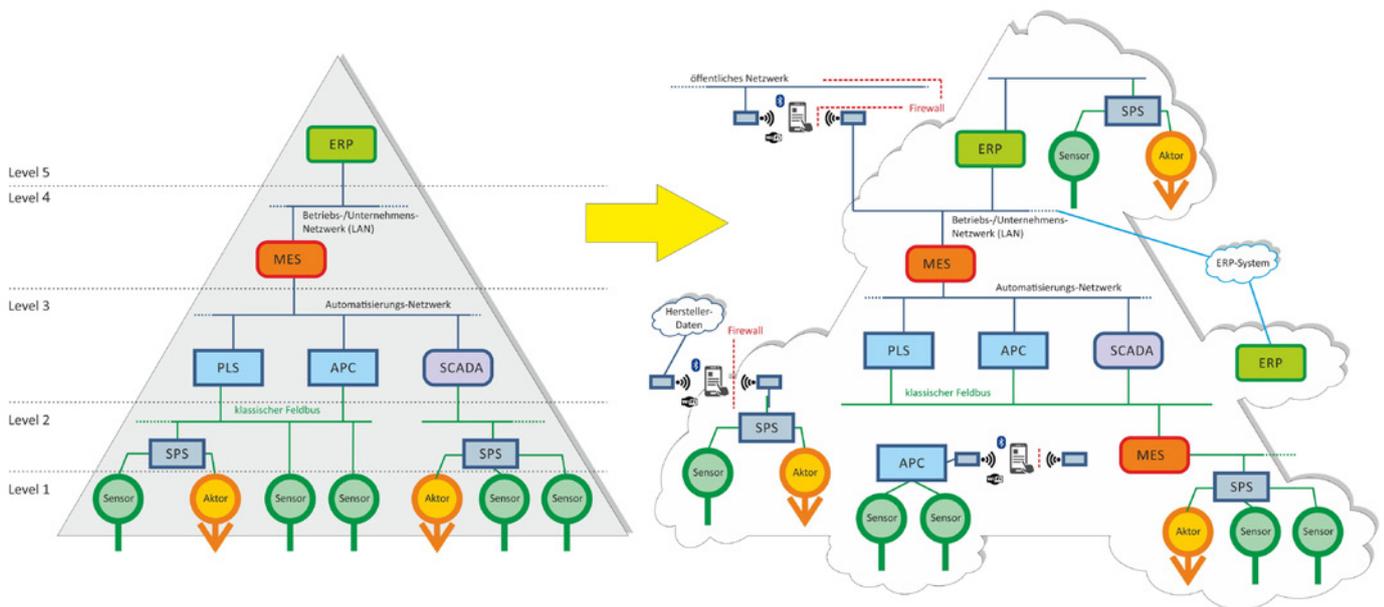
für M+O (Monitoring and Optimization) gesehen. Für Befehlsanforderungen von M+O zurück an die Prozessleitebene steht die Definition eines „Verification of Request“ aus.

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die Open Group im Open Process Automation-Forum (OPAF). In einem gerade geschlossenen Memorandum of Understanding zwischen der Open Group und der Namur werden derzeit Ansätze des Open Process Automation-Forums, des Module Type Packages (MTP, vergleiche 2.1) sowie der Namur Open Architecture (NOA) harmonisiert. [13]

### 2.1 Modulare Anlagen verringern Komplexität durch Kapselung

Als eine der ersten Ausprägungen von Industrie 4.0 und cyber-physischen Systemen werden Konzepte für modulare Produktion abgeleitet [14]. Mit Modularisierung nimmt die Flexibilität, Verfügbarkeit und Auslastung von Anlagen zu, und unterschiedliche Produkte lassen sich schneller auf den Markt bringen. So ist es auch für modulbasierte Spezialitätenchemie denkbar, von einer Dynamik nach dem Vorbild der Fertigungsindustrie zu profitieren und kürzere Innovations- und Produktzyklen zu realisieren. Das Konzept lässt auch höhere Stückzahlen für standardisiertere Feldgeräte in modularen Anlagen erwarten.

Für den Erfolg der Modularisierung ist wesentlich, dass über die funktionsfähige Anlage hinaus auch



**BILD 6:** Öffnung der Automatisierungspyramide zugunsten einer höheren Dezentralisierung auf Basis smarterer Eigenschaften der Automatisierungskomponenten (nach Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0“, 2015, [4])

Informationen zu wichtigen Anlagenteilen und Automatisierungskomponenten verfügbar werden und sich diese Komponenten mit schnellen Rüstzeiten optimal für ein Produkt zu neuen Anlagen rekonfigurieren lassen. So wird jedes Teil zu einem smarten Teil der vernetzten Produktion [15]. Modulare Automation verringert durch Kapselung der verfahrenstechnischen Funktionen die Komplexität in Engineering, Freigabe, Inbetriebnahme und Instandhaltung für den Nutzer. Die Komplexität bleibt erhalten, wird jedoch auf das Innere des Moduls beschränkt (Black Box). Der Nutzer sieht nur die Schnittstellen für die Kopplung der Module, die durch die Standardisierung nur einmal verstanden werden müssen. Das Systemverständnis verringert die wahrgenommene Komplexität durch sogenannte Deorchestrierung beziehungsweise Dekomposition.

Um dies zu erreichen wurden Schritte in Richtung Vereinfachung und Standardisierung eingeschlagen, denn Sensorik und Aktorik an einer Anlage können heute mehrere hundert einstellbare Parameter erfordern. Mit dem Projekt Dezentrale Intelligenz für modulare Anlagen (DIMA) hat der Elektronikhersteller Wago auf der Namur-Hauptsitzung 2014 einen ersten Weg zur Umsetzung der Anforderungen der NE 148 realisiert [16]. Bisherige Arbeiten ergaben, dass die Verwendung von Module Type Packages (MTP) zur Beschreibung von Prozessmodulen eine vielversprechende Lösung darstellt. Der Namur-Arbeitskreis (AK)

1.12 arbeitet derzeit in Zusammenarbeit mit verschiedenen Ad-Hoc-Arbeitskreisen der Namur und dem ZVEI an der Standardisierung von MTP [17]. Das MTP (Module Type Package) wird zur Nationalen Richtlinie VDI/VDE/Namur 2658 [18].

Vereinfachung ist auch hinsichtlich der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu erwarten. Gut programmierte Apps basieren beispielsweise auf sehr intuitiven und überschaubaren grafischen Benutzeroberflächen und verzichten auf das Abarbeiten endloser Menüs oder auf das Interpretieren von (binären) Zahlenfolgen. Dieses ist auch ohne Standardisierung auf Basis der Informationsbeschränkung möglich und begründet den Erfolg der Apps im Privatsektor, während nicht harmonisierte oder proprietäre Menüs die Bedienung im industriellen Sektor teilweise heute noch sehr unübersichtlich machen.

## 2.2 Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit am Beispiel eines smarten Temperatursensors

Auf Basis von sehr zuverlässigen Informationen zum Zustand von Sensoren aus seinem digitalen Zwilling, der Kalibrierhistorie und den historischen Messdaten, sind zukünftig sehr präzise und aktuelle Aussagen über den Sensor als Prüfmittel verfügbar, die jeder Qualitäts- und Sicherheitsanforderung gerecht werden. Im Zusammenhang mit dem Kontext der jeweiligen Daten, also wann der Sensor an welcher Stelle für welchen

Prozess mit welchem Messergebnis eingesetzt wurde, lassen sich Plausibilitätsbeziehungen und Zuverlässigkeitsinformationen ableiten.

Als einfaches Beispiel soll ein Temperatursensor in einer Rohrleitung dienen mit hohen Ansprüchen an Genauigkeit (Richtigkeit, Präzision und Langzeitstabilität) bei kurzen Ansprechzeiten (Bild 5). In seiner unmittelbaren Umgebung der Rohrleitung befinden sich weitere Sensoren, wie Durchfluss-, pH- oder Drucksensoren, die Temperaturen oder weitere Messgrößen zur internen Kompensation ihrer Messwerte erfassen – heute in der Regel nicht abrufbar. Könnte man auf diese zugreifen, können auch ihre Genauigkeiten historisch betrachtet und gegeneinander bewertet werden.

Dieses erweitert die heutigen Möglichkeiten um Plausibilitätsbetrachtungen und statistische Aussagen aller Automatisierungskomponenten, um Drift oder Beschädigungen schneller zu erkennen und abzustellen, die ansonsten unerkannt blieben und weitere Messwerte verfälschten.

Darüber hinaus können diese sekundären Sensoren auf Basis einer Risikobetrachtung als redundante T-Sensoren in das Sicherheitskonzept der Anlage mit einbezogen werden. Hinterlegte Plausibilitätsbetrachtungen dienen zur Einschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit. Werden diese Informationen kontextbezogen jedoch anonymisiert an den Sensorhersteller weitergegeben, kann dies zur Verbesserung des Sensors beziehungsweise seines cyber-physischen Zwillings (Bild 2) im Produktionssystem, seinen bedarfsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen und der Beurteilung der tatsächlichen Sicherheitsreserven verwendet werden.

### 2.3 Zeitliche und räumliche Wandelbarkeit der Automatisierungslandschaft

Die Technologie-Roadmap sah dieses durch die Öffnung der Automatisierungspyramide zugunsten einer höheren Dezentralisierung auf Basis smarter Eigenschaften der Automatisierungskomponenten (Bild 6).

Die Öffnung war so zu verstehen, dass die Automatisierungskomponenten ihre Funktionalität behalten, sich aber flexibel nach den erforderlichen Gegebenheiten integrieren lassen. Auf Basis dieser Flexibilität können Messmittel auch temporär zur Informationsgewinnung in eine Automatisierungslandschaft eingebunden werden, beispielsweise zur Validierung oder Kalibrierung von Feldgeräten oder zur Generierung von Prozessmodellen für Soft-Sensorik, das heißt für modellgestützte virtuelle Sensoren. Diese unterstützenden Cloud-Dienste erfordern keine permanente Verfügbarkeit oder Echtzeitfähigkeit. Wäre diese jedoch gegeben, so wäre auch eine Übernahme der Prozessführungsaufgaben denkbar. Das wäre die vollständige Realisierung des Konzepts Industrie 4.0.

Allgemein formuliert wird sich also jede Komponente zukünftig im Netzwerk mit ihren Fähigkeiten,

Workflows und Rechenleistung anmelden. Auf Basis einer risikobasierten Zuordnung (Orchestrierung) werden daraus die jeweils ideal zugeschnittenen Automatisierungsnetze zusammengestellt. Die Aufgaben höherer Automatisierungslevel richten sich damit vorwiegend auf die Orchestrierung und nicht mehr auf die dedizierte Steuerung der darunterliegenden Automatisierungskomponenten. Es spielt dann keine Rolle mehr, wo und wie diese Komponenten angebunden sind. Diese Vorstellung reduziert ein wenig die Befürchtung vor dem Kontrollverlust im Feld.

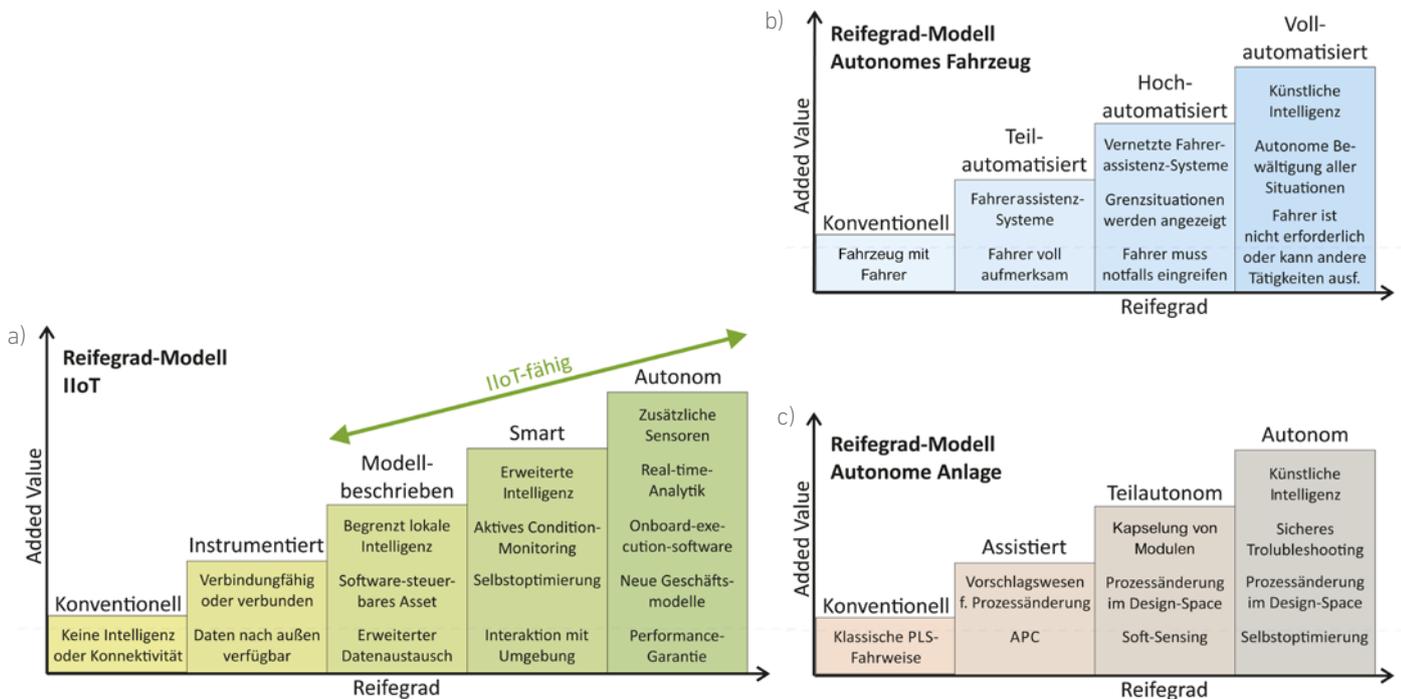
### 2.4 Neue Services durch Cloud-Dienste

In der Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0“ [4] wurden bereits Anwendungsfälle für neue Cloud-Dienste aus Sicht der Sensoren beschrieben, die auch für Aktoren gelten. Über die Schnittstellen des Feldgeräts zur Außenwelt in Verbindung mit den Kontextinformationen lassen sich alle erdenklichen Informationsdienste (in Form von Apps) ermöglichen. Neu ist dabei, dass das Feldgerät ergänzende, heute nicht zur Verfügung stehende Bezugsdaten selbstständig aus dem Internet holen kann, wie etwa Wetterinformationen. Damit können ganz neue Dienste angeboten werden. Industrie 4.0 hebt sich gegenüber gegenwärtigen Produktionskonzepten aber auch dadurch ab, dass es zu einem Mehrwert an Informationen kommt, dem Cloud-Wissen (vergleiche Staumeldung durch Handy-Bewegungsdaten).

### 2.5 Von unterstützter Fahrweise zur autonomen Anlage

Wie oben erwähnt kann der Reifegrad der Anlagen in der Prozessindustrie durch den Einsatz der Instrumente der Digitalisierung soweit erhöht werden, dass eine sichere Fernsteuerung (Remote Operation) oder sogar der völlig autonome Betrieb von Anlagen möglich werden. Dazu hat die ARC Advisory Group den Reifegrad von IIoT-Komponenten beschrieben (Bild 7a frei nach [19]).

Abermals kann die Entwicklung zum autonomen Fahrzeug vergleichsweise herangezogen werden: In einem teilautomatisierten System muss der Fahrer die automatischen Funktionen ständig überwachen und darf keiner fahrfremden Tätigkeit nachgehen. Hier helfen Fahrerassistenzsysteme, wie Abstands-, Spurhalte- oder Geschwindigkeitsautomatiken (letztere sogar schon seit den 1950er-Jahren). In einem hochautomatisierten Fahrzeug erkennt das automatische System seine Grenzen selbst und fordert in diesem Fall die Übernahme durch den Fahrer rechtzeitig an. Im vollautomatisierten, autonomen Fahrzeug kann das System alle Situationen autonom bewältigen. Eine Überwachung durch den Fahrer ist nicht mehr erforderlich und fahrerloses Fahren möglich (Bild 7b).



**BILD 7:** Reifegrade verschiedener digitaler Anwendungen: (a) Industrial Internet of Things (nach einem Konzept der ARC [19]); (b) Autonomes Fahrzeug; (c) Autonome Anlage (nach [20])

So lässt sich auch die autonome Anlage betrachten [20]: Als erster Schritt wird die Datenanalyse uns helfen, Abweichungen im Prozess frühzeitig zu erkennen. Im weiteren Reifegrad der Technologie und durch Lernen auf Basis kontextbezogener Informationen wird ein Vorschlagswesen für Prozessänderungen möglich. Dieses kann man sich als Assistenzsystem im Rahmen eines Design-Space (sinnvolle und bekannte Variation der kritischen Betriebsparameter) vorstellen. Nimmt das Wissen auf der Basis von zunehmend verfügbaren Anlagendaten zu (Soft Sensing, vergleiche 2.3), ist auch die teilautonome Weiterfahrt von Anlagen(-Modulen) unproblematisch. Sie ließe sich beispielsweise für Remote Operation (sichere Fernsteuerung von Anlagen) nutzen. Im letzten Reifegrad kann der Schritt von Remote Operation zu völlig autonomem Betrieb möglich werden, wobei auf Basis künstlicher Intelligenz mittlerweile auch Algorithmen für das Troubleshooting zur Verfügung stehen, wie in Bild 7c.

### 3. FAZIT UND AUSBLICK

Früher erzeugten Technologiewünsche und Visionen der Anwender aus der Prozessindustrie entweder Angst

oder Hohn bei den Geräte- und Softwareherstellern, wenn sie zu entsprechend phantasievollen Entwicklungen getrieben werden sollten – die zugegeben nur ein eingeschränktes Marktvolumen darstellten. Heute ist es umgekehrt! Die technischen Möglichkeiten und das Portfolio der Geräte- und Softwarehersteller übertreffen die Phantasie und Einsatzfreude der Anwender.

Eine mögliche Erklärung liegt darin, dass der riesige Consumer-Markt weltweit zum größten Technologietreiber geworden ist, insbesondere für Entwicklungen aus dem Elektronikbereich [21]. Die Technologie kommt sozusagen aus dem Wohnzimmer. Ein Beispiel unter sehr vielen sind leistungsfähige Grafikprozessoren (GPUs) mit enormem Absatzmarkt durch den Videospieldriving der Menschen. Heute werden sie auch für Fachanwendungen für verteilte Rechenoperationen genutzt. Übertragen auf Automatisierungsanwendungen in der Prozessindustrie ist als erstes ein Paradigmenwechsel erforderlich: Niemand wird sich mehr speziell für seine Bedarfe zugeschnittene Bauteile für Fachanwendungen der Automatisierung leisten wollen. Eine Feld-Bluetooth-Komponente könnte in der Größenordnung mehrerer tausend Euro liegen, auch wenn sie nur ein spezielles Bit mehr überträgt als Consumer-Bluetooth.

### 3.1 Zunehmende Intelligenz im Feld

Die Zahl der im Internet verbundenen Geräte beträgt derzeit knapp neun Milliarden. In den folgenden zwei Jahren wird ein Anwachsen auf weltweit 20,5 Milliarden erwartet [22]. Wachsen werden vor allem die Geräte am sogenannten Edge, also am Rand des Netzwerks. Dieses erwartet auch die Prozessindustrie – wenngleich bei viel kleineren Gesamtzahlen. Es spricht vieles dafür, die stark anwachsenden Datenmengen an Ort und Stelle zu verarbeiten und nur abstrahierte und reduzierte Daten zentral auszutauschen. Dieses bezeichnet man als Edge-Computing (siehe Kasten Edge Computing). Analysensysteme mit hohen Anforderungen an Echtzeitfähigkeit, wie etwa Prozess-Spektrometer im Millisekunden-Takt, können Spektren nur an Bord auf Embedded-Systemen auswerten.

## EDGE-COMPUTING

- Verlagerung der Rechenanwendungen, Daten und Diensten von zentralen Knoten in Rechenzentren zu den Knoten (-rechnern) beim Anlagenbetreiber, über die die Cloudanbindung hergestellt wird und weiter zu den äußeren Rändern (der „Kante“) des Netzwerks
- Ressourcenschonende Datenverarbeitung an Ort und Stelle im Endgerät (Datenkonditionierung, Embedded-Verarbeitung), dadurch bessere Erfüllung von Echtzeitanforderungen
- Aufbauend auf ad-hoc-vernetzten intelligenten Endgeräte mit digitalen Schnittstellen
- Verbesserung der Sicherheit durch näher am Netzwerkkern verschlüsselte Dateien
- Geeignetes Architekturkonzept für das Internet der Dinge (IoT) als Verknüpfung eindeutig identifizierbarer physischer Objekte mit einer virtuellen Repräsentation in einer Internet-ähnlichen Struktur
- Repräsentation durch Edge-Controller, zuerst als eine erweiterte Form der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) später wahrscheinlich im Feldgerät selbst
- Statt Edge Computing werden gelegentlich auch die Begriffe Fog Computing, Local Cloud, eingebettetes System/Embedded System oder Cloudlet verwendet
- Aktuelle Forschungsprogramme: beispielsweise Far-Edge-Projekt im Horizon 2020 [23]

Letztmalig drängt sich der Vergleich zum autonomen Fahrzeug auf [24]. Ein typisches autonomes Fahrzeug produziert zirka 40 TB Daten pro acht Stunden. Diese beträchtliche Datenmenge wird per Edge-Computing im Fahrzeug selbst ausgewertet, da der Datentransport zu einem zentralen Entscheidungssystem auch bei guten Netzverbindungen gigantisch wäre. Schon Übertragungsdauern von 150–200 ms im sehr schnellen Netz wären für autonomes Fahren untauglich für zentrale Entscheidungen. Im Stadtverkehr wären das gut zwei Meter zurückgelegte Strecke. Lediglich werden die verbesserten Entscheidungsalgorithmen von Zeit zu Zeit von zentraler Stelle ausgetauscht, beispielsweise wenn das Fahrzeug in der Garage steht.

### 3.2 Zunehmende Rechenleistung im Feld

#### Programmable Automation Controller

Mittlerweile verschiebt sich die Diskussion um den Einsatz von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) oder PC-basierten Automatisierungskomponenten zugunsten hybrider Systeme, da sich die technologischen Unterschiede zwischen PC und SPS immer weiter verringern. Von der Automation Research Corporation (ARC) wurde etwa das Akronym PAC für Programmable Automation Controller geprägt [25]. Besonders interessant sind die aktuellen Möglichkeiten dieser hybriden Automatisierungskomponenten, beispielsweise auf Basis von Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs, siehe Kasten Field-Programmable Gate Arrays rechts oben), die das Edge-Computing geradezu ideal untermauern.

#### Field-Programmable Gate Arrays

FPGAs sind mittlerweile sehr verbreitet, wenn rechenintensive Operationen anstehen, beispielsweise für typische Embedded-Aufgaben wie Messwertkompensationen. FPGAs lassen sich heute ohne die anfangs notwendigen Formalismen programmieren, und es existieren Konverter für grafische Programmiersprachen oder C-Code. Derzeit wird ihr Einsatz in verteilten Netzwerken vorgebracht, da sich FPGAs nahezu ideal in dieser Topologie einsetzen lassen und die modulare Orchestrierung mit anwenderdefinierter Funktionalität verkörpern. Die Anwendung autonom selbstheilender Bausteine für unternehmenskritische Anwendungen wurde bereits aufgezeigt [26].

#### Software-Virtualisierung

Im Business-Bereich sind virtualisierte Betriebssysteme schon lange verbreitet, insbesondere bei Servern. Dazu wird eine Virtualisierungsschicht zwischen der physikalischen Hardware (PC, SPS et cetera) und ihren logischen Teilen (Betriebssystem, Applikation) gelegt, sodass die logischen Teile nicht mehr abhängig von der Hardware sind. Man spricht

## FIELD-PROGRAMMABLE GATE ARRAYS (FPGAS)

- Von der Firma Xilinx im Jahre 1984 auf dem Markt eingeführt als Schnittstellenchips
- Vielseitig einsetzbare, rekonfigurierbare Siliziumchips für hohe Anforderungen in Bezug auf Determinismus, geringe Latenzzeit, Parallelität, Verarbeitungsgeschwindigkeit und Zuverlässigkeit
- Im Gegensatz zu Application-Specific Integrated Circuits (ASIC) sind FPGAs vollständig rekonfigurierbare Siliziumchips, bestehend aus Millionen von Logikblöcken, die sich durch programmierbare Routen verknüpfen lassen
- Realisierung von komplexen Algorithmen, wie beispielsweise FFT-Analysen, neuronalen Netzen oder kryptographischen Algorithmen als anwenderdefinierte Funktionalität
- Realisierung von leistungsfähigen Funktionalitäten bei Vermeidung hoher Leistungsaufnahme (und Wärmeabgabe) durch Hardware-optimiertes Rechnen und daher ideal für Anwendungen im Feld
- Mittlerweise Unterstützung grafischer Programmiersprachen oder C-Code in digitale Hardwareerschaltungen
- Realisierungen von selbstheilender Hardware
- Zunehmender Einsatz für computerbasierte Mess- und Automatisierungsanwendungen

von virtuellen Maschinen (VM, siehe Kasten Virtuelle Maschinen). Dieses bedeutet, dass Software nicht mehr lokal auf einem Rechner, sondern auf Rechnerverbänden lauffähig ist – auch über das Internet als Virtual Appliances verteilt.

Die Nutzung von Templates oder das schnelle Klonen von virtualisierten Anwendungen ist ein sehr wichtiger Vorteil von Software-Virtualisierungen. Sie eröffnet neue Backup-Möglichkeiten unter Einhaltung von Compliance-Richtlinien und vereinfacht die Wiederherstellung der Gast-Betriebssysteme erheblich. In Systemen kann ein validierter Zustand durch Wiedereinspielen der letzten validierten Version in wenigen Minuten wiederhergestellt werden, wenn etwa Funktionstests nach einem Softwarepatch oder einer Firmware-Erneuerung Probleme machen. Dieses wäre für Einzelanwendungen nie möglich, ohne ein System komplett neu aufzusetzen und wieder auf den letzten validierten Zustand aufzurüsten, und im GMP-Umfeld besteht das Dilemma Patch oder Compliance. Auch besteht die Möglichkeit, ein paralleles Testsystem zur Verhaltensbeobachtung temporär mitlaufen zu lassen oder separat zu testen.

Die Nutzung von Software-Virtualisierungen wird in höheren Automatisierungsebenen seit langer Zeit eingesetzt (Cloud-Computing für ERP-, MES- oder

## VIRTUELLE MASCHINEN (VM)

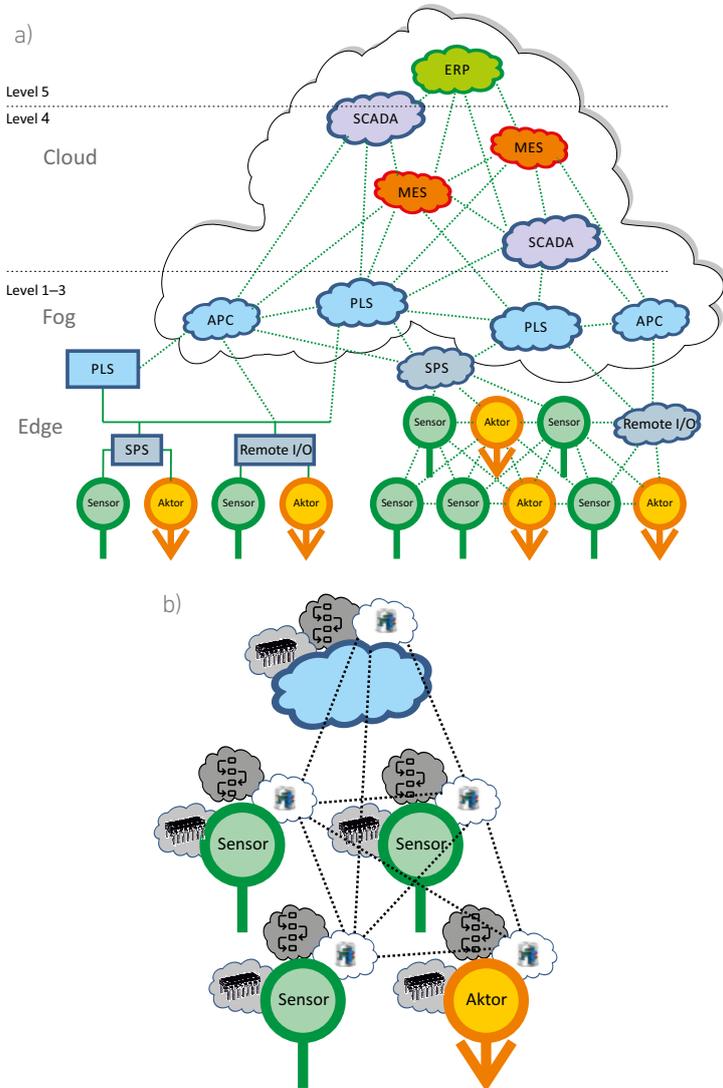
- Eine virtuelle Maschine ist die Software-technische Kapselung eines Rechnersystems innerhalb eines anderen, das heißt, eine reale Rechnerarchitektur oder die eines hypothetischen Rechners wird nachgebildet
- Virtualisierung trennt Software (Betriebssystem, Applikation) von der darunter liegenden Hardware (Server, Speicher)
- Systembasierte virtueller Maschinen ermöglichen mehrere Betriebssysteme gleichzeitig auf der gleichen Hardware oder sie machen Software lauffähig, die ohne VM nicht kompatibel mit der Hardware wäre (etwa VirtualBox oder vSphere)
- Prozessbasierte virtuelle Maschinen stellen eine Laufzeitumgebung bereit, die auf unterschiedlichen Rechnerarchitekturen ausgeführt werden kann (beispielsweise Java-Laufzeitumgebung oder .NET-Framework)
- Betreibt ein Unternehmen eine Vielzahl von Servern (mehr als 10–100), lassen sich durch sinkende Betriebskosten (Administration, Klimatisierung) Konsolidierungsraten von 1:5 bis 1:100 erzielen
- Virtuelle Maschinen entkoppeln den Lebenszyklus von Applikationen von der Hardware und erhöhen die Laufzeit von Systemen. Dieses bedeutet besseren Investitionsschutz.

Scada-Systeme). Sie ist auch für die Automatisierung im Fog- oder Edge-Bereich hochinteressant, wenngleich hier noch weniger Erfahrung vorliegt. Die zunehmende Implementierung von Prozessleitfunktionalitäten und Advanced Process Control auf virtuellen Maschinen wäre ein großer Gewinn und könnte zukünftig noch weiter in die Edge herunterreichen.

### 3.3 Zunehmende IT-Sicherheit im Feld

Die Definition offener und gleichzeitig sicherer Schnittstellen ist eine der größten, wichtigsten und zugleich dringlichsten Aufgaben der Digitalisierung, ohne die es nicht weitergeht. Es reicht nicht aus, abstrakt auf das Mitwachsen von Datenschutzrichtlinien zu verweisen und zu erwarten, dass sich die IT-Sicherheit ständig automatisch mit den Herausforderungen weiterentwickelt. Auch die den Feldgeräten im NOA-Konzept verordnete Datendiode (vergleiche 2) ist eine Hilfsvorstellung, die das Reifegradmodell in Bild 7a auf der zweiten Stufe lässt. Beide Sichtweisen tragen also nicht konstruktiv zur Ausweitung der Digitalisierung der Prozessindustrie bei.

Zur Definition einer sicheren Datenübertragung müssen jetzt prinzipielle Anforderungen und Geschäftsmodelle



**BILD 8:** (a) Verteilte Netzwerke auf Basis smarterer Eigenschaften der Automatisierungskomponenten: Edge und Fog Computing. Zunächst Virtualisierung ab Ebene 3 (PLS) mit klassischer Feldebene (links), später Virtualisierung bis Ebene 2 (SPS) mit vernetzter Feldebene (rechts). (b) Zusammenfassung einzelner Funktionalitäten von Automatisierungskomponenten in der Edge (beispielsweise Rechenleistung, Software/Logik, Datenspeicher) als virtuelle Maschinen, angedeutet für Datenspeicher.

her, denn ohne diese lässt sich keine sichere Architektur gestalten. Einige entgegenstehende Anforderungen sind klar gesetzt: die gesetzliche Anforderung an fast immer höchste IT-Sicherheitsstandards zum Schutz der Infrastruktur der Prozessindustrie, der Wunsch nach Laufzeiten von zwanzig Jahren, nach hoher Flexibilität

als Benefit der Digitalisierung und nach vertretbaren Installations- und Wartungskosten. Da steht ein unvorhersehbares Wettrüsten von aktuell als sicher geltenden Verfahren gegen die Waffen der Hacker dieser Welt an. Nur ein offener Mechanismus, der ständige Hard- und Softwareerweiterungen vorsieht, wäre dazu in der Lage.

### Demilitarisierte Zone

Im ersten Schritt könnten diese Anforderungen als „demilitarisierte Zone“ realisiert werden, die bereits aus der Netzwerkwelt bekannt ist (siehe Kasten demilitarisierte Zone) [20]. Diese ermöglicht eine Netzsegmentierung entsprechend dem individuellen Schutzbedarf. Prinzipiell wären solche Netzsegmentierungen als Funktionalität aller Automatisierungskomponenten denkbar, um die Ausbreitung von Schadsoftware im Automatisierungsnetz zu verhindern. Auch wäre vorstellbar, dass zunächst ein Trust-Center die DMZ betreut, das auch die Aufgabe übernimmt, mögliche Angriffe zu detektieren, zu melden und durch Veröffentlichung der Angriffswege besser zu werden.

## DEMILITARISIERTE ZONE (DMZ)

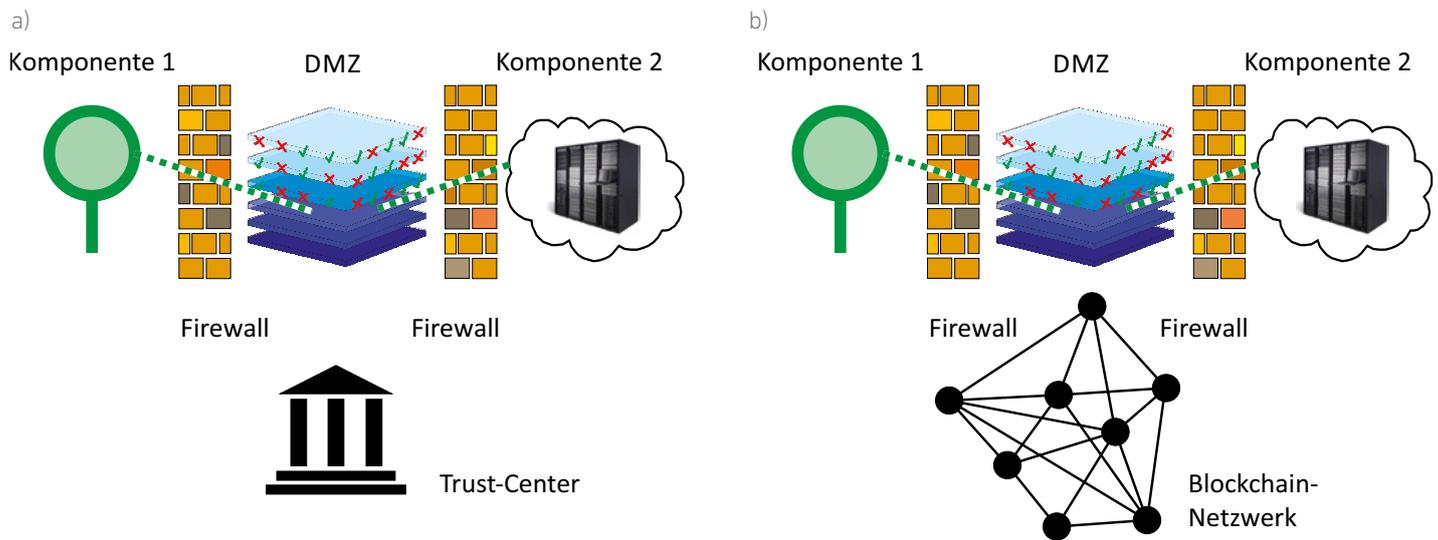
- In Computer-Netzwerken bezeichnet DMZ Computer-Hosts oder kleine Netzwerke, die eine neutrale Zone zwischen dem privaten Netzwerk eines Unternehmens und externen öffentlichen Netzwerken bilden
- Der Begriff lehnt an die geografische Pufferzone an, die von der UN Anfang der 50-er Jahre zwischen Nord- und Südkorea eingerichtet wurde
- Eine DMZ besteht aus zwei Firewalls, die auf der einen Seite viele Datenpakete in die DMZ hereinlässt, andererseits jedoch nur einen aufs Nötigste reduzierten Datentransport ins gesicherte Netzwerk zulässt. Eine direkte Verbindung ist ausgeschlossen
- Im Idealfall sollten bei dieser Lösung die Firewalls von verschiedenen Herstellern stammen um die Wahrscheinlichkeit herstellerbezogener Sicherheitslücken zu minimieren

### Authentisierung und Kryptographie

In unseren Köpfen sieht eine kompromittierte Kommunikationsverbindung immer wie eine offene Tür aus. Die Cyber-Angreifer räumen dann ab, soweit es das System hergibt und öffnen weitere Türen. Es ist aber vorstellbar, dass die Informationen einer Automatisierungskomponente strikt nach Informationsebenen getrennt voneinander vorliegen. Die Vorgehensweise zur Sortierung von Daten könnte nach offenen Standards definiert werden. Sie kann beispielsweise

## REFERENZEN

- [1] Gransche, B., Shala, E., Hubig, C., Alpsancar, S., & Harrach, S. (2014). Wandel von Autonomie und Kontrolle durch neue Mensch-Technik-Interaktionen. Grundsatzfragen autonomieorientierter Mensch-Technik-Verhältnisse.
- [2] Maiwald, M. (2016). Die Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0“ – Chancen für neue Automatisierungskonzepte und neue Geschäftsmodelle. *ATP Plus, Sonderausgabe, 1*.
- [3] OPC Foundation. (2018). *Home*. Abgerufen von: <http://www.opcfoundation.org>
- [4] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2015). *Sicherheitsanalyse Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA)*. Abgerufen von: [https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/Studien/OPCUA/OPCUA\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/DE/Publikationen/Studien/OPCUA/OPCUA_node.html)
- [5] Ladwig, B. (2018). Das smarte Labor braucht einen Kommunikationsstandard. In: *Trendreport 2018 Analysen-, Bio- und Labortechnik. SPECTARIS, Deutscher Industrieverband für optische, medizinische und mechatronische Technologien e.V. (Hrsg.)*. Berlin.
- [6] VDMA Forum Industrie 4.0 und Fraunhofer-Anwendungszentrum Industrial Automation (IOSB-INA) (Hrsg.). (2017). *Industrie 4.0 Kommunikation mit OPC UA – Leitfaden zur Einführung in den Mittelstand*. Abgerufen von: <https://rua.vdma.org/viewer/-/v2article/render/20625194>
- [7] DIN SPEC 91345:2016-04. (2016). Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). DIN: [www.beuth.de](http://www.beuth.de)
- [8] Pötter, T. (2013). Enabling Industrie 4.0. In *NAMUR-Hauptsitzung 2013, Vortrag T. Pötter, Bad Neuenahr, 07.11.2013*.
- [9] Baran, P. et al. (1964). *On Distributed Communications. Dokument RM-3420-PR*. Abgerufen von: [https://www.rand.org/pubs/research\\_memoranda/RM3420.html](https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM3420.html)
- [10] Lee, E. A. (2008). *Cyber Physical Systems: Design Challenges*. Berkeley: EECS Department, University of California.
- [11] Süddeutsche Zeitung. (2018). Als würde man einen neuen Kontinent entdecken. Abgerufen von: <https://www.sueddeutsche.de/digital/digitalisierung-in-deutschland-als-wuerde-man-einen-neuen-kontinent-entdecken-1.4067321>
- [12] NAMUR. (2017). *NAMUR Open Architecture – Erweiterung der bestehenden Ansätze als Grundlage für die effiziente und flexible Umsetzung von Industrie 4.0 in der Prozessindustrie*. Abgerufen von: [https://www.namur.net/fileadmin/media\\_www/fokusthemen/NOA\\_Homepage\\_DE\\_2018-06-20.pdf](https://www.namur.net/fileadmin/media_www/fokusthemen/NOA_Homepage_DE_2018-06-20.pdf)
- [13] NAMUR. (2018). *The Open Group und NAMUR unterschreiben Memorandum of Understanding, um bei offenen Standards für Automatisierungssysteme zu kooperieren*. (2018). Abgerufen von: <https://www.namur.net/de/publikationen/news-archiv/detail/article/the-open-group-und-namur-unterschreiben-memorandum-of-understanding-um-bei-offenen-standards-fuer-au.html> 08.08.2018
- [14] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (2015). *Modulbasierte Produktion in den Prozessindustrien – Auswirkungen auf die Automation, Empfehlungen des AK Modulare Automation zur NE 148 der Namur*. Abgerufen von: [https://www.zvei.org/fileadmin/user\\_upload/Presse\\_und\\_Medien/Publikationen/2015/maerz/White\\_Paper\\_\\_Module-Based\\_Production\\_in\\_the\\_Process\\_Industry\\_-\\_Effects\\_on\\_Automation\\_in\\_the\\_\\_Industrie\\_4.0\\_\\_Environment/ZVEI-White-Paper-Modulare-Automation.pdf](https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/maerz/White_Paper__Module-Based_Production_in_the_Process_Industry_-_Effects_on_Automation_in_the__Industrie_4.0__Environment/ZVEI-White-Paper-Modulare-Automation.pdf)
- [15] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (2015). Industrie 4.0: Die Industrie 4.0-Komponente. In: *ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. zur Hannover Messe 2015*
- [16] Albers, T. (2016). DIMA Dezentrale Intelligenz für modulare Anlagen. In *NAMUR-Hauptsitzung 2014, Vortrag Wago, Bad Neuenahr, 06.11.2016*.
- [17] Bernshausen, J., Haller, A., Holm, T., Hoernicke, M., Obst, M., & Ladiges, J. (2016). Namur Modul Type Package – Definition. *atp Magazin, 58(01-02)*, 72-81. doi:10.17560/atp.v58i01-02.554
- [18] VDI/VDE, NAMUR. (2018). VDI/VDE/NAMUR 2658 Blatt 2 „Automatisierungstechnisches Engineering modularer Anlagen in der Prozessindustrie. VDI: [www.vdi.de](http://www.vdi.de)
- [19] ARC Advisory Group (2015). Maturity Model. In: *ARC White Paper. Process Automation and the IoT: Yokogawa's Vigilant Plant Approach to the Connected Industrial Enterprise*. Abgerufen von: <https://web-material3.yokogawa.com/arc-iiot.pdf>
- [20] Klaer, R.-H., Wagner, A., Maiwald, M., 100 % Digital – Tutzing-Symposium Teil 3: Intelligente Nutzung von Daten und Bausteinen der Digitalisierung, CITPlus, 9/2018, S. 6-9
- [21] Lemke, L. (2018). Development Communications KROHNE Messtechnik GmbH. pers. Diskussion
- [22] Schmieder, J. (2018). *Rechnen am Rand*. Abgerufen von: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/edge-computing-rechnen-am-rand-1.4076498>
- [23] FAR-EDGE. (2018). *Factory Automation Edge Computing Operating System Reference Implementation*. Abgerufen von: <http://www.faredge.eu>
- [24] Eliot, L. (2018). *Edge Computing for AI Self-Driving Cars*. Abgerufen von: <https://aitrends.com/ai-insider/edge-computing-ai-self-driving-cars/>
- [25] Opto 22. (2006). *Understanding Programmable Automation Controllers (PACs) in Industrial Automation*. Abgerufen von: [https://www.automation.com/pdf\\_articles/Understanding\\_PACs\\_in\\_Industrial\\_Automation.pdf](https://www.automation.com/pdf_articles/Understanding_PACs_in_Industrial_Automation.pdf)
- [26] Akoglu, A., Sreeramareddy, A., & Josiah, J. G. (2009). FPGA based distributed self healing architecture for reusable systems. *Cluster Computing, 12(3)*, 269-284



**BILD 9:** (a) Segmentierung der Netzwerkkomponenten durch demilitarisierte Zonen (DMZ) unter Aufsicht eines Trust-Centers. Unterscheidung von Datenschichten analog RAMI-Modell. (b) Möglicher Übergang der Funktion eines Trust-Centers in einer DMZ auf ein verteiltes Blockchain-Netzwerk.

## AUTHENTIFIZIERUNG UND KRYPTOGRAPHIE

- Alle Automatisierungskomponenten dürfen nur von authentisierten Benutzern oder Diensten bedient werden
- Es wird zwischen den Authentisierungsmerkmalen Wissen (Passwort, PIN), Besitz (Token, Smartcard, Zertifikat) und körperlichen Merkmalen (Fingerabdruck, Iriserkennung) unterschieden. Die Sicherheit wird durch Verwendung mehrerer Merkmale erhöht, etwa der Zwei-Faktor-Authentisierung mittels Token und Passwort
- Anforderungen sind teilweise reguliert (Störfallverordnung) und sollten organisatorischen Anforderungen entsprechen
- Kryptographische Algorithmen (Hashfunktion, symmetrische oder asymmetrische Verschlüsselung) sollten dem Stand der Technik entsprechen (beispielsweise BSI TR-02102)

## BLOCKCHAIN-TECHNOLOGIE

- Das Blockchain-Konzept kann mit einem dezentral geführten Buchführungssystem verglichen werden, in dem Konsens zum letzten Zustand der Buchführung erzielt wird, auch wenn viele Teilnehmer an der Buchführung beteiligt sind
- Unabhängig vom Inhalt bauen spätere Transaktionen auf früheren Transaktionen auf und bestätigen die Fortschreibung als korrekt, indem sie die Kenntnis der früheren Transaktionen beweisen
- Existenz oder Inhalt früherer Fortschreibungen können nicht geändert oder gelöscht werden, da alle nachfolgenden davon betroffen wären. Dieses würden andere Teilnehmer der dezentralen Buchführung durch Inkonsistenzen mit ihren Aufzeichnungen erkennen
- Generell ermöglicht eine Blockchain die Erzielung von Einigkeit in dezentral verteilten Netzwerken

erfolgen wie für die Informationsebenen im RAMI-Modell [7]. Informationen und Softwarekomponenten könnten getrennt werden nach Messdaten, Firmware-Daten, Modellen, Verbrauchsdaten, Kontextinformationen, Betriebsdauer, Kalibrierung et cetera. Für alle Informationsebenen wären vom jeweiligen Datenbesitzer Freigaben als Verbindung der RAMI-Koordinaten notwendig, gewissermaßen Häkchen in der Würfelmatrix von RAMI. Risikobasiert könnten die Freigaben durch technische Authentisierungsmaßnahmen oder kryptographische Algorithmen (vergleiche Kasten Maßnahmen zur Authentifizierung und Kryptographie) bis zum jeweiligen Kommunikationspartner abgesichert sein – bis hin zur End-to-end-Hardwareverschlüsselung. Auch hier könnten Trust-Center bei dieser Tätigkeit unterstützen.

#### **Perspektive Blockchain**

Die neuen Geschäftsmodelle des Internet haben derzeit Hochkonjunktur, seien es Internethändler, Suchmaschinen oder soziale Netzwerke, die keine eigenen Produkte haben, sondern an dem Handel mit den Daten ihrer Nutzer verdienen. Wer es aufmerksam beobachtet, erkennt in der Blockchain-Technologie (vergleiche Kasten Blockchain-Technologie) derzeit die Basis für die „Rück-Demokratisierung“ des Internets, da sie die Dienstleister-Giganten überflüssig macht.

Übertragen auf die Automatisierungsnetzwerke könnten Blockchain-Technologien auch für eine sichere unmittelbare Kommunikation sorgen, die ohne zentrale Orchestrierung oder Trust-Center auskommt. Dazu ist in Bild 9 beispielhaft der Übergang der Funktion eines Trust-Centers in einer DMZ auf ein verteiltes Blockchain-Netzwerk skizziert.

#### **SCHLUSSSATZ**

Die Umsetzung der Digitalisierung erfordert den Aufbau neuer Fähigkeiten, Investition in Talente und ein erhebliches Veränderungsmanagement, das die gesamte Organisation abholt. Die Prozessindustrie steht vor Veränderungen, die über einen langen Zeitraum hinweggehen. Diese erfordern einen ausgeprägten Forschungs- und Gestaltungsbedarf. Digitalisierung ist nicht im Alleingang möglich, sie kann nur gemeinsam mit allen Beteiligten gestaltet werden.

## **DANKSAGUNG**

Ich bedanke mich bei sehr vielen Expertinnen und Experten – insbesondere der Namur AKs 3.6, 3.6.3 und 3.7 sowie meinen BAM-Kolleginnen und Kollegen – sehr herzlich für die interessanten Diskussionen, die zum dargestellten Bild beigetragen haben. Ebenso bedanke ich mich für den fachlichen Austausch mit Stefan Benk, Phoenix Contact Electronics GmbH, Michael Kloska, BASF SE, und Lars Lemke, Krohne Messtechnik GmbH.

## **AUTOR**



Dr. habil. **MICHAEL MAIWALD** (geb. 1967) hat an der Ruhr-Universität Bochum Chemie studiert und dort mit einer Promotion im Fach Physikalische Chemie abgeschlossen. Nach Aufbau und Leitung einer Arbeitsgruppe für NMR-Spektroskopie am Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik an der Uni

Stuttgart wechselte er einige Jahre als Laborleiter in die Zentrale Forschungsanalytik der Merck KGaA nach Darmstadt. Seit 2008 ist er Fachbereichsleiter „Prozessanalytik“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin. 2012 habilitierte er sich für das Fach im Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Kaiserslautern. Er wirkt aktiv in Arbeitskreisen des DIN und der DKE, IEC und NAMUR mit und baut derzeit den NAMUR Arbeitskreis 3.7 „Smarte Sensorik, Aktorik und Kommunikation“ auf. Von 2013–2016 war er Vorsitzender des Arbeitskreises Prozessanalytik der GDCh und DECHEMA. Die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh) hat Michael Maiwald als Fresenius-Lecturer für 2018–2019 ernannt.

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM),  
Richard-Willstätter-Straße 11,  
12489 Berlin,  
Tel. + 49 (0) 30 81 04 11 40,  
E-Mail: michael.maiwald@bam.de**