



VDE

VDI/VDE-Gesellschaft
Mess- und Automatisierungstechnik



Thesen und Handlungsfelder

Technologie–Roadmap
„Prozesssensoren 4.0“

November 2015

Vorwort

Mit den Technologie-Roadmaps „Prozesssensoren 2005–2015“ [1] (2006) und „Prozesssensoren 2015+“ [2] und [3] (2009) wurden Grundlagen für alle Unternehmen der Prozessindustrie geschaffen, um zielgerichtet auf Kundenbedürfnisse der Prozessindustrie zugeschnittene Produktentwicklungen, technologische Weiterentwicklungen und Forschungsprojekte zum Erfolg zu bringen. Die Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ fand große Akzeptanz aufgrund der soliden Betrachtung der Prozesse und der daraus abgeleiteten Thesen. Diese Aussagen haben in vollem Umfang weiterhin Gültigkeit. Im Rückblick auf die damals formulierten Entwicklungsziele wurden viele dieser Ziele im prognostizierten Zeithorizont auf den Weg gebracht und teilweise bereits umgesetzt. In dieser Technologie-Roadmap werden einige Beispiele dazu aufgezeigt.

Derzeit finden gravierende Veränderungen im Umfeld der Informations- und Kommunikationstechnik statt, die eine große Chance für die optimierte Prozessführung und Wertschöpfung mit darauf abgestimmten vernetzt kommunizierenden Sensoren bieten. Diese Art „smarter“ Sensoren stellen Dienste innerhalb eines Netzwerks bereit und nutzen Informationen daraus. Dadurch ergibt sich aktuell die Notwendigkeit, die Anforderungen an Prozesssensoren sowie an deren Kommunikationsfähigkeiten detaillierter zu beschreiben – vom einfachen Temperatursensor bis über heute in Entwicklung befindlichen Messsystemen hinaus –, da diese Technologieentwicklungen

rasant voranschreiten. Vernetzte Sensoren sind die Voraussetzung für die Realisierung von Cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) [4] und zukünftiger Automatisierungskonzepte für die Prozessindustrie, wie sie auch durch das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ adressiert werden.

Die Technologie-Roadmap liefert darüber hinaus Perspektiven für Forschungs- und Entwicklungsförderung und gibt Ansätze für die Normungsarbeit. Sie wird damit auch für Politik, Industrieverbände und Gremien von Interesse sein. Wenn sich die Exzellenz der Forschung und das ausgeprägte Know-how der Gerätehersteller und Anwender zu Forschungskonsortien auf Augenhöhe zusammenschließen und das Wissen gemeinsam vorangebracht wird, kommen faire und gut durchdachte Technologietransferprojekte mit Sicherheit zum Erfolg. Neben der technologischen Weiterentwicklung der Prozesssensoren ist von Herstellern und Anwendern die hohe Verfügbarkeit der komplexen Technologie sicherzustellen, damit weiterhin Vertrauen in die Technik besteht – vom Anwender bis ins Management.

Allen an der Neufassung der Technologie-Roadmap Beteiligten sei an dieser Stelle nochmals herzlicher Dank ausgesprochen. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Maiwald von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), der auch bei dieser Fassung die Moderation des Projektteams übernommen hatte.

Düsseldorf im November 2015



Dr.-Ing. Kurt D. Bettenhausen
Vorsitzender der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)



Dr.-Ing. Wilhelm Otten
Vorsitzender der NAMUR – Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie e.V.

Inhalt

Vorwort	1
1 Zusammenfassung – Motivation, Ziel und Ergebnisse	3
2 Industrie 4.0 – Einfluss auf Denken und Handeln von Menschen in Gesellschaft und Unternehmen	5
3 Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“	7
3.1 Basis –Anforderungsblätter der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“	8
3.2 Thesen und übergreifenden Entwicklungsziele der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“	8
3.3 Trends der verschiedenen Technologien	10
4 Nutzen der Anwendung von Prozessanalysetechnik und smarten Sensoren in verfahrenstechnischen Produktionsanlagen	11
4.1 Nicht qualitätsoptimierte klassische Rezeptfahrweise von Produktionsprozessen	11
4.2 Smarte Sensoren in allen Schritten der Produktionsprozesse	11
4.3 Drei typische Produktionsverfahren in der Prozessindustrie	13
4.4 Warum Industrie 4.0 auch in die Prozessindustrie Einzug halten wird	14
5 Beispielszenarien für Sensoren 4.0 in der Prozessindustrie	16
5.1 Optimierungsszenario 1 –Revisionsplanung am Beispiel Regelventile	16
5.2 Optimierungsszenario 2 – Multi-purpose-Destillations-Teilanlagen führen zur Erhöhung der Anlagenflexibilität	16
5.3 Optimierungsszenario 3 – Rohstoffeinkauf und Produktverkauf	17
6 Anforderungen an Prozesssensoren 4.0	19
6.1 Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit	19
6.2 Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen	20
6.3 Traceability und Compliance	21
6.4 Virtuelle Beschreibung	21
6.5 Interaktionsfähigkeit und Bidirektionalität	22
7 Der Weg von der aktuellen Automation zum smarten Sensor	23
7.1 Ausgangslage	23
7.2 Perspektive 1 – Vereinfachte Bedienung mit mobilen Endgeräten	24
7.3 Perspektive 2 – Neue Services durch Cloud-Dienste	25
7.4 Perspektive 3: Neue Automatisierungs-Topologien	25
8 Thesen 4.0	27
8.1 Thesen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“	27
8.2 Neue Thesen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 4.0“	27
Über die Technologie-Roadmap	28
Projektgruppe „Technologie-Roadmap“	29
Literatur	30

1 Zusammenfassung – Motivation, Ziel und Ergebnisse

Die Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 4.0“ ist eine Weiterentwicklung der im Vorwort genannten Technologie-Roadmaps und fokussiert sich im Kernpunkt auf die Erfassung von physikalischen und chemischen Messgrößen mittels spezifischer und unspezifischer Sensoren, die der Steuerung und dem Verständnis von Prozessen dienen. Der Titel „Prozesssensoren 4.0“ nimmt direkt Bezug auf die aktuellen Veränderungen, die durch das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ initiiert wurden (Abschnitt 2).

Als viertgrößte Branche in Deutschland (nach Umsatz) erwirtschaften die Unternehmen aus Aluminium-, Chemie-, Pharma-, Öl-, Gas-, Papier-, Zellstoff-, Glas-, Stahl-, Zementindustrie betriebswirtschaftlich optimierte und zielqualitätsorientierte Produkte mit innovativer Prozesssensorik. Durch direkte Erfassung von quantitativen und qualitativen Substanzenkonzentrationen und Zusammensetzungen im Prozess ermöglichen Prozesssensoren die Überwachung von Rohstoffen, Zwischen- und Endprodukten in deren Prozessen.

Es standen zunächst chemische und pharmazeutische Prozesse im Vordergrund, die sich durch ihre besondere Komplexität auszeichnen (insbesondere durch Umgang mit Flüssigkeiten und Gasen unter besonderen Bedingungen). Die Betrachtungen gelten jedoch uneingeschränkt auch für weitere Segmente der Prozessindustrie, z. B. Lebensmittel, Wasser und Energie.

Als Basis für die Erweiterung der Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ werden heutige und zukünftige Prozesse angesehen, von denen diese Messanforderungen ausgehen. So war – wie sich aus den verschiedenen Diskussionen und dem gesammelten Feedback im Nachgang der Veröffentlichung 2009 bis heute ergab – die solide Betrachtung der Prozesse eine wichtige Grundlage für die Akzeptanz der Roadmap „Prozesssensoren 2015+“. Abschnitt 3 spiegelt die Bewertung der 2009 gemachten Kernaussagen aus heutiger Sicht und bewertet diese neu. Bei der Überarbeitung wurde ein Weg gewählt, der einerseits die Grundlagen dieser breiten Basis beibehält, gleichzeitig aber den Fokus auf Neues legt, denn eine Roadmap hat visionäre Aspekte ohne Beschränkung aufzunehmen, ohne sich durch eine klassische Denkrichtung festzulegen. Als Zeithorizont für die erneute Überarbeitung ist eine Betrachtung von fünf Jahren und darüber hinaus angestrebt.

Während der Fokus in den Vorgänger-Roadmaps praktisch ausschließlich auf die technischen Anforderungen

an Sensoren und ihre Funktionsprinzipien lag, wurde als eine wichtige Ergänzung gesehen, nun auch den Nutzen von Sensoren (Abschnitt 4) sowie deren Kommunikationsmöglichkeiten detaillierter zu beschreiben. Dies reicht von den klassischen Sensoren bis hin zu den innovativen, da die Sensortechnologie rasant weiter voranschreitet. Gleichzeitig wurde erkannt, Schritte in Richtung Vereinfachung und Standardisierung einzuschlagen, denn Sensorik an einer Anlage kann heute mehrere hundert einstellbare Parameter erfordern. Die drastische Vereinfachung der Benutzung von „komplizierten“ Sensoren mit „Plug and Play“ bzw. „smarten“ Sensoren eröffneten völlig neue Möglichkeiten für die Prozess- und Betriebsführung. Smarte Sensoren messen mehrere Messgrößen, kalibrieren und optimieren sich selbst, sind leicht in Anlagen und Automatisierungslandschaften in variablen Topologien zu integrieren und erhalten ihren Betrieb selbstständig.

Die Realität nahm seit der letzten Aktualisierung 2009 einen noch nicht vorherzusehenden Lauf hinsichtlich der Gestaltung smarter Sensoren als Cyber-physische Systeme (CPS) [4]. Dies ist zugleich eine enorme Chance: Themen wie „Industrie 4.0“ [5]; [6]; [7] „Dezentrale Automation“ [8] oder „Factories of the Future“ [9] entfalten derzeit eine bedeutende Dynamik. Technologische Entwicklungen aus den Nachbarbranchen IT- und Medizintechnik eröffnen neue Möglichkeiten für die Prozesssensorik. Neuartige Sensorkonzepte oder miniaturisierte Bauelemente mit extrem niedriger Preisstellung und Anwendungs- und Konfigurations-Software für Smartphones und Tablets lassen eine massive Erniedrigung der Hemmschwelle bei der Beschaffung und beträchtlich häufigere Implementierung von Prozesssensoren erwarten. Industrie 4.0 wird den Wechsel von starren, vorgedachten, hierarchischen Produktionssystemen zu dynamischen, ad hoc wandlungsfähigen, selbstkonfigurierenden und selbstoptimierenden, integrierten und intelligent vernetzten Systemen und Prozessen in der Produktentstehung und über den gesamten Lebenszyklus von Produkten und Produktionsmitteln verwirklichen. Abschnitt 5 gibt einige Beispielszenarien für Sensoren 4.0 in der Prozessindustrie.

Derartige Szenarien mussten im Rahmen der Überarbeitung dringend eingegliedert werden, da die genannten Entwicklungen unweigerlich Einzug in die Automatisierungslandschaft [10] nehmen werden oder bereits genommen haben. Wie geht man mit der Einbindung und Kalibrierung der neuen Prozesssensoren um, ohne auf Sicherheit und Robustheit verzichten zu

müssen? Lassen sich neue Konzepte entwickeln, um den durch die anwachsenden Stückzahlen zukünftiger Sensoren vervielfachten Kalibrier- und Instandhaltungsaufwand abzudecken? Abschnitte 6 und Abschnitt 7 nennen die Anforderungen an smarte Sensoren und zeigen mögliche, konkrete Umsetzungsperspektiven – ausgehend von der heutigen Ausgangssituation. Um den Fokus auf Prozesssensoren und Anforderungen an sie zu richten, wurde das Thema IT-Sicherheit nicht speziell aufgegriffen. Es wird davon ausgegangen, dass sich die IT-Sicherheit adäquat mit den Anforderungen weiterentwickeln wird.

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist eine Chance: Eines Tages könnte die starke Individualisierung der Produkte für die Kunden ohne Einschränkungen der Produktqualität bewältigbar sein. Weit darüber hinaus werden sich weitere bedeutende Perspektiven und Erfolgsfaktoren eröffnen, z. B. Ressourcen- und Energieeffizienz, urbane Produktion, Bewältigung des demografischen Wandels, Begegnung des Fachkräftemangels oder Verbesserung der Work-Life-Balance.

Die Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 4.0“ zeigt die Voraussetzung der Prozesssensoren für die zukünftigen Automatisierungskonzepte auf, wie sie u. a. durch Industrie 4.0 adressiert werden. Dabei wurde entlang zweier Leitfragen vorgegangen: „Was kann der Prozesssensor zu Industrie 4.0 beitragen?“ und „Welche Vorteile bringt Industrie 4.0 für den Prozesssensor?“ Trotz des direkten Bezugs zu den Automatisierungskonzepten anderer Disziplinen liegt der Schwerpunkt auf der Betrachtung der Prozesssensoren.

Trotz der neuen Anforderungen im Umfeld von Industrie 4.0 hat die Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ in vielen Punkten ihre Aktualität nicht verloren und insbesondere hat ihre Basis in den

Prozessen weiterhin Gültigkeit. Dieses spricht für die gute Basis und die nachhaltige Betrachtungsweise. Es wurde daher angestrebt, die Roadmap „Prozesssensoren 4.0“ neben die weiter bestehende Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ zu setzen und die Industrie-4.0-Idee sowie alle daraus entstehenden Anforderungen in Mittelpunkt der Ergänzung zu stellen.

Die übergreifenden Aussagen der Technologie-Roadmaps sind sehr komprimiert in Form von Thesen zusammengefasst. Zu den 13 bestehenden Thesen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ (siehe Abschnitt 8.1) treten vier ergänzende **Thesen** hinzu:

- XIV Industrie 4.0 führt zu erheblichen Veränderungen im Denken und Handeln der Menschen in Gesellschaft, Industrie und Wirtschaftsräumen. Smarte Prozesssensoren werden diese Entwicklung mit neuen Funktionalitäten stark beeinflussen.
- XV Die stark vereinfachte Integration der Prozesssensoren in Netzwerke und ihre Interaktion mit weiteren Informationen führen zu (selbst-) organisierten Systemen und verbessern die Produktion.
- XVI Die Kommunikation aller Prozess Sensoren erfolgt über standardisierte und sichere Schnittstellen- und Datenformate.
- XVII Smarte Prozesssensoren sind wichtige Bestandteile von Cyber-physischen Produktionssystemen (CPPS) und ermöglichen neue Geschäftsmodelle für Anwender, Gerätehersteller, Dienstleister.

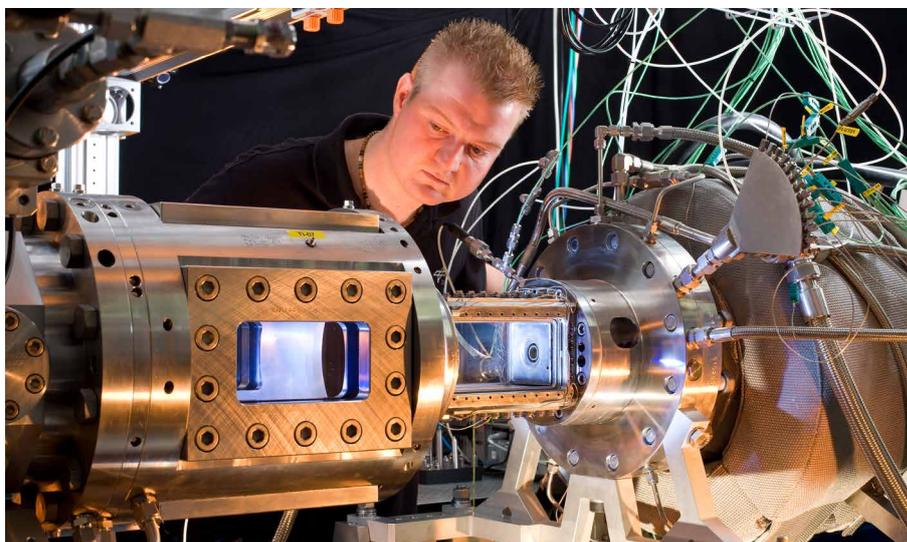


Bild 1. Prozesssensorik in einem Hochdruckverbrennungsprüfstand (Quelle: Thomas Ernsting/LAIF)

2 Industrie 4.0 – Einfluss auf Denken und Handeln von Menschen in Gesellschaft und Unternehmen

Der Einfluss von Entwicklungen im Bereich der Informations- und Kommunikations-Technologie (IKT) hat die moderne Gesellschaft verändert. Die junge Generation ist immer online und jederzeit verfügbar. Überall im privaten Leben gibt es für spezielle Anwendungen kleine Programme – die sogenannten Apps –, die das Internet der Dinge und der Services in allen erdenklichen Kombinationen nutzen. Somit sind die im Zukunftsprojekt Industrie 4.0 beschriebenen CPS im Alltagsleben bereits Realität. Die junge Generation ist flächendeckend mit diesen Dingen aufgewachsen und empfindet Smartphones, Tablet-Computer, Apps und deren Dienste als selbstverständlich. An dieser Stelle sei bemerkt, dass das iPad® der Firma Apple Inc. erst seit 2010 auf dem Markt ist [11] und in äußerst kurzer Zeit Maßstäbe gesetzt hat. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor war hier die Kombination von Rechenleistung mit der Einfachheit und Intuition der Bedienung, die schnell zur Selbstverständlichkeit geworden ist.

Die Einfachheit der Implementierung und Löschung von Apps ermöglicht den Nutzern mehr Experimentierfreude (Trial & Error) bei gleichzeitigem (scheinbar) verantwortungsbewusstem Umgang mit den smarten Geräten. Industrien, Gesellschaften und Wirtschaften, bei denen in der Zukunft diese moderne Art zu arbeiten – und zu denken – nicht vorkommt, werden das Nachsehen in dieser global vernetzten Welt haben.

Das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 ist die konsequente Übersetzung dieser global vernetzten Welt in das industrielle Umfeld. Es kann zu Recht als eine neue industrielle Revolution gesehen werden. Die Integration von modernen Sensoren der Prozessindustrie in CPPS wird den Automatisierungstechnikern jedoch einen ebenso revolutionären Kulturwandel abverlangen.

Warum ist dieser Kulturwandel so umwälzend? Zum einen ist die Prozessindustrie gegenüber der Fertigungsindustrie in der Welt der Automatisierungstechnik ausgesprochen konservativ. Mit gewissem Stolz werden Lebenszyklen der Produktionsanlagen von 30 bis 50 Jahren erwähnt, während Automobilfabriken alle 3 bis 5 Jahre komplett umgebaut werden. Daneben besteht ein weiterer Hintergrund: Die Gesellschaft toleriert keinerlei Störfälle in der Prozessindustrie. Die „Seveso-III-Richtlinie“ [12] und Störfallverordnung [13] haben aus gegebenen Anlässen die Auto-

omatisierungstechnik geprägt. Die Automatisierungstechniker haben die sicherheitstechnischen Anforderungen mit konservativer Instrumentierung und Automatisierung erfüllt.

Hier lohnt ein Blick in die Kfz- und Flugzeugtechnik: Bereits in Mittelklassefahrzeugen werden smarte Sensoren (Kameras mit Bilderkennung) zur Erkennung der Geschwindigkeitsbegrenzung eingesetzt. Zusatzinformationen von anderen Sensoren (Regensensor) werden genutzt, um die Entscheidung zu treffen, welche Geschwindigkeitsbegrenzung gilt: Die mit oder ohne dem Zusatzzeichen „bei Nässe“. Sensoren werden für andere Zwecke mitgenutzt, z. B. die ABS-Radsensoren zur Überwachung von Druckverlust in den Rädern. Aber auch kritische Funktionen werden in Fahrzeugen bereits eingesetzt. Das autonome Fahren wird bereits ernsthaft diskutiert. Im Flugzeug ist „fly by wire“ selbstverständlich, und Autopiloten können Flugzeuge unter bestimmten Voraussetzungen automatisch landen. Die Gesellschaft duldet auch technisches Versagen von Kfz und Flugzeugen nicht – und dennoch ist es der Branche gelungen, modernste Technik zu etablieren, wie es noch vor kurzem undenkbar gewesen wäre.

Diese Kreativität ist einerseits vom Wettbewerbsdruck getrieben, andererseits von der großen Stückzahl. Während Sensoren für Kraftfahrzeuge millionenfach produziert werden, kommen solche für Prozessanlagen heute in der Regel auf kleinere Stückzahlen und müssen den individuellen Einsatzbedingungen angepasst werden. Das Verhältnis des Entwicklungsaufwands für diese beiden Arten von Sensoren ist sehr verschieden. Dies wird sich in Zukunft jedoch ändern. In der Prozessindustrie werden Anlagen künftig weniger individuell ausgelegt, sondern vermehrt modular aufgebaut. Die Module können vereinheitlicht werden inklusive eines Großteils der enthaltenen Sensoren. Die Module werden außerdem CPPS beinhalten und autark werden. Der Entwicklungsaufwand für Sensoren in CPPS wird sich zukünftig eher lohnen. Einen Weg dazu zeigt das White Paper „Modulbasierte Produktion in der Prozessindustrie – Auswirkungen auf die Automation im Umfeld von Industrie 4.0 auf, das vom ZVEI im Februar 2015 veröffentlicht wurde [14].

Neben diesem technologischen Kulturwandel ist der Prozessindustrie noch eine weitere Aufgabe gestellt. Sie wird die geeigneten Fach- und Führungskräfte

zukünftig im Wettbewerb mit anderen Branchen gewinnen müssen. Aufgrund der zukünftigen demografischen Entwicklung in Mitteleuropa dürfte die Verpflichtung junger Ingenieurinnen und Ingenieure eine besondere Herausforderung werden, insbesondere im Wettbewerb zu den stark markengeprägten Automobilunternehmen und Unternehmen der Informationstechnologie, die beim Nachwuchs mit weitem Abstand zu den attraktivsten Arbeitgebern zählen. Die Prozessindustrie muss es schaffen, jungen Fachkräften ein attraktives und modernes Arbeitsumfeld zu bieten, so wie sie das aus dem Konsumbereich mit ihren kurzen Innovationszyklen gewohnt sind. Dabei ist die Aufgabe gestellt, die Balance zwischen Kreativität einerseits und Erfüllung sicherheitstechnischer Anforderungen andererseits zu wahren.

Cyber-physische Produktionssysteme haben mit jungen Fachkräften etwas gemeinsam: Es wird eifrig und bereitwillig Informationen mitgeteilt. Insofern werden Unternehmen sich zu entscheiden haben, wie sie es wagen wollen, ihr Know-how über Verfahrenstechnik, Applikationen von Sensoren und Instandhaltung zu teilen und dadurch innovativer und schneller am Markt zu sein. Bei der Definition der Informationsschichten (siehe Abschnitt 1) wird bei der Rechtevergabe zu berücksichtigen sein, dass nur eine festgelegte Auswahl an Informationen geteilt werden kann und der sensible und sicherheitsrelevante Teil nicht geteilt werden kann. Dieses bedingt auch die Entscheidung zwischen einer Rückwärtsverteidigung mittels Patenten und Gerichtsprozessen und einer Vorwärtsverteidigung, die darauf vertraut, u. a. mittels klugem Informationsaustausch den Anderen immer ein Stück voraus zu sein.

Neben dem ungeheuren Wandel, den Industrie 4.0 in der Gesellschaft erzeugen wird, wird es beispielsweise auch in der Hochschullehre zu Veränderungen kommen. Speziell bei der Ausbildung von Prozessanalytikern führt die ungeheure Menge an verfügbarer Information zu einer Menge an Lehrinhalten in der Hochschullehre, die die Studierenden zu oberflächlichem Lernen verführt. Studierende bekommen immer mehr Wissen vermittelt, sind aber zunehmend weniger in der Lage, das Gelernte in die Praxis umzusetzen. Zusätzlich zur reinen Informationsvermittlung und der nach wie vor sehr wichtigen Schulung von Fachkompetenz sind auch Problemlösungsfähigkeiten zu üben und das eigene Lernen zu thematisieren.

Praxisbeispiel NIR-Spektrometer aus einer Crowdfunding-Initiative

In der Sensorik werden wir schon bald vor Entscheidungen wie diese gestellt werden:

Ein Unternehmen hat im Rahmen eines Crowdfunding-Projekts ein NIR-Spektrometer in Form eines größeren USB-Sticks entwickelt. Dieses sendet das Spektrum per Bluetooth an das Smartphone und von dort auf einen Cloud-Server. Über diesen werden die Daten ausgewertet und das Ergebnis wieder zurück auf das Smartphone übertragen. Mit einem Developer-Kit kann man mit eigenen Spektren zu der Datenbasis beitragen.

250 € und die Daten teilen oder 100.000 € für ein Prozess-Spektrometer mit traditioneller Applikation?

Die wachsende Komplexität hat für das Fachgebiet zur Folge, dass Problemstellungen immer häufiger nur in Zusammenarbeit mit Personen aus anderen Fachbereichen gelöst werden können. Team-, Kommunikations- und Konfliktfähigkeit, Ausdauer, Belastbarkeit und Selbstorganisation spielen dabei eine zunehmend wichtige Rolle. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Ingenieuren und Informatikern ist hierbei von besonderer Bedeutung. Dabei wird das Format der traditionellen Vorlesung mehr und mehr ergänzt durch EDV-unterstützte Lernarrangements, die den Studierenden erlauben, sich aktiv einzubringen.

Diese fachübergreifenden Kompetenzen können für die Studierenden nicht einfach vorausgesetzt werden. Sie sind gezielt zu fördern!

Zusammenfassend kann man sagen, dass Industrie 4.0 mit ihren CPS und damit verbunden exponentiell zunehmenden Sensorik zu erheblichen Veränderungen im Denken und Handeln der Menschen in Gesellschaft, Industrie und Wirtschaftsräumen führen wird. Unternehmen, die sich dieser Entwicklung nicht stellen, werden es in der Zukunft sehr schwer haben, Nachwuchs aus der jungen Generation zu rekrutieren und wirtschaftlich erfolgreich zu sein.

Daraus lässt sich folgende **These** formulieren: „Industrie 4.0 führt zu erheblichen Veränderungen im Denken und Handeln der Menschen in Gesellschaft, Industrie und Wirtschaftsräumen. Smarte Prozesssensoren werden diese Entwicklung mit neuen Funktionalitäten stark beeinflussen.“

3 Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“

Technologie-Roadmaps sind nützlich zur Navigation von technologischen, ökonomischen, politischen und gesellschaftlichen Entwicklungswegen. Sie vereinen technologische und kommerzielle Erkenntnisse und liefern eine Orientierungskarte mit sinnvollen und lohnenden Wegen in die Zukunft. Eine neue Technologie hat die beste Zukunft, wenn die Wünsche der Anwender mit technologischen Möglichkeiten zusammengebracht werden. Da Forschungs- und Entwicklungsstrategien einen nicht unbeträchtlichen Vorlauf haben, muss rechtzeitig vorausgedacht werden. Die vielversprechenden Wege der Technologie-Roadmaps weisen zu jenen Entwicklungsprojekten, an die wegen laufender Projekte noch niemand denkt.

Die Thesen und Anforderungsblätter der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ bilden auch heute noch eine solide Basis für neue Sensorsysteme und demonstrieren das große Innovationspotenzial in der Prozessindustrie und ihrer Zulieferer. Seit der Erstveröffentlichung waren bis 2010 bereits mehr als 70 Fachveröffentlichungen und Präsentationen erschienen [15]. Dieser Trend setzt sich weiter fort. Die Technologie-Roadmap hat einen Innovationswettbewerb gezündet. Nach Aussagen der beteiligten Gerätehersteller wurden bis heute mehr als 30 Markteinführungen mit konkretem Bezug zur Roadmap sowie weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte in einem vergleichbaren Umfang initiiert. Dieses ist erfreulich, da eine Geräteentwicklung im Mittel fünf bis sieben Jahre dauert. Der konkrete Bezug auf die Roadmap in der Forschungslandschaft, z. B. bei Fördereinrichtungen oder die Integration der Thematik in Forschung und Lehre sind derzeit nur schwer recherchierbar und konkret zu belegen – sie sind aber enorm wichtig. Als Beispiel dienen die Projektauftrufe SPIRE-1 bis -4 [16] im Rahmen des HORIZON2020 der Europäischen Union.

Auf der Grundlage der ersten Roadmap haben sich nach Aussagen verschiedener Sensorikhersteller bereits eine Reihe konkreter Entwicklungen und Anwendungen ergeben. Nachfolgend einige ausgewählte Beispiele für erreichte Entwicklungsziele und eingetretene Szenarien aus der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“:

- n Besonders im Bereich Biotechnologie ist ein starkes Wachstum des Markts zu verzeichnen, im Speziellen bei Biodisposables (15 % bis 20 % Wachstumsprognose). → These IX
- n Die Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ ist in viele strategische F&E-Pläne eingeflossen. Dabei war die Roadmap ein sehr starkes unter allen anderen Marketinginstrumenten.

- n Die Thesen und Anforderungsblätter der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ sind Grundlage für die Entwicklung neuer bzw. verbesserter Sensorsysteme. Besondere Bedeutung haben die These I „höhere Robustheit und Langzeitstabilität“, These II „Sensoren zur Optimierung bestehender Anlagen“, These III „Informationen zu Zwischen- und Trendinformationen“, These IV „höhere Genauigkeit“, These XI „Komponenten in Gasen mit immer niedrigeren Erfassungsgrenzen“ und These XIII „Trend zu Inline-Messungen“.

- n Bei den Umsetzungsbeispielen geht der Trend sowohl zu „höherwertigen“ Prozessgrößen (Analytik, Diagnose) als auch zu robusten und genauen Messungen in der Prozessumgebung.

- n Temperatur-Messumformer erweiterten Diagnosemöglichkeiten → These I

Eine Sensorredundanz-Umschaltung erhöht die Messstellenverfügbarkeit. Fiel früher ein Temperatursensor aus, musste der neue Sensor manuell an den Messumformer angeschlossen werden. Jetzt wird der Mittelwert aus den beiden gemessenen Temperaturen gebildet und über den Ausgang des Messumformers dem übergeordneten Prozessleitsystem zur Verfügung gestellt. Sobald ein Ausfall eines Sensors von den integrierten Diagnosefunktionen erkannt wird, schaltet der Messumformer automatisch auf den verbleibenden Sensor um. Mithilfe geeigneter Algorithmen erfolgt außerdem eine Driftüberwachung. Da nur Maßnahmen erforderlich sind, wenn tatsächlich eine Drift auftritt, werden die Anzahl und die Kosten der Instandhaltungsarbeiten, z. B. für eine Neujustierung, an den Sensoren deutlich reduziert.

- n drahtlose Feldgeräte mit Energy Harvesting → These II

Drahtlose Feldgeräte erlauben den flexiblen Einsatz von Sensoren in der Prozessautomatisierung. Wichtig ist dabei eine dauerhafte und wartungsfreie Energieversorgung der Geräte. Um die Batteriebensdauer zu verlängern, muss daher zunächst der Energieverbrauch drahtloser Geräte konsequent optimiert werden. Um darüber hinaus die Forderung nach Lebensdauern von fünf bis zehn Jahren zu erfüllen, müssen außerdem alternative, dauerhaft verfügbare Energiequellen genutzt werden. Die Wandlung von in der Umgebung des Feldgeräts verfügbarer Energie in nutzbare elektrische Energie wird mit dem Begriff Energy Harvesting bezeichnet. Beispielsweise wird ein neuer

Temperatur-Messumformer von einem integrierten thermoelektrischen Mikrogenerator (Micro-TEG) als Energy Harvester mit Energie versorgt.

n Volumetric Laser Scanner à These V

Ein neuer 3-D-Laserscanner dient zur Volumemessung von Schüttguthalden im Freien oder in Lagergebäuden wie Silos, Bunkern, Schuppen und kuppelförmigen Rundlagern. Durch präzise Lasertechnologie und den Einsatz mehrerer vernetzter Scanner lassen sich auch komplexe Oberflächengeometrien exakt abbilden. Fernüberwachung und Datenverarbeitung ermöglichen die zuverlässige Erfassung und Verwaltung von Lagerbeständen.

3.1 Basis –Anforderungsblätter der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“

Sensoren werden für recht unterschiedlichste Zwecke in der Automatisierung eingesetzt, und im chemischen und chemisch-pharmazeutischen Umfeld herrscht eine große Heterogenität bezüglich der Anlagen und Verfahren, die entsprechend mit spezieller Sensorik auszurüsten sind. Aus dieser Vielfalt wurde ein zusammenfassendes Abbild des Bedarfs für Neues herausgearbeitet.

Aus den möglichen Teilanlagen einer verfahrenstechnischen Anlage wurden in der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ die wichtigsten Verfahrensschritte und Subprozesse mit höchster Bedeutung für die Entwicklung von Prozesssensoren ausgewählt, z. B. Reaktion, Polymerisation, Fermentation, Fällung, Kristallisation, Rektifikation, Filterung, Trocknung und Formulierung. Die Schwerpunkte konnten damals aus einer Umfrage heraus validiert werden.

Im nächsten Schritt wurden diese Verfahren in Anforderungsbögen zusammengefasst, ihre Applikationen charakterisiert und in ihren typischen Einsatzbedingungen dargestellt. Neben typischen Temperatur- und Druckbereichen wurden die erforderlichen Messgrößen, Messunsicherheiten sowie die erforderliche zeitliche Auflösung für die Sensoren genannt. Zusätzlich zur Darstellung der Ist-Ausprägung wurden auch erste Visionen für zukünftige Messaufgaben aufgezeichnet. Die Anforderungsblätter schlossen mit möglichen technischen Lösungswegen zur zukünftigen Umsetzung der Messaufgabe inklusive einer Einschätzung der zeitlichen Realisierbarkeit aus Sicht der Hersteller.

Aus der Sicht von heute ist der Blick auf wichtige Verfahrensschritte und Subprozesse weiterhin gerechtfertigt. Im Rahmen der Betrachtung zunehmender Modularisierung von Anlagen und Anlagenteilen

und der horizontalen Integration von Produktionssystemen wird diese Betrachtung sogar noch bedeutender.

3.2 Thesen und übergreifenden Entwicklungsziele der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“

Aus heutiger technologischer Sicht bleiben noch immer große Wünsche offen, für die neuartige Ansätze erforderlich sind. Im Folgenden werden drei wesentliche Aussagen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ fortführend betrachtet, die fallweise völlig neue Wirkmechanismen und Technologien bedingen. Diese drei übergreifenden Trends lassen sich wie folgt formulieren:

- n Bestimmung räumlich verteilter Prozessinformationen
- n Online-Erfassung völlig neuer Messgrößen (z. B. Konzentration von Sporen in Fermentern)
- n Online-Spurenanalytik (Stichwort: „Online-ppb“)

3.2.1 Bestimmung räumlich und zeitlich verteilter Prozessinformationen

Ein übergreifendes Entwicklungsziel für Prozesssensoren ist die Bestimmung räumlich verteilter Prozessinformationen, um von einer punktuellen Messung an einem Ort zu einer Zeit zu einer ein-, zwei- und sogar dreidimensionalen Messung zu gelangen und somit einen detaillierten „Einblick“ in Prozesse zu erhalten. Interessante Prozessgrößen sind sowohl physikalische Größen wie Druck, Temperatur oder Dichte – dazu gehört auch die vektorielle Größe Fließgeschwindigkeit – als auch chemische Größen wie Stoffverteilung und -umsatz.

Die Bewertungen des Themas „Tomografie“ hat jedoch insgesamt nur eine mittlere Priorität gegenüber den anderen Themenfeldern aufgezeigt. Ihr Bedarf wird in zwei Schwerpunkten gesehen:

- n Einsatz von Tomografie in der F&E: Tomografie kann mit größtem Gewinn dort eingesetzt werden, wo heute weder Messung noch Modellierung möglich ist – auch in der Mikroreaktionstechnik.
- n Einsatz von Tomografie zur Optimierung von bestehenden Anlagen: Mithilfe von Tomografie lässt sich ein Anlagenverständnis erzielen, das für solche Anlagen in Kombination mit Simulationstools Prozessoptimierungen nach modernem Standard erlaubt.

In beiden Fällen wird eingeschätzt, dass der hohe Kosten-zu-Nutzen-Aufwand aufgrund der erreichten Wertschöpfung tragbar ist. Auch die Kombination punktueller Messung mit CFD-Simulation (Computational Fluid Dynamics) ist äußerst gewinnbringend. Nicht in allen Fällen sind dreidimensionale Techniken erforderlich, sondern Messungen entlang einer Achse (Stichwort „Lanze“, Bedarf an Armaturen mit Vorschub- oder Knickmöglichkeit) erbringen bereits einen erheblichen Zugewinn an Informationen.

Derzeit sind vermehrt Entwicklungen und marktfähige Produkte zu beobachten. Bereits greifbar sind Impedanz- und Ultraschallverfahren für die Tomografie. Ein hohes Potenzial wird bei den spektroskopischen Techniken NMR (Kernresonanz), THz (Terahertz), optische Spektroskopie, Röntgen, LIBS (Laser-induzierte Breakdown-Spektroskopie) und Mikrowelle gesehen.

3.2.2 Online-Erfassung völlig neuer Messgrößen

In der Technologie-Roadmap 2015+ wurden unter völlig neuen Messgrößen vorwiegend die Bestimmungen des Zielproteins eines Bioprozesses erwähnt oder stoffliche Analysen von weiteren biochemischen Stoffen und Organismen (z. B. Viren und Bakterien), die eine mikrobielle Kontamination wasserbasierter Medien anzeigen. Dadurch würden sich die heute sehr langen Zeiten der Qualifizierung von Endprodukten bis zur Freigabe deutlich reduzieren.

Heute wird darüber hinaus wurde weiterer Bedarf identifiziert, z. B. zur Schaffung schneller Sensoren zur Ermittlung von Kettenlängen, Molmassenverteilungen oder des Vernetzungsgrads bei Polymerisationen, die Messung von strukturellen Größen gesehen. Außerdem fehlen derzeit (z. B. magnetische) Sensoren für die Korrosionsfrüherkennung und für die Überwachung von Fouling.

Als weitere Methoden kommen vorwiegend multidimensionale Chromatografie-Verfahren (GC x GC) sowie ganz allgemein miniaturisierte spektroskopische und chemische Sensoren infrage. Ein großes Potenzial wird in der sich rasant entwickelnden Mikrobiologie gesehen. Entwicklungen zur Erfassung biochemischer und biologischer Stoffe lassen sich zu Online-Verfahren weiterentwickeln.

3.2.3 Online-Spurenanalytik („Online-ppb“)

Der wachsende Bedarf an Online-Spurenanalytik wird bei der Analytik von Gasen besonders deutlich: Hier

müssen einzelne Gaskomponenten mit immer niedrigeren Erfassungsgrenzen überwacht werden. Die Messaufgabe stellt sich für unerwünschte Gaskomponenten in der Raum- oder Betriebsluft genauso wie für Sauerstoffspuren in Inertprozessen. Online-Spurenanalytik ist auch erforderlich, um geringe Konzentrationen an Katalysatorgiften in technischen Gasen als Einsatzstoffen zu ermitteln (z. B. in Biogas oder Gasen für Brennstoffzellen).

In den Anwendungsfeldern ergeben sich Forderungen nach Messbereichen bis in den niedrigen ppm- oder ppb-Bereich für kritische Komponenten. Die heute marktüblichen Technologien (z. B. elektrochemische Sensoren) stoßen diesbezüglich an ihre Grenzen.

Die zumeist optisch arbeitenden Online-Spurenmethoden haben sich in den vergangenen Jahren rasant weiterentwickelt. Die Cavity-Ring-Down-Spektroskopie findet Anwendung für Feuchtemessungen – auch in Matrices, wie HCl – und ist für eine Reihe von Analyten kommerziell verfügbar. Quantenkaskadenlaser (QCL) im mittleren Infrarot haben ebenfalls den Status von einer Forschungs-/Labormethode zu robust arbeitenden und kommerziell verfügbaren Modulen gewechselt und sind für einige Species bzw. Wellenlängen verfügbar. Generell nimmt ihr Durchstimmbereich zu. Parallel wurden Multipass-Zellen und spezielle Nachweisdetektoren kommerziell verfügbar. Auf dem Gebiet der fotoakustischen Spektroskopie sind ganz ähnliche Entwicklungen beobachtbar.

Die gegenwärtig stärkste Methode, die neben der Fähigkeit zur Online-Spurenanalytik noch eine erhebliche Dynamik aufweist – sowohl bezüglich des Konzentrationsbereichs über viele Größenordnungen als auch bezüglich der Messzeit –, ist die Massenspektrometrie.

Neben den genannten Verfahren haben nicht optischen Messungen ein großes Potenzial, etwa chromatografische Verfahren in Verbindung mit Anreicherungen oder kalorimetrische Messprinzipien.

Welche technologischen Weiterentwicklungen sind notwendig?

- ▢ einfache Lösung zur ppb-Kalibration (Prüfgas, selbstkalibrierende Messsysteme)
- ▢ gesicherte Ersatzteilversorgung auch bei Nischenanwendungen (QCLs)
- ▢ Verbesserungen von Prozess-Langwegzellen
- ▢ Entwicklungsbedarf für jeweils erforderliche Messdauer von Sekunden bis Stunden je nach Anwendung

- n empfindliche elektrochemische Sensoren
- n Miniaturisierung darf nicht zu Lasten der Verfügbarkeit führen.

3.3 Trends der verschiedenen Technologien

Die Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ hatte Technologietrends in fünf verschiedene Kategorien unterteilt und das Lösungspotenzial bezüglich der geforderten Messaufgaben grafisch aufbereitet (vgl. [2], Abschnitt 7.5, Seite 26). In den Diagrammen wurden neben den Achsen „Nutzen“ und „zeitlicher Horizont“ auch die erwartete Anwendungshäufigkeit visualisiert. Die Grafiken gehörten wegen ihrer Informationsdichte zu den meistzitierten und diskutierten Ergebnissen.

Im Rahmen dieser Aktualisierung lassen sich folgende Aussagen machen:

Verifikation der Entwicklungsziele der Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ auf dem Tutzing-Symposium 2014 [17]

- 1 Spektroskopie
 - Die Vorhersagen der Roadmap 2015+ wurden weitestgehend bestätigt.
 - Auf dem Gebiet optische Spektroskopie gab es die meisten Entwicklungsbeiträge.
 - Es zeichnen sich erste Entwicklungen für prozessstaugliche NMR-Spektrometer ab.
 - große Anstrengungen bei den Herstellern gepaart mit großem Anwenderinteresse

- 2 MS, GC, HPLC, Biochemie
 - viele Vorhersagen der Roadmap 2015+ bestätigt, insbesondere bis zur mittelfristigen Zeitskala
 - viele Beiträge, großes Potenzial wird bestätigt
- 3 MS, GC, HPLC, Biochemie
 - viele Vorhersagen der Roadmap 2015+ bestätigt, insbesondere bis zur mittelfristigen Zeitskala
 - viele Beiträge, großes Potenzial wird bestätigt
- 4 Physikalisch, mechanische Methoden
 - Einige Methoden sind kaum etabliert
 - Entwicklungen sind kaum absehbar.
- 5 Radar, Mikrowelle, Akustik ...
 - Die meisten genannten Methoden scheinen sich nicht zu etablieren.
 - kaum Feedback, Entwicklungen kaum absehbar
- 6 Optische, thermische, allgemeine Bildgebung
 - tomografische Verfahren in der Entwicklung

In den beiden Vorläufer-Roadmaps „Prozesssensoren 2005–2015“ und „Prozesssensoren 2015+“ lag der Fokus auf den Anforderungen an Sensoren für die Prozessindustrie und die sich daraus ergebenden Trends und Entwicklungsziele. In dieser Überarbeitung rückt parallel dazu auch der Nutzen von smarten Prozesssensoren stärker in den Vordergrund.

Bevor auf die spezifischen Vorteile smarter Sensoren eingegangen wird, wird die Motivation zu Prozessanalysetechnik und smarten Sensoren in verfahrenstechnischen Produktionsanlage im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4 Nutzen der Anwendung von Prozessanalysetechnik und smarten Sensoren in verfahrenstechnischen Produktionsanlagen

Die Wettbewerbsfähigkeit der verfahrenstechnischen Industrie basiert auf der Sicherung der geforderten Produktqualität bei einer optimalen Nutzung von Anlagen, Rohstoffen und Energie. Nur eine gute Prozessführung unter Einsatz zuverlässiger Prozessautomation sichert den globalen Wettbewerbsvorteil.

Die Prozessmesstechnik und -analytik ist als „Enabling-Technology“ darum gleich in doppelter Hinsicht ein Schlüssel zur langfristigen und nachhaltigen Bewahrung von Standortvorteilen: Einerseits ermöglicht sie der produzierenden Industrie die sichere, verfügbare und effiziente Herstellung international wettbewerbsfähiger Produkte. Andererseits bietet sie aber auch einer immer stärker differenzierende Messtechnikbranche die Möglichkeit, produktionstechnisches Know-how in Form von Mess- und Regeltechnik weltweit zu exportieren.

Neben einem übergreifenden Informationsmanagement beginnt ein wissensbasiertes Prozessverständnis für die Verfahrensentwicklung und Produktion bei den Prozesssensoren, die den Prozess transparent machen. Sie sind die „Sinnesorgane“ für automatisierte Verfahren. Die Spanne zur optimalen Steuerung anspruchsvoller Produktionsprozesse reicht von den klassischen Sensoren wie Temperatur- oder Druckaufnehmer über Sensoren für Leitfähigkeit, Schallgeschwindigkeit, Viskosität, akustischen Sensoren, Schwingungsaufnehmern, pH-Sensoren bis hin zu komplexen analytischen Techniken der Prozessanalysetechnik (PAT). Diese sind stoffspezifisch und können in verfahrenstechnischen Produktionsanlagen inline, online oder atline eingesetzt werden. Typische PAT-Sensoren sind z. B. Fotometer, Diodenlaser-Spektrometer, paramagnetische Sauerstoffsensoren bis hin zu komplexen Messmethoden der Gas- und Flüssig-Chromatografie oder der Spektroskopie in Wellenlängenbereichen von Mikrowellen bis zu Röntgenstrahlen. Auch Sensor-Arrays werden eingesetzt. Insgesamt umfasst die PAT rund 80 verschiedene analytische Messverfahren oder -methoden.

4.1 Nicht qualitätsoptimierte klassische Rezeptfahrweise von Produktionsprozessen

Verfahrenstechnische Produktionsanlagen dienen dazu, entlang der Wertschöpfungskette aus Einsatz-

stoffen (Edukten) mittels eines oder mehrerer chemischer oder physikalischer (mechanischer oder thermischer) Prozessschritte spezifikationsgerechte Stoffe (Produkte) herzustellen.

Wegen der langsamen Innovationszyklen wurden die Prozesse traditionell zuvor im Forschungslabor entwickelt und in Form von Rezepten an die produzierenden Betriebe übergeben, die diese ausführen.

In der Regel wurden im Entwicklungsstadium oft nur unspezifische Größen wie Temperatur oder Druck in Betracht gezogen und – falls erforderlich – neben Durchfluss oder Füllstand geregelt. Die Qualitätsparameter der Produkte werden in vielen Fällen heute noch immer erst am Ende des Produktionsprozesses gemessen und beurteilt. Diese Freigabeanalytik findet zumeist im Betriebslabor statt. Erst post mortem entscheidet sich so, ob die Produkte spezifikationsgerecht und damit verkaufsfähig sind. Falls nicht, stehen zur Verringerung des finanziellen Verlusts Aufarbeitungs- oder Abmischungsprozesse an.

Schwankungen der Qualität und Zusammensetzung der Edukte und Abweichungen im Produktionsprozess können nach der Rezeptfahrweise dann nicht ausgeglichen werden und führen unweigerlich zu einer instabilen Produktqualität. Zur Verbesserung sind eine Eingangsstoffanalytik und/oder eine In-Prozessanalytik nötig. Damit können die Ergebnisse in angemessener Zeit zur Verfügung gestellt werden, während Offline- oder Atlineanalytik den Einsatz von Schichtmannschaften in den Betriebslabors erfordert.

4.2 Smarte Sensoren in allen Schritten der Produktionsprozesse

In zunehmendem Maße wird erkannt, dass ein Endprodukt als Resultat der gesamten Prozesskette betrachtet werden muss. Seine Eigenschaften und seine Qualität sind folglich auch mit den Schlüsselparametern aus der gesamten Prozesskette – bis hin zu den dafür eingesetzten Rohstoffen verknüpft. Die online erhaltenen analytischen Daten spiegeln den Verlauf der Reaktion und somit den Hergang des Prozesses adäquat wider, sodass sie damit sehr viel mehr Informationen enthalten als das einzelne Freigabe-Zertifikat des Endprodukts, das heute die Produkteigenschaften repräsentiert. Je früher Informationen über

die Eigenschaften der Stoffströme bekannt und ihre Zusammenhänge mit dem Produktionsschritt verstanden sind, desto wirtschaftlicher kann in den Produktionsprozess eingegriffen und die optimale Qualität durch Nachregeln erzielt werden.

Im Folgenden wird auf die Verwendung smarter Sensoren und Prozessanalysenmesstechnik an drei Schlüsselstellen im Produktionsprozess eingegangen:

- n Edukte → Eingangsstoffkontrolle
- n Prozesse → In-Prozess-Kontrolle
- n Produkte → Freigabe

4.2.1 Nutzen in der Eingangsstoffkontrolle

Der Produktionszyklus beginnt mit dem Rohstoffeingang: Für die eingesetzten Rohstoffe liegen Zertifikate mit den Spezifikationen des Herstellers vor. In der Regel werden Stichproben der Ware bemustert und anhand der Muster zusätzliche Analysen durchgeführt, um die Angaben des Herstellers zu überprüfen oder um zusätzliche Informationen über die Zusammensetzung der Rohstoffe im Sinne einer Freigabe für die vorgesehene Verwendung zu erhalten. Die freigegebene Ware wird meist in Zwischenlagern bereithalten und bei Bedarf für die Produktion konfektioniert. Zukünftig wird die Eingangsstoffkontrolle durch Sensoren unterstützt (vgl. Praxisbeispiel Messung eines Einfahrstroms).

Der Nutzen smarter Sensoren und Prozessanalysetechnik besteht im

- n Erkennen unterschiedlicher Qualität und Zusammensetzung der Eingangsstoffe (Edukte) speziell bei nachwachsenden Rohstoffen und bei wechselnden Lieferanten. Es besteht damit die Möglichkeit der Vorwärtsregelung der Prozesse.
- n Vermeiden der Verwechslung von angelieferten Stoffen. Vermeiden des Pumpens in falsche Tanks (Eintankkontrolle).
- n Reduzierung der Wartezeit von Schiffen, Kesselwagen und Tanklastzügen bei der Anlieferung.
- n Optimierung der Zusammensetzung der Einfahrströme in die Anlage zur Verhinderung von nicht spezifikationsgemäßen Produkten (out of specification, OOS, oft Off-Spec) und zur Reduzierung des Aufwands für Recycling und Aufbereitung.

Praxisbeispiel Messung eines Einfahrstroms

Messung eines Einfahrstroms in eine Anlage zur Bestimmung der Qualität und der optimalen Zusammensetzung der Komponenten im Einfahrstrom. Eine Über- oder Unterdosierung würde eine Off-Spec-Produktion verursachen, die neben dem nicht verwendbaren Produkt auch die Anlage schädigen kann.

Bisherige Messungen: 40-minütige Laboranalytik alle zwei Stunden.

Jetziges Messverfahren: Online-Raman-Spektroskopie mit einer Messsonde; Messung findet alle drei Minuten statt.

Diese Messung hat im ersten Quartal nach Fertigstellung Off-Spec-Produktion verhindert, die den Wert der Messtechnik um ein Mehrfaches übersteigt.

Rechnet man hier die Reduzierung der Laboranalytik, die Anschaffung und den Einbau der Messmittel, die Abschreibung des Geräts und die jährlichen Betreuungskosten gegen die verhinderte Off-Spec-Produktion, dann lag der Return of Invest (ROI) in diesem Fall **bei sechs Monaten**.

Die Kosten einer möglichen Aufbereitung der Off-Spec-Produktion sind hier nicht berücksichtigt.

4.2.2 Nutzen der In-Prozess-Kontrollen

Für die Kontrolle der Einhaltung von Spezifikationen werden In-Prozess-Kontrollen (IPK) heute in vorgegebenen zeitlichen Abständen durchgeführt. Dazu müssen bisher vielfach Proben gezogen und entweder im Labor oder Betrieb analysiert werden – meist durch schnelle Atline-Techniken. Smarte Sensoren können In-Prozess-Kontrollen stark verbessern (vgl. Praxisbeispiel Messung einer Chlorierung in Batch-Fahrweise):

- n transparentere Prozesse durch vermehrte Anzahl Sensoren
- n frühzeitiges Erkennen von Prozessabweichungen und deren Korrektur durch In-Prozessregelungen durch erheblich höhere Messfrequenz
- n Optimierte Prozesse durch näheres Heranfahren an Prozessgrenzen mittels PAT in PLT-Schutzrichtungen

- n Realisierung unterschiedlicher Prozessfahrweisen (energieoptimiert, stoffoptimiert, ausbeuteoptimiert)
- n Kapazitätserweiterung von Anlagen durch Verkürzung von An- und Abfahrzeiten und der Taktzeiten
- n sekundäre Timingeffekte („grüne Welle“)

Praxisbeispiel Messung einer Chlorierung in Batch-Fahrweise

Messung einer **Chlorierung in Batch-Fahrweise** zur Reduzierung der Taktzeiten einer Anlage und zur Einsparung von Laboranalytik.

Bisherige Messungen: Laboranalytik mehrfach pro Batch

Jetziges Messverfahren: Online-Raman-Spektroskopie mit einer Messsonde; Messung findet alle drei Minuten statt.

Mit der Messung wurde die Taktfrequenz der Anlage erhöht und eine Kapazitätserhöhung um ca. 10 % erreicht.

Die Reduzierung der Laboranalytik, die Anschaffung und der Einbau der Messmittel, die Abschreibung des Geräts und die jährlichen Betreuungskosten sowie die Kapazitätserweiterung ergaben in diesem Fall einen ROI von **unter sechs Monaten**.

4.2.3 Nutzen für die Freigabe

Ist der Produktionsprozess abgeschlossen, erfolgt in der Regel eine Freigabeanalytik, bei der die Einhaltung der Spezifikationen überprüft wird (vgl. Praxisbeispiel Restfeuchtemessung eines Produkts). Sofern diese eingehalten werden, kann das Produkt ausgeliefert werden. Wird die Spezifikation nicht eingehalten, kann das Produkt – sofern möglich – nur mit eingeschränkten Qualitätsmerkmalen weiterverwendet werden oder es muss gänzlich verworfen oder kostenintensiv aufgearbeitet werden. Ziele sind:

- n Vermeiden von Nachbearbeitungsschritten, da mittels Prozessregelung der Spezifikationsbereich der Produkte eingehalten wird
- n Reduzierung der Zahl der offline gemessenen Proben auf eine finale Freigabe- und Rückstellprobe
- n Bei validierten PAT-Systemen kann die Offline-Freigabeanalytik oftmals ganz entfallen.

Praxisbeispiel Restfeuchtemessung eines Produkts

Restfeuchtemessung eines Produkts nach der Trocknung und vor der Verpackung. Die Laboranalytik ist hier zwar einfach, aber sehr langwierig. Ein nicht spezifikationsgerechtes Produkt wäre schon verpackt, bevor man es erkennt.

Bisherige Messungen: 120-minütige Laboranalytik alle vier Stunden

Jetziges Messverfahren: Online-Nahinfrarotspektroskopie mit bis zu sechs Messköpfen; Messung findet alle zwölf Minuten bei sechs Messköpfen statt.

Diese Messung dient der Verhinderung von Off-Spec-Produktion. Der eigentliche Vorteil liegt jedoch hier in der Einhaltung der Spezifikation. In der Regel werden diese Spezifikationen ohne Einsatz von Online-Messmitteln deutlich unterschritten, um eine Zurückweisung des Kunden auf jeden Fall zu verhindern. Bei vorgegebener Spezifikationsgrenze von z. B. 0,5 % Restfeuchtegehalt liegen die wirklichen Feuchtegehalte eher unter 0,1 % Restfeuchte. Bei einer Jahresproduktion von 100 kt/a würde eine Ausnutzung der Spezifikationsgrenze um 0,3 % 300 t/a ausmachen.

Rechnet man hier die Reduzierung der Laboranalytik, die Anschaffung und den Einbau der Messmittel, die Abschreibung des Geräts und die jährlichen Betreuungskosten gegen diese 300 t Produktion, dann kann der ROI je nach Produktpreis bei **unter sechs Monaten** liegen. Die Reduzierung der Energiekosten und des damit verbundenen CO₂-Ausstoßes sind hier noch nicht berücksichtigt.

4.3 Drei typische Produktionsverfahren in der Prozessindustrie

In der verfahrenstechnischen Industrie unterscheidet man im Wesentlichen zwischen drei Produktionsverfahren:

- n kontinuierliche Verfahren → Conti-Prozesse
- n Chargen-Produktion → Batch-Prozesse
- n Fermentation → Bio-Prozesse

Kontinuierliche Produktionsverfahren findet man vornehmlich in der Petro- und Großchemie. Raffinerien, Steamcracker und Ammoniakanlagen sind treffende Beispiele hierfür. Die Anlagen sind wegen der hohen Stoffdurchsätze und ihrer Wertschöpfung heute

meist optimiert. Der Automatisierungsgrad ist hier am höchsten. Auch der Einsatz von Prozesssensoren ist bei Kontianlagen am weitesten fortgeschritten. Einen Überblick gibt das nachfolgende Praxisbeispiel.

Nutzen von Prozesssensoren

n Nutzen in Conti-Prozessen

- durch höhere Messfrequenz stabilere und geregelte Prozesse
- möglicher Entfall von Aufarbeitungsschritten durch geregelte Dosierungen
- erhöhte Ausbeute und bessere und konstantere Produktqualität

n Nutzen in Batch-Prozessen

- Erhöhung der Anlagenkapazität durch reduzierte Wartezeiten auf Ergebnisse der Offline-Analytik
- reduzierte Batch-Zeiten durch gemessene Weiterschaltbedingungen (z. B. Abschluss der Reaktion, ausreichendes Mischen) im Gegensatz zu festen Zeiten aus Rezeptursteuerungen
- Vermeiden von unerwünschten Nebenprodukten mittels Reaktionsüberwachung

n Nutzen in Bio-Prozessen

- Echtzeitinformation über den Prozess im Fermenter/Bioreaktor. Damit können Prozessabweichungen umgehend festgestellt und korrigiert werden.
- robustere und skalierbare Prozesse, optimierter Golden-Batch-Vergleich
- gezielte Prozessregelung zur Optimierung der Wirkstoffausbeute (Proteine) und der biologischen Wirksamkeit (Potency)
- Überwachung von Metaboliten des Produkts während der Fermentation
- Überwachung von Änderungen in den Populationen und in der Morphologie
- Erkennung der Prozessendpunkte

Die Chargen-Produktion findet in der Regel in einzelnen verfahrenstechnischen Apparaten wie Kesseln, Rührreaktoren oder Mischern statt. Typischerweise werden alle Spezialchemikalien wie Lacke, Dispersionen und Kosmetikgrundstoffe in Batch- oder Semi-

Batch-Prozessen hergestellt. Auch in der chemisch-pharmazeutischen Produktion werden wegen der Nutzung der Anlagen als Multi-purpose-Einheiten überwiegend Batch-Prozesse eingesetzt.

Produkte, die sich auf klassisch chemischem Wege nicht herstellen lassen oder biochemische Substanzen sind, werden mittels geeigneten Bakterien, tierischen Zellen oder Hefen in Fermentationsprozessen hergestellt. Meist sind dies Medikamente, wie Insulin, der Blutgerinnungsfaktor VIII oder ähnliche Biologicals.

4.4 Warum Industrie 4.0 auch in die Prozessindustrie Einzug halten wird

Um im globalen Wettbewerb bestehen zu können, müssen Produktionsverfahren, wettbewerbsfähig, kostenoptimiert und flexibel sein. Dies erreicht man durch den Einsatz von Systemen der Prozessanalysetechnik, smarterer einzelner und verknüpfter Sensoren, darauf zugeschnittener Regelalgorithmen und einer darauf abgestimmten Vernetzung. Ein weiterer Fortschritt stellen die Konzepte von Industrie 4.0 dar, die noch weiter optimierte und zusätzlich ganz neue Betriebs- und Instandhaltungsstrategien ermöglichen werden – bis hin zu neuen Produktionstopologien.

Dies gilt im Besonderen, wenn die Prozessinformationen mit weiteren Produktionsparametern (z. B. Dosieraten, Rührgeschwindigkeiten oder anderen Betriebsbedingungen) sowie mit den Spezifikationen des Produkts in Zusammenhang gebracht werden. In einem konsequenten Informationsmanagement werden solche Daten gesammelt und bewertet, sodass nicht nur eine statistische Prozesskontrolle möglich ist, um einen Prozess sicher zu machen, sondern auch verstanden wird, welche Produktionsparameter ein möglichst spezifikationsgerechtes Produkt für den Kunden erzeugen. In einem Informationsmanagementsystem lassen sich diese Daten gegenüberstellen, auch wenn sie an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten gewonnen werden.

Damit werden Feedback- und Feedforward-Entscheidungen möglich, mit denen auf vorgelagerte Informationen resp. auf später erkannte Eigenschaften reagiert werden kann.

Die Praxisbeispiele „Industrie 4.0 zur Verbesserung der Prozessanalysetechnik“ und „Industrie 4.0 in den drei am meisten verbreiteten Produktionsverfahren der Prozessindustrie“ zeigen mögliche Szenarien von Industrie 4.0 in der Prozessindustrie, bezogen auf die oben genannten Praxisbeispiele und Produktionsverfahren. Im folgenden Abschnitt werden weitere Szenarien diskutiert.

Praxisbeispiel – Industrie 4.0 zur Verbesserung der Prozessanalysenmesstechnik

n Eingangsstoffkontrolle

- Edukte und Produkte bringen ihre Zusammensetzung elektronisch mit, firmenübergreifende Produktion, durchgehende Chargenrückverfolgbarkeit, „Track and Trace“, möglicher Entfall von Eingangs- und Freigabeanalytik, Vorteile in der Logistik, Produkte melden sich selbständig im Markt.

n In-Prozess-Kontrolle

- direkter Eingriff des Sensors in die Prozesssteuerung zur Optimierung und Modifizierung der Rezepte und der Reduzierung der Produktionsdauer
- Zunahme der Verfügbarkeit von Anlagen durch „autarke Redundanz“ der Sensoren; bei Ausfall eines Sensors übernehmen die verbleibenden Sensoren dessen Aufgabe.
- Gegenseitige Plausibilitätsprüfungen der Sensoren. Ein Sensor, der falsche Messwerte erzeugt, wird vom Kollektiv der anderen Sensoren erkannt. Beispiel: Ein falsch messender Temperatursensor in einer Rektifikationskolonne wird durch die Kombination der Messwerte anderer Sensoren (Stoffzusammensetzung am Kopf oder Seitenabzug der Kolonne, Differenzdruck über der Kolonne, andere Temperatursensoren) erkannt.

n Freigabe

- gezielte Platzierung von Produkten (auch von „Off-Spec“-Produkten) auf dem elektronischen Marktplatz
- Entfall der Freigabeanalytik durch Sicherstellung der eingebauten Qualität

Praxisbeispiel – Industrie 4.0 in den drei am meisten verbreiteten Produktionsverfahren der Prozessindustrie

n Konti-Prozesse

- Einbindung von externen Datenbanken (Wettervorhersagen, Rohstoffpreise, Währungsschwankungen, Positionsdaten von Verkehrsmitteln) zur Produktionssteuerung
- „Last-Minute“-Entscheidung über Produkteigenschaften nach aktuellem Kundenbedarf

n Batch-Prozesse

- beschleunigter Produktwechsel durch vorausschauende Spezifikationsanpassung
- automatischer Produktwechsel nach Markttrends und -lage

n Bio-Prozesse

- Modelle aus der Cloud zur Steuerung anspruchsvoller Prozesse – Systemdenken zur Problemlösung aus dem Web, gegenseitiges Lernen (Prinzip WIKIPEDIA)
- Verdaubare oder ausscheidbare Mikro-Sensoren in der Tablette erlauben eine direkte Kommunikation mit am Körper getragenen Empfangsgeräten. Einnahme und Wirkung kann kontrolliert werden, die Darreichungsform und Dosis kann optimiert werden.
- Bedarf an Medikamenten über Suchanfragen (z. B. Websuche über Suchmaschine) ermitteln

5 Beispielszenarien für Sensoren 4.0 in der Prozessindustrie

Der gewinnbringende Einsatz smarter und vernetzter Prozesssensoren eröffnet der Prozessindustrie vielfältige Optimierungsszenarien beispielsweise im Hinblick auf Prozessoptimierung und -automatisierung, Anlageninstandhaltung, Revisionsplanung, Eduktein- und Produktverkauf. Drei Optimierungsszenarien sind in den folgenden Abschnitten beispielhaft beschrieben und Bild 2 in grob visualisiert.

Um den Maximalnutzen dieser CPPS zu erschließen, muss der Informationsaustausch über einzelne Anlagenteile, Produktionsanlagen und Firmengrenzen hinweg global erfolgen (horizontale Integration).

Vorbemerkung

In einer ersten Annäherung wird sich gerne einem Hilfsmittel bedient, der „Cloud“, in der sich diese Information befindet. Die Cloud ist einer über Internetdienste verfügbaren Datenablage (die auch in Bild 2 auftaucht), wobei zu erwarten ist, dass zunächst unternehmensinterne Datenbanken und Informationssysteme mit stark kontrolliertem Nutzerzugang etablieren werden. Dieses wird sich später ändern (vgl. Abschnitt 7.4). Im Zuge dessen wird auch von der „Auflösung der Automatisierungspyramide“ gesprochen [5]. Auch hier ist zunächst der Verlust der Konturen der Automatisierungspyramide zu erwarten, der sich in kontrollierten Schritten vollzieht. Ein wertvolles Hilfsmittel zum Verständnis der Datenstrukturen in der Automatisierungslandschaft ist das sogenannte Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 [19], das in Abschnitt 7.1.2 angerissen wird.

5.1 Optimierungsszenario 1 – Revisionsplanung am Beispiel Regelventile

Stellungsregler von Regelventilen bieten bereits heute viele Diagnosemöglichkeiten, wie etwa die Untersuchung des Bewegungsprofils des Ventils oder die Ergebnisse von Partial-Stroke-Tests. Der vernetzte Stellungsregler innerhalb eines CPPS ermöglicht jedoch optimierte Revisionsplanungen in folgender Weise:

- Der Stellungsregler identifiziert Sensoren in seiner unmittelbaren Umgebung.
- Drucksensoren vor und hinter dem Regelventil liefern in Zusammenhang mit dem Messwert eines Durchflusssensors Informationen über das Auftreten und die Häufigkeit von Kavitation.
- Ein Trübungssensor liefert die Information über die Konzentration abrasiver Partikel.
- Die thermische Belastung des Regelventils wird anhand von Temperatursensoren in der Rohrleitung ermittelt.
- Aus den Daten der Analysengeräte wird das Maß der Korrosionsbelastung bestimmt.
- Aus der Gesamtheit der Daten wird die Lebensdauer des Ventils prognostiziert und eine Revisionsempfehlung abgeleitet.
- Die Instandhaltungsleistung wird autark beauftragt und in der Enterprise-Ressource-Planning(ERP)-Software abgerechnet.

In Bild 2 ist ein Anlagenfließbild für eine Destillationskolonne mit mehreren Sensoren schematisch als CPPS dargestellt. Das Wissen über dieses CPPS ist über ein Industrie-4.0-Netzwerk (mindestens) innerhalb des Unternehmens verfügbar (blaue „Cloud“). Szenario 1 ist in grün schematisch dargestellt. Darin besteht eine enge Beziehung zum ERP-System des Unternehmens, das auch weitere Anlagen (rechts und links der Cloud angedeutet) verwaltet.

5.2 Optimierungsszenario 2 – Multi-purpose-Destillations-Teilanlagen führen zur Erhöhung der Anlagenflexibilität

Schon heute werden einige Module (z. B. Kälteanlagen) autark betrieben und geregelt. Obwohl durchaus komplexe Regelalgorithmen hinter einem Kältemodul stehen und der Betrieb für den Gesamtprozess durchaus kritisch ist, wird die Modularität nicht mehr angezweifelt. Das Modul gibt nur noch Zustandsinformationen, etwa aktuelle Kälteleistung, Kältereserve, Energieverbrauch, Instandhaltungszustand o. Ä. an das Prozessleitsystem weiter. Zukünftig ist naheliegend, viele weitere Unit Operations zu zergliedern, z. B. Destillationen oder Trocknungen.

Diese CPPS steuern sich dann eigenständig über ihre smarten Sensoren.

Destillations-Teilanlagen in der Prozessindustrie werden zukünftig als separate Unit Operation betrachtet. Die für diese Flexibilisierung erforderlichen Destillationsparameter der zu verrichtenden Trennaufgaben stehen als Parametersätze (Stoffdaten und Destillationsmodelle für ein gegebenes Stoffsystem) im Netzwerk zur Verfügung.

Ist beispielsweise eine Destillationsanlage mit den bisher ausgeführten Trennaufgaben nicht ausgelastet und es besteht Bedarf an einer Trennung, so führt die Anlage autark folgende Schritte aus:

- n Die Anlage beschafft sich die Details der anstehenden Trennaufgabe über das Netzwerk beispielsweise Eduktzusammensetzung, Produktspezifikation oder geforderte Produktionsmengen über Zeit.
- n Die Anlage prüft anhand ihrer Engineering-Spezifikation und von Werkstoffverträglichkeits-Informationen aus dem Netz, ob die Trennaufgabe spezifikationsgerecht durchgeführt werden kann.
- n Die verwendeten Feldgeräte und Prozesssensoren laden die erforderlichen Applikationsparameter aus dem Netz. Im Fall eines Prozess-Spektrometers sind dies beispielsweise geeignete Chemometriemodelle um die erforderlichen Stoffkonzentrationen zu ermitteln. Stehen die Datensätze nicht zur Verfügung, wird ein Dienstleister beauftragt, der die erforderliche Applikation unter den gegebenen Randbedingungen erstellt.
- n Die Destillationsanlage beschafft sich aus dem Netz die erforderlichen Stoffdaten (Siedekurven u. Ä.), die zur Parametrierung der Anlage erforderlich sind. Modelle für erste Simulationen oder Machbarkeitsversuche müssen keine hohe Qualität aufweisen und können als Anwendung (App) bezogen werden. Modelle für eine überlegene Produktion werden vermutlich aus eigener Hand kommen und für Standardtrennaufgaben wahrscheinlich schon heute im Netz verfügbar sein.
- n Die Anlage parametriert sich autark und optimiert sich anschließend im laufenden Betrieb selbst. Dabei werden bei großen und trägen Anlagen auch Umwelt- und Witterungseinflüsse berücksichtigt sowie Wettervorhersagen mit einbezogen.

Szenario 2 ist in Bild 2 in rot schematisch dargestellt. Auch eine Multi-purpose-Nutzung oder eine Übertragung der Produktionsparameter auf weitere Anlagen (rechts und links der Cloud).

5.3 Optimierungsszenario 3 – Rohstoffeinkauf und Produktverkauf

Die weltweit zusammengefassten Multi-purpose-Anlagen mit Batch-Betrieb und dezentralen Leitwarten werden aufgrund ihres modularen Aufbaus über ein erweitertes und flexibles Produktionsspektrum verfügen.

- n Auf einer Art virtuellem Marktplatz werden Produkthanfragen unter Angabe benötigter Menge, Bereitstellungszeitpunkt, Spezifikation, Verkaufspreis etc. gelistet
- n Im Rahmen der Produktionsplanung prüft die Anlage die Verfügbarkeit und Qualität der potenziellen Rohstoffe und optimiert unter den gegebenen Rahmenbedingungen Anlagenauslastung und Produktionskosten. Dabei werden auch Nachbarbetriebe entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt. Das Know-how des Unternehmens stellen somit künftig die Produktionsrezepte dar
- n Es folgt die automatisierte Parametrierung der verbauten Feldgeräte und Sensoren: Kalibrierdaten für die Messaufgabe werden aus dem Netz beschafft. Personalressourcen wie beispielsweise der PLT-Ingenieur werden geschont.
- n Prozesssensoren ermöglichen die lückenlose Identifikation der Rohstoffe, Zwischenprodukte und Endprodukte. Somit wird das Produkt selbst zur Automatisierungskomponente

Die Abbildung der Zu- und Verkäufe im ERP System geschieht hierbei automatisch. Szenario 3 ist in Bild 2 in blau schematisch dargestellt.

Übergreifend kann folgende **These** abgeleitet werden:

„Smarte Prozesssensoren sind wichtige Bestandteile von CPPS und ermöglichen neue Geschäftsmodelle für Anwender, Gerätehersteller, Dienstleister.“

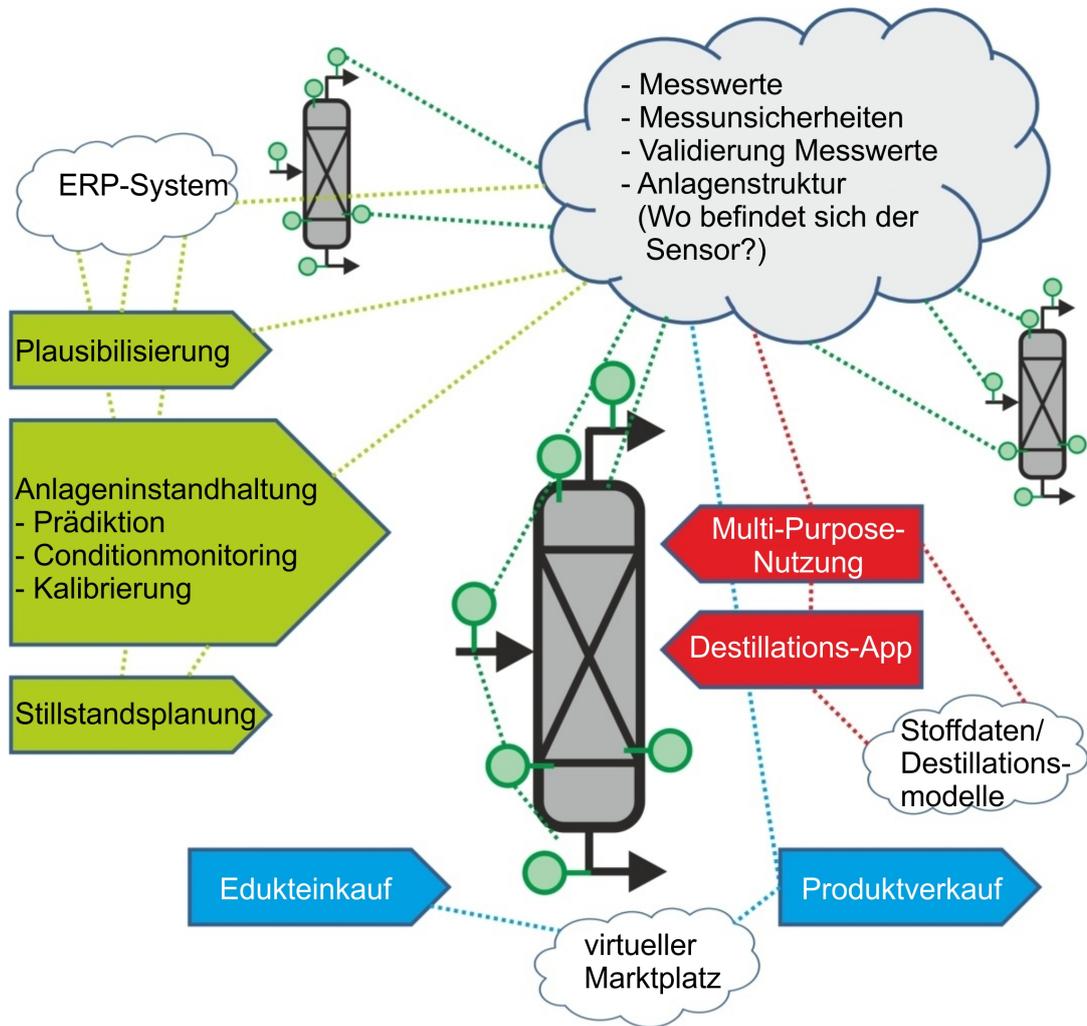


Bild 2. Schematische Darstellung einer Destillationskolonne mit mehreren Sensoren als CPPS zur Veranschaulichung der Optimierungsszenarien basierend auf vernetzten Prozesssensoren und der Verbindung mit unternehmensweit verfügbaren Informationen („Cloud“ oben rechts).

6 Anforderungen an Prozesssensoren 4.0

Im Folgenden werden die Voraussetzungen der Prozesssensoren für die zukünftigen Automatisierungskonzepte beschrieben. Die wichtigsten Vorzüge sind dabei

- Prozesssensoren stellen für festgelegte Adressaten zusätzliche Informationen und Dienste bereit und generieren daraus im Verbund neue Informationen, die über die Summe der Informationen der Einzelsensoren hinausgeht.
- Die smarten Funktionen der Sensoren vereinfachen ihren Einsatz und ermöglichen Plug and Play, obwohl sie komplexer werden. Dieses ist besonders wichtig für:
 - Selbstdiagnose
 - Selbstkalibrierung
 - Selbstkonfiguration/Parametrierung

Damit Prozesssensoren ein essenzieller Bestandteil in CPS sein können, müssen sie zuerst die ureigene Aufgabe des Messens und der Präsentation von Prozessinformationen erfüllen. Die Grundvoraussetzung hierzu ist die Leistungsfähigkeit der Sensoren. Diese wird sich durch verschiedene technologische Randbedingungen konstant weiterentwickeln. Die folgenden wesentlichen Aussagen können getroffen werden:

- Die Miniaturisierung setzt sich weiter fort. (Miniaturisierung erlaubt den Zugang komplexer Technik an Prozesse.)
- Die Ausbreitung mikroelektromechanischer Systeme, optisch-elektromechanisch Sensoren erfolgt über Spezialanwendungen hinaus und kann für smarte Sensorfunktionen eingesetzt werden, wie etwa Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen.
- Die Rechenleistung innerhalb der Sensoren nimmt zu. Die Preisstellung dafür nimmt ab. (schnellere Prozessoren in den Sensoren, Datenauswertung, Chemometrie auf dem Sensor)

- Sensoren werden autarker. (kommunikationsautark, energieautark durch Energy Harvesting)
- Verknüpfung von Sensoren oder Sensordaten führt zu erhöhter Leistungsfähigkeit (Aussagekraft, Ausfallsicherheit, ggf. Messgenauigkeit)
- Es existiert eine sichere Rückfallstrategie zur Vermeidung von Betriebsstörungen. Darüber hinaus müssen die Prozesssensoren zur Einbindung in CPS weitere Anforderungen erfüllen (siehe Bild 3 und Abschnitt 6.1 bis Abschnitt 6.5), die sich wie folgt gliedern lassen und in den folgenden Abschnitten unteretzt werden:
 - Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit
 - Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen
 - Traceability und Compliance
 - virtuelle Beschreibung
 - Interaktionsfähigkeit und Bidirektionalität

Die Eigenschaften der Prozesssensoren 4.0 ergeben eine weitere **These**:

„Die stark vereinfachte Integration der Prozesssensoren in Netzwerke und ihre Interaktion mit weiteren Informationen führen zu (selbst)organisierten Systemen und verbessern die Produktion.“

6.1 Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit

Durch die Conectivity gewährleisten die Prozesssensoren den Austausch ihrer Informationen als CPS mit anderen Prozesssensoren und im Netzwerk.



Bild 3. Smarte Sensoreigenschaften auf einen Blick (Erläuterungen in Abschnitt 6.1 bis Abschnitt 6.5)

Dieses umfasst folgende Punkte:

- n Sensoren erhalten ein Benutzerinterface zu Standard-Hardware (Smartphone, Smart-Pad etc.) und können kontrolliert und IT-sicher ferngesteuert werden.
- n Sensordaten werden zur Inbetriebnahme, Parametrierung, Instandhaltung und Diagnose mit Kontextinformationen eingeführt. Sensoren bilden Netzwerke/Sensornetzwerke/eigenständig Netzwerke und ermöglichen so z. B. topografische Erfassungen bzw. Beschreibungen.
- n Kabellose Sensoren gewinnen an Bedeutung.
- n Sensoren sind durchgehend digital. (Analoge Messungen werden unmittelbar digitalisiert.)
- n Die Kommunikation wird für eine Übergangszeit abwärtskompatibel zur bestehenden Automationslandschaft sein und gleichzeitig innovative Topologien unterstützen.
- n Die störungsfreie Kommunikation aller Sensoren untereinander setzt ein einheitliches Protokoll voraus [14]. Der derzeit meistdiskutierter Standard ist OPC Unified Architecture (OPC-UA) [18] bis [22], der auf OPC [23] (Einführung 1995) und Serviceorientierten Architekturen (SOA) in industriellen Automatisierungssystemen aufbaut und seit 2007 für eine skalierbare und plattformunabhängige Lösung weitergeführt wird.

OPC Unified Architecture (OPC-UA)

- n OPC-UA ist eine Technologiegeneration der OPC-Foundation für sicheren, zuverlässigen und herstellerunabhängigen Transport von Rohdaten und vorverarbeiteten Informationen von der Sensor- und Feldebene bis hinauf zum Leitsystem und in die Produktionsplanungssysteme (ERP).
- n Mit OPC-UA ist jede Art von Information zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort für jede autorisierte Anwendung und jede autorisierte Person verfügbar.
- n Der offene OPC-UA-Standard ist als IEC-Normenreihe IEC 62541 veröffentlicht. Bisher liegen die Teile 1 bis 10 als Edition 1.0 vor. Die Arbeiten an Teil 11 „Historical Access“, Teil 13 „Aggregates“ und Teil 100 „OPC-UA for Devices“ wurden begonnen.
- n Die für einige wenige Anwendungen geforderte Echtzeitfähigkeit (das heißt zeitliche Auflösung deutlich unter Millisekunden) wird derzeit beforscht.

- n Einen Überblick über die Einsatzmöglichkeiten für das Zukunftsprojekt „Industrie 4.0“ gibt [20].

Die Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit ist eine wichtige Voraussetzung für die rasche Umsetzung von Industrie 4.0. Dieses lässt sich in einer weiteren **These** formulieren:

„Die Kommunikation aller Prozesssensoren erfolgt über standardisierte und sichere Schnittstellen- und Datenformate.“

6.2 Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen

Die smarten Instandhaltungsfunktionen der Prozesssensoren ermöglichen in CPS folgende Optimierungen:

- n Interaktive Assistenzfunktionen vereinfachen die Fehlersuche und Instandsetzung (Remote-Instandhaltung/-Diagnose, aktuelle Informationen, z. B. Videos zum Tauschen von Teilen).
- n Verifikation der Sensordaten anhand der Daten der (logisch) benachbarten Sensoren
- n Prädiktion des Zustands anhand der Daten von (logisch) benachbarten Sensoren
- n Lokales Service-Interface bietet notwendigen Informationen zur Zustandsüberwachung und Instandsetzung an.
- n Smarte Funktionen ermöglichen Selbstkalibrierung oder Vergabe von Kalibrierungsaufträgen an geeignete Drittanbieter.
- n Der Sensorzugriff erfolgt über gestufte Zugriffsrechte. Für jede Benutzergruppe sind eindeutig festgelegte Funktionen nutzbar.
- n Die Instandhaltungsleistungen des Sensors werden automatisch im ERP-System abgerechnet und erleichtern so das Kostenmonitoring.
- n Die Nachbestellung von Ersatzteilen und Verbrauchsmaterialien für den Prozesssensor erfolgt autark. Bei potenziellen Ausfällen werden Ersatzmodule rechtzeitig beschafft. Der Austausch der Module erfolgt stark vereinfacht nach dem Plug-and-Play-Verfahren, wobei Upgrades möglich sind.
- n Der Sensor sendet Zustandsmeldungen, die über die NAMUR-Signale [24] hinausgehen.

6.3 Traceability und Compliance

Da CPS (selbst)organisierende Systeme sind, die auch autarke Entscheidungen treffen, ist die Nachverfolgbarkeit, der Zustand oder ein Logbuch von essenzieller Bedeutung. Deshalb muss der Prozesssensor durch die Traceability folgende Aufgaben erfüllen:

- n Die Gültigkeit der Sensorsignale muss im Hinblick auf Kalibrierung und Validierung sichergestellt und dokumentiert sein.
- n Die smarten Funktionen zur Selbstdiagnose, Selbstkalibrierung oder Selbstkonfiguration werden in geeigneter Form (z. B. Audittrails) dokumentiert.
- n Die Sensoren verfügen über eine kontextabhängige Entscheidungsfähigkeit. So können beispielsweise verschiedene Eigenschaften zu- oder abgeschaltet werden.
- n Es sind automatisierte Updates der Sensor-Firmware und der Bedienprogramme möglich.
- n Der Sensor kann sämtliche Sensorinformationen (z. B. Inbetriebnahmedaten, Betriebsstunden, Instandhaltungshistorie) auf Abruf kontextbasiert bereitstellen.

- n Die Sensoren führen selbstständig und permanent Plausibilitätsprüfung durch, z. B. zur Erkennung von ungewöhnlichen Anlagezuständen bzw. des Messwerts oder Verifizierung von Zertifikaten.
- n Die Sensorkalibrierung ist kompatibel zu den Anforderungen von Pharmaprozessen, etwa von Good Manufacturing Practice (GMP) nach Forderungen der U.S.-Behörde Federal Drug Administration (FDA).

6.4 Virtuelle Beschreibung

Durch die Nutzung von digitalen Planungswerkzeugen von Anlagen werden vermehrt digitale, einheitliche Beschreibungen der Sensoren notwendig. Weiterhin verlangt die Vorbereitung eigenständiger Entscheidung oder der Betrachtung von Szenarien im CPS ein virtuelles Abbild der real existierenden Anlage, somit müssen die Prozesssensoren technische Daten oder Funktionalitäten über das Sensorsignal hinaus zur Verfügung stellen. Diese Informationen stehen wiederum weiteren Hierarchie-Ebenen zur Verfügung, um etwa eine Produktionseinheit oder eine Fabrik zu simulieren, bevor diese zusammengebaut und betrieben werden. Dieses ist in schematisch in Bild 4 dargestellt. Durch die virtuelle Beschreibbarkeit wird das von Industrie 4.0 geforderte „durchgehende Engineering“ unterstützt.

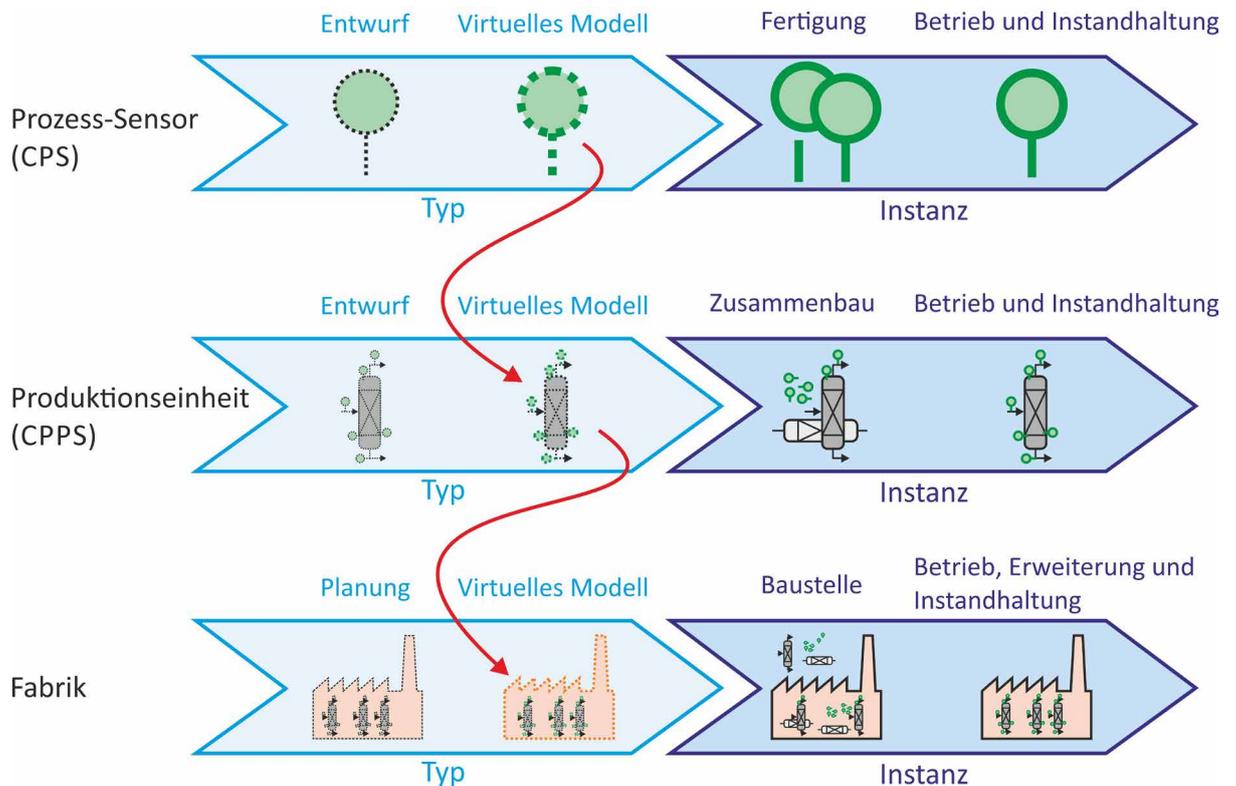


Bild 4. Lebenszyklus einer Industrie-4.0-Komponente – zur Verdeutlichung herausgegriffen sind Sensor, Produktionseinheit und Fabrik (vgl. Bild 6)

- n Neben den physikalischen Sensor werden virtuelle Modelle für die Planung, Simulation und Überwachung der Anlage bereitgestellt (3-D Modelle, Simulationsmodelle).
- n Die aktuelle Anlage ist im Datenraum des CPPS abgebildet.

Ähnliche Sichtweisen sind auf Ebene der Messdaten und Modelle denkbar, wo Sensorkennlinien, chemometrische Modelle, Modelle für Advanced Process Control oder Soft Sensing bis hin zu übergreifenden Datenanalysen („Big Data“) für Kennzahlen auf ERP-Ebene entlang ihrer Lebenszyklen (Planung, Modellierung, Test/Validierung, Funktion) beschrieben werden können.

- n Sensorserver beinhaltet ein Abbild der „Sensorintelligenz“, dort kann (virtuell) mit neuen Kennlinien/Kalibrierungen/Patches gearbeitet werden, die kontrolliert auf den Sensor übertragen werden. Sensordaten können dort zugänglich gemacht werden, ohne Zugang zum Sensor selbst zu geben.
- n Der Sensor erhält ein Abbild im virtuellen Datenraum.
- n Ein Prozesssensor holt sich über die Anlagen-Cloud seine Position (R/I-Diagramm) nebst weiteren Informationen und kann sich so selbst konfigurieren.

6.5 Interaktionsfähigkeit und Bidirektionalität

Durch die Vernetzung der Prozesssensoren und damit der kontinuierlichen Bereitstellung von Informationen werden in CPS zusätzliche Funktionen bereitgestellt.

Dies umfasst:

- n Sensoren sind eine Hauptdatenquelle für Big- bzw. Smart-Data-Ansätze. Da sie durch ihre Connectivity kommunizieren, verknüpfen und Cloud-fähig sind, bilden sie intelligente Schwärme aus.
- n Sensoren sind nicht mehr Einzelmessstellen, sondern bilden Prozesszustände ab oder generieren neue Informationen durch Kombination einzelner Informationen (vgl. Automotive-Beispiel im Abschnitt 2).
- n Sensoren liefern die gewünschten Informationen. (Das kann ein physikalisch chemische Größe sein oder nur ein robuster Messwert, der an anderer Stelle weiterverarbeitet wird, etwa für Soft Sensing und Advanced Process Control.)
- n Automatisierungstechnik und IKT verschmelzen zunehmend.

7 Der Weg von der aktuellen Automation zum smarten Sensor

Aufgrund der langen Laufzeiten von verfahrenstechnischen Anlagen, der sicherheitstechnischen Anforderungen und der konservativen Ausrichtung der Prozessindustrie ist nicht von einer disruptiven Innovation der Prozesssensoren auszugehen, sondern die Veränderungen vollziehen sich von der Istsituation über prinzipiell drei Schritte dahin. Diese Schritte sind im Folgenden dargestellt.

Schon heute sind Teile dieses möglichen Wegs beschritten – zum einen, weil die Ideen und Konzepte für die Automatisierung nicht neu sind, zum anderen, weil sich die Umsetzung dieser Konzepte sehr rasch vollzieht und attraktiv ist. Eine wichtige Grundlage spielen dabei Schnittstellen und Referenzarchitekturen. So ist ein Trend festzustellen, die besten Normungsansätze heranzuziehen, um Industrie 4.0 rasch verwirklichen zu können. Zwei wichtige Konzepte, die durchaus als „Ausgangslage“ betrachtet werden dürfen, werden daher in Abschnitt 7.1.1 und Abschnitt 7.1.2 in einem Exkurs knapp erläutert. Für weitere Details sei auf die Literatur verwiesen.

In den weiteren Überlegungen wird das formale RAMI-Modell verlassen und diese Schritte aus Sicht des Prozesssensors selbst und die ihn bildenden Komponenten beschreiben.

7.1 Ausgangslage

Die Ausgangslage kennzeichnet sich im Wesentlichen durch:

- Mehr als 80 % der Messdatenkommunikation ist analog, meist 4 mA bis 20 mA, unidirektional.
- Die Topologie ist überwiegend sternförmig realisiert.
- Sensoren geben allenfalls Zustandsinformationen aus (z. B. über HART oder potenzialfreie NAMUR-Kontakte).
- Vorausschauende Instandhaltungsanforderungen werden typischerweise nicht ausgegeben.
- Die Instandhaltung findet konservativ-vorabestimmt anstelle von zustandsorientiert statt, um eine hohe Anlagenverfügbarkeit und eine hohe Sicherheit zu gewährleisten.
- Kalibrierungen und Optimierungen finden nach Instandhaltungsintervallen statt.

- Plausibilitätsüberprüfungen finden höchstens auf PLT-Ebene (PLT – Prozessleittechnik) statt.
- Sensoren sind nicht universell auswechselbar (Baulängen, Parametrierung, Kommunikation etc.).
- Kabellose Datenanbindungen (z. B. Wireless HART) und Energieversorgungen (Batterie, Energy Harvesting) sind vereinzelt im Einsatz.

7.1.1 Industrie-4.0-Netzwerk und Verwaltungsschale

Das Bild 5 zeigt das aktuelle Prinzip eines Feldgeräts mit einer Schnittstelle zum Prozess (Sensor, Aktor oder andere Dinge), der klassischen Integration via Feldbus und einer Bedienung (HMI). Man geht davon aus, dass die Integration noch lange Zeit so realisiert ist wie heute und nennt sie daher konventionell. Eine weitergehende Entwicklung erfolgt über zusätzliche Kommunikationskanäle. Diesen Teil des Feldgeräts nennt man „neue Welt“. Dieser ist durch eine Barriere, eine interne Firewall vom konventionellen Teil abgetrennt, um in diesem kritische Funktionen wie die Messwerterzeugung selbst zu schützen.

7.1.2 Referenzarchitekturmodell (RAMI 4.0)

Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 und die Industrie 4.0-Komponente [19] beschreiben die verschiedenen Dimensionen und Hierarchien des Informationsaustauschs sehr konkret (vgl. Bild 5). Darin kann die Kommunikation auf genau festgelegten Informationsebenen (Layers, das heißt Blickweisen wie Messdaten, Zustandsinformationen, Energiezustand), auf verschiedenen Hierarchieebenen und entlang des Lebenszyklus erfolgen (vgl. auch Bild 6). Die einzelnen Hierarchieebenen sind, wie in Bild 5 dargestellt, streng voneinander getrennt.

- virtuelles Abbild des Sensors (derzeit bereits mehr oder weniger stark ausgeprägt)
 - In einer Datenbank („Cloud“) sind statische Informationen (Typenbezeichnung, Instandhaltungsinformation, Handbuch, Werksparmetrierung etc.) über einen Sensor abgelegt. Sie lassen sich über seine Kennung abrufen.

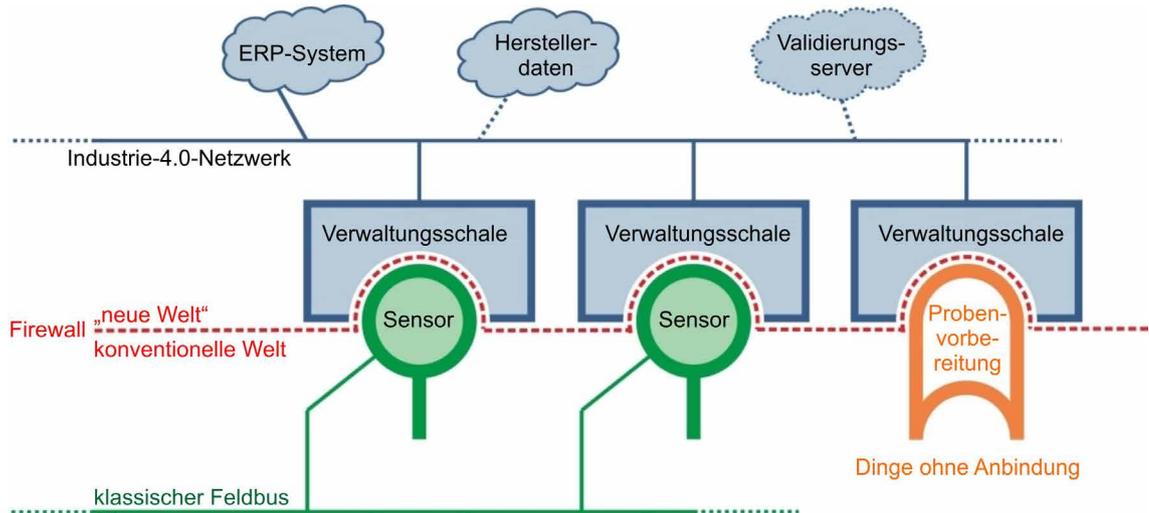


Bild 5. Ausgangslage: Sensoren sind klassisch über Feldbus mit dem PLT-System verbunden. Dinge ohne Anbindung, wie etwa eine Probenvorbereitung, können nicht auf einer Steuerebene kontrolliert werden.

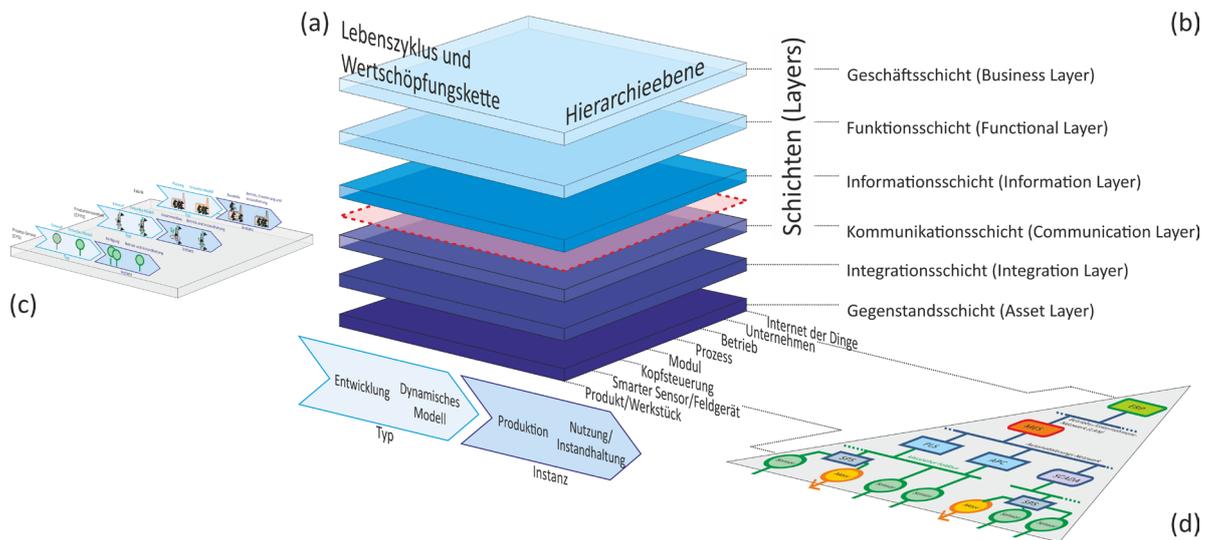


Bild 6. Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 und die Industrie-4.0-Komponente [19]

- Engineering-Informationen (Anschlussdaten, CAD-Modell, dynamisches Simulationsmodell) werden vom Hersteller bereitgestellt.
- Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 und die Industrie-4.0-Komponente bieten sich aktuell als Standard an. Auch z. B. eClass wurde für die Automatisierungskomponenten hinsichtlich des Einsatzes in Industrie 4.0 weiterentwickelt.

7.2 Perspektive 1 – Vereinfachte Bedienung mit mobilen Endgeräten

Der erste Schritt in die „neue Welt“ ist schlicht ein zusätzlicher Zugang zu den Prozesssensoren mit mobilen Endgeräten (Smart-Phone, Smart-Pad). Dieser ist für einige wenige Prozesssensoren schon heute

realisiert. Dabei werden die Standardkommunikationsmöglichkeiten wie WLAN oder Bluetooth entweder unidirektional oder bidirektional genutzt. Letztere erfordern dabei Maßnahmen zur Datensicherheit wie die Vergabe von Zugriffsrechten.

Dadurch ist eine vereinfachte und komfortablere Bedienung möglich und es lassen sich weitere Dienste realisieren, z. B.:

- Abfrage von Zustandsinformationen (z. B. Sensordaten, Fehlerhistorie) und Messwerten
- Das mobile Endgerät kann als Brücke zur Cloud fungieren und dadurch Dienste der Cloud (z. B. neue Kalibriermodelle, neue Firmware, Reparatur, fortgeschriebene Dokumentation/Handbuch) bereitstellen.

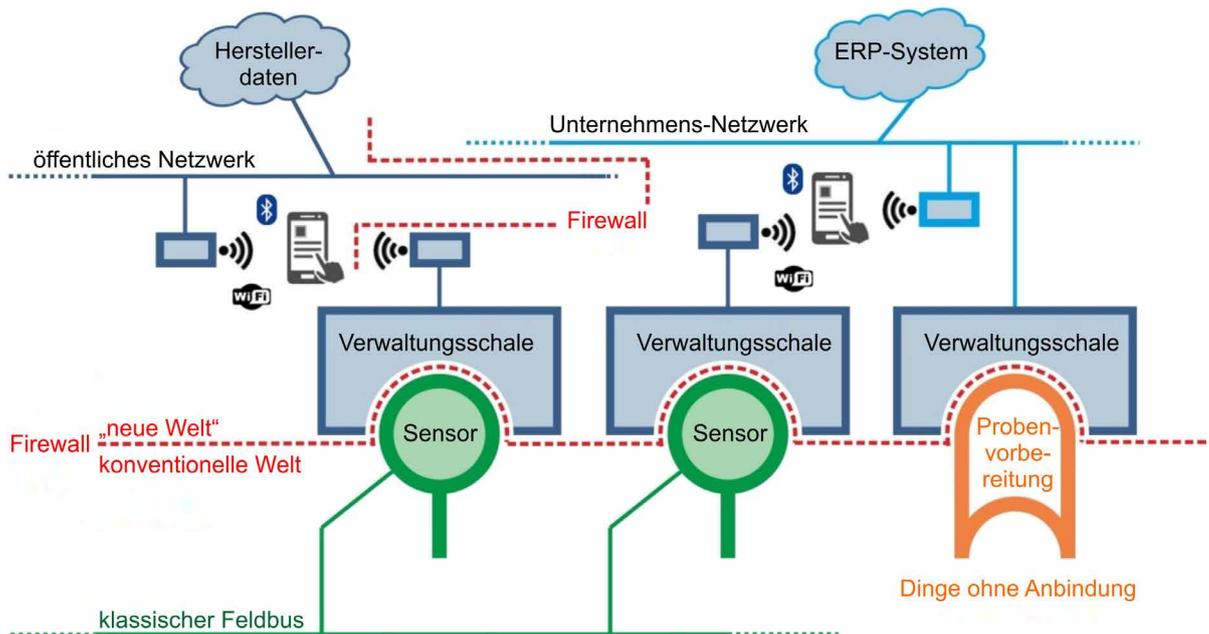


Bild 7. Schritt 1 und Schritt 2 – Vereinfachte Bedienung

7.3 Perspektive 2 – Neue Services durch Cloud-Dienste

Der nächste Schritt ist die direkte bidirektionale Kommunikation zum Internet. Als Integrationstechnologie wird wohl OPC-UA zum Tragen kommen.

Damit wird der Prozesssensor zusätzlich zu seiner konventionellen Integration Bestandteil eines CPPS. Das ist dann das Internet der Dinge für Prozesssensoren.

Applikationen können darüber direkten Zugriff auf Daten im Prozesssensor erhalten oder der Prozesssensor kann Daten selbstständig aus dem Internet holen. Dadurch kann der Prozesssensor Dienste anbieten und beispielsweise Dosierfunktionen ausführen und Ventile direkt ansteuern. Damit ist dann der Aufbau beliebiger Dienstleistungen und Funktionen auf der Basis der jeweils gängigen Methoden und Technologie des Internets möglich. Man kann annehmen, dass dies in verschiedenen Domänen geschieht, z. B. begrenzt auf eine Anlage, auf einen Betrieb oder einen Hersteller.

Industrie 4.0 hebt sich gegenüber gegenwärtigen Produktionskonzepten dadurch ab, dass sogenannte Dienste entwickelt und realisiert werden. Ein bestehendes Beispiel ist die Nutzung von Handy-Bewegungsdaten zur Darstellung der Verkehrssituation auf Straßen (das sogenannte „Cloud-Wissen“).

In der Prozessindustrie werden Dienste entwickelt werden, die die Daten der smarten Sensoren nutzen:

- ▢ Instandhaltungsdienste ermitteln über Sensordaten den Abnutzungsvorrat von Anlagenteilen und leiten Instandhaltungsmaßnahmen ab.
- ▢ Energiedienste bestimmen über Sensordaten den Energieverbrauch von Anlagenteilen in Abhängigkeit von der Fahrweise und Umgebungsbedingungen und leiten Energieeinsparungen ab.

7.4 Perspektive 3: Neue Automatisierungs-Topologien

Mit diesem Schritt wird dann die eigentliche Prozessautomatisierung im CPPS realisiert.

Es wird dann eine dauerhafte Verbindung zwischen Prozesssensor und Cloud realisiert. Das heißt, der Sensor wird in beide Richtungen kommunikationsfähig. Damit lassen sich Cloud-Dienste (anlagenbezogen, betriebsintern, firmenintern, herstellerintern, weltweit) nutzen, Sensoren untereinander vernetzen und (zumindest vorerst weniger kritische) Automatisierungsaufgaben realisieren.

Die unterstützenden Cloud-Dienste erfordern keine derart hohe Verfügbarkeit oder Echtzeitfähigkeit. Sind diese jedoch zukünftig gegeben, wäre auch eine Übernahme der Prozessführungsaufgaben denkbar. Dann kann die konventionelle Integration vollständig ersetzt werden und die Realisierung des Konzepts Industrie 4.0 für Prozesssensoren ist erreicht.

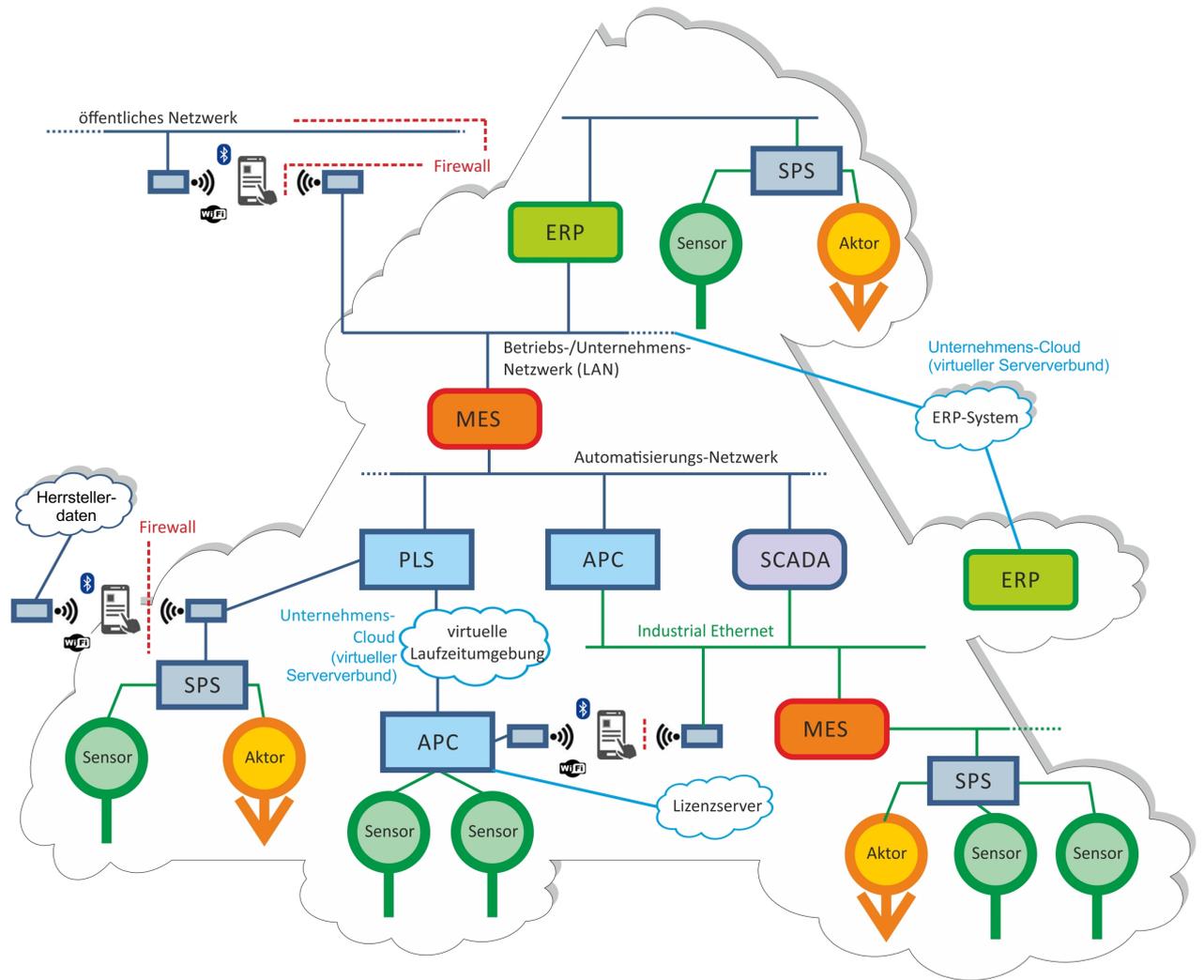


Bild 8. Akzeptanz Cloud-basierter Topologien und Auflösung der Konturen der Automatisierungspyramide

8 Thesen 4.0

Die wichtigsten Ergebnisse der Anwenderabfrage wurden in der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“ in Kernthesen zusammenfasst. **Diese Thesen haben generell auch heute weiter Bestand.** Sie sind im folgenden Abschnitt noch einmal zusammengestellt. Für weitere Erläuterungen siehe [2]. In Abschnitt 8.2 sind dann die Aussagen der Technologie-Roadmap 4.0 in Form von vier neuen Thesen zusammengefasst.

8.1 Thesen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“

- I Für die Sensorik wird eine höhere Robustheit und Langzeitstabilität (niedriger Instandhaltungsbedarf) erwartet.
- II Neue Prozesssensorik wird nicht nur beim Bau von Neuanlagen, sondern zunehmend auch zur Optimierung bestehender Anlagen eingesetzt.
- III Die neuen Anforderungen an die Prozesssensorik gehen über die Erfassung von Prozessinformationen hinaus. Auch Zwischen- und Trendinformationen zu Produkteigenschaften werden zu Regelzwecken genutzt.
- IV Für spezifische Applikationen wird von der Sensorik eine höhere Genauigkeit gefordert.
- V Es sind Informationen über die räumliche Verteilung von Prozessgrößen erforderlich.
- VI Es besteht der Wunsch zur Ermittlung und Lokalisierung von Grenzflächen bzw. -phasen.
- VII Es gibt einen Trend zu Bioprozessen, auch für bisher konventionell chemisch hergestellte Produkte.
- VIII Eine prozesstaugliche Zielproteinanalyse für Bioprosesse wäre revolutionär. *Potency und Glycosylierung sind Parameter, die heute dazugekommen sind**.

- IX. Der Bedarf nach Prozessanalytik mit Einwegsensoren wächst.
- X Die zunehmende Verwendung nachwachsender oder recycelter Einsatzstoffe stellt neue Anforderungen an die Prozessmesstechnik.
- XI Komponenten in Gasen *und Flüssigkeiten** müssen mit immer niedrigeren *Bestimmungsgrenzen** detektiert werden.
- XII Es besteht Bedarf an nicht invasiver Sensorik für die Warenlogistik.
- XIII Ein Trend zu Inline-Messungen *oder nicht invasiver Messverfahren** ist deutlich erkennbar.

* Ergänzungen/Veränderungen gegenüber „Prozesssensoren 2015+“ kursiv gesetzt

8.2 Neue Thesen der Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 4.0“

- XIV Industrie 4.0 führt zu erheblichen Veränderungen im Denken und Handeln der Menschen in Gesellschaft, Industrie und Wirtschaftsräumen. Smarte Prozesssensoren werden diese Entwicklung mit neuen Funktionalitäten stark beeinflussen.
- XV Die stark vereinfachte Integration der Prozesssensoren in Netzwerke und ihre Interaktion mit weiteren Informationen führen zu (selbst)organisierten Systemen und verbessern die Produktion.
- XVI Die Kommunikation aller Prozesssensoren erfolgt über standardisierte und sichere Schnittstellen- und Datenformate
- XVII Smarte Prozesssensoren sind wichtige Bestandteile von CPPS und ermöglichen neue Geschäftsmodelle für Anwender, Gerätehersteller, Dienstleister.

Über die Technologie-Roadmap

Die 2005 erstmals veröffentlichte Technologie-Roadmap wurde in einem gemeinsamen Projekt der Organisationen NAMUR und VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik unter Mitwirkung führender Hersteller und Anwender von Prozesssensorik sowie dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) 2004 erarbeitet [26; 27]. Durch das Zusammenbringen von Technologie- und Marktsicht sowohl aus Anwendersicht als auch Herstellersicht haben die Verbände den künftigen Handlungsbedarf bzw. das Potenzial im Bereich der Prozesssensorik aufgezeigt.

Initiiert von NAMUR und VDI/VDE-GMA und unter Mitwirkung der Unternehmen ABB, BASF, Bayer Technology Services, BIS Prozesstechnik, Evonik, Endress+Hauser, Siemens und der BAM entstand 2009 die grundlegend aktualisierte und überarbeitete Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2015+“, die im November 2009 veröffentlicht wurde [2] und [3].

Am 04. April 2014 startet in München die Projektarbeit zur Überarbeitung erneut im Auftrag der NAMUR und GMA unter Mitwirkung der Unternehmen ABB, BASF, Bayer Technology Services, Bilfinger, Endress+Hauser, Evonik, Festo, Siemens, Krohne und den Forschungsinstituten BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Federführung), Fraunhofer ICT und der Hochschule Reutlingen. Im Projektteam waren damit Experten aus den Anwenderunternehmen, den Geräteherstellern und kompetenten Forschungseinrichtungen vertreten.

Um die Technologiewünsche mit einem größeren Fachpublikum abzustimmen, fand vom 12. bis 15. Oktober 2014 unter der Organisation der DECHEMA das 53. Tutzing-Symposium in der Evangelische Akademie Tutzing am Starnberger See unter dem Titel „Prozessanalytik – Werkzeug oder Zukunftstechnologie?“ statt [17]. Ein wesentliches Element des Symposiums waren Workshops mit dem Ziel, in interdisziplinären Expertengruppen von 20 bis 25 Teilnehmern zu den ausgewählten Fragestellungen Status und Handlungsbedarf innerhalb der einzelnen Themengebieten zu erarbeiten. Der offene Meinungs austausch aller Teilnehmer, mit unterschiedlichen Erfahrungen und Sichtweisen, bot eine große Chance, signifikante und

zukunftsweisende Perspektiven aufzuzeigen. Die Workshops wurden von Moderatoren geleitet und folgten einem vorbereiteten Ablaufplan. Der umfassendste Workshop des Tutzing-Symposiums wurde von der Projektgruppe „Technologie-Roadmap“ gestaltet und geleitet. Die Ergebnisse wurden von den jeweiligen Moderatoren zusammengefasst und flossen in diese Technologie-Roadmap mit ein.

Auch das 9. Interdisziplinäre Doktorandenseminar der GDCh (22. bis 24. Februar 2015 in Berlin) startete gleich in medias res mit einem Design-Thinking-Workshop zum Thema „Prozessanalytik für Industrie 4.0“ in Bezug auf die Prozessindustrie. So kam von der Projektgruppe „Technologie-Roadmap“ der Vorschlag, die Generation der zukünftigen Kolleginnen und Kollegen zu dem Thema zu befragen, die für die heute verbrochenen Konzepte zukünftig selber aufkommen müssen. Nach einem Impulsvortrag „Prozessanalytik für Industrie 4.0“ ging gleich an die mehrstufige Konzeptgestaltung der drei Schwerpunktthemen: „Netzwerk der Sensoren“, „Intelligente Prozesse“ und „Kommunikation zwischen Mensch und Maschine“. Zuletzt wurden die drei Konzepte in greifbare Prototypen realisiert und ausgiebig diskutiert.



Bild 9. Projektgruppe „Technologie-Roadmap“

Projektgruppe „Technologie-Roadmap“

Dr. Martin Blazek
Evonik Technology & Infrastructure GmbH
Marl

Dr. Michael Deilmann
Krohne Messtechnik GmbH
Duisburg

Dr. Armin Gasch
ABB AG, Forschungszentrum Deutschland
Ladenburg

Dr. Martin Gerlach
Bayer Technology Services GmbH
Leverkusen

Frank Grümbel
Lanxess Deutschland GmbH
GF PTSE CM Prozessanalysetechnik
Leverkusen

Dr. Ulrich Kaiser
Endress+Hauser Management AG
Reinach, Schweiz

Dr. Michael Kloska
BASF SE
Fachzentrum Prozessanalysetechnik
Ludwigshafen

Dr. Stefan Löbbecke
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT
Pfinztal

Dr. habil. Michael Maiwald
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
(BAM)
Berlin

Thorsten Pötter
Bayer Technology Services GmbH
Leverkusen

Prof. Dr. Karsten Rebner
Hochschule Reutlingen Process Analysis & Technology (PA&T)
Reutlingen

Dr. Eckhard Roos
Festo AG & Co. KG
Denkendorf

Dr. Stefan Stieler
Bilfinger Maintenance GmbH
Frankfurt am Main

Dr. Dieter Stolz
Siemens AG
Industry Automation Division, Sensors and Communication
Karlsruhe

Dr. Michael Theuer
BASF SE
Fachzentrum Prozessanalysetechnik
Ludwigshafen

Geschäftsstelle GMA und NAMUR

Jürgen Berthold
Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik
Düsseldorf

Heinrich Engelhard
Bayer Technology Services GmbH
Leverkusen

Literatur

- [1] Abele, T.; Demmerle, W.; Drathen, H.; Dyckmanns, H.; Gasch, A.; Gerlach, M.; Gote, M.; Harbach, F.; Kaiser, U.; Kloska, M.; Laube, T.; Ochs, S.; Markus, M.; Panzke, R.; Schmieder, W.; Westerkamp, D.: Technologie-Roadmap „Prozesssensoren 2005–2015“, Herausgegeben von VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und NAMUR - Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, Düsseldorf, März 2006
- [2] Gasch, A.; Gerlach, M.; Kaiser, U.; Kloska, M.; Maiwald, M.; Matalla, N.; Morr, W.; Panzke, R.; Stieler, S.; Westerkamp, D.: Prozesssensoren 2015+, Technologie-Roadmap für Prozesssensoren in der chemisch-pharmazeutischen Industrie, Herausgegeben von VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) und NAMUR - Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie, Düsseldorf, November 2009
- [3] Maiwald, M.: Die aktualisierte Technologie-Roadmap Prozess-Sensorik 2015+, Hauptbeitrag ATP-Edition (Automatisierungstechnische Praxis), 52 (1–2) (2010), S. 40–45
- [4] Im Text werden CPS und CPPS unterschieden. Die zukünftige Prozessanlage ist ein CPPS. Der smarte Sensor, Aktor etc. ist bereits ein CPS-Akronyme findet man z. B. in <http://www.din.de/blob/67740/7493cef1cbe545512c0c933168452289/roadmap-i4-0-deu-data.pdf> (August 2015)
- [5] „Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems“, Acatech 2012, <http://www.acatech.de/?id=1405> (Juli 2015)
- [6] „Zukunftsprojekt Industrie 4.0“, Internetseite der Bundesregierung, <http://www.bmbf.de/de/9072.php> (Juli 2015)
- [7] Umsetzungsstrategie Industrie 4.0, Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0, herausgegeben von Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V. (BITKOM), Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) und Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), April 2015
- [8] Thesen und Handlungsfelder: Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation, herausgegeben von der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Düsseldorf, April 2013
- [9] Factories of the Future, European Commission, Research and Innovation, Key Enabling Technologies, http://ec.europa.eu/research/industrial_technologies/factories-of-the-future_en.html (Juli 2015)
- [10] Automation 2020, Bedeutung und Entwicklung der Automation bis zum Jahr 2020, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) 2012, <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/mess-und-automatisierungstechnik/fachbereiche/automation-2020/> (Juli 2015)
- [11] Apple produzierte bis 1998 PDAs der Produktreihe Newton. Seit 2000 arbeitete das Unternehmen an einem neuen Tablet-Konzept, wobei die Entwicklungen zwischenzeitlich immer wieder eingestellt wurden. Aus diesem Projekt gingen 2007 das iPhone® und 2010 das iPad® hervor. Übernommen aus: <https://de.wikipedia.org/wiki/IPad> (August 2015)
- [12] „Seveso-III-Richtlinie“: Richtlinie 2012/18/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 zur Beherrschung der Gefahren schwerer Unfälle mit gefährlichen Stoffen, zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinie 96/82/EG des Rates
- [13] „Störfall-Verordnung“: Verordnung auf Basis BGGI I, Nr. 19, 2. Mai 2000, S. 603–623 in der letzten Fassung BGGI. I, Nr. 33, 16. Juni 2005, S. 1598–1620 vom 01. Juli 2005
- [14] White Paper: Modulbasierte Produktion in der Prozessindustrie - Auswirkungen auf die Automation im Umfeld von Industrie 4.0, ZVEI, Februar 2015, <http://www.zvei.org/Verband/Publikationen/Seiten/White-Paper-Modulbasierte-Produktion-in-der-Prozessindustrie.aspx> (Juli 2015)
- [15] T. Abele, U. Kaiser, D. Westerkamp: Welcher Nutzen lässt sich durch Technologie-Roadmapping realisieren? In: Gausemeier, Jürgen (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung: 6. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, 28.–29.10.2010 in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften Paderborn, Heinz Nixdorf Institut (HNI-Verlagschriftenreihe Bd. 276), 2010, 405–418
- [16] Sustainable Process Industry through Ressource and Energy Efficiency, <http://www.spire2030.eu/> (Juli 2015)
- [17] 53. Tutzing-Symposium, Prozessanalytik – Werkzeug oder Zukunftstechnologie?, DECHEMA, 12.–15.10.2014, Evangelische Akademie Tutzing am Starnberger See
- [18] <http://www.opcfoundation.org/> (August 2015)
- [19] Das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 und die Industrie 4.0-Komponente, ZVEI, April 2015, <http://www.zvei.org/Themen/Industrie40/Seiten/Das-Referenzarchitekturmodell-RAMI-40-und-die-Industrie-40-Komponente.aspx> (Juli 2015)

- [20] https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2014/03/OPC-UA_I_4.0_Wegbereiter_DE_v2.pdf (August 2015)
- [21] Mahnke, W., Leitner, S.-H., Damm, M., OPC Unified Architecture, Springer Verlag, 2009 – ISBN 978-3-540-68898-3
- [22] Lange, J., Iwanitz, F., Burke, T.: OPC Von Data Access bis Unified Architecture, VDE Verlag, 2010 – ISBN 978-3-8007-3217-3
- [23] OLE for Process Control (OPC) “Open Platform Communications” https://de.wikipedia.org/wiki/Open_Platform_Communications (August 2015)
- [24] NAMUR - Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie: NAMUR-Empfehlung NE 107 „Selbstüberwachung und Diagnose von Feldgeräten“, 12.06.2006
- [25] Abele, T.; Kaiser, U.; Drathen, H.; Westerkamp, D. Laube, T.: Automatisierungstechnische Praxis 47 (2005) Heft 8, 36–41
- [26] Abele, T.; Kaiser, U.; Drathen, H. Westerkamp, D.; Fay, U.: Automatisierungstechnische Praxis 47 (2005) Heft 9, 50–54

Der VDI

Sprecher, Gestalter, Netzwerker

Ingenieure brauchen eine starke Vereinigung, die sie bei ihrer Arbeit unterstützt, fördert und vertritt. Diese Aufgabe übernimmt der VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. Seit über 150 Jahren steht er Ingenieurinnen und Ingenieuren zuverlässig zur Seite. Mehr als 12.000 ehrenamtliche Experten bearbeiten jedes Jahr neueste Erkenntnisse zur Förderung unseres Technikstandorts. Das überzeugt: Mit rund 154.000 Mitgliedern ist der VDI die größte Ingenieurvereinigung Deutschlands. Als drittgrößter technischer Regelsetzer ist er Partner für die deutsche Wirtschaft und Wissenschaft.

Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Jürgen Berthold
VDI/VDE-Gesellschaft
Mess- und Automatisierungstechnik (GMA)
Tel. +49 211 6214-678
Berthold@vdi.de
www.vdi.de

NAMUR-Geschäftsstelle
Heinrich Engelhard
c/o Bayer Technology Services GmbH
Tel. +49 214 30-71034
office@namur.de
www.namur.net