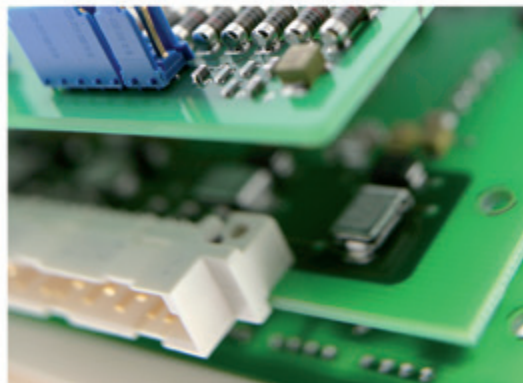


POSITIONSPAPIER

# Sensorik für die Digitalisierung chemischer Produktionsanlagen



## **IMPRESSUM**

### **Autoren:**

Uwe Hampel (Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf)  
Andreas Schütze (Universität des Saarlandes)  
Matthias Rädle (Hochschule Mannheim)  
Thomas Rück (Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg)  
Martin Krawczyk-Becker (KROHNE Innovation GmbH)  
Thomas Musch (Ruhr-Universität Bochum)  
Michael Maiwald (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)  
Hans Joachim Fröhlich (Endress+Hauser AG)  
Sebastian Zeck (Wanted Technologies)

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Uwe Hampel

### **Herausgeber**

ProcessNet-Fachgemeinschaften „Fluiddynamik und Trenntechnik“ und „Prozess-, Apparate- und Anlagentechnik“

### **Verantwortlich im Sinne des Presserechts**

DECHEMA e.V.  
Dr. Andreas Förster  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Januar 2020

### **Bildnachweise**

Titel: KROHNE Messtechnik GmbH; S. 2: BASF SE; S. 3: hramovnick - stock.adobe.com; S. 7: Endress+Hauser;  
S. 9: Volker Schlichting - fotolia.de; S. 11: WrightStudio - stock.adobe.com; S. 14: railwayfx - stock.adobe.com;  
S. 15: Michael Zhang - fotolia.de

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Digitalisierung chemischer Produktionsprozesse – Chancen und Herausforderungen für Messtechnik und Sensorik</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Sensorik für Zustandsüberwachung und vorausschauende Wartung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Sensorik zur Erfassung stoffbezogener Größen</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Sensorintegration in Anlagen</b>	<b>7</b>
<b>5</b>	<b>Datenübertragung und Sensorkommunikation</b>	<b>9</b>
<b>6</b>	<b>Sensorintelligenz</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Sensordatenverarbeitung</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Empfehlungen für die Forschung und Entwicklung</b>	<b>15</b>

# 1 Digitalisierung chemischer Produktionsprozesse – Chancen und Herausforderungen für Messtechnik und Sensorik



Produktqualität, etwa durch Verunreinigungen und Spurenstoffe, schwankende Eduktzusammensetzungen oder degradierte Katalysatoren frühzeitig zu erkennen. Dafür geeignete spektroskopische Messtechniken sind heute fast immer noch ausschließlich für den Laborbereich verfügbar und müssen auf die Prozessebene übertragen werden.

Für diese Herausforderungen ist die in heutigen Prozessanlagen vorhandene betriebliche Instrumentierung sowohl bezüglich der von ihr erfassten Informationen als auch bezüglich der von ihr bereitgestellten Schnittstellen und Datenformate nicht

Die chemische Industrie steht derzeit, wie viele andere Industriebereiche, vor den Herausforderungen einer Digitalisierung der Produktion. Sie ist der Schlüssel für die Flexibilisierung von Prozessen und Anlagen, für die Verkürzung von Produkteinführungszeiten sowie für den Zuschnitt der Produktion auf wechselnde Nachfrage und kürzere Produktlebenszyklen. In einer vernetzten Welt werden Informationen über Rohstoffe, Energieträger und Marktbedingungen instantan verfügbar. Sie können damit direkt in Prozessabläufe einfließen und bei der Erstellung von Marktprognosen helfen. Allerdings ergeben sich für die Digitalisierung von Produktionsprozessen in der chemischen Industrie besondere Herausforderungen durch ein oftmals sehr produktspezifisches Anlagendesign sowie die komplexe stoffliche und energetische Verkettung von Grundoperationen.

Die Messtechnik und Sensorik spielt neben der intelligenten Datenverarbeitung eine Schlüsselrolle für die Digitalisierung. Flexiblere Anlagen benötigen Sensorik zur Überwachung des Anlagenzustandes, zur Früherkennung nicht bestimmungsgemäßer Betriebszustände sowie für eine bedarfsgerechte Wartung. Neben der Zustandsüberwachung ist ebenfalls eine verbesserte Sensorik für die Erfassung von stoffbezogenen Daten essenziell, um Einbußen der

ausreichend. Eine Weiterentwicklung der Prozessmesstechnik und Prozessanalysetechnik in Richtung der Erfassung sekundärer Prozessparameter, einer intelligenten multimodalen Sensordatenverarbeitung, standardisierter digitaler Schnittstellen sowie Sensorintelligenz ist unabdingbar. Schließlich ist beim verstärkten Einsatz neuer Sensorik der Sensorrobustheit, der Eigensicherheit im Prozess sowie der einfachen, auch nachträglichen oder temporären, Installierbarkeit von Sensoren in großen Anlagen und rauen Prozessumgebungen Rechnung zu tragen.

Da die Entwicklung neuer und verbesserter Messtechnik und Sensorik grundlegend aus verschiedenen Richtungen gedacht werden muss, haben sich Akteure aus verschiedenen Branchen zusammengetan und dieses Positionspapier erstellt. Es basiert auf einer grundlegenden Analyse des Ist-Stands sowie des Bedarfs der Industrie, die unter anderem auf einem eigens dafür durchgeführten Workshop mit Sensorentwicklern, Anlagenherstellern sowie Anlagenbetreibern am 18. Juni 2019 bei der DECHEMA in Frankfurt a. M. diskutiert wurden. Diese Aktivitäten wurden maßgeblich von der Initiative *Wanted Technologies* der ProcessNet sowie dem AMA Verband für Sensorik und Messtechnik e.V. initiiert.



## 2 Sensorik für Zustandsüberwachung und vorausschauende Wartung

Die Zustandsüberwachung hat zum Ziel, frühzeitig Veränderungen und Probleme im Prozessablauf oder in der Funktion von Komponenten zu erkennen. Dadurch sollen größere Schäden oder Produktivitätseinbußen vermieden werden. Die vorausschauende Wartung dient der Optimierung der Produktion bezüglich Wartungseingriffen und Prozessstillständen. Das frühzeitige Bestimmen optimaler Eingriffszeitpunkte ist dabei ebenso wichtig wie das Anpassen der Betriebsfahrweise an den aktuellen Anlagen- und Komponentenzustand. Vor allem in frühen Phasen sind Veränderungen des Material- oder Komponentenverhaltens kaum mit betrieblicher Prozessinstrumentierung erkennbar und erfordern zusätzliche Spezi­alsensorik.

Für **große Komponenten**, wie Trennkolonnen, Reaktoren, Rohrleitungssysteme, **sowie ganze Anlagen** stehen die Erfassung von Prozess- und Anlagenparametern an möglichst vielen Positionen und mit möglichst geringem technischen Aufwand bezüglich der Verkabelung sowie der Art und Anzahl von Einbauöffnungen bei gleichzeitig hoher Robustheit und großer Datenverdichtung im Vordergrund. Zu erfassende Größen sind Art und Dicke von Fouling-Belägen, Verschleißfortschritt, Geometrie­veränderungen, Mikrorisse sowie lokal wirkende Lasten und Spannungen, Beschleunigungen, Frequenzen und Amp-

lituden von Vibrationen, sowie Temperaturwechselbelastungen. Diese müssen mit ausreichend hoher räumlicher Auflösung erfasst werden. In Bezug auf die funktionale Prozesssicherheit kann durch feste oder mobile Sensorik eine zweite Überwachungsebene aufgespannt werden, in der Tätigkeiten der Anlagenläufer durch die Sensorik übernommen werden. Bei **Komponenten**, wie Pumpen, Ventilen und Durchflussmessern, stehen vor allem der Verschleiß sowie mechanische und thermomechanische Belastungen im Fokus des Interesses. Die Zukunftstrends liegen hier in der multisensoriellen Erfassung verschiedener und auch indirekter Parameter, in der Erfassung von Parametern an mehreren Positionen innerhalb der Komponente, in intelligenter Softsensorik sowie berührungsfreien Messverfahren.

Für die Zustandsüberwachung gibt es bereits eine Reihe etablierter einfacher **berührender Sensortechniken**, wie Dehnmessstreifen oder Temperatursensoren. Während für letztere kaum Entwicklungsbedarf besteht, sind für erstere Entwicklungen hin zu höheren Prozesstemperaturen oberhalb 200 °C anzustreben. Zu den fortgeschrittenen berührenden Sensoren gehören faseroptische Sensoren auf Basis von Faser-Bragg-Gitter-Technologie oder Raman-Streuung. Für diese wurde in den letzten Jahren bereits



eine gute Prozesstauglichkeit erreicht. Zukünftige Entwicklungen sollten vor allem auf eine Ausdehnung der sensorischen Funktionalität auf andere Größen als Temperatur und Dehnung sowie eine noch höhere Robustheit zielen.

Im Bereich **eingreifender aber nicht medienberührender Sensorik** liegt ein Hauptaugenmerk auf der Entwicklung von Schall-, Radar- und Lidar-Systemen für raue Prozessumgebungen. Solche Techniken werden heute beispielsweise bereits für die Füllstandsmessung eingesetzt. Eine Ausdehnung des Anwendungsbereiches auf die Diagnostik von Strömungszuständen in Kolonnen, die Detektion und quantitative Bewertung von Schaumbildung und Zweiphasenzuständen, die Messung von Trübungen im Gas- oder Flüssigkeitsraum von Prozessanlagen oder die Erkennung anlageninterner Geometrieänderungen sind hier von besonderem Interesse. Entwicklungsbedarf besteht vor allem im Bereich der intelligenten Signal- und Datenverarbeitung sowie der Robustheit der Sensorhardware. Im Bereich der Anlagensicherheit ist darüber hinaus die Weiterentwicklung intelligenter, hochempfindlicher und -selektiver Gassensorik von Bedeutung.

Besonderes Augenmerk sollte auf die Entwicklung, Qualifizierung und Anwendung **berührungsfreier nichteingreifender Mess- und Bildgebungsverfahren** gelegt werden. Der Preis von CMOS- und Infrarot-Kameras erlaubt mittlerweile einen massiven Einsatz derselben in Prozessanlagen. Daher stehen weniger der Bildgebungssensor selbst als die Schaffung geeigneter und sicherer optischer Zugänge zum Prozess bzw. zur Anlage sowie die intelligente Bildanalyse im Fokus. Ziel der Entwicklung von Systemen im Bereich TRL 3 bis TRL 6 muss hier der Nachweis der erfolgreichen Erkennung und Quantifizierung von Zustandsänderungen unter schwierigen Prozessbedingungen sein. Solche sind beispielsweise geringfügige Geometrieänderungen, Schwingungen, Belagsbildung, Materialabtrag durch Korrosion oder Abrasion, Temperaturfelder oder verschiedene Strömungszustände. Daneben sollten für große Anlagen ebenfalls neue Ansätze berührungsfreier Mess- und Bildgebungsverfahren, etwa Messverfahren auf Basis natürlicher Strahlung oder Prozesstomographie, auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht und hin zur Prozesstauglichkeit entwickelt werden.

Für die **Komponentenüberwachung** werden aus Gründen der Prozesssicherheit ebenso berührungsfreie Messverfahren bevorzugt. Die akustische Überwachung stellt eine im Grundsatz bereits gut entwickelte Methode dar. Ebenso wie für Gesamtanlagen sollten hier verstärkt Verfahren auf Basis von optischer und Infrarot-Bildgebung für Pro-

duktionsanlagen qualifiziert werden. Für akustische und bildgebende Ansätze sind insbesondere Konzepte für die gleichzeitige Überwachung mehrerer Komponenten von Interesse. Fernerhin sollten auch hier innovative Ansätze, etwa durch Nutzung natürlicher Strahlung, magnetischer Felder, Kernspinresonanz sowie Verfahren der Prozesstomographie oder Impedanzspektroskopie nutzbar gemacht werden.

Für die Zustandsüberwachung und vorausschauende Wartung von Komponenten stehen **Robustheit** und **Kosteneffizienz** technischer Lösungen im Vordergrund. Deshalb ist bei der Entwicklung und Qualifizierung von Sensorlösungen insbesondere auf die Robustheit des Wandlers und der prozessnahen Aufbau- und Verbindungstechnik zu achten. Besonders wichtig sind dabei Temperaturfestigkeit, Temperaturwechselbeständigkeit, Chemikalienbeständigkeit, Abrasionsfestigkeit, Korrosionsbeständigkeit, Unempfindlichkeit gegen mechanischen und thermischen Schock sowie Unempfindlichkeit gegen Fouling. Kann eine Unempfindlichkeit nicht gewährleistet werden, sind Konzepte zur Erkennung von Beeinträchtigungen der sensorischen Funktionalität zu entwickeln und zu implementieren. Da bei Komponenten der Kostendruck auf die Sensorik größer ist als bei großen Anlagen, sind hier insbesondere die Substitution kostenintensiver High-end-Sensorik durch kombinierte einfache und preiswerte Sensoren sowie die adressierbare Erfassung verschiedener Systemparameter von Interesse.

Eine wesentliche Entwicklungsrichtung ist die **Fusion von Daten multipler Sensoren** und die Etablierung von **Softsensorik**. So können bei der Überwachung von Pumpen, Ventilen oder Wärmetauschern Daten spezieller Sensoren, etwa für Vibration, mit Daten betrieblicher Instrumente, etwa für Temperatur, Druck und Durchfluss, kombiniert werden. Für Pumpen, Ventile und Rohre sind sensorische Konzepte von hohem Interesse, bei denen der Zustand der Komponenten (zum Beispiel Lagerspiel, Ventilsitz, Verblockung, Wandschwächung) mittels Softsensorik aus mit betrieblicher Instrumentierung erfassten fluiddynamischen und thermischen Prozessgrößen ableitbar ist. Bei Wärmetauschern kann Softsensorik helfen zu erkennen, wo genau Fouling einsetzt und wie viele bzw. welche Rohre oder Platten betroffen sind. Für die Qualifizierung berührungsfreier akustischer Sensoren ist oft die Schallausbreitung in inhomogenen und veränderlichen Prozessmedien und komplex strukturierten Prozessräumen problematisch. Hier sind insbesondere fortgeschrittene Methoden der Signalverarbeitung, wie etwa Maschinelles Lernen, gefordert.

### 3 Sensorik zur Erfassung stoffbezogener Größen

Als stoffbezogene Messgrößen werden im Kontext chemischer Produktionsanlagen im weitesten Sinne solche Größen bezeichnet, welche die chemische Zusammensetzung und stoffliche Eigenschaften von Gasen, Flüssigkeiten und Feststoffen aber auch Grenzflächen beschreiben. Hierzu zählen beispielsweise Stoffkonzentration, Phasenanteil, Partialdruck, pH-Wert, Viskosität, Dichte, Oberflächenspannung, disperse Grenzflächendichte, Aktivität, Trübung sowie Größenverteilungen disperser Stoffe. Für die Messung dieser Größen existieren heute vielfältige Arten von Labormessgeräten, die auf komplexen physikalischen Messprinzipien, wie z. B. der UV/VIS/NIR-Spektroskopie, der Raman-Spektroskopie, der Fluoreszenzspektroskopie, der Ionenmobilitätsspektrometrie, der Kernspinresonanzspektroskopie oder der photoakustischen Spektroskopie, basieren. Die Inline- bzw. Online-Erfassung stoffbezogener Größen wird häufig mit dem Begriff der Prozessanalysetechnik (PAT) verbunden.

Für den Laborbetrieb entwickelte Messgeräte sind im Allgemeinen universell für stark wechselnde Anforderung des Laborbetriebs ausgelegt und deshalb zu groß und zu teuer für die Integration in Prozessanlagen. Zur besseren Prozessintegration existierender Messverfahren für stoffbezogene Größen sind **Messgeräte kompakt, robust und funktional** zu gestalten, wobei dies nicht zu Lasten der oft geforderten hohen Präzision und Reproduzierbarkeit gehen darf. Ein Beispiel ist die Miniaturisierung von komplexen Wandlersystemen, wie z. B. standardisierte Spektrometer-Frontends. Neben einer grundlegenden Funktionsoptimierung ermöglicht ein funktionales Design auch den einfachen Austausch bestimmter Baugruppen, beispielsweise mit Blick auf eine **einfache Sensorwartung oder Sensorreinigung**, so dass dies durch den Anwender selbst und nicht ausschließlich durch geschultes Fachpersonal möglich ist. Im Rahmen der Miniaturisierung und Funktionalisierung sollte das Potenzial alternativer und automatisierter Fertigungsverfahren, wie Siebdruck, 3D-Druck, Dünnschichttechnik oder MEMS-Technologien, genutzt werden. In Kombination mit der Verwendung standardisierter Komponenten können Messsysteme auf diese Weise preiswerter realisiert und ein massiverer Einsatz, etwa in großen Apparaten, wie Trennkolonnen, ermöglicht werden. Auch die faseroptische Ankopplung von optischen Sensoren stellt eine sehr gute Möglichkeit dar, die Prozessanbindung robust und kostengünstig bei

gleichzeitiger Erhöhung der Prozess- und Anlagensicherheit (z. B. Explosionsschutz) zu realisieren.

Werden Sensoren und Messverfahren für stoffbezogene Größen von der Labor- auf die Prozessumgebung übertragen, so sind sie außerdem oft anfällig für prozesstypische Störungen, die im Labormaßstab nicht vorkommen oder durch manuelle Präparationsverfahren vermieden werden. Solche Störungen sind zum Beispiel Gasblasen, Schlieren und Feststoffpartikel in optischen Messvolumina, Fouling an Wand- oder Wärmeübertragungsflächen, stoffliche Inhomogenitäten durch ungenügende Vermischung, Dispergierung oder Emulgierung oder starker Temperatureinfluss. Dafür sind integrale Korrektur- und Schutzmechanismen zu entwickeln und zu implementieren. Störungen, die sich auch auf den Prozessablauf auswirken, sollten detektiert, quantifiziert und gemeldet werden. So können in manchen Anwendungen Prozessspektrometer durch einfachere und robustere Messgeräte ersetzt werden, bei denen durch Beschränkung auf produktspezifische Wellenlängen problematische Querempfindlichkeiten vermieden werden. Hierzu ist zumeist ein vertieftes Prozessverständnis notwendig. Als Beispiel kann beim Raman-Nachweis von Restwasser in organischen Lösungsmitteln der Einfluss von Fluorophoren oder Belägen über die Messung der Lichtintensität in einem nicht-Raman-aktiven Wellenlängenbereich erkannt und unterdrückt werden.

Eine wesentliche Hürde bei der Praxiseinführung neuer Sensorik entsteht aus dem Tatbestand, dass im Labor, im Technikum und in der großtechnischen Produktionsanlage bisher Messtechnik und Sensorik mit unterschiedlicher Funktionalität verwendet werden muss. Durchgängige Lösungen existieren kaum. Dies erhöht den Anpassungsaufwand bei der Integration in Prozessanlagen zusätzlich. Sowohl die Akzeptanz als auch die Übertragbarkeit von Ergebnissen würde von einer durchgängigen Sensoranwendung während der Prozessentwicklung und Pilotierung vom Labor über das Technikum bis in die Produktion und Nutzung vergleichbarer Sensorik profitieren.

Wegen der Vielfalt der zu erfassenden Größen und der zur Messung geeigneten physikalischen und chemischen Wechselwirkungsmechanismen ist das Gebiet der Sensorik für stoffbezogene Größen sehr innovativ und von vielfältigen

Entwicklungen in **anderen Anwendungs- und Technologiefeldern** getrieben. Beispielhaft seien hier jüngere Entwicklungen in der Lasertechnik (Absorptionsspektroskopie mittels durchstimmbarer Laserdioden, Raman-Techniken, photoakustische Spektroskopie, Quantenkaskadenlaser, Oberflächenplasmonen-Resonanzspektroskopie), der Lichtwellenleitertechnik (faseroptische Sensoren) sowie der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik (ChemFET, MEMS, kapazitive mikromechanische Ultraschallwandler) genannt. Ergebnisse des wissenschaftlich-technischen Fortschritts auf diesen Gebieten sind in möglichst kurzer Zeit durch Demonstration der Funktionsprinzipien im Labor und anschließende Übertragung in die Praxis der chemischen Produktion zu transferieren. Oft sind solche innovativen Messtechniken auch bereits für andere Einsatzgebiete, wie Medizintechnik, Materialprüfung oder Fertigungstechnik, entwickelt, müssen aber für verfahrenstechnische Anwendungen spezifisch adaptiert werden.

Eine besondere Herausforderung ist die Erfassung stoffbezogener Größen bei Existenz von Grenzflächen im Messvolumen. Diese können sich einerseits durch physikalische Effekte, wie Lichtbrechung, Lichtreflexion, Licht- und Schallstreuung, störend auf den Messprozess auswirken. Andererseits ist die Grenzfläche oft selbst von Interesse, etwa bei der Bestimmung von Oberflächenspannungen, Grenzflächendichten oder Stoffübergangsgrößen. Besonders Grenzflächen zwischen Flüssigkeiten sowie zwischen Flüssigkeit und Gas (Flüssigkeitsfilme, Dampf- und Gasblasen) sind hier wegen ihrer Deformierbarkeit und Dynamik problematisch. Die Entwicklung praxistauglicher Messverfahren, welche gegen die Existenz von Grenzflächen unempfindlich sind oder von Messverfahren, welche diese erkennen, quantifizieren und in die Berechnung stoffbezogener Größen einbeziehen, sind von großem Wert. Dafür sind sowohl intelligente physikalisch-technische Lösungen (zum Beispiel Messtechniken auf Basis von Kernspinresonanz oder Röntgenstrahlung) als auch intelligente Datenauswertetechniken für optische und andere Messverfahren gefragt.

Ein enorm hohes Potenzial bei der Auswertung von Daten von Sensoren für stoffbezogene Größen liegt in der Entwicklung und Nutzung von Verfahren zur Mustererkennung auf Basis maschinellen Lernens. Dies trifft besonders auf multimodale Sensorsysteme sowie Messtechniken zu, bei denen komplexe Spektren bzw. Signalformen ausgewertet werden müssen (z. B. FTIR-Spektroskopie oder Spektroskopiemethoden mit Frequenzmodulation). In Verbindung mit speziellen, auch multispektralen Kamerasystemen und intelligenten Auswertelgorithmen könnten derartige Mustererkennungsverfahren auch genutzt werden, um prozesstypische Störungen zu erkennen.



## 4 Sensorintegration in Anlagen

Neben den Anschaffungskosten für Sensoren fallen nicht unerhebliche Kosten bei deren Integration in die Anlage an. Dazu kommen weitere Kosten für Wartung und Instandhaltung während der Betriebszeit. Als Hemmnisse für eine umfassendere Instrumentierung von Anlagen wurden fehlende Standardisierung für Prozesszugänge vor allem für komplexere Sensoren, hoher Verkabelungsaufwand für Datenkommunikation und Energieversorgung sowie fehlende Standards für nicht drahtgebundene Kommunikation erkannt.

Wo immer möglich, sollte die **mechanische Integration** von Sensoren vereinfacht und **standardisiert** werden. In großen Anlagen könnten dies zum Beispiel standardisierte Zugänge für Sensoren und Sensorlanzen an der Anlage, standardisierte Kabelführungen in Komponenten oder standardisierte optische, akustische oder elektromagnetische Prozessfenster sein. Prioritär sollten, wo immer möglich, berührungsfreie Messverfahren so qualifiziert werden, dass berührende Sensoren ersetzt werden können. Ein gutes Beispiel dafür sind Clamp-On-Ultraschall-Sensoren.

Einen vielversprechenden Ansatz zur Reduktion des Installationsaufwandes stellen **modulare Sensorkonzepte**

dar, bei denen eine bereits in die Kernautomatisierung integrierte Sensorplattform mit geringem Aufwand um zusätzliche Sensormodule, auch temporär, erweitert werden kann. Die zentrale Sensorplattform aggregiert die Daten lokal und stellt verdichtete Informationen nach Bedarf zur Verfügung. Sie kann diese aber auch unter Berücksichtigung von Applikationswissen auswerten. Neben der Nutzung von Messwerten wäre ein erweiterter Zugang zu Rohdaten für autorisierte Benutzer („Poweruser“) sehr nützlich, wie etwa der Zugriff auf Rohspektren an einem Prozess Spektrometer.

Die Verkabelung von Sensoren wirkt sich erheblich auf Installations- und Wartungsaufwand und die damit verbundenen Kosten aus und verhindert oft den flexiblen Einsatz von Sensorik. Zur Reduktion des Verkabelungsaufwandes sind **kabellose Kommunikationstechnologien** in die Prozessautomatisierung einzuführen. Dabei kann auf aktuelle Entwicklungen im Bereich 5G, Narrowband, IoT und Bluetooth, aber auch Technologien wie WirelessHART, LoRa und WiFi aufgesetzt werden. Zu einem flächendeckenden Einsatz kabelloser Kommunikation in Chemieanlagen ist es bislang jedoch noch nicht gekommen. Neben der begrenzten Langzeiterfahrung, besonders hinsichtlich Sicherheit und Robustheit, liegt dies auch an der man-



gelnden Verfügbarkeit entsprechend ausgerüsteter und zertifizierter prozessstauglicher Sensoren und Infrastruktur. Einer der kritischen Punkte ist eine hinreichend genaue Synchronisation kabelloser Sensoren, insbesondere bei einer gemeinsamen Auswertung von zeitlich hoch aufgelösten Daten. Dabei sind die Anforderungen an Latenz und Synchronität der jeweiligen Anwendungen und Prozesse der Chemieindustrie ein entscheidender Faktor, der in diesem Zusammenhang oft unklar ist und bislang nur unzureichend untersucht wurde.

Der Aufwand für kabelgebundene Energieversorgung kann durch Ansätze **energieautarker Sensorik** reduziert werden. So können Sensoren deutlich leichter an schwer zugänglichen Stellen ohne verfügbare Stromversorgung installiert werden. Darüber hinaus ergeben sich Möglichkeiten überall dort, wo Kabelausführungen nicht oder nur mit großem Aufwand möglich sind. Beispiele hierfür sind Sensoren, die sich vollständig im Inneren einer Anlage oder in geschlossenen Einwegsystemen, wie Single-Use-Bioreaktoren, befinden. Herausforderungen auf dem Weg zu energieautarken Sensoren sind zum einen die Entwicklung energieoptimierter Sensoren, zum anderen die lokale Versorgung mit ausreichend Energie. Während die Verwendung von Batterien hierzu in manchen Anwendungen unbedenklich erscheint, kann sie in anderen, z. B. in explosionsgefährdeten Bereichen, durchaus problematisch sein. Insbesondere hier können Methoden des Energy Harvesting, bei dem lokal kleine Mengen Energie beispielsweise aus Temperaturunterschieden, Strukturschwingungen oder Strömungen gewonnen werden, eine vielversprechende Alternative darstellen. Dafür sind umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, sowohl zur Minimierung des Energieverbrauchs der Sensoren als auch zur Maximierung der Effizienz der Energieernte, zu leisten.

Ein für die Industrie sehr wichtiges Thema ist der **zeitweise Betrieb von Zusatzinstrumentierung** bei Inbetriebnahmen, Anfahr- und Abfahrvorgängen sowie zu Zwecken des Trouble-Shootings. Von Interesse sind beispielsweise sich einstellende Strömungszustände in Kolonnen und Reaktoren, die Funktion von Flüssigkeitsverteilern oder die Anströmbedingungen in Rohrbündeln. Die Ansprüche an eine flexible temporäre Zusatzinstrumentierung unterscheiden sich dabei teils deutlich von den Ansprüchen, die typischerweise an die permanent genutzte Sensorik der Kernautomatisierung gestellt werden. Während die Ansprüche der Anwender bezüglich Präzision und Verfügbarkeit der Messung unter Umständen geringer sein können, werden Aufwand und Kosten für die sichere Installation solcher Sensorik, auch während des Anlagenbetriebs, zu kritischen Größen. Konsequenterweise wünschen sich Anwender Konzepte, die eine unkomplizierte, kostengünstige und flexible Anbindung und Nutzung von zusätzlicher Sensorik erlauben. Von besonderem Interesse sind hier wieder Clamp-On-Sensoren, deren Installation keinen Eingriff in die Anlage erfordert. Alternativ können Konzepte für Einwegsensoren entwickelt werden, die in die Anlagen oder Komponenten integriert werden, aber nur eine begrenzte Lebensdauer haben und damit nur in der initialen Phase des Anlagenbetriebs Daten liefern. Auch Multiparametersensoren mit bedarfsweiser Erfassung zusätzlicher Größen können einen Lösungsansatz darstellen.

## 5 Datenübertragung und Sensorkommunikation



Im Gegensatz zu zentralisierten Kommunikationssystemen, wie wir sie heute in der Prozessautomation antreffen, basieren das weltweite Internet sowie die moderne Telekommunikation seit vielen Jahren auf verteilten Netzwerken. Dort melden sich Teilnehmer im System mit ihren Fähigkeiten an und werden optimal ausgelastet. Unter dem Begriff **Industrie 4.0** entwickelte Konzepte führen zu einer „Auflösung der Automatisierungspyramide“ und ermöglichen eine flexible Produktion mit adaptiven, sich selbst konfigurierenden, selbstorganisierenden, flexiblen Produktionsanlagen mit hohem Vernetzungsgrad und hochverfügbaren Informationsdiensten.

Für die störungsfreie Kommunikation aller Automatisierungskomponenten untereinander wird ein **einheitliches Protokoll und ein einheitlicher Feldbus** benötigt. Mittlerweile gilt der Standard OPC Unified Architecture (OPC-UA, IEC 62541) als gesetzt und die Verbände arbeiten an der Ausgestaltung der Semantik. Nicht-Ethernet-Feldbusse sind vor dem Hintergrund einer gewachsenen Landschaft in bestehenden Anlagen und den oft sehr speziellen An-

forderungen an Stromversorgung und Explosionsschutz heute weiterhin dominant. Als wesentlicher Nachteil dieser Situation ist die Komplexität hinsichtlich Installation und Wartung mit erhöhten Anforderungen an das Fachwissen des Personals zu nennen. OPC-UA wird bereits zur Verbindung von Automatisierungskomponenten in den höheren Hierarchien eingesetzt, etwa zu ERP- oder Produktionsassistenzsystemen. Zukünftig wird der Standard aber auch auf Geräteebene und Feldebene möglich sein und kann hier für smarte Automatisierungskomponenten in der Feldebene genutzt werden. Deren Rechenleistung wächst, um OPC-UA-Kommunikation und andere Rechenoperationen, wie etwa Verschlüsselungsaufgaben oder Datenanalysen, energiesparend effizient auszuführen. Gleichzeitig muss sichergestellt werden, dass Informationen weitergegeben werden, die an anderer Stelle im Prozess oder in der Anlage erforderlich sind, um aus deren Kombination Schlüsse ziehen zu können. Hierfür müssen geeignete Standards zur eindeutigen Weitergabe vorverarbeiteter Daten und Merkmale entwickelt werden.



Eine durchgängige Ethernet-basierte Kommunikation ist über das Advanced Physical Layer (APL) mit der Geschwindigkeit und Flexibilität von Standard-Ethernet- und IP-Technologien auf der Basis von einfacher Zweileitertechnik in Sicht. APL ist eine 2011 begonnene, durch die IEEE Standards Association koordinierte Initiative mit Ziel der Fertigstellung 2022 nach Abschluss aller Konformitätstests. Die Basis stellt eine Zweidraht-Ethernet-Verbindung nach 10BASE-T1L auf Basis des Ethernet-Standards IEEE 802.3 dar, so dass bestehende Zweidrahtverbindungen genutzt werden können. Ziel von APL ist die Überwindung der Abhängigkeit von proprietären Protokollen. Gleichzeitig wird eine Anpassung an die Anforderungen an typische Netzwerkausdehnungen mit Hilfsenergie-Versorgung bis 500 mW pro Gerät für bis zu 50 Geräte vorgesehen, die auch eine Installation in explosionsgefährdeten Bereichen ermöglichen soll. Alternativ dazu werden auch drahtlose Standards Einzug halten, wie z. B. der 5G-Standard.

Die Definition **offener und zugleich sicherer Schnittstellen** ist eine der größten, wichtigsten und zugleich dringlichsten Aufgaben der Digitalisierung, ohne die es nicht weitergeht. Zur Definition einer sicheren Datenübertragung müssen als erstes prinzipielle Anforderungen und Geschäftsmodelle festgelegt werden. Nur auf einer solchen Basis kann eine sichere Kommunikationsarchitektur von den Experten für Datensicherheit gestaltet werden. Ein erster Schritt zur Bereitstellung zusätzlicher Datenkanäle wird im NOA-Konzept (NAMUR Open Architecture) gemeinsam durch NAMUR und ZVEI vorangebracht. Weil Instandhaltungs- und Betriebsfunktionen einen großen Nutzen haben, decken einige innovative Unternehmen der Prozessindustrie ihre Anlagen derzeit flächendeckend mit zusätzlichen Netzwerkzugängen aus, meist über Wireless-Technologien. Ebenso sind Firmen dazu übergegangen, ihre Asset- und Anlagenpläne komplett zu digitalisieren. Zur Gewährleistung der Datensicherheit erfolgt der Sensorzugriff über gestufte Zugriffsrechte und Benutzergruppen. Hier ist es eine fortwährende Aufgabe von Anwendern und Geräteherstellern, einheitliche Standards für die Sicherheit und die Funktionalität zu schaffen und den aktuellen Anforderungen anzupassen. Derzeit werden u. a. Ticket-basierte Zugriffsrechte anstatt von Passwörtern diskutiert, da letztere in einer Automatisierungslandschaft von mehreren tausend Geräten und vor dem Hintergrund wechselnden Personals nicht handhabbar sind.



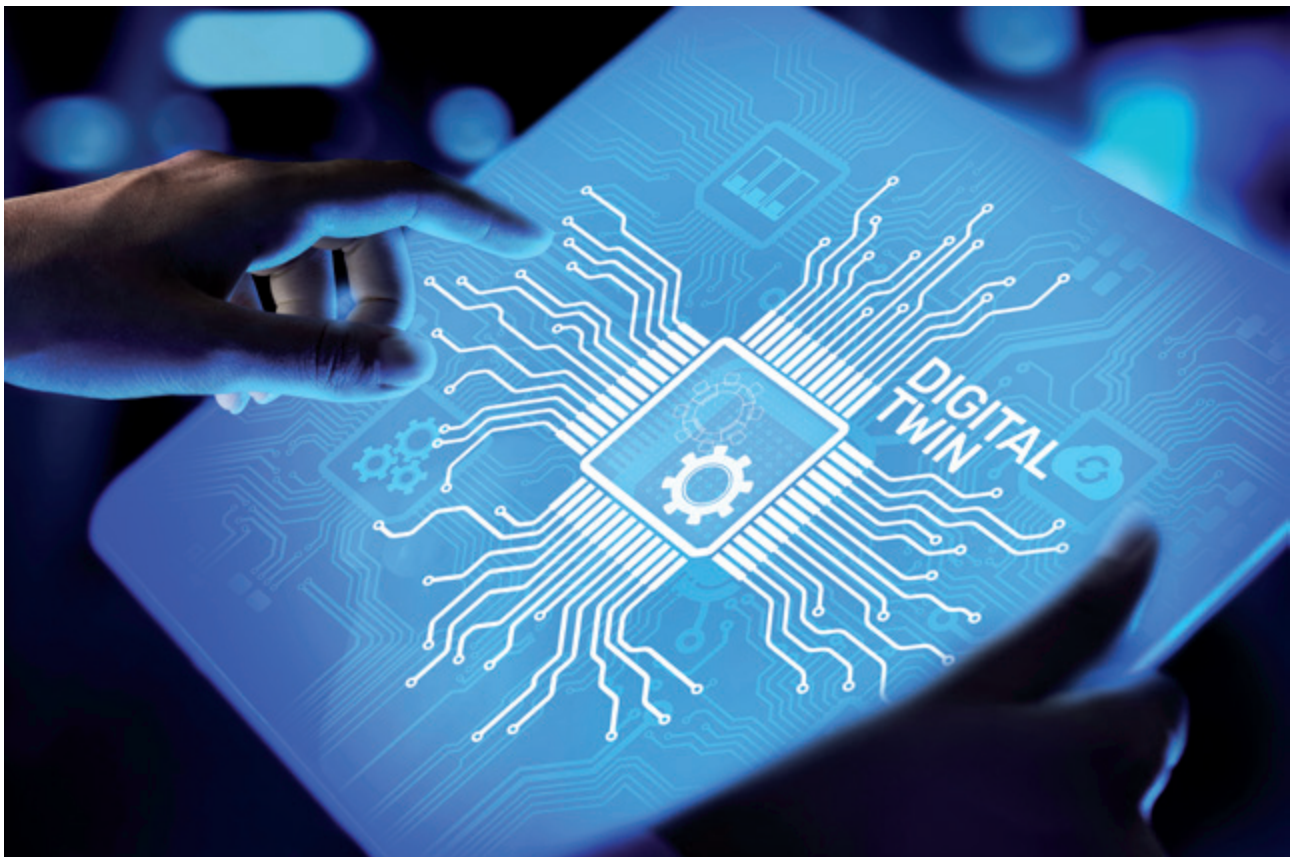
## 6 Sensorintelligenz

Die Technologie-Roadmap „Prozess-Sensoren 4.0 – Voraussetzungen für die zukünftigen Automatisierungskonzepte“ formuliert eine Reihe von Anforderungen für smarte Prozesssensoren als Bestandteile von cyberphysischen Produktionssystemen, welche erst im Ansatz als realisiert angesehen werden können. Diese Anforderungen sind Konnektivitäts- und Kommunikationsfähigkeit (siehe auch Abschnitt 5), Interaktionsfähigkeit, Instandhaltungs- und Wartungsfunktionen, Rückverfolgbarkeit und Compliance sowie eine virtuelle Beschreibung.

**Interaktionsfähigkeit**, also die Fähigkeit von Sensoren, untereinander Informationen auszutauschen und zu bewerten, wird als wichtiger Bestandteil vorausschauender Konzepte für die Anlagenüberwachung betrachtet. Fallen an einer Messstelle etwa primäre oder sekundäre Messwerte auf, die sich außerhalb bestimmter Grenzen bewegen, erfolgt mittels definierter Weitergabe solcher Information eine zweckgerichtete „Sensibilisierung“ weiterer Sensoren in einer relevanten Umgebung sowie eine integrierte, vorausschauende Bewertung der Datenlage im

Hinblick auf die Entwicklung des Anlagenzustands. Auch eine dynamische, der prognostizierten Entwicklung des Anlagenzustands angepasste Selbstparametrierung von Sensorsystemen, etwa im Hinblick auf Messbereich und Auflösung, oder die Auswahl und optimale Ausnutzung der Bandbreite sowie der Datenfilterung auf Basis von Orchestrierungsinformationen aus dem digitalen Zwilling und aus dem Anlagenkontext fallen in diese Kategorie. Forschungsbedarf besteht hier hinsichtlich der technisch und wirtschaftlich sinnvollen Ausgestaltung der Systemarchitektur, zum Beispiel der Verteilung notwendiger Ressourcen zwischen beteiligten Sensoren und Systemkomponenten zur Durchführung solcher Bewertungen. Auch die betreffende Algorithmik hierfür, welche selbstlernend in Bezug auf den Betrieb der individuellen Anlage sowie teilhabend am Maschinenlernen vergleichbarer Anlagen ausgeführt werden sollte, stellt dabei einen zentralen zukünftigen Forschungsschwerpunkt dar.

**Smarte Sensoren** sollen ihre spezifikations- bzw. anwendungsgerechte Funktionsfähigkeit so weit wie möglich



selbst überwachen können und dem Betreiber bzw. seinem Instandhaltungsdienstleister im Fall von Abweichungen, möglichst vorausschauend und von sich aus, zweckmäßige Hinweise zur **Instandhaltung** geben. Im Hinblick auf die Erfassung des momentanen Diagnosezustands von Sensoren ist hier in den vergangenen Jahren bereits einiges an Anforderungen realisiert worden. Als aktuelle und zukünftige Forschungsschwerpunkte sind vor allem noch die Fähigkeit zur vorausschauenden Zustandsbewertung auch, jedoch nicht ausschließlich, unter Berücksichtigung von Plausibilitätsbetrachtungen bestimmter primärer Messwerte im Kontext mit Messwerten anderer Sensoren, sowie zu einer metrologisch akzeptablen Selbstkalibrierung von Sensorsystemen einschließlich einer Selbstjustierung zu nennen. Hier ist weitere Forschung und Entwicklung bezüglich der praxisgerechten Unterstützung des Instandhaltungspersonals mittels elektronisch verfügbarer, relevanter Dokumentation und Hilfsmittel (etwa bedarfsgerechte Instandhaltungsvideos) erforderlich.

Das Ziel einer anforderungsgerechten **Rückverfolgbarkeit** in kompletten industriellen Lieferketten fasst mehrere Aspekte der modernen Qualitätssicherung zusammen. Wichtige Aspekte sind die Rückverfolgbarkeit des Werdegangs sowie der Wartungs- und Instandhaltungshistorie der Sensoren selbst sowie die Validität der von ihnen gelieferten primären und sekundären Messwerte. Eine vor Manipulation geschützte Dokumentation dieser Historien kann heute als im Ansatz vorhanden betrachtet werden. Die weitere Forschung in diesem Themengebiet muss sich unter Berücksichtigung moderner Informations- und Netzwerktechnologien auf eine sachlich angemessene und wirtschaftlich sinnvolle Optimierung mit Blick auf die Lieferkettenintegration konzentrieren. Eine enge Verbindung zum nachfolgenden Punkt der virtuellen Beschreibung von Sensoren erscheint hierbei sinnvoll, da sich das genannte Optimierungsproblem auch auf die Frage der Verfügbarkeit von Compliance-Nachweisen innerhalb bzw. außerhalb des Sensorsystems im engeren Sinne bezieht.

Allgemein werden durch die Nutzung von digitalen Planungswerkzeugen von Anlagen vermehrt einheitliche **digitale Beschreibungen der Sensoren** notwendig. Ihre technischen Daten oder Funktionalitäten müssen in Form von dynamischen Modellen zu Verfügung stehen. Diese Informationen sollen wiederum weiteren Hierarchie-Ebenen zur Verfügung stehen, um etwa eine Produktionseinheit (und später sogar eine ganze Fabrik) zu simulieren und zu betreiben. An Konzepten zum sogenannten digitalen Zwilling einzelner Sensorsysteme sowie anderer Anlagen-

komponenten wird bereits umfänglich geforscht und entwickelt. Anforderungen und Anwendungsfälle sind hierbei vielfältig und reichen von der zuvor genannten Abbildung der Gerätehistorie in online verfügbaren Datenbanken bis zu selbstlernender Modellierung und Simulation mit dem Ziel der Prozess- und Betriebsoptimierung. Zukünftige Forschungsschwerpunkte dürften sich um die Frage herum ergeben, wie Architekturen bzw. Datenmodelle für digitale Zwillinge so modular realisiert werden können, dass sie den vielfältigen Anforderungen im Lebenszyklus einer Anlage flexibel angepasst werden können. Zu berücksichtigen ist hierbei insbesondere das Wechselspiel von digitalem Zwilling als virtuelles Modell (Typ) und operativer Instanz (physische Komponente oder Anlage) sowie der Informationsaustausch zwischen diesen Welten. Eine gute Basis für eine solche Architektur stellt das Referenzarchitekturmodell RAMI 4.0 (DIN SPEC 91345) mit den beiden Achsen Lebenszyklus und Wertschöpfungskette dar.

Da Implementierung und Kalibrierung der Sensoren heute einen enormen Anteil im Gesamtaufwand ausmachen, bringt auch die Einführung von Konzepten zur **Selbstkalibrierung** einen erheblichen Nutzen. Zum einen kann Redundanz im System oder Prozess genutzt werden. Ein Beispiel wäre die oben genannte Verarbeitung von zusätzlichen Informationen aus Sensoren und Aktoren der Umgebung. Auf Basis von sehr zuverlässigen Informationen zum Zustand von Sensoren aus seinem digitalen Zwilling, der Kalibrierhistorie und den historischen Messdaten sind zukünftig sehr präzise und aktuelle Aussagen über den Sensor als Prüfmittel verfügbar, die jeder Qualitäts- und Sicherheitsanforderung gerecht werden. Natürlich ist auch die Weiterentwicklung von physikalischen Konzepten zur Selbstkalibrierung wichtig. So sind bereits Sensoren mit intern rückführbarer Kalibrierung erhältlich, die ihren Messwert unter gegebenen Einsatzbedingungen eigenständig von Zeit zu Zeit primär ableiten können, wie z. B. spezielle Temperatursensoren mit eingebautem Fixpunkt. Auch die vor kurzem erfolgte Umstellung des SI-Systems schafft neue Perspektiven durch Integration von Primärstandards, wie zum Beispiel Chip-Sized-Atomic-Clock für Zeit/Frequenz, Quanten-Halleffekt für Spannung, direkt in den Messsystemen. Dazu gehören zukünftig vermehrt Funktionen zur Selbstregenerierung bzw. Selbstreparatur. Beispielsweise stellen die Wartung und der Wechsel von pH-Sensoren als häufig genutzte chemische Sensoren heute immer noch einen erheblichen Aufwand dar.

Im Zusammenhang mit dem Kontext der jeweiligen Daten, d. h. wann der Sensor an welcher Stelle für welchen Prozess mit welchem Messergebnis eingesetzt wurde, lassen

sich Plausibilitätsbeziehungen und Zuverlässigkeitsinformationen ableiten. Das heißt, die **Funktionsüberwachung** des Sensors erfolgt nicht nach festen Grenzwerten, sondern an Hand der im digitalen Zwilling gespeicherten Historie. Dieses erweitert die heutigen Möglichkeiten um Plausibilitätsbetrachtungen und statistische Aussagen aller Automatisierungskomponenten, um Drift oder Beschädigungen schneller zu erkennen und abzustellen die ansonsten unerkannt blieben und weitere Messwerte verfälschen würden. Darüber hinaus können diese sekundären Sensoren auf Basis einer Risikobetrachtung als redundante Messwertaufnehmer in das Sicherheitskonzept der Anlage mit einbezogen werden. Hinterlegte Plausibilitätsbetrachtungen dienen zur Einschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit. Werden diese Informationen kontextbezogen, aber anonymisiert an den Sensorhersteller weitergegeben, werden sie zur Verbesserung des Sensors bzw. seines digitalen Zwillings im Produktionssystem, den bedarfsorientierten Instandhaltungsmaßnahmen und der Beurteilung der tatsächlichen Sicherheitsreserven verwendet werden können.

Über die Schnittstellen des Feldgeräts zur Außenwelt in Verbindung mit den Kontextinformationen lassen sich ferner alle erdenklichen Informationsdienste (in Form von Apps) ermöglichen. Neu ist dabei, dass das Feldgerät ergänzende, heute nicht zur Verfügung stehende Bezugsdaten selbständig aus dem Internet holen kann, wie etwa Wetterinformationen. Damit können ganz neue Dienste angeboten werden. Eine digitalisierte Prozessindustrie hebt sich gegenüber gegenwärtigen Produktionskonzepten also auch dadurch ab, dass es zu einem Mehrwert an Informationen durch **Einbeziehung von Cloud-Wissen** kommt.

## 7 Sensordatenverarbeitung

Wie weiter oben schon angemerkt, stellt häufig nur die Kombination von Rohdaten in Verbindung mit Kontextinformationen bzw. im Zusammenhang mit weiteren Rohdaten einen Wert dar. In vielen Fällen können Rohdaten reduziert weitergegeben werden, wenn dieses kontextbezogen jeweils für die Anwendung ausreicht. Es darf aber nicht vergessen werden, dass zukünftige Auswertungstechniken ggf. andere Anforderungen an die Daten haben. Daher ist es ggf. sinnvoll, in einem vertretbaren Aufwand „Datenschnipsel“ der Rohdaten zu archivieren, d. h. die vollen Rohdaten über einen ausreichend langen Zyklus einige Male am Tag, entsprechend der Variabilität des Prozesses, zu sichern. Somit lassen sich Rohdaten auch posthum noch mit neuen Modellen in vollem Umfang auswerten. Ein Beispiel dazu ist die Freigabe von Produkten oder Zwischenprodukten mit einer prozessanalytischen Online-Methode und einem Modell zur Überwachung der vorgegebenen Spezifikationen auf Basis von vorbehandelten und ggf. reduzierten Daten, etwa die Aufnahme eines NIR-Spektrums, dessen Vektor-Normalisierung und Bildung einer Ableitung, auf die das Modell angesetzt wird. Liegen die Rohdaten vor, können diese später auf



neue Modelle mit bisher nicht betrachteten Spezifikationen angesetzt werden, etwa auf Basis einer neuen Kundenspezifikation oder zur Betrachtung von anderen Qualitätsmerkmalen, wie etwa der Auswertung von Streulinformationen zur Beurteilung der Morphologie des Produktes über Streulichtanteile im Spektrum, die in den reduzierten Daten nach Bildung der Ableitung eliminiert wurden. Aufgabe zukünftiger Forschung und Entwicklung wird sein, einen Leitfaden zur Datenerfassung abzuleiten, um eine risikobasierte Entscheidung zu ermöglichen und daraus die richtige Daten-Dimension und ein Konzept zur Datenspeicherung abzuleiten. Die Datendimensionalität ergibt sich aus  $\text{Abtastrate} \times \text{Datendichte} \times \text{Informationsdichte}$ .

Mit großem Interesse werden von den Anwendern derzeit Vibrationssensoren und akustische Sensoren betrachtet, d. h. zusätzliche Sensoren, die Informationen zur Wartung und Optimierung von Prozessen der Industrie ermöglichen. Auch die Beschreibung von Datenformaten für Neuronale Netzwerke („Grey-Box-Modell“) sind wichtige Grundlagen für die Nutzung smarter Daten. Dazu laufen bereits Leuchtturmprojekte, insbesondere bei den Verbänden NAMUR und ZVEI.

Zukünftig wünschen sich die Anwender eine **Vereinfachung des Datentransfers** zu Modellanwendungen, die ähnlich der oben beschriebenen „Kapselung“ der Komplexität von Sensoren auch die Komplexität der Datennutzung auf das Verständnisniveau eines Ingenieurs oder eines typischen Anwenders reduziert, so dass nicht in jedem Fall das Spezialwissen eines Data Scientists benötigt wird. Dieses ist eine wichtige Voraussetzung für eine breite Akzeptanz und eine technische Kultur für die Datennutzung. Auf diesem Weg sind auch Werkzeuge zu schaffen, die zumindest in einer Lern- und Übergangsphase nachvollziehen lassen, auf welcher Basis eine Modellbildung oder ein Algorithmus begründet ist, insbesondere, wenn Werkzeuge der künstlichen Intelligenz eingesetzt werden. Vergleichbare Anforderungen bestehen heute in der Chemometrie, um Korrelation und Kausalität voneinander zu unterscheiden. In der Hauptkomponentenanalyse (PCA) und verwandten Methoden werden dazu Interpretation von „Scores“ und „Loadings“ herangezogen, z. B. um ihre Plausibilität auf Basis physikalischer oder chemischer Informationen (z. B. Spektren) zu bewerten.



## 8 Empfehlungen für die Forschung und Entwicklung



Aus dem oben zusammengefassten Stand von Wissenschaft und Technik, den bestehenden Anforderungen und den identifizierten Lücken ergibt sich ein konkreter Bedarf für die zukünftige mittelfristige und langfristige Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Sensorik und Messtechnik für die Digitalisierung der chemischen Produktion. Während Hersteller von Sensor-, Mess- und Automatisierungstechnik in der Regel produktspezifische Entwicklungen der wettbewerblichen Forschung vollständig aus ihren eigenen Forschungs- und Entwicklungsbudgets bestreiten, erfordern grundlegend neue Entwicklungen sowie vorwettbewerbliche Forschung und Entwicklung, etwa zum Technologietransfer vom Labor an die Anlage, Demonstration der Funktionsfähigkeit, Benchmarks, allgemeine Kostenanalysen sowie Vereinheitlichung und Standardisierung von Konzepten, eine Unterstützung durch Forschungsförderung der öffentlichen Hand im Rahmen von Verbundforschungsvorhaben.

Während Entwicklungen im Bereich der Grundlagenforschung sehr spezifisch durch Einzelprojekte und kleine-

re Verbundprojekte gefördert werden können, ist es für den Erfolg vorwettbewerblicher Entwicklungsprojekte enorm wichtig, größere Verbünde mit verschiedenen Partnern aus allen Bereichen der Wertschöpfungskette, d. h. Grundlagenforschung und Ausbildung, Messtechnikentwicklung, Automatisierungstechnik, Anlagenbau und Anlagenbetrieb, zu initiieren und zu fördern. In diesen sollten Messtechnikentwicklung, Demonstration von Funktionsfähigkeit, Robustheit und Kosteneffizienz im Labor und an geeigneten Anlagen ganzheitlich erfolgen. Während die Beteiligung von Forschungsinstituten und Universitäten der Weiterentwicklung des Wissenschaftsstandes förderlich ist, sollten ebenfalls Partner aus dem Prüf- und Standardisierungswesen eingebunden werden bzw. Wege zur Standardisierung von Produkten und Technologien aufgezeigt werden.

Untergliedert nach Anwendungsbezug und Reifestadium wurden die folgenden Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte identifiziert.

**Grundlagenforschung** ist vor allem in zwei Teilbereichen von erheblicher Bedeutung:

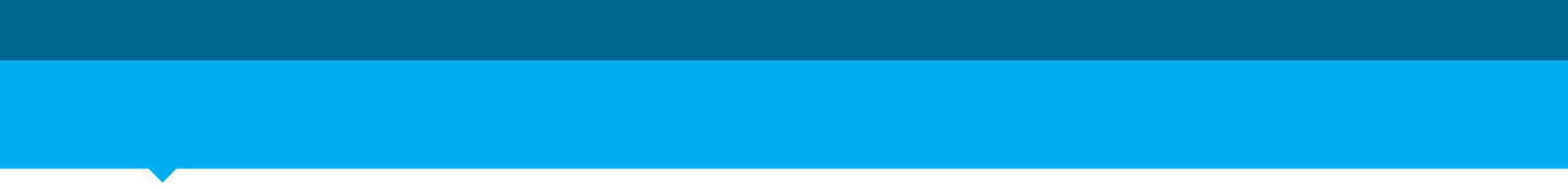
1. Entwicklung neuer Messtechniken auf Basis bisher wenig genutzter physikalischer, chemischer oder biochemischer Wirkprinzipien oder völlig neuer Basistechnologien. Beispiele sind Messverfahren auf Basis natürlicher Strahlung, Röntgenstrahlung, magnetischer Felder oder Kernspinresonanz, Verfahren der Prozesstomographie, Verfahren der Impedanzspektroskopie oder Ionenmobilitätsspektrometrie oder Quantenkaskadenlaser.
2. Nutzung und Qualifizierung fortschrittlicher Methoden der Signal- und Datenverarbeitung zur Analyse komplexer hochdimensionaler Sensordaten. Beispiel sind Analyse von Bilddaten, Spektren, akustische Daten oder Analysen von Sensordaten aus Mehrphasensystemen.

**Angewandte Grundlagenforschung** zielt insbesondere auf die Qualifizierung bisher teilweise wenig erprobter Technologien mit speziellem Anwendungsbezug, also für konkrete Herstellungsprozesse, Grundoperationen und Anlagentypen. Beispiele sind:

1. Gewinnung und Analyse multisensorieller und multimodaler Daten
2. Entwicklung und Demonstration von Ansätzen zur Softsensorik
3. Vergleichende Bewertung und Qualifizierung von Techniken des Energy Harvestings
4. Qualifizierung neuer Materialien und Technologien für Sensoren für raue Einsatzbedingungen (hohe und tiefe Temperaturen, hohe Drücke, aggressive Medien)
5. Qualifizierung von bildgebenden, akustischen und spektralen Sensoren sowie Schall-, Radar- und Lidar-Systemen für schwierige und störbehaftete Prozessumgebungen
6. Entwicklung neuer Konzepte für intelligente Sensoren für spezielle Prozesse und Prozessumgebungen
7. Entwicklung von Konzepten der Sicherheit offener Schnittstellen in Sensor- und Produktionsnetzwerken

**Vorwettbewerbliche angewandte Forschung und Entwicklung** muss vor allem folgende Problemstellungen adressieren:

1. Entwicklung von robusten, miniaturisierten Sensorsystemen für die Zustandsüberwachung und die Messung stoffbezogener Größen
2. Konzepte für kosteneffiziente verteilte Sensoren
3. Qualifizierung von Fertigungsverfahren für Sensoren, zum Beispiel Siebdruck, 3D-Druck, Dünnschichttechnik oder MEMS-Technologien
4. Technische Qualifizierung von Sensoren für raue Einsatzbedingungen (hohe und tiefe Temperaturen, hohe Drücke, aggressive Medien)
5. Qualifizierte und standardisierte Sensorschnittstellen an Prozessanlagen, zum Beispiel standardisierte Zugangspunkte für Sensoren und Sensorlanzen, Prozessfenster, robuste Konzepte zur faseroptischen Ankopplung optischer Sensoren
6. Neue Konzepte kabelloser und kabelgebundener Kommunikation und deren Standardisierung
7. Entwicklung modularer Sensorsystemkonzepte mit sensornaher Signalverarbeitung
8. Entwicklung und Erprobung von Konzepten für Sensoren für den zeitweisen Betrieb
9. Ansätze und Demonstration von Konzepten zur Erhöhung der Sensorintelligenz (Interaktionsfähigkeit, intelligente Instandhaltung, Rückverfolgbarkeit, Selbstkalibrierung, Funktionsüberwachung, Einbeziehung von Cloud-Wissen), Standardisierung
10. Konzepte des digitalen Zwillings für Sensoren, insbesondere zu Zwecken der Prozessmodellierung und Simulation
11. Entwicklung eines Leitfadens zur digitalen Datenerfassung für die chemische Produktion



DECHEMA

Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie e.V.

Theodor-Heuss Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

Telefon: 069 7564-0

Telefax: 069 7564-117

E-Mail: [info@dechema.de](mailto:info@dechema.de)