

POSITIONSPAPIER

Industriewasser 4.0

Potenziale und Herausforderungen
der Digitalisierung für die industrielle
Wasserwirtschaft



Vorwort	3
1 Einleitung	4
2 Industrierwasser 4.0	5
3 Potenziale und Herausforderungen	6
4 Digitalisierung der industriellen Wasserwirtschaft	7
4.1 Einleitung	7
4.2 Potenziale	7
4.3 Barrieren	10
4.4 Handlungsbedarf	12
5 Digitale Vernetzung mit der industriellen Produktion	16
5.1 Einleitung	16
5.2 Potenziale	17
5.3 Barrieren	18
5.4 Handlungsbedarf	20
6 Digitale Vernetzung mit kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement	22
6.1 Einleitung	22
6.2 Potenziale	23
6.3 Anforderungen an vernetzte Systeme aus Sicht der Wasserwirtschaft	24
6.4 Handlungsbedarf	26
7 Perspektiven der Digitalisierung	28
7.1 Einleitung	28
7.2 Perspektiven in der industriellen Wasserwirtschaft	28
7.3 Perspektiven in der Interaktion mit der Produktion	28
7.4 Perspektiven in der Interaktion mit kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement	29
8 Zusammenfassung	30
8.1 Potenziale	31
8.2 Barrieren	32
8.3 Handlungsbedarf	33
8.4 Perspektiven	34
Impressum	35

Vorwort

Die DECHEMA mit ihrer engen Verknüpfung zur Prozessindustrie beschäftigt sich seit vielen Jahren mit dem Thema Digitalisierung. Die Fachgruppe „Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“ als gemeinsames Gremium von DECHEMA und VDI-GVC im Rahmen der Initiative „ProcessNet“ hat in ihrem Positionspapier zu „Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik“¹ bereits im Jahr 2014 die Notwendigkeit und die Herausforderungen einer engeren Vernetzung von industrieller Wasserwirtschaft, Produktion und weiteren Akteuren wie der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement aufgezeigt. In 2016 wurde das DECHEMA-Whitepaper „Digitalisierung in der Chemieindustrie“² vorgestellt.

In Fachgesprächen mit Experten von Prozessindustrie, Wassertechnik, Digitalisierung, Modellierung, Automatisierung und IT-Systemen und der Fachgruppe „Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik“ hat die DECHEMA das Thema Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft unter dem Begriff *Industriewasser 4.0* aufgegriffen und gemeinsam mit ihnen das vorliegende Positionspapier erarbeitet.

Die Nutzung der in diesem Papier skizzierten Potenziale der Digitalisierung wird die Arbeitsorganisation und -gestaltung unausweichlich tiefgreifend verändern. Daher ist es für die umfassende Akzeptanz der Digitalisierung in der Arbeitswelt besonders wichtig, dass diese Änderungen durch intensive Diskussionen mit den beteiligten Gesellschaftsgruppen erörtert und allseits tragbare Lösungen vereinbart werden. Hierbei ist die Partizipation aller Beteiligten an dem Nutzen und den Vorteilen der Digitalisierung Voraussetzung.

Ebenso wie die in dem vorliegenden Papier diskutierten Folgen der technischen Umsetzung sind auch die damit verbundenen rechtlichen Fragestellungen zu durchdenken, zu klären und zu regeln.

Der Einfluss auf die Arbeitswelt und rechtliche Fragestellungen wird im vorliegenden Positionspapier nur gestreift. Beide sind jedoch eng mit der technischen Umsetzung der Digitalisierung verwoben und werden bereits als Erfolgsfaktoren in der Entwicklung von *Industrie 4.0* adressiert.³ Sie müssen übergreifend mit dem Voranschreiten aller Digitalisierungsansätze und gemeinsam mit technologischen Fragestellungen entwickelt werden. Der ständige Austausch mit allen Akteuren ist dabei unverzichtbar. Nur so kann der erfolgreiche Umbau der Prozessindustrie zu *Industrie 4.0* gelingen und im Einklang mit einer nachhaltigen gesellschaftlichen Entwicklung stehen.

1 ProcessNet Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik: Positionspapier „Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik“. <http://dechema.de/studien.html>

2 DECHEMA e.V.: DECHEMA-Whitepaper „Digitalisierung in der Chemieindustrie“. <http://dechema.de/studien.html>

3 acatech e.V.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt *Industrie 4.0*, Abschlussbericht des Arbeitskreises *Industrie 4.0*. http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_o.pdf

1 Einleitung

Wasser ist ein entscheidender Produktionsfaktor für die Industrie⁴. Während die Digitalisierung in der industriellen Produktion und der Prozessindustrie (z. B. Chemie, Stahl, Glas/Keramik) sowohl national als auch international (z. B. Industrial Internet Consortium⁵, Made in China 2025⁶) schnell fortschreitet, hat der Digitalisierungsgrad in der Wasserwirtschaft noch kein vergleichbares Niveau erreicht.

Im Zuge der Entwicklung von *Industrie 4.0*⁷ hat die German Water Partnership den Begriff *Wasser 4.0*⁸ definiert. Dieser steht für eine Verknüpfung von Sensorik, Computer-Modellen und Echtzeitsteuerung unter starker Beteiligung von intelligenten Netzwerken und dem Internet. Dabei ist *Wasser 4.0* an die vierte Stufe der industriellen Produktion angelehnt.

Für eine ganzheitliche und wettbewerbsfähige Entwicklung von *Industrie 4.0* ist Wasser als wichtigstes Lösungs-, Kühl- und Reinigungsmittel in den meisten Produktionsbereichen eine unverzichtbare und nicht zu ersetzende Ressource. Diese herausragende Bedeutung von Wasser gilt sowohl national als auch international. Vor dem Hintergrund von Wasserverknappung und Nutzungskonkurrenz kommt an vielen weltweiten Produktionsstandorten der Wasserverfügbarkeit einerseits und den Abwassereleitbedingungen andererseits eine steigende Bedeutung zu; sie sind bereits vielerorts maßgebliche Standortfaktoren. Zudem beeinflussen sie zum Teil wesentlich den ökonomischen Erfolg einer Produktionsanlage.

Weitere Bedeutung kommt dem effizienten Umgang mit knappen Wasserressourcen zu, da in Unternehmensstrategien und der Produktvermarktung nachhaltiges Wirtschaften und „Green Labeling“ entscheidende und zunehmend wichtigere Wettbewerbsfaktoren geworden sind.

Vor allem im industriellen Bereich ist die Wassertechnik durch die enge Verbindung mit der Produktion gefordert. Die steigende Flexibilisierung und Vernetzung in der Produktion, z. B. durch die Entwicklung hin zu kleineren Losgrößen und zur Erzeugung personalisierter Produkte, erfordert im Zuge von *Industrie 4.0* auch die Flexibilisierung und Vernetzung der industriellen Wasserwirtschaft.

Somit ist die Entwicklung einer vernetzten industriellen Wasserwirtschaft im Sinne von *Industriewasser 4.0* zwingend erforderlich.

Die Ziele des Positionspapiers sind:

- » mit der Entwicklung von *Industriewasser 4.0* einen Beitrag zur nachhaltigen Produktion und Ressourcenschonung in der Wasserwirtschaft zu leisten und damit die Umsetzung der Sustainable Development Goals⁹, besonders der Ziele „Clean Water and Sanitation“ (Nr. 6), „Industry, Innovation and Infrastructure“ (Nr. 9) und „Responsible Consumption and Production“ (Nr. 12) zu unterstützen,
- 
- » die Identifikation von Potenzialen, Barrieren sowie Forschungs- und Entwicklungsbedarf für Umsetzung von *Industriewasser 4.0*,
 - » die Charakterisierung künftiger Interaktionsszenarien und Schnittstellen zwischen industrieller Wasserwirtschaft, industrieller Produktion sowie kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement bei einer fortschreitenden Digitalisierung,
 - » die Sensibilisierung und Vernetzung der Akteure aus den verschiedenen Sektoren und Kompetenzfeldern zu unterstützen.

4 ProcessNet Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik: Positionspapier „Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik“. <http://dechema.de/studien.html>

5 <http://www.iiconsortium.org/>

6 <http://english.gov.cn/2016special/madeinchina2025/>

7 acatech e.V.: Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt *Industrie 4.0* – Abschlussbericht des Arbeitskreises *Industrie 4.0* https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf

8 GWP Arbeitskreis *Wasser 4.0*: „*Wasser 4.0*“, http://www.germanwaterpartnership.de/fileadmin/pdfs/gwp_materialien/gwp_wasser_40.pdf

9 <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>

2 Industrierwasser 4.0

Industrierwasser 4.0 umfasst die Schnittstelle zwischen der Digitalisierung in der industriellen Produktion unter dem Begriff *Industrie 4.0* sowie der Digitalisierung der Wasserwirtschaft, wie sie von German Water Partnership (GWP) unter dem Begriff *Wasser 4.0* verstanden wird.

Die Technologiefelder, welche unter *Industrie 4.0* subsumiert werden, umfassen vor allem Cloud-Computing, Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) und intelligente Fabriken (Smart Factory). *Wasser 4.0* greift die vergleichbaren Begriffe für die Wasserwirtschaft auf, mit dem Ziel einer intelligenten Vernetzung von Wassernutzern und Komponenten in einer zukunftsfähigen Wasserinfrastruktur mit der Umwelt und dem Wasserressourcenmanagement.

Aus Sicht einer integrierten industriellen Wasserwirtschaft¹⁰ umfasst der Ansatz von *Industrierwasser 4.0* die drei in Abbildung 2.1 gezeigten Handlungsfelder mit den

entsprechenden Schnittstellen. *Industrierwasser 4.0* verknüpft damit die Ansätze von *Industrie 4.0* und *Wasser 4.0*:

1. Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft (s. Kap. 4)
2. Digitale Vernetzung der industriellen Wasserwirtschaft mit der industriellen Produktion (s. Kap. 5)
3. Digitale Verknüpfung der industriellen Wasserwirtschaft mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement (s. Kap. 6)

Bei allen drei Sektoren stehen die Abhängigkeiten und die gegenseitige Beeinflussung untereinander auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten industriellen Wasserwirtschaft bei gleichzeitiger Sicherung aller Bedarfe im Vordergrund.

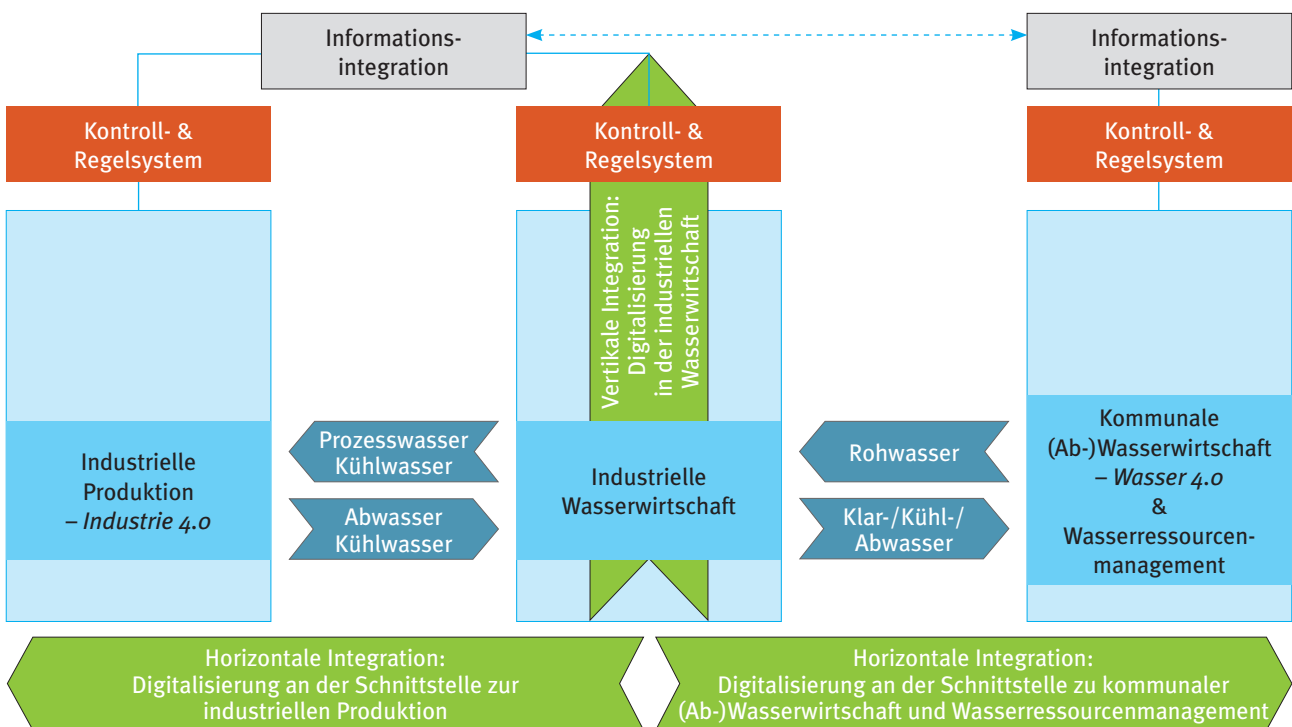


Abb. 2.1: Handlungsfelder (grün) und Schnittstellen (dunkelblau) von *Industrierwasser 4.0*

¹⁰ ProcessNet Fachgruppe Produktionsintegrierte Wasser- und Abwassertechnik: Positionspapier „Trends und Perspektiven in der industriellen Wassertechnik“. <http://dechema.de/studien.html>

3 Potenziale und Herausforderungen

Mit Blick auf die fortschreitende Digitalisierung in der industriellen Produktion ergibt sich einerseits eine Vielzahl an Potenzialen für *Industriewasser 4.0*. Andererseits ergeben sich viele Herausforderungen auf dem Weg zur Nut-

zung der Potenziale. Wie in der folgenden Tabelle zusammengefasst, gilt es alle Aspekte zu berücksichtigen - von den technisch-wirtschaftlichen bis zu den sozialen, rechtlichen und beschäftigungspolitischen Herausforderungen.

Potenziale	Herausforderungen
<ul style="list-style-type: none"> » Ökonomisch und ökologisch optimierte industrielle Wasserwirtschaft » Erhöhung der Wasserversorgungs- und Entsorgungssicherheit » Bedarfsgerechte dynamische Fahrweise von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen in Abhängigkeit von Produktionsprozessen » Erhöhung der Ausfallsicherheit von Betriebsmitteln und Produktionsanlagen » Optimierte Planungsinstrumente und durchgängige Anlagenbegleitung über den Lebenszyklus » Know-how Management, optimierte Arbeitsbedingungen sowie Aus- und Weiterbildung » Wirksamer Schutz aquatischer Ökosysteme » Beitrag zu Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft und Green Economy 	<ul style="list-style-type: none"> » Erweiterte Verarbeitung und Nutzung von Messdaten » Modellierung und Simulation als Prognose- und Steuerungsinstrumente » Digitalisierung bestehender Wasserbehandlungsanlagen » Interoperable Schnittstellen und Informationsmodelle mit der Digitalisierung in der industriellen Produktion » Schnittstellen mit der Digitalisierung in der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement » Sicherheit Cyber-Physischer Produktionssysteme (CPPS) » Rechtliche und Haftungsfragen vor allem an Schnittstellen bei zunehmender Vernetzung » Arbeits- und Organisationsstrukturen, Kommunikation, Ausbildungsprofile und Personalentwicklung

3D-Visualisierungen ermöglichen es, die Logistik effizienter zu gestalten und kollisionsfreie auf ein Minimum reduzierte Umbauten vorzunehmen. Schulung und Weiterbildung des Betreiberpersonals wird durch virtuelle Betriebsstände sicherer, schneller und verständlicher.

Unter Ausschöpfung aller Potenziale für die Anlagenplanung in Kombination mit einem bedarfsgerecht und dynamisch an die Erfordernisse der Produktionsprozesse angepassten Betrieb kann der Ressourcenverbrauch sehr stark reduziert und die Wasserversorgungs- und Entsorgungssicherheit deutlich erhöht werden. Dies gilt sowohl für die industrielle Wasserwirtschaft selbst als auch für die Verknüpfung mit der industriellen Produktion, der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement. So kann die industrielle mit der kommunalen und landwirtschaftlichen Wassernutzung sowie der Bewirtschaftung der natürlichen Wasserressourcen abgestimmt werden.

Die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft unterstützt auch eine zunehmende Entkopplung von Pro-

duktion und Frischwasserbedarf. Weltweit kann dadurch an Industriestandorten mit Wasserstress das Risiko für Einschränkungen oder gar Unterbrechungen der Produktion auf Grund mangelnder Wasserverfügbarkeit verringert werden. Gleichzeitig entstehen Potenziale für Produktionssteigerungen, ohne dabei auf zusätzliche Frischwasserressourcen angewiesen zu sein.

Die konsequente Nutzung der Optimierungs- und Kostensenkungspotenziale, welche die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft bietet, führt zu kleineren und flexibleren Anlagen bei verkürzter Bauzeit, die sich durch erhöhte Betriebssicherheit, verlässlichere Betriebsführung und längere Lebensdauer auszeichnen.

Industriewasser 4.0 ist daher nicht nur für die Wassertechnologiebranche und den innerdeutschen Markt von großer Relevanz. Der *Industriewasser 4.0* Ansatz stärkt auch den Export von Technologien, Ausrüstungen, Ingenieur- und anderen Dienstleistungen und fördert gleichzeitig die Wettbewerbsfähigkeit der produzierenden Industrie in internationalen Märkten.

4 Digitalisierung der industriellen Wasserwirtschaft

4.1 Einleitung

Die industrielle Wasserwirtschaft umfasst sowohl die industrielle Wassertechnik als auch das industrielle Wassermanagement. Die Schnittstellen bilden den Eingang unterschiedlichster Rohwässer zur Versorgung sämtlicher industrieller Bedarfe einschließlich Kühlung und die Abgabe der verwendeten Wässer in die Vorfluter, an kommunale Kläranlagen oder nachgeschaltete Wassernutzer.

Die Integration aller Hierarchieebenen bei der industriellen Wassertechnik, von Anlage und Sensor im Feld über die Steuerungs- und Bedienungsebene, die Management- und Controlling-Ebene bis hin zur Modellierung und Simulation im Netz oder der Cloud durch autonome, sogenannte Cyber-Physische Systeme (CPS) wird als vertikale Integration des industriellen Wassermanagements verstanden. Die Herausforderung der Zukunft ist es, diese Digitalisierung in der

industriellen Wasserwirtschaft so zu verankern, dass die Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen zu adaptiven, mit ihrer Umgebung interagierenden Systemen werden. Sie müssen über intelligente adaptive Mechanismen verfügen, um ihr Leistungsniveau zu erhöhen oder flexibel und autonom auf vorhergesehene und unvorhergesehene Ereignisse und Bedingungen zu reagieren, ohne ihre Leistungsfähigkeit zu verringern. Hierbei kommt Wassermanagementsystemen zu Gute, dass weiche Echtzeitforderungen in der Regel ausreichend und die erforderlichen Antwortzeiten vergleichsweise lang sind.

Die Merkmale solcher CPS in der industriellen Wassertechnik sind, dass Wasserver- und Entsorgungskonzepte sowohl die Möglichkeiten intelligenter Steuerungssysteme in der Anlage ausnutzen als auch eine Internet- und Cloud-basierte Vernetzung bis zum Endnutzer zeigen. Die Digitalisierung ermöglicht eine Kopplung von realen und virtuellen Wassersystemen und bietet die Nutzung von Assistenzsystemen zur Prozesssimulation und zur Entscheidungsunterstützung, wodurch sich intelligente Regelungs- und Vorhersagemodelle zur Reduktion von Risiken und Kosten etablieren lassen.

Darüber hinaus können entsprechend digitalisierte Industriewasserprozesse gleichwertig mit anderen Produktionsprozessen und -faktoren in eine *Industrie 4.0* Landschaft integriert werden.

4.2 Potenziale

Die Potenziale der Digitalisierung auch innerhalb des Managements einer (Ab-)Wasseranlage sind enorm. Häufig ergibt sich das Potenzial aus der Umsetzung vieler Einzelmaßnahmen, die in der Vergangenheit bereits als isolierte Optimierungen betrachtet wurden. Weit darüber hinaus geht dann die Nutzung der zusätzlichen Freiheitsgrade, welche die Datenverfügbarkeit und die vernetzte, simulationsgestützte Optimierung für die Anlagenbetreiber bedeuten und zur Kostenreduzierung genutzt werden kann.

Optimierte Anlagenauslegung führt zu minimierten Investitionskosten

Die Digitalisierung birgt hohe Kosteneinsparpotenziale auch bei Investitionen. Neue Anlagen sowie Anlagenre-

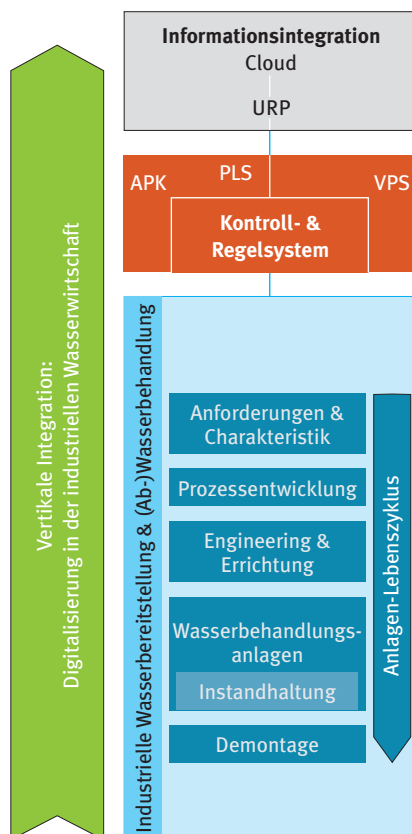


Abb. 4.1: Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft (APK = Automatisierte Prozesskontrolle; VPS = verteilte Prozessleitsysteme; PLS = Produktionsleitsystem; URP = Unternehmensressourcenplanung)

weiterungen können bedarfsgerecht mittels Dataming von historischen digitalen Anlagen- und Prozessdaten dimensioniert werden. Hierdurch werden Überdimensionierungen im Allgemeinen, aber auch solche, welche durch Leerlaufzeiten bedingt werden (z. B. Verlagerung von Spülvorgängen in Schwachlastzeiten), vermieden. Anlagen werden schlanker ausgelegt und damit die Kosten gesenkt.

Auch Anlagenprüfungen, Sicherheitsbetrachtungen und ggf. Zertifizierungen werden durch vollständige und konsistente Auslegungs- und Anlagendaten im Sinne eines digitalen Zwillings erleichtert und kostengünstiger.

Virtuelle Inbetriebsetzung führt zu Kosteneinsparungen

Inbetriebnahmen können schon beim Anlagenbauer mittels virtueller Bedienstände vorweggenommen, Produktionsprogramme getestet, Passgenauigkeit von Anlagenkomponenten überprüft und das Betreiberpersonal virtuell geschult werden (s. Abb. 4.2). So kann eine schnellere Übergabe der Anlagen an den Betreiber erfolgen. Darüber hinaus kann das Beherrschen von Störungen oder kritischen Betriebszuständen mittels virtueller Bedienstände trainiert werden. Im Bereich des Anlagenbaus für die Prozessindustrie ist dies inzwischen verbreitet, in der Wasserwirtschaft aber noch weitgehend Neuland.

Digitale Anlagenmodelle ermöglichen effiziente Änderungen

Bei Modernisierungen von Anlagen helfen digitale Modelle (auch digitale Zwillinge genannt), den Materialfluss, die Medienwege und die Laufstrecken des Betriebspersonals zu minimieren, die Logistik zu optimieren und vor allem den

Abbau von Altanlagenkomponenten und die Neuinstallation neuer Komponenten oder Anlagenstufen in die Altanlage „as built“ passgenau und kollisionsfrei zu gestalten. Dort, wo derartige Modelle nicht vorliegen, können 3D-Scans die Altanlage mit allen während der Anlagenlaufzeit bereits vorgenommenen Änderungen, Anbauten und Rückbauten abbilden¹¹ (s. Abb. 4.3). Sie können so digitalisiert und in 3D-Konstruktionsprogramme überführt werden. Die Modelle selbst können exportiert und als semantisch annotierte Modelle auch in andere Bereiche übernommen werden. Kostenintensive und zeitraubende Kollisionen werden wirksam vermieden und die Risiken für Personal einerseits, Zeit und Kosten andererseits gesenkt.



Abb. 4.3: Virtueller Abbau einer Altanlage und Aufbau einer Neuanlage auf Basis eines digitalen Zwillings: Verkürzung und Kostenreduktion durch Optimierung des Installationsablaufes, Verständnis des Ablaufs aller Parteien; Risikominimierung

Online-Sensorik schafft die Basis für eine hoch aufgelöste Verfügbarkeit aller relevanten Prozessdaten

Im Bereich der Sensorik wird die Verfügbarkeit von Onlinemessungen neuer Parameter Einfluss haben auf die

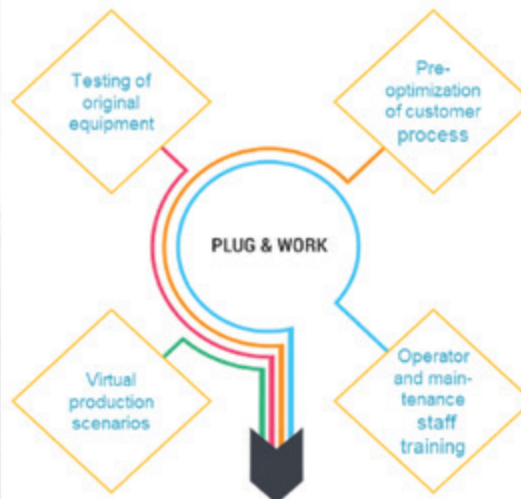


Abb. 4.2: Virtuelle Inbetriebnahme vor Anlageninstallation: erhebliche Verkürzung der Betreiberschulung und Prozessoptimierung

¹¹ ProcessNet Temporärer Arbeitskreis Virtual Reality & Laserscanning: „Laserscanning und Virtuelle Realität - Ein Impuls für die Zukunft von 3D“. <http://dechema.de/studien.html>

- » Prozesssteuerung: z.B. Gensonden im Bereich der biologischen Abwasserreinigung,
- » Anlagenverfügbarkeit: z.B. Sensorik zu Korrosion/Scaling oder (online)-Erfassung und Digitalisierung wartungsrelevanter Daten und Betriebszustände,
- » Qualitätsüberwachung und -sicherung: z.B. Spurenstoffe, Mikroorganismen.

Die Konnektivität und Kommunikationsfähigkeit sind dabei essenziell.

Intelligente Steuerungen sind selbstlernend und bewältigen auch unvorhergesehene Zustände

Die Datenverfügbarkeit wird die Weiterentwicklung der Automatisierung bis hin zu einer vollständig integrierten Automatisierung (TIA) beeinflussen. Selbstlernende Assistenzsysteme, prädiktive Betriebsstrategien sowie Szenario- (empirisch-stochastisch) und Indikations-basierte (Rückkopplung aus der Produktion) Elemente werden zunehmend klassische Regelungs- und Steuerungsalgorithmen ergänzen. Durch die damit mögliche kontinuierliche Implementierung optimierter Steuerungen zusammen mit einer dichteren Überwachung der Anlagenleistung lässt sich die Regelung des Gesamtprozesses weitgehend automatisieren. Die unmittelbare Interaktion lässt sich auf die Notwendigkeit der Kontrolle des Gesamtprozesses reduzieren.

Selbstlernende Systeme führen zu einer wesentlich sichereren Regelung des Anlagenbetriebes und damit zu einer besseren Einhaltung von Grenzwerten. Komplexe Sachverhalte werden zu Kennwerten als entscheidungsrelevante Informationen verdichtet. Meldewege in der Organisation oder zum Kunden (Produktion) über z. B. Qualitätsabweichungen werden digitalisiert und gegebenenfalls automatisiert.

Intelligente Wasser-/Abwassersysteme arbeiten adaptiv. Sie interagieren auf Basis des integrierten und kompatiblen Modellwissens oder nicht-physikalischer Algorithmen künstlicher Intelligenz mit ihrer Umgebung und passen sich ihr selbstständig an. Sie sind robust und bewältigen auch unerwartete, vom Entwickler nicht berücksichtigte Situationen in einem sich ändernden Umfeld, ohne ihr Leistungsniveau zu reduzieren. Ihre Steuerung arbeitet vorausschauend, dabei antizipieren sie auf der Basis von Erfahrungswissen die Wirkungen unterschiedlicher Einflüsse. Darüber hinaus sind sie benutzerfreundlich.

Durch die Kopplung verschiedener Modellvariationen wie beispielsweise von neuronalen Netzen mit physikalischen Modellen kann die Sicherheit und die Vorhersagegeschwindigkeit nochmals deutlich erhöht werden. Neuronale Netze ermöglichen durch Verknüpfung der Informationen verschiedener Zustandsvariablen die Projektion auf die wichtigsten Einflussfaktoren und eine Beurteilung ihrer Sensitivität für den Prozess. Physikalische Modelle erlauben auf dieser Basis eine Abstraktion in die Zukunft. Die Anwendung der neuronalen Modellebene bildet in dieser Kopplung die notwendige Adaptivität von prädiktiven physikalischen Modellen ab. Beispielsweise kann der Nutzen durch Entlastung des Gesamtstromes durch separate Vorbehandlung oder zeitenweise Pufferung von Teilströmen oder deren Verschneidung vorausberechnet werden.

Einbeziehen von Experten und simulationsgestützter Optimierung erhöhen die Anlagenperformance und unterstützen die Anlagenbetreiber

Im Bereich der Prozessoptimierung und Anlagenüberwachung werden sich Internet- und Cloud-basierte Elemente durchsetzen, über die externes Wissen (auch Modellgestützt oder in Kopplung mit der Produktion) integriert wird. Dies kann sowohl proprietär durch spezialisierte Dienstleister (z.B. Stoffdaten, Pumpenkennlinien) als auch durch allgemein verfügbare Daten, z. B. European Open Data Portal¹², erfolgen. Das Gebiet der Instandhaltung scheint dabei Vorreiter zu sein, wie die Datennutzung für fallorientierte (case oriented) oder vorausschauende Instandhaltung (predictive maintenance) zeigt (z. B. Fernwartung und Anlagenüberwachung mit Zustandsdatenerfassung von Pumpen durch deren Hersteller). Dagegen beginnt sich die Prozesseite erst zu entwickeln.

Die Notwendigkeit der Einflussnahme des Anlagenbetreibers vor Ort wird dadurch sinken. Die Betriebsleitung wird spürbar entlastet und der Personalbedarf vor Ort wird durch Wegfall von Routinearbeiten reduziert. Arbeitszeiten und Einsatzorte können flexibler gestaltet werden, die Einarbeitung von neuem Personal kann Off-site wirksam unterstützt werden.

Simulationsgestützte Optimierung der Einzelkomponenten ermöglicht höhere Verfügbarkeit und Lebensdauer sowie verbesserte Leistung und Auslastung von Anlagen.

Durch Bestimmung des Leistungspotenzials der Einzelkomponenten und die Nutzbarmachung von installierten

¹² www.europeandataportal.eu

Überkapazitäten kann die Anlagenleistung ohne Kapitaleinsatz maximiert werden. Einzelkomponenten können simulationsgestützt in Bezug auf Geometrie, Funktion und Einbindung in die Anlage im Interesse einer längeren Lebensdauer oder höheren Kapazität optimiert werden. (s. Abb. 4.4)

Die Beeinträchtigung der Anlagenleistung in Folge von Belastungs- und Volumenstromänderungen beispielsweise durch Produktionsänderungen, -verlagerungen oder -ausweitungen im Laufe des Betriebes kann somit durch Austausch von Kernkomponenten, die mittels Berechnung für den geänderten Anwendungsfall optimiert wurden, verringert werden. So könnten beispielsweise Schieber, Überlaufkanten oder auch Zyklone und Rohrleitungsquerschnitte an entscheidenden Stellen dem geänderten Bedarf optimal angepasst und so die Adaptionfähigkeit einer auf einen bestimmten Anwendungsfall zugeschnittene Anlage erhöht werden.

Prädiktive Zustandsüberwachung ermöglicht höhere Verfügbarkeit und Lebensdauer

Es kann von einer höheren Anlagenverfügbarkeit ausgegangen werden, da prädiktive Zustandsüberwachung aller einzelnen Anlagenaggregate wie Pumpen, Rührern, Ventilen, aber auch von Sensoren und Rohrleitungen eine kontinuierliche und bedarfsoptimierte Wartung und Reparatur erlauben (s. Abb. 4.5). Notreparaturen und ungeplante Stillstände werden so weitgehend vermieden.

Internet der Dinge erlaubt die Selbstkontrolle und eigenständige Reparaturorganisation von Einzelkomponenten

Im Zuge der Etablierung des Industriellen Internet der Dinge (Industrial Internet of Things IIoT) werden Sensoren, Komponenten und Geräte entwickelt, die zunehmend miteinander kommunizieren und Prozesse auch ohne

die Mitwirkung von Menschen als Koordinatoren von Informationen organisieren. Diese Entwicklung wird wesentliche Veränderungen bei Organisationabläufen mit sich bringen. Viele komplexe und übergreifende Abläufe werden nicht nur automatisierbar, sondern durch interaktive Kommunikation und intelligente Steuerungen selbst organisierbar. Sensoren und Aktoren werden entwickelt, die eigenständig Zustände erfassen, Aktionen ausführen und Handlungsroutinen einleiten. Beispiele bei der Wasseraufbereitung sind leere Betriebsmittelbehälter, die ihre Wiederbefüllung organisieren, einschließlich der Bestellung von Chemikalien sowie der Automatisierung des Logistikprozesses bis hin zur endgültigen Befüllung. Pumpen oder andere Aggregate können ihren Verschleiß überwachen oder Defekte an sich selbst erkennen, die passenden Ersatzteile bestellen und gleichzeitig einen Wartungstermin zur Reparatur organisieren.

4.3 Barrieren

Auf dem Weg zur vollständigen Digitalisierung der industriellen Wasserwirtschaft sind verschiedene Barrieren zu überwinden. Dabei sind die sichere Datengewinnung und Datenhaltung (inklusive Zugriffe), Datenschutz, Skalierbarkeit und Harmonisierung von Datenstandards die kurzfristig wichtigsten Bereiche.

Daten- und IT-Sicherheit

Besonders hemmend wirkt die vielfach ungeklärte Datensicherheit bei der raschen Zunahme des Datenaustauschs im Zuge der weiteren Entwicklung des Industriellen Internet der Dinge. Zudem ist vielfach unklar, ob existierende Schutzmaßnahmen der Schadsoftware der nächsten Generation, die selbst intelligent und autonom agieren können wird, standhalten können. Ansätze für den Schutz von Anlagen, wie das Defense-in-Depth Konzept für den Schutz von Industrieanlagen gegenüber unbefugten Zu-

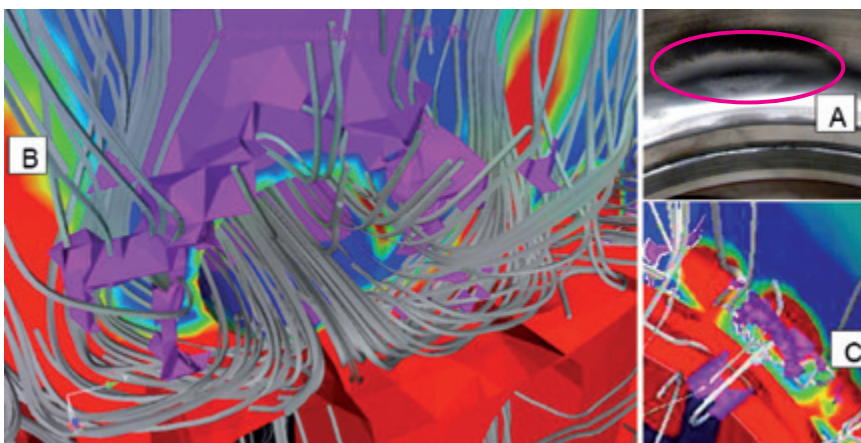


Abb. 4.4: Komponentenertüchtigung: Simulationsgestützte Verlagerung der Kavitation von der Ventilkörperwand in den Wasserkörper verhindert Materialschäden im Betrieb. Rechts oben: Problem: Kavitationsschäden an Ventilkörperwand; links: Strömungssimulation am Ventilaustritt zur Optimierung der Betriebsweise; rechts unten: Ausschnitt der Simulation

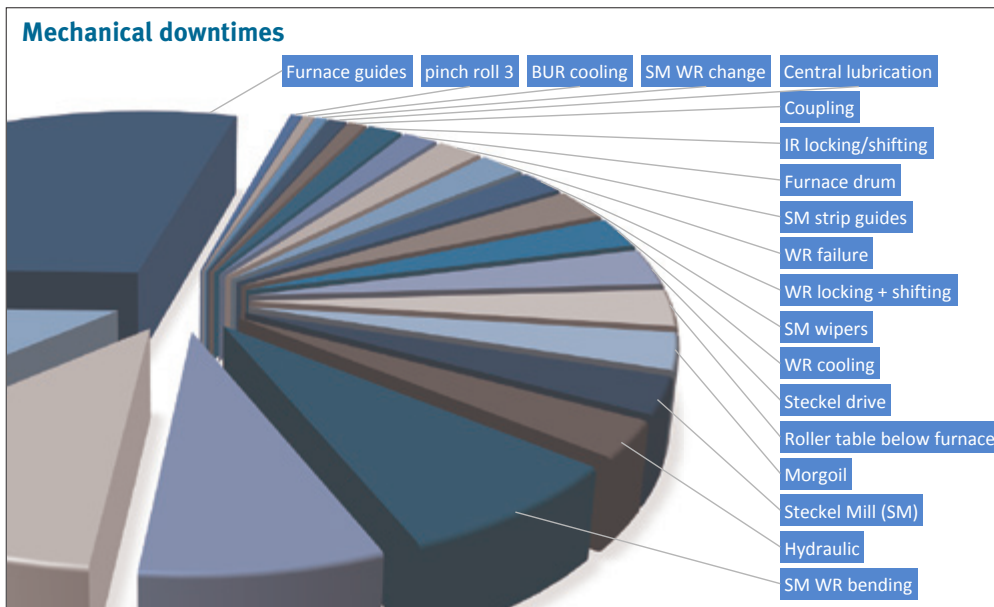


Abb. 4.5: Potenziale für prädiktive Überwachung: Beispiel aus der Prozessindustrie für Flaschenhalsanalyse eines Betriebs anhand der Vielfältigkeit von Betriebsstörungen

griffen sind noch nicht in allen Bereichen ausreichend bekannt. In Bezug auf die abhörsichere und manipulationsfreie Datenübermittlung und -nutzung sind daher auch bis zur betrieblichen Ebene die technischen Implementierungsmöglichkeiten der Bausteine (Verschlüsselungsalgorithmen, Block-chain-Elemente) ebenso weiter zu entwickeln wie risiko-basierte Bewertungssysteme. Darüber hinaus stellen sich Fragen in Bezug auf die Datenhoheit (wem gehören welche Daten), den Datenschutz (welche Daten dürfen wo verarbeitet werden) und in Bezug auf die Verantwortlichkeit für die Datensicherheit und -integrität.

Daten sind nicht harmonisiert und stehen zum Teil nicht digital zur Verfügung

In sehr vielen traditionellen Betrieben sind die Infrastrukturen alt und an längst überholte Anlagensteuerungen angepasst. Daher ist eine Harmonisierung und Digitalisierung der Daten nicht ohne erhebliche Anstrengungen zu bewerkstelligen. Die Systemintegration ist oftmals aufgrund von Inkompatibilitäten der Systeme oder der Schnittstellen nicht möglich. Zudem stehen die Daten vieler Sensoren oder auch von Laboranalysen für eine digitale Verarbeitung und einen Online-Zugriff nicht zur Verfügung. Weiterhin behindern die Inkonsistenzen bei der Datenerhebung eine Digitalisierung.

Personal und Verantwortlichkeitsstruktur sind nicht an ein digitales Umfeld angepasst

Das in den Betrieben vorhandene und an die bestehenden Infrastrukturen angepasste und hierauf geschulte Personal verfügt nicht oder nur vereinzelt über das Wissen und

die Fähigkeit, mit einem digitalen Umfeld umzugehen. Auch entstehen neue Anforderungen an die Flexibilität und die Lernbereitschaft des Personals. Ohne ihre Umsetzung können die Potenziale der Digitalisierung nicht vollständig ausgeschöpft werden.

Auch die Abgabe von Entscheidungskompetenz an Systeme künstlicher Intelligenz stößt derzeit oft auf erheblichen Widerstand. Dies gilt besonders für die Richtigkeit der Einflussnahme solcher Systeme auf den Anlagenbetrieb. Die Verantwortlichkeit ist hierbei sowohl innerhalb eines Betriebes zu klären als auch bei der Einbeziehung von Betriebsfremden wie beispielsweise mit einer Beratung beauftragter Experten.

Betriebliche Organisationsformen sind nicht für die Digitalisierung geeignet

Neue Organisationsformen müssen entwickelt werden, um die vorgenannten Elemente der Vernetzung umzusetzen. Es wird nicht möglich sein, alles erforderliche Know-how in den personell schrumpfenden Betriebsstrukturen vorzuhalten. Daher sind Kompetenznetzwerke zu entwerfen, die den Zugriff auf das notwendige Expertenwissen zeitnah und kooperativ erlauben. Dazu gehört auch der Bereitschaftsdienst von Fachkräften (intern und extern).

Parallel dazu muss eine realitätsnahe Betriebssimulation in virtuellen Bedienumgebungen erfolgen, um das Systemverständnis in der erforderlichen Tiefe und Breite zu erhalten (intern oder extern) und ein Störungsmanagement trainieren zu können.

Simulations- und Modellierungswerkzeuge sind weder durchgängig verfügbar noch integriert

Simulationswerkzeuge zur optimierten Auslegung und zum Betrieb der Wasser- und Abwasserbehandlung sind zwar vorhanden, müssen aber technisch weiterentwickelt werden. Wichtig sind dabei die Entwicklung von nicht-empirischen Algorithmen in Verbindung mit neuronalen Strukturen sowie die Durchgängigkeit und Kompatibilität mit den umgebenden Sektoren (Produktion, weitere Wassernutzer und Umwelt). Auch die verlustfreie und einfache Kommunikation mit Software zur ökonomischen und ökologischen Bewertung muss ermöglicht werden. Damit wird der Echtzeit- und auch der prädiktive Betrieb im industriellen Wassermanagement möglich.

Zur Gewährleistung der in Echtzeit erforderlichen Systemantworten ist die Kopplung von neuronalen Netzen mit physikalischen Modellen möglich, da die Rechenzeit hierdurch erheblich verkürzt werden kann. Allerdings werden solche gekoppelten Systeme derzeit noch nicht im Abwasser-/Wasserbereich eingesetzt, hier fehlt das Anwendungswissen. Nicht zuletzt muss die Echtzeitfähigkeit physikalischer Modelle für die Abwasserreinigung noch erarbeitet werden.

Der Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Optimierung von Wasserbehandlungsanlagen ist bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Dies gilt vor allem für dynamische Verläufe der Zulaufcharakteristik, als auch für die Komponentenoptimierung. Die hieraus resultierenden Potenziale sind noch nicht annähernd charakterisiert. Um sie zu erschließen, muss die Anlagenauslegung neu durchdacht werden. Dies lohnt sich insbesondere bei Anlagen, die von mehreren und variablen Abwasser-/Wasserströmen gespeist werden.

Auf rechtlicher Ebene ergeben sich viele neue Fragestellungen

Mit den Neuerungen durch die Digitalisierung werden auch zahlreiche rechtliche Fragestellungen aufgeworfen. Hierzu zählen u.a.:

- » Verantwortlichkeit bei externem Datenzugriff
 - Besitzansprüche an volldigitalisierten Prozess- und Betriebsdaten, anlagenübergreifenden Datenvergleichen sowie Datenauswertungen
 - Verantwortung für die Folgen von Entscheidungen und Steuerungseingriffen in den Bereichen Umweltschutz, Produktions- und Anlagensicherheit sowie Produktqualität

» Arbeitnehmerschutzgesetz

» Urheberrechte

Investitionen sind nicht kurzfristig, sondern mittel- bis langfristig wirtschaftlich

Es werden erhebliche Kosten für den Ersatz von nicht digitalisierbaren Sensoren, für die Digitalisierung analog erhobener Daten und für die Erneuerung bzw. Neuinvestition in eine moderne Onlinesteuerung von Anlagen bei der Systemanpassung entstehen. Der unmittelbare Nutzen und die damit verbundene Kosteneinsparung werden nicht immer mit genügender Sicherheit für eine Investitionsentscheidung quantifizierbar sein. Hinzu kommen Kosten für eine deutlich verbesserte Datensicherheit, Datenverarbeitung und -bevorratung. Auch die erforderliche kontinuierliche Schulung des Betreiberpersonals wird organisatorisch und kostenseitig wirksam werden.

4.4 Handlungsbedarf

Betriebliche Abläufe sind zu einem durchgängigen und fachdisziplinübergreifenden System zu entwickeln

Der Schwerpunkt zukünftiger Forschungstätigkeiten verlagert sich hin zur Untersuchung und Entwicklung vollständig beschreibbarer, aber noch beherrschbarer, kontextabhängiger (selbsttätig) regelbarer Wasserbehandlungs- und Wassermanagementsysteme.

Insbesondere ist die integrative Entwicklung von Prozessen und Behandlungssystemen von Bedeutung. Dabei müssen von Beginn an alle Aspekte in einem engen Wechselspiel ausgebildet und über den Marktzyklus des Wassers kontinuierlich fortentwickelt werden. Hierzu zählt auch die Erprobung und Validierung von Entwurfsentscheidungen im Hinblick darauf, welche Funktionen später mechanisch oder elektrisch, durch Firmware oder Software oder auch durch Dienstleistungen umgesetzt werden sollen. Die Verfügbarkeit aller relevanten Daten und Prozesse über System- (Teilsystem, Maschine/Prozess, Produktionsanlage, Fabrik) und Firmengrenzen hinweg, sowie deren Bereitstellung in skalierbaren Systemen ist dabei ein zentraler Bestandteil. Ebenso ist die Modularisierung und Wiederverwendung der Anlagen und Systeme für die Beherrschung der zunehmenden Komplexität und Skalierbarkeit voranzutreiben. Der Rückfluss von Erfahrungen aus dem Einsatz der Anlagen und Systeme in die Entwicklung bzw. das Engineering und den Betrieb ist genauso von Bedeutung wie die digitale Einbindung von Offline-Analytik.

Letztlich muss die Realisierung eines ganzheitlichen, fachdisziplinübergreifenden Systems die etablierten Entwicklungsmethoden und die entsprechenden Toolumgebungen der betroffenen Domänen (beispielsweise Mechanik, Elektrotechnik, Softwaretechnik, Kommunikationstechnik sowie Anlagen- und Prozesstechnik) integrieren.

Die vertikale Integration vereint bei *Industriewasser 4.0* die verschiedenen Systeme für die Unterstützung bzw. Durchführung der unterschiedlichen Wertschöpfungsprozesse sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch über Unternehmensgrenzen hinweg (z. B. bei Verbänden) zu einer durchgängigen Lösung.

Dynamisierung der Fahrweise zur Erhöhung der Effizienz von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen

Wasserbehandlungsanlagen arbeiten für die heutigen Anforderungen bereits sehr effizient. Die Anpassung an höhere und schnellere Variabilität vor allem in der Abwasserzusammensetzung erfordert neue Optimierungsansätze, um eine hohe Effizienz der (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen zu gewährleisten. Die Werkzeuge der Digitalisierung schaffen die Voraussetzungen für einen effizienten und sicheren Betrieb (s. Abb. 4.6).

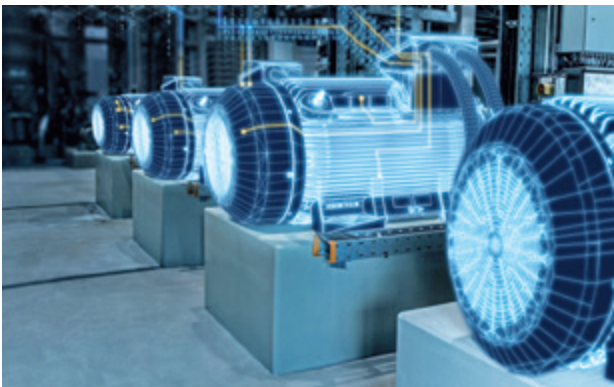


Abb. 4.6: Eine dynamische Fahrweise von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen erfordert auch eine intelligente Motorsteuerung

Sensorentwicklungen ermöglichen eine bessere Erfassung komplexer Zustände und Prozesse

Durch die Weiterentwicklung spezifischer Sensoren für online Kontrolle, Regelung und Überwachung können präzisere Informationen zum Zustand von Wässern oder dem gesamten Prozess erfasst werden. Eine große Bedeutung wird der Entwicklung von Sensoren in Analogie zu menschlichen Sinnen zukommen. Optische, akustische und geschmackliche Messprinzipien sowie Geruchssensoren werden die Möglichkeiten erhöhen wassertechnische Systeme in Echtzeit zu charakterisieren. Hinzu kommen

biobasierte Sensoren zur Analyse von Toxizität, Wirkstoffen und hygienischen Parametern. Mit online Messung von mikrobiologischen Parametern z. B. zur Erfassung von Populationszusammensetzung und der biologischen Aktivität von Mikroorganismen können biologische Prozesse optimiert und effizienter gesteuert werden.

Modellierung und Maschinelles Lernen sollen das industrielle Wassermanagement vereinfachen und optimieren

Die zentrale Motivation hinter der Analyse von Sensordaten ist die kontinuierliche Erfassung von Informationen über einen (technischen) Prozess entweder als Basis für dessen Steuerung und Regelung oder für eine Diagnose, Alarmierung etc. So können beispielsweise bei einem reaktiven Eingriff Prozessparameter angepasst werden oder bei Diagnosen Maschinendefekte signalisiert werden. Wesentliche Voraussetzung dafür sind Modelle, die eine Interpretation und Reaktion sowie eine Einbindung in die Gesamtsysteme ermöglichen.

Die Verknüpfung der diversen Sensoren und deren Auswertung, teilweise unter kritischen Echtzeitbedingungen, ist eine zentrale Herausforderung.

Hierbei besteht insbesondere Handlungsbedarf bei der Datenakquisition von einer großen Anzahl an Sensoren und ihrer Verarbeitung vor Ort (Edge-Computing). Mit Blick auf die Modellierung liegen die Herausforderungen auf der Überführung von Zusammenhängen zwischen gemessenen Werten und auftretenden Effekten in ein passendes, möglichst auch neuronales Modell und dessen prädiktive Aussagefähigkeit (z. B. mit Blick auf vorausschauende Wartung).

Unter Sensordaten sind hierbei nicht nur klassische Sensordaten zu verstehen sondern auch Daten, welche nur durch komplexe und schnelle Auswertungsverfahren zu verarbeitbaren Informationen führen. Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz zur Erkennung und Zuordnung von Bildern oder Geräuschen ist hier nur ein Beispiel von vielen. Bei der Sensorentwicklung selbst ergeben sich damit Möglichkeiten, umfangreiche Rohdaten an Steuerungseinheiten weiterzugeben, ohne Informationsverluste durch die Ermittlung von einzelnen Messparametern als Zwischengröße zu erhalten. Auswertungsverfahren mit Hilfe von Maschinellern sind auf diese Zwischenauswertung nicht angewiesen und können Zusammenhänge aus den Rohdaten ermitteln, welche durch eine Reduzierung auf Zwischengrößen verborgen bleiben. Voraussetzung hierfür sind Lösungskonzepte und Steuerungsalgorithmen, die aus der Analyse von Rohdaten zu verwertbaren

Ergebnissen hinsichtlich der Prozesssteuerung und Visualisierung der Anlagenzustände führen.

Insgesamt ergeben sich neue Anforderungen an Sensorentwicklungen, Datenauswertung und Steuerung, wodurch eine engere interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Sensorentwicklern, Verfahrens- und Automatisierungstechnikern sowie Kommunikations- und Softwarespezialisten erforderlich wird. Die Qualität der Erkenntnisse aus den Daten ist abhängig von den verfügbaren Lernzeiten und dem Umfang an Daten aus den verfügbaren Anlagen.

Data Mining für bessere und vorhersehbare Instandhaltung

Optimierungsbedarf besteht u.a. in der Standardisierung der Schnittstellen und Fähigkeiten von Einheiten (Modulen) zum Aufbau einer flexiblen und wandelbaren Wasserbehandlung (s. Abb. 4.7).

Es ist ein Gerüst für die Umsetzung von zustandsabhängigen Überwachungen und Steuerungen von *Industriewasser 4.0*-Szenarien zu entwickeln. Der Informationsaustausch über die Hauptkomponenten der Sensordatenverarbeitung muss standardisiert werden. Es soll eine Softwarearchitektur entstehen, die den Zugriff auf Sensordaten ermöglicht, ohne Kenntnisse über die physische Sensorebene zu besitzen (Sensorabstraktion). Insbesondere ist die Einbindung kabelloser Sensoren zu berücksichtigen. Die Inbetriebnahme und Konfiguration muss grafisch und interaktiv mittels Plug-and-Work-Ansatz realisiert werden. Die Auswertung mehrerer Sensordatenströme im Sinne von Datenfusion muss ermöglicht werden, ohne individuelle Entwicklungserfordernisse für jeden Anwendungsfall. Um einen möglichst hohen Grad an Autonomie des Sensornetzes zu erreichen, müssen die Sensoren mit semantischen Beschreibungen ausgestattet werden. Dies sind notwendige Voraussetzungen hin zu standardisierten Plattformen.

Zeitskalen sind anzupassen

Die Zeitskalen bzw. Datenerhebungsintervalle der Sensoren sind sorgfältig auf die Variationsgeschwindigkeit der entsprechenden Messparameter anzupassen, um einerseits eine zu hohe Redundanz zu vermeiden, andererseits Veränderungen in Echtzeit beobachten zu können. Lösungsansätze auf der Seite der Informationsgewinnung aus Daten unterschiedlicher Zeitskalen ergeben sich durch die Anwendung zeitlich gestaffelter statistischer Algorithmen und neuronaler Netze.

Entwicklung eines Komponentenkatalogs und Standardisierung der Kommunikationstechnologien

Aus Forschungssicht ergibt sich die Notwendigkeit, eine exemplarische Smart Factory mit einem Smart Industrial Water Management zu installieren (Test Bed). Damit können mittel- bis langfristig modularisierte CPPS und ein entsprechender Komponentenkatalog entwickelt werden. Um die Anwendbarkeit in unterschiedlichen Unternehmen und Branchen mit heterogenen IT-Systemen, technischen Ressourcen und Kompetenzen zu gewährleisten, müssen sowohl die Basistechnologien der Informations- und Kommunikationstechnologien für die Automatisierungstechnik ertüchtigt, als auch anwendungsbezogene Referenzarchitekturen, als Erfolgsfaktor gestaltet werden.

Benötigt wird ein wissenschaftliches Fundament für eine integrative, Semantik erfassende Modellierungstheorie für die Produktionstechnik im Maschinen- und Anlagenbau sowie den Anlagenbetrieb. Für den Einsatz von Simulationswerkzeugen zur Anpassung von Anlagen an geänderte Zulaufbedingungen ist eine Flexibilisierung der Auslegung von Anlagen erforderlich. Damit erfolgt eine Durchdringung der Möglichkeiten, die hiermit eröffnet werden. Darüber hinaus können die Grenzen der Anpassungsfähigkeit geprüft werden.

Schnellere und effizientere Prozessabläufe erfordern das Industrielle Internet der Dinge (IIoT) in der industriellen Wasserwirtschaft

Die Nutzung der Möglichkeiten des Industriellen Internet der Dinge (IIoT) erfordert die Kommunikation zwischen



Abb. 4.7: Optimierung der Leistung von Assets, Energie- und Ressourcenverbrauch, Instandhaltung und Services

Komponenten, Sensoren und Steuereinheiten auch über kabellose Verbindungen und das Internet eine Entwicklung auf vielen Ebenen. Kommunikationsfähige Komponenten und Standards zum Informationsaustausch sind genauso zu entwickeln wie kabellose Netzwerke mit geringem Energieverbrauch für weite Entfernungen, um eine Unabhängigkeit von einer zentralen Stromversorgung zu erreichen. Ein großes Innovationspotenzial besteht im Entwickeln von Konzepten und Prozessen, die für das Industrielle Internet der Dinge geeignet sind, um so Abläufe zu optimieren und kosteneffizient zu organisieren.

Auch wenn die generelle Entwicklung des IIoT im Bereich der gesamten Produktionsindustrie viele Entwicklungstrends prägen wird und diese teilweise im Bereich der Wassertechnik übernommen werden können, müssen weitere wasserspezifische Lösungen, Konzepte und Technologien individuell entwickelt und etabliert werden.

Menschenzentrierte Schnittstellenlösungen erfordern neben Sicherheit, Flexibilität und Schulung neue rechtliche Rahmenbedingungen

Informationssicherheit stellt die Verfügbarkeit, Integrität und Vertraulichkeit der Informationen in *Industriewasser 4.0*-Anlagen und -Systemen sicher. Bei Informationssicherheit geht es darum, Gefahren abzuwehren, die auf die Anlage bzw. deren Funktionen einwirken. Insbesondere sind explizite und nicht intendierte Angriffe eingeschlossen. Sicherzustellen ist die Informationssicherheit für alle Funktionalitäten, sowohl für Betriebsfunktionen als auch für Überwachungsfunktionen und Schutzfunktionen.

Handlungsbedarf besteht dabei vor allem bei Verfügbarkeit und Integrität, Betriebssicherheit, Know-how-Schutz und Datenschutz (s. Kap. 4.3).

Eine erfolgreiche Implementierung von *Industriewasser 4.0* erfordert eine humanzentrierte Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Im Rahmen von *Industriewasser 4.0* wird sich die Mensch-Technik-Interaktion entsprechend verändern: Die Maschinen passen sich den Menschen an – und nicht umgekehrt. Intelligente industrielle Assistenzsysteme mit multimodalen, bedienungsfreundlichen Benutzerschnittstellen können die Beschäftigten bei ihrer Arbeit unterstützen und bringen digitale Lerntechnologien direkt an den Arbeitsplatz.

Industriewasser 4.0 muss von den Mitarbeitern an Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen akzeptiert werden. Die Voraussetzung dafür sind Arbeitsbedingungen,

die eine Flexibilität im Sinne der Mitarbeiter ermöglichen und ihre Kreativität und Lernfähigkeit unterstützen. Sogenannte multimodale Assistenzsysteme werden dafür die technologische Voraussetzung schaffen. Im Fokus dieses Themenfelds sind auch die Qualifikationsentwicklung und die Arbeitsorganisation sowie die Gestaltung der Arbeitsmittel im Rahmen von *Industriewasser 4.0*-Systemen.



Abb. 4.8: Mobile, mitarbeiterfreundliche Auswertung, Bewertung und Bedienung

Die Fragestellungen müssen interdisziplinär bearbeitet werden, indem die Expertise eines Teams aus Ingenieuren, Informatikern, Psychologen, Ergonomen, Sozial- und Arbeitswissenschaftlern sowie Medizinern und Designern einbezogen wird.

Zur Regelung und Neugestaltung des sich dramatisch veränderten Arbeitsumfeldes sind alle gesellschaftlichen Kräfte wie u.a. Arbeitgeber, Verbände und Gewerkschaften, aber auch den politischen Instanzen auf nationaler und internationaler Ebene aufgerufen. Diese müssen sozialverträgliche und wettbewerbserhaltende Antworten auf die mit den Neuerungen einhergehenden Fragestellungen ergründen und verwirklichen:

- » Wem gehören die Daten?
- » Wie können die Daten wirksam vor Spionage, Sabotage und Terrorismus geschützt werden?
- » Wer haftet bei Datenmissbrauch?
- » Wie wird rechtlich die Flexibilisierung von Arbeitszeit und Einsatzort geregelt?
- » Wie werden Neuregelungen global wirksam, auch um Wettbewerbsverzerrungen zu vermeiden?

5 Digitale Vernetzung mit der industriellen Produktion

5.1 Einleitung

Die industrielle Wasserwirtschaft ist mit ihrer Wasserbereitstellung eng mit den Anforderungen aus Produktionsprozessen verknüpft. Die Digitalisierung der industriellen Produktion und die damit einhergehende, zunehmende Flexibilisierung erfordern daher auch in der industriellen Wasserwirtschaft eine erhöhte Anpassungsfähigkeit an beiden Schnittstellen: der Wasserbereitstellung und der Abwasserbehandlung. Diese Anpassungsfähigkeit an die Produktion beinhaltet sowohl eine zeitliche Komponente (im Sinne von Reaktionszeiten auf sich ändernde Randbedingungen) als auch eine Verfahrens- und Qualitätskomponente (im Sinne einer Adaption von Reinigungsverfahren auf wechselnde Anforderungen).

Da hier zwei Bereiche innerhalb eines Standortes oder Unternehmens die Wasser- und Informationsströme miteinander verknüpfen und optimieren, handelt es sich hierbei um eine horizontale Integration.

Der digitalen Vernetzung auf dieser Ebene können zwei weitere Aspekte zugeordnet werden, welche hier nicht im Detail ausgeführt sind:

- » die Vernetzung mit weiteren, unternehmensfremden industriellen Wassernutzern im Sinne einer industriellen Symbiose
- » die Einbindung in Smart Grid Konzepte.

Durch abgestimmte Planung, einheitliche messtechnische Ausrüstung, Interoperabilität der Lösungen für Hard- und Software und abgestimmten Betrieb der vernetzten Anlagen lassen sich zukünftig erhebliche wirtschaftliche Potenziale erschließen. Erste Erfahrungen zeigen beispielsweise, dass bei einer Abwasserbehandlungsanlage durch eine plattformbasierte Planung Einsparungen von 20% beim Engineering erzielt werden konnten¹³. Die bedarfsgerechte Bereitstellung und Aufreinigung der Ressource Wasser auf Ebene der Produktion kann damit als eine zusätzliche Aufgabe innerhalb eines bestehenden oder zu etablierenden Fertigungsmanagementsystems (Manufacturing Execution System, MES) verstanden werden. Ähnlich der MES-Aufgabe „Energiemanagement“ ist es Ziel der horizontalen Integration des Wassermanagements, den Wasserbedarf (und den damit verbundenen Stoff- und Energiebedarf) entlang der Arbeitsschritte in einem Produktionsprozess „zu planen, zu erfassen, zu überwachen, zu analysieren, zu steuern und letztlich zu senken“¹⁴.

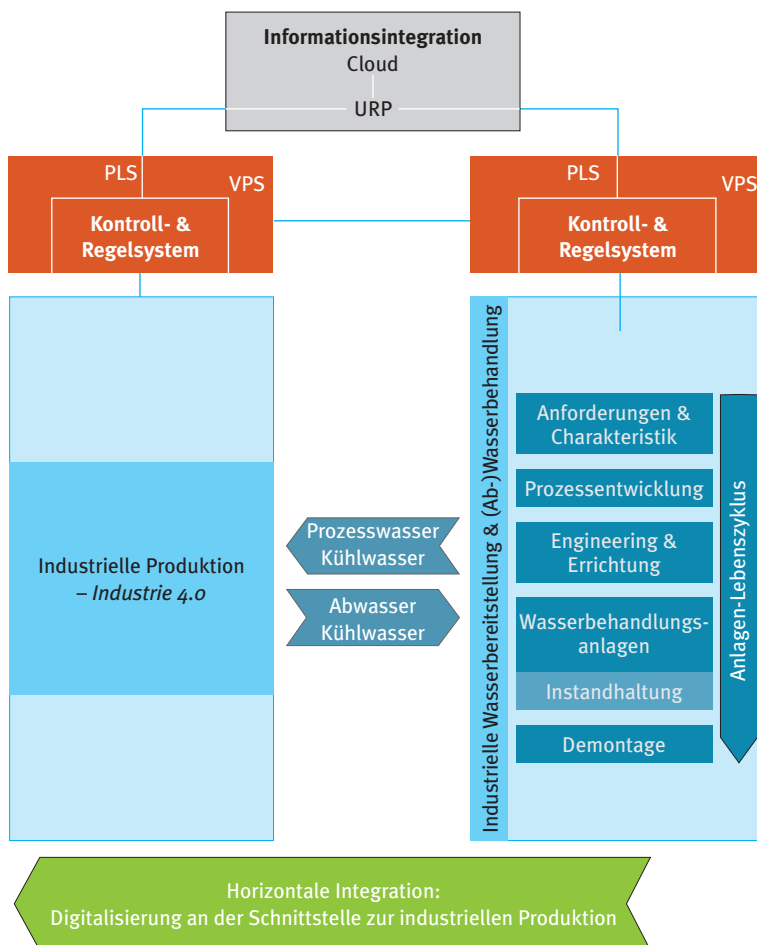


Abb. 5.1: Digitale Vernetzung der industriellen Wasserwirtschaft mit der industriellen Produktion (APK = Automatisierte Prozesskontrolle; VPS = verteilte Prozessleitsysteme; PLS = Produktionsleitsystem; URP = Unternehmensressourcenplanung)

¹³ GWP Arbeitskreis Wasser 4.0: „Wasser 4.0“, www.germanwaterpartnership.de/fileadmin/pdfs/gwp_materialien/gwp_wasser_40.pdf

¹⁴ VDI-Richtlinie: VDI 5600 Blatt 6 Fertigungsmanagementsysteme (Manufacturing Execution Systems – MES) – Energiemanagement mit MES (2017)

Durch dieses Vorgehen wird erhöhte Transparenz über Wasserbedarf und -einsatz in Produktionsabschnitten bis auf Maschinenebene ermöglicht. Damit steigt ebenfalls die Fähigkeit zur Vorhersage des produktionsabhängigen Wasserbedarfs und der daraus resultierenden Abwasserbelastung. Neben der reinen Erfassung von Volumenströmen, die über Zähler und Durchflussmesser bereits heute standardisiert möglich ist, spielt auch die Online-Messung von Stoffparametern eine entscheidende Rolle im industriellen Wassermanagement, um eine optimale Produktqualität und Produktionseffizienz zu erreichen.

5.2 Potenziale

Verkürzung von Reaktionszeit und Erhöhung von Flexibilität der Prozesswasserbehandlung

Mit Hilfe der horizontalen Vernetzung wird auf Basis aktueller und zukünftiger Produktionsdaten eine Vorhersage der anfallenden Prozesswassermengen und -qualitäten und somit des Betriebs der Prozesswasserbehandlung möglich sein. Engpässe sowie kritische Zustände der Prozesswasserbehandlung können bereits im Vorfeld aktiv vermieden bzw. es können rechtzeitig betriebliche Maßnahmen ergriffen werden. Dies ist insbesondere bei der absehbaren Flexibilisierung der Produktion durch das Agieren im Rahmen von *Industrie 4.0* und den sich daraus ergebenden Anforderungen im Umgang mit variierenden Rahmenbedingungen für die Prozesswasserbehandlung notwendig. Wesentliches Potenzial für verkürzte Reaktionszeiten und eine Flexibilisierung ist bei Prozesswasserbehandlungsanlagen zu sehen, die mit batchweise betriebenen Produktionsprozessen wie z. B. der biotechnologischen und chemischen Herstellung von Wirkstoffen, der Lebensmitteltechnologie oder den überwiegenden Prozessen der Stahlherstellung gekoppelt sind. Bei vereinheitlichten Datenformaten ist die verbesserte Abschätzung der Zusammenführung verschiedener Prozesswasserströme aus unterschiedlichen Produktionseinheiten (u.a. für bessere Symbiosen in Chemie- und Industrieparks) möglich.

Neben dem flexiblen Betrieb der Prozesswasserbehandlung ist Potenzial für die Beschaffung und Bevorratung von Behandlungschemikalien zu sehen, die noch intensiver prognoseorientiert durchgeführt werden kann. Die Integration der Prozesswasserbehandlung in bestehende digitale Systeme auf unterschiedlichen Ebenen (z. B. SAP, MS-Windows) unterstützt mit der Prognoseorientierung eine flexible und vorausschauende Instandhaltung. Durch automatisierte Meldekettens in den Prozessen, in Koordi-

nation mit den Daten zur prädikativen Zustandsüberwachung von Sensoren und Aggregaten (s. Kap. 4), können z. B. optimale Zeitfenster für Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen definiert werden.

Steigerung der Transparenz des Anlagenbetriebs

Mit der Verknüpfung von Produktion und Prozesswasserbehandlung auf den unterschiedlichen Signalebenen sowie mit der modellbasierten Prognosefähigkeit erhalten die Mitarbeiter ein zusätzliches „Sicherheitsgefühl“ beim Betrieb der Prozesswasserbehandlung aufgrund absehbarer Anlagenzustände. Es besteht die Möglichkeit der ganzheitlichen Abbildung/Visualisierung der horizontalen Integration in Leitsysteme zur erleichterten und sicheren Bedienung (softwaretechnische Einbindung der Prozesswasserbehandlung in eine Standortdarstellung). In dem Vermeiden des manuellen Austauschs von Informationen durch die Digitalisierung des Anlagenbetriebs, insbesondere über die Prozessstufen hinaus, liegt das Potenzial eines transparenteren Betriebs sowohl der Prozesswasserbehandlung als auch der Produktion. Zusätzlich bietet der integrierte Betrieb der Prozesswasserbehandlung durch die Digitalisierung eine erfahrungsbasierte Unterstützung des Bedienpersonals.

Rückkopplung einer integrierten Prozesswasserbehandlung zur Produktion

Grundsätzlich ist aus Sicht des Produktionsbetriebs eine Rückkopplung der Prozesswasserbehandlung in Richtung Produktionsprozess unerwünscht, aber insbesondere bei existierenden Standorten nicht zu vermeiden. Im Zusammenhang mit auftretenden kritischen Zuständen der Prozesswasserbehandlung kann jedoch auf Basis einer horizontalen Integration ein „minimaler oder angepasster Betrieb“ der Produktion ermittelt bzw. die Dauer kritischer Zeiträume bestimmt werden. Weiterhin besteht das Potenzial der Prognose für die Einhaltung von Grenzwerten unter Einbeziehung der Produktionsplanung bzw. definierter Produktionsbedingungen. Für weitgehend flexibilisierte Herstellungsprozesse, auch unter Wasserstress-Situationen, ist die Integration der industriellen Wasserwirtschaft eine notwendige Voraussetzung zur Umsetzung von Just-in-time-Produktion bzw. bedarfssynchroner Produktion.

Sicheres Design und optimierte Kapazitätsplanung der Prozesswasserbehandlung bei Neubau oder Erweiterung

Durch die horizontale Integration des Wassermanagements mit der Produktion wird unter Anwendung von Simulationswerkzeugen die bedarfsgerechte Auslegung sowohl im Fall des Neubaus als auch bei Produktionserweiterungen ermöglicht (s. Kap. 4.2). Simulationen des Betriebs der Prozesswasserbehandlung und integrierte virtuelle Inbetriebsetzungen im Fall von Neubau oder Erweiterung können vorab auf Basis von SOLL-Daten der Herstellungsprozesse erfolgen. Anlagenbauunternehmen und Dienstleister können so bereits in der Planungsphase extreme Produktionsszenarien berücksichtigen. Es ergibt sich weiterhin das Potenzial zur Bestimmung von Reserven in der Prozesswasserbehandlung im Zuge geplanter Erweiterungen der Produktionskapazität. In die Auswahl und Beurteilung potenzieller (Ab-)Wasserbehandlungsverfahren kann somit neben der Funktionsorientierung auch die Eignung für eine lastabhängige, dynamische Betriebsweise besser eingebunden werden. Ist eine Anpassung der Prozesswasserbehandlung an die flexibilisierte Produktion nicht möglich, kann mit Hilfe der horizontalen Integration eine Abschätzung der notwendigen Infrastruktur zur Entkopplung erfolgen. Bei batch-geführten

Produktionsprozessen wird beispielsweise bereits mit Puffertanks, deren Volumen auf ein Minimum reduziert ist, ein möglichst konstanter und sicherer Betrieb der Prozesswasserbehandlung ermöglicht. Weiterhin sind die im Rahmen der horizontalen Integration entwickelten Simulationswerkzeuge für künftige Aufgaben der Prozesswasserbehandlung wie die „Minimalaufbereitung“ von Prozesswasser zur Mehrfachnutzung in unterschiedlichen Produktionsprozessen einsetzbar.

5.3 Barrieren

Eindeutige Definition des Integrations-/Optimierungsziels

Für die Integration der industriellen Wasserwirtschaft in Digitalisierungskonzepte der Produktion ist primär ein klares Optimierungsziel zu definieren. Zunächst müssen Engpässe und Optimierungspotenziale in bestehenden Anlagen aufgezeigt werden, worauf dann konkrete Handlungsoptionen aufbauen. Dieser Definitionsschritt stellt in vielen Industriebetrieben eine hohe „Eintrittshürde“ dar, weil die Heterogenität der beteiligten Mitarbeiter und Organisationseinheiten mit teils divergierenden oder widerstreitenden Teilzielen ein universelles und kongruentes Verständnis der Optimierungsgrößen erschwert.



Abb. 5.2: Modellbasierte Prognosefähigkeit bietet zusätzliches „Sicherheitsgefühl“

Schaffung zunehmender Abhängigkeiten im Unternehmen

Um die Umsetzung eines integrierten Wassermanagements zu ermöglichen, bedarf es der engen Verknüpfung der Systeme aller Bereiche, inklusive der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur. Damit steigen die gegenseitigen Abhängigkeiten unterschiedlicher Organisationseinheiten im Unternehmen, die es planerisch und operativ zu bewältigen gilt. Für zukunftsfähige Entwicklungen sind sowohl von Seiten der Software als auch der Hardware intelligente Schnittstellen einzuplanen und Standardisierungen vorzunehmen. Bei der Umsetzung von Digitalisierungskonzepten müssen Redundanzen in der digitalen Produktions- und Wasserinfrastruktur verfügbar sein, da sonst Produktionsausfälle im Störfall (vor allem bei Just-in-Time-Situationen) eine Konsequenz sein können. IT-seitige Verknüpfungen können darüber hinaus zu einer erhöhten Anfälligkeit der Netze durch Systemausfälle oder mangelnde Datensicherheit führen, denen aktiv begegnet werden muss (s. Kap. 4.3). Während dieses Problem innerhalb eines Unternehmens (Intranet-Zugriff) noch beherrschbar erscheint, stellt dies über die Unternehmensgrenzen hinweg hohe Anforderungen an die Cyber-Sicherheit.

Verkürzung von Reaktionszeiten und Reduktion von Sicherheiten

Bisher profitieren Produktionsprozesse häufig davon, dass Altanlagen so dimensioniert sind, dass keine Engpässe bestehen oder durch die Größe der wassertechnischen Anlagen viele kleine Produktionswechsel keine Auswirkung in der Lastanforderung haben. Durch die Anforderungen an eine erhöhte gesamtheitliche Produktionseffizienz wird das Vorhalten solcher Sicherheiten betriebswirtschaftlich zunehmend hinterfragt. Eine Reduktion der Sicherheiten und Redundanzen auf Anlageniveau erfordert somit zwangsläufig eine Steigerung der Genauigkeit von Mess-, Steuer- und Regelsystemen, die Entwicklung neuer Sensoren zur Bereitstellung bisher nicht erfassbarer Daten und eine erhöhte Flexibilität und Handlungsfähigkeit des Bedienpersonals. Durch externe Faktoren der Flexibilisierung, wie z. B. das bereits oben erwähnte, zunehmend variable Energiemanagement eines Betriebes, werden die Anforderungen weiter erhöht. Daraus resultiert im Negativfall eine unzureichende Beherrschbarkeit des integrierten Systems, die die Optimierungsanstrengungen ins Gegenteil verkehrt.

Komplexität und Kosten der integrierten Lösungen

Einheitenübergreifende integrierte Strukturen im Wassermanagement bedeuten für einen Industriebetrieb eine erhebliche organisatorisch-personelle wie auch finanzielle Belastung, da die Digitalisierung trotz möglichst weitgehender Standardisierung der Plattformsysteme (Soft- und Hardware) grundsätzlich individuelle Lösungen mit hohem Planungsaufwand erfordert. Durch horizontale Einbeziehung unterschiedlicher Unternehmenseinheiten und die Vermeidung von Insellösungen werden umfassend vernetzte Strukturen geschaffen, die aufgrund ihrer Größe und der damit einhergehenden Schnittstellenproblematik hoch komplex sind. Diese Komplexität führt bei Einrichtung der Systeme zu erhöhtem Fehlerpotenzial, langen Anlaufzeiten und erheblichen Investitions- und Personalkosten, die berücksichtigt werden müssen. Insbesondere bei Planung und Bau der Ver- und Entsorgungsinfrastruktur wirken sich Kostendruck und lange Abschreibungszeiträume negativ auf die Umsetzung integrierter Lösungen aus (s. Kap. 4.3).

Steigende Anforderungen an Bedienpersonal und Organisationsstruktur

Aus den in den vorangegangenen Abschnitten geschilderten Barrieren ergeben sich unmittelbar steigende Anforderungen an Bedienpersonal und Entscheidungsträger. Enge Taktung der relevanten Anlagendaten, Reduktion von Sicherheiten und zunehmende Komplexität können zu Stresssituationen führen, die im ungünstigsten Fall in Mitarbeiterüberforderung und Fehlentscheidungen münden, wenn keine menschenzentrierten Schnittstellen geschaffen werden (s. Kap. 4.4). Arbeitspsychologische Maßnahmen und Weiterbildung müssen daher die Implementierung der horizontal integrierten Systeme begleiten, um die Maßnahmen nicht an Widerständen der Belegschaft scheitern zu lassen. Nicht vernachlässigt werden darf, dass die Entwicklungsgeschwindigkeit der digitalen Systeme eine kontinuierliche Bereitschaft zum lebenslangen Lernen aller Akteure voraussetzt. Gleichzeitig muss die betriebsinterne Organisationsstruktur der horizontalen Integration Rechnung tragen. Der Bedarf an systematischer Kommunikation und Meldekettens steigt mit der Anzahl der beteiligten Organisationseinheiten und Akteure (s. Kap. 4.3).

5.4 Handlungsbedarf

Nachvollziehbarkeit der Umsetzung horizontaler Integration

Um mögliche Widerstände von Unternehmenseinheiten bereits in Planungsprozessen so gering wie möglich zu halten, muss die Entscheidung für die integrierten Digitalstrukturen anhand universeller, nachvollziehbarer Kriterien erfolgen. Kriteriensets z. B. bei multikriterieller Bewertung und die Vorgehensweise zur Ermittlung solcher Kriteriensets sind möglichst standardisiert und transparent zu halten. Auch arbeitsorganisatorische Faktoren müssen in Zusammenarbeit mit Sozioökonomen und Soziologen berücksichtigt werden. Das Verständnis solcher Faktoren jenseits ingenieur- und elektrotechnischer Kennzahlen muss weiter ausgebaut werden, um die Veränderungen der Arbeits- und Entscheidungsabläufe für die Betroffenen adäquat erfassen zu können.

Übergreifende, verbesserte Sensorik und Modelle

Auf die Notwendigkeit zur Entwicklung verbesserter Sensorik und der zur Datenanalyse verwendeten Auswertungsalgorithmen wurde bereits ausführlich in Kapitel 4.4 eingegangen. Im Aufgabenfeld der horizontalen Integration von *Industriewasser 4.0* muss diese Entwicklung maßgeblich auch in den Produktionseinheiten vorangetrieben werden. Im Sinne eines vorbeugenden, prozessintegrierten Umweltschutzes sind Qualitätsparameter der erzeugten Produkte und Zustandsvariablen der Herstellungsprozesse möglichst online zu erfassen, um beispielsweise die Auswirkungen auf die nachgelagerte Prozesswasserbehandlung vorausschauend beurteilen zu können. Neben den online Messungen sind neuronale Modelle zu entwi-

ckeln, die prädiktiv die Netz- und Unit-Operation-kontrolle und -regelung übernehmen. Gegebenenfalls können dann bereits vor Überführung von Substanzen und Schmutzstoffen in den Wasserpfad Gegenmaßnahmen ergriffen werden oder kann die Adaption der Prozesswasserreinigung vorausschauend und unmittelbar erfolgen. So kann z. B. bei Beschichtungsprozessen die Menge und Konzentration der eingesetzten Chemikalien mit der Schichtdicke und -güte auf dem Werkstück abgeglichen werden, um die Verlagerung überschüssiger Substanzen in den Wasserpfad zu beurteilen. Aufgrund der Produktionstaktungen sind dazu berührungslose, spektroskopische oder optische Messverfahren weiter zu entwickeln.

Bedienbarkeit und Integration von Digitalisierungslösungen

Die Bedienbarkeit der eingesetzten IT-Systeme durch auf den Nutzer abgestimmte, intuitive Mensch-Maschine-Schnittstellen muss verbessert werden. Bisher umgesetzte Konzepte beruhen in der Regel auf Bildschirmarbeitsplätzen zur Prozesssteuerung und Datenverarbeitung. Mobile Endgeräte ermöglichen in der Produktion die Vor-Ort-Erfassung von Betriebszuständen und Anlagenkonfigurationen sowie die Alarmierung von Betriebspersonal. Virtuelle Realität Darstellungen in Leitständen und Sprachsteuerung von Aggregaten im Betrieb können die Bedienbarkeit verbessern, um Arbeiten wie Instandhaltungsmaßnahmen schnellstmöglich durchführen zu können.

Zur Reduzierung des Integrationsaufwands sind wirkliche Plug-and-Work-Lösungen von digitaler Soft- und Hardware weiterzuentwickeln. Automatische Übernahme von Konfigurationen und Parameter-Einstellungen von Sensoren und Bauteilen wie z. B. Frequenzumformern bei

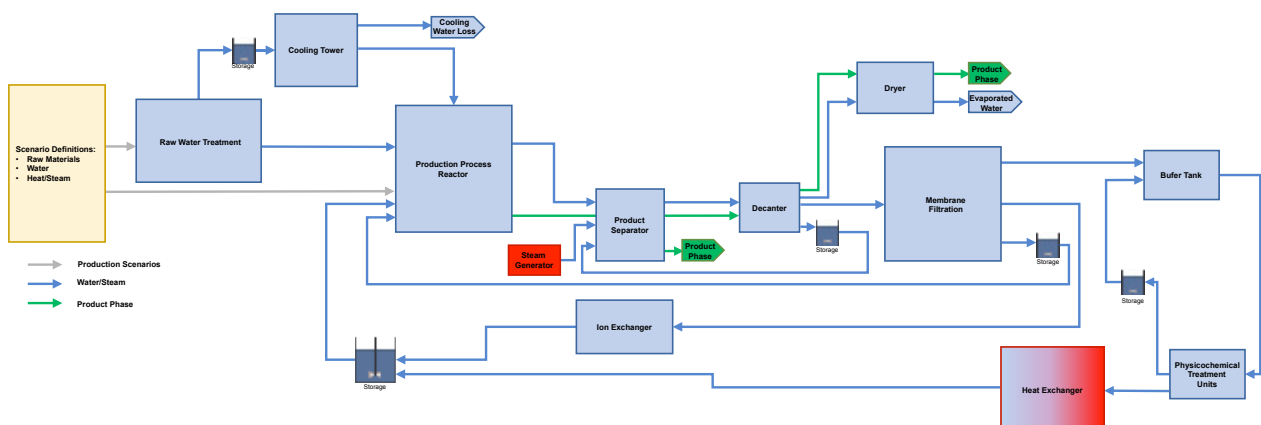


Abb. 5.3: Integriertes Wasser- und Energiemodell für einen Produktionsprozess in der chemischen Industrie



Abb. 5.4: Vor-Ort-Erfassung von Betriebszuständen und Anlagenkonfigurationen

fälligem Austausch kann den Arbeitsaufwand in der Anlagenwartung verringern. Bei erstmaligem Einrichten der digitalen Systeme muss die Zeitspanne von erster Inbetriebsetzung bis zum Normalbetrieb, trotz zunehmender Komplexität, weiter verkürzt werden.

Fortbildung, Schulung und Plant Information Modeling

Durch die steigenden Anforderungen an das Bedienpersonal und die Organisationsstruktur (s. Kap. 4.4 und 5.3) bedarf es der begleitenden Entwicklung angepasster Lernformate und Informationssysteme in Schulungsmaßnahmen. Auch hier können Virtuelle Realität Konzepte für das Erlernen von Bedienungsvorgängen oder für die übergreifende Anlagenplanung an kritischen Schnittstellen eingesetzt werden. Während 3D-Simulationen in der Produktentwicklung, insbesondere in der Automobilindustrie, bereits weite Verbreitung gefunden haben, sind solche Lösungen in der Anlagenplanung noch unterrepräsentiert.

Schnittstellen und Informationsmodelle

Zur Umsetzung einer horizontalen Integration müssen Schnittstellen und Architekturen definiert werden, die eine Kopplung der Prozesswasserbehandlung mit Produktionsprozessen innerhalb des Unternehmens und über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglichen.

Insbesondere für letzteres gilt es, geeignete Informationsmodelle bereitzustellen. Analog dem aufkommenden „Building Information Modeling“ im Bauwesen und der Haustechnik müssen Planungsinstrumente in Form eines übergreifenden „Plant Information Modeling“ für alle Akteure einsehbar die notwendigen Daten bereitstellen und Änderungen im Prozess dokumentieren.

Flexibilisierung und Demonstration

Das Zusammenspiel von digitalisierten Anlagenkomponenten, Softwarelösungen und Mensch-Maschine-Schnittstellen kann für einen weiten Nutzerkreis am besten in konkreten Umsetzungsbeispielen veranschaulicht werden.

Daher müssen beispielhaft konkrete Demonstrationsanlagen und Konzepte der horizontalen Integration in Form von Referenzprojekten realisiert werden. Neben der digitalen Infrastruktur ist in solchen Referenzprojekten auch die Entwicklung flexibler Anlagenkomponenten zu berücksichtigen, die unterschiedliche Betriebszustände in optimaler Weise abdecken können. Durch die Variabilität der Produktionsbedingungen sind in der industriellen Wassertechnik zunehmend robuste und langlebige Hardwarekomponenten gefordert, die in unterschiedlichen Betriebszuständen (und nicht nur an einem Betriebspunkt) bei hoher Energieeffizienz eingesetzt werden können. Dies gilt beispielsweise für Elektromotoren, Messsysteme und Wärmeüberträger in Industrierwasseranlagen und in der Produktion.

Durch erfolgreich umgesetzte Referenzprojekte in Form von Demonstrationen oder ersten Implementierungen, lassen sich skeptische Akteure einfacher überzeugen, als dies durch theoretische Effektabschätzungen möglich wäre. Vor allem aber eröffnen erfolgreiche Referenzprojekte Marktpotenziale für alle Beteiligten auf nationaler und internationaler Ebene. Da in diesen Referenzen eine öffentliche Zugänglichkeit gefordert ist, die aufgrund der Konkurrenz in der industriellen Produktion teilweise nicht gewünscht wird, ist eine öffentliche Förderung ausgewählter Referenzprojekte erforderlich.

6 Digitale Vernetzung mit kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement

6.1 Einleitung

Die industrielle Wasserwirtschaft kann nur in Wechselwirkung mit ihrem externen Wasserumfeld agieren. Dies sind vor allem die kommunale (Ab-)Wasserwirtschaft und natürliche Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwässer) in Form des Wasserressourcenmanagements, meist vertreten durch Fach- und Vollzugsbehörden. In dem Maße, in dem in der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft mit *Wasser 4.0* die Digitalisierung voranschreitet, entstehen an den Schnittstellen zwischen Kommunen und Industrie neue Anforderungen vor allem bei der Optimierung von Informationsströmen. Für Standorte, an welchen natürliche Wasserressourcen Bestandteil des industriellen Wassermanagements sind, wird die Digitalisierung künftig zuneh-

mende Bedeutung für die Informationsschnittstelle zum Wasserressourcenmanagement, d.h. den Genehmigungs- und Vollzugsbehörden im Rahmen von Überwachung und Compliance erhalten. Diese Verknüpfung erfolgt auf einer horizontalen Integrationsebene.

Notwendigkeit zur Anpassung an demographischen, strukturellen und klimatischen Wandel

Die Wasser- und Abwasserwirtschaft sieht sich vor der Herausforderung, ihre Systeme und Anlagen an einen fortlaufenden demographischen, strukturellen und klimatischen Wandel anzupassen. Immer mehr Verbraucher - sowohl privat als auch industriell - konzentrieren sich in den Ballungszentren, sodass sowohl die Nachfrage nach Wasser als auch die Abwassermengen steigen. Daneben müssen immer strengere Anforderungen an die Wasserqualität erfüllt werden. Gerade in industriellen Prozessen ist die Versorgung mit entsprechend aufbereitetem Wasser ein entscheidender Faktor für die Produktivität und Qualität der Prozesse. In einigen Regionen der Welt wie Indien oder Lateinamerika behindern Wasserknappheit und eine nicht ausreichende Wasserqualität mittlerweile die weitere wirtschaftliche Entwicklung, sodass der Schutz und die nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen zunehmend in den Fokus der Öffentlichkeit geraten.

Steigende Qualitätsanforderungen und flexible technische Lösungen

Die Belastungen des Grund- und Oberflächenwassers mit Spurenstoffen und sonstigen umweltkritischen Substanzen sowie Emissionen in Form zu hoher Nährstofffrachten aus der Landwirtschaft sowie Mikroplastik stellen neue Anforderungen an die Aufbereitung. Um die Qualität unserer Wasserressourcen zu sichern, steigen gleichzeitig die Anforderungen an die Behandlung der Abwässer – sowohl im kommunalen als auch im industriellen Bereich. So müssen zusätzliche Behandlungsstufen in den Reinigungsprozess integriert werden oder vorhandene Prozesse angepasst werden, um strengere Grenzwerte zu erfüllen. Daneben

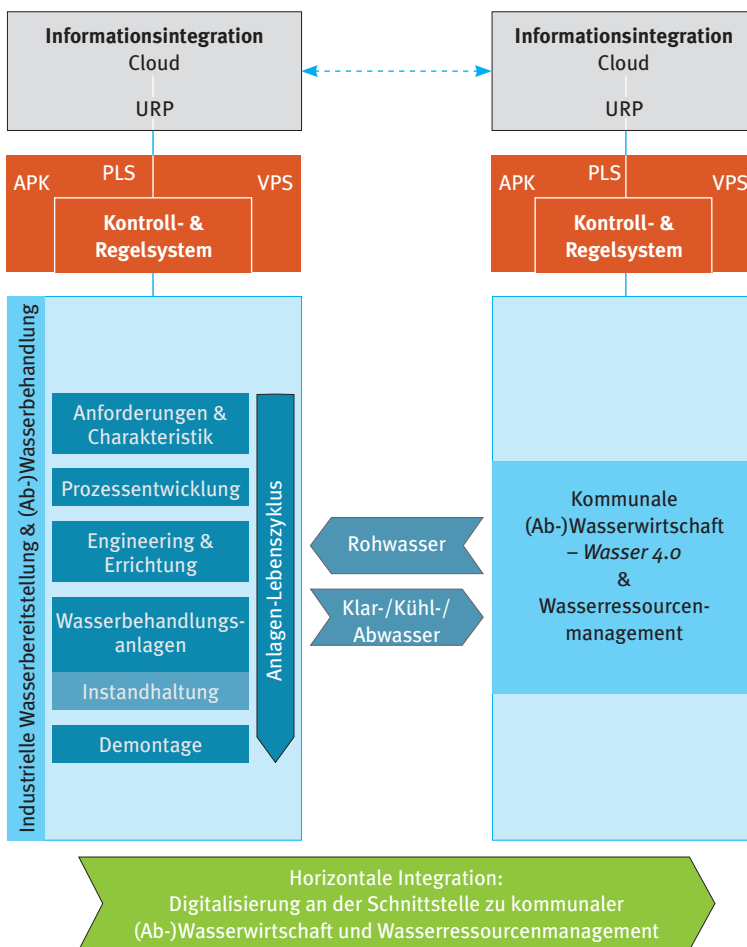


Abb. 6.1: Digitale Vernetzung der industriellen Wasserwirtschaft mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement (APK = Automatisierte Prozesskontrolle; VPS = verteilte Prozessleitsysteme; PLS = Produktionsleitsystem; URP = Unternehmensressourcenplanung)

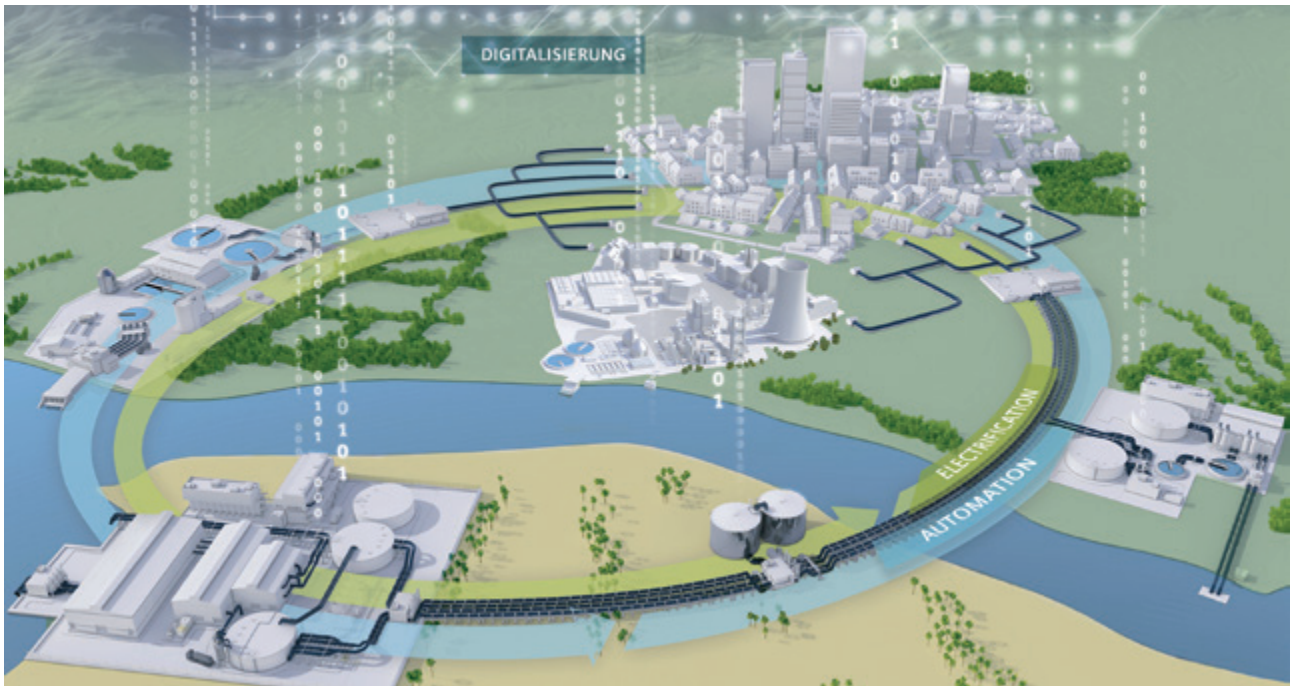


Abb. 6.2: Die horizontale Integration der industriellen Wasserwirtschaft mit der kommunalen Wasserver- und -entsorgung wird auf verschiedenen Ebenen einen wichtigen Beitrag zu einem nachhaltigen Wasserressourcenmanagement leisten

sollten Anlagenbetreiber möglichst sicherstellen, dass bei Naturereignissen wie Starkregen oder Unwettern eine Überflutung der Abwasseranlagen und damit verbunden eine unkontrollierte Freisetzung von belasteten Abwässern weitgehend verhindert wird. Die zunehmende Flexibilisierung der Produktion resultiert zudem in Schwankungen sowohl beim Bedarf nach Wasser als auch bei der anfallenden Abwassermenge, sodass die entsprechenden Ver- und Entsorgungssysteme ebenfalls eine größere Flexibilität aufweisen müssen. Nicht zuletzt stellt auch der demographische Wandel die Anlagenbetreiber vor die Herausforderung, die Erfahrung und das Wissen des Personals in der Aufbereitung systematisch zu erfassen und zur Schulung und Ausbildung neuer Mitarbeiter nutzen zu können.

6.2 Potenziale

Bedarfsgerechte Behandlung durch integrierte Datenerfassung und -auswertung

Für eine nachhaltige Wasser- und Abwasserwirtschaft ist es unverzichtbar, dass sowohl industrielle als auch kommunale (Ab-)Wasserströme nicht nur strukturell, sondern auch informationstechnisch zu einer Wasser-Kreislaufwirtschaft verknüpft werden. Auf diese Weise lassen sich in vielen Bereichen Synergien nutzen, um die Effizienz und Qualität der Wasser- und Abwasseraufbereitung zu steigern. Durch eine integrierte Überwachung der Versor-

gung lassen sich Leckagen schneller identifizieren sowie die Einhaltung von Grenzwerten und eine bedarfsgerechte Behandlung der Wasser- und Abwasserströme sicherstellen. Damit können die vorhandenen kommunalen Infrastrukturen effizienter genutzt und betrieben werden. Um dies zu erreichen sind allerdings eine engere Vernetzung der unterschiedlichen Organisationen und Anlagen sowie Lösungen für die Erfassung und Auswertung der Daten unterschiedlichster Sensoren und Systeme notwendig.

Durch Investitionen in die Infrastruktur lassen sich zudem erhebliche Einsparungen realisieren, unter anderem durch eine flexiblere Steuerung der Betriebsparameter und Pumpen.



Abb. 6.3: „From Integrated Engineering to Integrated Operation“ für ein nachhaltiges Wassermanagement

Modellbasierte Optimierungssysteme erlauben bedarfsgerechten Anlagenbetrieb bei flexiblen Rahmenbedingungen

Die digitale Verknüpfung der industriellen mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft ermöglicht über das Echtzeitmonitoring von Wassermengen und -qualitäten ein Informations- und Frühwarnsystem nicht nur während des Normalbetriebs von Anlagen, sondern auch im Falle von besonderen Ereignissen wie außerordentlichen Wetterereignissen oder toxischen Stößen in der Wasserinfrastruktur. Durch modellbasierte Optimierungssysteme können Anlagenbetreiber Prognosen und darauf basierende Vorschläge für die Betriebsparameter ableiten. Dadurch lassen sich aus den gewonnenen Daten aussagekräftige Informationen gewinnen, die einen maximalen Nutzen im praktischen Betrieb der Anlagen erzeugen. So lassen sich durch die Integration von Wetterdaten und Geoinformationssystemen die Zufluss- und Abflussmengen bei bestimmten Wetterlagen simulieren und mit den Betriebsparametern der verschiedenen kommunalen und industriellen Anlagen verknüpfen. Dadurch können zum Beispiel rechtzeitig vor einem Starkregenereignis eine Pufferkapazität für die zusätzlichen Wassermengen geschaffen, gleichzeitig die industriellen Einleitungen reduziert und die Abwasserbehandlung entsprechend angepasst werden.

6.3 Anforderungen an vernetzte Systeme aus Sicht der Wasserwirtschaft

Digitales Wassermanagement als Bindeglied zwischen gesetzlichen Rahmenbedingungen für verschiedene Bereiche

Das digital unterstützte industrielle Wassermanagement bildet das Bindeglied und den Puffer zwischen den Anfor-



Abb. 6.4: Durch modellbasierte Optimierungssysteme können Anlagenbetreiber Prognosen und darauf basierende Vorschläge für die Betriebsparameter ableiten

derungen einer flexiblen Produktion (*Industrie 4.0*) und Anforderungen aus der Hydrosphäre und der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft. Anforderungen an die Wasserqualität innerhalb der Industrieunternehmen sind abhängig von den dort ablaufenden Produktionsprozessen. Aufgrund der meist völlig anderen Zusammensetzung der industriell anfallenden Abwässer und der kommunalen Abwässer wird häufig eine voneinander getrennte Abwasserreinigung in separaten technischen Systemen durchgeführt. Die jeweiligen Einleitgrenzwerte differieren ebenfalls und hängen sowohl beispielsweise von den örtlichen Rahmenbedingungen als auch den Größenklassen der Kläranlagen ab. Im Falle einer digitalen Verknüpfung des industriellen mit dem kommunalen Wassermanagement ist auf die unterschiedlichen rechtlichen Rahmenbedingungen einzugehen und neben den Betreibern auch die Behörden unter systemischen Gesichtspunkten einzubinden. In Regionen mit auftretender Wasserknappheit entstehen über diesen systemischen Ansatz Möglichkeiten, flexible Lösungen zu finden.

Für die Umsetzung der oben beschriebenen intelligenten und vernetzten Systeme müssen zum einen entsprechende Sensoren und Automatisierungssysteme implementiert werden, zum anderen benötigen Betreiber sowohl der industriellen als auch kommunalen Abwasserreinigungsanlagen neue Lösungen für die dynamische und bedarfsgerechte Prozesssteuerung – im besten Fall mit einer jeweils geeigneten Schnittstelle zur systemischen Einbindung. Durch eine ganzheitliche Planung und einen vernetzten Betrieb der Anlagen lassen sich die erforderlichen Investitionen kostenoptimiert und effizient umsetzen und gleichzeitig die Akzeptanz und Transparenz bei Baumaßnahmen erhöhen.

Horizontale Integration durch Vernetzung zwischen realen und virtuellen Wassersystemen

Damit diese horizontale Integration die Datenqualität und Aussagesicherheit über verschiedene Anlagen und Systeme verbessert, müssen zudem entsprechende Automatisierungssysteme und leistungsfähige Werkzeuge für die Simulation und Prognose implementiert werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Vernetzung virtueller und realer Wassersysteme gelingt. Für eine Umsetzung in der Praxis sind dabei vor allem die Daten- und Ausfallsicherheit, durchgängige Schnittstellen sowie Servicefähigkeit des Gesamtsystems entscheidende Kriterien.

Notwendige Angleichung der verschiedenen Digitalisierungsformate und -grade

Bei der Umsetzung der Digitalisierung in die Praxis wird, vorrangig im kommunalen Bereich, noch gezögert. Von den in Deutschland existierenden rund 10.000 kommunalen Kläranlagen bedienen ca. 250 Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern, aber über 1.500 Anlagen liegen zwischen 10.000 und 100.000 Einwohnern. Insbesondere bei diesen mittelgroßen Kläranlagen ist der Grad der Digitalisierung unterschiedlich weit fortgeschritten. Die Abwasserentsorgung und -reinigung wird typischerweise von vielen kleinen und größeren Organisationseinheiten übernommen, sodass eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen existiert. Die Digitalisierung mit all ihren Facetten ist in der Industrie insgesamt weiter fortgeschritten als im kommunalen Bereich. Deshalb sollte eine Erfahrungstransfer von der Industrie in das kommunale Wassermanagement verstärkt werden. Gemeinsam entwickelte Lösungen für Kommunen und Industrie könnten zur Hebung relevanter Synergiepotenziale führen. Beide Seiten würden hinsichtlich der Möglichkeiten zu frühzeitigem Eingreifen beispielsweise bei Störfällen profitieren. Voraussetzung dafür ist ein hohes Vertrauensverhältnis zwischen den Partnern. Ebenso relevant ist die von Beginn an starke Einbindung der Behörden.

Aufgrund der meist standardmäßig ausgeführten kommunalen Kläranlagentechnik und der spezifisch aufgebauten industriellen Kläranlagentechnik existiert eine stark inhomogene Landschaft mit individuellen Digitalisierungskonzepten. Eine Homogenisierung des Gesamtsystems erfordert damit einen zunächst hohen Planungsaufwand. Bei Anlagentechnik und Anlagenbau auf der einen und der Digitalisierung auf der anderen Seite treffen unter-



Abb. 6.5: Daten- und Ausfallsicherheit, durchgängige Schnittstellen sowie IT-Sicherheit des Gesamtsystems sind entscheidende Kriterien für eine hohe Akzeptanz

schiedliche Zeithorizonte für Abschreibungen als auch Entwicklungszyklen aufeinander. Daher müssen heutige Konzepte bereits entsprechende Schnittstellen integrieren, um Erweiterungen und Modernisierungen leicht umsetzen zu können. Die Integration neuer Managementprozesse bei kommunalen Kläranlagen in Anlagen und Standorte verursacht anfangs einen vergleichsweise hohen Aufwand. Viele Anlagenbetreiber stehen einer Vernetzung und Digitalisierung daher eher skeptisch gegenüber. Gleichzeitig sind die Vorteile einer flexibleren und effizienteren Prozess- und Anlagensteuerung, ebenso wie der Nutzen aufgrund einer engeren Verknüpfung mit den sie umgebenden industriellen Anlagen, noch nicht ausreichend durch Praxisbeispiele belegt. Hier kann durch Positiv-Demonstrationsbeispiele (Referenzprojekte) eine flächendeckende schnelle Umsetzung beschleunigt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Referenzprojekte ist, dass sich damit der Nutzen der horizontalen Integration aussagekräftig belegen lässt.

Kostenreduktion durch Digitalisierung

Oft werden Investitionskosten als Barriere für die Digitalisierung in der Wasser- und Abwasserwirtschaft genannt. Diese Kosten können durch digitale Werkzeuge für Planung, Betrieb und Instandhaltung deutlich reduziert werden. Durch ein digitales Abbild der Anlage, den digitalen Zwilling, bei dem die Planungsdaten automatisch aktualisiert und abgeglichen werden, verkürzt sich die Zeit bis zur Inbetriebnahme, auch die Optimierung der Betriebsparameter sowie der Wartungsmaßnahmen wird deutlich vereinfacht.

Dieser digitale Zwilling kann auch dazu genutzt werden, neue Betriebsszenarien zu analysieren und bereits im Vorfeld planerisch zu berücksichtigen. Und nicht zuletzt lassen sich anhand des digitalen Anlagenmodells auch Mitarbei-



Abb. 6.6: Durch die Integration von Planung und Modellierung lassen sich neue Betriebsszenarien analysieren und bereits im Vorfeld planerisch berücksichtigen

ter einfacher schulen, was zu einer besseren Akzeptanz der Lösung und einem effizienteren Anlagenbetrieb führt. Insbesondere die oben genannten neuen Schulungsansätze könnten eine Umsetzung des Systemgedankens zur digitalen Verknüpfung der industriellen und kommunalen Wasserwirtschaft außerordentlich beschleunigen.

Sicherheitskonzepte und Akzeptanzerhöhung

Eine weitere Barriere für horizontale Integration von industriellen und kommunalen Wasserwirtschaftssystemen sind Bedenken bei der Netzwerksicherheit, insbesondere, wenn Entwicklungsansätze über Unternehmensgrenzen hinausgehen. Oftmals sind die Möglichkeiten für den Schutz von Anlagen (Ansätze wie das Defense-in-Depth Konzept für den Schutz von Industrieanlagen gegenüber unbefugten Zugriffen) noch nicht ausreichend bekannt. Auch hier kann durch entsprechende Referenzprojekte eine höhere Akzeptanz für Digitalisierungslösungen erreicht werden.



Abb. 6.7: Eine höhere Akzeptanz für Digitalisierungslösungen ist die Voraussetzung für zukunftsorientierte Veränderungen

6.4 Handlungsbedarf

Entwicklung und Einsatz modularer und flexibler Abwasserbehandlungstechnik

Besonders vorteilhaft wird die digitale Verknüpfung von industrieller Wasserwirtschaft und kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft sein, wenn mittels modularer und flexibler Abwasserbehandlungssysteme eine bedarfsgerechte Auslastung der kommunalen Infrastruktur ermöglicht wird.

Erleichterung der Vorhersagbarkeit und Optimierung der systemischen Reinigungsleistung durch digitale Verknüpfung

Die Digitalisierung bietet die Möglichkeit, sowohl Frisch- und Abwasserströme als auch Prozess-Teilströme in Hin-

blick auf Quantität und chemisch/biologische Qualität engmaschiger und zielgerichteter zu überwachen. Durch eine direkte Rückkopplung mit der Anlagentechnik kann dann sichergestellt werden, dass Wasser und Abwasser adäquat aufbereitet werden. In der Konsequenz bietet sich hier ein starkes Entwicklungs- und Marktpotenzial für die Entwicklung neuer Sensortechnik und Methoden der dynamischen und bedarfsgerechten Prozesssteuerung (idealerweise online und in Echtzeit).

Diese Vorteile der Digitalisierung lassen sich auch im Zusammenhang mit der Wiederverwendung von Abwässern oder der Reinigung von Abwässern, die neuartige und/oder für die Umwelt schädliche Substanzen, Nährstoffe oder Wertstoffe enthalten (z. B. Spurenstoffe, Rückgewinnung seltener Metalle), nutzen. Auch weitergehende Verknüpfungen wie z. B. die Steuerung der Kühlwasser-einleittemperatur in Abhängigkeit von Gewässerabfluss und -temperatur bei sensiblen Vorflutern sind denkbar.

Effektive Digitalisierung durch Digitalisierung der Planung

Begleitende Voraussetzung für eine effektive Digitalisierung des Monitorings und Betriebs ist die Digitalisierung der Planung (s. Kap. 5.4). Die Integration von Building Information Modeling (BIM) und Geoinformationssystemen (GIS) in Planungsprozesse steht in Deutschland noch am Anfang, wird sich jedoch in den nächsten Jahren rapide etablieren. Durch die digitale Planung können Bau- und Sanierungsmaßnahmen effizienter und präziser durchgeführt und besser nachverfolgt werden. Im Betrieb bleiben die Informationen erhalten und ergeben ein genaueres, integriertes Bild der Situation. Weiterhin können Informationen besser mit Dritten, wie etwa kommunalen Dienstleistern, geteilt werden.

Entwicklung und Etablierung von Prognosetools

Daneben muss die Entwicklung von Prognosetools zum Abwasseraufkommen (Menge, Zusammensetzung, GIS, räumlich klein-/großskalig) und Auswirkungen auf die Abwasserbehandlung (Schlammengen) weiter vorangetrieben werden, damit sich die Wasserwirtschaft auf kommende Anforderungen (demographischer Wandel, Klimawandel-bedingte Veränderungen, unterschiedliche Zeithorizonte, industrielle Entwicklung) vorbereiten kann. Durch eine direkte Interaktion zwischen Produktion und Betriebsmitteln an Standorten bzw. in Industrieparks kann sowohl die Effizienz der Wasser- und Abwasseraufbereitung durch die systematische Bedarfskommunikati-

on und -vormeldung als auch die optimale Integration des urbanen Umfeldes unterstützt werden.

Einführung eines unternehmens- und funktionsübergreifenden Wassermanagements

Auf der Ebene der Prozessleittechnik und IT müssen entsprechende Technologien und Modellierungsinstrumente entwickelt werden, um ein unternehmens- und funktionsübergreifendes Wassermanagement für Industrie und kommunale Ver- und Entsorger zu ermöglichen (s. Kap. 5.4). Dazu gehören zum einen Standards für einen einfachen und sicheren bidirektionalen Datenaustausch zwischen unterschiedlichen technischen Systemen genauso wie die Entwicklung kollaborativer Systeme für das Gesamtsystem der Wasserver- und -entsorgung. Die Digitalisierung über die Schnittstellen Produktion – industrielles Wassermanagement – Hydrosphäre/Kommunen hinweg wird nicht als komplexes Gesamtsystem, sondern als kollaborative Einzelsysteme realisiert werden. Diese Strategie bietet sich auch für komplexe Szenarien in den jeweiligen Bereichen an.

Durch die Weiterentwicklung von Ansätzen für das integrierte Engineering von Wasser- und Abwasseranlagen zu Lösungen für den integrierten Betrieb lassen sich zusätzliche Effizienzpotenziale erschließen.



Abb. 6.8: Assistenzsysteme analysieren die Daten und generieren daraus wertschöpfende Informationen, die den Anlagenbetreiber bei der Prozessoptimierung und Instandhaltung unterstützt, dies erfordert auch eine Anpassung von Ausbildungsprofilen

Anpassung von Ausbildungsprofilen für die grundlegende Unterstützung des Paradigmenwechsels

Da in vielen Unternehmen der Wasserwirtschaft aktuell ein Generationenwechsel im Bereich der Mitarbeiter stattfindet, muss auch sichergestellt sein, dass die neuen Technologien sowohl bei Entscheidern als auch bei Betriebs- und Instandhaltungsteams akzeptiert und genutzt werden. Daher müssen zum einen Ausbildungsprofile erweitert und angepasst werden, zum anderen aber auch Lösungen für eine wirkungsvolle Unterstützung der Mitarbeiter entwickelt und implementiert werden. Neben der Erweiterung von SCADA¹⁵- und Prozessleitsystemen stehen dabei auch neue Ansätze im Fokus, wie etwa die Unterstützung der Arbeiten in der Anlage durch Virtuelle Realität und intelligente Assistenzsysteme, die anhand umfangreicher Datenbanken und fortschrittlicher Algorithmen konkrete Handlungsempfehlungen geben können.

Änderung etablierter Strukturen und Technologien

Die Digitalisierung in der Wasserwirtschaft wird auf praktisch allen Ebenen und Funktionsbereichen dazu führen, dass etablierte Strukturen und Technologien verändert und erweitert werden. Damit diese Veränderungen von den Verantwortlichen als Chance begriffen werden, müssen nicht zuletzt auch die Verbände und Gremien die horizontale

Integration der industriellen Wasserwirtschaft mit dem Wasserressourcenmanagement und der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft aktiv begleiten, um mögliche Vorbehalte zu Risiken und Kosten abzubauen. Nur wenn Planer, Anlagenbetreiber und Industrie gemeinsam die notwendigen Projekte vorantreiben, kann die Wasserwirtschaft von den Vorteilen der Vernetzung von Prozessen profitieren: mehr Flexibilität und Effizienz bei der Aufbereitung, eine noch bessere Einhaltung von Grenzwerten und eine nachhaltigere Bewirtschaftung von natürlichen Ressourcen.

7 Perspektiven der Digitalisierung

7.1 Einleitung

Mit der Unterteilung in die industrielle Wasserwirtschaft, ihrer Vernetzung mit der Produktion, sowie mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement werden in diesem Positionspapier die Potenziale, die Barrieren und der Handlungsbedarf der Digitalisierung aufgezeigt.

Für alle drei Bereiche ist die Abstimmung der unterschiedlichen Innovations- und Implementierungsgeschwindigkeiten in den Kernbereichen Informationstechnologien, Anlagenbau, Infrastruktur, Aus-/Weiterbildung und Organisationsstrukturen der Schlüssel für eine Realisierung der im folgenden skizzierten Perspektiven. Wesentlicher Bestandteil ist die Konzentration auf die Bedürfnisse und Möglichkeiten der Menschen, die diese Systeme entwickeln, bedienen und nutzen.

Die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft, gemeinsam mit der Integration von Produktion, kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement wird vielfältige, positive Impulse geben. Sie wird den Export von Technologien, Ausrüstungen, Ingenieur- und anderer Dienstleistungen rund um die Wassertechnik verstärken. Gleichzeitig wird sie die Wettbewerbsfähigkeit der wassernutzenden Industrie verbessern. Insgesamt führt dies zu einer Stärkung beider Bereiche in den kompetitiven, internationalen Märkten.

Die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft wird zu einer nachhaltigen Wassernutzung und der Umsetzung der Sustainable Development Goals, besonders der Ziele „Clean Water and Sanitation“ (Nr. 6), „Industry, Innovation and Infrastructure“ (Nr. 9) und „Responsible Consumption and Production“ (Nr. 12) beitragen. Darüber hinaus wird sie zukunftsfähige und kreative Arbeitsplätze bieten.

7.2 Perspektiven in der industriellen Wasserwirtschaft

In naher Zukunft werden in der industriellen Wasserwirtschaft die bereits für die Prozessindustrie entwickelten und zukünftig zu entwickelnden Tools übernommen, angepasst und angewandt werden. Darüber hinaus werden

spezielle Entwicklungen für das Wassermanagement realisiert werden, angefangen bei der Sensorentwicklung über die genaue Anpassung des Anlagenbetriebs an die Erfordernisse aus Produktion und Einleitbedingungen bis hin zur für die speziellen Erfordernisse maßgeschneiderten Auslegung und Errichtung von Neuanlagen.

Mittelfristig werden Entwicklungen greifen, die zwar schon bald realisierbar wären, deren Konsequenzen vor ihrer Implementierung zunächst auf politischer, juristischer und gesellschaftlicher Ebene zu regeln sein werden. Hierzu zählen beispielsweise Fragestellungen in Bezug auf Verantwortung, Arbeitsbedingungen und Datenschutz.

Schließlich werden das industrielle Wassermanagement und der Prozessbetrieb eine Einheit bilden und das Optimum aus den Randbedingungen aller beteiligten Prozesse erreichen und sich gegenseitig beeinflussen.

Die Digitalisierung wird über die gesamte Lebensdauer einer Anlage wesentliche Verbesserungen in Bezug auf Kosteneinsparung, Personalentlastung, Anlagenperformance, Grenzwerteinhaltung und Ressourcenschonung bringen.

7.3 Perspektiven in der Interaktion mit der industriellen Produktion

Durch Umsetzung der Potenziale der Digitalisierung der industriellen Wasserwirtschaft in der horizontalen Integration mit Herstellungsprozessen werden zukünftig flexible, vernetzte Wasserstrukturen erzeugt. Sie werden betriebsintern und betriebsübergreifend weitgehend automatisiert und adaptiv auf wechselnde Anforderungen hinsichtlich Wasserqualitäten und Wasservolumenströmen reagieren können. Just-in-time-Situationen der Produktion können unmittelbar von den vernetzten, peripheren Anlagen der industriellen Wasserwirtschaft erfasst werden. Durch einheitliche Formate für Datenaustausch und durchgängige Datenplattformen im Zusammenspiel mit adaptiver Hardware und fortschrittlichen Sensorlösungen steigt zunächst unmittelbar die Transparenz der Prozesse für Akteure aus der Bereitstellung der Betriebsmittel und der Produktion. Dies führt zu einem besseren Verständnis des Zusammenspiels unterschiedlicher Grundoperationen im Produktionsverbund und mittelbar

zu einer erhöhten Effizienz der vor- und nachgelagerten Wasseraufbereitungs- und behandlungsverfahren. Damit werden kurz- und mittelfristig zunehmend bessere Umweltstandards bei reduzierten Kosten sowie erhöhter Produktionssicherheit und -qualität erreicht.

Durch die Implementierung fortschrittlicher Mensch-Maschine-Schnittstellen, intuitiver Bedienoberflächen und auf Virtueller Realität basierter Schulungsinhalte wird die vernetzte Struktur *Industriewasser 4.0* für die Bediener in ihrer Komplexität verständlich und im betrieblichen Alltag steuerbar. Die Entwicklungsgeschwindigkeit der Digitalisierungslösungen führt dazu, dass nur kontinuierliche Fortbildung des Betriebspersonals die langfristige Tragfähigkeit der gewählten Lösungen sichert. Lebenslanges Lernen aller Beteiligten wird zu einer Notwendigkeit im betrieblichen Alltag. Anlagenerweiterungen und -neubauten werden durch das vertiefte Prozessverständnis mit Hilfe von Planungstools, die auf digitalen Anwendungslösungen basieren, beschleunigt und nachvollziehbar. Produktion und Prozesswasserbehandlung werden als funktionelle Einheit geplant und ausgeführt. Höhere Flexibilität der Wassertechnologie wird tendenziell zu kleineren funktionellen Einheiten führen, die in ihrem modularen Aufbau einem stetigen Wechsel parallel zu den Produktionsprozessen unterworfen sind.

7.4 Perspektiven in der Interaktion mit kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement

Wasserressourcen schonen, Energieverbräuche optimieren, Wasserverluste vermeiden, Überflutungen verhindern sowie vorausschauende Wartung und Instandhaltung - die Herausforderungen in der industriellen und kommunalen Wasserwirtschaft sind hoch. Und sie werden sich mit dem Trend zur Urbanisierung und mit der Energiewende weiter verschärfen. Integrierte digitale Lösungen können einen großen Beitrag dazu leisten, diese Anforderungen zu meistern und eine hohe Versorgungssicherheit für alle Wassernutzer zu gewährleisten.

Die intelligente Verknüpfung von Daten aus unterschiedlichen Quellen, wie z. B. von Sensoren, Wasserverbrauchszählern oder Wetterdaten, schafft neue Möglichkeiten, die Ressource Wasser in Industrie und im kommunalen Bereich effizienter zu nutzen und somit die Nachhaltigkeit zu fördern. Grundlegende Voraussetzung dafür: Die durchgängige Vernetzung vom Anlagenengineering über die Inbetriebnahme, den Betrieb, die Instandhaltung und die laufende Optimierung der Prozesse auf Basis einer

Datenplattform. Die voranschreitende Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft und der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft ermöglicht darüber hinaus eine intelligente Interaktion beider Sektoren miteinander.

Die Wasserwirtschaft der Zukunft arbeitet smart, energieeffizient und vernetzt, auch über die Sektorengrenzen hinaus. Vernetzte, intelligente Systeme tragen dazu bei, Energie besser zu nutzen, unnötige Wasserverluste zu vermeiden, die Nutzung natürlicher Wasserressourcen zu minimieren und die strikter werdenden Regularien national und international weiterhin sicher einzuhalten. Der Schutz der natürlichen Wasserressourcen kann damit sowohl national als auch international nachhaltig verbessert werden.

8 Zusammenfassung

Anlass

Wasser ist ein entscheidender Produktionsfaktor für die Industrie. Während die Digitalisierung in der industriellen Produktion und der Prozessindustrie sowohl national als *Industrie 4.0* wie auch international schnell fortschreitet, hat der Digitalisierungsgrad in der Wasserwirtschaft in Form von *Wasser 4.0* noch kein vergleichbares Niveau erreicht. Durch die enge Vernetzung mit der Produktion ist die industrielle Wasserwirtschaft gefordert, kurzfristig Digitalisierungskonzepte zu entwickeln und umzusetzen.

Aus diesem Grund hat die DECHEMA mit ihrer engen Verknüpfung zur Prozessindustrie das Thema Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft unter dem Begriff „*Industriewasser 4.0*“ aufgegriffen und das vorliegende Positionspapier initiiert.

Industriewasser 4.0

Aus Sicht einer integrierten industriellen Wasserwirtschaft^[1] verbindet *Industriewasser 4.0* die Ansätze von *Industrie 4.0* und *Wasser 4.0* über drei Handlungsfelder mit den entsprechenden Schnittstellen:

1. Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft
2. Digitale Vernetzung der industriellen Wasserwirtschaft mit der industriellen Produktion
3. Digitale Verknüpfung der industriellen Wasserwirtschaft mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement

Bei allen drei Sektoren stehen die Abhängigkeiten und die gegenseitige Beeinflussung untereinander auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten industriellen Wasserwirtschaft bei gleichzeitiger Sicherung aller Bedarfe im Vordergrund.

Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft

Die Integration aller Hierarchieebenen bei der Industriellen Wassertechnik, vom Sensor im Feld, über die Steuerungs- und Bedienungsebene, die Management- und Controlling-Ebene bis hin zur Modellierung und Simulation im Netz oder der Cloud durch autonome, sogenannte Cyber-Physische Produktionssysteme (CPPS) wird als vertikale Integration der industriellen Wasserwirtschaft verstanden.

Die Herausforderung der Zukunft ist es, diese Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft so zu verankern, dass die Wasser- und Abwasserbehandlungsanlagen zu adaptiven, mit ihrer Umgebung interagierenden Systemen werden. Darüber hinaus müssen sie sich selbstständig anpassen können, um ihr Leistungsniveau zu erhöhen oder flexibel und autonom auf vorhergesehene und unvorhergesehene Ereignisse und Bedingungen zu reagieren, ohne ihre Leistungsfähigkeit zu verringern.

Digitale Vernetzung mit der industriellen Produktion

Die industrielle Wasserwirtschaft ist mit ihrer Wasserbereitstellung eng mit den Anforderungen aus Produktionsprozessen verknüpft. Die Digitalisierung der industriellen Produktion als *Industrie 4.0* und die damit einhergehende, zunehmende Flexibilisierung erfordern daher auch in der industriellen Wasserwirtschaft eine erhöhte Anpassungsfähigkeit an die Schnittstellen: der Wasserbereitstellung und der Abwasserbehandlung sowie der Verknüpfung durch Recycling und Kaskadennutzung. Diese Anpassungsfähigkeit an die Produktion beinhaltet sowohl eine zeitliche Komponente (im Sinne von Reaktionszeiten auf sich ändernde Randbedingungen) als auch eine Verfahrens- und Qualitätskomponente (im Sinne einer Adaption von Reinigungsverfahren auf wechselnde Anforderungen).

Interaktion mit kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement

Das industrielle Wassermanagement kann nur in Wechselwirkung mit seinem externen Wasserumfeld agieren. Dies sind vor allem die kommunale (Ab-)Wasserwirtschaft und natürliche Wasserressourcen (Grund- und Oberflächenwässer) in Form des Wasserressourcenmanagements, meist vertreten durch Fach- und Vollzugsbehörden. In dem Maße, in dem in der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft mit *Wasser 4.0* die Digitalisierung voranschreitet, entstehen an den Schnittstellen zwischen Kommunen und Industrie neue Anforderungen vor allem bei der Optimierung von Informationsströmen. Für Standorte, an welchen natürliche Wasserressourcen Bestandteil des Wassermanagements sind, wird die Digitalisierung künftig zunehmende Bedeutung für die Informationsschnittstelle zu den Genehmigungs- und Vollzugsbehörden im Rahmen von Überwachung und Compliance erhalten.

8.1 Potenziale

Die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft ermöglicht die Nutzung vielfältiger Potenziale. Sie reichen von ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Aspekten über Versorgungs- und Produktionssicherheit bis hin zu Kreislaufwirtschaft und Green Economy.

Ökonomisch und ökologisch optimierte industrielle Wasserwirtschaft

- Selbstlernende Steuerungen bewältigen unvorhergesehene Zustände
- Reaktionszeiten verkürzen sich durch frühzeitige Reaktion auf Produktionswechsel
- Echtzeitmonitoring von Wassermengen und -qualitäten ermöglicht Frühwarnsysteme

Erhöhung der Wasserversorgungs- und Entsorgungssicherheit

- Modellbasierte Optimierungssysteme erlauben bedarfsgerechten Anlagenbetrieb bei flexiblen Rahmenbedingungen

Bedarfsgerechte dynamische Fahrweise von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen in Abhängigkeit von Produktionsprozessen

- Online-Sensorik schafft die Basis für Verfügbarkeit aller Prozessdaten in Echtzeit
- Transparenz des Anlagenbetriebs erhöht sich durch Datenverfügbarkeit
- Die Prozesswasserbehandlung reagiert flexibel auf Produktionsänderungen
- Rückkopplung zur Produktion führt zum Ausschöpfen des maximalen Produktionspotenzials

Erhöhung der Ausfallsicherheit von Betriebsmitteln und Produktionsanlagen

- Simulationsgestützte Optimierung und prädikative Zustandsüberwachung der Einzelkomponenten bis hin zum Industriellen Internet der Dinge ermöglichen höhere Verfügbarkeit, Leistung und Lebensdauer von Anlagen

Optimierte Planungsinstrumente und durchgängige Anlagenbegleitung über den Lebenszyklus

- Investitionskosten lassen sich durch optimierte simulationsgestützte Anlagenauslegung unter Nutzung umfangreicher Betriebsdaten minimieren
- Virtuelle Inbetriebsetzung führt zu Kosteneinsparungen
- Anlagendesign wird an veränderte Zulaufcharakteristika effizient angepasst

Aus- und Weiterbildung sowie Know-how Management

- Einbeziehen von Expertenwissen erhöht die Anlagenleistung und unterstützt Betreiber
- Die Einarbeitung von Personal kann durch Modellsysteme (digitale Zwillinge) wirksam unterstützt werden

Wirksamer Schutz aquatischer Ökosysteme

- Steigende Qualitätsanforderungen und flexible technische Lösungen erhöhen weiter den Schutz von Grund- und Oberflächenwasser

Beitrag zu Ressourceneffizienz, Kreislaufwirtschaft und Green Economy

- Wasserwirtschaft passt sich demographischem, strukturellem und klimatischem Wandel an

8.2 Barrieren

Um die Potenziale der Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft erschließen zu können, müssen die entsprechenden Barrieren und Herausforderungen identifiziert und nachfolgend abgebaut oder zumindest gezielt reduziert werden. Sie berühren alle Felder im Kontext der Digitalisierung, von den technisch-wirtschaftlichen bis zu den sozialen, rechtlichen und beschäftigungspolitischen Aspekten.

Erweiterte Verarbeitung und Nutzung von Messdaten

- Unterschiedliche Digitalisierungsformate und -grade verhindern die Nutzung von Messdaten in Modellen

Modellierung und Simulation als Prognose- und Steuerungsinstrumente

- Modellierungs- und Simulationswerkzeuge sind als Prognose- und Steuerungsinstrumente nicht ausreichend akzeptiert
- Unzureichende Netzwerkssicherheit bewirkt mangelnde Akzeptanz

Digitalisierung bestehender Wasserbehandlungsanlagen

- Daten sind nicht harmonisiert und stehen z.T. nicht digital zur Verfügung
- Investitionen sind kurzfristig nicht wirtschaftlich und komplex
- Nachweis der Kostenreduktion durch Digitalisierung ist aufwändig

Interoperable Schnittstellen und Informationsmodelle mit der Digitalisierung in der industriellen Produktion

- Simulations- und Modellierungswerkzeuge sind weder durchgängig verfügbar noch integriert
- Organisationseinheiten im Unternehmen werden abhängiger voneinander
- Komplexität der entstehenden Systeme führt zu langen Anlaufzeiten, verbunden mit erheblichen Investitions- und Personalkosten

Schnittstellen mit der Digitalisierung in der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft und dem Wasserressourcenmanagement

- Integration mit der kommunalen (Ab-)Wasserwirtschaft erfordert eine Vernetzung zwischen realen und virtuellen Wassersystemen
- Unterschiede bei Entwicklungsstand und -geschwindigkeit im industriellen und im kommunalen Bereich sowie im Wasserressourcenmanagement

Sicherheit Cyber-Physischer Produktionssysteme (CPPS)

- Daten- und IT-Sicherheit sind lückenhaft
- Unzureichende Rahmenbedingen für Informationsaustausch zwischen CPPS der Produktion und industriellen Wasserwirtschaft

Rechtliche und Haftungsfragen an Schnittstellen bei zunehmender Vernetzung

- Neu auftretende rechtliche Fragestellungen sind noch ungeklärt
- Einleitgrenzwerte für kommunales und industrielles Abwasser sind uneinheitlich

Organisationstrukturen, Kommunikation, Aus- und Weiterbildung

- Eine eindeutige Definition des Integrations-/Optimierungsziels ist aufwändig
- Personal, betriebliche Organisationsformen und Verantwortlichkeitsstrukturen sind nicht an eine digitale Umwelt angepasst
- Die Anforderungen an Bedienpersonal und Organisationsstruktur steigen in Bezug auf Flexibilität, Lernbereitschaft und Verständnis des Gesamtprozesses

8.3 Handlungsbedarf

Auf Basis der Potenziale und Barrieren wurde der Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft identifiziert. Dieser umfasst sowohl technische Bereiche als auch die Personalentwicklung und rechtliche Aufgabenstellungen.

<p>Digitalisierung des Betriebs</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitalisierung der Planung und Inbetriebnahme zur Reduzierung der Investitionskosten • Nutzung von Data Mining für bessere und vorhersehbare Instandsetzung • Betriebliche und überbetriebliche Abläufe sind zu einem durchgängigen und fachdisziplinübergreifenden System zu entwickeln • Modulare und flexible Abwasserbehandlungstechnik ist zur bedarfsgerechten Auslastung der Anlagenkapazitäten zu entwickeln • Schnellere und effizientere Prozessabläufe erfordern die Etablierung des Industriellen Internet der Dinge (Industrial Internet of Things) in der industriellen Wasserwirtschaft
<p>Neu- und Weiterentwicklung der Sensortechnik</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensorentwicklungen ermöglichen eine bessere Erfassung komplexer Zustände und Prozesse • Entwicklung von Sensoren, Datenerfassung und Maschinelles Lernen bilden die Grundlage für prädiktive Aussagen in Echtzeit
<p>Funktionsübergreifende Modellierung und Steuerung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Digitale Verknüpfung erleichtert die Vorhersagbarkeit und Optimierung der systemischen Leistung von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen und des Wasserressourcenmanagements • Prognosetools zum Abwasseraufkommen steigern die Effizienz und Interaktion • Dynamische Fahrweise erhöht die Effizienz von (Ab-)Wasserbehandlungsanlagen • Modellierungsinstrumente führen zu einem unternehmens- und funktionsübergreifenden Wassermanagement
<p>Personalentwicklung und -unterstützung</p> <ul style="list-style-type: none"> • Virtuelle Realität Darstellungen und intuitive Mensch-Maschinen-Schnittstellen erleichtern die Bedienbarkeit • Plug-and-Work-Lösungen vermindern den Integrationsaufwand • Anpassung von Aus- und Weiterbildungsprofilen unterstützen grundlegend den Paradigmenwechsel zu <i>Industriewasser 4.0</i> • Eine Änderung etablierter Strukturen ist hierfür erforderlich
<p>Klärung rechtlicher Fragestellungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch die Digitalisierung geänderte Rahmenbedingungen erfordern rechtliche Regelungen
<p>Demonstration</p> <ul style="list-style-type: none"> • Realisierung von Demonstrationsstandorten (Referenzprojekte) für die Handlungsfelder industrielle Wassertechnik – industrielle Produktion – kommunale (Ab-)Wasserwirtschaft/Wasserressourcenmanagement

8.4 Perspektiven

In der industriellen Wasserwirtschaft werden für die Industrie entwickelte und künftige Tools der Digitalisierung übernommen, weiterentwickelt und angewandt werden. Darüber hinaus werden spezielle Lösungen für das integrierte industrielle Wassermanagement realisiert werden.

Durch die horizontale Integration der industriellen Wasserwirtschaft mit der industriellen Produktion werden zukünftig flexible, vernetzte Wassermanagementstrukturen erzeugt. Wichtiger Bestandteil wird dabei ein dynamisch arbeitendes integriertes Wassermanagement sein.

Die steigende Vernetzung von industrieller Wasserwirtschaft, kommunaler (Ab-)Wasserwirtschaft und Wasserressourcenmanagement wird eine hohe Versorgungssicherheit für alle Wassernutzer, gewährleisten. Gleichzeitig wird sie, besonders bei kompetitiven Nutzungsszenarien, den nachhaltigen Umgang mit natürlichen Wasserressourcen weiter stärken.

Die Gestaltung und Implementierung der Digitalisierung in Form des *Industriewasser 4.0* Ansatzes wird darüber hinaus vielfältige, positive Impulse geben. Sie wird den Export von Technologien, Ausrüstungen, Ingenieur- und anderen Dienstleistungen rund um die Wassertechnik steigern. Gleichzeitig bietet sie integrierte Lösungen, welche die Wettbewerbsfähigkeit der wassernutzenden Industrie durch steigende Wassereffizienz und Produktionssicherheit verbessern. Insgesamt führt *Industriewasser 4.0* zu einer Stärkung beider Sektoren - national und in den kompetitiven, internationalen Märkten.

Über den *Industriewasser 4.0* Ansatz wird die Digitalisierung in der industriellen Wasserwirtschaft insgesamt zu einer nachhaltigen Wassernutzung und der Umsetzung der Sustainable Development Goals, besonders der Ziele „Clean Water and Sanitation“ (Nr. 6), „Industry, Innovation and Infrastructure“ (Nr. 9) und „Responsible Consumption and Production“ (Nr. 12) beitragen.

IMPRESSUM

Autoren

Dr. Angela Ante	SMS group GmbH, Hilchenbach
Dr. Helmut Bennemann	Bayer AG, Bergkamen
Dr.-Ing. Christoph Blöcher	Covestro Deutschland AG, Leverkusen
Prof. Dr.-Ing. Markus Engelhart	Technische Universität Darmstadt
Dr.-Ing. Bernd Fitzke	Wehrle-Umwelt GmbH, Emmendingen
Prof. Dr.-Ing. Sven-Uwe Geißen	Technische Universität Berlin
Prof. Dr. Manfred Hauswirth	Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS, Berlin
Dr.-Ing. Matthias Kozariszczyk	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf
Dr.-Ing. Johannes Leonhäuser	Bayer AG, Dormagen
Dr.-Ing. Elmar Rother	Evonik Industries AG, Hanau
Dr.-Ing. Gerd Sagawe	EnviroChemie GmbH, Roßdorf
Dr.-Ing. Ursula Schließmann	Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB, Stuttgart
Dr. Thomas Track	DECHEMA e.V., Frankfurt am Main
Dr.-Ing. Alexander Willner	Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS, Berlin
Dipl.-Ing. Christian Ziemer	Siemens AG, Nürnberg

Herausgeber



Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main
Tel.: +49 69 7564-0
Fax: 49 69 7564-201
E-Mail: info@dechema.de

Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.
Dr. Thomas Track
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt am Main

Gestaltung/Satz

PM-GrafikDesign
Peter Mück, Wächtersbach

Erschienen im Mai 2018

ISBN: 978-3-89746-210-6

Bildnachweise

© Bildcollage Titelseite: Bildteile v.l. © red150770 - stock.adobe.com; © navintar - stock.adobe.com
© EnviroChemie GmbH: Abb. 4.8, Abb. 5.4
© Siemens AG: Abb. 4.6, Abb. 4.7, Abb. 5.2, Abb. 6.2, Abb. 6.3, Abb. 6.4, Abb. 6.5, Abb. 6.6, Abb. 6.7, Abb. 6.8
© SMS group: Abb. 4.2, Abb. 4.3, Abb. 4.4, Abb. 4.5 (angepasst)
© TU Berlin: Abb. 5.3

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