



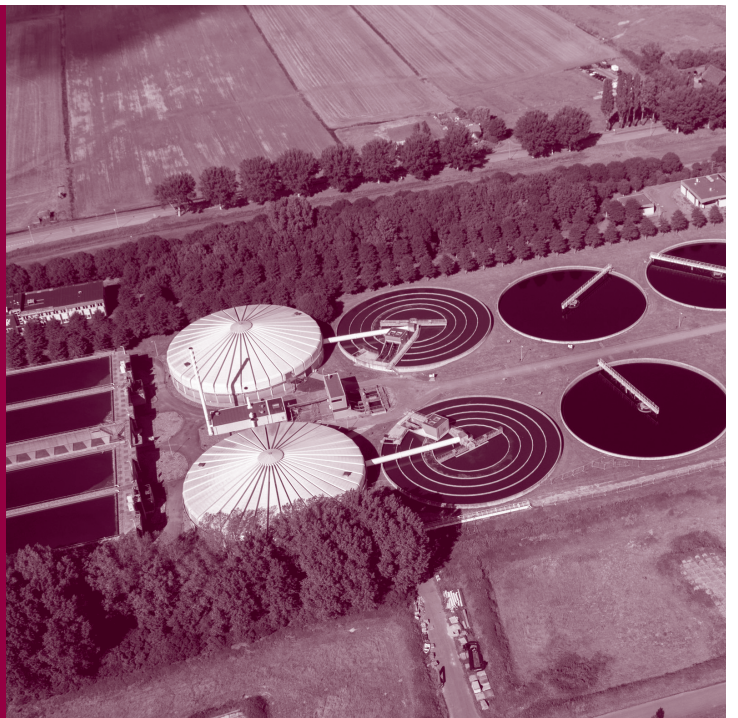
BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG

Pauline Riousset
Saskia Steiger
Claudio Caviezel

Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft

Endbericht zum TA-Projekt

September 2023
Arbeitsbericht Nr. 205





Pauline Rioussel
Saskia Steiger
Claudio Caviezel

Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft

Endbericht zum TA-Projekt



Büro für Technikfolgen-Abschätzung
beim Deutschen Bundestag
Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de

2023

Umschlagbild: jvdwolf/123RF

ISSN-Internet: 2364-2602

Das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) berät das Parlament und seine Ausschüsse in Fragen des wissenschaftlich-technischen Wandels. Das TAB wird seit 1990 vom Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) betrieben. Hierbei kooperiert es seit September 2013 mit dem IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gGmbH sowie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH.



Inhalt

Zusammenfassung	7
1 Einleitung	39
2 Thematische und begriffliche Einführung	43
2.2 Digitalisierung als kontinuierlicher Prozess	43
2.3 Wasser- und Abfallwirtschaft als Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge	45
2.4 Kritische Infrastrukturen in Deutschland	46
2.4.1 Anfänge des Politikfeldes zum Schutz Kritischer Infrastrukturen	46
2.4.2 Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen	48
2.4.3 Schutz der Kritischen Infrastrukturen als öffentlich-private Kooperation – UP KRITIS	48
2.4.4 Schutz Kritischer Infrastrukturen in der Gesetzgebung des Bundes	49
2.4.5 Festlegung der Kritischen Infrastrukturen	50
2.4.6 Ausblick	52
3 Abfallwirtschaft	53
3.1 Ziele, Aufgaben und Herausforderungen	53
3.1.1 Ziele der Abfallwirtschaft	53
3.1.2 Deutsches Abfallrecht	54
3.1.3 Zentrale Aufgabenbereiche der öRE	59
3.1.4 Marktwirtschaftliche Strukturen	62
3.1.5 Herausforderungen und Perspektiven der Digitalisierung	63
3.2 Stand und Perspektiven	64
3.2.1 Abfallerfassung und Transport	65
3.2.2 Abfallbehandlungsanlagen und -maschinen	77
3.2.3 Verwaltung und Planungsprozesse	86
3.2.4 Zwischenfazit	93
3.3 Potenziale und Grenzen	94
3.3.1 Betriebs- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen	94



3.3.2	Auswirkungen auf Beschäftigung und Arbeitsbedingungen	99
3.3.3	Ökologische Auswirkungen	101
3.3.4	Entsorgungssicherheit	105
3.3.5	Zwischenfazit	106
3.4	Handlungsfelder	107
4	Wasserwirtschaft	117
4.1	Ziele, Aufgaben und Herausforderungen der Wasserwirtschaft	118
4.1.1	Ziele der Wasserwirtschaft	118
4.1.2	Wasserrecht	119
4.1.3	Zentrale Aufgabenbereiche der Wasserwirtschaft	123
4.1.4	Organisation	126
4.1.5	Aktuelle Herausforderungen	127
4.2	Digitalisierung der Wasserwirtschaft: technischer Stand und Entwicklungstrends	132
4.2.1	Automatisierungs- und Prozessleittechnik	135
4.2.2	Sensorik	142
4.2.3	Datenübertragung	149
4.2.4	Datenspeicherung und -verarbeitung	150
4.2.5	Simulations- und Prognosewerkzeuge	153
4.2.6	Verknüpfung und Auswertung von bereichs- und unternehmensübergreifenden Daten	156
4.3	Anwendungsfelder und Potenziale	163
4.3.1	Wassergewinnung und -aufbereitung	164
4.3.2	Wasserverteilung	168
4.3.3	Abwasserableitung und -reinigung	174
4.3.4	Verwaltung und Kundenservice	181
4.3.5	Voraussetzungen zur Erschließung von Digitalisierungspotenzialen	184
4.3.6	Zwischenfazit	186
4.4	Nutzen der Digitalisierung für die Störungs- und Krisenbewältigung	188
4.4.1	Fallstudie: Metropolregion Berlin-Brandenburg	189
4.4.2	Aktuelle Nutzung von digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen	190
4.4.3	Potenzieller Nutzen künftiger digitaler Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen	195



4.4.4	Bedeutung menschlicher Erfahrung in Ausnahmesituationen	199
4.4.5	Zwischenfazit	202
4.5	Handlungsfelder	203
5	Implikationen der Digitalisierung für die Informationssicherheit	217
5.1	Gefährdungen der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft	218
5.1.1	Eigenschaften von IT-Systemen der Wasserwirtschaft	219
5.1.2	Typische Gefährdungen der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft und Auswirkungen der Digitalisierung	222
5.1.3	Aktuelle Bedrohungslage für Kritische Infrastrukturen und speziell für die Wasserwirtschaft	238
5.2	Regulatorische Grundlagen zur Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft	243
5.2.1	Deutsches Wasserrecht	243
5.2.2	Gesetzgebung zum Schutz der Kritischen Infrastrukturen	245
5.2.3	Europäisches Recht	252
5.2.4	Regelwerke, Normen und Empfehlungen zur Informationssicherheit	254
5.2.5	Zwischenfazit und Ausblick	261
5.3	Unterstützungsangebote durch staatliche Stellen oder privatwirtschaftliche Organisationen	262
5.3.1	UP KRITIS	262
5.3.2	Allianz für Cybersicherheit	263
5.3.3	Cyber-Sicherheitsnetzwerk	263
5.3.4	Dienstleistungen des BSI	264
5.3.5	Informations- und Beratungsangebote von Landesbehörden	264
5.3.6	Informations-, Schulungs- und Beratungsangebote von Verbänden	265
5.3.7	CERT@VDE	265
5.3.8	Kompetenzzentrum Digitale Wasserwirtschaft	266
5.3.9	Zwischenfazit	266
5.4	Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft	267
5.4.1	KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser von 2015	268



5.4.2	Erkenntnisse für KRITIS-Betreiber aus dem Nachweisverfahren nach § 8a BSIG	270
5.4.3	Qualitative Interviews mit Betreibern und Expert/innen durch Treibert et al. 2021	272
5.4.4	Quantitative Befragung durch Treibert et al. 2021	279
5.4.5	Bestandsaufnahme der Informationssicherheit in kleinen und mittleren Kläranlagen durch Löwen et al. (2023)	298
5.4.6	Zwischenfazit	301
5.5	Handlungsfelder	303
6	Schlussbemerkung	315
7	Literatur	321
7.1	In Auftrag gegebene Gutachten	321
7.2	Weitere Literatur	321
8	Anhang	353
8.1	Abbildungen	353
8.2	Tabellen	354
8.3	Kästen	355

Zusammenfassung

Die Dienstleistungen der Daseinsvorsorge – dazu zählen die Grundversorgung mit Wasser und Energie, die Abwasser- und Abfallentsorgung, aber beispielsweise auch Gesundheitsdienste, Bildung oder die Bereitstellung kultureller Einrichtungen – sind für die gesellschaftliche, wirtschaftliche und kulturelle Entwicklung unverzichtbar. Viele dieser Dienstleistungen bzw. die zu ihrer Erbringung notwendigen Infrastrukturen werden daher auch zu den Kritischen Infrastrukturen gezählt, die als besonders schützenswert gelten. In Deutschland werden die Dienstleistungen der Daseinsvorsorge zumeist durch die Kommunen erbracht. Die Sicherstellung der Daseinsvorsorge stellt Kommunen bzw. die mit der Erfüllung der Aufgaben beauftragten Unternehmen angesichts der Umbrüche etwa durch den Krieg in der Ukraine oder von klimatischen oder demografischen Veränderungen vor wachsende Herausforderungen. Der Digitalisierung wird eine zentrale Rolle zugesprochen, um diesen Herausforderungen zu begegnen. Digitale Technologien ermöglichen nicht nur Effizienz- und Qualitätssteigerungen, sondern eröffnen auch Optionen für intelligente Betriebsweisen, um auf außergewöhnliche Situationen, wie klimabedingte Extremereignisse, besser zu reagieren. Zugleich aber stellt die Digitalisierung Kommunen wegen der hohen Investitionskosten, des nötigen Kompetenzaufbaus und der erhöhten Gefahr durch Cyberangriffe auch vor große Schwierigkeiten.

Vor diesem Hintergrund werden im vorliegenden TAB-Bericht die Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Abfallwirtschaft und der Wasserwirtschaft analysiert.

Thematische und begriffliche Einführung

Der Begriff Digitalisierung wird zumeist unscharf verwendet. In der Abfall- und Wasserwirtschaft wird darunter der Einsatz verschiedener digitaler Technologien verstanden, die einerseits der Automatisierung einzelner Betriebsabläufe durch einfache Wenn-dann-Regeln dienen, andererseits aber auch eine umfassende Vernetzung und Optimierung sämtlicher betrieblicher Aufgaben und Prozesse zum Ziel haben können. Bei der Digitalisierung handelt es sich um einen kontinuierlichen Prozess, der von der Computerisierung ab den 1970er Jahren über die zunehmende Automatisierung einzelner Aufgaben bzw. Prozesse und die Vernetzung einzelner Anwendungen zu größeren Systemen bis hin zur Vision einer *Digitalisierung 4.0* im Sinne eines autonom agierenden Gesamtsystems reicht. Dieses Begriffsverständnis von Digitalisierung liegt dem vorliegenden TAB-Bericht zugrunde.

Wie Leistungen der Daseinsvorsorge zu erbringen sind und welche Rolle die Digitalisierung dabei spielt, können Kommunen überwiegend frei ent-



scheiden. Seit den 1980er Jahren haben die Kommunen die Leistungserbringung in steigendem Maße auf privatrechtliche Akteure übertragen, wobei die Verantwortung für die Aufgabenerfüllung bei den Kommunen verbleibt.

Der Schutz von Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen wurde mit der Verabschiedung der »Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)« im Jahr 2009 als gesamtgesellschaftliche Aufgabe von Staat, Wirtschaft und Öffentlichkeit gefasst. Besondere Bedeutung wurde einer vertrauensvollen und konstruktiven Zusammenarbeit zwischen den staatlichen Stellen und den vielfach privatwirtschaftlich organisierten Betreibern beigemessen. Freiwilligen Selbstverpflichtungen der Wirtschaft wurde daher grundsätzlich Vorrang vor gesetzlichen Regelungen eingeräumt. In Bezug auf den Schutz der IT-Systeme erwies sich der rein freiwillige Ansatz jedoch als nicht ausreichend, um ein angemessenes IT-Sicherheitsniveau in allen KRITIS-Sektoren zu erreichen. 2015 wurde daher das IT-Sicherheitsgesetz¹ verabschiedet, das große Betreiber von Kritischen Infrastrukturen verpflichtet, ihre betriebskritischen IT-Systeme nach dem Stand der Technik abzusichern. Ende 2022 legte die Bundesregierung Eckpunkte für ein KRITIS-Dachgesetz vor, mit dem in Ergänzung zum IT-Sicherheitsgesetz auch der physische Schutz von Kritischen Infrastrukturen gesetzlich geregelt werden soll.

Abfallwirtschaft

Die Digitalisierung wird als notwendig erachtet, um die Ressourcen aus dem Kreislauf zurückzugewinnen und die nationalen und europäischen Ziele der Abfallpolitik zu erreichen. Dennoch tragen nicht alle digitalen Innovationen zu den Klimazielen und zum Ressourcenschutz bei. Nach einer Einführung in die Ziele, Aufgaben und Herausforderungen der Abfallwirtschaft stellt der Bericht den Stand und die Perspektiven digitaler Technologien für den Sektor dar. Auf dieser Grundlage werden die Auswirkungen der Digitalisierung der Abfallwirtschaft auf Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt abgeschätzt und Handlungsfelder für eine bessere Erschließung von Digitalisierungspotenzialen abgeleitet.

Ziele und Aufgaben

Vorrangiges Ziel der Abfallentsorgung in Deutschland ist es, Abfälle sicher und umweltschonend zu entsorgen. Über die Beseitigung der Abfälle hinaus ist die Abfallwirtschaft zunehmend gefordert, die Vermeidung, Verwertung und ordnungsgemäße Entsorgung von Abfällen zu fördern und zu einer Kreislaufwirtschaft beizutragen, um Ressourcen zu schonen, das Klima zu schützen und die Rohstoffversorgung zu sichern. Grundlage dafür bildet die Abfallhierarchie,

¹ IT-Sicherheitsgesetz vom 17.7.2015



wonach die Vermeidung von Abfällen Vorrang hat. Die verbleibenden unvermeidbaren Abfälle sollen prioritär stofflich genutzt, also für eine Wiederverwendung vorbereitet und, falls eine Weiternutzung nicht möglich ist, recycelt werden. Nicht stofflich nutzbare Abfälle sollen energetisch verwertet werden. Letztendlich sollen nur noch Abfälle, die weder stofflich noch energetisch nutzbar sind, beseitigt werden.

Seit 1975 schaffen europäische Vorgaben einen verbindlichen Rahmen für den Umgang mit Abfällen. Diese wurden insbesondere durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)² ins deutsche Recht umgesetzt. Demgemäß sind in Deutschland die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (örE) – in der Regel Landkreise und kreisfreie Städte – grundsätzlich für die Entsorgung aller in ihrem Gebiet anfallenden Siedlungsabfälle zuständig. Davon ausgenommen sind Abfälle, die der Verantwortung der Hersteller unterliegen (z. B. Verpackungen) oder von diesen in Wahrnehmung der Produktverantwortung freiwillig zurückgenommen werden, sowie gewerbliche Abfälle. Teile der Haushaltsabfälle, wie Altkleider oder Altpapier, können auch durch gewerbliche oder gemeinnützige Sammlungen erfasst werden. Dies erfolgt generell allerdings nur, wenn für die gesammelten Abfälle Verwertungserlöse anfallen. Finden die Sammlungen nicht statt, verbleibt die Entsorgungspflicht bei den örE. Dieser Umstand wird kritisiert, da Doppelstrukturen aufgebaut werden und den örE Einnahmen fehlen, die in die Infrastrukturen investiert werden könnten. Sofern es für die Vorbereitung zur Wiederverwendung, zum Recycling oder für andere Verwertungsverfahren erforderlich ist, sind Abfälle nach Art und Beschaffenheit getrennt zu erfassen und zu behandeln.

Die zentralen Aufgabenbereiche der örE liegen in der Abfallerfassung und im Transport, in der Behandlung von Siedlungsabfällen und den dazugehörigen Verwaltungs- und Planungsprozessen (z. B. Auftragsmanagement, Kommunikation mit Bürger/innen). Mit der Erfüllung dieser gesetzlichen Aufgaben können örE private Unternehmen beauftragen.

Stand und Perspektiven der Digitalisierung in der Abfallwirtschaft

Der Digitalisierung werden bei der Weiterentwicklung der Abfallwirtschaft hohe Potenziale für die Etablierung effizienterer Betriebsprozesse und für die Verbesserung der Rückgewinnung von Wertstoffen zugeschrieben, weswegen sie von vielen deutschen Entsorgungsunternehmen als zentrale Zukunftsaufgabe betrachtet wird. Im Vergleich zu anderen Industriebereichen ist der Digitalisierungsgrad der Abfallwirtschaft noch eher gering.

2 Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24.2.2012, zuletzt am 2.3.2023 geändert



Abfallerfassung und -transport

In den Bereichen Abfallerfassung und -transport zählen Datenerfassungsgeräte und Bordcomputer in den Sammelfahrzeugen zu den Standardtechnologien. Sie dienen dazu, Informationen zu Störungen (z. B. nicht bereitgestellte oder falsch befüllte Behälter, Abholhindernisse) papierlos beim Befahren der Sammelrouten zu dokumentieren. Verbreitet sind auch Behälteridentifikationssysteme, mit denen Container während der Sammeltour erkannt und den einzelnen Haushalten bzw. Grundstücken zugeordnet werden können.

Weitere digitale Technologien befinden sich in früheren Anwendungsstadien. Dazu gehören Ident-Wägesysteme am Sammelfahrzeug, mit denen die Gebühren der Abfallsammlung in Abhängigkeit von der Abfallmenge verursachergemäß abgerechnet und einzelnen Haushalten bzw. Grundstücken zugeordnet werden können. Zunehmend werden auch sensorbestückte Behälter eingesetzt. Damit können der Füllstand und die Position der Behälter sowie Auffälligkeiten wie Brand oder Diebstahl aus der Ferne erfasst werden. Mit Sensoren zur Störstoffdetektion am Sammelfahrzeug können Fehlwürfe bzw. in den falschen Behälter geworfene Stoffe automatisch erkannt werden. Allerdings beschränkt sich diese Technologie aktuell im Wesentlichen noch auf die Erkennung von Metallen in Bioabfällen.

Navigations- und Telemetriesysteme dienen dazu, Informationen zur Sammeltour (z. B. Standorte der Sammelfahrzeuge und Behälter, Gewicht und Anzahl der Leerungen) zwischen den Sammelfahrzeugen und der Zentrale auszutauschen, zu analysieren und zu visualisieren, wodurch das Fahrzeugmanagement, die Revier- und Tourenplanung und das Auftragsmanagement optimiert werden können. Solche Systeme sind zunehmend auf dem Markt erhältlich und integrieren multiple Funktionalitäten. Automatisierungstechnologien für den Abfalltransport, wie beispielsweise Fahrassistentensysteme zur Unterstützung beim Einparken, Einhalten der Spur, Rückfahren aus Sackgassen, Beschleunigen und Bremsen, werden bereits in vielen Sammelfahrzeugen eingesetzt. Darüber hinaus gehende Automatisierungs- bzw. Autonomisierungstechnologien (z. B. KI-gestützte Software für autonome Fahrzeuge oder autonome Roboterlösungen zur Abholung von Abfallbehältern) haben die Praxisreife noch nicht erreicht. Dies gilt ebenfalls für Unterflurbehälter mit automatischer Sortierung, Detektion von Störstoffen und mengengerechter Abrechnung, die bisher nur im Rahmen von Pilotprojekten erprobt wurden. Sie könnten in Deutschland perspektivisch insbesondere für verdichtete Siedlungsstrukturen an Bedeutung gewinnen.

Abfallbehandlungsanlagen und -maschinen

Die Abfallwirtschaft befindet sich in Bezug auf die Digitalisierung der Überwachung und Steuerung von Betriebsprozessen im Vergleich zu anderen Sektoren



(z. B. die industrielle Produktion) zwar in einem frühen Stadium, sie könnte aber gerade deswegen von den dort entwickelten Konzepten und gemachten Erfahrungen profitieren.

Die für die Industrie 4.0 typische Vernetzung von Maschinen und Anlagen, die Erhebung großer Mengen an Prozessdaten sowie ihre Analyse spielen heutzutage auch in der Abfallwirtschaft und Recyclingindustrie eine zunehmend wichtige Rolle. In großen Müllverbrennungs- oder Abfallbehandlungsanlagen finden gewöhnlich eine kontinuierliche digitale Prozessüberwachung und -steuerung mithilfe von Prozessleitsystemen statt. Der dadurch ermöglichte optimierte Betrieb trägt zur Reduktion von Treibhausgas- und Schadstoffemissionen bei und verringert den Wartungsaufwand. Durch die Erhebung und Analyse von Daten aus einer Vielzahl von Sensoren soll die Effizienz der Betriebsabläufe weiter gesteigert und das Monitoring von Stoffströmen verbessert werden. Für die Kreislaufwirtschaft bieten digitale Technologien und insbesondere Weiterentwicklungen in den Bereichen Sensorik und Robotik Verbesserungspotenziale für die Sortierung von Wertstoffen. Eine möglichst sortenreine Erfassung und Sortierung von Abfällen sind zentrale Voraussetzungen für ein hochwertiges Recycling ebenso wie für eine effiziente thermische Verwertung. Kombinierte Sensor- und Robotiksysteme sind für die automatische Sortierung von Wertstoffen bereits etabliert (z. B. Sortierung von Leichtverpackungen und Kunststoffen). Derzeit wird an der Optimierung bestehender Systeme gearbeitet, insbesondere zur Erhöhung ihrer Geschwindigkeit und des Erfassungs- und Reinheitsgrads der rückgewonnenen Materialien. Mögliche künftige Anwendungsfelder für Sensorsysteme betreffen die Fremdstoffentfrachtung von Bioabfällen und die Rückgewinnung von Wertstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen. Für Letzteres sowie für die Behandlung von Rostaschen aus der Müllverbrennung und von Wertstoffen aus Deponien wird allerdings ein vergleichsweise geringeres Potenzial der Digitalisierung assoziiert. Dies liegt vor allem am hohen Verunreinigungsgrad vieler verwertbarer Stoffe in diesen Abfallströmen, was ein hochwertiges Recycling erschwert.

Über die Digitalisierung von Prozessen und Aufgaben der öRE hinaus könnten digitale Lösungen dazu beitragen, Informationen über Produkte bzw. Abfälle entlang der Wertschöpfungskette vom Hersteller bis zum Recyclingbetrieb weiterzugeben. Digitale Produktpässe können dazu dienen, die Wiederverwendung zu erleichtern, indem die Kenntnis der Abfallzusammensetzung und der darin enthaltenen Rohstoffe verbessert wird, um so die Abfallbehandlung weiter zu optimieren.

Verwaltung und Planungsprozesse

Viele Aufgabenfelder der internen Organisation sind bereits weitgehend digitalisiert, so etwa die Buchhaltung, das Controlling, die Erstellung von Aufträgen, Angeboten, Gebührenbescheiden und Rechnungen oder die elektronische



Dokumentation von nachweispflichtigen Abfällen. Gleichwohl bieten digitale Lösungen weitere Potenziale für effizientere Abläufe in der internen Organisation und im Auftragsmanagement. Darüber hinaus wird erwartet, dass die Kundenkommunikation mit Bürger/innen immer stärker digitalisiert wird. Ein wichtiges Ziel der Nutzung digitaler Kommunikationstechnologien, wie Kundenportale, soziale Medien oder Apps, ist es, Anreize für die Abfallvermeidung und eine effektivere Sortierung zu setzen. Allerdings sind digitale Lösungen oft zielgruppenspezifisch und manche Anwendungen können auf Akzeptanzprobleme bei bestimmten Nutzergruppen stoßen, sodass sie konventionelle Kommunikationsformen, wie Postwurfsendungen, nicht vollständig ersetzen können. Außerdem wurden in den letzten Jahren digitale Plattformen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft entwickelt. Die bei öRE derzeit am weitesten verbreiteten Modelle sind digitale Plattformen als Tausch- oder Verschenkbörsen, um eine bessere Verwertung gebrauchter Produkte zu erreichen.

Potenziale und Grenzen

Betriebs- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen

Drei Trends prägen die Entwicklung der Abfallwirtschaft: erstens Autonomisierung von Systemen im Sinne einer Fortentwicklung bereits vollzogener Automatisierungsschritte hin zu autonom agierenden Sammel- und Sortiereinheiten, zweitens Vollintegration von Systemen, also die Entwicklung von integrierten Lösungen für Teilsysteme sowohl innerhalb der Abfallsammellogistik als auch zwischen diesem Bereich und der Kundeninteraktion und der Sortierung und drittens erweiterte Kreislaufwirtschaft, die sich nach Expertenmeinung nur durch eine massive Nutzung digitaler Technologien realisieren lässt. Das ökonomische Potenzial der Autonomisierung mit dem Ziel effizienterer Abläufe konnte im Rahmen von Pilotprojekten für einzelne Technologien bereits belegt werden. Die wirtschaftlichen Potenziale der Vollintegration sind hingegen schwerer abzuschätzen; beispielsweise kann eine ganzheitliche Integration von Systemen das Risiko von Abhängigkeiten zu einzelnen Dienstleistern oder Herstellern erhöhen. Durch die politischen Initiativen für eine erweiterte Kreislaufwirtschaft wird vor allem die Intensivierung der Kommunikation der öRE mit ihren Kunden sowie anderen Branchenakteuren angeregt. ÖRE stehen überwiegend am Anfang der Wertschöpfungskette in der Abfallwirtschaft und profitieren wenig vom Absatz von Wertstoffen. Ihre Einkünfte schöpfen sie im Wesentlichen aus der Erhebung von Gebühren. Ein investitionsintensiver Pfad zu mehr Kreislaufwirtschaft durch Digitalisierung müsste daher unter Umständen durch eine veränderte Marktbeteiligung der öRE an den Wertstoffmärkten bzw. eine höhere Marktbeteiligung an der Erfassung, Sortierung und Verwertung von Wertstoffen realisiert werden, um die öffentlichen Ausgaben gegenzufinanzieren.



Auswirkungen auf Beschäftigung und Arbeitsbedingungen

Zurzeit wirken zwei wichtige Faktoren auf die Beschäftigung in der Abfallwirtschaft ein: zum einen die Verschärfung der nationalen Ziele zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft und zum anderen die voranschreitende Digitalisierung. Während die Stärkung der Kreislaufwirtschaft eher mit positiven Beschäftigungseffekten einhergeht, führt die Digitalisierung tendenziell zum Abbau von Arbeitsplätzen. Allerdings können die spezifischen Wirkungen der beiden Faktoren und das Ergebnis ihres Zusammenspiels auf die Beschäftigtenzahl nur schwer auseinandergehalten und abgeschätzt werden. So ist beispielsweise der Bedarf an künftig notwendigen Kompetenzen für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft bislang wenig erforscht. Außerdem finden die Veränderungen in einem Feld mit Fachkräftemangel statt, sodass Automatisierungstechnologien zu den Investitionen gehören, welche die Situation bei voranschreitenden personellen Engpässen entlasten könnten. Die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Arbeitsbedingungen fallen hingegen meist positiv aus. Die Belegschaft wird von schweren körperlichen Arbeiten entlastet und die Lösungen tragen zu einem besseren Umgang mit gefährlichen Abfällen bei. Dennoch gilt, dass die Fachkräfte frühzeitig in die Entwicklung bzw. Auswahl und Einführung von neuen digitalen Technologien einbezogen werden sollten, um deren Akzeptanz und spätere Nutzung zu verbessern.

Ökologische Auswirkungen

Die Digitalisierung hat sowohl positive als auch negative ökologische Auswirkungen. Negative Folgen betreffen den Energie- und Ressourcenverbrauch für die Herstellung und den Betrieb der digitalen Technologien sowie die Erzeugung von Elektroschrott nach ihrer Nutzungsphase. Positive Auswirkungen sind mit Effizienzsteigerungen in der Abfallsammlung, -behandlung und -verwertung sowie mit einer besseren Ressourcennutzung durch eine Kreislaufwirtschaft verbunden. Ob digitale Innovationen sich in der Gesamtbilanz positiv auf den Ressourcenverbrauch und die Umwelt auswirken, lässt sich anhand vorhandener Daten derzeit nur sehr schwer abschätzen. Die größten Potenziale für die Rückgewinnung von Wertstoffen scheinen in der Intensivierung der Kommunikation von öRE mit ihren Kunden (Sensibilisierung für sortenreine Sortierung und Abfallvermeidung) sowie anderen Branchenakteuren (Austausch von Information zur Materialzusammensetzung von Abfällen) zu liegen. Im Sinne der Abfallhierarchie müssen bei der Förderung von Technologien Reboundeffekte (wenn der Einsatz digitaler Technologien mehr Ressourcen und Energie verbraucht, als durch sie eingespart wird) mitbedacht und diejenigen digitalen Technologien bevorzugt werden, die für die Stufen der Abfallhierarchie mit höherer Priorität (insbesondere die Abfallvermeidung und Wiederverwendung) Unterstützung bieten.



Handlungsfelder

Nicht jede Investition in digitale Technologien trägt in gleichem Maß zur Umsetzung der Abfallhierarchie bei, weshalb mögliche Investitionen auf ihren voraussichtlichen diesbezüglichen Nutzen hin evaluiert werden sollten. Es gilt darauf zu achten, dass besonders Investitionen in die Abfallvermeidung und -wiederverwendung bevorzugt werden. Außerdem sollten Fehlinvestitionen sowie ökonomische oder ökologische Reboundeffekte vermieden werden.

Förderliche Rahmenbedingungen schaffen

Um die Potenziale der Digitalisierung für die Abfallwirtschaft zu heben, bedarf es förderlicher Rahmenbedingungen. Folgende Punkte bieten hierfür Ansätze:

- *Stärkere Berücksichtigung der Abfallwirtschaft in Smart-City-Konzepten:* Kommunen könnten künftig eine zentrale Rolle bei der Erfassung und Charakterisierung von Abfällen und deren Zurückführung in die optimale Kaskadennutzung spielen. Wie genau diese Rolle ausgefüllt werden könnte, wäre im Rahmen von Smart-City-Strategien zu erarbeiten.
- *Unterstützung bei der Ausschreibung logistischer und abfallwirtschaftlicher Dienstleistungen:* ÖrE können über öffentliche Ausschreibungen Impulse für die Nutzung digitaler Technologien durch sammelnde Privatunternehmen setzen. Durch die Entwicklung von Leitfäden und Mustervorlagen für entsprechende Ausschreibungen könnten Kommunen durch den Bund hierbei unterstützt werden.
- *Beratungsangebote für örE:* Für die Einführung von digitalen Innovationen brauchen insbesondere kleinere Kommunen und kommunale Betriebe fachliche Unterstützung. Beratungsangebote können hier dazu beitragen, Fehlinvestitionen zu vermeiden sowie etwaige Reboundeffekte durch einen fehlerhaften Einsatz von digitalen Technologien zu verhindern. Existierende Förderprogramme des Bundes für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) wie »go-inno« oder »go-digital« sollten vor diesem Hintergrund fortgeschrieben, ausgebaut und in der Abfallwirtschaft aktiv beworben werden. Darüber hinaus könnten speziell auf die Abfallwirtschaft zugeschnittene Förderprogramme ein Ansatz sein, um durch die Digitalisierung ermöglichte Synergieeffekte der organisationsübergreifenden Zusammenarbeit besser zu nutzen.
- *Interorganisationale und interkommunale Zusammenarbeit:* Um die Kostenlast bei der Einführung und/oder Entwicklung von digitalen Technologien für einzelne Betriebe zu reduzieren, könnten sowohl regionale Verbünde als auch bundesweite Kooperationen unterstützt werden.
- *Zusammenarbeit der Akteure entlang der Wertschöpfungsketten fördern:* Auch wenn der technologische Fortschritt in einzelnen Schritten der Abfall-



wirtschaft zu einer Verbesserung der Kreislaufwirtschaft führt, ergibt sich bei vielen Lösungen erst dann einen Mehrwert, wenn branchenübergreifend mehrere Akteure beteiligt werden. Dazu wäre eine Verbindung der Informationssysteme von öRE mit vorgelagerten Produktions- und Nutzungsschritten erforderlich, um ohne Unterbrechung des Informationsflusses die in Produkten enthaltenen Materialien und ggf. toxischen Stoffe zu dokumentieren. Die Vernetzung von Herstellern und Akteuren der Recyclingwirtschaft würde es ermöglichen, die Perspektive der Entsorgungswirtschaft bereits im Designprozess für neue Produkte besser einfließen zu lassen. Eine Austauschplattform, die der Vernetzung und Zusammenarbeit der Akteure dient, könnte hierfür auf Bundesebene geschaffen werden.

- *Ausbau digitaler Expertise:* Um die Beschäftigten der Abfallwirtschaft mit den nötigen Digitalkompetenzen auszustatten, sind (kontinuierliche) Aus- und Weiterbildungsanstrengungen erforderlich, die durch staatliche Maßnahmen (z. B. Steuervergünstigungen) unterstützt werden können.
- *Kommunikationsinfrastrukturen ausbauen:* Eine schlechte Mobilfunkanbindung bedeutet eine deutliche Einschränkung der Möglichkeiten zur Nutzung digitaler Technologien für Unternehmen der Abfallwirtschaft. Mobilfunknetze sollten daher flächendeckend ausgebaut werden, um die Digitalisierung der Abfallwirtschaft an allen Standorten gleichermaßen zu ermöglichen. Außerdem wäre eine staatliche Förderung des Auf- und Ausbaus von Long Range Wide Area Networks (LoRaWAN) als Alternative zum Mobilfunk an geeigneten Standorten zu prüfen. Die LoRaWAN-Technologie ermöglicht es, über große Areale Kommunikationsverbindungen aufzubauen, um Daten weiträumig und mit geringem Energieaufwand zu übertragen.

Rechtliche Grundlagen anpassen

Einem Einsatz digitaler Systeme stehen häufig Rechtsunsicherheiten entgegen. Eine proaktive Rechtssetzung könnte verlässliche Rahmenbedingungen für Investitionen schaffen. Dazu ist ein intensiver Dialog mit den betroffenen Akteuren der kommunalen Kreislaufwirtschaft und ihren Vertretern beispielsweise zu Anforderungen an abfallwirtschaftliche Infrastrukturen und Produktkennzeichnungen geboten. Außerdem wirft die Anwendung von automatisierten und insbesondere autonomen Systemen oder Maschinen in der Abfallwirtschaft neue Rechtsfragen in den Bereichen Sicherheit und Haftung auf. Um eine Erprobung im laufenden Betrieb zu ermöglichen, könnten regulatorische Freiräume (Sandboxes/Experimentierklauseln) geschaffen werden. Schließlich sind datenschutzrechtliche Aspekte für den Umgang und die Verwendung von Betriebs- und Maschinendaten zu klären, die etwaigen Rückschlüsse auf das Verbrauchs- und Entsorgungsverhalten einzelner Personen zulassen.



Normung und Standardisierung vorantreiben

Um die Verbreitung digitaler Lösungen zu beschleunigen, sind technische Mindestanforderungen regelmäßig zu aktualisieren. Allerdings stellt die hohe Innovationsgeschwindigkeit eine große Herausforderung für die Normierung und Standardisierung dar. Außerdem mangelt es noch vielfach an normierten Schnittstellen für einen reibungslosen Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwaresystemen. Hier gilt es nach Wegen zu suchen, wie der Normierungsprozess durch politische Unterstützung beschleunigt werden könnte.

Wissenslücken schließen

Die Digitalisierung der Abfallwirtschaft ist in einigen Bereichen (z. B. Verwaltungsprozesse) fortgeschritten, in anderen Bereichen bestehen deutliche Forschungs- und Innovationsbedarfe (z. B. bei Sensorsystemen und Robotikanwendungen für die Abfallsammlung und -sortierung oder bei integrierten Telemetrielösungen zur Optimierung der Sammellogistik). Außerdem fehlt es zurzeit an genauen Informationen zur Verbreitung und Nutzung digitaler Technologien in der Abfallwirtschaft. Nicht zuletzt wurden die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Digitalisierung der Abfallwirtschaft bislang kaum erforscht. Die Datenlage dazu ist dringend zu verbessern, um Chancen und Risiken der Digitalisierung Kritischer Infrastrukturen ganzheitlicher beurteilen zu können.

Wasserwirtschaft

Das zweite Fallbeispiel behandelt die Versorgung der Bevölkerung mit hygienisch einwandfreiem Trinkwasser und die Sicherstellung der Abwasserbeseitigung. Auch in der Wasserwirtschaft werden Systeme und Prozesse zunehmend digitalisiert. Nach einer Einführung in die Ziele, Aufgaben und Herausforderungen der Wasserwirtschaft werden der Stand und die Perspektiven digitaler Technologien im Sektor sowie mögliche Anwendungsfelder entlang der Wertschöpfungsstufen der Wasserwirtschaft dargestellt. Zum Schluss werden Handlungsfelder abgeleitet.

Ziele, Aufgaben und Herausforderungen

Kommunen sind verpflichtet, die Versorgung der Allgemeinheit mit Trink- und Brauchwasser sowie die Beseitigung des Abwassers zu organisieren. Hygienisch einwandfreies Trinkwasser jederzeit in ausreichender Menge für die Bevölkerung bereitzustellen, erfordert einen umfassenden Schutz der Wasserressourcen. Dafür müssen wasserwirtschaftliche Betriebe rechtliche Anforderungen und technische Standards einhalten.

Seit 2000 bildet die Richtlinie 2000/60/EG³ (Wasserrahmenrichtlinie) den zentralen ordnungspolitischen Rahmen für Schutz, Bewirtschaftung und Nutzung der Gewässer in Europa. Sie definiert Bewirtschaftungsziele für den chemisch-physikalischen, den biologisch-ökologischen und den mengenmäßigen Zustand der Gewässer. Spezifische Anforderungen an Trinkwasser und kommunales Abwasser sind in der Richtlinie (EU) 2020/2184⁴ (Trinkwasserrichtlinie – Neufassung)] und der Richtlinie 91/271/EWG⁵ (Kommunalabwasserrichtlinie) festgelegt. Konkretisiert und ergänzt werden die europäischen Regelungen im Wasserhaushaltsgesetz (WHG)⁶ und in der Trinkwasserverordnung (TrinkwV)⁷, die Mindestanforderungen an die Qualität des Trinkwassers definieren, sowie in der Abwasserverordnung (AbwV)⁸, die qualitative Vorgaben für die Einleitung von Abwasser in Gewässer macht. Wie bzw. mit welchen technischen und organisatorischen Maßnahmen die Betriebe der Wasserwirtschaft die gesetzlichen Anforderungen einhalten sollen, dazu macht das Wasserrecht keine konkreten Vorgaben. Stattdessen wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik bzw. des Stands der Technik gefordert. Im Zuge der Überarbeitung der Kommunalabwasserrichtlinie schlägt die Europäische Kommission u. a. vor, das Verursacherprinzip zu stärken, nach welchem die Hersteller z. B. von Medikamenten oder Kosmetika an den Kosten der Abwasserreinigung beteiligt werden sollen, was zu einer Verringerung der Schadstoffbelastung beitragen soll.

Aufgaben der Trinkwasserversorgung sind die Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung von Roh- bzw. Trinkwasser. Je nach Qualität des aus dem Grundwasser, aus Oberflächengewässern oder aus anderen Wasserressourcen entnommenen Rohwassers wird dieses mit aufwendigen Verfahren zu Trinkwasser aufbereitet. Das Trinkwasser wird gespeichert und über Fern- und Versorgungsleitungen an die Wasserverbraucher verteilt. Die Aufgaben der Abwasserbeseitigung umfassen die Sammlung, Ableitung und Klärung von Abwasser. In Deutschland sind Mischkanalisationen, die Schmutz- und Niederschlagswasser gemeinsam ableiten, vorherrschend. Das gesammelte Abwasser wird in Kläranlagen mittels mechanisch-physikalischer, biologischer und chemischer Prozesse gereinigt und anschließend in ein Gewässer eingeleitet. Die Überwachung und Steuerung der komplexen Betriebsprozesse sowie die Reinigung und Instandhaltung der Infrastrukturen stellen zentrale Aufgaben der wasserwirtschaftlichen Unternehmen dar.

-
- 3 Richtlinie 2000/60/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik
 - 4 Richtlinie (EU) 2020/2184 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Neufassung)
 - 5 Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser
 - 6 Wasserhaushaltsgesetz vom 31.7.2009, zuletzt am 20.7.2022 geändert
 - 7 Trinkwasserverordnung vom 10.3.2016, zuletzt geändert am 22.9.2021 (ersetzt durch die Trinkwasserverordnung vom 20.6.2023)
 - 8 Abwasserverordnung vom 17.6.2004, zuletzt am 20.1.2022 geändert



Vor allem in Großstädten müssen viele Wasserverteilnetze und Kanalisationssysteme erneuert werden, was Kommunen und Unternehmen der Wasserwirtschaft vor erhebliche finanzielle Schwierigkeiten stellt. Eine große Herausforderung stellt außerdem die Beherrschung der Folgen des Klimawandels dar, da Extremwetterereignisse wie Starkregen oder langanhaltende Dürren unmittelbare Auswirkungen auf alle wasserwirtschaftlichen Prozesse haben. Auch die zunehmende Belastung der Gewässer mit Nitrat, mit Rückständen aus Arznei- und Pflanzenschutzmitteln und anderen Chemikalien stellt die Unternehmen der Wasserwirtschaft vor Probleme. Schließlich gehören wasserwirtschaftliche Betriebe zu den größten Energieverbrauchern auf kommunaler Ebene, sodass die Reduzierung des Energieverbrauchs als weitere Herausforderung hinzukommt.

Digitalisierung der Wasserwirtschaft: technischer Stand und Entwicklungstrends

Aufbauend auf die vorhandene Automatisierungs- und Prozessleittechnik findet derzeit eine digitale Transformation in der Wasserwirtschaft statt. Damit verbunden ist – in Analogie zu Industrie 4.0 – die Vision einer Wasserwirtschaft 4.0, also eine umfassend vernetzte Wasserwirtschaft. Die Grundlage hierfür bilden die digitale Vernetzung und Integration bisher getrennter Anlagen und Prozesse der Wasserwirtschaft entlang der Wertschöpfungsketten innerhalb der Unternehmen, aber auch über Unternehmens- und Organisationsgrenzen hinaus. Der Weg dazu ist allerdings noch weit. Zwar wurden mittlerweile zahlreiche digitale Innovationen für die Wasserwirtschaft entwickelt und stehen am Markt bzw. als Prototypen bereit. Allerdings handelt sich dabei vielfach um Einzelanwendungen, die dem Anspruch einer umfassenden Vernetzung noch nicht gerecht werden.

Automatisierungs- und Prozessleittechnik

Der Einsatz von Automatisierungs- und Prozessleittechnik ist in der Wasserwirtschaft weitgehend etabliert. Vor allem werksgebundene Infrastrukturen der Wassergewinnung und -aufbereitung (Brunnen, Wasseraufbereitungsanlagen) wie auch die Abwasserreinigung (Kläranlagen) weisen einen hohen Automatisierungsgrad auf, wobei Soll- und Grenzwerte vorgegeben sind und Abweichungen durch Warn- oder Störmeldungen an das Betriebspersonal weitergegeben werden. Die Überwachung größerer Anlagen erfolgt üblicherweise von einer zentralen Leitwarte aus. Aufbau und Funktionsumfang der Automatisierungs- und Prozessleittechnik sind in der betrieblichen Praxis jedoch äußerst heterogen und durch eine Vielfalt an Hard- und Softwarekomponenten unterschiedlicher Hersteller, Architekturen und Generationen gekennzeichnet.



Sensorik

Sensoren liefern die für die Überwachung und Steuerung der Anlagen und Prozesse notwendigen Echtzeitdaten der Betriebszustände. Die kontinuierliche Messung von physikalischen und chemischen Parametern, wie Druck, Durchflussmenge, Wasserstand, Temperatur, pH-Wert oder Energieverbrauch, bildet die Grundlage für eine verfahrenstechnische und wirtschaftliche Optimierung von wasserwirtschaftlichen Betriebsprozessen. Durch die Digitalisierung hat die Messtechnik in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte erzielt. Dies betrifft die Signalverarbeitung und generell Leistungssteigerungen bei Mikroprozessoren, durch die Funktionserweiterungen und eine zunehmende Verlagerung der Datenverarbeitung in die Sensoren ermöglicht werden. Weiterentwicklungen betreffen u. a. die Robustheit der Sensorsysteme, da sie in der Wasserwirtschaft häufig unter schwierigen Einsatzbedingungen zuverlässig und möglichst wartungsarm funktionieren müssen. Außerdem wird an der Entwicklung von echtzeitfähigen Sensorsystemen für chemische und biologische Parameter der Wasserqualität gearbeitet, an denen es derzeit noch mangelt. Installation, Betrieb und Instandhaltung von Sensorsystemen sind mit Kosten verbunden, so dass ihr Einsatz trotz der damit verbundenen Vorteile auch immer unter betriebswirtschaftlichen Aspekten abgewogen werden muss.

Datenübertragung

Für die meisten digitalen Anwendungen ist eine leistungsfähige Telekommunikationsinfrastruktur für eine schnelle und sichere Datenübertragung notwendig. Steht diese nicht oder nicht zuverlässig zur Verfügung, so stellt dies für die Realisierung von Digitalisierungsvorhaben eine hohe Hürde dar. Dies gilt insbesondere auch für die Wasserwirtschaft, wo es häufig um die Vernetzung von in der Fläche weit verteilten Anlagen geht. Akteure der Wasserwirtschaft bemängeln in diesem Zusammenhang den zögerlichen Ausbau einer flächendeckenden Breitbandversorgung insbesondere in ländlichen Räumen. Eine viel diskutierte Lösung stellt der Aufbau spezieller Funknetze auf Basis der LoRaWAN-Technologie dar, deren Einsatz in der Wasserwirtschaft derzeit in Pilotvorhaben erprobt wird. Der Aufbau von LoRaWAN erfordert hohe Investitionen, sodass er durch Kommunen, Länder und Bund finanziell unterstützt werden könnte.

Datenspeicherung und -verarbeitung

Die Wasserwirtschaft ist sehr daten- und rechenintensiv. Durch die Digitalisierung erhöhen sich die Anforderungen an IT-Systeme in den Betrieben weiter, da immer größere Datenmengen erhoben, verarbeitet und bereitgestellt werden müssen. Um von den Potenzialen digitaler Innovationen zu profitieren, müssen Betreiber folglich eine leistungsfähige IT-Infrastruktur vorhalten, die aber nicht



nur teuer in der Anschaffung ist, sondern auch hohe Wartungs- und Energiekosten verursacht sowie IT-Fachpersonal erfordert. Vor diesem Hintergrund steigt auch in der Wasserwirtschaft das Interesse an der Nutzung von cloudbasierten Dienstleistungen. Diese könnten perspektivisch vor allem solchen Unternehmen, die selber nicht in der Lage sind, eigene leistungsfähige IT-Systeme aufzubauen und zu unterhalten, die Teilhabe an der digitalen Entwicklung ermöglichen. Die Nutzung von Clouddienstleistungen externer Anbieter birgt allerdings auch Risiken. Unter anderem werden Abhängigkeiten erzeugt, ein Teil der Kontrolle über IT-Prozesse und Daten wird abgegeben und Aspekte der Datensicherheit und des Datenschutzes werden ausgelagert. Aufgrund von Sicherheitsbedenken werden externe Clouddienstleistungen derzeit daher noch eher zögerlich genutzt und vorrangig in den kaufmännischen Unternehmensbereichen realisiert, während die betriebskritische Automatisierungs- und Prozessleittechnik weniger im Fokus steht.

Simulations- und Prognosewerkzeuge

Simulations- und Prognosewerkzeuge sind heute in allen Bereichen der Wasserwirtschaft zu finden. Hierbei handelt es sich meist um Software zur Modellierung dynamischer Prozesse in wasserwirtschaftlichen Anlagen oder des Wasserhaushalts, um beispielsweise das Anlagenverhalten zu simulieren oder künftige Kapazitäts- und Infrastrukturbedarfe abzuschätzen. Die Modellierungsergebnisse dienen u. a. der Erarbeitung neuer Betriebskonzepte, der Weiterbildung von Mitarbeiter/innen oder unterstützen Planungsentscheidungen. Die Software wird in der Regel von speziell geschultem Personal und unabhängig vom routinemäßigen Betrieb in der Leitstelle eingesetzt. Echtzeitsimulationswerkzeuge, die als Teil des Prozessleitsystems operieren und für Aufgaben der unmittelbaren Prozessüberwachung und -steuerung eingesetzt werden, befinden sich hingegen noch in einer frühen Forschungs- und Entwicklungsphase. Erste Lösungen für eine adaptive Echtzeitsteuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen werden derzeit in Pilotprojekten erprobt. In der Koppelung von Automatisierungs- und Prozessleittechnik mit Simulations- und Prognosewerkzeugen wird ein großes Potenzial für betriebsoptimierte Steuerungskonzepte und die digitale Transformation insgesamt gesehen.

Verknüpfung und Auswertung von bereichs- und unternehmensübergreifenden Daten

Zurzeit liegen die in der Wasserwirtschaft erhobenen Daten (z. B. Prozessdaten, Infrastrukturdaten, kaufmännische Daten, Geodaten) häufig nur fragmentiert und voneinander getrennt auf verschiedenen IT-Systemen und in unterschiedlichen Unternehmensbereichen vor. Ein Austausch der Daten zwischen den verschiedenen IT-Systemen ist über Datenschnittstellen zwar grundsätzlich mög-



lich, dies ist aber zumeist nicht Standard und daher oft mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden. Mit einer weitergehenden Nutzung, Verknüpfung und Auswertung der im Betrieb vorhandenen Daten, aber auch von externen Daten (z. B. Wetterdaten) werden vielfältige Potenziale der Optimierung von Betriebsprozessen assoziiert.

Ein Lösungsansatz für die Organisation und Vernetzung bislang isolierter Datenbestände sind *Geoinformationssysteme* (GIS), welche beispielsweise die Visualisierung von Rohrleitungs- und Kanalnetzen ermöglichen. Die geographischen Objekte lassen sich mit spezifischen Informationen (z. B. Bau- oder Betriebspläne) oder aktuellen Arbeitsanweisungen verknüpfen, was beispielsweise der Arbeitsorganisation und -planung dienen kann. Der Nutzen von GIS hängt jedoch vom Grad der unternehmensweiten Vernetzung und Informationsvermittlung ab.

Building Information Modeling (BIM) bezeichnet eine Technologie, mit deren Hilfe alle relevanten Informationen zur Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden und anderen Bauwerken digital erfasst und verwaltet werden können. BIM-Softwareprodukte speziell für die Wasserwirtschaft stehen aktuell noch nicht zur Verfügung, ihnen wird aber aufgrund der typischen komplexen Anlagen ein hohes Potenzial zugemessen.

Mit der Modellierung und Visualisierung durch *digitale Zwillinge* soll der komplette Datenbestand einer realen Anlage (z. B. ein Pumpwerk, ein Klärwerk) oder auch eines gesamten Systemverbunds (bis hin zu einzelnen Kennzahlen und Betriebsparametern) in ein virtuelles Echtzeitabbild überführt werden. Die Anwendungsmöglichkeiten für digitale Zwillinge sind vielfältig und reichen von der Analyse und Optimierung von Arbeitsprozessen über Forschung und Entwicklung, Aus- und Weiterbildung bis hin zur vorausschauenden Wartung und Planung von Anlagen über deren gesamten Lebenszyklus. In der Wasserwirtschaft arbeiten Unternehmen erst vereinzelt und pilothaft mit digitalen Zwillingen. Herausforderungen für die Anwendung bestehen u. a. dahingehend, dass die Echtzeitfähigkeit detaillierter Modelle von komplexen Versorgungssystemen noch nicht gegeben ist und die Daten aus den unterschiedlichen Quellen mangels standardisierter Schnittstellen mit hohem Aufwand aufbereitet werden müssen, um sie für digitale Zwillinge nutzbar zu machen.

Anwendungsfelder und Potenziale

Mit dem Einsatz digitaler Technologien in der Wasserwirtschaft sind vielfältige Erwartungen verknüpft. Welche Anwendungsfelder sie eröffnen und welche Potenziale damit assoziiert sind, wurde entlang der Wertschöpfungsstufen untersucht.



Wassergewinnung und -aufbereitung

Informationen über die Verfügbarkeit und Qualität von Trinkwasserressourcen bilden die Grundlage für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit in der Wasserwirtschaft. Für viele Parameter der Wasserqualität (z. B. pH-Wert, Trübung, elektrische Leitfähigkeit) sind Sensorsysteme etabliert, die eine kontinuierliche Messung und Überwachung der Wassergüte durch die Wasserbetriebe ermöglichen. Der Einsatz solcher Sensorsysteme in der Trinkwassergewinnung erlaubt einen flexibleren und effizienteren Einsatz von Betriebsmitteln sowie eine stringendere Überwachung der Wasserqualität. Allerdings deckt die aktuelle Sensortechnik nur einen Teil der chemischen und biologischen Parameter ab, die gemäß der TrinkwV durch die Betriebe routinemäßig überwacht werden müssen. Viele Parameter der Wassergüte werden daher nicht in Echtzeit, sondern mit labortechnischen Verfahren nur diskontinuierlich überwacht. Damit können Grenzwertüberschreitungen nicht unmittelbar erkannt werden, was insbesondere auf Spurenstoffe zutrifft. An der Entwicklung und Verbesserung von echtzeitfähigen Sensorsystemen für chemische Spurenstoffe und biologische Parameter wird intensiv gearbeitet und erste Sensorsysteme stehen auch bereits kommerziell zur Verfügung. Aufgrund der Vielfalt möglicher Kontaminationen ist eine umfassende sensorbasierte Qualitätsüberwachung in Echtzeit allerdings auch langfristig nicht zu erwarten.

Die Trinkwasserqualität kann insbesondere durch zu hohe Nitratkonzentrationen beeinträchtigt werden. Für die Einhaltung von Nitratgrenzwerten und die Prävention von toxischen Algenblütenereignissen können Sensoren durch Echtzeitmessungen eine frühzeitige Identifikation ermöglichen. Ergänzend könnte eine verstärkte Datenerfassung zum Düngepraxisverhalten der Landwirte sowie weiterer Daten zu Einflussfaktoren der Nitratversickerung künftig lokale Wirkungszusammenhänge zwischen Düngeverhalten und Wasserqualität erfassen und es könnten Maßnahmen zur Nitratreduktion systematisch evaluiert werden.

Im Zuge des Klimawandels müssen sich Unternehmen der Wasserwirtschaft zunehmend mit den Herausforderungen längerer Dürreperioden und veränderten Ressourcenverfügbarkeiten auseinandersetzen. Digitale Innovationen können kontinuierliche Informationen über Grundwasserstände bzw. Wasserdargebote erheben. Werden sie den Betrieben zur Verfügung gestellt, können auf dieser Grundlage und in Kombination mit Wetterprognosedaten Entscheidungen zur schonenden Nutzung der Ressource Wasser frühzeitig und koordiniert getroffen werden.

Wasserverteilung

Der kontinuierlichen Überwachung der Trinkwasserqualität im Verteilnetz wird zunehmend eine zentrale Bedeutung beigemessen. Digitale Innovationen für eine verbesserte Gefahrenerkennung und -alarmierung beim Monitoring der



Wasserqualität werden vor allem durch eine Kombination fortschrittlicher Sensortechnik und Datenanalyseverfahren erwartet. Entsprechende Sensorsysteme befinden sich allerdings noch in einem frühen Forschungs- und Entwicklungsstand. Zudem sind sie mit hohen Anschaffungs- und Betriebskosten verbunden.

Da in Verteilnetzen eine kontinuierliche Messung der Wasserdurchflussmengen derzeit nicht flächendeckend, sondern in der Regel nur an ausgewählten Stellen stattfindet, lassen sich anhand der Messdaten nur größere Leckagen erkennen. Durch einen Ausbau der Sensorsysteme im Verteilnetz und eine entsprechende Datenauswertung sollen künftig auch kleinere Leckagen automatisiert ermittelt und lokalisiert werden können. Ergänzend dazu können perspektivisch Satellitendaten zur Ortung von größeren Leckagen oder Rohrbrüchen genutzt werden. Digitale Wasserzähler beim Verbraucher ermöglichen es außerdem, Leckagen im Hausnetz schneller zu entdecken.

Schließlich können digitale Wasserzähler durch eine Übermittlung von Echtzeitinformationen an die Nutzer/innen potenziell das Wasserverbrauchsverhalten beeinflussen. Erste Studien in verschiedenen Ländern zeigen, dass dadurch induzierte Verhaltensänderungen deutliche Wassereinsparungen ermöglichen. Der Forschungsstand hierzu ist allerdings noch unausgereift. So fehlt es an Langzeitstudien. Außerdem dürften sich weniger technikaffine Verbraucher von solchen Lösungen kaum angesprochen fühlen.

Mit dem Einsatz digitaler Technologien wird in der Wasserverteilung zudem ein Energieeinsparpotenzial verbunden. Instrumente zur Modellierung und Simulation ermöglichen beispielsweise kurzfristige Maßnahmen zur Optimierung des Rohrdrucks bzw. des Pumpenbetriebs. Auf diese Weise lassen sich Gesamtenergieeinsparungspotenziale realisieren.

Abwasserableitung und -reinigung

Mit einer sensorbasierten Echtzeitüberwachung der Auslastung der Kanalisation in Mischsystemen kann die Steuerung der Abflüsse optimiert werden. Wichtig ist dies insbesondere bei Starkregenereignissen, um vorhandene Stauräume besser ausnutzen und Mischwasserüberläufe, die mit problematischen Stoffeinträgen in Gewässer verbunden sind, möglichst vermeiden zu können. Grundvoraussetzung hierfür ist eine bessere Ausstattung der Kanalnetze mit der entsprechenden Mess- und Regeltechnik und, sofern nicht auf öffentliche Telekommunikationsnetze zurückgegriffen werden kann, der Aufbau von Übertragungsnetzen. Zwar sind damit insbesondere für Bestandsanlagen hohe Investitionen verbunden, allerdings können dadurch auch Kosten für den Ausbau von Speicherkapazitäten eingespart werden. Gegenüber dem Infrastrukturausbau bieten digitale Anwendungen außerdem schnellere Lösungen des Problems häufiger auftretender Starkregenereignisse. Vor dem Hintergrund klimawandelbedingter längerer Dürre- oder Hitzeperioden wird eine angepasste Kanalnetzsteuerung perspektivisch auch für das Speichern von Niederschlagswasser zur



Bewässerung und Stadtkühlung zunehmend wichtiger. Eine bessere Ausstattung der Kanalnetze mit digitaler Messtechnik bietet darüber hinaus Potenziale für die Zustandsbewertung und frühzeitige Erkennung von Kanalschäden.

Innovationen im Bereich der Behandlung von Abwasser in Kläranlagen betreffen u. a. die weitergehende Automatisierung einzelner mechanischer Verfahrensschritte. Weitere Anwendungsgebiete von digitalen Lösungen bestehen in der Optimierung der Betriebsprozesse, z. B. in Bezug auf einen verschmutzungsabhängigen Einsatz der Betriebsmittel oder auf eine vorausschauende Wartung der Anlagen durch die Auswertung von Betriebsdaten. Schließlich ermöglicht eine durch digitale Technologien optimierte Kläranlagensteuerung Einsparpotenziale beim Energieverbrauch. Ein wesentliches Hemmnis für die weitere Verbreitung von digitalen Lösungen zur Optimierung des Kläranlagenbetriebs ist, dass viele und insbesondere kleine Betreiber nicht über ausreichende personelle und fachliche Ressourcen verfügen, um solche Lösungen einzuführen und an die jeweiligen Besonderheiten ihrer Anlagen anzupassen. Außerdem können aktuelle Technologien nicht alle Schadstoffe aus dem Wasser entfernen, sodass sich bestimmte Kontaminanten nur über die Reduzierung oder Vermeidung von Einträgen kontrollieren lassen.

Verwaltung und Kundenservice

In den Unternehmensbereichen Verwaltung und Kundenservice wird ein breites Spektrum an spezifischen Softwaresystemen für die verschiedenen Aufgaben, wie Bilanzierung, Verbrauchsabrechnung, Personalplanung, behördliche Dokumentations- und Genehmigungspflichten, eingesetzt. Infolge mangelnder Kompatibilität ist ein medienbruchfreier Daten- und Informationsaustausch zwischen diesen Einzelanwendungen und externen Dienstleistern, Behörden oder Kunden allerdings vielfach nicht möglich. Die Verbesserung der Kompatibilität zwischen den Softwaresystemen bietet Potenziale für effizientere Arbeitsprozesse und eine bessere Nutzung vorhandener Datenbestände. Vereinzelt gibt es Prozesse und Betriebsaufgaben, die bislang weitgehend ohne Softwareunterstützung abgewickelt werden, z. B. die Dokumentenablage und -archivierung. Die Digitalisierung auch dieser Prozesse ist gegenwärtig im Gange. Zunehmend wird auch die Kundenkommunikation durch die Nutzung von webbasierten Kundenplattformen und den Einsatz von Social-Media-Instrumenten und Chatbots digitalisiert. In Verbindung mit digitalen Wasserzählern ermöglicht dies u. a. eine Optimierung des Abrechnungsprozesses.

Planung, Wartung und Instandhaltung von Anlagen können durch entsprechende Simulationssoftware effizienter gestaltet und besser mit anderen städtebaulichen Maßnahmen abgestimmt werden. Für ein effizientes Informations- und Wissensmanagement ist der Datenaustausch zwischen Wasserbetrieben, Kommunen, Wasser- und Katasterbehörden wesentlich. Allerdings liegt ein Großteil der Daten, beispielsweise zur kontinuierlichen Überwachung der



Trink- und Abwassergüte oder zu Hochwasserereignissen, weder digital vor noch ist er allen Akteuren offen zugänglich. Aktuell laufen auf Ebene der Europäischen Kommission, des Bundes, der Länder und Kommunen verschiedene Initiativen, um die Digitalisierung und Bereitstellung dieser Daten mithilfe von Plattformen voranzutreiben. Bereits bestehende Angebote sind in der Wasserwirtschaft allerdings noch wenig bekannt und werden daher kaum genutzt.

Voraussetzungen zur Erschließung von Digitalisierungspotenzialen

Die Potenziale der Digitalisierung sind nicht für alle Betriebe einheitlich, sondern werden auch durch betriebs- und regionalspezifische Gegebenheiten (z. B. Größe des Versorgungsgebiets, Anlagenbestand, Wasservorkommen und -verfügbarkeit) bestimmt. Außerdem stellen sich Herausforderungen wie eine steigende Wassernutzungskonkurrenz oder eine zunehmende Nitratbelastung der Rohwasserquellen nicht für alle Unternehmen der Wasserwirtschaft gleichermaßen. Dennoch gilt generell: Je geringer die Anzahl und Vielfalt der Infrastrukturen und Anlagen eines Unternehmens sind, desto niedriger ist auch der zu erwartende Nutzen, der durch Digitalisierungsmaßnahmen über Effizienzsteigerungen und die Bewältigung künftiger Herausforderungen potenziell erzielt werden kann. Außerdem sind ohne die Schaffung zukunftsfähiger Infrastrukturen viele digitale Lösungen nicht anwendbar. Auch unzureichend compatible Schnittstellen für den Datenaustausch innerhalb der Unternehmen und zwischen Unternehmen und Behörden limitieren derzeit noch viele weiterführende Anwendungen. Nicht zuletzt ist es für eine erfolgreiche Umsetzung von Digitalisierungsprojekten in Wasserunternehmen unerlässlich, Akzeptanz bei den Beschäftigten für die damit einhergehenden betrieblichen Veränderungen zu schaffen. Dafür ist es nötig, die Mitarbeiter/innen frühzeitig in die Einführung der Innovationen einzubeziehen.

Chancen und Risiken der Digitalisierung für die Störungs- und Krisenbewältigung

Der Umgang mit Störungen und Krisen ist ohne den zumindest begleitenden Einsatz von digitalen Technologien heute nicht mehr denkbar. Für die Bewältigung von Ausnahmesituationen spielen Prozessleitsysteme die entscheidende Rolle. Noch ist die Durchführung von Simulationen zu zeitaufwendig, um während einer Störungs- oder Krisensituation eingesetzt werden zu können. Die Kommunikation – hier vor allem die im Krisenfall nötige interne Kommunikation – erfolgt bisher noch wenig digitalgestützt. Dahingegen zeichnet sich hinsichtlich der externen Kommunikation ein häufigerer Einsatz digitaler Werkzeuge, wie etwa Kundenportale zur Information der Bürger/innen über Gefahren, ab. Der Umfang der Nutzung digitaler Lösungen für die Störungs- und Krisenbewältigung hängt von dem konkreten Ereignis ab. Während digitale



Lösungen bei einer Hitzewelle vergleichsweise intensiv eingesetzt werden, um die begrenzt vorhandenen Wasserressourcen durch eine situationsangepasste Steuerung bestmöglich zu nutzen, können sie erwartungsgemäß bei einem Stromausfall viel weniger Unterstützung bieten.

Von digitalen Technologien wird während Störungs- oder Krisensituationen vor allem erwartet, dass sie Informationsdefizite ausgleichen und zu einer besseren Nutzung der vorhandenen Ressourcen und Kapazitäten führen. Dennoch ist die menschliche Erfahrung in der Bewältigung von Ausnahmesituationen für die Wiederherstellung des Normalbetriebs entscheidend. Infolge der zunehmenden Digitalisierung und Automatisierung der betrieblichen Prozesse und Abläufe werden Störungen jedoch immer häufiger durch Technikeinsatz gelöst. So kommt das Personal immer seltener dazu, die Bewältigung von Störungen zu üben, was zu einem schleichenden Verlust von Kompetenzen und Erfahrungen beim Personal führen kann. Tritt dann aber eine Abweichung vom Normalbetrieb auf, die durch Technikeinsatz nicht mehr automatisch behoben werden kann, kann sich diese schnell zu einer Krise entwickeln. Hinzu kommt, dass durch Digitalisierung und Automatisierung der Personalbestand tendenziell reduziert wird und eine Konzentration des Personals auf wenige Standorte stattfindet. Dies kann bei Krisenereignissen veränderte Reaktionszeiten sowie geringere personelle Kapazitäten zur Schadensbehebung zur Folge haben.

Handlungsfelder

Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft ist eine Zukunftsaufgabe für Kommunen und Unternehmen, die einer vorausschauenden Gestaltung bedarf. Die Digitalisierung hat Auswirkungen auf die Abläufe und Prozesse in allen wasserwirtschaftlichen Wertschöpfungsstufen, weshalb damit infrastrukturelle, rechtliche und auch bildungspolitische Handlungsbedarfe verbunden sind.

Überbetriebliche Potenziale für die gesamte Branche erschließen

Eine stärkere Vernetzung und Integration von wasserwirtschaftlich relevanten Daten zwischen Betrieben, Behörden und Industrie eröffnen vielfältige Optionen für eine bessere Datennutzung und damit für eine Optimierung wasserwirtschaftlicher Prozesse. Dazu sind jedoch ein besserer Datenaustausch und eine Standardisierung von Datenschnittstellen nötig. Bisher sind Daten nur schwer zugänglich bzw. nur mit einem hohen Aufbereitungsaufwand nutzbar. Ein öffentliches Datenverzeichnis und eine zentrale Dateninfrastruktur wären Voraussetzungen für die weiterführende Erschließung der Potenziale einer Digitalisierung. Zum Beispiel wären eine Vereinheitlichung und Integration der vorhandenen Einzeldaten zu Grundwasserständen hilfreich, um den Zugang zu diesen Daten für die Wasserwirtschaft zu erleichtern. Die Grundlagen hierzu könnten etwa durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) geschaffen werden.



Zugang zur Digitalisierung auch für kleine und mittlere Betriebe erleichtern

Die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben ist vielfach mit hohen Investitionskosten verbunden und geht mit neuen Management-, Personal- und Kompetenzbedarfen einher. Insbesondere für kleine und mittlere Betriebe ist die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben daher schwer zu leisten. Ein Ansatz zur Reduzierung des Problems fehlender Ressourcen besteht in der Etablierung von (regionalen) Kooperationen, um größere Digitalisierungsvorhaben gemeinsam zu stemmen. Betriebsübergreifende Formen der Zusammenarbeit sollten durch Kommunen, Länder und Bund unterstützt bzw. zumindest nicht behindert werden. So wäre beispielsweise zu prüfen, inwiefern verschiedene Kooperationsformen Auswirkungen auf die Besteuerung der Unternehmen hätten, damit Anreize der Zusammenarbeit nicht durch nachteilige (steuerliche) Rahmenbedingungen konterkariert werden. Unterstützung bieten auch bestehende Förderprogramme des Bundes, die sich an KMU richten und Beratungsleistungen fördern und finanzielle Zuschüsse bei Investitionen in digitale Technologien und in die Mitarbeiterqualifizierung bieten. Solche Programme sollten fortgeschrieben, ausgebaut und ggf. stärker auf die Wasserwirtschaft zugeschnitten werden. Treiber der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft sind vielfach einzelne innovative Unternehmen, die aufgrund ihrer Größe über die nötigen finanziellen und personellen Ressourcen zur Erprobung und Einführung neuer digitaler Technologien verfügen. Um auch kleinere und mittlere Betriebe stärker zu erreichen, wären Mechanismen für einen besseren Transfer von Erkenntnissen aus Forschungsprojekten und Best-Practice-Beispielen in die wasserwirtschaftliche Praxis zu etablieren.

Infrastrukturelle Rahmenbedingungen schaffen

Ohne die Schaffung zukunftsfähiger Infrastrukturen der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) sind viele digitale Lösungen nicht anwendbar. Grundlage dafür sind leistungsfähige und flächendeckend verfügbare öffentliche Telekommunikationsnetze. Alternativ bzw. ergänzend können spezielle Funknetze aufgebaut werden, wofür Kommunen, Länder und Bund die Koordination und Verantwortung übernehmen könnten. Die Bereitstellung öffentlicher Clouddienstleitungen würde die Abhängigkeit der Unternehmen zu großen kommerziellen Cloudanbietern verringern sowie das Teilen und Nutzen von Daten vereinfachen.

Rechtliche Grundlagen anpassen

Vielfach kann das Potenzial digitaler Innovationen erst erschlossen werden, wenn eine Anpassung des regulatorischen Rahmens erfolgt. Beispielsweise könnten Wasserversorger durch die Ermöglichung von dynamischen Preismo-



dellen für Endverbraucher Anreize für eine sorgsame Wassernutzung in Zeiten von Knappheit setzen. Eine dynamische Berechnung von Wasserentnahmeentgelten für Wasserversorger könnte eine Lenkungswirkung auf die Wasserentnahme aus Grund- und Oberflächengewässer entfalten. Dafür wäre die Schaffung einer rechtlichen Grundlage für den Umgang (Zugriff, Verarbeitung und Weitergabe) sowohl mit personenbezogenen Daten (z. B. im Kontext des Einsatzes von digitalen Wasserzählern) als auch mit Maschinen- und Betriebsdaten, um für Rechtssicherheit für die Betreiber zu sorgen.

Auf- und Ausbau digitaler Expertise stärken

Die Einführung von digitalen Innovationen erfordert den Auf- und Ausbau digitaler Expertise in Betrieben, um die Abhängigkeiten von externen Dienstleistern zu reduzieren. Entsprechend stellen die Förderung von Schulungsmaßnahmen, der Ausbau der Schulungsangebote und die Aufnahme von IT-Lerninhalten in die Rahmenlehrpläne und Ausbildungsordnungen der wasserwirtschaftlichen Aus- und Weiterbildungsberufe wesentliche Maßnahmen zur Unterstützung des innerbetrieblichen Kompetenzaufbaus dar.

Forschungs- und innovationspolitische Instrumente anpassen

Mit der Digitalisierung eröffnet sich ein weites Innovationsfeld, dass unterschiedliche Technologiebereiche umfasst und vielfältige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe aufweist. Diese betreffen z. B. die Entwicklung preiswerter und zuverlässiger Sensorsysteme für Wasserqualitätsanalysen, die Weiterentwicklung von analytischen Auswertungsmethoden zur Erfassung von Verunreinigungen durch Spurenstoffe oder Technologien zur Ermittlung von Rohrbrüchen und Leckagen. Um die Verbreitung und Nutzung digitaler Lösungen zu fördern, wäre es vorteilhaft, Förderprogramme für Digitalisierungsvorhaben auszuweiten, beispielsweise speziell für kommunale Unternehmen. Außerdem könnten Pilotvorhaben und Reallabore für innovative Digitalisierungsprojekte stärker als bisher gefördert werden. Um vorhandene Forschungs- und Wissenslücken zu füllen und Handlungsbedarfe zu identifizieren, sollte der Stand der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft systematisch und regelmäßig erhoben werden differenziert in Bezug auf die Verbreitung einzelner digitaler Technologien und damit verbundener Realisierungshemmnisse. Zudem sollten die betriebswirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der Digitalisierung besser erforscht werden. Zwar verweisen einige Untersuchungen auf optimierte betriebswirtschaftliche Prozesse, jedoch fehlen umfassende repräsentative Studien.

Implikationen der Digitalisierung für die Informationssicherheit

Die Digitalisierung bietet vielfältige Potenziale für die Bewältigung der Herausforderungen, denen sich die Wasser- und die Abfallwirtschaft zu stellen haben. Um die Ver- und Entsorgungssicherheit auch unter den künftigen Rahmenbedingungen jederzeit gewährleisten zu können, ist es wichtig, diese Potenziale zu erschließen. Zugleich aber stellt die voranschreitende Digitalisierung auch eine Herausforderung für eine sichere Daseinsvorsorge dar, denn dadurch erhöht sich auch die Anfälligkeit der wasser- oder abfallwirtschaftlichen Prozesse gegenüber den Bedrohungen der Informationssicherheit.

Vor diesem Hintergrund wurden die Implikationen der Digitalisierung von Kritischen Infrastrukturen auf die Informationssicherheit am Beispiel der Wasserwirtschaft näher beleuchtet. Im Fokus der Betrachtungen standen potenzielle Gefährdungen der Informationssicherheit sowie notwendige präventive Maßnahmen, damit IT-Sicherheitsvorfälle mit Folgen für die Ver- und Entsorgungssicherheit gar nicht erst eintreten. Reaktive Maßnahmen für die Bewältigung von eingetretenen IT-Sicherheitsvorfällen wurden hingegen nicht vertieft untersucht, da dies den Rahmen des Projekts gesprengt hätte.

Gefährdungen der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

IT-Systeme sind grundsätzlich einer Reihe von Bedrohungen ausgesetzt. Dazu gehören menschliche Fehlhandlungen (z. B. Konfigurations- oder Bedienungsfehler), technisches Versagen (z. B. Soft- oder Hardwarefehlfunktionen) und zunehmend vorsätzliche Handlungen wie Cyberangriffe. Eine Bedrohung wird erst dann zu einer Gefährdung für ein IT-System, wenn sie auf eine vorhandene Schwachstelle trifft. Die Gefährdungslage für ein Unternehmen kann folglich durch zwei unterschiedliche Entwicklungen verschärft werden: zum einen durch einen Anstieg der Bedrohungen und zum anderen durch die Entstehung neuer Schwachstellen innerhalb der IT-Systeme des Unternehmens.

Auf Unternehmen der Wasserwirtschaft treffen derzeit beide Entwicklungen zu. Auf der einen Seite hat sich die allgemeine Bedrohungslage etwa durch Schadprogramme oder Cyberangriffe in den letzten Jahren generell stark erhöht und durch den russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine weiter verschärft. Auf der anderen Seite führen innovative digitale Lösungen für die Wasserwirtschaft dazu, dass die Automatisierungs- und Prozessleittechnik (im Folgenden Prozess-IT⁹) gegenüber solchen Bedrohungen immer anfälliger wird. Sicherheitsvorfälle in der Prozess-IT wirken sich unmittelbar auf die Überwachung und Steuerung der wasserwirtschaftlichen Anlagen aus, weshalb sie zu Beeinträchtigungen der Wasserver- bzw. Abwasserentsorgung führen können. Dahingegen sind IT-Sicherheitsvorfälle, die sich nur auf die Büro-IT eines wasser-

9 Gebräuchlich ist auch der englische Begriff Operational Technology (OT).



wirtschaftlichen Unternehmens beschränken, mit Blick auf die Ver- und Entsorgungssicherheit als weniger kritisch einzustufen.

Prozess-IT-Installationen wurden in der Vergangenheit als physisch isolierte Systeme konzipiert, wodurch sie weitgehend vor äußeren Einflüssen geschützt waren. Die mit der Digitalisierung einhergehende Vernetzung und Integration von Daten und Systemen bedingen dagegen meist eine Öffnung der Prozess-IT gegenüber den unternehmensinternen Büro-IT-Netzwerken, fremden Unternehmensnetzwerken oder dem Internet. Dadurch ist die Prozess-IT in wachsendem Maß denselben Bedrohungen ausgesetzt, wie sie auch für Büro-IT-Systeme gelten (z.B. Infektionen mit Schadprogrammen, Cyberangriffe über das Internet). Wie im vorliegenden Bericht anhand bereits aufgetretener IT-Sicherheitsvorfälle in der Wasserwirtschaft im In- und Ausland aufgezeigt wird, führen diese Entwicklungen generell zu einem Ansteigen der Gefährdungslage für die Prozess-IT von wasserwirtschaftlichen Unternehmen. Für die Unternehmen besteht die Herausforderung darin, kontinuierlich alle Gefährdungen durch entsprechende Schutzvorkehrungen zu kontrollieren, was eine anspruchsvolle und ressourcenintensive Aufgabe darstellt.

Aktuelle Bedrohungslage für Kritische Infrastrukturen und speziell für die Wasserwirtschaft

Während gezielte Cyberangriffe auf die Prozess-IT von Kritischen Infrastrukturen bis 2010 meist als Restrisiko akzeptiert wurden, gelten sie mittlerweile als eine besondere Bedrohung, da politisch motivierte Angreifer es auf einen hohen gesellschaftlichen Schaden abgesehen haben könnten. Eine wachsende Bedrohung geht auch von nicht zielgerichteten Angriffen mit Schadprogrammen wie Ransomware aus, die immer häufiger auch Kritische Infrastrukturen und Unternehmen der Wasserwirtschaft treffen. Neben Cyberangriffen gilt insbesondere die zunehmende Vernetzung und Komplexität der IT-Systeme in Kritischen Infrastrukturen als Herausforderung für die Informationssicherheit, da sich dadurch immer mehr mögliche menschliche und technische Fehlerquellen ergeben. Seit Ausbruch des Krieges in der Ukraine warnen deutsche Sicherheitsbehörden außerdem vor wachsenden Risiken für direkte russische Cyberangriffe auf Kritische Infrastrukturen in Deutschland.

Die verschärfte Bedrohungslage schlug sich in den vergangenen Jahren in einer wachsenden Zahl an IT-Sicherheitsvorfällen in den Kritischen Infrastrukturen nieder. Seit 2015 müssen große Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen (KRITIS-Betreiber i. S. d. BSI-Gesetzes – BSIG¹⁰) betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) melden. Die Zahl dieser Meldungen über alle Sektoren der Kritischen Infrastrukturen verdreifachte sich zwischen den Berichtszeiträumen 2017/2018

10 BSI-Gesetz vom 14.8.2009, zuletzt am 23.6.2021 geändert

und 2021/2022 von 145 auf 452. Entgegen ersten Befürchtungen hat sich die Gesamtzahl der meldepflichtigen Ereignisse seit Ausbruch des Krieges in der Ukraine nicht massiv erhöht (Stand September 2022). Auffallend ist, dass die Meldezahlen aus dem Sektor Wasser bisher vergleichsweise niedrig waren und im Gegensatz zu allen anderen Sektoren der Kritischen Infrastrukturen sich ab 2017 auch nicht substantiell erhöhten. Dies könnte an dem im Vergleich zu anderen Sektoren noch niedrigen Digitalisierungsgrad der Wasserwirtschaft liegen, wodurch diese den Bedrohungen der Informationssicherheit insgesamt weniger stark ausgesetzt ist. Durch eine voranschreitende Digitalisierung wird allerdings auch die Wasserwirtschaft anfälliger gegenüber den Bedrohungen der Informationssicherheit. Außerdem könnten die Unternehmen infolge des Ukraine-Krieges das Ziel von Cyberangriffen auf Kritische Infrastrukturen werden. Mit Blick auf die Zukunft kann daher von einer steigenden Bedrohungslage für die Wasserwirtschaft ausgegangen werden, wodurch sich die Schutzbedarfe erhöhen.

Für kleine und mittlere Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen gibt es bislang keine Meldepflichten für betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle. Daher fehlt es hier an einer belastbaren Datengrundlage, um die Auswirkungen der sich verschärfenden Bedrohungslage abschätzen zu können.

Regulatorische Grundlagen zur Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

Die Gesetze und Verordnungen des *deutschen Wasserrechts* fordern die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik. Die für die Wasserwirtschaft maßgeblichen Regeln werden durch den Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) sowie die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) entwickelt und als Arbeitsblätter veröffentlicht. Zurzeit existieren in diesen Regelwerken jedoch keine Arbeitsblätter, mit denen sich dezidiert mit dem Thema Informationssicherheit auseinandergesetzt wird. Insofern fehlt es für die Wasserwirtschaft aktuell an einer schriftlichen Fixierung von allgemein anerkannten Regeln der Technik im Bereich der Informationssicherheit, die (bzw. dazu gleichwertige Maßnahmen) von *allen* Unternehmen als gesetzliche Mindestanforderungen umgesetzt werden müssten.

Das *IT-Sicherheitsgesetz* von 2015 legte den Rahmen für die Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen fest. Die für die Wasserwirtschaft relevanten Regelungen sind im BSIG enthalten. Dieses verpflichtet große Unternehmen der Wasserwirtschaft, ihre betriebskritischen IT-Systeme nach dem Stand der Technik abzusichern und dies gegenüber dem BSI regelmäßig nachzuweisen, außerdem müssen betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle dem BSI gemeldet werden. Die Regelungen gelten für alle Unternehmen, die Anlagen betreiben, mit denen 500.000 oder mehr Personen versorgt werden (KRITIS-



Betreiber). Die Anzahl der KRITIS-Betreiber in der Wasserversorgung wurde 2020 mit 47 Unternehmen angegeben (von insgesamt über 5.800 in Deutschland tätigen Wasserversorgern). Die Kleinteiligkeit der deutschen Wasserwirtschaft führt dazu, dass aktuell über 99 % der Wasserversorgungsunternehmen, die grob geschätzt für mindestens die Hälfte der Wassergewinnung in Deutschland verantwortlich sind, nicht unter die Regelungen des BSIG fallen und daher, wenn überhaupt, Maßnahmen zum Schutz ihrer IT-Systeme nur auf freiwilliger Basis umsetzen.

Das *europäische Recht* spannt den Rahmen für die nationalen Vorschriften auf. Die Richtlinie (EU) 2016/1148 (NIS-Richtlinie)¹¹ von 2016 legte Mindestanforderungen und Meldepflichten fest. Die Ermittlung der Unternehmen, die unter diese Regelungen fallen, ist Aufgabe der Mitgliedstaaten. In Deutschland waren wesentliche Regelungselemente der NIS-Richtlinie durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 bereits umgesetzt. Im Dezember 2022 trat die Richtlinie (EU) 2022/2555 (NIS-2-Richtlinie)¹² in Kraft, die bis Oktober 2024 in nationales Recht umgesetzt werden muss. Eine wesentliche Neuerung betrifft den Wegfall der Zuständigkeiten der Mitgliedstaaten für die Ermittlung der regulierten Unternehmen. Künftig müssen für alle mittleren und großen Unternehmen der Wasserwirtschaft, die 50 oder mehr Personen beschäftigen bzw. deren Jahresumsatz 10 Mio. Euro oder mehr erreicht, gesetzliche Pflichten zur Absicherung ihrer IT-Systeme sowie Meldepflichten gelten. Die Zahl der verpflichteten wasserwirtschaftlichen Unternehmen wird sich dadurch deutlich erhöhen.

Normen und Regelwerke ergänzen die rechtlichen Grundlagen, indem sie gesetzliche Bestimmungen durch technische und organisatorische Vorgaben konkretisieren und damit die Rechtssicherheit für die Gesetzesadressaten erhöhen (untergesetzliches Regelwerk). Zum Thema Informationssicherheit gibt es eine Vielzahl an internationalen und nationalen Normen und Regelwerken. Für KRITIS-Betreiber der Wasserwirtschaft von besonderer Relevanz ist der branchenspezifische Sicherheitsstandard, der zur Beschreibung des nach BSIG geforderten Stands der Technik von den Branchenverbänden DVGW und DWA entwickelt wurde. Für kleine und mittlere Betriebe der Wasserwirtschaft, die Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit auf freiwilliger Basis umsetzen möchten, bieten Normen und Regelwerke wichtige Orientierung. Generell setzt die Umsetzung der Normen oder Regelwerke erhebliche zeitliche, personelle und fachliche Ressourcen voraus, was vor allem für kleine Unternehmen eine hohe Hürde darstellt.

11 Richtlinie (EU) 2016/1148 über Maßnahmen zur Gewährleistung eines hohen gemeinsamen Sicherheitsniveaus von Netz- und Informationssystemen in der Union

12 Richtlinie (EU) 2022/2555 über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union, zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 910/2014 und der Richtlinie (EU) 2018/1972 sowie zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148 (NIS-2-Richtlinie)

Unterstützungsangebote durch staatliche Stellen oder privatwirtschaftliche Organisationen

Orientierung im Bereich der Informationssicherheit bieten nicht nur verschriftlichte Normen und Regelwerke, sondern auch vielfältige, meist kostenfreie Unterstützungsangebote durch staatliche Stellen und/oder privatwirtschaftliche Organisationen. Niedrigschwellige Unterstützungsangebote sind vor allem für kleine und mittlere Betriebe der Wasserwirtschaft wichtig, die aus eigenem Antrieb die Informationssicherheit im Betrieb erhöhen wollen, dazu aber auf fachliche Hilfe und Informationen angewiesen sind.

Bei den Unterstützungsangeboten mit staatlicher Beteiligung hervorzuheben ist die öffentlich-private Kooperation UP KRITIS, die allen Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen (unabhängig von ihrer Größe), Branchenverbänden und zuständigen Behörden offensteht. Die Plattform dient dem Wissens- und Erfahrungsaustausch, außerdem erhalten alle Teilnehmer/innen vom BSI speziell aufbereitete Lage- und Hintergrundinformationen. Eine vergleichbare Plattform ist die Allianz für Cybersicherheit, die auch für Unternehmen außerhalb der Kritischen Infrastrukturen zugänglich ist. Derzeit beteiligt sich jedoch nur eine kleine Zahl an Unternehmen der Wasserwirtschaft an diesen Plattformen. Speziell für KRITIS-Betreiber bietet das BSI zusätzliche Services wie Handreichungen, Informationsveranstaltungen und Lageinformationen im Kontext der Umsetzung der gesetzlichen Anforderungen nach BSIG. Auch einige Landesbehörden wie das Bayerische Landesamt für Sicherheit in der Informationstechnik oder der Verfassungsschutz des Landes Rheinland-Pfalz haben spezifische Informations- und Beratungsangebote für Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen entwickelt.

Zu den privatwirtschaftlichen Unterstützungsangeboten gehören beispielsweise die themenbezogenen Aktivitäten der wasserwirtschaftlichen Branchenverbände DVGW, DWA oder Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), aber auch anderer Fachvereinigungen wie des Vereins Deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Das Spektrum der Inhalte und Formate ist sehr breit und reicht von kostenlosen Informationsmaterialien und -veranstaltungen oder Austauschplattformen über kostenpflichtige Fort- und Weiterbildungsangebote für Führungs- und Fachkräfte bis hin zu individuellen Beratungsdienstleistungen durch IT-Fachleute für Unternehmen der Wasserwirtschaft.

Die Inanspruchnahme von Unterstützungsangeboten bzw. die Teilnahme an Plattformen erfolgen immer auf freiwilliger Basis. Daher profitieren vor allem solche Unternehmen davon, die über ein ausreichendes Problembewusstsein verfügen und sich proaktiv (bei KRITIS-Betreibern auch von Gesetzes wegen) um die Verbesserung der Informationssicherheit kümmern. Mittlere und vor allem kleine Betreiber, die dem Thema Informationssicherheit auf Führungs- oder Fachkräfteebene wenig oder keine Bedeutung beimessen, werden hingegen selten erreicht. Auch ein geringer Bekanntheitsgrad kann eine Ursache für die



bisher eher zögerliche Nutzung bestehender Unterstützungsangebote durch Unternehmen der Wasserwirtschaft sein.

Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

Der Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft wurde erstmalig in der 2015 erschienenen KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser im Auftrag des BSI systematisch erhoben und dargestellt. Die Studie erfasste das Sicherheitsniveau, wie es kurz vor Inkrafttreten des IT-Sicherheitsgesetzes vorzufinden war. In den Leitungsebenen war das Problembewusstsein wenig ausgeprägt, wodurch es der Unternehmensführung schwer fiel, Aspekte der Informationssicherheit in die betrieblichen Risikobetrachtungen einfließen zu lassen. Die Studie förderte außerdem markante Abhängigkeiten der Unternehmen von externen Dienstleistern zutage. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen waren nicht in der Lage, IT-Kompetenzen in der eigenen Organisation zu halten.

Für *KRITIS-Betreiber* wurden 2015 durch das IT-Sicherheitsgesetz Nachweis- und Meldepflichten eingeführt, weshalb das BSI seitdem über einen guten Überblick über das Sicherheitsniveau bei großen Unternehmen verfügt. Durch die verpflichtende flächendeckende Einführung von Informationssicherheitsmanagementsystemen (ISMS), durch die eine Organisation die grundlegenden Methoden und Prozesse zur Gewährleistung der Informationssicherheit festlegt, konnte bei KRITIS-Betreibern der Wasserwirtschaft eine deutliche Verbesserung des Sicherheitsniveaus erreicht werden. Gleichwohl bestehen hier laut dem BSI weitere Optimierungspotenziale. Im Rahmen des TAB-Projekts durchgeführte Betreiberbefragungen legen außerdem Sicherheitsdefizite infolge einer verzögerten Einspielung von Sicherheitsupdates nahe. Die Installation von Sicherheitsupdates in komplexen Prozess-IT-Umgebungen stellt generell eine Herausforderung dar, da zwischen den Risiken der Softwareschwachstellen und den Risiken der Installation abgewogen werden muss.

Für die *nicht regulierten kleinen und mittleren Unternehmen* ist der Wissensstand zum Sicherheitsniveau hingegen äußerst limitiert, da eine systematische Erhebung seit 2015 nicht mehr stattfindet. Daher wurden im Rahmen des TAB-Projekts eine Reihe von qualitativen Interviews mit Betreibern und Vertretern von Fachverbänden und Behörden geführt sowie eine auf quantitative Ergebnisse ausgerichtete Onlineumfrage unter Betreibern durchgeführt. Ausgewertet wurden ferner die Ergebnisse einer Ende 2022 erschienenen Bestandsaufnahme des IT-Sicherheitsniveaus von kleinen und mittleren Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen. Weil gesetzliche Verpflichtungen fehlen, hängt das Ambitionsniveau bei kleinen und mittleren Betrieben entscheidend vom Sicherheitsbewusstsein in den Unternehmensleitungen ab. Im Zuge des IT-Sicherheitsgesetzes nimmt auch bei diesen Unternehmen das Verständnis für IT-bedingte Bedrohungen zu. Allerdings fehlt es in den Geschäftsführungen teilweise



noch an Verständnis dafür, dass die Gewährleistung von Informationssicherheit keine einmalige, sondern eine Daueraufgabe ist, die langfristige Investitionen in Personal und Technik erforderlich macht. Begrenzte finanzielle, fachliche und personelle Ressourcen stellen daher oft ein Hemmnis für die Umsetzung von Maßnahmen der Informationssicherheit dar. Der Aufbau von eigener IT-Expertise wird außerdem durch den Fachkräftemangel erschwert. Gleichwohl zeigten die Betreiberbefragungen, dass viele kleine und mittlere Betriebe proaktiv und im Rahmen ihrer Möglichkeiten Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit umsetzen. Die Unternehmen schnitten vor allem in Bezug auf die Umsetzung von technischen Sicherheitsvorkehrungen gut ab, nicht jedoch im gleichen Maße bei den organisatorischen Maßnahmen. Eine Erklärung ist, dass technische Anforderungen oft mit standardisierten Maßnahmen und externer Unterstützung erfüllt werden können. Organisatorische Maßnahmen verlangen hingegen meist die Bereitstellung ausreichender zeitlicher und personeller Ressourcen, was die Bereitschaft für deren Umsetzung schmälert. Allerdings sind diese Ergebnisse nicht repräsentativ, außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass vor allem solche Betreiber an den Befragungen teilgenommen haben, die für das Thema bereits sensibilisiert waren. Weitere empirische Forschung zum Stand der Informationssicherheit bei kleinen und mittleren Unternehmen der Wasserwirtschaft ist daher dringend nötig.

Handlungsfelder

Mit Blick auf die Informationssicherheit ist die deutsche Wasserwirtschaft heute zweigeteilt: Auf der einen Seite stehen wenige große KRITIS-Betreiber, für die es gesetzliche Bestimmungen für den Schutz ihrer IT-Infrastrukturen mit klar definierten Mindestanforderungen gibt. Auf der anderen Seite gibt es sehr viele kleine und viele mittlere Betreiber, die Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit – wenn überhaupt – nur auf freiwilliger Basis und nach eigenem Ermessen umsetzen. Diese Dualität bestimmt auch die Handlungsoptionen zur Förderung der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft. Während es bei großen KRITIS-Betreibern in der Regel darum geht, ein bereits erreichtes Sicherheitsniveau weiter zu optimieren, müssen mittlere und vor allem kleine Betriebe oftmals erst für das Thema sensibilisiert und aufgrund begrenzter eigener Ressourcen generell viel stärker unterstützt werden. Die im Bericht vorgestellten Handlungsoptionen legen den Schwerpunkt auf die bundespolitische Ebene.

Sicherheitsbewusstsein stärken

Ein Grundverständnis für die Gefährdungen der Informationssicherheit in Unternehmensleitungen und bei Fachkräften ist Voraussetzung dafür, dass Prozesse zur Verbesserung der Informationssicherheit initiiert und entsprechende



Maßnahmen konsequent umgesetzt werden. In Unternehmen der Wasserwirtschaft fehlt es mitunter jedoch an einem ausreichenden Verständnis für neu entstehende Risiken durch die Digitalisierung. Um das Sicherheitsbewusstsein zu stärken, stehen der Politik verschiedene Optionen zur Verfügung:

- Mit *zielgerichteten Informationskampagnen*, die z. B. durch das Bundesministerium des Innern (BMI) finanziert und durch die Branchenverbände durchgeführt werden, könnten die Führungsebenen stärker sensibilisiert werden.
- Eine *Unterstützung des Staates an den Kosten für Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen* (z. B. durch Bezuschussung, steuerliche Absetzung) könnte insbesondere kleine und mittlere Unternehmen entlasten.
- Eine *Entschärfung des IT-Fachkräftemangels* z. B. durch die Aufnahme von Lerninhalten zur Informationssicherheit in die Rahmenlehrpläne der wasserwirtschaftlichen Berufe würde es den Unternehmen erleichtern, erforderliche Fachkompetenzen durch Neueinstellungen im Betrieb aufzubauen.

Freiwillige Aktivitäten kleiner und mittlerer Betreiber unterstützen

Kleine und mittlere Betreiber setzen Maßnahmen zum Schutz ihrer IT-Systeme auf freiwilliger Basis um. Weil dazu aber vielfach die nötigen Ressourcen fehlen, benötigen sie fachliche, personelle und finanzielle Unterstützung. Für die Politik bestehen hierzu diverse Möglichkeiten:

- Durch eine stärkere Bewerbung könnte der *Bekanntheitsgrad von bestehenden Unterstützungsangeboten erhöht* und deren Inanspruchnahme durch Unternehmen der Wasserwirtschaft gesteigert werden.
- Auf die *Wasserwirtschaft zugeschnittene finanzielle Förderprogramme* für freiwillige Maßnahmen der Informationssicherheit könnten kleine und mittlere Unternehmen entlasten und Anreize schaffen, sich stärker mit dem Thema auseinanderzusetzen.
- Durch einen *kostenfreien Zugang zum branchenspezifischen Standard* von DVGW und DWA könnte dessen freiwillige Anwendung befördert werden.
- Mit *Mustervorlagen für vergaberelevante Unterlagen*, die grundlegende Anforderungen an die Informationssicherheit enthalten, könnten externe Dienstleister stärker in die Pflicht genommen werden.
- Die *Etablierung von Unternehmenskooperationen*, um Ressourcen für die Informationssicherheit gemeinschaftlich aufzubauen, sollte politisch unterstützt bzw. mögliche Hemmnisse (z. B. steuerliche Nachteile) sollten abgebaut werden.

Optimierung der Informationssicherheit bei KRITIS-Betreibern

Verbesserungspotenziale bei KRITIS-Betreibern betreffen aktuell in organisatorischer Hinsicht vor allem den Aufbau und Betrieb von ISMS sowie in technischer Hinsicht den Umgang mit Softwareschwachstellen. Es könnte sich als sinnvoll erweisen, nach möglichen systemischen Gründen für diese Sicherheitsmängel zu suchen, um auf dieser Grundlage erforderliche Anpassungen in den bestehenden Unterstützungsangeboten des BSI und anderer Institutionen für KRITIS-Betreiber der Wasserwirtschaft vornehmen zu können.

Gesetzliche Rahmenbedingung weiterentwickeln

Im Zuge der Umsetzung der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht wird der Gesetzgeber entscheiden müssen, ob die bisher für KRITIS-Betreiber geltenden Anforderungen weitgehend unverändert auch für die neu verpflichteten mittleren Unternehmen übernommen werden sollen oder ob für diese Gruppe weniger strenge Anforderungen an die Informationssicherheit gestellt werden. Da gemäß den Betreiberbefragungen die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen selbst für große KRITIS-Betreiber eine Herausforderung darstellt, könnte ein abgestuftes Vorgehen sinnvoll sein, um mittlere Unternehmen nicht zu überfordern. Die NIS-2-Richtlinie lässt eine Abstufung des Anforderungsniveaus in Abhängigkeit von der Unternehmensgröße prinzipiell zu.

Auch nach Überführung der Vorgaben der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht wird es für die große Zahl an kleinen Unternehmen keine gesetzlichen Vorgaben zur Informationssicherheit geben. Angesichts der nicht auszuschließenden Möglichkeit für gleichzeitig auftretende IT-Störungen bei mehreren Unternehmen (z. B. durch parallel ausgeführte Cyberangriffe) wären gesetzliche Mindestanforderungen zum Schutz der IT-Systeme ggf. auch für kleine Unternehmen zu prüfen. Eine Möglichkeit dazu besteht darin, bei den regelsetzenden Fachverbänden DVGW und DWA darauf hinzuwirken, dass Mindeststandards der Informationssicherheit als Arbeitsblätter in ihren Regelwerken umgesetzt werden, die (bzw. dazu gleichwertige Maßnahmen) dann im Wege des Wasserrechts als allgemein anerkannte Regeln der Technik von allen Unternehmen umgesetzt werden müssten. Alternativ dazu könnte im Zuge der Umsetzung der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht der Anwendungsbereich der Regelungen des BSIG über mittlere und große Unternehmen hinaus auch auf kleine Betreiber ausgedehnt werden, wobei auch hier spezifische Mindestanforderungen für diese Zielgruppe zu entwickeln wären.

Wissenslücken schließen

Fundierte Kenntnisse zum jeweils aktuellen Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft sind für Politik, Behörden, Verbände und Unternehmen



notwendig, um mögliche Gefährdungen frühzeitig erkennen und geeignete Maßnahmen rechtzeitig ergreifen zu können. Für KMU, die nicht unter die Regelungen des BSIG fallen, liegen derzeit allerdings nur äußerst lückenhafte Informationen vor. Empirische Studien sind daher dringend geboten, um den Status quo der Informationssicherheit sowie Herausforderungen bei kleinen und mittleren Unternehmen vertieft untersuchen und Handlungsnotwendigkeiten ableiten zu können.

Weil Prozess-IT-Installationen infolge der Vernetzung vieler Anlagen selbst in kleinen Unternehmen eine hohe Systemkomplexität erreichen, stellt die Ermittlung von spezifischen Gefährdungen der Informationssicherheit generell eine Herausforderung dar. Hierfür notwendige umfassende Sicherheitsanalysen wie Penetrationstests sind im Echtzeitbetrieb in der Regel nicht möglich. Abhilfe könnten Testumgebungen schaffen, die als physische oder virtuelle Modelle realisiert werden und es beispielsweise erlauben, Szenarien von Cyberangriffen auf gängige Prozess-IT-Installationen der Wasserwirtschaft zu simulieren. Die Entwicklung von Testumgebungen für die Wasserwirtschaft hat bereits begonnen und sollte durch die Forschungsförderung fortgesetzt und ggf. ausgebaut werden.

Schlussbemerkung

Seit dem Einzug von Informationstechnik in den 1980er Jahren spielen Digitalisierungsprozesse für die Betreiber der Abfall- und Wasserwirtschaft eine immer wichtigere Rolle. Ging es bisher meist um die Optimierung und Automatisierung von einzelnen Betriebs- oder Verwaltungsprozessen, werden künftige Potenziale vor allem im Kontext der großen Herausforderungen unserer Zeit, wie der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen, der Beherrschung von Klimawandelfolgen, der Ressourcenknappheit oder dem Fachkräftemangel, gesehen. Generell gilt jedoch, dass die Digitalisierung immer nur ein Teil der Lösung für abfall- und wasserwirtschaftliche Problemstellungen sein kann, weshalb digitale Technologien stets in ganzheitliche Strategien zur Begegnung der künftigen Herausforderungen eingebettet werden müssen. Auch ist dafür Sorge zu tragen, dass sich die Digitalisierung nicht selbst zu einer Herausforderung für die Gewährleistung der Ver- und Entsorgungssicherheit entwickelt, etwa indem wichtige Kompetenzen der Mitarbeiter/innen für die Krisenbewältigung verloren gehen oder betriebskritische IT-Systeme anfälliger gegenüber Cyberangriffen oder anderen IT-bedingten Störungen werden. Deutlich wird, dass die Digitalisierung der Abfall- und Wasserwirtschaft Gestaltung braucht, damit Potenziale bestmöglich erschlossen und negative Folgewirkungen minimiert werden können. Dieser TAB-Bericht skizziert Gestaltungsoptionen und zeigt einen möglichen Orientierungsrahmen speziell für politisches Handeln auf, um den digitalen Fortschritt nachhaltig zu gestalten.

1 Einleitung

Die Dienstleistungen der Daseinsvorsorge – dazu zählen die Grundversorgung mit Wasser und Energie, die Abwasser- und Abfallentsorgung, aber beispielsweise auch Gesundheitsdienste, Bildung oder die Bereitstellung kultureller Einrichtungen – sind für die gesellschaftliche, wirtschaftliche und kulturelle Entwicklung unverzichtbar. Sie werden in Deutschland häufig durch die Kommunen (bzw. durch kommunale Unternehmen) bereitgestellt, weshalb sich auch Begriff der kommunalen Daseinsvorsorge durchgesetzt hat. Wegen ihrer hohen Bedeutung für das Gemeinwesen werden viele dieser Dienstleistungen bzw. die zu ihrer Erbringung notwendigen Infrastrukturen auch zu den Kritischen Infrastrukturen gezählt, bei deren Ausfall erhebliche Versorgungsengpässe drohen würden und die daher als besonders schützenswert gelten.

Die Sicherstellung der Dienstleistungen der kommunalen Daseinsvorsorge bzw. der Schutz kritischer kommunaler Infrastrukturen stellt Kommunen bzw. die mit der Erfüllung der Aufgaben beauftragten Unternehmen vor wachsende Herausforderungen. Nicht nur aktuelle Umbrüche durch die COVID-19-Pandemie oder den russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine und die damit einhergehende angespannte sicherheits- und energiepolitische Lage, sondern auch langfristige klimatische oder demografische Veränderungen machen Anpassungen in betrieblichen Prozessen und in der Arbeitsorganisation notwendig.

Eine zentrale Rolle hierbei wird der Digitalisierung zugesprochen. Digitale Technologien bieten vielfältige Möglichkeiten für Effizienz- und Qualitätssteigerungen in betriebswirtschaftlichen und technischen Prozessen. Außerdem eröffnet sie Optionen, um durch intelligente Betriebsweisen auf außergewöhnliche Situationen wie klimabedingte Extremwetterereignisse besser zu reagieren. Schließlich wird die Digitalisierung auch als entscheidende Voraussetzung für die Verwirklichung von Nachhaltigkeitszielen und die Sicherung der Zukunftsfähigkeit von Städten und Gemeinden gesehen, indem mit ihrer Hilfe innovative und umweltfreundliche Konzepte für die Mobilitätswende, für eine sichere Versorgung mit Energie und Wasser oder zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft entwickelt werden.

Zugleich aber stellt die Digitalisierung die unter Sparzwängen stehenden Kommunen auch vor Schwierigkeiten. Neben den hohen Kosten für die notwendige IT-Infrastruktur sehen sich Kommunen und Versorgungsunternehmen strukturellen Veränderungen ausgesetzt. Außerdem müssen notwendige Digitalkompetenzen vielfach erst noch aufgebaut werden, damit digitale Technologien eingeführt und erfolgreich eingesetzt werden können. Schließlich erhöht sich durch die Digitalisierung auch die Anfälligkeit der Versorgungsinfrastrukturen gegenüber Cyberangriffen und anderen IT-bedingten Störungen, was die Anforderungen an den Schutz Kritischer Infrastrukturen weiter erhöht.



Vor diesem Hintergrund wurde das Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) vom Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages beauftragt, ein TA-Projekt zu den Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Wasser- und Abfallwirtschaft durchzuführen.

Zielsetzung des TA-Projekts

Das Ziel des TA-Projekts bzw. mit dem vorliegenden Bericht ist es, die Anwendungsfelder und Potenziale der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen anhand von zwei Sektoren, der kommunalen Abfallwirtschaft sowie der kommunalen Wasserwirtschaft, aufzuzeigen. Der Stand der Digitalisierung und mögliche Einsatz- und Entwicklungspotenziale digitaler Technologien für Unternehmen der Abfall- und Wasserwirtschaft stehen im Fokus der Untersuchung. Im Vergleich zur Abfallwirtschaft ist der Stand in der Wasserwirtschaft schon weiter vorangeschritten, daher werden für diesen Versorgungsbereich die Potentiale der Digitalisierung für den Normalbetrieb als auch für die Bewältigung von Ausnahmesituationen eingehender analysiert. Darauf aufbauend widmet sich die vorliegende Analyse vor dem Hintergrund einer weiter vorangeschrittenen Digitalisierung in der kommunalen Wasser- und Abwasserwirtschaft der Frage, unter welchen Rahmenbedingungen diese Potenziale bei gleichzeitiger Gewährleistung der Ver- bzw. Entsorgungssicherheit ausgeschöpft werden können und geht dabei auf die Anforderungen der IT-Sicherheit im Bereich Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung ein. Die Analyse bildet die Grundlage für die Ableitung politischer Handlungsoptionen, um die Chancen der Digitalisierung für kritische kommunale Infrastrukturen zu fördern und damit verbundene Risiken zu minimieren.

Zusammenarbeit mit Gutachtern und Danksagung

Zur fachlichen Fundierung dieses Berichts wurden fünf Gutachten vergeben:

- Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen am Beispiel der Abfallwirtschaft. Holger Berg, Philipp Bendix, Jana Nicolas, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; Jörg Wagner, Marko Günther, INTECTUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Wuppertal
- Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Sabine Thaler, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef



- › Gutachten zu den Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen am Beispiel der Wasserver- und Abwasserentsorgung. Prof. Dr. Mark Oelmann, Christoph Czichy, Mocons GmbH & Co. KG, Mühlheim
- › Präventive Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft: Stand und Herausforderung. Prof. Dr. René Treibert, Erfan Koza, Asiye Öztürk, Clavis Institut für Informationssicherheit der Hochschule Niederrhein, Mönchengladbach
- › »Vor die Lage kommen«: Auswirkungen der Digitalisierung für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Wasserwirtschaft. Dr. Leon Hempel, Steffen Wunderlich, Eva Platzer, Berlin

Ergänzend zu den Gutachten wurden vom TAB eigenständige Recherchen, Analysen sowie Experteninterviews vorgenommen. Die Verantwortung für die Auswahl, Strukturierung und Interpretation der Gutachtenergebnisse liegt bei den Autorinnen Dr. Pauline Rioussset und Dr. Saskia Steiger sowie dem Autor Dr. Claudio Caviezel des vorliegenden Berichts. An dieser Stelle sei den Gutachterinnen und Gutachtern für die Bereitschaft zur Kooperation und Kommunikation herzlich gedankt. Dank gebührt ebenfalls Dr. Christoph Revermann und Dr. Arnold Sauter für die Durchsicht und Kommentierung von Entwurfsversionen sowie Carmen Dienhardt und Brigitta-Ulrike Goelsdorf für die redaktionelle Bearbeitung des Manuskripts und die Erstellung des Layouts.

Struktur des Berichts

Der vorliegende TAB-Arbeitsbericht ist wie folgt aufgebaut: Kapitel 2 dient der thematischen und begrifflichen Einführung. Das in diesem Bericht verwendete Begriffsverständnis von Digitalisierung wird erörtert, außerdem werden die Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge sowie der Schutz Kritischer Infrastrukturen in Deutschland in seiner historisch-politischen Entwicklung dargestellt. In den folgenden beiden Kapiteln werden die Chancen und Risiken der Digitalisierung kommunaler Infrastrukturen an den Beispielen der Abfallwirtschaft (Kap. 3) und der Wasserwirtschaft (Kap. 4) dargelegt. Zunächst wird ein Branchenüberblick gegeben und Ziele, Anforderungen, Aufgabenbereiche, marktwirtschaftliche Strukturen sowie Herausforderungen in der Abfall- und Wasserwirtschaft beschrieben. Daran anschließend werden der Status quo und die Perspektiven der Digitalisierung für die beiden Branchen erörtert. Auf dieser Grundlage erfolgt sodann eine Analyse der Potenziale digitaler Technologien, aber auch ihrer Grenzen vor dem Hintergrund der jeweiligen Herausforderungen. Die beiden Kapitel schließen mit der Darstellung von politischen Handlungsfeldern für eine weiterführende Entwicklung der Chancen der Digitalisierung kommunaler Infrastrukturen. In Kapitel 5 werden am Beispiel der Wasserwirtschaft die Implikationen einer voranschreitenden Digitalisierung kommu-



naler Infrastrukturen aus dem Blickwinkel der Informationssicherheit behandelt. Im Fokus der Betrachtungen stehen die potenziellen Gefährdungen der Informationssicherheit sowie notwendige präventive Maßnahmen, um diese Gefährdungen zu beseitigen. Im abschließenden Kapitel 6 werden übergreifende Schlussbetrachtungen formuliert. Dabei wird insbesondere auf die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen beiden Sektoren eingegangen.

2 Thematische und begriffliche Einführung

Die Analyse von Digitalisierungsprozessen in kritischen kommunalen Infrastrukturen an den Beispielen der Abfall- und Wasserwirtschaft erfordert Wissensbestände aus unterschiedlichen Politikfeldern (z. B. Daseinsvorsorge, Ressourcenpolitik, Schutz kritischer Infrastrukturen) und Disziplinen (z. B. Technik, Umweltökonomik, Recht) zusammenzubringen. Aufgrund der Vielzahl der zu untersuchenden Aspekte ist zunächst eine Abgrenzung des Untersuchungsgegenstands vonnöten, außerdem müssen Begrifflichkeiten geklärt werden.

Die *Digitalisierung* wird in der öffentlichen Diskussion, aber auch in Fachkreisen unterschiedlich definiert und abgegrenzt. Mit dem Begriff verbinden sich je nach Auslegung unterschiedliche Prozesse, angefangen von der bereits erfolgten Computerisierung über laufende Automatisierungsanstrengungen bis hin zu einer umfassenden Vernetzung digitaler Technologien im Sinne von 4.0-Visionen. Eine präzise akzeptierte Definition existiert bislang nicht. Im folgenden Kapitel 2.1 wird eine Möglichkeit der Systematisierung skizziert, um die Bestimmung des Status quo von Digitalisierungsmaßnahmen in Unternehmen der Abfall- und Wasserwirtschaft zu ermöglichen. Daraufhin wird der Begriff der *Daseinsvorsorge* (Kap. 2.2) eingeführt, der historisch gewachsen und einer begrifflichen Konkretisierung bedarf (Scheller 2017, S. 39). Zum Schluss werden *Kritische Infrastrukturen* in Deutschland definiert. Die Definition Kritischer Infrastrukturen unterlag im Zeitverlauf einigen Veränderungen, die sich aus der Dynamik des gesellschaftlichen und technischen Wandels sowie der Entwicklung des Politikfeldes zu ihrem Schutz ergeben haben. Auf diese Entwicklungen und den aktuellen Stand geht Kapitel 2.3 ein.

2.1 Digitalisierung als kontinuierlicher Prozess

Der Begriff der Digitalisierung wird zumeist unscharf verwendet. Darunter werden digitale Technologien oder Softwareprodukte verstanden, die sowohl der einfachen Automatisierung von Betriebsabläufen dienen können als auch die Grundlage für eine Vernetzung von Einzelprozessen bilden, damit eine weitergehende Automatisierung und Autonomisierung von Betriebsprozessen erfolgen kann. Aus der technologischen Perspektive umfasst die Digitalisierung verschiedene Entwicklungen:

- › Überführung von Informationen in maschinenlesbare Daten, um sie mithilfe von Computersystemen speicher- und verarbeitbar zu machen;
- › Algorithmen, um Eingabedaten nach festgelegten Regeln in Ausgabedaten zu verarbeiten;



- › Automatisierung als der Einsatz von Geräten, um physische Handlungen des Menschen (teilweise) zu ersetzen;
- › Autonomie, um lernende Systeme in die Lage zu versetzen, ohne menschliches Eingreifen in komplexen Umgebungen zu funktionieren (Müller-Brehm et al. 2020).

Bei der Digitalisierung handelt es sich somit um einen kontinuierlichen Prozess, der von der Computerisierung ab den 1970er Jahren über die zunehmende Automatisierung einzelner Aufgaben bzw. Prozesse und die Vernetzung einzelner Anwendungen zu größeren Systemen bis hin zur Vision einer Digitalisierung 4.0 eines autonom agierenden Gesamtsystems reicht. Um den Prozess der Digitalisierung zu beschreiben, wurde für das Beispiel der Wasserversorgung ein Reifegradmodell entwickelt (Oelmann et al. 2021). Hierbei wird für jeden Prozess und jede Wertschöpfungsstufe eines wasserwirtschaftlichen Unternehmens eine von sechs Reifegradstufen ermittelt (Abb. 2.1).

Abb. 2.1 Stufen des Reifegradmodells Wasserversorgung 4.0



Quelle: nach Oelmann et al. 2019, S. 39

Die ersten beiden Stufen, die Computerisierung und die Konnektivität, stellen die Grundlagen für Digitalisierungsprozesse in einem Unternehmen dar. Unter Computerisierung wird die Einführung von Informationstechnologien (IT) für einzelne Betriebsprozesse verstanden, um repetitive Aufgaben effizienter zu

gestalten. Die Konnektivität beschreibt die Verknüpfung von IT mit Betriebsprozessen, wodurch Betreiber Informationen und Zugriff auf bestimmte Prozesse erhalten. Erst mit der dritten Stufe, der Sichtbarkeit, werden Betriebsprozesse von Anfang bis Ende unternehmensweit erfasst. Die gewonnenen Daten stehen zentral zur Verfügung und erlauben die Generierung eines digitalen Unternehmensabbilds. Daran schließt sich die vierte Stufe der Digitalisierung (Verständnis) an. Hier werden historische und Echtzeitdaten analysiert, um Erkenntnisse abzuleiten, die Betreiber bei komplexen Entscheidungen als Unterstützung dienen. Darauf aufbauend erfolgt in Stufe fünf (Prognosefähigkeit) die weitere Verwendung erfasster Daten für Simulationen und Szenarioanalysen, die es den Betreiber ermöglichen, vorausschauende Entscheidungen zu treffen. Die sechste und letzte Stufe der Digitalisierung beschreibt schließlich die Adaptierbarkeit, bei welcher Betriebsprozesse, wo sinnvoll, vollständig automatisiert sind. Die Systeme können auf akute und künftige Ereignisse autonom reagieren und sich selbst optimieren (Hein/Offermann 2019, S. 38).

Das Reifegradmodell kann bei der Bestimmung des Status quo Unterstützung bieten, um in der Branche zu beobachtende Entwicklungen strukturiert einzuordnen. Diese Systematisierung diene als Hintergrundfolie für die vorliegende Analyse des Stands und der Perspektiven der Digitalisierung in beiden Branchen (Oelmann/Czichy 2020, S. 54).

2.2 Wasser- und Abfallwirtschaft als Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge

Die Daseinsvorsorge wird als staatliche Aufgabe zur Bereitstellung der für »ein sinnvolles menschliches Dasein notwendigen Güter und Leistungen« verstanden (WD 2006, S. 2). Das Prinzip der Daseinsvorsorge ist verfassungsrechtlich im Sozialstaatsprinzip verankert (Art. 20 Abs. 1 Grundgesetz – GG¹³). Sie umfasst u. a. die Grundversorgung mit Wasser und Energie, die Abwasser- und Abfallentsorgung, der öffentliche Personennahverkehr, die Versorgung der Bürger mit Gesundheitsdiensten, die Bereitstellung von Wohnraum und von Bildungseinrichtungen oder kulturelle Einrichtungen wie Theater, Museen oder Sporteinrichtungen (Bogumil/Holtkamp 2013, S. 217). Da nach dem GG (Art. 30 Abs. 83) die Verwaltung in Deutschland vor allem Aufgabe der Länder und der Gemeinden ist und die Gemeinden außerdem Angelegenheiten der örtlichen Gemeinschaft in Eigenverantwortung erledigen dürfen (Art. 28 Abs. 2), werden die Aufgabe der Daseinsvorsorge zumeist durch die Kommunen als Selbstverwaltungsangelegenheiten erfüllt, weshalb auch der Begriff der kommunalen Daseinsvorsorge Verwendung findet (Bogumil/Holtkamp 2013, S. 16 ff.).

13 Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland in der veröffentlichten bereinigten Fassung, zuletzt am 19.12.2022 geändert



Konkretisiert wird das Prinzip der kommunalen Daseinsvorsorge in den Gemeindeordnungen der Bundesländer (WD 2006, S.2). Nach dem Recht auf kommunale Selbstverwaltung können Kommunen überwiegend frei entscheiden, wie sie diese Fürsorge ausüben. So können Kommunen rechtlich selbstständige Organisationseinheiten gründen, die dem Gemeinwohl verpflichtet sind und die jeweiligen Aufgaben ausführen, wobei jedoch die Verantwortung für die Aufgabenerfüllung bei den Kommunen verbleibt. Spätestens seit den 1980er Jahren haben die Kommunen in großem Umfang Leistungen der Daseinsvorsorge auf Dritte übertragen, bei denen es sich in steigendem Maße um privatrechtliche Akteure handelt (WD 2006, S.3). Die Gewährleistung der Daseinsvorsorge als kommunale Aufgabe ist zu einer geteilten Aufgabe von Kommunen und privater Wirtschaft geworden, deren inhaltliche und organisatorische Ausgestaltung sowie die quantitativen und qualitativen Standards der Leistungserbringung fortwährend und vor allem vor Ort in den Kommunen ausgehandelt werden (Beukert et al. 2021, S. 10 f.; Sack 2022, S. 17).

2.3 Kritische Infrastrukturen in Deutschland

Einige der Infrastrukturen, die dazu dienen, die kommunale Aufgaben der Daseinsvorsorge zu erbringen, werden zugleich auch zu den *Kritischen Infrastrukturen* gezählt. Kritische Infrastrukturen bezeichnen Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung Versorgungsengpässe, Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden. Entsprechend stellt die Gewährleistung des Schutzes Kritischer Infrastrukturen eine »Kernaufgabe staatlicher und unternehmerischer Sicherheitsvorsorge und zentrales Thema der Sicherheitspolitik« dar (BMI 2009, S.2 f.). Die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung sowie seit Kurzem auch die Siedlungsabfallentsorgung werden in Deutschland zu den Kritischen Infrastrukturen gezählt. Wie sich das Politikfeld zum Schutz Kritischer Infrastrukturen seit Ende der 1990er Jahren formierte, welche Akteure in die Pflicht genommen werden, wie die Zusammenarbeit zwischen öffentlichen und privaten Akteuren organisiert ist und welche gesetzlichen Regelungen zum Schutz Kritischer Infrastrukturen bestehen, dies wird im folgenden Kapitel erläutert. Die Ausführungen basieren größtenteils auf der Publikation des BBK (2020, S. 17 ff.).

2.3.1 Anfänge des Politikfeldes zum Schutz Kritischer Infrastrukturen

Erste politische Schritte zum Schutz Kritischer Infrastrukturen in Deutschland wurden 1997 mit der Einrichtung einer ressortübergreifenden Arbeitsgruppe AG KRITIS auf Initiative des Bundesministeriums des Innern (BMI) unter-



nommen. Einen wichtigen Anstoß dazu gaben die Arbeiten der US-amerikanischen President's Commission on Critical Infrastructure Protection (PCCIP 1997, S. vii), die insbesondere auf bestehende und wachsende Gefahren aus dem Cyberraum aufmerksam machte. Die AG KRITIS hatte die Aufgabe, Bedrohungsszenarien aufzuzeigen, über die Informationstechnik angreifbare Schwachstellen in den Infrastrukturen zu identifizieren und Möglichkeiten zur Vermeidung oder Verminderung potenzieller Schäden zu erarbeiten. Als Kritische Infrastrukturen wurden Organisationen und Einrichtungen mit (lebens)wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen definiert, bei deren Ausfall oder Störungen für größere Bevölkerungsgruppen nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe oder andere dramatische Folgen eintreten. Ein Ergebnis der AG KRITIS war 1998 die Schaffung des ersten Referats auf Bundesebene im BSI, das sich dezidiert dem Schutz Kritischer Infrastrukturen widmete. Die Arbeit der AG KRITIS endete im Jahr 2000.

Die weiteren Entwicklungen wurden vor allem durch die Terroranschläge vom 11. September 2001 geprägt. Als Reaktion darauf richtete das BMI 2002 die ressortübergreifende Projektgruppe KRITIS ein, die den Schutz Kritischer Infrastrukturen an einem breiteren Gefahrenansatz ausrichtete und neben Aspekten der Informationssicherheit auch den physischen Schutz in den Blick nahm. Analysen des BSI gelangten damals zum Ergebnis, dass in Bezug auf IT-Gefahren nur ein geringer Handlungsbedarf bestehe, während ein hohes Gefährdungspotenzial vor allem von physischen Bedrohungen ausginge. Parallel dazu verabschiedete die Innenministerkonferenz 2002 die »Neue Strategie zum Schutz der Bevölkerung in Deutschland«, die den Schutz Kritischer Infrastrukturen in den Kontext des Bevölkerungsschutzes stellte. Nach der Gründung des Bundesamts für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) im Jahr 2004 wurde hier die Organisationseinheit Zentrum Schutz Kritischer Infrastrukturen geschaffen. Seit dieser Zeit teilen sich zwei Bundesbehörden die Zuständigkeiten, das BSI verantwortet den Bereich der Informationssicherheit und das BBK den physischen Schutz von Kritischen Infrastrukturen.

In den Folgejahren führten vielfältige Aktivitäten zu generellen Empfehlungen, speziellen Handreichungen, strategischen Zielsetzungen oder ersten organisatorischen Strukturen. Ein Beispiel ist der 2005 durch das BMI herausgegebene »Nationale Plan zum Schutz der Informationsinfrastrukturen« (NPSI), der sich vorrangig an die Betreiber der Kritischen Infrastrukturen und die Bundesbehörden richtete und strategische Ziele in den Bereichen Prävention, Reaktion und Nachhaltigkeit von Schutzmaßnahmen vorgab (BMI 2005, S. 6). Für die Konkretisierung und Operationalisierung dieser Ziele wurde 2007 von der Bundesregierung in Zusammenarbeit mit den Betreibern von Kritischen Infrastrukturen der »Umsetzungsplan KRITIS« (BMI 2007) erstellt,¹⁴ der u. a. die

14 Für die Bundesbehörden wurde entsprechend der »Umsetzungsplan für die Gewährleistung der IT-Sicherheit in der Bundesverwaltung« (Umsetzungsplan Bund) erstellt.



Grundlage für die Institutionalisierung der Kooperation zwischen staatlichen Stellen, Betreibern und Fachverbänden im Rahmen des »UP KRITIS« legte.

2.3.2 Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen

Ab 2007 begannen Überlegungen zur Einbettung der bis dato implementierten Maßnahmen in eine übergeordnete Gesamtstrategie, die 2009 in der Verabschiedung der »Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen« (KRITIS-Strategie) (BMI 2009) mündeten. Zentrale Elemente aus den vorangegangenen Aktivitäten werden in der KRITIS-Strategie weitergeführt, so u. a. die Berücksichtigung eines breiten Gefahrenspektrums (All-Gefahren-Ansatz) oder die Ausrichtung des Schutzes Kritischer Infrastrukturen an den strategischen Zielen Prävention, Reaktion und Nachhaltigkeit.

Die KRITIS-Strategie richtet sich in erster Linie an den Bund. Der Schutz der Kritischen Infrastrukturen wird jedoch als gemeinsame Aufgabe von Staat, Wirtschaft und Öffentlichkeit erkannt, sodass auch weitere staatliche Stellen auf allen Ebenen, die Betreiber der Kritischen Infrastrukturen und ihre Verbände, die Wissenschaft und Forschung und nicht zuletzt auch die Bevölkerung angesprochen wird. Besondere Bedeutung wird vor allem einer vertrauensvollen und konstruktiven Zusammenarbeit zwischen den staatlichen Stellen und den vorwiegend privatwirtschaftlich organisierten Betreibern beigemessen. Freiwilligen Selbstverpflichtungen der Wirtschaft wird daher grundsätzlich Vorrang vor gesetzlichen Regelungen eingeräumt (BMI 2009, S. 2). Entsprechend existiert in Deutschland auch kein übergreifendes Gesetz für den Schutz der Kritischen Infrastrukturen, obschon im Laufe der Zeit einzelne Aspekte in Fachgesetzen geregelt wurden.

Die Ausgestaltung der Zusammenarbeit zwischen staatlichen und privaten Akteuren wird in der KRITIS-Strategie nur skizziert. Als wesentliche Arbeitspakete werden die Festlegung allgemeiner Schutzziele, die Analyse und Bewertung von Gefährdungen, die Festlegung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen (in erster Linie durch Verbandslösungen, interne Regelwerke oder unternehmenseigene Schutzkonzepte) sowie ein kontinuierlicher Risikokommunikationsprozess genannt. Zur Umsetzung dieser Schritte sollen institutionalisierte Plattformen zwischen Staat, Behörden, Unternehmen und Verbänden organisiert werden (BMI 2009, S. 14 f.).

2.3.3 Schutz der Kritischen Infrastrukturen als öffentlich-private Kooperation – UP KRITIS

Eine solche Plattform der Zusammenarbeit ist der UP KRITIS, die bereits 2007 im Zuge der Implementierung des »Umsetzungsplan KRITIS« etabliert wurde. Bis 2013 diente die Plattform dem Austausch zwischen den Betreibern Kri-

tischer Infrastrukturen und den zuständigen Bundesbehörden vor allem in Bezug auf Aspekte der Informationssicherheit. Zu den Ergebnissen der Zusammenarbeit zählen Empfehlungen z. B. zur Früherkennung und Bewältigung von IT-Krisen (UP KRITIS 2014), aber auch interne Studien z. B. zu IT-Abhängigkeiten. 2014 wurde UP KRITIS inhaltlich und strukturell neu aufgestellt, um einerseits auch den physischen Schutz der Kritischen Infrastrukturen verstärkt in den Blick zu nehmen (der Schwerpunkt bleibt aber der Schutz der IT-Systeme in kritischen Prozessen) und andererseits die Plattform für einen breiteren Teilnehmerkreis (vor allem für nationale Branchen- und Fachverbände und zuständige Landesbehörden) zu öffnen. Die Zahl der Teilnehmer/innen ist entsprechend von rund 120 im Jahr 2014 (Lieberknecht 2014, S. 12) auf 840 Unternehmen und Behörden im Oktober 2022 (BSI 2022b, S. 70) angewachsen. Die Arbeitsweise im UP KRITIS wird in Kapitel 5.3.1 vorgestellt.

2.3.4 Schutz Kritischer Infrastrukturen in der Gesetzgebung des Bundes

Dem Ansatz der freiwilligen Selbstverpflichtung der KRITIS-Strategie folgend sollen gesetzliche Regelungen nur dann greifen, wenn erhebliche festgestellte Sicherheitsmängel auf freiwilliger Basis nicht beseitigt werden bzw. bestehende gesetzliche Regelungen aufgrund neuer Gefahren und Risiken nicht ausreichenden Schutz bieten (BMI 2009, S. 12 f.). Dies und die Notwendigkeit, Vorgaben von europäischer Ebene in deutsches Recht zu überführen, haben im Laufe der Zeit dazu geführt, dass einzelne Aspekte des Schutzes Kritischer Infrastrukturen in Fachgesetzen festgeschrieben wurden.

Der Schutz der Informationssicherheit nimmt in diesem Kontext eine besondere Rolle ein. Die Prüfung regulatorischer Instrumente in diesem Bereich wurde erstmals im Rahmen der »Cyber-Sicherheitsstrategie für Deutschland«, die 2011 den NPSI von 2005 ablöste, in Erwägung gezogen. Angesichts der wachsenden Bedrohung wurden in der Cyber-Sicherheitsstrategie Maßnahmen zur Stärkung der IT-Sicherheit erörtert, so im Bereich der Kritischen Informationsinfrastrukturen beispielsweise die Prüfung von rechtlichen Verpflichtungen zur stärkeren Verzahnung von Staat und Wirtschaft oder von gesetzlichen Vorgaben in Bezug auf Schutzmaßnahmen (BMI 2011a, S. 6 f.). Auch das BSI gelangte zur Einschätzung, dass der rein freiwillige Ansatz im Rahmen der öffentlich-privaten Kooperation UP KRITIS nicht ausreichend sei, um ein angemessenes IT-Sicherheitsniveau in allen KRITIS-Sektoren zu erreichen. So engagierten sich gemäß dem BSI (2015a, S. 41 ff.) nicht alle KRITIS-Sektoren im gleichen Maße im UP KRITIS und auch bei den Betreibern zeigten sich große Unterschiede hinsichtlich der Umsetzung von Schutzmaßnahmen. Diese Überlegungen und Feststellungen mündeten 2015 schließlich in das IT-Sicherheitsgesetz (Art. 1), durch das gesetzliche Regelungen zur Erhöhung der Informa-



tionssicherheit auch in Kritischen Infrastrukturen eingeführt wurden. Seitdem sind die Betreiber von Kritischen Infrastrukturen verpflichtet, bei IT-Systemen, die für die Funktionsfähigkeit der Kritischen Infrastrukturen maßgeblich sind, ein Mindestmaß an Informationssicherheit einzuhalten und dies gegenüber dem BSI auch regelmäßig nachzuweisen. Die rechtlichen Rahmenbedingungen zum Schutz der Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen werden in Kapitel 5.2.2 für den Sektor Wasser vertieft erörtert.

2.3.5 Festlegung der Kritischen Infrastrukturen

Im Fokus der Aktivitäten der 1997 eingesetzten AG KRITIS standen Organisationen und Einrichtungen aus insgesamt sieben Sektoren: Energie, Telekommunikation und Informationstechnik, Transport und Verkehrswesen, Gesundheitswesen, Notfall- und Rettungswesen, Finanz- und Versicherungswesen sowie Behörden und Verwaltung. Die Trinkwasserversorgung wurde damals als Teil des Gesundheitswesens betrachtet, während die Abwasserbeseitigung und die Abfallentsorgung noch nicht als Kritische Infrastrukturen identifiziert wurden (BBK 2020, S.23). Seit dieser ersten Einteilung hat sich die Zuordnung der Sektoren der Kritischen Infrastrukturen mehrfach gewandelt, so auch im Hinblick auf die Wasser- und Abfallwirtschaft. Die ab 2002 aktive Projektgruppe KRITIS führte den neuen Sektor Versorgung ein, wozu auch die Wasserversorgung und die Entsorgung gezählt wurden (neben Gesundheits-, Notfall- und Rettungswesen, Katastrophenschutz und Lebensmittelversorgung; BMI 2005, S.21). 2 Jahre nach Verabschiedung der KRITIS-Strategie wurde 2011 eine neue, zwischen Bund und Ländern abgestimmte Einteilung vorgenommen, die den bisherigen Sektor Versorgung zugunsten der drei neuen Sektoren Ernährung, Gesundheit und Wasser wieder auflöste (BMI 2011b, S. 8). Die nun neun Sektoren (dazu zählen außerdem Energie, Informationstechnik und Telekommunikation, Transport und Verkehr, Finanz- und Versicherungswesen, Staat und Verwaltung, Medien und Kultur) wurden auf Bundesebene in 29 Branchen weiter differenziert, so z. B. der Sektor Wasser in die öffentliche Wasserversorgung und die öffentliche Abwasserbeseitigung (BBK 2020, S. 24). Aus dem Bereich der Entsorgung wurden – von der Wasserbeseitigung abgesehen – keine Sektoren bzw. Branchen als Kritische Infrastrukturen identifiziert (Tab. 2.1).

Eine weitere Definition für Kritische Infrastrukturen wurde 2015 mit dem IT-Sicherheitsgesetz bzw. mit der damit einhergehenden Novellierung des BSIG eingeführt. Eine rechtsverbindliche Definition wurde nötig, weil das BSIG den Betreibern Kritischer Infrastrukturen gesetzliche Pflichten zum Schutz ihrer IT-Systeme auferlegt. Die Festlegung der *Kritischen Infrastrukturen im Sinne des BSIG* basiert zunächst auf der Sektoreneinteilung von Bund und Ländern, allerdings ohne die beiden Sektoren Medien und Kultur sowie Staat und Verwaltung. Im Gegensatz zur Definition von Bund und Ländern

jedoch handelt es sich gemäß BSIG bei den Kritischen Infrastrukturen nicht um ganze Sektoren bzw. alle dazugehörigen Organisationen, sondern nur um einzelne Einrichtungen oder Anlagen in diesen Sektoren, die kritische Dienstleistungen erbringen, also Dienstleistungen, deren Ausfall oder Beeinträchtigung zu erheblichen Versorgungsengpässen oder zu Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit führen würden. Ob Einrichtungen oder Anlagen solche kritischen Dienstleistungen erbringen, ist vom Erreichen oder Überschreiten von Schwellenwerten abhängig. Die Höhe dieser Schwellenwerte ist für die verschiedenen Anlagenkategorien, die kritische Dienstleistungen erbringen, in der BSI-Kritisverordnung (BSI-KritisV)¹⁵ festgelegt (dazu ausführlich für den Sektor Wasser Kap. 5.2.2).

Tab. 2.1 Einteilung der Sektoren in Kritische Infrastrukturen (Stand Januar 2023)

Sektoreneinteilung gemäß Bund und Länder	Sektoreneinteilung gemäß BSIG
Energie	Energie
Ernährung	Ernährung
Finanz- und Versicherungswirtschaft	Finanz- und Versicherungswesen
Gesundheit	Gesundheit
Informationstechnik und Telekommunikation	Informationstechnik und Telekommunikation
Medien und Kultur	Siedlungsabfallentsorgung
Staat und Verwaltung	
Transport und Verkehr	Transport und Verkehr
Wasser	Wasser

Eigene Zusammenstellung nach BBK 2020, S.24, und §2 Abs.10 Nr.1 BSIG (23.6.2021)

2021 wurde im Rahmen der Novellierung des BSIG durch das zweite IT-Sicherheitsgesetz (Art. 1)¹⁶ mit der Siedlungsabfallentsorgung schließlich ein neuer KRITIS-Sektor hinzugefügt (Tab. 2.1). Für diesen Sektor steht die Bestimmung von kritischen Dienstleistungen und Schwellenwerten in der BSI-KritisV noch aus (Stand Januar 2023).

¹⁵ BSI-Kritisverordnung vom 22. April, zuletzt am 6.9.2021 geändert

¹⁶ Zweites Gesetz zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme vom 18.5.2021



2.3.6 Ausblick

Im Dezember 2022 beschloss die Bundesregierung Eckpunkte für ein KRITIS-Dachgesetz. Mit dem KRITIS-Dachgesetz sollen sektorübergreifend Vorgaben und Strukturen zum physischen Schutz von Kritischen Infrastrukturen gesetzlich geregelt werden, um bestehende Regelungen zum Schutz der Informationssicherheit zu ergänzen. Mit dem KRITIS-Dachgesetz werden u. a. folgende Ziele verfolgt (BMI 2022b):

- Die bestehende Bestimmung Kritischer Infrastrukturen soll durch eine systematische und umfassende Identifizierung aller besonders schützenswerten Infrastrukturen ergänzt werden.
- Mit regelmäßigen systematischen Risikobewertungen sollen Gefahren für die Kritischen Infrastrukturen künftig besser erkannt und Handlungsbedarfe abgeleitet werden.
- Den Betreibern von Kritischen Infrastrukturen sollen verbindliche Mindestvorgaben im Bereich der physischen Sicherheit auferlegt werden, um sie umfassend gegen Gefahren zu schützen und als Teil des Gesamtsystems resilienter zu machen.
- Die Einführung eines zentralen Störungsmonitorings soll ein Gesamtüberblick über mögliche Schwachstellen beim physischen Schutz Kritischer Infrastrukturen ermöglichen.
- Mit dem KRITIS-Dachgesetz soll der institutionelle Rahmen für den physischen Schutz Kritischer Infrastrukturen geschaffen werden. Dafür soll das BBK im Rahmen der Bundeszuständigkeit zur zentralen, übergreifenden Behörde für den physischen Schutz Kritischer Infrastrukturen ausgebaut werden.

Schließlich sollen mit dem KRITIS-Dachgesetz auch die Vorgaben der Richtlinie (EU) 2022/2557¹⁷ in nationales Recht umgesetzt werden.

¹⁷ Richtlinie (EU) 2022/2557 über die Resilienz kritischer Einrichtungen und zur Aufhebung der Richtlinie 2008/114/EG

3 Abfallwirtschaft

Die Siedlungsabfallentsorgung – und damit die Abfallwirtschaft – ist als kritischer Sektor ein relevanter Teil der staatlichen Daseinsvorsorge. Insbesondere die Kommunen stehen vor der Aufgabe, die Entsorgung von Siedlungsabfällen, also die Sammlung, Beseitigung und Verwertung der Abfälle, zu gewährleisten und die Sicherheit der dazugehörigen IT-Infrastrukturen der Siedlungsabfallentsorgung zu schützen. Welche Ziele, Aufgaben und Herausforderungen damit einher gehen, wird im Kapitel 3.1 eingeführt. Auf dieser Grundlage werden die zentralsten digitalen Technologien dargestellt, die zur Erledigung dieser Aufgaben Potenziale darstellen (Kap. 3.2). Anschließend wird erörtert, inwiefern die Trends der Digitalisierung in der Branche zu betriebs- und gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen, Auswirkungen auf Beschäftigungsstruktur und Arbeitsbedingungen und auf die Erreichung der politischen Ziele im Bereich Klima- und Ressourcenschutz führen könnten (Kap. 3.3). Welche Maßnahmen zur Erschließung der Potenziale beitragen können, ist Gegenstand des letzten Kapitels (Kap. 3.4). Dieses Kapitel legt den Fokus nicht auf die IT-Sicherheit.

3.1 Ziele, Aufgaben und Herausforderungen

In Kapitel 3.1.1 werden die Ziele der Abfallwirtschaft sowie Anforderungen, die an öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger (örE) gestellt werden und sich im deutschen Recht niederschlagen (Kap. 3.1.2), vorgestellt. In Kapitel 3.3.3 werden die zentralen Aufgaben von örE erörtert, in Kapitel 3.1.4 wird auf die marktwirtschaftlichen Strukturen eingegangen, bevor vor diesem Hintergrund in Kapitel 3.1.5 die Herausforderungen und Perspektiven der Branche dargestellt werden.

3.1.1 Ziele der Abfallwirtschaft

Vorrangiges Ziel der Abfallentsorgung in Deutschland ist es, Abfälle sicher und umweltschonend zu entsorgen. Dafür sind örE zuständig. Sie haben die Aufgabe, insbesondere die Abfälle aus privaten Haushalten und ihnen angediente haushaltsähnliche Gewerbeabfälle zu verwerten oder zu beseitigen (§§ 17 u. 20 KrWG). Durch die steigenden Herausforderungen – Ressourcen schonen, Klima schützen, Rohstoffversorgung sichern – ist die Abfallwirtschaft zunehmend gefordert, zu einer Kreislaufwirtschaft beizutragen. Diese beschreibt ein Modell der Produktion und des Verbrauchs, bei dem »bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt werden« (EP 2015). Über die Stärkung des Recyc-



lings hinaus rücken demnach die Abfallvermeidung und Vorbereitung zur Wiederverwendung in den Vordergrund der Aufgabenbereiche von öRE. Die Grundprinzipien der Abfallvermeidung und -verwertung wurden durch das 1996 in Kraft getretene Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz¹⁸ im deutschen Recht verankert (Berg et al. 2019, S. 17). Für öRE bedeutet die Erweiterung der Kreislaufwirtschaft insbesondere, dass Aktivitäten im Bereich der Information der Bürger/innen im Rahmen der Abfallberatung und zur Abfallvermeidung intensiviert werden (Berg et al. 2019, S. 68). Dadurch wird die reine Entsorgung allmählich zu einem Minimum reduziert (Berg et al. 2019, S. 123).

3.1.2 Deutsches Abfallrecht

Seit 1975 stecken europäische Vorgaben den Rahmen mit Abfällen fest, die dann durch nationale Gesetze konkretisiert wurden. Für den Vollzug sind die Bundesländer zuständig. Anschluss- und Benutzungszwang sowie Gebührensysteme werden schließlich auf kommunaler Ebene durch Abfallwirtschafts- und Abfallgebührensatzungen bestimmt. Nachfolgend werden lediglich rechtliche Regelungen beschrieben, die unmittelbar Wirkung auf die kommunale Abfallwirtschaft haben.

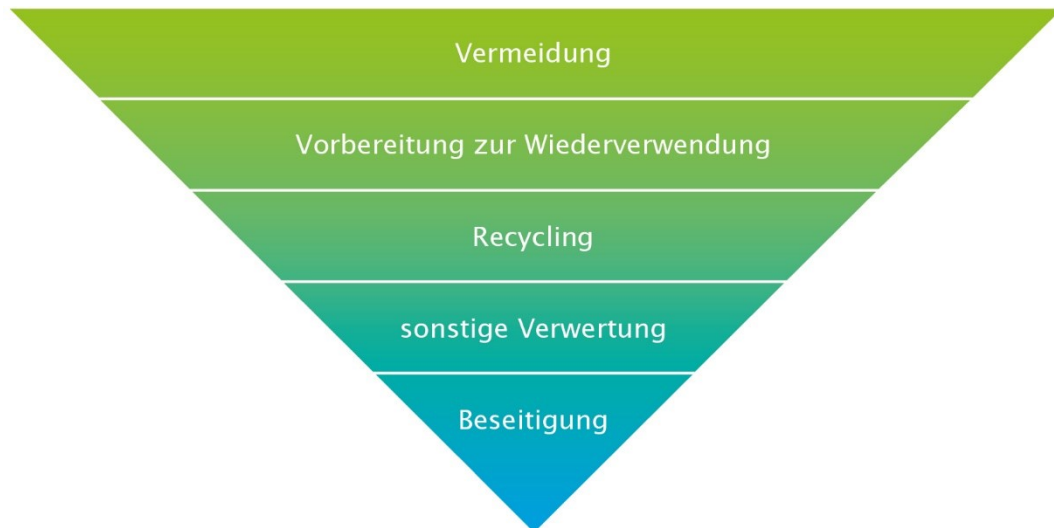
3.1.2.1 Grundprinzipien des Abfallrechts

Grundsätzlich unterliegen Abfälle in Europa der Warenverkehrs- und Wettbewerbsfreiheit. Nach den in Artikel 16 Abs. 1 der Richtlinie 2008/98/EG¹⁹ (Abfallrahmenrichtlinie) formulierten Grundsätzen der Entsorgungsautarkie und der Nähe für gemischte Siedlungsabfälle aus privaten Haushalten soll aber jeder Mitgliedstaat dafür Sorge tragen, dass ein integriertes und angemessenes Netz von Anlagen zur Verwertung und Beseitigung von Siedlungsabfällen errichtet wird. Artikel 4 der Abfallrahmenrichtlinie legt auch fest, wie Abfälle erfasst und entsorgt werden sollen. Die Basis für diese Regelungen bildet die Abfallhierarchie (Abb. 3.1): Vorrang hat die Vermeidung von Abfällen. Unvermeidbare Abfälle sollen prioritär stofflich genutzt, also für eine Wiederverwendung vorbereitet oder recycelt werden. Nicht stofflich nutzbare Abfälle sollen energetisch verwertet werden. Schließlich sollen nur noch Abfälle, die weder stofflich noch energetisch nutzbar sind, beseitigt werden.

18 Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz vom 27.9.1994 (außer Kraft)

19 Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, die zuletzt durch die Richtlinie (EU) 2018/851 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle geändert wurde

Abb. 3.1 Abfallhierarchie



Quelle: nach VDI ZRE o.J.

3.1.2.2 Verantwortungsbereich öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger

Die Vorgaben der Abfallrahmenrichtlinie werden durch das KrWG ins deutsche Recht umgesetzt. Abfälle im Sinne des § 3 KrWG sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Das KrWG regelt u. a., welche Abfälle dem örE zu überlassen sind und welche nicht.

Überlassungspflichten für Siedlungsabfälle

Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger – in der Regel Landkreise und kreisfreie Städte – sind grundsätzlich für die Entsorgung aller in ihrem Gebiet anfallenden Siedlungsabfälle zuständig. Dabei handelt es sich um Abfälle aus *privaten Haushaltungen*, die nicht in eigenen Anlagen verwertet werden (§ 17 u. § 20 KrWG). Abfälle sind zu verwerten oder, falls eine Verwertung nicht möglich ist, zu beseitigen. Grundsätzlich gilt, dass Abfälle zur Beseitigung in Deutschland nur deponiert werden dürfen, wenn zuvor verwertbare Bestandteile abgetrennt und der organische Anteil reduziert wurden (§ 6 Deponieverordnung²⁰). Für die Vorbereitung zur Wiederverwendung und das Recycling von Siedlungsabfällen legt § 14 KrWG quantitative Ziele fest.

Sofern es für die Vorbereitung zur Wiederverwendung, das Recycling oder andere Verwertungsverfahren erforderlich ist, sind Abfälle nach Art und Be-

²⁰ Deponieverordnung vom 27.4.2009, zuletzt am 30.6.2020 geändert



schaffenheit getrennt zu erfassen und zu behandeln (§ 9 KrWG). Die Getrenntsammlungspflicht betrifft gemäß § 20 Abs. 2 KrWG Papier, Pappe und Kartonen (PPK), Bioabfälle, Kunststoffabfälle, Metallabfälle, Glas, Textilabfälle, Sperrmüll und gefährliche Abfälle, wobei die Getrenntsammlungspflicht für Textilien erst ab dem 1. Januar 2025 gilt. Abfälle, die nicht verwertet werden können, können gemischt erfasst werden (Restabfall). Der Fremdstoffgehalt soll rechtlich festgesetzte Maximalgrenzen nicht überschreiten. Anforderungen an die Sammlung und Behandlung von Bioabfällen regelt die Bioabfallverordnung²¹, darunter auch den maximalen Kunststoffanteil in Bioabfällen, die kompostiert, vergärt oder mit anderen Stoffen gemischt werden.

Darüber hinaus sind öRE für Abfälle zur Beseitigung *aus anderen Herkunftsbereichen* (z. B. hausmüllähnliche Gewerbeabfälle), die nicht in eigenen Anlagen beseitigt werden, zuständig (§ 17 KrWG). In den meisten Bundesländern gilt dies auch für illegal abgelagerte Abfälle auf öffentlich zugänglichen Flächen, wenn der Besitzer dieser Abfälle nicht ermittelt werden kann.

Abfälle zur Verwertung, die der Verantwortung der öRE grundsätzlich nicht unterliegen

Ausnahmen von den Überlassungspflichten an die öRE (§ 17 Abs. 2 des KrWG) bestehen für folgende Abfallarten:

- *Abfälle, die einer Rücknahme und Rückgabepflicht im Sinne der Produktverantwortung unterliegen:* Gemäß § 25 KrWG werden Hersteller in die Pflicht genommen, das Entstehen von Abfällen zu vermindern sowie die Voraussetzungen für eine Wiederverwendung von Produkten oder einzelner Komponenten und eine umweltverträgliche Verwertung oder Beseitigung der zu Abfall gewordenen Güter zu ermöglichen. Das KrWG wird durch eine Reihe von Gesetzen und Rechtsverordnungen flankiert, die die produktspezifischen EU-Richtlinien in deutsches Recht umsetzen und vielfach auch Sammel- und/oder Verwertungsquoten festlegen. Davon sind insbesondere Verpackungen (Kasten 3.1), Elektro- und Elektronikgeräte, Batterien, Personenkraftwagen und Altöl betroffen. Zur Umsetzung der genannten Pflichten werden Rücknahmesysteme eingerichtet, die es ermöglichen, diese Produkte nach dem Ende der Nutzungsdauer getrennt zu erfassen und in geeignete Verwertungswege zu lenken. Für Elektro- und Elektronikaltgeräte besteht eine geteilte Produktverantwortung, die sowohl die öffentlichen Entsorgungsträger zur Einrichtung von Sammelstellen verpflichtet als auch Hersteller und Handel die Möglichkeit der Einrichtung eigener Rücknahmesysteme eröffnet (§ 16 Elektro- und Elektronikgerätegesetz²²).

21 Bioabfallverordnung vom 4.4.2013, zuletzt am 27.9.2017 geändert

22 Elektro- und Elektronikgerätegesetz vom 20.10.2015, zuletzt am 3.11.2020 geändert



- *Abfälle, die in Wahrnehmung der Produktverantwortung freiwillig zurückgenommen werden* (nach § 26 KrWG) und für die der jeweilige Hersteller einen Feststellungs- oder Freistellungsbescheid erhalten hat (z. B. für PV-Module, Mobiltelefone oder Lampen).
- *Abfälle zur Verwertung, die gemäß § 17 Abs. 2 KrWG durch gewerbliche oder gemeinnützige Sammlungen erfasst werden.* Wenn verwertbare Abfälle durch eine gemeinnützige oder gewerbliche Sammlung einer ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung zugeführt werden und überwiegende öffentliche Interessen nicht entgegenstehen, sind öRE für ihre Sammlung und Verwertung nicht zuständig. Da PPK, Altmetalle und Alttextilien als Sekundärrohstoffe einen positiven Marktwert haben können, gibt es für diese Abfallarten in vielen Entsorgungsgebieten gewerbliche Sammlungen, die durch die private Entsorgungswirtschaft betrieben werden. Gewerbliche Sammlungen erfolgen allerdings nur, wenn für die gesammelten Abfälle Verwertungserlöse anfallen. Finden die Sammlungen nicht statt, verbleibt die Entsorgungspflicht bei den öRE. Dieser Umstand wird kritisiert, da Doppelstrukturen aufgebaut werden und den öRE Einnahmen fehlen, die in die Infrastrukturen investiert werden könnten. Auch gemeinnützige Sammlungen durch Schulen, Vereine oder karitative Einrichtungen sind vielerorts etabliert, die für die abgegebenen Mengen durch den öRE vergütet werden.

Diese Ausnahmetatbestände gelten nicht für gemischte Abfälle aus privaten Haushaltungen und für gefährliche Abfälle, die eine Gefahr für die Gesundheit und die Umwelt darstellen.

Kasten 3.1 Duale Systeme und die Sammlung von Verpackungen

Verpackungen, die beim Endverbraucher als Abfall anfallen, unterliegen der erweiterten Herstellerverantwortung. Ihr Inverkehrbringen, ihre Rücknahme und hochwertige Verwertung werden über das Verpackungsgesetz (VerpackG)²³ geregelt, welches die Richtlinie 94/62/EG²⁴ in deutsches Recht umsetzt. Demnach sind Hersteller von Verpackungen verpflichtet, sich bei der Zentralen Stelle Verpackungsregister (§ 9) zu registrieren und sich an einem oder mehreren Systemen zu beteiligen (§ 7). Systempflichtige Verpackungen sind von den Systemen getrennt von gemischten Siedlungsabfällen zu erfassen und einer Verwertung zuzuführen (§ 14). Die im Auftrag der Hersteller betriebenen Systeme organisieren Sammlung, Transport und Behandlung der systempflichtigen Verpackungen. Dafür beauftragen sie öffentliche

23 Verpackungsgesetz vom 5. Juli 2017, zuletzt am 22.9.2021 geändert

24 Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle, Richtlinie (EU) 2018/852 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle



oder private Entsorgungsunternehmen, die in Abstimmung mit den Kommunen die Durchführung der Sammlung für sie übernehmen (§ 22 u. 23). Einige öRE haben auf Basis des § 22 Abs. 5 VerpackG Wertstofftonnensysteme eingeführt, in denen Leichtverpackungen (LVP) und stoffgleiche Nichtverpackungen gemeinsam gesammelt werden können. Die Entsorgung systempflichtiger Verpackungen wird seit der Gründung des dualen Systems 1991 durch Lizenzentgelte der Hersteller finanziert und ist durch die Lizenzgebühren, welche beim Verkauf von gelben Tonnen und Säcken von den Verbrauchern bezahlt werden, für Endverbraucher/innen gebührenfrei.

Da die dualen Systeme als Ergänzung zum kommunalen Abfallwirtschaftssystem geschaffen wurden, ist die Sammlung auf die vorhandenen Sammelstrukturen der öRE abzustimmen. Eine Rahmenvorgabe kann der öRE im Hinblick auf die Art des Sammelsystems (Hol-, Bring- oder Kombination beider Systeme), die Art und Größe der Sammelbehälter sowie die Häufigkeit und den Zeitraum der Behälterentleerungen durch Verwaltungsakt vorgeben. An der Sammlung dieser Abfälle kann der öRE sich mit eigenen Erfassungssystemen beteiligen. Alternativ können die öRE mit den dualen Systemen auch vereinbaren, dass Nichtverpackungsabfälle aus Kunststoff und Metall gemeinsam mit den stoffgleichen Verpackungsabfällen mittels einer einheitlichen Wertstoffsammlung (Wertstofftonne) erfasst werden. Allerdings zeigt die Praxis, dass der Abstimmungsprozess zwischen öRE und dualen Systemen oft schwierig ist.

3.1.2.3 Technische Mindestanforderungen an die Anlagen

Mit Blick auf den technischen Fokus dieses Berichts ist der Rahmen zur Bestimmung des Stands der Technik hervorzuheben. Als Stand der Technik im Sinne des § 28 KrWG wird der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen bezeichnet, die zur Vermeidung oder Verminderung von schädlichen Umwelteinwirkungen oder zur Gewährleistung der Anlagensicherheit beitragen. Der Stand der Technik wird zum einen über die BVT(Beste-verfügbare-Techniken)-Merkblätter beschrieben, zum anderen über die in Anlage 3 des KrWG definierten Kriterien.

Im Rahmen eines durch die Richtlinie 2010/75/EU²⁵ und den Durchführungsbeschluss 2012/119/EU festgelegten Prozesses (Sevilla-Prozess)²⁶ werden die technischen Mindestanforderungen an Abfallbehandlungs- und Verbrennungsanlagen regelmäßig angepasst. An ihrer Erstellung sind neben der

25 Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)

26 Durchführungsbeschluss 2012/119/EU mit Leitlinien für die Erhebung von Daten sowie für die Ausarbeitung der BVT-Merkblätter und die entsprechenden Qualitätssicherungsmaßnahmen gemäß der Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung)

EU-Kommission und den Mitgliedstaaten auch Industrie und Nichtregierungsorganisationen beteiligt. Die BVT-Schlussfolgerungen sind für alle Mitgliedstaaten verbindlich und müssen in nationales Recht umgesetzt werden.

Spezifische technische Anforderungen an die Mindestausstattung von Vorbehandlungsanlagen wurden in der Anlage zu § 6 Absatz 1 Satz 1 Gewerbeabfallverordnung²⁷ festgelegt.

Richtlinien zur Einhaltung des Stands der Technik werden von den zuständigen regelsetzenden Institutionen herausgegeben, beispielsweise die Richtlinie VDI 2095 Blatt 3²⁸. Die verpflichtende Einhaltung des Stands der Technik betrifft ebenfalls die Mess- und Überwachungstechnik. Der Stand wird durch die zuständige Behörde bestimmt, mitsamt Anforderungen an Messgeräte.²⁹

3.1.3 Zentrale Aufgabenbereiche der örE

In diesem Bericht wird der Fokus auf solche Aufgabenbereiche der örE gelegt, die sich besonders gut digitalisieren lassen. Dabei handelt es sich um Verwaltungsaufgaben, die Abfalllogistik sowie um die Behandlung von Abfällen.

3.1.3.1 Aufgaben der Verwaltung

Die konkrete Art und Weise, wie Abfälle gesammelt und entsorgt werden, legt der örE für sein Entsorgungsgebiet mittels einer Abfallwirtschaftssatzung fest (z. B. Art der Behälter, Gestaltung von Standplätzen für Behälter auf privaten Grundstücken). In vielen Fällen sind außerdem Richtwerte für das bereitzustellende Behältervolumen festgelegt. In den Abfallgebührensatzungen legen die örE die Gebühren für die Inanspruchnahme der abfallwirtschaftlichen Leistungen fest (Berg et al. 2019, S. 25 f.). Zu den Aufgaben der Verwaltung gehören (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 27):

- die Erarbeitung von Abfallwirtschaftskonzepten;
- die jährliche Erstellung von Abfallbilanzen über die Verwertung und die Beseitigung der im Gebiet des örE anfallenden und zu überlassenden Abfälle;
- die Abstimmung mit den dualen Systemen hinsichtlich der Erfassung von Verpackungen im Gebiet des örE sowie hinsichtlich der Mitbenutzung von Erfassungssystemen (insbesondere Wertstoffhöfe, Papiersammlung, Wertstofftonne);

27 Gewerbeabfallverordnung vom 18.4.2017, zuletzt am 5.7.2017 geändert

28 Richtlinie VDI 2095 Blatt 3 – Emissionsminderung – Abfallbehandlung – Anlagen zur Behandlung von Abfallgemischen aus der haushaltsnahen Wertstofferrfassung und von gemischten Gewerbeabfällen

29 Siehe z. B. Anlage 4 der 17. BImSchV



- › die Information und Beratung der Bürger/innen über Möglichkeiten der Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen inklusive der eingerichteten Erfassungssysteme für Elektro- und Elektronikaltgeräte;
- › die Kalkulation und Erhebung von Gebühren.

Viele öRE erheben eine Grundgebühr, welche grundstücks- oder personenbezogen festgelegt wird, um insbesondere die fixen Kosten der Abfallentsorgung zu decken. Gemäß dem Verursacherprinzip kann sich die Höhe der Abfallgebühr darüber hinaus nach dem Umfang der durch den jeweiligen Haushalt in Anspruch genommenen Leistung richten, um damit nicht zuletzt auch Anreize zur Vermeidung und besseren Verwertung von Abfällen zu setzen. Die meisten öRE bieten als Ergänzung zu den Abfallbehältern für kurzzeitiges Mehraufkommen Abfallsäcke an. Durch den Kaufpreis der Säcke ist die Entsorgung der zusätzlichen Restabfälle bezahlt. Außerdem halten die öRE Wertstoffhöfe vor, die der Erfassung von Abfällen dienen, die nicht über Holsysteme erfasst werden.

3.1.3.2 Abfalllogistik

Abfälle werden nach einer Vorsortierung durch den Abfallerzeuger am Ort ihrer Entstehung vom öRE bzw. einer beauftragten Organisation gesammelt und zum abfallspezifischen Lagerungs-, Vorbehandlungs- oder Behandlungsort transportiert. Um alle anfallenden Abfälle effizient zu erfassen, müssen häufig verschiedene Sammelsysteme, jeweils angepasst an die anfallenden Abfallmengen und -qualitäten, räumlichen Voraussetzungen und sonstige lokale Erfordernisse, parallel zum Einsatz kommen (Berg et al. 2019, S.43). Grundsätzlich lassen sich zwei verschiedene Systeme unterscheiden: das Hol- und das Bringsystem. Im Holsystem werden die Abfallsammelbehältnisse oder Einzelstücke (sperrige Abfälle, Elektroaltgeräte) unmittelbar am Anfallort bereitgestellt. Die befüllten Behältnisse werden dann von den Abfallerzeugern oder dem Entsorgungsteam zur Entleerung/Abfuhr an den nächstgelegenen Straßenrand gebracht, wo sie von Sammelfahrzeugen abgefahren werden. Das Holsystem kommt üblicherweise bei folgenden Abfallarten zum Einsatz (Berg et al. 2019, S.44):

- › Abfälle, die regelmäßig mit hohem Aufkommen anfallen (Restabfall, Bioabfall, Leichtverpackungen sowie PPK);
- › Abfälle, die spezieller Aufmerksamkeit bedürfen (Restabfall und Bioabfall);
- › Abfälle, die von einem Großteil der Bevölkerung nicht selbst transportiert werden können (sperrige Abfälle, Elektroaltgeräte).

Das Bringsystem wird in der Regel genutzt, wenn in den Haushalten regelmäßige, aber nur geringe Mengen einer Abfallart anfallen (z. B. Altglas) oder wenn Abfälle unregelmäßig anfallen (z. B. Alttextilien, Grünschnitt) (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S.44). Beim Bringsystem werden Abfälle vom Abfallerzeuger zu Abfallsammelbehältern gebracht, die an zentral gelegenen



Plätzen bereitgestellt werden und von einer Vielzahl von Abfallerzeugern genutzt werden. Behälter werden je nach Nutzungsgrad regelmäßig oder bei Bedarf geleert. Im Gegensatz zum Bringsystem müssen die Sammelfahrzeuge nicht alle Straßenzüge zur Entleerung der Abfallbehälter abfahren, sondern fahren eine erheblich geringere Anzahl von Sammelpunkten an, die noch dazu zentral gelegen sind. Eine spezielle Teilkomponente innerhalb eines Bringsystems sind öffentliche Rücknahmestellen oder Wertstoffhöfe, die insbesondere für sporadisch anfallende Abfallarten (z. B. Elektroaltgeräte, sperrige Abfälle, schadstoffbelasteter Sondermüll) von manchen öRE eingesetzt werden. Hierbei handelt es sich um beaufsichtigte Sammelstellen für verschiedene, vor allem recycelbare Abfallstoffe aus Haushaltungen. Die Erfassung stoffgleicher Nichtverpackungen, also insbesondere Kunststoffe und Metalle, welche keine Verpackungen sind und durch die öRE getrennt zu erfassen sind, erfolgt meist auf den Wertstoffhöfen.

3.1.3.3 Behandlung von Abfällen

Gemäß der Abfallhierarchie soll die aus ökologischer Perspektive und unter Berücksichtigung der technischen, wirtschaftlichen und sozialen Folgen jeweils beste Option für den Umgang mit der jeweiligen Abfallart ausgewählt werden. Für die verschiedenen Abfallarten haben sich folgende Behandlungsmethoden etabliert:

Gemischte Siedlungsabfälle werden entweder zu mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen (MBA) oder zu Müllverbrennungsanlagen (MVA) zur thermischen Verwertung gebracht:

- In *mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen* werden die Abfälle durch eine Kombination von biologischen und mechanischen Verfahren behandelt, wobei die Reihenfolge der Behandlungsschritte und die Ziele der biologischen Behandlung variieren können (Bilitewski et al. 2018, S. 136). Bei dem Splitting oder Endrotteverfahren wird die heizwertreiche Abfallfraktion für eine thermische Verwertung von der biologisch verwertbaren Fraktion mechanisch abgetrennt. Letztere wird je nach Verfahren für die Biogasproduktion verwendet oder nach Stabilisierung (biologische Trocknung und anschließende Abtrennung brennbarer Bestandteile) energetisch verwertet (Bilitewski et al. 2018, S. 136; 177).
- In einer *Müllverbrennungsanlage* werden Restabfälle und Sperrmüll (ggf. nach Abtrennung der trockenen Fraktion) thermisch verwertet (Bilitewski et al. 2018, S. 33). MVA nutzen die aus den Abfällen gewonnene Energie zur Erzeugung von Strom, Prozessdampf und/oder Fernwärme. Aus der Schlacke zurückgewonnene Eisen- und Nichteisenmetalle werden stofflich verwertet (Bilitewski et al. 2018, S. 196; Umweltbundesamt 2020a). Die Schlacke wird z. B. als Straßenbaumaterial weiterverwertet oder auf Deponien



gelagert (Bilitewski et al. 2018, S. 196; BMU 2020a). Hochkalorische aufbereitete Abfallstoffe können in der Nähe von Industrieanlagen behandelt werden und diese mit der Prozesswärme oder elektrische Energie versorgen (UBA 2020a) bzw. in Feuerungsanlagen von Kraft-, Heizkraft- oder Zementwerken (Zeschmar-Lahl et al. 2020, S. 29).

Trockene gemischte Wertstoffe (Kunststoffe, Metalle), die am Anfallsort vorsortiert wurden, werden an Sortieranlagen angeliefert, wo die rezyklierbare Fraktion abgetrennt und für eine weitere Verwertung aufbereitet wird (Bilitewski et al. 2018, S. 33 f.). Die nachgelagerten Prozesse der Behandlung von Wertstoffen werden in spezialisierten Recyclinganlagen oder direkt an einem Produktionsort durchgeführt. An diesen marktgetriebenen hochspezialisierten Rückgewinnungsverfahren sind kommunale Organisationen bzw. öRE nicht beteiligt (Prognos/INFA 2018, S. 51 f.).

Getrennt gesammelte Bioabfälle können in einer Anlage zur Kompostierung und ggf. zur Produktion von Biogas behandelt werden. Seit 2005 dürfen nicht vorbehandelte biologisch abbaubare und sonstige organische Abfälle nicht mehr deponiert werden.

3.1.4 Marktwirtschaftliche Strukturen

Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger können sich zur Erfüllung ihrer gesetzlichen Aufgaben privater Dritter bedienen (§ 22 KrWG). Ihre Verantwortlichkeit für die Erfüllung der Pflichten bleibt hiervon jedoch unberührt und so lange bestehen, bis die Entsorgung endgültig und ordnungsgemäß abgeschlossen ist. So sind öRE dazu verpflichtet, die Erfüllung der Vertragspflichten zu kontrollieren. Die an private Dritte übertragenen Aufgabenbereiche umfassen insbesondere die Sammlung verschiedener Abfallfraktionen einschließlich des Betriebs von Wertstoffhöfen sowie die Entsorgung der eingesammelten Abfälle (Berg et al. 2019, S. 23). Alternativ kann der öRE eigene Strukturen schaffen, auf die er die gesetzlichen Aufgaben oder Teile davon überträgt. Diese Strukturen können unterschiedliche Rechtsformen haben (Berg et al. 2019, S. 61 ff.). Dazu zählen Regiebetriebe, Eigenbetriebe, Kapitalgesellschaften (GmbH), Anstalten öffentlichen Rechts und Zweckverbände (bei interkommunalen Kooperationen). Die Wahl der jeweiligen Rechtsform hängt dabei einerseits von wirtschaftlichen Erwägungen, andererseits auch von bundeslandspezifischen Regelungen des Gemeindewirtschaftsrechts sowie von den Grundsätzen der kommunalen Selbstverwaltung ab. Die Beteiligung kommunaler Einrichtungen (rechtsformübergreifend) am Markt ist bundesweit wesentlich geringer als die der privatwirtschaftlichen Entsorgungsunternehmen. Kommunen beteiligen sich vor allem an den Aufgabenbereichen, welche der Daseinsvorsorge dienen, also insbesondere die Sammlung von Abfällen sowie die Behandlung von Restabfällen. Bei den nachgelagerten Stufen der Sortierung und des Recyclings sind fast aus-

schließlich private Entsorgungsunternehmen tätig (Prognos/INFA 2018). Rein kommunale Unternehmen sind überwiegend in der Abfallsammlung und dem Transport tätig, mit einem Anteil am Markt von ca. 52 % (Prognos/INFA 2020, S. 74). Bei Altpapier betrifft der Marktanteil eine ähnliche Größenordnung. Bei Glas und Leichtverpackungen, die der Herstellerverantwortung unterliegen, liegt ihr Marktanteil bei 20 %. Bei der Sammlung sind bundesweit keine besonderen strukturellen Unterschiede festzustellen. Grundsätzlich verfügen städtisch geprägte Regionen eher über Kommunalunternehmen, ländlich geprägte Regionen über privatwirtschaftlich organisierte Strukturen. Der kommunale Anteil nimmt derzeit aufgrund wachsender Rekommunalisierungstendenzen zu. Im Bereich der Sortier-, Schredder- und Aufbereitungsanlagen ist der Markt überwiegend privatwirtschaftlich geprägt (Prognos/INFA 2018, S. 51 f.). Mechanische bzw. mechanisch-biologische Behandlungsanlagen werden zu 50 % der Kapazitäten von rein kommunal geführten Unternehmen betrieben. Der Betrieb von Müllverbrennungsanlagen erfolgt zu 44 % in der Verantwortung von kommunalen Unternehmen, der von Ersatzbrennstoffkraftwerken zu 13 %, der von Sonderabfallverbrennungsanlagen zu 8 % (Prognos/INFA 2020, S. 74).

3.1.5 Herausforderungen und Perspektiven der Digitalisierung

Digitalen Lösungen werden große Potenziale für die Kreislaufwirtschaft zugeschrieben. Dies betrifft sowohl die Aufgaben der Verwaltung, insbesondere die Kommunikation mit den Bürger/innen, als auch die branchenübergreifende Vernetzung von Akteuren entlang von Wertschöpfungsketten (Prognos/INFA 2020, S. 157 f.). Digitale Technologien sollen dazu beitragen, den Rezyklateinsatz zu erhöhen, Kunststoffe länger und effizienter zu nutzen sowie Plastikeinträge in die Umwelt zu reduzieren (Bundesregierung 2020b, S. 16). Die umweltpolitische Digitalagenda der Bundesregierung (BMU 2020b) sieht beispielsweise vor, einen digitalen Produktpass für mehr Transparenz zu Umwelt- und Materialdaten von Produkten einzuführen, eine standardisierte Datenbank zu Produkten und Abfallströmen zu initiieren sowie ein Reallabor »Vernetzte Modellkommune in der Kreislaufwirtschaft« zu errichten, um digitale Lösungen für eine optimierte Abfalllogistik und -wirtschaft zu erproben. In der Fortschreibung der Strategie Künstliche Intelligenz (KI) der Bundesregierung ist die Errichtung eines Anwendungshubs im Bereich der Kreislaufwirtschaft vorgesehen. Dadurch sollen u. a. smarte Sensorik und Trackingtechnologien für die Sammlung, Sortierung und das Recycling gefördert werden (Bundesregierung 2020b, S. 16), wobei diese zunächst Kunststoffverpackungen betreffen sollen (BMBF 2021a).

Gleichzeitig bringt die Digitalisierung der Abfallwirtschaft auch einige Herausforderungen mit sich (Berg et al. 2019, S. 69 ff.). Dazu zählt insbesondere die Ausbildung des Personals, um digitale Technologien einsetzen zu



können. Hier geraten die öRE in einem sektorübergreifenden Wettbewerb um qualifizierte Arbeitskräfte. Zudem stellt die Finanzierung digitaler Vorhaben, die sich nicht immer über Gebührenerhöhungen ausgleichen lässt, eine große Herausforderung dar. Die Gewährleistung der Siedlungsabfallentsorgung erfordert neben einer hohen Sicherheit und Belastbarkeit der informationstechnischen Systeme innerhalb der Betriebe auch das Vorhandensein der grundlegenden digitalen Infrastruktur, d. h. vor allem eines Breitbandnetzes. Auch die Obsoleszenz digitaler Systeme, die dazu führt, dass trotz funktionierender Hardware ein System ausgetauscht werden muss, die Vereinheitlichung digitaler Prozesse und die Standardisierung digitaler Schnittstellen stellen Hindernisse für die Realisierung von digitalen Anwendungen durch die öRE dar. Zudem ist seit 2021 die Siedlungsabfallentsorgung durch das zweite IT-Sicherheitsgesetz als Kritische Infrastruktur eingestuft. Damit gehen für eine im Wege der Verordnung noch näher zu bestimmende (Stand Januar 2023) Gruppe von öRE neue gesetzliche Anforderungen an die Informationssicherheit einher.

3.2 Stand und Perspektiven

Der Digitalisierung werden für die Entwicklung der Abfallwirtschaft hohe Potenziale zugeschrieben (Sarc et al. 2020, S. 998). In Deutschland wird die Digitalisierung der Abfallwirtschaft von vielen Entsorgungsunternehmen daher als notwendig erachtet (Mechsner 2017). Kommunale Entsorgungsbetriebe erwarten künftig eine stark zunehmende Automatisierung ihrer Tätigkeiten (Kommunalwirtschaft.eu 2019). Allerdings ist der Digitalisierungsgrad der Abfallwirtschaft im Vergleich zu anderen Industriebereichen eher als gering zu bezeichnen (Borchard et al. 2021; Sarc et al. 2020, S. 998).

Alle drei im Kapitel 3.1.3 dargestellten Aufgabenbereiche sind vor dem Hintergrund der wachsenden Digitalisierung der kommunalen kreislauforientierten Abfallwirtschaft von besonderer Relevanz. In diesem Kapitel wird der Fokus insbesondere auf folgende Aspekte gelegt:

- *Abfallerfassung und Transport:* Die Sammlung und der Transport von Abfällen zu den Aufbereitungs-, Behandlungs- und/oder Ablagerungseinrichtungen sind für rund 60 bis 80 % der Gesamtkosten der Abfallentsorgung verantwortlich (Berg et al. 2019, S. 42). Die Digitalisierung dieser Bereiche ist insbesondere mit Erwartungen an Kosteneinsparungen verbunden.
- *Abfallbehandlungsanlagen und -maschinen:* Der Digitalisierung von Maschinen und Abfallbehandlungsanlagen wird eine zentrale Rolle für die Erreichung der Kreislaufwirtschaftsziele beigemessen, denn sie bieten Möglichkeiten, die steigenden Anforderungen an Recyclingqualität zu bewältigen und Recyclingquoten effizienter zu erfüllen (Sarc et al. 2020, S. 1001).



- › *Organisation und Kommunikation*: Die Bereiche der betrieblichen Organisation und der Kommunikation mit Bürger/innen weisen mit vielen Projekten und Aktivitäten im Bereich Digitalisierung bereits einen hohen Innovationsgrad auf (Berg et al. 2019, S. 75 ff.).

Für jeden dieser Bereiche werden im Folgenden die digitalen Technologien vorgestellt, die in der Abfallwirtschaft bereits etabliert sind, die im Regelbetrieb bei einzelnen innovativen Entsorgungsbetrieben schon im Einsatz stehen oder die gegenwärtig im Rahmen von Pilotprojekten erprobt werden. Außerdem werden technologische Entwicklungstrends und kurz- bis langfristige Perspektiven dargelegt.

Aufgrund der Aufteilung der Entsorgungsbranche in kommunale und private Entsorgungsbetriebe und der Vielzahl von kleinen und mittleren Unternehmen ist die Bestimmung des Verbreitungsgrades einzelner (digitaler) Technologien nicht einfach möglich. Oft sind entsprechende Daten veraltet oder ungenau. Im Folgenden erfolgt daher nur eine grobe Abschätzung der jeweiligen Verbreitungsgrade, die sich aus der empirischen Erhebung der Gutachter (Berg et al. 2019) sowie (sofern vorhanden) aus ergänzenden Befragungen speist.

3.2.1 Abfallerfassung und Transport

Im Bereich der Abfalllogistik stellt sich das Spektrum der digitalen Innovationen in Abhängigkeit ihres Reifegrades wie folgt dar Berg et al. (2019, S. 71 ff.):

- › Technologie mit weiter Verbreitung (Standardtechnologien) in der Branche:
 - Datenerfassungsgeräte und Bordcomputer im Fahrzeug
 - Behälteridentifikationssysteme
- › Technologien in einem frühen Anwendungsstadium:
 - Ident-Wägesysteme am Fahrzeug zur satzungskonformen und mengengerechten Abrechnung
 - Sensoren am Behälter zum Management des Behälterbestands und zur Optimierung der Sammellogistik
 - Sensoren am Fahrzeug zur Detektion von Störungen
- › Systeme, die von vielen Herstellern angeboten werden, in der kommunalen Entsorgungswirtschaft aber noch nicht weit verbreitet sind:
 - Navigations- und Telemetriesysteme zur Tourensteuerung sowie zum Management des Fuhrparks
- › Technologien, die eine Anwendung in der Praxis noch nicht erreicht haben:
 - Autonomisierungstechnologien für den Abfalltransport
 - Unterflurbehältern mit automatischer Sortierung, Detektion von Störstoffen und mengengerechter Abrechnung



3.2.1.1 Datenerfassungsgerät und Bordcomputer am Fahrzeug

Bei der digitalen Datenerfassung im Holsystem werden Informationen zu Störungen (z.B. nicht bereitgestellte, falsch befüllte Behälter oder Abholhinder-nisse) sowie ausgewählte Betriebsdaten in eine geeignete Software papierlos eingetragen (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 83 f.). Dadurch können eine beschleunigte Dokumentation und Informationsweitergabe an die Zentrale bzw. an Kund/innen erfolgen sowie Beschwerden der Gebührenpflichtigen schneller bearbeitet werden. Die Datenerfassung kann über ein Bordcomputer im Fahrzeug, ein mobiles Handgerät (spezielles Datenerfassungsgerät, ein Tablet oder ein Smartphone) oder eine Kombination hiervon erfolgen (BDE/VKU 2018, S. 27 ff.; dazu und zum Folgenden Berger/Volkmar 2020). Mit diesen Geräten wird ein Telematiksystem zur digitalen Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zentrale realisiert (BDE/VKU 2018, S. 27 f.). Sowohl mit Bordcomputern als auch mit speziellen Handlesegeräten bestehen bereits langjährige Erfahrungen, während die Auswahl von industrietauglichen Tablets oder Smartphones noch begrenzt ist (BDE/VKU 2018, S. 28). Eine Verbindung mit Behälteridentifikationssystemen (Kap. 3.2.1.2) ist mit RFID Reader (Technologie für Sender-Empfänger-Systeme mithilfe elektromagnetischer Wellen) oder Barcodeleser möglich. Darüber hinaus ermöglichen manche Geräte die Fotodokumentation durch integrierte Kameras (BDE/VKU 2018, S. 28 f.).

Mithilfe der mobilen digitalen Datenerfassung können Mitarbeiter/innen auch die Sauberkeit von Straßen bewerten. Dazu braucht es eine Qualitätsbewertungs-App (Berg et al. 2019, S. 76). Im Bringsystem kann die Qualifizierung und Sortierung der Abfälle digital durchgeführt werden, was den Informations-transfer zu den Wertstoffen an den Recycler erleichtern kann (Berg et al. 2019, S. 124). Solche Systeme wurden bereits eingeführt. Beispielsweise erfolgt die Erfassung der Wertstoffe auf den Wertstoffhöfen im Landkreis Rostock seit 2019 digital. Mithilfe von mobilen Erfassungsgeräten werden hier Herkunft, Art und Menge der angelieferten Abfälle erfasst sowie deren Ausgang und Verwertung bearbeitet. Generell wird von den befragten Expert/innen erwartet, dass sich die digitale Erfassung von Störungen und damit auch mobile Leistungserfassungssysteme bzw. Bordcomputereinsatz zur Ermittlung von Betriebsdaten künftig unter den öRE verbreitet (Prognos/INFA 2020).

3.2.1.2 Behälteridentifikationssysteme

Behälteridentifikationssysteme ermöglichen es, einzelne Abfallbehälter elektronisch zu erkennen (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 82 f. u. 142 f.). Mit Funksendern ausgestattete Behälter können während der Sammel-tour durch Empfangsgeräte im Sammelfahrzeug erkannt und den einzelnen Haushalten bzw. Grundstücken zugeordnet werden. Die Behälteridentifikation

wird gewöhnlich durch einen am Behälter angebrachten passiven Transponder (ohne eigene Stromversorgung) realisiert, dem eine eindeutige Identifikationsnummer zugeordnet ist. Die Daten des Transponders werden mit einem RFID-Lesegerät ausgelesen, das beispielsweise an der Ladevorrichtung am Sammelfahrzeug angebracht wird. Die am Fahrzeug erhobenen Daten werden je nach System entweder drahtlos oder nach Beendigung der Tour z. B. per USB-Stick übertragen und in der zentralen Software verarbeitet bzw. archiviert. Am Behälter platzierte QR-Codes, die durch Smartphone ausgelesen werden, sind auch standardisiert (BDE/VKU 2018, S. 6).

Mit dieser Technologie können Leerungen sowie eventuell anfallende Störungen (z. B. falsch befüllte oder nicht bereitgestellte Behälter, Abholhindernisse) pro Behälter automatisiert dokumentiert und ausgewertet werden, wodurch ein elektronischer Leistungsnachweis, eine verursachergerechte Abrechnung oder im Störfall eine schnelle Benachrichtigung der Kund/innen erfolgen kann. Zudem wird mit der Behälteridentifikation sichergestellt, dass bei der Abfallsammlung nur beim öRE gemeldete Behälter entleert werden. Die Überprüfung erfolgt innerhalb von Sekunden, wodurch eine Echtzeitbestätigung des Leerungsservice an die Zentrale gewährleistet werden kann. Die Behälteridentifikation unterstützt den öRE bei der Bewältigung gesetzlicher Pflichten, wie der Anmeldung von Sammlungen, der Erstellung von Abfallwirtschaftskonzepten oder der Nachweisführung und Bilanzerstellung.

Derzeit werden viele unterschiedliche Systeme eingesetzt, deren Datensicherheit über ein Zertifikat des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) garantiert wird. Eine Vereinheitlichung der verwendeten Technik wird seitens des Bundesverbands der Deutschen Entsorgungswirtschaft e. V. und des Verbands Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e. V. angestrebt (Bilitewski et al. 2018, S. 112). Eine entsprechende DIN-EN-Norm³⁰ ist vorhanden. Die Technik ist schon seit den 1990er Jahren am Markt erhältlich, lässt sich relativ leicht in den Standardablauf integrieren und erfordert keine großen Umstellungsmaßnahmen.

Die Anwendung von Behälteridentifikationssystemen ist weit verbreitet und bei vielen öRE bereits implementiert. Beispielsweise waren in Deutschland 2018 18 Mio. Behälter mit (passiven) Transpondern vom Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft ausgestattet (BDE/VKU 2018, S. 19). In Feldversuchen ausgiebig getestete aktive Transponder, die über eine eigene Stromversorgung verfügen und Daten via Mobilfunknetz senden, sind hingegen aufgrund höherer Kosten für eine breite Anwendung noch (nicht) geeignet (BDE/VKU 2018, S. 18). Mit Smartphone lesbare QR-Codes werden vermehrt eingesetzt (BDE/VKU 2018, S. 6).

30 DIN 14803:2020 Identifikation und/oder Mengenbestimmung von Abfall



3.2.1.3 Ident-Wägesysteme am Fahrzeug

Bei Ident-Wägesystemen wird die Behälteridentifikation durch ein Wägesystem ergänzt, wodurch öRE die Gebühren der Abfallsammlung auf Basis der entsorgten Abfallmasse verursachergerecht berechnen und den einzelnen Haushalten bzw. Grundstücken zuordnen können (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 91 f. u. 143 f.). Durch die Einführung einer mengenbezogenen Abrechnung können öRE einen Anreiz zur Abfallvermeidung und -trennung setzen. Allerdings lassen sich damit auch unerwünschte Vermeidungsstrategien beobachten, etwa die wilde Entsorgung von Abfällen oder die Entsorgung in fremde Abfallbehälter. Auch sind die Anschaffungs- und Unterhaltungskosten (z. B. für die Eichung) von Ident-Wägesystemen vergleichsweise hoch, sodass das Aufwand-Nutzen-Verhältnis für jeden Anwendungsfall geprüft werden muss.

Automatisierte Wägesysteme gibt es für unterschiedliche Fahrzeuge und Container (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 91 f.). In der einfachsten Version (stationäre Systeme) bestehen sie aus einer Fahrzeugwaage, deren Wägesignal elektronisch erfasst und gespeichert wird. Dafür fährt das Sammelfahrzeug vor der Leerung in der Anlage über eine Waage, wodurch einzelne Schüttungen nicht gemessen werden können. Mit weiter fortgeschrittenen Systemen (mobile Systeme) können einzelne Schüttungen gewogen werden und somit verursacherbezogene Gebührensysteme realisiert werden. In diesem Fall befindet sich die Waage am Lifter des Sammelfahrzeugs oder zwischen Fahrgestell und Aufbau (BDE/VKU 2018, S. 25). Die Auflösung variiert je nach Modell. Der Behälter wird normalerweise voll und leer gewogen, um aus der Differenz die Müllmasse zu bestimmen. Als Basis für eine mengengerechte Abrechnung gelten Behälteridentifikationssysteme (EU-Recycling 2019a). Über entsprechende Schnittstellen können die Waagen mit dem IT-System des Entsorgers verknüpft werden, oder sie verfügen über eine eigene Softwarelösung, um die Menge zu berechnen (Fricke et al. 2018, S. 539 ff.). Im Vergleich zur weiten Verbreitung von Behälteridentifikationssystemen werden Ident-Wägesysteme bislang seltener genutzt (Berg et al. 2019, S. 142). Noch wird überwiegend stationär gewogen, aber die Entwicklung geht zunehmend in Richtung mobiler Wiegesysteme (EU-Recycling 2019a).

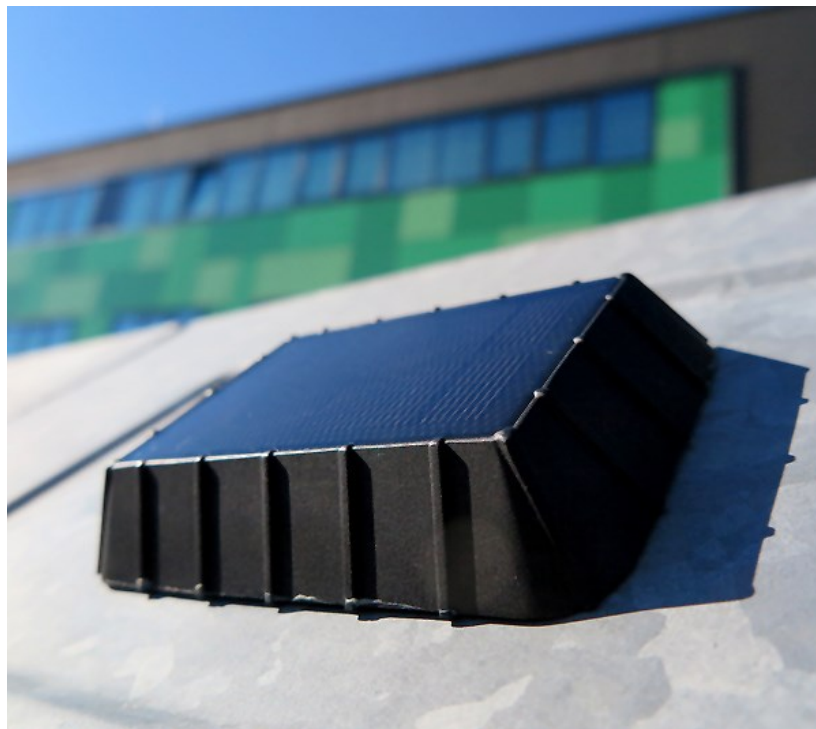
3.2.1.4 Sensoren am Behälter

Sensoren in oder an Abfallbehältern messen Parameter wie Temperatur, Bewegung, Schall oder die geografische Lage in Echtzeit bzw. in vorher definierten Zeitabständen (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 88 ff. u. 133 ff.). Mithilfe einer geeigneten Software können aus den Messwerten z. B. Aussagen zum Füllstand der Behälter, zu ihrer jeweiligen Position sowie zu Auffälligkeiten (z. B. Feuer oder Diebstahl) abgeleitet werden. Auf dieser Basis können

Sammeltouren optimiert, Schäden minimiert oder unnötige Fahrten zu nicht ausreichend befüllten Abfallbehältern vermieden werden. Dies macht die Entsorgung rentabler (Sarc et al. 2020, S. 1000) und spart CO₂-Emmission. Verknüpft mit einem Identifikationssystem ermöglicht die Ortung die Prüfung und Steuerung der Behälterverteilung im Planungsgebiet.

Die Sensordaten können über kabellose Funkstandards wie Narrowband-Internet of Things (NB-IoT) oder LoRaWAN über weite Strecken zur Weiterverarbeitung an einen zentralen Server gesendet werden (dazu auch Kap. 4.2.3). Für die Datenübertragung über kurze Strecken (z. B. zur Konfiguration der Sensoren) kann beispielsweise die Bluetoothschnittstelle genutzt werden. Ein Photovoltaikmodul am Sensor kann für dessen Stromversorgung sorgen. Die Anbringung des Sensors erfolgt außen am Container durch Ankleben oder Festnieten (Abb. 3.4). Neben den hohen Anforderungen an die Beständigkeit der Sensoren gegen Witterung und Belastung im Gebrauch ist ein funktionierendes Servicenetz des Anbieters zum schnellen Ersatz von beschädigten Sensoren nötig.

Abb. 3.2 Sensor am Behälter in der Stadt Bochum



Quelle: USB Bochum GmbH

Sensorbestückte Behälter werden international entwickelt und von zahlreichen Anbietern vermarktet. Füllstandssensoren für Bringsysteme mit Sammelcontainern und Unterflurbehältern sind erprobt und befinden sich bereits vielfach im



Testbetrieb. In Deutschland wurden sie bislang vor allem im Rahmen von Pilotprojekten eingeführt (Krause 2021). Vorreiter für die Nutzung von Mülleimern oder -behältern mit Füllstandssensoren sind die Städte Kassel, Köln und Hamburg (Lange/Pfefferle 2021, S. 24 f.). In Duisburg werden sie für die Messung der Auslastung von Abladeplattformen auf den Wertstoffhöfen eingesetzt (Smartcity Duisburg 2020). Außerdem befinden sich Füllstandssensoren aktuell bei der Berliner Stadtreinigung sowie in Bochum, Darmstadt, Wolfsburg oder in München im Testbetrieb (320° 2021c; Berg et al. 2019, S. 89; Recycling Magazin 2019; tz 2021).

Für Unterflurcontainer hat die Stadtreinigung Hamburg bereits eine Feldphase abgeschlossen (Berg et al. 2019, S. 89). Dort wurden Füllstandssensoren eingebaut und nach einer operativen Phase wieder entfernt, nachdem ausreichend Daten gesammelt worden waren, um diese durch KI-basierte Software auszuwerten und die Sammlung zu optimieren. Ein erneuter Einsatz von Sensorik wird erwogen, sobald preisgünstigere Sensoren verfügbar sind. Diese sollen dann mit der LoRaWAN-Technologie mit geringeren Betriebskosten als im Testbetrieb eingesetzt werden können (Berg et al. 2020c). Auch mit Füllstandssensoren ausgestattete Straßenpapierkörbe, die bei vollem Zustand die öRE automatisch benachrichtigen, sind auf dem Markt erhältlich und werden bereits installiert.³¹ In einem Pilotprojekt in Österreich schicken die vollen Abfallbehälter eine E-Mail an den zuständigen Abfallentsorger (320° 2021a).

Nach kürzlich abgeschlossenen Erprobungen von Füllstandssensoren in Abfallbehältern in den Städten Duisburg, Düsseldorf und Frankfurt wurde jedoch deutlich, dass die organisatorischen und logistischen Anpassungen, die eine füllstandabhängige Abfuhr erforderlich machen würden, noch eine große Herausforderung darstellen. Die notwendigen Anfangsinvestitionen sind nicht unerheblich und insbesondere von kleineren Unternehmen oder Kommunen nur schwer zu bewerkstelligen. Die Genauigkeit der Sensoren war in den Erprobungsprojekten nicht ausreichend bzw. eine höhere Genauigkeit durch häufigere Datenerfassung würde die Batterielaufzeit minimieren. Darüber hinaus waren die proprietären Sensorlösungen mit den bereits installierten Tourenplanungssystemen nicht immer kompatibel, was eine Integration der Sensordaten in die Tourenplanung technisch herausfordernd machte. In der Summe kommen Hoffmann et al. (2021, S. 1275 f.) zu dem Fazit, dass die Initiierung einer füllstandabhängigen Leerung durch Bürger/innen beispielsweise via E-Mail, App oder Messengeranwendungen, vielversprechender und kostengünstiger wäre als der Einsatz von Sensorik, zumindest für kleinere Behälter. Forschung zu KI-basierten Auswertemethoden, die Entwicklung standardisierter Einbauvorrichtungen für Sensoren und Interoperabilität von Sensoren und Systemen sind eine

31 <https://kommunaldigital.de/der-projektatlas?page=search&search=solarpapierk%C3%B6rbe> (25.9.2023)

wesentliche Voraussetzung für die sensorbasierte Optimierung von Abfalllogistikprozessen (Hoffmann et al. 2021, S. 1277).

3.2.1.5 Sensoren zur Störstoffdetektion in Sammelbehältern

Mithilfe von Detektionssystemen zur Störstofferkennung können Fehlwürfe bzw. in den falschen Behälter geworfene Stoffe automatisch detektiert werden (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 144 ff.). Ein solches System kann eine stichprobenartig durchgeführte manuelle Sichtkontrolle von Abfallbehältern durch das Sammelpersonal ersetzen. Bei stark unsachgemäß befüllten Behältern können diese stehengelassen und die Abfallverursachenden zur Nachsortierung veranlasst werden, alternativ ist eine gebührenpflichtige Entsorgung als Restabfall möglich. Solche Maßnahmen können, wenn sie eine Verhaltensänderung bewirken, zur Verbesserung der Qualität der Ausgangsstoffe für das Recycling beitragen. Mit höheren Graden an Sortenreinheit in Abfallfraktionen können höherwertige Rezyklate erzeugt werden. Ebenso kann über einen finanziellen Anreiz ein Beitrag zur Abfallvermeidung erzielt werden.

Die Anwendung von Detektionssystemen für Störstoffe ist noch in einem frühen Stadium und beschränkt sich im Moment im Wesentlichen auf die Detektion von Metallen in Bioabfällen (Berg et al. 2019, S. 144). In Euskirchen, Zülpich und Bad Münstereifel (Nordrhein-Westfalen) wird ein solches Detektionssystem am Fahrzeug bereits eingesetzt. Damit werden Blechdosen oder Tetra Paks in Bioabfallbehältern detektiert. Die Investitionskosten werden über die Einsparung von Kosten, die sonst durch die notwendige Säuberung von Störstoffen anfallen, amortisiert (Mackerordt 2019). In Duisburg wird die automatische Detektion von Kunststoffen in Grünabfallbehältern mit einer Kamera getestet (Smartcity Duisburg 2020). Eine Detektion von Fehlwürfen direkt an Sammelbehältern, wie z.B. für Alttextilien, wäre laut Expertenaussage zwar wünschenswert, ist aber technisch noch nicht realisierbar.

Mit dem Detektionssystem DS 2010-2 der Maier & Fabris GmbH können bei einer Sammeltour die Inhalte von Altpapier- und Bioabfallbehältern auf ihren Anteil an metallischen Störstoffen geprüft werden. Die Detektoren, die das Wirbelstrominduktionsverfahren³² nutzen, befinden sich an der Behälteraufnahme am Fahrzeug (Abb. 3.5). Ein Bordcomputer im Fahrzeug informiert das Sammelpersonal, ob der überprüfte Behälter entleert werden kann oder bei zu hohem Fremdanteil stehen gelassen wird (Maier & Fabris GmbH 2015). Detektionssysteme können gut mit einem Behälteridentifikationssystem verknüpft werden. Auch eine Integration von Detektions-, Identifikations-, und Wiegesystemen wird bereits erprobt.

32 Durch ein Magnetfeld werden in den metallischen Störstoffen Wirbelströme induziert, deren elektrische Felder durch einen Sensor gemessen werden.



Die Detektion von Störstoffen und Fehlwürfen anhand integrierter Sensoren zur Materialerkennung wird sich hin zur Feststellung der genauen Abfallzusammensetzung weiterentwickeln, was für den Sammelprozess einen Sicherheitsgewinn ermöglichen und die Sortierung erleichtern würde (Berg et al. 2019, S. 144). Intelligente Abfallcontainer, welche mit KI Wertstoffe in verschiedene Fraktionen (Glas, Papier, Metall, Kunststoffe) sortieren und zusammenpressen, sind bereits auf dem Markt erhältlich.³³ Für schwer rezyklierbare Stoffe (z. B. Textilien) beschränkt sich die Entwicklung vor allem auf entsprechende Sensoren für zentrale Sortierprozesse, wie z. B. im Projekt »Fibersort« (Interreg NWE o. J.).

3.2.1.6 Navigations- und Telemetriesysteme

Die Abfallsammlung folgt Routen, die im Rahmen des Fahrzeug- und Auftragsmanagements sowie der Disposition geplant und festgelegt werden müssen. Die komplexe Aufgabe der Tourenplanung und -optimierung lässt sich durch Softwarelösungen leichter handhaben (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 89 ff. u. 136 f.). In Verbindung mit Telemetriesystemen für den Informationsaustausch zwischen Sammelfahrzeugen und Zentrale können außerdem tourenbezogene Informationen gesammelt, visualisiert und ausgewertet werden, um über die Planung hinaus auch eine zentrale Routensteuerung für eine störungsfreie und betriebswirtschaftlich optimierte Abfallsammlungen zu ermöglichen. Beispielsweise können mit Global-Positioning-System(GPS)-Empfängern die aktuellen Standorte der Sammelfahrzeuge und Behälter in der Zentrale nachverfolgt werden, wodurch im Bedarfsfall Tourenpläne in Echtzeit angepasst und Routenänderungen an Fahrzeugführende kommuniziert werden können.

Eine Vielzahl von Systemen ist bereits auf dem Markt erhältlich, die eine oder mehrere Funktionen anbieten, wobei Telematik, Tourenplanung und -steuerung bereits für die meisten angebotenen Lösungen ineinandergreifen (Berg et al. 2019, S. 89). Dabei stehen folgende Funktionalitäten im Vordergrund:

- › *Flotten- und Auftragstracking und Auswertung:* Durch eine Übermittlung relevanter Daten wie Standort und Füllstand der Fahrzeuge in Echtzeit kann die Planung an unvorhergesehene Umstände angepasst werden. Gleichzeitig können Kund/innen zeitnah informiert werden (z. B. Auftragsbestätigung). Für größere Fahrzeugflotten kommen Fleet Management Systems (FMS) zum Einsatz, welche die Verwaltung einer Vielzahl von Fahrzeugen unterstützen. Das Erfassen von Fahrtrouten verschiedener Einsatzfahrzeuge wird bereits im realen Betrieb von einigen Unternehmen praktiziert, z. B. von der AFS Freiburg und der Stadtreinigung Hamburg (VKU 2019).

33 <http://www.bine.world/> (10.3.2023)



- *Berechnung und Visualisierung von optimalen Routen* unter Berücksichtigung einer Vielzahl von Parametern, die zum Teil aus dem Flotten- und Auftragstracking gesammelt werden. Dazu gehören z. B.: Personal und Fahrzeuge, Einsatzbereitschaft, Nutz-/Lastvolumen, Zugangswege zu Objekten (Treppe, Fahrstuhl, Klingel, Schranke, Poller etc.), Mautgebühren, Aufenthaltszeiten, Wartezeiten, Entsorgungsfahrten, Rüstzeiten, Zeitaufwände für Pausen, Anfahrt und Abfahrt aus dem Revier sowie ggf. Fahrzeuggeschwindigkeit (Berger/Volkmar 2020, S. 387 ff.; VKU 2019, S. 54).
- *Navigation der geplanten Route*: Echtzeitanpassung und Optimierung der zuvor geplanten Tour für jede/n Fahrer/in. Vorteile davon sind eine flexible Routenplanung, die einfache Anwendbarkeit auch durch nicht ortskundigen Fahrer/innen sowie der verminderte Kommunikationsaufwand.
- *Automatisierte Dokumentation*: Informationen zu tatsächlich befahrenen Orten, zu Zeitpunkt, Gewicht und Anzahl der Leerungen sowie zu Abholhindernissen können dokumentiert und elektronisch an die Dispositionszentrale oder ggf. an die Kund/innen übermittelt werden.

Die einfachsten Systeme basieren auf handelsüblichen Smartphones oder Tablets und die darin integrierten Sensoren (z. B. GPS-Sensoren) und Datenübertragungsschnittstellen, die mit spezieller Software ausgerüstet werden. Anspruchsvollere Systeme integrieren externe Sensoren oder Wäge- und Behälteridentifikationssysteme. Eine Integration der Software in die schon bestehende IT-Architektur sowie mit weiteren Softwaresystemen wie Geoinformations- oder Abrechnungssystemen ist je nach Hersteller über entsprechende Schnittstellen möglich (Berg et al. 2019, S. 137 f.). In der Stadt Herne (Nordrhein-Westfalen) wurde beispielsweise eine Kombination aus automatisierter Auftrags- und Einsatzplanung, digitalem Sperrmüllantrag mit gegenstandsscharfer Erfassung und Terminplanung mit Bezahlfunktion umgesetzt (Wolter 2020, S. 15).

Telematiksysteme finden in der Abfallwirtschaft durch private Unternehmen bereits breite Anwendung, werden aber selten durch Kommunen eingesetzt, die die Sammlung selbst durchführen (Berg et al. 2019, S. 82).

Eine steigende Durchdringung des Marktes mit den Technologien der Telematik zur digitalen Kommunikation zwischen Fahrzeug und Zentrale und der Tourenplanung und -optimierung wird bereits beobachtet. Die Tendenz zum Einsatz von Software mit multiplen Funktionalitäten dürfte sich künftig verstärken (Berg et al. 2019, S. 89). Die Möglichkeit, eine Karte nicht nur zur Visualisierung, sondern auch zur interaktiven Planung zu nutzen, wird bislang nur selten angeboten, wird aber vor allem für größere Betriebe als hilfreich erachtet (Gruner 2018, S. 551 ff.). Weiterhin wird die Anbindung der Systeme an Fremdsysteme wie Verkehrsmeldungen, Kundensysteme oder an Systeme von Subunternehmen perspektivisch immer relevanter (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 91 ff.). Zudem könnten KI-basierte Auswertungsmethoden zeitnah in die Beauftragung von Sperrmüllabholungen eingebunden werden mit dem



Ziel, die Zusammensetzung der Güter automatisiert zu erkennen und das Volumen abzuschätzen, um die Touren- und Kapazitätsplanung zu verbessern. Auch könnten dadurch noch verkaufsfähige Güter identifiziert und in Zweite-Hand-Einrichtungen bzw. Sozialkaufhäuser verbracht werden. Dieses Konzept wäre insbesondere bei einer Sperrmüllabholung ab Haus sinnvoll. Auch die Steuerung und Abrechnung von Subunternehmen könnten künftig automatisiert vom Fahrzeug aus erfolgen (EU-Recycling 2020). Ebenfalls könnte die präventive Instandhaltung, wodurch Fehler im Fahrzeug frühzeitig erkannt und kostspielige Reparaturen vermieden werden können, im Rahmen des Fuhrparkmanagements zur Anwendung kommen (Kirchhoff 2018, S. 619). Insgesamt könnten digitale Lösungen zu einer deutlichen Erleichterung der Planung und Logistik beitragen, insbesondere bei wenig routinierten Abläufen wie die Entsorgung von illegalen Ablagerungen oder von sperrigen Abfällen (Berg et al. 2019, S. 146).

3.2.1.7 Autonomisierung des Abfalltransports

Müllfahrzeuge werden zunehmend mit Fahrassistenzsystemen ausgestattet, wie sie bei Pkw bereits üblich sind (z. B. Einparkhilfe, Rückfahrsystem, Spurhalteassistent, Geschwindigkeitsregelung, Notbremsassistent) (Berger/Volkmar 2020, S. 384 ff.; Kirchhoff 2018). Der Einsatz von Heck- und Arbeitsbereichskameras sowie von Fahrerassistenzsystemen werden in der DGUV-Regel 114-601 Abfallsammlung empfohlen und Fahrerassistenzsysteme bereits in vielen Müllfahrzeugen eingesetzt (DGUV o.J.). Darüberhinausgehende spezielle Lösungen für die Abfallwirtschaft betreffen die Automatisierung von Vorgängen des Abfalltransports. So testen beispielsweise das Entsorgungsunternehmen Renova und der Fahrzeughersteller Volvo ein System für das autonome Rückwärtsfahren aus Sackgassen für Müllfahrzeuge in der Stadt Göteborg, Schweden (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 149 f.). Bei der ersten Befahrung eines Sammelgebiets werden Route und Sammelpunkte der Tour vom Fahrzeug mithilfe von Sensoren erfasst. Anhand der gespeicherten Informationen kann sich das Fahrzeug bei darauffolgenden Fahrten orientieren. Auf Befehl auch von außerhalb des Fahrzeugs fährt das Fahrzeug autonom rückwärts. Der Vorgang wird von Sensoren überwacht, sodass das Sammelfahrzeug an parkenden Fahrzeugen und anderen unerwarteten Hindernissen vorbeinavigieren bzw. anhalten kann.

An der Entwicklung von Fahrzeugen, die nicht nur (kleine Strecken) rückwärts, sondern vollständig autonom durch die Stadt navigieren und bereitgestellte Behälter leeren, wird derzeit gearbeitet, um eine bessere, zeitlich entzerrte Abfallsammellogistik zu erlauben (Schneider 2020, S. 375 ff.). Dazu wird u. a. KI-gestützte Software für autonome Fahrzeuge für die Abfallwirtschaft entwickelt (Waste360 2019b), mit deren Hilfe die Sammlung zu jeweils optimalen Zeitpunkten erfolgen (Tourenoptimierung und Predictive Pick-up) kann.

Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein bzw. Sammeln von Datenbeständen beispielsweise durch sensorbestückte Behälter (Berg et al. 2019, S.104). Derzeit werden von Volvo ursprünglich für den Bergwerksbetrieb entwickelte autonome Lastwagen für die Abfallwirtschaft adaptiert (Volvo Group 2017). Mithilfe von vorprogrammierten Routen sowie Sensoren zur Erkennung von Hindernissen fährt das Sammelfahrzeug ohne FahrerIn oder Fahrer. Die Aufgaben des Sammelpersonals bestehen nur noch darin, das Fahrzeug zu Fuß zu begleiten und anhand eines Steuerungspanels am Fahrzeugheck kurz anzuhalten, um die Sammelbehälter zu entleeren. Der Hersteller hebt das Potenzial der Technologie zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen für das Sammelpersonal, die höhere Verkehrssicherheit und die bessere Umweltbilanz hervor. Die Technologie wird derzeit in der Praxis getestet (Waste360 2019a). Auch der japanische Hersteller von Nutzfahrzeugen FUSO³⁴ hat ein elektrisches Konzeptfahrzeug mit Müllsammelaufbau vorgestellt, welches sich aus der Distanz durch ein Touchscreengerät steuern lässt und mit hochpräzisen Sensoren Personen und Hindernisse erkennt und darauf reagiert (Hoffmann 2020; Recycling Magazin 2020c). Bis zur Einsatzreife von autonomen Müllfahrzeugen in urbanen Gebieten ist allerdings noch viel Entwicklungsarbeit notwendig, bislang werden solche Lösungen nur vereinzelt in kontrollierbaren Umgebungen wie Deponien oder Materialrückgewinnungsanlagen eingesetzt (Waste360 2019a). So finden autonome Kehrmaschinen beispielsweise in ersten Wertstoffhöfen Anwendung (Smartcity Duisburg 2020). Ein weiteres Anwendungsfeld sind autonome Fahrzeuge für das Wenden und Durchmischen von großen Komposthaufen (Pelzl, C. 2020).

Über die Autonomisierung von Müllfahrzeugen hinaus könnten perspektivisch auch autonome Roboterlösungen zur Abholung von Abfallbehältern entwickelt werden. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts »DustBot« wurden Kleinfahrzeuge entwickelt, die auf Anforderung beim Müllverursachenden kleine Mengen an Hausmüll abholen, um sie zu einer Abfallsammelstelle zu bringen (EK o. J.). Die Technologie wurde in der kleinen Stadt Peccioli in Italien erprobt (Ferri et al. 2011), wurde allerdings nie kommerzialisiert.

Mit zunehmenden technischen Fähigkeiten der Systeme wird angenommen, dass der Sammelprozess immer weiter automatisiert werden kann. Allerdings wird die Realisierung der Vision eines vollständig automatisierten Abfalltransports von Expert/innen noch in ferner Zukunft (mind. 20 Jahre) gesehen (Berg et al. 2019, S.111).

34 FUSO, Mitsubishi Fuso Truck and Bus Corporation ist ein Tochterunternehmen der Daimler Truck (www.fuso-trucks.at/content/eu/austria/de/ueber-fuso/fuso-geschichte.html; 10.3.2023).



3.2.1.8 Unterflurbehälter mit automatischer Sortierung, Detektion von Störstoffen und mengengerechter Abrechnung

Perspektivisch könnte die Entwicklung von Unterflurbehältern mit automatischer Sortierung, Detektion von Störstoffen und mengengerechter Abrechnung an Bedeutung gewinnen. Gebäude mit Vakuumbabfallschächten oder separaten Fahrstühlen für den Abtransport der Abfälle in die unterirdischen Verwertungsanlagen stellen dafür zwei möglichen Visionen dar (Schneider 2020, S. 375 ff.). Bezüglich des ersteren bietet das schwedische Unternehmen Envac seit Längerem ein Müllabsaugsystem an, dessen Digitalisierung im Rahmen des europäischen Projekts »Grow Smarter«³⁵ gefördert wurde. Dabei wurde ein Unterflurrohrleitungssystem in einem modernisierten Altbaugebiet mit 350 Haushalten eingerichtet. An der Einwurfstelle identifizieren sich die Anwohner mittels RFID-Chip, sortieren den Abfall entsprechend der Abfallfraktionen in verschiedenfarbige Beutel und werfen sie in den Schacht ein. Mit Sensoren wird die Farbe des Beutels identifiziert und der Beutel gewogen. Mittels Druckluft werden die Beutel über das Rohrleitungssystem zu einer zentralen Sammelstelle transportiert. Von dort werden sie zu einer Sortieranlage gebracht, wo die Abfälle den entsprechenden Verwertungswegen zugeführt werden. Im Anschluss erhalten Anwohner/innen ein persönliches Feedback zu ihrer Abfallerzeugung. Die gefahrenen Wege des Abfalltransports reduzieren sich um 90 % gegenüber einer konventionellen Sammlung mittels Fahrzeugs und Sammelbehälter vor jedem Gebäude und damit auch Treibhausgasemissionen, Lärm und Kosten. Ähnliche Systeme wurden in Israel in mehreren Kommunen sowohl in privaten Wohngebieten als auch in öffentlichen Einrichtungen eingeführt, allerdings mit hohen Investitionskosten und teilweise operativen Schwierigkeiten bei Verstopfungen (Kaza et al. S. 147). Aufgrund der notwendigen Absauganlagen lassen sich Müllabsaugsysteme nur schwer im Gebäudebestand integrieren, stellen aber ggf. eine Option für Neubauprojekte dar und könnte in der Bundesrepublik insbesondere für besonders verdichteten Siedlungsstrukturen (Buchert et al. 2017, S. 23), Neubaugebieten oder im Zuge der Errichtung größerer Gebäudekomplexe von Interesse sein (Berg et al. 2019, S. 151).

35 <https://grow-smarter.eu/home/> (15.3.2023)

Abb. 3.3 Unterflurbehälter der Berliner Stadtreinigung



Quelle: BSR

3.2.2 Abfallbehandlungsanlagen und -maschinen

Die Digitalisierung der Überwachung und Steuerung von Betriebsprozessen in Maschinen und Anlagen erfolgt in vielen Sektoren in einem rasanten Tempo. Die Abfallwirtschaft befindet sich im Vergleich zu anderen Sektoren zwar noch in einem frühen Stadium der Digitalisierung, sie kann aber von den dort entwickelten Konzepten und gemachten Erfahrungen profitieren. Der Technologie- und Wissenstransfer soll insbesondere mit Blick auf Abfallbehandlungsanlagen und -maschinen erfolgen (Sarc et al. 2019, S. 479). Über die Digitalisierung von Überwachungs- und Steuerungsprozessen der Abfallbehandlung hinaus spielen digitale Sortier- und Trenntechniken in der Aufbereitung von Abfällen und zur Erreichung der gesetzlich festgelegten Sortierquoten eine wichtige Rolle (Bilitewski et al. 2018, S. 129; ISWA 2017). Nach einer kurzen Übersicht zum Stand der Technik bei der Überwachung von Anlagen werden in diesem Kapitel vor allem Sensortechnologien für die Abfallsortierung vorgestellt, denn auch wenn sie für öRE keine direkten Auswirkungen haben, stellen sie im Gesamtkontext der Kreislaufwirtschaft eines der größten Potenziale der Digitalisierung dar.

3.2.2.1 Automatisierte Anlagen- und Maschinenüberwachung und -steuerung

Die für die Industrie 4.0 typische Vernetzung von Maschinen in der Cloud, die Erhebung großer Mengen an Prozessdaten und ihre Analyse (Data Analytics) spielen heutzutage in der Abfallwirtschaft, Sortier- und Recyclingindustrie eine wichtige Rolle (Berg et al. 2020b, S. 17). Supervisory-Control-and-Data-Acquisition(SCADA)-Systeme dienen in der Kombination mit Sensoren der Überwachung und Steuerung von Prozessen. Automatische Alarmbenachrichtigungen werden beim Überschreiten von Schwellenwerten erstellt. Welche Daten



erhoben und analysiert werden, hängt von der Anlage ab. Auf einer Deponie wird beispielsweise die Produktion von Gas überwacht und anhand der Messdaten prognostiziert (Kranert 2017, S. 511). In großen Müllverbrennungsanlagen findet in der Regel eine kontinuierliche digitale Prozessüberwachung statt. Heizwert, Brennstoffzusammensetzung und -qualität, Rosttemperatur sowie zentrale Parameter zum Anlagenzustand werden automatisch gesammelt und ausgewertet. Ein optimierter Betrieb schont Treibhausgasemissionen sowie Wartungsnotwendigkeit (ContextCrew Neue Energie GmbH 2019). In einer Sortieranlage können neben Sensoren für die Sortierung von Abfällen (Kap. 3.2.2.2) auch Sensoren zum Brandschutz eingesetzt werden. So kann beispielsweise die Temperatur der Partikel auf dem Förderband mit Infrarotsensoren gemessen werden, um im Bedarfsfall eine automatische Kühlung durch Wassersprinkleranlagen oder einen Alarm zur manuellen Entfernung der identifizierten Gegenstände aus dem Abfallstrom auszulösen. Eine solche Lösung wird in einer Abfallrecyclinganlage in Obersteiermark (Österreich) seit 2019 eingesetzt (RecyclingPortal.eu 2020b). Die Automatisierung von Anlagen betrifft auch Deponien. So wird in Pilotprojekten die Messung von Deponieemissionen mit der Hilfe von Drohnen erprobt.³⁶ Perspektivisch könnte die Steuerung von Abfallbehandlungsanlagen mithilfe einer vorausschauenden Berechnung der Abfallerzeugung auf der Basis von KI-basierten Methoden erfolgen, wie in Oslo bereits erprobt wird (Sæther Fasting 2019).

Eine stärkere Digitalisierung der Abfallbehandlungsanlagen und der Maschinen wird in naher Zukunft erwartet, die dynamisch Daten über Betriebsabläufe und Stoffströme aus einer Vielzahl von Sensoren erheben. Auf Grundlage der erhobenen Daten, die zunehmend auf cloudbasierten Datenplattformen gespeichert werden, wird erwartet, dass Sortiermaschinen und Anlagen über unterschiedliche Standorte hinaus vernetzt und automatisch gesteuert werden (Sarc et al. 2020, S. 1002). Somit sollen personelle und maschinelle Kapazitäten optimal genutzt und eine vorausschauende Wartung sowie Prozessoptimierungen möglich sein (Flemming 2019; Preuss 2019; Schindler 2019).

Kasten 3.2 Beispiel: KI für die Optimierung von Betriebsabläufen in Müllverbrennungsanlagen

Auch Verbrennungsprozesse können mit KI-Methoden optimiert werden. Fraunhofer UMSICHT untersucht am Beispiel kleinerer Biomassekraftwerke, wie Verbrennung von Biomasse digital überwacht und gesteuert werden können, um einen stabilen Verbrennungsprozess und die höchste Ausbrandqualität von Feststoff und Gasphase bei wechselnder Brennstoff-

³⁶ www.resource.is/en/portfolio-items/mapping-landfill-methane-emissions-with-uav/ (10.3.2023)

qualität und bestmöglicher Effizienz zu erreichen. Dazu werden Daten zu Heizwert, Brennstoffzusammensetzung und -qualität, Rosttemperatur sowie Anlagenzustand gesammelt und mit KI-Methoden ausgewertet. Darauf basierend werden die automatisierten Einstellungen für den jeweiligen Brennstoff sowie für kritische Anlagenzustände festgelegt (Fraunhofer UMSICHT o.J.). Ähnliche Untersuchungen zur Entwicklung und Demonstration eines automatisierten, flexiblen und bedarfsgerechten Betriebs finden auch für weitere Anlagentypen statt, wie z.B. im Projekt »FlexPump« (Fraunhofer IKTS et al. 2020) mit Fokus auf Biogasanlagen.

3.2.2.2 Sensorsysteme für die Sortierung von Abfällen

Die möglichst sortenreine Erfassung und Sortierung von Abfällen ist eine zentrale Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling und eine effiziente thermische Verwertung. Je nach Abfallstrom erfolgt die Sortierung ggf. in mehreren Schritten und an unterschiedlichen Orten (z. B. im Wertstoffhof, in Sortieranlagen, Recyclinganlagen) (Kasten 3.3). Digitale Lösungen haben insbesondere für die Sortierung von Einzelkörnern aus der Zerkleinerung von Wertstoffen stark an Bedeutung gewonnen (Martens/Goldmann 2016, S.45), wodurch die Sortiertechnik bereits einen hohen Automatisierungsgrad aufweist (Bilitewski et al. 2018, S.133). Sortieranlagen werden mit Automatisierung und digitalen Technologien ausgerüstet, sodass die Sortierung von Abfällen immer seltener manuell erfolgt (Gerth 2013, S.37). Zur Anwendung kommen Sensoren, um Materialien nach ihren Eigenschaften, wie beispielsweise Farbe, Form, Feuchtigkeit, Helligkeit oder Fluoreszenz, zu trennen (Martens/Goldmann 2016, S.58), nachdem das Sortiergut gereinigt, getrocknet, zerkleinert und die Müllpartikel vereinzelt wurden (Gerth 2013; Gundupalli et al. 2017, S.58). Die Eigenschaften und Position der einzelnen Partikel werden dabei von Sensoren auf dem Förderband erfasst und ergänzen so die manuelle Sortierung. Anschließend werden sie mittels Blasdüsen/Druckluft oder mechanischen Vorrichtungen (z.B. Klappen) in den entsprechenden Materialaustrag geschoben bzw. ausgeschossen (Martens/Goldmann 2016, S.58). Die genaue Ausstattung ist in jeder Vorbehandlungsanlage unterschiedlich (Bilitewski et al. 2018, S.150; Pinasseau et al. 2018; Prognos/INFA 2020, S.28). In den letzten Jahren wurden immer mehr vollautomatische Sortieranlagen in Betrieb genommen (Prognos/INFA 2020, S.28).

Kasten 3.3 Sortierung von Abfällen

Die bei der Sortierung durch kommunale und gewerbliche Entsorger gewonnenen Metalle sowie Papier, Pappe und Kartonage sind in der Regel direkt



für das Recycling geeignet (Bilitewski et al. 2018, S. 148). Im Gegensatz dazu bedürfen Kunststoffe, die nicht thermisch verwertet werden, in der Regel weiteren Aufbereitungsschritten durch eine materialspezifische Sortierung und Vorbehandlung zum Recycling, die in spezialisierten Sortieranlagen erfolgen. Bei Sperrmüll werden Holz und Metalle händisch oder manuell mithilfe von Greifern oder Kränen auf dem Wertstoffhof separiert. Auch elektrische und elektronische Haushaltsgeräte und grobe Störstoffe müssen zur Separierung vorsortiert werden (Bilitewski et al. 2018, S. 156).

Viele Sortierschritte werden mit mechanischen Verfahren im Rahmen der Sortierung durchgeführt. Dabei nutzen Sortierungstechniken (z.B. Dichtesortierung, Sortierung im Magnetfeld, Sortierung im elektrischen Feld, Flotation) die Eigenschaften von Materialien, wie magnetische Suszeptibilität, elektrische Leitfähigkeit, Gewicht oder Dichte, für die Trennung. So können insbesondere organische Abfälle, Eisenmetalle, Nichteisenmetalle, Plastik und Papier sortiert werden (Gundupalli et al. 2017, S. 58). Die unterschiedlichen Sensortechnologien werden im Folgenden vorgestellt:

Nahinfrarotspektroskopie

Die Sensortechnologie mit der größten Verbreitung in der Abfallsortierung ist die Nahinfrarot(NIR-)spektroskopie. Das zu sortierende Material wird mit infraroter Strahlung beleuchtet und das reflektierte Spektrum mit einem Sensor gemessen. Da jedes Material ein charakteristisches Reflektionsspektrum aufweist, lassen sich durch die Auswertung der Spektren die untersuchten Objekte quasi in Echtzeit verschiedenen Materialklassen zuordnen. NIR-Sensoren werden beispielsweise für die Sortierung verschiedener Kunststoffarten, wie Polyethylenterephthalat (PET), Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE), und die Abtrennung von Papier verwendet, aber auch für die Abtrennung von Holz aus dem Sperrmüll (Lechner et al. 2014, S. 6). Ein Nachteil ist allerdings, dass schwarze Kunststoffe aufgrund ihrer Farbe von NIR-Sensoren nicht erkannt und folglich nicht richtig sortiert werden (Gundupalli et al. 2017, S. 68).

Oberhalb von Transportbändern angebrachte NIR-Sensoreinheiten sind mittlerweile eine Standardtechnik in modernen Sortieranlagen (Bilitewski et al. 2018, S. 133). Neben ihrem breiten Einsatz beispielsweise in der Sortierung von Kunststoffverpackungen werden sie zunehmend auch für die Sortierung von Wertstoffen aus gemischten Siedlungsabfällen (Lechner et al. 2014, S. 8) oder jüngst in der ersten vollautomatischen Textilsortieranlage im industriellen Maßstab eingesetzt (Recycling Magazin 2021d). Auch in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen finden NIR-Sensorsysteme zunehmend Anwendung, um die Qualität der ausgeschleusten Ersatzbrennstoffe zu erhöhen (Fritzsche et al. 2017, S. 389), Schadstoffe zu entfernen und einen stabilen Energiegehalt zu erzielen (Flamme/Hams 2018, S. 649). Auch für die Behandlung von Abfällen, die aus



dem Rückbau von Deponien resultieren, sind NIR-Sensoren geeignet, da sie insbesondere eine Separierung der mineralischen und organischen Bestandteile ermöglichen sowie eine Abtrennung von Störstoffen (z. B. Polyvinylchlorid [PVC]) aus dem potenziellen Ersatzbrennstoff (Küppers et al. 2019).

VIS-Spektrometrie

Optoelektronische Sensoren messen optische Eigenschaften von Gegenständen wie Farbe, Helligkeit, Transparenz, Form, Konsistenz oder Größe. Die visuelle Spektrometrie (VIS) inklusive Fluoreszenzmessung (UV-VIS) ermöglicht die Erkennung von Farben, Transparenz, Fluoreszenz, Glanz und wird für die Sortierung von farbigen Kunststoffen und Papieren verwendet, insbesondere um PP-Kunststoffe aus gemischten Kunststoff- oder Siedlungsabfällen abzutrennen (Martens/Goldmann 2016, S. 59). UV-VIS wird für die Detektion von undurchsichtigem Glas, Spezialglas (Keramik, Bleiglas, Borosilikatglas) und Papier verwendet (Gundupalli et al. 2017, S. 66). Von Nachteil ist allerdings, dass Oberflächenverunreinigungen (z. B. Etiketten) die Erkennung des Materials erschweren (Gundupalli et al. 2017, S. 66). VIS-Sensoren werden bereits in MBA, MVA sowie Anlagen zur Zerkleinerung von Metallabfällen eingesetzt (Pinasseau et al. 2018, S. 100). In der Entwicklung sind optische Sortiervverfahren für die Abtrennung von Gips- und Betonkomponenten beispielsweise aus der Feinfraktion von Deponien zur Aufbereitung von Mineralstoffen zwischen 10 und 60 mm, die für den Einsatz im Straßenbau verwertet werden können (Krüger et al. 2018, S. 747). Ebenfalls wird das technische Potenzial von bildgebender Fluoreszenzabklingzeitmessung für die Entwicklung eines optischen Verfahrens zur artspezifischen Sortierung von Altholz analysiert (Versen 2020).

Elektromagnetische Sensoren

Für die Identifikation von Metallen werden häufig elektromagnetische Sensoren, auch Induktionssensoren genannt, verwendet. Induktionssensoren messen die Leitfähigkeit der im Abfallstrom enthaltenen Materialien. Sie können für die Aussortierung von Metallen in vielen Abfallströmen, darunter auch gemischten Stoffströmen, eingesetzt werden (Lechner et al. 2014). Induktionssensoren werden insbesondere für die Erkennung von Nichteisenmetallen genutzt (Gundupalli et al. 2017, S. 62) und sind für die Trennung der Metallfraktion die am häufigsten verwendete Technik (Gundupalli et al. 2017, S. 70).

Röntgentransmissionssensor

Die Röntgentransmissionsmessung identifiziert Materialien auf Grundlage ihrer Dichte und Zusammensetzung (Martens/Goldmann 2016, S. 59). Dazu werden die auf einem Förderband transportierten Materialien mit Röntgenstrahlung



durchleuchtet und die Intensität der Strahlung mit einem Sensor gemessen. Die Technik wird beispielsweise auch für Prozesse der mechanischen Behandlung von Metallabfällen in Zerkleinerungsanlagen sowie bei der Behandlung von Abfällen zur thermischen Verwertung angewendet (Pinasseau et al. 2018, S. 100). Die Röntgentransmissionsmessung verspricht ein hohes Potenzial insbesondere für Aufgaben, für die es noch keine optimale Sortierlösung gibt (Martens/Goldmann 2016, S. 59). Obgleich sich damit aus der Kunststoffabfallfraktion ausschließlich PVC erkennen lässt, kann die Technik wegen ihrer Fähigkeit, schwarze Kunststoffe und oberflächenkontaminierte Fraktionen zu erkennen, auch in der Kunststoffsortierung von Vorteil sein (Gundupalli et al. 2017, S. 65). Darüber hinaus können damit Induktionssensoren ergänzt werden, um eine höhere Effizienz und Sortierpräzision von Metallen zu erreichen (Gundupalli et al. 2017, S. 64). Auf Röntgentransmission basierende Sortiersysteme werden zur Sortierung von Nichteisenmetallen in Leicht- (z. B. Aluminium) und Schwermetalle (z. B. Kupfer, Blei) eingesetzt, die z. B. aus Abfallverbrennungsrostaschen zurückgewonnen werden können (Pretz/Feil 2015, S. 224). Die Rückgewinnung von Nichteisenmetallen aus Rostaschen ist seit vielen Jahren Stand der Technik und wird aufgrund der steigenden Nachfrage für Nichteisenmetalle kontinuierlich verbessert und auf immer feinere Partikelgrößen ausgeweitet (Pretz/Feil 2015, S. 217). Aus Rostaschen können insbesondere Aluminium und Kupfer wiedergewonnen werden (Quicker 2018, S. 673). Mit dem Recycling von Aluminium kann bis zu 95 % Energie und 92 % CO₂ gegenüber der Primärherstellung aus Aluminiumerz eingespart werden (Recycling Magazin 2021c). Gleichwohl gehen viele wertvolle Metalle, wie Gold, Silber, Platin oder Palladium, die sich in Form von Partikeln in Rostaschen befinden, nach wie vor verloren (acatech 2021, S. 16).

Röntgenfluoreszenzspektrometrie

Bei der Röntgenfluoreszenzspektrometrie wird das Material mit Röntgenstrahlung angeregt und die in der Folge emittierte Fluoreszenzstrahlung mit einem Röntgensensor gemessen. Sie wird beispielsweise für die Erkennung von Bleiglas oder Glaskeramik genutzt (Martens/Goldmann 2016). Außerdem können damit anorganische von organischen Materialien sowie leichte von schweren Metallen unterscheiden werden (Lechner et al. 2014). Eine weitere Anwendung ist die Erkennung von Arsen (z. B. in Holzabfällen) sowie von Kupfer und Chrom (Gundupalli et al. 2017). Die Methode wird weiterentwickelt, um Polypropylen (PP) aus der Kunststofffraktion zurückzugewinnen (Gundupalli et al. 2017, S. 65) sowie für die Trennung von PVC und PET (Martens/Goldmann 2016, S. 288).



Laserinduzierte Breakdownspektroskopie

Die laserinduzierte Breakdownspektroskopie (LIBS), welche die Marktreife erst kürzlich erreicht hat, liefert spektrometrische Informationen für die Analyse von Metalllegierungen, Kunststoffen und behandelten Holzabfällen (Gundupalli et al. 2017, S.63). Dies ermöglicht beispielsweise die Sortierung von spezifischen Metalllegierungen (Laska et al. 2019) oder die Erkennung von Schwermetallen in Holzabfällen. Zudem können mit der LIBS Stoffe erkannt werden, die von NIR-Technologien nicht erfasst werden, etwa Glas oder schwarze Kunststoffe, die lange ein Problem bei der Sortierung dargestellt haben (Flemming 2019; Meyer et al. 2017). Allerdings müssen die Abfälle frei von Schmiermitteln, Farben und Oxidschichten sein, da sie über die Charakterisierung ihrer Oberfläche identifiziert werden (Gundupalli et al. 2017, S. 63 f.). Vorteil dieser Technologie ist die schnelle Sortierung großer Abfallvolumen (Gundupalli et al. 2017, S.63). 2020 wurde eine Pilotanlage mit LIBS-Sensortechnologie in Karlsruhe in Betrieb genommen, die das Erkennen und Sortieren von Legierungen in Metallschrotten schneller und genauer machen soll (Recycling Magazin 2021a). LIBS-Sortieranlagen sind noch nicht verbreitet.³⁷

Kombinierte Sensorsysteme

Kombinierte Sensorsysteme sind notwendig, um bessere Sortierergebnisse zu erzielen. Auf dem Markt sind Standardprodukte verfügbar, Hersteller bieten aber auch kundenindividuelle Lösungen an.³⁸ Je nach Anforderungen kann die Sensorausstattung somit nicht nur an die Art der zu behandelnden Abfallströme, sondern auch an die Verwertungsziele angepasst werden, z. B. eine reine Wertstofffraktion mit möglichst wenig Verunreinigungen oder eine hohe Wertstoffausbringung, bei der Verunreinigungen eher toleriert werden (siehe Laska et al. 2019, S.560, am Beispiel der Aluminiumfraktion). Auch Robotiksysteme für die automatische Sortierung von Abfällen befinden sich bereits in einer fortgeschrittenen Entwicklungsstufe. Ebenso konnten bei Sortiermechanismen mit Luftausschleusung in den letzten Jahren bedeutsame Fortschritte erzielt werden (Berg et al. 2020b, S.13), sodass sie künftig an Bedeutung gewinnen werden (Sarc et al. 2020, S. 1003). Auf Grundlage von Informationen aus Sensoren wird ein Greifarm, ggf. mit einem Saugnapf ausgestattet, gesteuert, um damit die identifizierten Objekte auf dem Förderband in die geeigneten Auswurföffnung zu bewegen (Sarc et al. 2020, S. 1004 f.).

Inzwischen werden Systeme von verschiedenen Herstellern angeboten und eignen sich auch für leichtere und kleinere Materialien, wie Verpackungs- oder

³⁷ <https://imec-radiation.de/lib-sortieranlage/> (29.3.2021)

³⁸ Beispiele von kombinierten Sensorsystemen und unter www.tomra.com/de-de/sorting/recycling/tomra-solutions/combisense; www.sesotec.com/emea/en/products/sorting-systems (9.3.2023)



Siedlungsabfälle.³⁹ Die Sortierung und Aufbereitung von Kunststoffen erfolgen bereits heute mit kombinierten Sensorsysteme zur Erkennung von Größe, Materialart und Farben weitestgehend vollautomatisch (Prognos/INFA 2020, S. 50). Dennoch erreichen Sortieranlagen für Leichtverpackungen in Deutschland derzeit eine maximale Sortierquote von lediglich 50%. Insbesondere schwarze Kunststoffe sowie Verpackungen mit Vollhüllenetiketten stellen nach wie vor Herausforderungen für die Sortierung dar. Spezifische Lebensmittelverpackungen, Polymertypen wie Tiefzieh- oder Spritzgusscharzqualitäten können nicht gezielt sortiert werden (Woidasky et al. 2019, S. 1). Einen sensorgestützten Roboter Greifarm, der mit Sensoren und KI-basierter Software die Beschaffenheit von Abfällen erkennt und sortiert, testet das Unternehmen Alba in ihrer Sortieranlage für Leichtverpackungen in Leipzig (Allgemeine Bauzeitung 2020). Für die Fremdstoffentfrachtung von Bioabfällen sind spezielle Sortierroboter erforderlich, denn die herkömmliche Sortierung mit Druckluftaustrag ist bei einem Trockenanteil von nur 40% nicht einsetzbar. Ein Konzept für ein solches System wurde 2022 entwickelt und wird in Oetwil am See, in der Schweiz, eingesetzt (EUWID Recycling und Entsorgung 2022). Derzeit wird an der Erhöhung der Geschwindigkeit existierender Systeme wie auch an der Erhöhung des Erfassungs- und Reinheitsgrads der rückgewonnenen Partikeln geforscht, um ein wirtschaftliche(s) Recycling zu ermöglichen (Gruber et al. 2019).

Für die Behandlung von gemischten Siedlungsabfällen, von Rostaschen aus der Müllverbrennung oder von Wertstoffen aus Deponien, wird mit dem Einsatz hochmoderner digitaler Technologien tendenziell ein vergleichsweise geringes Potenzial für ein hochwertiges Recycling assoziiert. Dies liegt an der hohen Verunreinigung der verwertbaren Stoffe (Bilitewski et al. 2018, S. 132). Dennoch zeigte ein Entsorgungsunternehmen in Norwegen, dass die Rückgewinnung von Kunststoffen und Papier aus gemischten Siedlungsabfällen durch eine vollautomatische Sortieranlage gute Ergebnisse erzielen kann. Mit der 2019 in Betrieb genommenen Sortieranlage konnten Getränkekartons und Kunststoffe mit einem hohen Reinheitsgrad aus dem gemischten Abfallstrom getrennt werden (Recycling Magazin 2021b). Auch neuere Ansätze werden derzeit erforscht, wie die Erhöhung des Recyclinganteils gemischter Siedlungsabfälle mithilfe von 3-D-Sensorik und KI (Know-Center GmbH 2021).

Ausblick

Sortier- und Trenntechnik gehören zusammen mit intelligenten Sammelbehältern zu den am häufigsten patentierten Abfall- und Recyclingtechniken (Prognos/INFA 2020, S. 137 f.). Zur Steigerung der Rückgewinnung von Materialien aus dem Abfallstrom ist Forschung zu Sensortechnologien, die insbesondere dort und ergänzend verwendet werden können, wo mechanische

³⁹ z. B. <https://www.terex.com/zenrobotics>; www.entsorgungstechnik-bavaria.de/img/Roboter/MAX-AI.pdf (10.3.2023)



Technologien an ihre Grenzen kommen und/oder dort wo alternative Sensortechnologien nicht wirtschaftlich eingesetzt werden können.

Ein vielversprechender Ansatz auf der Produktseite sind chemische Marker oder digital lesbare Kennzeichnungen wie digitale Wasserzeichen, die Informationen über die Materialzusammensetzung von Produkten oder Verpackungen für die Sortierung und das Recycling bereitstellen. Chemische Marker sind eindeutig identifizierbare Moleküle, die in Produkten oder Verpackungen integriert werden, wobei auch eine Kombination verschiedener Marker möglich ist. Als chemische Marker werden in der Regel fluoreszierende Moleküle verwendet, die mithilfe der Fluoreszenzspektroskopie erkannt werden können (Knappe et al. 2021, S. 19). Ein Beispiel für die Entwicklung eines digitalen Wasserzeichens ist die Initiative »HolyGrail«⁴⁰ durch einen Zusammenschluss von mehr als 160 Unternehmen und Organisationen aus der Konsumgüter- und der Recyclingbranche. Dabei werden unsichtbare Codes auf Etiketten, aber auch direkt auf Kunststoffverpackungen gedruckt, die von modifizierten NIR-Scannern gelesen werden können. Die Codes enthalten Information zur Materialzusammensetzung und zur Funktionalität der Verpackung bzw. zu den darin verpackten Produkten (Packaging Europe 2019). Es werden Sortiereinheiten im semiindustriellen Maßstab entwickelt (320° 2021b). Einige Einzelhändler haben bereits digitale Wasserzeichen in ihre Verpackungen übernommen (z.B. Wegmans, Walmart). Die Technologie ermöglicht es, beispielsweise Lebensmittel- und Nichtlebensmittelverpackung zu unterscheiden, transparente und schwierig zu recycelnden Verpackungen oder mehrschichtige Verpackungsmaterialien zu erkennen (MCC Verstraete 2019). Perspektivisch könnten digitale Wasserzeichen für weitere Produkte entwickelt werden und so eine wichtige Rolle für Sortieranlagen und ggf. auch für die kommunale Abfallwirtschaft spielen.

Eine bessere Kenntnis der Abfallzusammensetzung und der darin enthaltenen Rohstoffe bereits im Vorfeld der Anlieferung der Abfälle in eine Aufbereitungsanlage birgt das Potenzial, die Abfallbehandlung weiter zu optimieren (Wilts/Berg 2017). Ein Ansatz hierzu bieten digitale Zwillinge, die als digitale Abbilder realer Gegenstände alle relevanten Informationen zu den Produkten und ihrer Materialzusammensetzung dokumentieren (Wilts/Berg 2017, S. 5). Der Einsatz von digitalen Zwillingen, ggf. in Kombination mit Sensoren zur kontinuierlichen Bewertung des Produktzustandes (Pinasseau et al. 2018, S. 78), war bislang insbesondere für Produkte geeignet, die eine lange Nutzungsdauer aufweisen, wie beispielsweise Fahrzeuge oder Elektro- oder Haushaltsgeräte. Anhand der Informationen aus dem digitalen Zwilling können Entscheidungen über Wiederverwendung, Demontage, Wiederaufarbeitung oder weitere Verwertungsmöglichkeiten eines Produkts oder seiner Teile optimiert werden (Rocca et al. 2020; Schleich et al. 2019, S. 8 f.). Um digitale Zwillinge für den speziellen Anwendungsfall der Erkennung von Abfällen nutzbar zu machen,

40 www.digitalwatermarks.eu/ (10.3.2023)



müssen die bestehenden Sortiertechnologien weiterentwickelt bzw. mit der Möglichkeit ausgestattet werden, die Informationsträger zu erkennen (Berg et al. 2019, S. 128). Für die Anwendung von digitalen Zwillingen für zu rezyklierende Produkte (auch als digitale Produktpässe genannt) sind noch einige Herausforderungen zu bewältigen, z. B. die Suche nach der besten technischen Lösung, um die Information über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts übermitteln zu können. Inzwischen sind die Technologien, die für Verpackungen eingesetzt werden (z. B. digitale Wasserzeichen, chemische Tracer) auch als Informationsträger für Produkte verfügbar, die manuell oder automatisch ausgelesen werden können (Ökopol 2020, S. 60 ff.). Mit dem Vorschlag der EU-Kommission für eine Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte ist die breite Einführung von Produktpässen vorgesehen (EK 2022a).

3.2.3 Verwaltung und Planungsprozesse

Für die interne Organisation und die Kommunikation sowohl mit Geschäftspartnern als auch mit Bürger/innen bietet die Digitalisierung Chancen für effizientere Abläufe (Berg et al. 2019, S. 84 f.; Prognos/INFA 2020, S. 156). Im Folgenden werden drei Aufgabenbereiche der Verwaltung von kommunalen Entsorgungsträger diskutiert, die sich aus der Perspektive der Digitalisierung als besonders relevant erwiesen haben (Berg et al. 2019, S. 75 ff.). Es handelt sich dabei um

- die interne Organisation und das digitale Auftragsmanagement,
- die Kommunikation mit Bürger/innen sowie
- die Förderung der Kreislaufwirtschaft mit digitalen Handelsplattformen.

3.2.3.1 Interne Organisation und digitales Auftragsmanagement

Im Bereich der internen Organisation bietet die Digitalisierung vielfältige Möglichkeiten und große Potenziale für effizientere Prozesse (Berg et al. 2019, S. 84 ff.). Viele Aufgabenfelder sind bereits weitgehend digitalisiert, so die Buchhaltung, das Controlling, die Erstellung von Aufträgen, Angeboten, Gebührenbescheiden oder Rechnungen, die elektronische Dokumentation von nachweispflichtigen Abfällen (Kasten 3.4). Zunehmend stellen Betriebe das Auftragsmanagement mit Subunternehmen von einem analogen auf ein digitales Auftragsmanagement um (Prognos/INFA 2020, S. 143). Gründe für die Digitalisierung sind Kosteneinsparungen durch effizientere und weniger fehleranfällige Verwaltungsprozesse. Spezifische Softwareangebote existierten für alle genannten Aufgabenfelder, allerdings sind die Softwarelösungen vielfach nicht untereinander kompatibel, was den Datenaustausch erschwert. Das elektronische Nachweisverfahren für gefährliche Abfälle ist hingegen ein Beispiel einer



Lösung, die es allen Akteuren entlang der Verwertungskette zum Verfahren ermöglicht, digital miteinander zu kommunizieren (Berg et al. 2020b, S.22 f.). Darüber hinaus spielt die Digitalisierung bei der Telearbeit oder dem Arbeitsschutz eine zunehmend wichtige Rolle (Berg et al. 2019, S.85).

Eine innovative Form der mobilen Datenerfassung und -verarbeitung wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts unter Beteiligung der Stadtreinigung Hamburg entwickelt und erprobt (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S.147 f.). Dabei handelt es sich um die Smartphone-App »Sauber-App«, die neben Informationen, wie einen Abfuhrkalender, die Funktion »Müllecke fotografieren und melden« enthält. Mithilfe der Funktion können Bürger/innen Fotos von illegalen Müllablagerungen oder von überquellenden Papierkörben zusammen mit ihrem Standort direkt an das Entsorgungsunternehmen schicken. Die eingehenden Meldungen werden durch eine KI-basierte Bilderkennungssoftware vorsortiert und an die entsprechenden Fachstellen weitergeleitet. Die Software ist derzeit in der Lage, 10 von 60 Problemarten (z.B. überquellende Papierkörbe, wilder Sperrmüll) bei illegalen Abfallablagerungen zu 80 % richtig zu klassifizieren. Dadurch ergeben sich Zeitersparnisse bei der Bearbeitung der Meldungen und der Sammelprozess kann optimiert werden. Die KI wird fortlaufend weiter trainiert, um eine bessere Trefferquote zu erzielen und weitere Kategorien von Vermüllungen hinzuzufügen.

Kasten 3.4 Dokumentation von nachweispflichtigen Abfällen

Für nachweispflichtige Abfälle (darunter gefährliche Abfälle) ab einer bestimmten Mindestmenge muss in Deutschland seit 2010 die gesamte Kommunikation zwischen Erzeuger, Entsorger und Behörden sowie die Dokumentation des gesamten Entsorgungsprozesses elektronisch abgewickelt werden. Damit verknüpft ist beispielsweise die Pflicht zur elektronischen Registerführung und zur Verwendung einer rechtskräftigen elektronischen Signatur für alle am Entsorgungsprozess beteiligten Akteure (z. B. Sammler, Beförderer). Die Benutzung des Systems setzt spezielle Hard- und Software voraus. Zwar wird ein Onlinesoftwareportal⁴¹ kostenlos zur Verfügung gestellt, für die regelmäßige Verwendung gibt es allerdings kommerzielle Lösungen, die eine einfachere Handhabbarkeit und weitere Funktionen bieten. Die Unterschriften erfolgen mit personalisierten Chipkarten sowie dafür vorgesehenen Lesegeräten. Auch wenn die Einführung sich für die Betriebe nicht immer reibungslos gestaltet hat, ist das System mittlerweile etabliert und akzeptiert (Berg et al. 2019, S.82).

41 <https://www.eanvportal.de> (16.8.2023)



3.2.3.2 Kommunikation mit Bürger/innen

Der Bereich der Kommunikation hat sich in der empirischen Untersuchung von Berg et al. (2019, S. 75) als der zurzeit am weitesten digitalisierte Bereich in der kommunalen Kreislaufwirtschaft erwiesen. Digitale Technologien können zu einer effektiveren, effizienteren und nutzerorientierteren Kommunikation mit den Bürger/innen beitragen. Die meisten örE verfügen über dezidierte Webseiten und viele Betriebe nutzen bereits Apps und ähnliche Informationsdienste (Berg et al. 2019, S. 124). Zusätzlich zu den etablierten analogen Möglichkeiten der Kommunikation werden die folgenden digitalen Kommunikationskanäle genutzt:

- *Internetpräsenz:* Die Webseiten der örE stellen vor allem allgemeine Informationen oder aktuelle Meldungen zu Dienstleistungen des Entsorgers zur Verfügung. Interaktive Webseiten, über die Kund/innen beispielsweise mit dem örE in Kontakt treten oder ihre Kontaktdaten verwalten können, werden als Kundenportale bezeichnet. Entsprechende Webseiten bzw. Kundenportale gelten bei örE mittlerweile als Standard.
- *Apps für Smartphones/Tablets:* Mobile Applikationen bieten beispielsweise aktuelle Informationen oder Erinnerungsfunktionen an (z. B. bezüglich Leerungsterminen), wobei die Inhalte auch personalisiert angeboten werden können. Außerdem können die in mobilen Endgeräten integrierten Sensoren genutzt werden, z. B. Standortdaten und Kameraaufnahmen für die Meldung von illegal entsorgten Gegenständen (Berg et al. 2019, S. 78 ff.). Vor Kurzem hat die Stadt Frankfurt am Main außerdem einen Informations- und Dienstleistungskanal für ihre Bürger/innen in Betrieb genommen, der mit Smartphones, Tablets und Smart Speakers kompatibel ist (Ehrich et al. 2020, S. 4 ff.).
- *Integration eines abfallwirtschaftlichen Dienstes in eine bereits existierende öffentliche App:* Einige Kommunen bündeln die genannten Funktionen mit anderen kommunalen Informationsangeboten in einer gemeinsamen App. Dies korrespondiert mit der Verpflichtung der Kommunen, im Rahmen des Onlinezugangsgesetzes⁴² Serviceportale zu integrieren.
- *Nutzung von Social-Media-Kanälen:* Dazu gehören insbesondere Facebook, Twitter oder Instagram. Durch die Nutzung dieser schon etablierten Kommunikationskanäle sind die Kosten für den örE wie auch der Aufwand für die Nutzer/innen und damit die Einstiegshürden gering. Nachteile sind allerdings die Abhängigkeit von den Vorgaben der Plattformen und die nicht vorhandenen Individualisierungsmöglichkeiten.

Da örE gemäß § 46 Abs. 1 KrWG zur Öffentlichkeitsarbeit und speziell zur Abfallberatung der Bürger/innen in ihrem Entsorgungsgebiet – im Sinne einer

42 Onlinezugangsgesetz vom 14.8.2017, zuletzt am 28.6.2021 geändert



Aufklärung über Möglichkeiten der Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen – verpflichtet sind, bildet die Förderung der Abfallvermeidung und eines richtigen Sortierverhaltens in Vorbereitung auf die Verwertung von Abfällen einen Schwerpunkt der digital vermittelten Informations- und Kommunikationsangebote. Darüber hinaus können Bürger/innen in einem ansprechenden nutzerfreundlichen Format zur Abfallvermeidung angeregt werden. Das Land Berlin bringt beispielsweise das TrenntMagazin im Onlineformat mit entsprechenden Lifestylertipps heraus. Auch die App »Zu gut für die Tonne« hat Erfolge vermeldet. Auf der Grundlage von Eingaben zu Ernährungsvorlieben und in der eigenen Küche vorhandene Restezutaten werden passende Kochrezepte vorgeschlagen.⁴³ Manche Apps bieten Endkonsumenten eine Unterstützung zum richtigen Sortierverhalten (Kasten 3.5).

Darüber hinaus werden über digitale Plattformen beispielsweise Standorte, Öffnungszeiten und aktuelle Auslastung von Wertstoffhöfen⁴⁴, aber auch Informationen zur Abfallwirtschafts- und Gebührensatzung meist mehrsprachig und teilweise mithilfe von Erklärvideos oder häufig gestellte Fragen (FAQ) kommuniziert. Wichtige Kundendienstleistungen können online über elektronische Formulare bzw. im Kundenportal beantragt werden, z. B. die Vereinbarung von Abfuhrterminen für Sperrmüll, die Beantragungen für die Befreiung von der Biotonnennutzung oder die Bestellung von Abfallbehältern. Im Kundenportal können außerdem Kundendaten verwaltet werden (z. B. die Erteilung von SEPA-Lastschriftmandaten, Meldung von Grundstückseigentümerwechsel) oder Beschwerden an das Entsorgungsunternehmen gerichtet werden.⁴⁵ Schließlich können Abrechnungen elektronisch erfolgen (Prognos/INFA 2020, S. 160). Mit den digitalen Kommunikationsangeboten kann die Leistungserbringung stärker bedarfsorientiert gestaltet und Nachfragen besser erfasst und bearbeitet werden (Berg et al. 2019, S. 76 u. 79).

Kasten 3.5 Beispiel: »Junker Guru«

Die in Italien entwickelte und verbreitete App »Junker Guru«⁴⁶ liefert auf der Basis eines auf der Verpackung aufgedruckten Barcodes Informationen zur richtigen Entsorgung des Produkts gemäß den örtlichen Richtlinien. Die App zeigt auch an, wo sich die nächstgelegene Verwertungsstätte für das zu

43 www.zugutfuerdietonne.de/app/ (10.1.2023)

44 In Singen wird der Andrang an Wertstoffhöfe beispielsweise mithilfe der LoRaWAN-Technologie in Echtzeit gemessen und an die Kund/innen kommuniziert (Kommune 21 2019)

45 Über die proaktive Meldung von Mängeln auf den Abfuhrtouren mit Standortinformationen, Fotos sowie erläuternden Kommentaren durch Angestellte kann die für Beschwerden zuständige Abteilung besser auf die Anfragen von Kund/innen eingehen (VKU 2019, S. 60; Berg et al. 2019, S. 83).

46 www.junker.app (27.2.2023)



Abfall gewordene Produkte befindet. Zudem erhalten die Nutzer/innen Informationen zu Abfällen, die nicht im Rahmen der Behältersammlung erfasst werden können, sowie zu lokalen Reparatur-, Wiederverwendungs- und Recyclingdiensten. Ziel ist es, Fehlwürfe zu verhindern, die Abfallhierarchie stärker zu berücksichtigen und die Qualität der Sammlung zu verbessern, außerdem trägt die App zur Entlastung der kommunale Abfallberatung bei. Zudem liefert die App hilfreiche Informationen über das Sortierverhalten der Bürger/innen. Die Grundlage für die App bildet eine Produktdatenbank, die ständig erweitert wird. So können die Nutzer/innen bislang nicht registrierte Produkte der App melden. Allerdings setzt die Anwendung der App voraus, dass die Verpackung des zu entsorgenden Produktes zum Zeitpunkt der geplanten Entsorgung noch vorhanden oder der Barcode direkt auf das Produkt aufgedruckt ist. Eine Übertragung nach Deutschland ist nach Anpassung technisch möglich. Der finanzielle Aufwand ist nach Abschätzung von Berg et al. (2019, S. 130) verhältnismäßig gering (30.000 Euro für die Anpassung der App für eine Anwendung in Deutschland, mindestens 500 Euro pro Kommune für die Ersteinrichtung, Betriebskosten: 0,10 bis 0,20 Euro/Einwohner/innen pro Jahr).

Perspektivisch wird erwartet, dass die voranschreitende Digitalisierung der Kundenkommunikation noch stärker zunimmt. Beispielsweise könnten KI-basierte Methoden in der Kommunikation mit Kund/innen zum Einsatz kommen, indem bestimmte Serviceangebote durch Chatbots erfolgen (Berg et al. 2019, S. 104). Chatbots sind technische Dialogsysteme, die durch Abgleich mit einer hinterlegten Datenbank vordefinierte Antworten auf häufig gestellte Fragen geben, wobei sie als lernende Systeme ihr Antwortverhalten kontinuierlich verbessern können (Eicher 2016; Shawar/Atwell 2007). Ausgehend von der aktuellen Situation in der kommunalen Abfallwirtschaft erwarten Berg et al. (2019, S. 124) eine Erweiterung der Funktionalitäten digitaler Angebote in Richtung von mehr Interaktion mit den Zielgruppen. Die Intensivierung der Nutzung digitaler Kanäle für die Abfallberatung wird ebenso erwartet. Dabei könnten Endverbraucher/innen beispielsweise durch Gamification in Verbindung mit Sensorik an Verpackungen oder Sammelbehältern zur sortengerechten Abfalltrennung angeleitet werden. Außerdem könnten Bürger/innen auf der Basis ihrer digital gemessenen und qualifizierten Abfälle mithilfe von KI-Methoden automatisiert erzeugte Hinweise zur Abfallvermeidung und -trennung erhalten (Berg et al. 2019, S. 123).

Durch den großen Nutzerkreis vieler Plattformen und Anwendungen, die der Kommunikation im Internet dienen, erhöht sich die erzielbare Reichweite der Informationen zu Abfallvermeidung, -wiederverwendung oder -trennung. Kundenportale führen zu Effizienzsteigerungen in der Unternehmens- und Kundenverwaltung, insbesondere wenn eine Integration mit nachgelagerten

Prozessen beispielsweise in der Logistik oder bei der Erstellung von Leistungsnachweisen erfolgt (Berg et al. 2019, S. 158). Dennoch gilt es zu berücksichtigen, dass Social-Media-Kanäle oft zielgruppenspezifisch sind (Berg et al. 2020c, S. 108) und manche Anwendungen auf Akzeptanzprobleme bei bestimmten Nutzergruppen stoßen können (Berg et al. 2020c, S. 114). Mit jedem Kanal werden nur ausgewählte Bevölkerungsgruppen erreicht, sodass nur eine umfangreiche Nutzung mehrerer Kanäle zu einer breiten Abdeckung der zu erreichenden Bevölkerung führen kann (Berg et al. 2020c, S. 108). Analoge Kommunikationsformen wie Telefon oder Postwurfsendungen können noch nicht vollständig ersetzt werden (Berg et al. 2019, S. 158). Die durchschnittlich erzielte Effizienzsteigerung durch verminderten Kommunikationsaufwand könnte ggf. teilweise durch eine höhere Frequenz in der Kommunikation überkompensiert werden (Berg et al. 2020c, S. 92). Des Weiteren können die Mitarbeiter/innen der Anwendung von Chatbots als autonom agierende Kommunikationssysteme skeptisch gegenüberstehen, was zu einem kommunikativen Mehraufwand gegenüber der eigenen Belegschaft bei der Einführung führen kann (Berg et al. 2019, S. 114).

3.2.3.3 Digitale Handelsplattformen

In den letzten Jahren wurden diverse digitale Plattformen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft entwickelt bzw. weiterentwickelt (Sarc et al. 2020, S. 1004). Das bei örE weit verbreitetste Modell sind digitale Plattformen für eine bessere Verwertung gebrauchter Produkte (Berg et al. 2019, S. 124). Ein prominentes Beispiel ist Stilbruch Hamburg, ein Tochterunternehmen der Hamburger Stadtreinigung, das neben einem physischen auch ein Onlinegebrauchtwarenkaufhaus sowie Verschenk- und Tauschmärkte betreibt.⁴⁷ Ein weiteres Beispiel ist die »AbfallApp Ortenaukreis«, auf der Gebrauchtwaren gehandelt werden und eine Verschenkbörse betrieben wird (Kommunalwirtschaft.eu 2020).

Über die direkte Kommunikation der örE mit Bürger/innen hinaus stellt die Vernetzung zwischen öffentlich-rechtlichen und privaten Entsorgern sowie Akteuren der Recyclingindustrie und des produzierenden Gewerbes einen bedeutenden Digitalisierungstrend und zugleich eine zentrale Notwendigkeit für die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft dar (Berg et al. 2019, S. 123). Auch die Transparenz über die Verfügbarkeit und Beschaffenheit von zu Abfall gewordenen Produkten sowie Recyclerfordernissen müssen entlang von Wertschöpfungsketten erhöht werden, damit Such- und Transaktionskosten für die Hersteller sinken und so den Anreiz, Sekundärrohstoffe einzusetzen, steigt. Technologisch erfordert dies eine genaue Analyse der Beschaffenheit von Wertstoffen (OECD 2007, 2018; Wilts/Berg 2017, S. 4). Informationen bzw. Daten,

⁴⁷ www.stilbruch.de/ (10.3.2023)



die zur Schließung von Kreisläufen erhoben und verarbeitet werden, bieten im Verbund mit leistungsfähiger Datenverarbeitung die Möglichkeit einer erhöhten Transparenz zur Beschaffenheit der Produkte, aus denen die Sekundärrohstoffe gewonnen werden sollen, die somit leichter in den Kreislauf zurückgeführt werden können (Berg et al. 2019, S. 126). Mit digitalen Handelsplattformen können verfügbare Produkte und Materialien gesucht, Prüflabore und Beratungsdienstleistungen kontaktiert, ein preislicher Vergleich von Rezyklaten und Neuwaren vereinfacht und Geschäfte digital abgewickelt werden (Recycling Magazin (2020a; EU-Recycling 2019b). Entsprechende digitale Plattformen existieren für Altpapier (Recycling Magazin 2020b), Altmetalle⁴⁸ oder für Kunststoffabfälle⁴⁹ (Recycling Magazin 2020d). Teilweise werden solche Plattformen staatlich gefördert (OECD 2007, S. 3). In Schottland wurde der »Scottish Materials Brokerage Service«⁵⁰ entwickelt, um die Nachhaltigkeit und Stabilität des Markts für Sekundärrohstoffe zu erhöhen und Kommunen darin zu unterstützen, bessere Verträge für die Abfallsammlung zu schließen (OECD 2018, S. 103). Bislang sind solche Ansätze unter den öRE vergleichsweise schwach ausgeprägt. Lediglich Ansätze wie digitalisierte Wertstoffhöfe (Kommune 21 2019), auf denen Abfälle mithilfe digitaler Technologien qualifiziert werden, sind vorzufinden. Generell betreffen Digitalisierungsmaßnahmen selten eine bessere Information von Lieferanten und Dienstleistern (Berg et al. 2019, S. 77).

Plattformen, die darauf abzielen, Transparenz über die Beschaffenheit von Rezyklaten zu schaffen, Transaktionskosten für den Handel von Sekundärrohstoffen zu minimieren und die horizontale Integration entlang der Wertschöpfungskette zu erhöhen, werden derzeit im Rahmen von Forschungsprojekten entwickelt. In einer Kooperation von IT-Expert/innen und Wiederaufbereitern von Kunststoffabfällen fokussiert das Projekt »Di-LinK« auf industrielle Kunststoffe⁵¹, das Projekt »Recycling 4.0« auf die Entwicklung eines Informationsmarktplatzes zu Material-, Produkt- und Prozessdaten (Goldmann 2018). Auch der Handel von Verbrennungskapazitäten könnte perspektivisch stärker digital erfolgen (Deubel 2019).

Langfristig könnten Informationssysteme der öRE mit Daten aus vorgelagerten Produktions- und Nutzungsschritten verknüpft werden, um ohne Unterbrechung des Informationsflusses den Verbleib von Ressourcen nachzuverfolgen und Aufschlüsse über in Produkten enthaltene Materialien zu erhalten (Berg et al. 2019, S. 124).

48 www.schrott24.de/ (17.3.2023)

49 <https://cirplus.com/>; <https://plastship.com> (10.3.2023)

50 <https://www.zerowastescotland.org.uk/resources/scottish-materials-brokerage-service> (12.10.2023)

51 www.di-link.de/ (17.3.2023)

3.2.4 Zwischenfazit

Digitale Technologien gewinnen in der Abfallwirtschaft zunehmend an Bedeutung. Digitale Lösungen für die Abfallerfassung und den Abfalltransport befinden sich vielfach noch in einem frühen Anwendungsstadium und sind wenig verbreitet. In der Abfallbehandlung sowie in der Unternehmensverwaltung sind digitale Technologien hingegen bereits stärker etabliert.

Generell geht der Trend in Richtung einer zunehmenden Automatisierung und Digitalisierung der Branche. Im Fokus steht eine Optimierung der Betriebsprozesse innerhalb einzelner Wertschöpfungsstufen. Generell sind die Prozesse zwischen den Wertschöpfungsstufen noch wenig koordiniert bzw. aufeinander abgestimmt. Eine Integration von Systemen entlang der Wertschöpfungskette ist bislang nur vereinzelt zu beobachten. Auf Basis der zuvor genannten Ausführungen lassen sich drei Trends in der Kreislaufwirtschaft erkennen und beschreiben (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 110 ff.):

- Die Aufgaben der Abfallsammlung, aber auch die anschließenden Verteil- und Sortierprozesse werden zunehmend automatisiert. Die Grundlage hierfür bieten technische Fortschritte in den Bereichen Sensorik, Robotik und Datenverarbeitung. Perspektivisch soll eine weitgehende Autonomie der Betriebsprozesse erreicht werden, wie z. B. Sammel- und Sortiereinheiten, die autonom agieren können. Dieses Ziel liegt allerdings noch in weiter Ferne.
- Eine zunehmende Integration der aktuell zumeist vorhandenen Einzelsysteme bis hin zu einer Vollintegration stellt der zweite Trend dar. Voraussetzung hierfür ist, dass das Fehlen von Schnittstellen zwischen einzelnen Softwarelösungen, zwischen unterschiedlichen Wertschöpfungsstufen im Unternehmen oder zwischen verschiedenen Unternehmen nach und nach behoben wird. Dazu ist Standardisierung notwendig, die aber im Moment im Wesentlichen nur in der Abfallsammellogistik zu beobachten ist, wo es durch die Verbindung verschiedener digitaler Technologien wie Ident-Systeme, Telematik oder Füllstandsensoren bereits erste integrierte Lösungen gibt. Eine Vollintegration müsste allerdings (mindestens) noch die Bereiche der Unternehmensverwaltung, der Kundeninteraktion sowie der Abfallsortierung und -behandlung mit einbeziehen.
- Die Verschärfung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Erreichung der europäischen und nationalen Ziele der Kreislaufwirtschaft trägt zum verstärkten Einsatz digitaler Technologien in der Abfallwirtschaft bei. Die Technologien dienen dazu, genutzte Materialien und Produkte so lange im Kreislauf zu führen, wie dies ökologisch sinnvoll ist.

3.3 Potenziale und Grenzen

Die Perspektiven einer weiteren Digitalisierung der Abfallwirtschaft bietet vielfältige Potenziale für Deutschland. Werden durch die Digitalisierung der Abfallwirtschaft höhere Recyclingquoten erreicht, erhöht sich die Unabhängigkeit Deutschlands gegenüber Importen von Primärrohstoffen (Dussaux/Glachant 2019). Für die langfristige Sicherung der Rohstoffversorgung ist die Nutzung von Sekundärrohstoffen erforderlich (Friege/Dornack 2019, S. 597). Das Ziel der Rohstoffsicherung ist mittlerweile zu einem Haupttreiber der technologischen Entwicklungen für die Abfallwirtschaft geworden (Berg et al. 2020b, S. 5). Ziel dieses Kapitels ist es, die Chancen, Risiken und Hemmnisse, die mit der Digitalisierung der Abfallwirtschaft einhergehen, zu bewerten. Die folgenden Ausführungen liegen den Ergebnissen des Gutachtens von Berg et al. (2019) zugrunde. Auf Basis einer Analyse aktueller Digitalisierungstrends (Kap. 3.2.4) werden im Folgenden betriebs- und gesamtgesellschaftliche Auswirkungen, Auswirkungen auf Beschäftigung und Arbeitsbedingungen sowie auf die Umwelt (ökologische Auswirkungen) untersucht. Zum Schluss werden Aspekte der Entsorgungssicherheit angerissen.

3.3.1 Betriebs- und gesamtwirtschaftliche Auswirkungen

Die marktwirtschaftlichen Entwicklungen der Branche erfahren derzeit eine bemerkenswerte Dynamik (Kasten 3.6). Wie in den vorangegangenen Kapiteln erörtert, bietet die Anwendung von digitalen Technologien Potenziale für Effizienzsteigerungen in allen Bereichen der Abfallwirtschaft. Zudem werden neue Geschäftsmodelle vor allem die Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Die Abschätzung von betriebs- oder gesamtwirtschaftlichen Auswirkungen der Digitalisierung ist allerdings sehr schwierig (Berg et al. 2020b, S. 41 f.). Minderungen der Betriebskosten sind bei Investitionen in digitale Innovationen nicht immer gegeben. Deswegen sind Pilotprojekte zur Prüfung der Wirtschaftlichkeit neuer technischer Entwicklungen zu empfehlen (VKU 2020, S. 9).

Kasten 3.6 Einschätzung der marktwirtschaftlichen Entwicklungen der Branche

Dem Statusbericht der Branche zum Stand der Kreislaufwirtschaft in Deutschland können folgenden Entwicklungstrends entnommen werden: Das Exportvolumen von Technik für die Abfallwirtschaft betrug 2018 5,1 Mrd. Euro (Prognos/INFA 2020, S. 81). Zwischen 2010 und 2018 hat der Wert der weltweit exportierten Güter im Bereich der Technik für die Abfallwirtschaft von knapp 29 auf über 35 Mrd. US-Dollar im Jahr 2018 zugelegt.

Deutschland ist Marktführer mit einem Anteil von knapp 20% der Exporte im Technologiefeld »Anlagentechnik« (Prognos/INFA 2020, S.96). Die deutsche Abfalltechnik erfährt eine zunehmende Nachfrage aus dem Ausland, die künftig weiter steigen sollte (Prognos/INFA 2020, S.85; 93). Allerdings wächst zugleich die Konkurrenz, da der Anteil der weltweit vergebenen Patente für Technologien in der Kreislaufwirtschaft in den Hauptexportländern für deutsche Produkte und Sekundärrohstoffe ansteigt (Prognos/INFA 2020, S.135 u. 216).

Im Folgenden werden nicht die allgemeinen Risiken der Digitalisierung (dazu beispielsweise WBGU 2019, S.293) erörtert, sondern Nutzen und Kosten von drei Trends in der Abfallwirtschaft spezifisch analysiert. Dazu wird Bezug auf die drei von Berg et al. (2019, S.109 ff.) identifizierten Trends genommen (Kap. 3.2.4):

- › *Autonomisierung von Systemen*: Dieser Trend beschreibt die Fortentwicklung bereits vollzogener Automatisierungsschritte hin zu autonom agierenden Sammel- und Sortiereinheiten (Berg et al. 2019, S.111).
- › *Vollintegration von Systemen*: Im Zuge der Digitalisierung entstehen häufig Lösungen bzw. Angebote für spezifische Probleme. Diese erzeugen in der Regel einen Mehrwert für die adressierte Aufgabenstellung, sind aber aufgrund von unterschiedlichen Standards, Schnittstellen oder Softwarelösungen nur eingeschränkt mit anderen Einzelsystemen kompatibel. Dieser Trend geht in Richtung der Entwicklung von integrierten Lösungen für Teilsysteme sowohl innerhalb der Abfallsammellogistik als auch zwischen diesem Bereich, der Kundeninteraktion und der Sortierung (Berg et al. 2019, S.115 f.).
- › *Erweiterte Kreislaufwirtschaft*: Dieser Trend ist zwar bisher nicht vorrangig technologisch getrieben, unterliegt aber aktuell einer hohen Dynamik (Berg et al. 2019, S.120 ff.). Dabei ist davon auszugehen, dass sich eine funktionierende Kreislaufwirtschaft nicht ohne massive Nutzung digitaler Technologien realisieren lässt (Wilts/Berg 2017).

3.3.1.1 Autonomisierung

Mit der zunehmenden Automatisierung von Systemen bis hin zur Entwicklung von autonom agierenden Systemen in der Abfallsammlung und -behandlung sind vielfache Chancen für verbesserte Prozessabläufe bei der Sammlung und eine effizientere Sortierung verbunden (Berg et al. 2019, S.115). Auch wenn die betriebswirtschaftlichen Vorteile schwer zu verallgemeinern sind, dienen die folgenden Beispiele zur Illustration der zentralen Potenzialfelder:



- *Tourensteuerung*: Durch die effizientere Nutzung von Ressourcen mit einer Routenoptimierungssoftware können laut Herstellerangaben 5 bis 15 % der Fahrzeuge eingespart (AMCS o.J.). Durch Leerungen nur bei Bedarf kann die Anzahl der Leerungen um 58 % im ländlichen und 39 % im urbanen Raum gesenkt werden, wie ein Feldtest unter Verwendung von E-Mail, WhatsApp, App und Telefon zur Meldung des Abholbedarfs in der Stadt Bottrop zeigte (Althoff et al. 2019, S. 196 ff.). Ein weiterer Feldversuch zur bedarfsorientierten Leerung mit sensorbestückten Sammelbehältern für Textilabfälle ließ die Kosten der Sammellogistik um 20 % senken (Waste Management World 2021). Zudem ist eine genaue Terminierung der Abholung möglich. Die Sensorbestückung verspricht vor allem bei größeren Behältern, die unregelmäßig geleert werden, Kosteneinsparungen (Berg et al. 2019, S. 135). Wird sie durch neue KI-gestützte Systeme unterstützt, sollen mehr als doppelt so viele Abfallbehälter gesammelt werden können wie mit herkömmlichen Excel-basierten Routenoptimierungssystemen (Burger et al. 2018, S. 24).
- *Autonome Systeme und Fahrzeuge* könnten den Verkehr durch azyklische Sammlung entlasten. Allerdings besteht auch das Risiko, dass sie anfangs Risiken für den Verkehr darstellen (Berg et al. 2019, S. 117). Die mit der Automatisierung von Prozessen verbundenen Investitionskosten betreffen die Anschaffung der benötigten Hard- und Software. Beim automatisierten Fahren fallen ca. 15 % der Kosten für zusätzliche Hardware und ca. 85 % für zusätzliche Software an. Der Gesamtkostenaufschlag für ein autonom fahrendes Fahrzeug wird je nach Ausbaustufe zwischen ca. 1.600 Euro für Assistenzsysteme bis 23.400 Euro für vollständig autonome Systeme abgeschätzt, wobei diese Zahlen sich nicht speziell auf Müllfahrzeuge beziehen und die Zuverlässigkeit als gering anzusehen ist (Kurte/Esser 2018, S. 14). Es ist davon auszugehen, dass die Kosten mit steigenden Stückzahlen künftig sinken werden (Berg et al. 2019, S. 115).
- *Autonom agierende Sortiertechnologien*: Das Marktsegment »Abfallbehandlung und -verwertung« wird als technologischer Schwerpunkt der Kreislaufwirtschaft betrachtet (Prognos/INFA 2020, S. 87). Dabei spielen Sensortechnologien zur Steigerung der Erkennung und Sortierung von Materialien fürs Recycling eine besondere Rolle. Die Automatisierung in der Abfallerfassung erhöht die Effizienz und Wertigkeit der Verwertung (Roland Berger GmbH 2018, S. 161). Allerdings werden bislang aus gemischten Siedlungsabfällen, die öRE hauptsächlich sammeln und behandeln, kaum Wertstoffe rückgewonnen – mit Ausnahme von Metallen. Die hohen Investitionskosten des Einsatzes von Sortiertechnologien wären ggf. mit einer geringen Ausbeute mit hohem Verschmutzungsgrad assoziiert (Pomberger 2021, S. 27).

Für manche sich schnell entwickelnde kostenintensive Technologien könnten Miet-, Betriebs- oder Dienstleistungsmodelle attraktive Betreiber- bzw. Nutzungsmodelle darstellen (Berg et al. 2019, S. 116). Mit der Autonomisierung von Teilschritten wird ein Wandel in der Kostenstruktur erwartet, welcher sich von vormals hohen operativen Personalkosten hin zu nunmehr hohen Investitionskosten hinbewegt (Berg et al. 2019, S. 163). Einsparungen von personellen Ressourcen können Investitionskosten abfedern oder sogar kompensieren (Kap. 3.3.2). Eine zunehmende Autonomisierung von Betriebsprozessen bringt weitere Vorteile, wie z. B. eine höhere Auslastung der Fahrzeuge, da betriebsrechtlich vorgesehene Ruhezeiten des Betriebspersonals wegfallen (Berg et al. 2019, S. 115).

3.3.1.2 Vollintegrierte Systeme

Die Vollintegration von Einzelsystemen hin zu einem digitalen Gesamtsystem soll perspektivisch die Effizienz der Prozesse erhöhen, Fehleranfälligkeiten mindern und die Kundeninteraktion verbessern. Durch eine nahtlose, automatisierte Weitergabe und Analyse relevanter Daten kann der Aufwand für Datenübertrag und Dokumentation sinken. Eine intensive Vernetzung ist für den optimalen Einsatz digitaler Anwendungen und die Nutzung fortschrittlicher Analyseverfahren, die auf möglichst umfangreiche Daten angewiesen sind, grundlegend. Dadurch können Anlagekapazitäten durch ein bedarfsorientiertes Management besser genutzt werden (Berg et al. 2019, S. 116 ff.). Falls auch Daten zu den gesammelten Abfällen inkl. Fehlwürfen erhoben werden, wäre es zudem möglich, das Verbraucherverhalten zu analysieren und Impulse für ein ressourcenschonenderes bzw. abfallvermeidendes Verhalten zu setzen. Auch eine vorausschauende Planung kann dadurch erleichtert werden (Berg et al. 2019, S. 116 f.).

Für die kommunale Kreislaufwirtschaft besteht das ökonomische Potenzial vor allem in effizienteren Abläufen und dem damit eingesparten Arbeitsaufwand. Zu möglichen Kosten kann bislang wenig ausgesagt werden, da vollumfängliche Systeme (noch) nicht auf dem Markt erhältlich sind. Die derzeitige Entwicklung weist eher auf eine schrittweise Integration hin, die nach und nach mehr Systemkomponenten umfasst (Berg et al. 2019, S. 117).

Mit der Entwicklung eines Markts für Komplettlösungen würde das Risiko eines Oligopols mehrerer vollintegrierter herstellerspezifischer Lösungen bestehen, die untereinander nicht kompatibel sind oder deren Kompatibilität mit unverhältnismäßigem Mehraufwand erkaufte werden muss, was zu einem Lock-in auf ein spezifisches System führt. Eine solche Situation ist im Feld der Mobiltelefonie vorhanden, wo die inkompatiblen Systeme von Android und Apple konkurrieren. Überall dort, wo ein System nicht komplett gekauft wird, sondern aufgrund verteilter Kompetenzen Systembrüche vorliegen – beispielsweise



Abfallsammlung und Abfallberatung –, ist die Erzeugung oder Beschaffung eines Gesamtsystems zumindest erschwert (Berg et al. 2019, S. 119).

3.3.1.3 Erweiterte Kreislaufwirtschaft

Die Intensivierung der Kommunikation von örE mit seinen Kunden sowie anderen Branchenakteuren entlang der Wertschöpfungskette steht bei diesem Trend im Fokus. Durch intensivere Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette kann die kommunale Abfallwirtschaft dazu beitragen, dass Informationen über Abfälle mithilfe von Sensorsystemen und Datenverarbeitung erfasst, analysiert und an die Recyclingindustrie für eine bessere Leistungserbringung weitergegeben werden. Ein werterhaltendes Recycling lebt davon, dass Information über die Zusammensetzung der zu Abfall gewordenen Produkte bis zum Ende ihres Lebenszyklus erhalten bleiben (Berg et al. 2019, S. 123). Die Digitalisierung und dabei insbesondere Technologien zur Einführung von digitalen Produktpässen können dabei helfen, Informationen zu Angebot, Qualität und Verfügbarkeit von aus Abfällen gewinnbaren Rohstoffen bereitzustellen, Abnehmer zu finden und Recyclingkosten zu senken (Berg et al. 2019, S. 126). So können Qualität und Zusammensetzung von Sekundärrohstoffen sichergestellt und ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Primärrohstoffen gesteigert werden. Darüber hinaus können die von örE gesammelten Daten über Stoffströme Hinweise auf lokale Möglichkeiten zur Vermeidung von Abfällen liefern sowie zur effizienteren Produktnutzung und besseren Produktherstellung aus recyceltem Material genutzt werden, die in die Beratung zur Abfallvermeidung einfließen können (Berg et al. 2019, S. 125).

Die Kosten der Digitalisierung der Kommunikation sind stark von der Anwendung und der konkreten digitalen Lösung abhängig. Für Anwendungen mit hohem Investitionsbedarf muss das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Fall zu Fall evaluiert werden. Entstehen die Investitionskosten bei dem einen Akteur, der Nutzen jedoch bei einem anderen, wird die Einführung der entsprechenden digitalen Innovation erschwert (Berg et al. 2019, S. 125). Da örE überwiegend am Anfang der Wertschöpfungskette in der Abfallwirtschaft stehen und vom Absatz von Wertstoffen wenig profitieren, sondern ihre Einkünfte in wesentlichen Teilen aus der Erhebung von Gebühren schöpfen, stellt dies ein besonderes Hindernis für die Teilhabe von örE an der digitalen Entwicklung dar. Ein investitionsintensiver Pfad zu mehr Kreislaufwirtschaft durch Digitalisierung müsste daher unter Umständen durch eine veränderte Marktbeteiligung der örE an den Wertstoffmärkten bzw. eine höhere Marktbeteiligung an der Erfassung, Sortierung und Verwertung von Wertstoffen realisiert werden. Der Aufwand, der auf die Akteure der kommunalen Kreislaufwirtschaft bei einer Stärkung ihrer Aktivitäten als Rohstofflieferanten entfallen würde, würde zum Teil durch die zusätzlichen Erlöse kompensiert werden (ZfK 2020). Der zusätzliche

Mehraufwand könnte durch erhöhte Gebühren oder durch Fördermaßnahmen ausgeglichen werden (Berg et al. 2019, S. 125).

3.3.2 Auswirkungen auf Beschäftigung und Arbeitsbedingungen

Im Folgenden werden die Auswirkungen auf Beschäftigung und Arbeitsbedingungen dargestellt, sowie die Wissenslücken und Unsicherheiten, die damit einhergehen.

3.3.2.1 Veränderung der Beschäftigtenstruktur und des Bedarfs an Kompetenzen

Zwei Treiber wirken sich auf die derzeitige Entwicklung der Beschäftigung in der Abfallwirtschaft aus: der gesetzliche Rahmen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft und die voranschreitende Digitalisierung.

Der Übergang zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft soll laut Prognosen mit positiven Beschäftigungseffekten verbunden sein, wie Studien für die Mitgliedstaaten der OECD (2020, S.33), für die EU (Cambridge Econometrics et al. 2018) oder für Deutschland (Horbach/Rammer 2020) zeigen. Ein steigender Bedarf wird sowohl für hoch- als auch mittel- und niedrigqualifizierte Arbeitskräfte erwartet, die insbesondere in den Bereichen Reparatur und Wiederverwendung ggf. inklusive Wiederaufbereitung von Produkten eingesetzt werden sollen (Cambridge Econometrics et al. 2018, S. 11; 50). Positive Beschäftigungseffekte werden nicht nur für alle Wertschöpfungsstufen der Abfall-, Recycling- und Verwertungsindustrie, sondern auch für den Anlagen- und Maschinenbau erwartet (Cambridge Econometrics et al. 2018, S.48). Erste Ergebnisse dazu – bezogen auf Österreich – zeigen, dass positive Beschäftigungseffekte mit der Komplexität des Abfallwirtschaftssystems bzw. mit dem Grad der getrennten Sammlung und dem Aufwand der Abfallbehandlung steigen (Altendorfer et al. 2020, S.34; Meyer/Sommer 2019).

Digitalisierungstendenzen hingegen führen zu einer Zunahme vor allem von hochqualifizierten Arbeitsplätzen und könnten den mit der Stärkung der Kreislaufwirtschaft assoziierten positiven Beschäftigungseffekte entgegenwirken (Cambridge Econometrics et al. 2018, S. 74). Berg et al. (2019, S.117) erwarten, dass die Automatisierung von Aufgaben tendenziell zu einem Arbeitsplatzabbau in der Abfallwirtschaft führen wird. Allerdings finden die Veränderungen in einem Feld mit Fachkräftemangel statt (Burgard 2018). Mit der Alterung der Belegschaften und dem gleichzeitigen Mangel an qualifizierten Nachwuchskräften bei steigendem Pro-Kopf-Müllaufkommen erhöhen sich die Anforderungen an die Abfallsammlung und -behandlung pro Mitarbeiter/in. Digitale Technologien und automatisierte Systeme erfordern weniger



Bedienpersonal bzw. ermöglichen es dem vorhandenen Personal, sich auf solche Aufgaben zu konzentrieren, die durch die Technik nicht zu lösen sind (Berg et al. 2019, S. 110; 116). In dieser Hinsicht gehören Automatisierungstechnologien zu den Investitionen, welche die Situation bei voranschreitenden personellen Engpässen entlasten können (Buchert et al. 2017, S. 24; 58).

Die spezifischen Wirkungen der beiden Treiber Stärkung der Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung auf die Abfallwirtschaft und das Ergebnis ihres Zusammenspiels auf die Beschäftigtenzahl können nur schwer auseinandergehalten und abgeschätzt werden (OECD 2020, S. 35). Vorhandene Daten sind mit vielen Unsicherheiten verbunden (Cambridge Econometrics et al. 2018, S. 7). Insbesondere erschwert der Mangel an empirischen Daten Prognosen über mögliche Beschäftigungseffekte (Altendorfer et al. 2020, S. 34). Oft sind die verfügbaren Daten hochaggregiert und können die Effekte innerhalb der kommunalen Abfallwirtschaft nicht spezifisch abbilden.

Durch die voranschreitende Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft ist vor allem mit einer erhöhten Nachfrage nach Fachkräften mit IT-Expertise und Querschnittskompetenzen wie Problemlösung und Kommunikation zu rechnen (Cambridge Econometrics et al. 2018, S. 74). Voraussichtlich werden mehr oder höher qualifizierte Techniker/innen sowie Informatiker/innen beispielsweise für die Gewährleistung des reibungslosen Betriebs automatisierter und perspektivisch autonomer Systeme benötigt (Berg et al. 2019, S. 116). Generell ist der erforderliche Bedarf an künftig notwendigen Kompetenzen für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft bislang wenig erforscht (Altendorfer et al. 2020, S. 33; OECD 2020, S. 35).

3.3.2.2 Arbeitsbedingungen

Die Digitalisierung wirkt sich nicht nur auf die Beschäftigungszahlen und -struktur, sondern auch auf die Arbeitsbedingungen in der Branche aus. Digitale Lösungen können zur Entlastung der Belegschaft von schweren körperlichen Arbeiten und zu Erleichterungen beim Umgang mit gefährlichen Abfällen beitragen (Berg et al. 2019, S. 111; Berg et al. 2020b, S. 44). Berg et al. (2019, S. 101; 102; 115; 117) erwarten in der Tendenz, dass die Automatisierung abfallwirtschaftlicher Prozesse durch Robotiksysteme zunächst manuelle Prozesse ersetzen, die repetitive Arbeiten beinhalten, über einen langen Zeitraum auszuführen sind und deren Entscheidungskriterien von einem Sensorsoftwaresystem erfasst und verarbeitet werden können. Darunter fallen Sortier- und Klassifizierungsaufgaben, aber auch Teilschritte der Abfallsammlung. Darüber hinaus bergen vollintegrierte Systeme Potenziale, Mitarbeiter/innen zu entlasten. So ist der Übertrag von Daten von einem System in ein anderes infolge der vorhandenen Medienbrüche bislang häufig ein zeitraubender Vorgang (Berg et al. 2019, S. 118). Hinzu kommt eine erwartete Minderung der Unfallquote beispielsweise

durch die Anwendung von Assistenzsystemen beim Rückwärtsfahren von Sammelfahrzeugen (Berg et al. 2019, S. 117).

Gleichzeitig stellen automatisierte Systeme hohe Anforderungen an die Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion (Berg et al. 2019, S. 114, u. 2020c). Die Einführung automatischer Systeme bzw. die schrittweise Integration vorhandener Systeme erfordert die sorgfältige Evaluation der Akzeptanz der Mitarbeiter/innen für die Systeme und die Entwicklung von Schulungskonzepten, welche Bedürfnisse und Ängste der Mitarbeiter/innen berücksichtigen (Berg et al. 2019, S. 118). Manche digitalen Technologien, wie der Einsatz von Robotern in der Abfallsammlung oder von selbstfahrenden Behältern und Fahrzeugen, treffen bei Beschäftigten häufig auf Skepsis (Berger/Volkmar 2020, S. 385 ff.). Die Befürchtungen beziehen sich insbesondere auf die Annahme, durch die neue Technologie überwacht oder überfordert zu werden, außerdem bestehen Ängste vor Arbeitsplatzverlust (Berg et al. 2020b, S. 44). Dies kann dazu führen, dass neu eingeführte Systeme durch die Belegschaft nicht genutzt oder sabotiert werden. Beispielsweise könnten maschinell erzeugte Aufträge ignoriert oder Systemempfehlungen zu Gunsten anderer Lösungen präferiert werden (Berg et al. 2019, S. 118). Vorbehalte und die daraus resultierende Ablehnung gegenüber neu einzuführenden Technologien sind oft eine nicht zu unterschätzende Hürde für die Digitalisierung, wie Interviews mit Expert/innen verdeutlichen (Berg et al. 2019, S. 86).

Um die Akzeptanz und spätere Nutzung von neu einzuführenden digitalen Technologien zu verbessern, sollten die Fachkräfte frühzeitig in die Auswahl und Entwicklung einbezogen werden. So können Mitarbeiter/innen aufgrund ihrer jeweiligen Tätigkeiten und Erfahrungen Ansprüche an und Eignung von neuen Technologien besonders gut beurteilen, außerdem kann der Umgang damit von Grund auf erlernt werden (Berg et al. 2019, S. 160).

3.3.3 Ökologische Auswirkungen

Die Digitalisierung hat sowohl positive als auch negative ökologische Auswirkungen. Negative Auswirkungen betreffen den Energie- und Ressourcenverbrauch der digitalen Infrastrukturen sowie die Erzeugung von elektro- und elektrotechnischen Abfällen (Berg et al. 2020b, S. 40). Positive Auswirkungen sind mit der Steigerung der Effizienz von Betriebsprozessen, wodurch Energie und Ressourcen eingespart werden können, sowie mit den Möglichkeiten zur Beeinflussung des Verhaltens von Abfallerzeugern verbunden (EEA 2020). Die ökologischen Auswirkungen, die sich aus dem Recycling von Abfällen ergeben, sind oft geringer, als diejenigen die durch die Produktion von Primärrohstoffen entstehen (Dehoust et al. 2016; Nessi et al. 2018). Digitale Technologien in der Abfallwirtschaft können zu einer besseren Umsetzung der Abfallhierarchie führen (Berg et al. 2019, S. 119; 123; 125). Ökologische Vorteile hinsichtlich der



Ressourcenschonung sind erst dann gegeben, wenn es durch digitale Technologien gelingt, Wertstoffe in höherem Maß zurückzugewinnen, als dies bisher der Fall ist (Berg et al. 2019, S. 113). Recyclingprozesse weisen zwar in der Tendenz einen geringeren ökologischen Fußabdruck als traditionelle Entsorgungsaktivitäten auf (OECD 2019, S. 67), dennoch tragen nicht alle Investitionen in digitale Technologien zur Ressourcenschonung bei. Der Einsatz von zusätzlichen Informations- und Kommunikationstechnologien könnte beispielsweise zu zusätzlichen Verlusten kritischer Rohstoffe (z. B. Tantal, Indium) führen, die sich schwer rezyklieren lassen (Wilts et al. 2019, S. 6). Insbesondere müssen die Konzentration des Rohstoffs in der Abfallfraktion und die Präsenz von Verbundmaterialien in der Gesamtbilanz berücksichtigt werden (Friege/Dornack 2019, S. 601). Hinzu kommt, dass die Ökobilanz der Systeme auch davon abhängt, mit welchem Ziel die Lösungen eingesetzt werden (Gailhofer/Franke 2021, S. 533). Im Folgenden stehen die Auswirkungen der Digitalisierung der Aufgaben von öRE auf die Emissionen von Treibhausgasen und den Verbrauch von Ressourcen im Fokus.

3.3.3.1 Treibhausgasemissionen

Zwischen 1990 und 2018 sind die Treibhausgasemissionen in der Abfallwirtschaft um fast 75 % gesunken und trugen 2018 mit 9,7 Mio. t CO₂-Äquivalenten (CO₂eq) einen Anteil von etwa 1 % an den Gesamtemissionen in Deutschland bei (BMU 2019, S. 28). 80 % der Emissionen sind auf die Abfalldeponierung, 10 % auf die Abwasserbehandlung und weitere 10 % auf Kompostierung und mechanisch-biologische Abfallbehandlung zurückzuführen (Bundesregierung 2019b, S. 23). Allerdings werden die Einsparungen, welche durch Abfallsammlung, -transport und -recycling in anderen Sektoren (Energie, Landwirtschaft, Verkehr, Energieerzeugung) ermöglicht werden, bislang diesen Sektoren in der nationalen Treibhausgasinventarisierung zugeschrieben. So argumentiert die Branche, dass eine umfassende Bilanzierung für die gesamte Branche noch nicht vorliegt (Prognos/INFA 2020, S. 199). Durch den stärkeren Einsatz von Sekundärrohstoffen und durch weiterentwickelte Behandlungsverfahren könnten künftig sektorübergreifend Einsparpotenziale in Höhe von 16 Mio. t CO₂eq im Vergleich zum Status quo eingespart werden, schätzen Prognos/INFA (2020, S. 199).

Bei der Abfallsammlung können Vorteile dann eintreten, wenn beispielsweise Fahrzeuge mit der Hilfe von Software für die Tourenplanung und -optimierung sparsamer fahren (Berg et al. 2019, S. 113). Durch die Kombination von KI-basierten Auswertungsmethoden und Füllstandsensoren werden Energie eingespart und CO₂-Emissionen reduziert (Amann 2020; Prognos/INFA 2020, S. 197). Laut Herstellerangaben können Softwarelösungen zur Tourenplanung und -optimierung Strecken und Fahrzeiten und folglich auch die CO₂-



Emissionen um 5 bis 25 % verringern.⁵² Generell lassen sich durch die Substitution von Primärrohstoffen mit Rohstoffen aus dem Recycling Energie und damit Emissionen in der Produktion einsparen (Prognos/INFA 2020, S. 197).

In der Abfallwirtschaft selbst könnte die Erhöhung der Komplexität von Sammel-, Sortier- und Behandlungsprozessen (Altendorfer et al. 2020, S. 34) sowie ihre Digitalisierung (Bahn-Walkowiak et al. 2020, S. 56 f.) zu erhöhten Energieverbräuchen führen und die genannten positiven Effekten mindern. Dabei sind sowohl direkte als auch indirekte Energieverbräuche zu berücksichtigen. Letzteres entstehen durch die IKT-Infrastrukturen, die dafür notwendig sind (Bahn-Walkowiak et al. 2020, S. 57).

In einem branchenübergreifenden Vergleich wurde gezeigt, dass aus der Vielzahl möglicher emissionsminimierender Maßnahmen insbesondere solche im Bereich des Recyclings von Verpackungen, Altpapier und Altglas, der Vergärung von Bioabfällen und der thermischen Verwertung mit einem begrenzten Mitteleinsatz zu den größten Effekten hinsichtlich der Vermeidung von CO₂eq. führen (Prognos/INFA 2020, S. 200). Van Eygen/Fellner (2020) kommen am Beispiel Österreich zum Ergebnis, dass die Einführung neuer Technologien zur Erhöhung der Sortiertiefe von Kunststoffverpackungen und automatischen Restmüllsortierung lediglich zu geringen Einsparungen von fossilen Stoffen und zu vergleichsweise hohen Kosten pro eingesparte Tonne CO₂eq führen würden (van Eygen/Fellner 2020, S. 45). Genauere Daten für Deutschland liegen nicht vor.

3.3.3.2 Ressourcenverbrauch

Tendenziell soll die digitalgestützte Erfassung, Analyse und Weitergabe von Informationen zu Produkt- bzw. Abfallbeschaffenheit vom Produzenten über den Konsumenten bis hin zum Entsorger und Recycler zu einer besseren Sortierung und zu einem besseren Recycling führen und die Einsatzfähigkeit der jeweiligen Rezyklate erhöhen (dazu und zum Folgenden Berg et al. 2019, S. 122). Ob digitale Innovationen sich auf den Ressourcenverbrauch in der Gesamtbilanz positiv auswirken, lässt sich anhand vorhandener Daten nur sehr schwer abschätzen, denn quantitative Daten zu den Auswirkungen der Digitalisierung auf den Ressourcenverbrauch sind kaum vorhanden.

- Der Ressourcenverbrauch, der als Folge der *Integration* von Systemen entsteht, ist nur schwer abzuschätzen. Überall dort, wo integrierte Systeme dazu führen, dass Systemredundanzen abgebaut werden und die Effizienz des Gesamtprozesses steigt, könnte bzw. sollte auch ein verminderter Verbrauch an Ressourcen erfolgen. Unklar ist allerdings, ob ggf. ein erhöhter

52 <https://www.amcsgroup.com/de/broschuren/broschure-intelligente-optimierung/> (10.3.2023)



Rechenaufwand durch den Einsatz digitaler Technologien zu erhöhten Energieverbräuchen führen wird (Berg et al. 2019, S. 119).

- › Ob der Ressourcenverbrauch für die benötigte *Automatisierungshardware*, wie Sensoren und Steuergeräte, sowie für die benötigte IT-Infrastruktur durch die Einsparungen ausgeglichen wird, hängt von der einzuführenden Digitalisierungsmaßnahmen ab. Ob die Bilanz insgesamt positiv ausfällt, ist ebenfalls nicht bekannt und stellt einen Forschungsbedarf dar (Berg et al. 2019, S. 113).

Im Speziellen besitzen digitale Sortiertechnologien ein Potenzial zur Optimierung abfallwirtschaftlicher Aufgaben und damit zur Verbesserung der Ausbeute von wiederverwertbaren Rohstoffen. Dennoch gilt: Je höher die Qualität der Ausgangsmaterialien und der Vorsortierung, desto sinnvoller ist der Einsatz materialspezifischer Sensoren. Der Automatisierungsgrad und die Auswahl der eingesetzten Technologien sind von den verfügbaren Kapazitäten (Personal) und den zu erwartenden Erlösen abhängig (Bilitewski et al. 2018, S. 157 am Beispiel der Auslegung der Speermüllsortieranlagen). Aufbereitungsprozesse, die in Herstellungsprozesse übergehen, sind kaum noch mit mechanischen oder manuellen Verbesserungen zu optimieren. Deswegen sind solche Prozesse für die Steigerung der Ausbringungsquote auf digitale Technologien angewiesen. Bei der Aufbereitung von Rostaschen aus der Müllverbrennung ist eine sensorgestützte Sortierung beispielsweise technisch machbar und zum Teil bereits in Müllverbrennungsanlagen vorzufinden. Die Rückgewinnung von Metallen hat in den letzten Jahren einen hohen technischen Stand erreicht (Quicker 2018, S. 673 ff.). Dennoch sind die Potenziale von Sensortechnologien für öRE geringer als für die private Entsorgungs- und Verwertungswirtschaft. Dies liegt an der Aufteilung des Markts zwischen kommunalen Betrieben, die überwiegend im Marktsegment der Behandlung gemischter Siedlungsabfälle mit hohem Verschmutzungsgrad repräsentiert sind, und privaten Betrieben, die die Sortierung von Wertstoffen und das Recycling dominieren.

Hinsichtlich der Einführung von Sensorsystemen für den Rückbau von Deponien – ein Prozess, bei welchem Wert- oder Brennstoffe aus alten Ablagerungen rückgewonnen werden – sind Wirtschaftlichkeit und ökologische Vorteile bislang nicht immer gegeben (Krüger et al. 2016, S. 12; Krüger et al. 2018, S. 750). Aufgrund der derzeitigen Unwirtschaftlichkeit des Deponierückbaus in Deutschland (Rettenberger 2018, S. 730) bleiben Digitalisierungsoptionen für den Rückbau von Deponien, in der Verbindung mit mechanischen Sortierverfahren und einer besseren Reinigung von Sortierprodukten, bislang nur eine theoretische Möglichkeit. Mit den Aktivitäten des Umweltbundesamtes in der Forschungsreihe »Kartierung des anthropogenen Lagers« könnte der Rückbau von Deponien an Bedeutung gewinnen.

Reboundeffekte

Unter Reboundeffekt wird das Überschießen von Ressourcennutzung oder Emissionen durch Maßnahmen, die eigentlich zur Effizienzsteigerung gedacht waren, verstanden (Santarius 2012, S. 5 ff.). Dies geschieht beispielsweise dann, wenn für die Nutzung digitaler Technologien mehr Ressourcen und Energie aufwendet werden, als durch sie eingespart wird. Auch psychologische Reboundeffekte in Form einer Verantwortungsverlagerung können auftreten, wenn Bürger/innen sowie Unternehmen vermittelt wird, dass das Problem der Kreislaufführung durch die Technologisierung der Abfallwirtschaft gelöst wird, und sie ihre Aktivitäten für eine Vermeidung von Abfällen vernachlässigen (Berg et al. 2019, S. 126), was zu einer absoluten und nicht nur relativen Erhöhung des Abfallaufkommens führen kann. In Summe betrachtet erfordert ein erfolgreicher Einsatz digitaler Technologien zur Ressourcenschonung, dass im selben Maß des Aufbaus der Recyclingkapazitäten ein Abbau der Produktionskapazitäten der Primärrohstoffe stattfindet, denn eine Zunahme der Verwendung von Recyclingstoffen ohne entsprechende Verringerung des Einsatzes an Primärrohstoffen führt zwar zum Wachstum des Markts für Rezyklate bzw. rezyklathaltige Produkte, spart aber keine Ressourcen ein (Berg et al. 2019, S. 130; Santarius 2012, S. 8 ff.). So erhöhte sich zwischen 2017 und 2019 die Einsatzmenge von Kunststoffrezyklat um 10,2%, während im gleichen Zeitraum die Menge an Kunststoffen aus primären Rohstoffen nur um 2,5% sank (Lindner et al. 2020, S. 15). Dies könnte auf einen Reboundeffekt hinweisen, denn der Einsatz von Kunststoffneuewaren sinkt nicht proportionell zur Steigerung des Einsatzes von Kunststoffrezyklaten.

3.3.4 Entsorgungssicherheit

Berg et al. (2019) weisen auf drei Hauptrisiken für die Sicherheit der Entsorgungsdienstleistungen hin, die mit der zunehmenden Digitalisierung und insbesondere Autonomisierung von Prozessen in der Abfallwirtschaft verbunden sind. Erstens entsteht dadurch eine Konkurrenzsituation zwischen den traditionellen Akteuren der Abfallwirtschaft, die über Kompetenzen in der Erfüllung der ureigenen Aufgabenbereiche der Entsorgung verfügen, und IT-Unternehmen, welche zwar umfassende digitale Kompetenzen, aber kaum abfallwirtschaftliche Fachkenntnisse mitbringen. Werden diese Kompetenzen nicht ausreichend miteinander kombiniert, könnten die Fähigkeiten von öRE, Risiken vorzubeugen mindern und dadurch die Erbringung der Dienstleistungen gefährden (Berg et al. 2019, S. 109). Zweitens wachsen mit der zunehmenden Digitalisierung und Integration von Systemen sowohl die Risiken durch einen Ausfall als auch das Ausfallrisiko. Während Ausfälle einzelner Fahrzeuge und Maschinen meist problemlos kompensiert werden können, stellt sich das Risiko eines



Ausfalls größerer Systemteile weitaus bedrohlicher dar. Durch die Vernetzung der Systeme entsteht die Möglichkeit, dass ein in einem Teilsystem entstandener Fehler sich unbemerkt über das gesamte System fortpflanzt und ggf. verstärkt. Gleichzeitig ist der Betrieb eines großen integrierten Systems aufgrund seiner hohen Komplexität möglicherweise anfälliger für Störungen oder Ausfälle als dies mehrere kleine, getrennt operierende Teilsysteme sind (Berg et al. 2019, S. 110). Und drittens erhöhen sich durch eine voranschreitende Digitalisierung generell die Abhängigkeiten der Abfallwirtschaft von zuverlässig funktionierenden Stromversorgungs- und Telekommunikationsinfrastrukturen (Berg et al. 2019, S. 116) sowie die Anfälligkeiten gegenüber den Bedrohungen der Informationssicherheit. Wie gefährdet Kritische Infrastrukturen gegenüber Cyberangriffen und anderen IT-bedingen Störungen sein können, wird am Beispiel der Wasserwirtschaft in Kapitel 5 analysiert.

3.3.5 Zwischenfazit

Mit dem Einsatz von digitalen Technologien sind vielfach betriebswirtschaftliche Optimierungspotenziale verbunden. Dort wo Potenziale bestehen, haben Unternehmen vereinzelt in digitale Innovationen investiert und erste Erfahrungen gemacht. Festzustellen ist, dass der Digitalisierungsgrad in der privatwirtschaftlichen Abfallentsorgung tendenziell höher ist als in der kommunalen Abfallwirtschaft. Ein weiteres Ziel des Einsatzes digitaler Technologien für Unternehmen ist es, dem aktuellen und weiterhin zu erwartenden Fachkräftemangel entgegenzuwirken und zugleich steigenden Müllaufkommen und Recyclinganforderungen zu bewerkstelligen. Darüber hinaus ermöglichen manche digitalen Technologien Verbesserungen in den Arbeitsbedingungen. Grundsätzlich sollte die Einführung neuer digitaler Technologien in enger Abstimmung mit der Belegschaft erfolgen, um ihre Akzeptanz und Nutzung durch die Belegschaft zu fördern. Vorteile der Digitalisierung für die Erreichung der nationalen Kreislaufwirtschaftsziele und für die Minderung von Treibhausgasen sind vor dem Hintergrund der Ressourcen, die für die Herstellung und den Betrieb der Technologien eingesetzt werden müssen, noch nicht eindeutig quantifizierbar, insbesondere wenn sie sich ausschließlich auf einzelne Aufgaben bzw. nur auf die kommunale Abfallwirtschaft beschränken. Außerdem können digitale Innovationen auch zu Reboundeffekten führen. Viel eher fördert der Einsatz digitaler Innovationen bei einem betriebsübergreifenden Einsatz, wodurch Informationen über Produkte und Materialien entlang der Wertschöpfungskette weitergeleitet werden können, die Umsetzung der Abfallhierarchie und bietet Potenziale für den Ressourcenschutz.

3.4 Handlungsfelder

Nicht jede Investition in digitale Technologien trägt im gleichen Maße zur Umsetzung der Abfallhierarchie bei, weshalb mögliche Investitionen auf ihren voraussichtlichen diesbezüglichen Nutzen hin evaluiert werden sollten. Branchenakteure argumentieren, dass die wachsenden Aufgaben, die ihnen gestellt werden, nur durch Verbesserungen, Erweiterungen oder die Neuplanung von Anlagen zu bewältigen sind (Prognos/INFA 2020, S. 135). Zugleich sind technologische Innovationen oft nur Teil der Lösung (OPECST 2020, S. 257). Vor diesem Hintergrund sollten digitale Technologien immer nach ihrem Beitrag zur (gesetzlichen) Aufgabenerfüllung bzw. zur Lösung bestehender Probleme bewertet, ausgewählt und beschafft werden. Es gilt darauf zu achten, dass Fehlinvestitionen und Reboundeffekte sowohl ökonomisch als auch ökologisch vermieden werden (Berg et al. 2019, S. 157). Außerdem sollten Investitionsentscheidung sicherstellen, dass die damit erzielten Einsparungen den für Herstellung und Betrieb der digitalen Technologien erforderlichen Ressourcen- und Energieverbrauch übersteigen (Berg et al. 2019, S. 7).

Zur Umsetzung der Abfallhierarchie sind insbesondere Investitionen in die Abfallvermeidung und -wiederverwendung zu bevorzugen. Hier könnten digitale Technologien zur Erhöhung der Effizienz und Reichweite der Abfallberatung beitragen. Sie sind ein Schlüssel zur Erreichung der immer strenger werdenden Sammelquoten, wie beispielsweise für Elektro- und Elektronikprodukte (UBA 2022a), und zu einer immer genaueren Vorsortierung. Bisher erhalten digitale Lösungen für die systematische Erschließung von Potenzialen der Abfallberatung, z. B. im Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder und seiner Fortschreibung (BMUV 2020), keinen besonders hohen Stellenwert.

Künftig wird vor allem der Stärkung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft hohe Relevanz zukommen. Mithilfe von digitalen Technologien sollen beispielsweise die Erfassungs- und Sortierausbeute erhöht, Kunststoffe länger und effizienter genutzt und Plastikeinträge in die Umwelt vermieden werden. Sowohl die Digitalagenda als auch die KI-Strategie der Bundesregierung fördern eine Kreislaufwirtschaft in Deutschland. Im Fokus dieser Vorhaben stehen digitale Produktpässe und die Förderung von Reallaboren.

Um die Potenziale einer digitalen Abfallwirtschaft über das bisherige Maß hinaus zu heben, können die Rahmenbedingungen verbessert, die rechtlichen Grundlagen angepasst, die Normierung und Standardisierung vorangetrieben sowie Wissenslücken geschlossen werden. Möglichkeiten dazu werden im folgenden Kapitel konkretisiert. Die Ausführungen basieren, wenn nicht anders angegeben, in wesentlichen Teilen auf dem Gutachten von Berg et al. (2019, S. 135 ff.).



Förderliche Rahmenbedingungen schaffen

Um die Potenziale der Digitalisierung für die Abfallwirtschaft zu heben, bedarf es förderlicher Rahmenbedingungen. Diese können durch die Einbettung der abfallwirtschaftlichen Initiativen in gesamtstädtische Digitalstrategien, durch fachliche und finanzielle Unterstützung für einzelne Betriebe oder für Verbünde, durch den Auf- und Ausbau von Fachkompetenzen in den Unternehmen oder durch den Ausbau der Kommunikationsinfrastrukturen geschaffen werden.

Abfallwirtschaft in Smart-City-Konzepten stärker berücksichtigen

Um die Rohstoffversorgung mittelfristig zu sichern, wird es zunehmend erforderlich, Materialien und insbesondere kritische Rohstoffe aus dem Abfall zurückzugewinnen (Berg et al. 2020a, S. 25). Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger könnten zum zukünftigen Zentrum der Kreislaufwirtschaft werden, indem sie sich zu »Kreislaufmanagern« (acatech 2021, S. 33) entwickeln und zu Abfall gewordene Produkte in die jeweils optimale Kaskadennutzung zurückführen. Dafür ist eine Wissens- und Entscheidungsbasis zu erarbeiten, um in den kommenden Jahren und Jahrzehnten auf kommunalpolitischer Ebene effektiver agieren zu können (Müller et al. 2017, S. 3). Kommunen könnten künftig insbesondere bei Erfassung, Kartierung und Charakterisierung relevanter Rohstoffe eine wichtige Funktion einnehmen. Eine solche Kartierung hat die Stadt Bonn bereits initiiert, um Strategien zu erarbeiten, wie verbaute kritische Metalle künftig besser rezykliert werden können (Eckarhardt 2019; Hoffmeister et al. 2018). Ein Ansatz, um die Rolle von örE in einer künftigen Kreislaufwirtschaft zu stärken, ist die stärkere Berücksichtigung der Abfallwirtschaft in Smart-City Strategien.

Unterstützung bei der Ausschreibung logistischer und abfallwirtschaftlicher Dienstleistungen

Bei örE geht der Impuls zur Digitalisierung häufig von öffentlichen Ausschreibungen für die Beauftragung von logistischen oder anderen abfallwirtschaftlichen Dienstleistungen durch (private) Dritte aus. So können örE beispielsweise die Nutzung digitaler Technologien durch sammelnde Privatunternehmen (beispielsweise Navigations- und Telemetriesysteme) vorschreiben (Berg et al. 2019, S. 82) oder eine CO₂-Bepreisung in ihren Ausschreibungen festlegen, um Investitionsanreize in CO₂-effiziente Technologien und Dienstleistungen zu setzen. Ein Beispiel für Letzteres ist der Entsorgungs- und Wirtschaftsbetrieb Landau (EWL), der seit 2020 in seinen Ausschreibungen für *logistische Leistungen* transportbedingte Emissionen mit 160 Euro/t CO₂ bepreist (Recycling-Portal.eu 2020a). Zwar dürfen öffentliche Auftraggeber von den ausführenden Unternehmen fordern, dass sie ökologische Auswirkungen berücksichtigen,

allerdings sind nicht alle Ausführungsklauseln rechtlich zulässig (Schneider/Schmidt 2020). Um vor diesem Hintergrund die Kommunen bei der Auftragsvergabe zu unterstützen und für Rechtssicherheit zu sorgen, könnten Leitfäden und Mustervorlagen für entsprechende Ausschreibungen entwickelt werden. Dies gilt für die kreislaforientierte Beauftragung von logistischen Dienstleistungen genauso wie für relevante Beschaffungsaufträge (UBA 2020b). Das Umweltbundesamt hat bereits einen Leitfaden für Müllfahrzeuge herausgegeben, welcher überarbeitet werden könnte, um die Potenziale der Digitalisierung für die Einsparung von Treibhausgasen stärker in den Blick zu nehmen.

Beratungsangebote für öre

Für die Einführung von digitalen Innovationen brauchen insbesondere kleinere Kommunen und kommunale Betriebe fachliche Unterstützung. Eine internationale Umfrage stellte einen signifikanten Wissensbedarf bzw. beträchtliche Wissenslücken zum Thema Digitalisierung in der Abfallwirtschaft fest (ISWA 2017). Vor allem für kleinere Kommunen bzw. deren Betriebe sind adressatengerecht aufbereitete Informationen über digitale Innovationen sowie ein kontinuierlicher Wissenstransfer von Pionierkommunen zu Einsteigerkommunen von Vorteil, um angesichts der wachsenden Vielfalt an digitalen Technologien mögliche Fehlinvestitionen zu vermeiden sowie etwaige Reboundeffekte durch einen fehlerhaften Einsatz zu verhindern. Die Beratungsbedarfe betreffen nicht nur technologische Aspekte (z.B. die Auswahl, Bedienung und Wartung der Technologien), sondern auch betriebswirtschaftliche Aspekte oder Rechtsfragen (z.B. in Bezug auf die Datenhoheit von Betriebs- und Maschinendaten oder auf Ausschreibungsverfahren).

Weil vor allen kleinere Betriebe oftmals nicht in der Lage sind, ausreichend eigene digitale Kompetenzen aufzubauen, wird die nötige Expertise in vielen Fällen als private Dienstleistung zugekauft. Die Förderprogramme »go-inno« oder »go-digital« des BMWK beispielsweise unterstützen branchenunabhängig KMU bei ihren Digitalisierungsvorhaben durch die Förderung von Beratungsleistungen und Umsetzungsmaßnahmen. Von solchen Förderprogrammen können auch Betriebe der Abfallwirtschaft profitieren, weswegen sie fortgesetzt, ausgebaut und in der Abfallwirtschaft aktiv beworben werden sollten. Ein Nachteil von solchen auf individuelle Unternehmen abzielenden Förderangeboten ist jedoch, dass organisationsübergreifende Lösungen nur indirekt gefördert und dadurch Kosteneinsparung durch Skalierung nicht gänzlich erschlossen werden können. Speziell auf die Abfallwirtschaft zugeschnittene Förderprogramme könnten ein Ansatz sein, um durch die Digitalisierung ermöglichte Synergieeffekte der organisationsübergreifenden Zusammenarbeit besser zu nutzen.



Interorganisationale und interkommunale Zusammenarbeit

Durch interorganisationale und interkommunale Zusammenarbeit bei der Entwicklung und/oder Einführung von digitalen Technologien kann die Kostenlast reduziert werden. Wird beispielsweise eine auf die kommunale Abfallwirtschaft zugeschnittene Softwarelösung von mehreren öRE entwickelt, reduzieren sich die Kosten für die einzelnen Beteiligten. Besonders im Rahmen der branchen- oder ämterübergreifenden Zusammenarbeit ergeben sich Synergieeffekte z. B. durch gemeinsame Investitionen in und Nutzung von Infrastrukturen oder den Datenaustausch (z. B. Meldedaten) über gemeinsame Plattformen. So schließen sich einige öRE mit anderen kommunalen Akteuren zusammen, um die Herausforderungen von Innovation und Digitalisierung miteinander anzugehen und gemeinsame Investitionen zu tätigen. Beispielsweise gründeten in Nordrhein-Westfalen mehrere Städte und Gemeinden Unternehmen regio IT, dessen Auftrag in der Beratung und Begleitung von Entsorgern und Versorgern bei der Einführung digitaler Lösungen besteht⁵³. Solche Verbünde können sowohl auf regionaler Ebene aufgesetzt werden (wie z. B. das InfraLabBerlin⁵⁴) und durch die Länder unterstützt werden, als auch über bundesweite Kooperationen oder über die Zusammenarbeit als Mitglieder der Verbände Kommunaler Unternehmen gefördert werden.

Zusammenarbeit der Akteure entlang der Wertschöpfungsketten fördern

Auch wenn der technologische Fortschritt in einzelnen Schritten der Abfallwirtschaft zu einer Verbesserung der Kreislaufwirtschaft führt, ergibt sich bei vielen Lösungen erst dann ein Mehrwert, wenn branchenübergreifend mehrere Akteure beteiligt werden (Wilts/Berg 2017). Dazu wäre eine Verbindung der Informationssysteme von öRE mit vorgelagerten Produktions- und Nutzungsschritten erforderlich, um ohne Unterbrechung des Informationsflusses die in Produkten enthaltenen Materialien und ggf. toxischen Stoffe zu dokumentieren und den Verbleib von Ressourcen entlang des gesamten Produktlebenszyklus nachzuverfolgen. So können digitale Lösungen wie digitale Wasserzeichen, chemische Tracker oder digitale Produktzwillinge ihr Potenzial zur Schaffung von Transparenz über die Materialzusammensetzung erst dann voll entfalten, wenn möglichst viele Akteure entlang der Wertschöpfungskette (Betriebe, Sortierer und Recycler) sich an der Umsetzung beteiligen. Die Vernetzung von Herstellern und Akteuren der Recyclingwirtschaft würde es ermöglichen, die Perspektive der Entsorgungswirtschaft bereits im Designprozess für neue Produkte

53 www.regioit.de/unternehmen/strategie/ (10.3.2023)

54 Das InfraLab ist ein Kooperationsprojekt der Berliner Infrastrukturunternehmen im Bereich Energie, Strom, Abfall, Mobilität und Wasser, das dazu dienen soll, Smart-City-Projekte umzusetzen (<https://infralab.berlin>; 23.1.2023)



besser einfließen zu lassen. Eine Austauschplattform, die der Vernetzung und Zusammenarbeit der Akteure dient, könnte hierfür auf Bundesebene geschaffen werden.

Ausbau digitaler Expertise

Die Einführung digitaler Lösungen erfordert einen Ausbau von entsprechenden Kompetenzen in der Branche. Mangelnde digitale Kompetenzen bilden derzeit eine wesentliche Hürde für die Digitalisierung der kommunalen Kreislaufwirtschaft (Berg et al. 2019, S. 160; Berger/Volkmar 2020, S. 385 ff.). Der Übergang zu einer digitalen Kreislaufwirtschaft setzt einen großen Bedarf an gut ausgebildeten IT-Fachkräften frei, die aber generell schwer zu finden und teuer in der Anstellung sind. Um die eigenen Beschäftigten mit den entsprechenden Kompetenzen auszustatten, sind (kontinuierliche) Aus- und Weiterbildungsanstrengungen erforderlich. Dazu ist es notwendig, dass die konkreten Aus- und Weiterbildungsbedarfe durch die einschlägigen Akteure (z. B. Betreiber, Branchenverbände, Bundesinstitut für Berufsbildung) festgestellt und gezielte Schulungsmöglichkeiten konzipiert und eingerichtet werden. Außerdem ist es wichtig, dass die Qualifikationserfordernisse, die von der Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft ausgehen, besser verstanden werden, um vorausschauende Strategien zur Gestaltung von Beschäftigungsübergängen zu entwickeln und Beschäftigte mit zielgerichteten Weiterbildungsangeboten für den Übergang vorzubereiten (OECD 2020, S. 35). Durch staatliche Unterstützung könnte der Ausbau digitaler Expertise unterstützt werden. In Frankreich beispielsweise wurde ein nationaler Rahmenvertrag für den Ausbau digitaler Kompetenzen für die Digitalisierung in der Abfallwirtschaft mit Branchenvertretern und Schulungsanbietern abgeschlossen (FNADE 2017).

Kommunikationsinfrastrukturen ausbauen

Eine schlechte Mobilfunkanbindung bedeutet eine deutliche Einschränkung in den Möglichkeiten zur Nutzung digitaler Technologien für öRE. Entsorgungsunternehmen in den städtischen Gebieten verfügen aktuell aufgrund der besseren Telekommunikationsinfrastrukturen in der Regel über bessere Ausgangsbedingungen für die Digitalisierung als solche in ländlichen Räumen. Für digitale Anwendungen in der Kreislaufwirtschaft ist aber eine zuverlässige, flächendeckende Netzabdeckung in allen besiedelten Gebieten wichtig. Mobilfunknetze sollten daher flächendeckend ausgebaut werden, um die Digitalisierung der Abfallwirtschaft an allen Standorten gleichermaßen zu ermöglichen.

Die LoRaWAN-Technologie als mögliche Alternative zur Nutzung des Mobilfunknetzes erhält nach Aussage einiger Expert/innen im Moment hohe Aufmerksamkeit. Vielerorts ist LoRaWAN schon verfügbar oder die Installation ist in Planung. Da das Funksignal auch dicke Betonwände durchdringt und



hohe Reichweiten aufweist, eignet sich die Technologie auch für den Einsatz in urbanen Räumen, um Sensoren für verschiedenste Anwendungen über das gesamte Versorgungsgebiet kostengünstig und energieeffizient einzusetzen. Vor diesem Hintergrund wäre eine staatliche Förderung des Auf- und Ausbaus von LoRaWAN an geeigneten Standorten zu prüfen.

Rechtliche Grundlagen anpassen

Rechtsunsicherheiten können Digitalisierungsvorhaben in der Abfallwirtschaft im Wege stehen. Relevante Handlungsfelder für den Gesetzgeber gibt es in den folgenden Bereichen.

Proaktive Rechtssetzung

Für die Digitalisierung von Anlagen und Systemen, die langen Investitionszyklen unterliegen und ggf. hohe Investitionsbedarfe erfordern, benötigen öRE Planungssicherheit durch verlässliche Rahmenbedingungen. Vor diesem Hintergrund würde eine proaktive Rechtssetzung Investitionen in die abfallwirtschaftlichen Infrastrukturen erleichtern. Dies betrifft z. B. klare Anforderungen an die Kennzeichnung von Produkten (digitale Produktpässe) und damit zusammenhängend an den erforderlichen Stand der Technik zur Erkennung solcher Kennzeichnungen. Ein intensiver Dialog mit den betroffenen Akteuren der kommunalen Kreislaufwirtschaft und ihren Vertretern ist dazu geboten.

Sicherheits- und Haftungsbestimmungen

Die Anwendung digitaler Technologien in der Abfallwirtschaft wirft neue Rechtsfragen in den Bereichen Sicherheit und Haftung auf. Teilweise fehlt es hier noch an rechtsverbindlichen Regelungen. Klare Sicherheits- und Haftungsbestimmungen sind beispielsweise für automatisierte und insbesondere für autonome Systeme oder Maschinen notwendig, die in nicht speziell geschützten Umfeldern für die Zusammenarbeit mit Menschen eingesetzt werden (Berg et al. 2019, S. 98; 113; Sarc et al. 2020, S. 999). So setzt der perspektivische Einsatz von (teil)autonomen Sammelfahrzeugen durch öRE klare rechtliche Rahmenbedingungen voraus, die auch die Sicherheit der Bedienenden und Dritter gewährleisten. Weitere rechtliche Unsicherheiten bestehen insbesondere hinsichtlich der grundlegenden Frage, in welchem Ausmaß das automatische Auslösen von Betriebsprozessen ohne menschlichen Intermediär zulässig ist bzw. sein soll. Für die Einführung von Technologien, die sich bei unklarer Rechtslage erst noch bewähren müssen, könnten regulatorische Freiräume (Sandboxes/Experimentierklauseln) geschaffen werden, um eine Erprobung im laufenden Betrieb zu ermöglichen. Dies wird bereits für das Testen von Konzepten zum



vernetzten und autonomen Fahren eingesetzt und bietet sich generell für Smart-City-Projekte an.

Datenschutz

Im Zuge der Digitalisierung der Abfallwirtschaft sind datenschutzrechtliche Aspekte zu klären. Dies betrifft beispielsweise die weitere Verwendung von Betriebs- und/oder Maschinendaten, die etwaige Rückschlüsse auf das Verbrauchs- und Entsorgungsverhalten einzelner Personen zulassen. So erlauben etwa digitale Systeme, die Abfallmengen und -arten einzelner Haushalte registrieren, potenziell Rückschlüsse auf individuelle Konsumgewohnheiten oder Verhaltensweisen. Vor diesem Hintergrund ist der Umgang mit Betriebs- und Maschinendaten im Sinne des Datenschutzes neu zu definieren.

Normung und Standardisierung vorantreiben

Normung und Standardisierung stellen Grundvoraussetzungen für die Verbreitung von digitalen Technologien und die Erschließung von systemübergreifenden Digitalisierungspotenzialen dar. Mit Blick auf die Digitalisierung der kommunalen Abfallwirtschaft wurden im TA-Projekt vor allem die folgenden Handlungsbedarfe identifiziert.

Technische Mindeststandards regelmäßig anpassen

Um die Verbreitung digitaler Lösungen zu beschleunigen, sind technische Mindestanforderungen regelmäßig zu aktualisieren. Allerdings stellt die hohe Innovationsgeschwindigkeit eine große Herausforderung für die Normierung und Standardisierung dar (Berg et al. 2020a, S. 24). Beispielsweise ermöglichen die schnellen Fortschritte in den Bereichen Sensorik und Datenverarbeitung immer höhere Sortierquoten. Allerdings werden die BVT-Merkblätter, die den einzuhaltenden Stand der Technik in Abfallbehandlungs- und Verbrennungsanlagen beschreiben, nur in einem Rhythmus von ca. 10 Jahren aktualisiert, was mit Blick auf digitale Innovationen zu selten ist (SRU 2020, S. 166). Hier gilt es nach Wegen zu suchen, wie der Normierungsprozess durch politische Unterstützung beschleunigt werden könnte.

Standardisierung von IT-Schnittstellen

Zu den Haupthindernissen einer stärkeren Digitalisierung der Abfallwirtschaft zählen bislang fehlende technische Standards und Schnittstellen für eine horizontale Integration von Systemen entlang der Wertschöpfungsketten (Berger/Volkmar 2020, S. 385 ff.). Voraussetzung dafür ist zunächst die Einigung



auf eine Referenzarchitektur (DGAW 2019). Geeignete Schnittstellen für einen reibungslosen Datenaustausch zwischen verschiedenen Softwarelösungen, z. B. für die Disposition, für das Fahrzeugmanagement oder für Verwaltungsaufgaben, fehlen aber noch weitgehend und behindern den Fortgang der Digitalisierung. Zwar wird an der Einführung standardisierter Lösungen intensiv gearbeitet. Beispielsweise strebt der BDE/VKS bei Behälteridentifikationssystemen eine Vereinheitlichung der verwendeten Technik auf Grundlage bereits verfügbarer DIN-Normen an (Bilitewski et al. 2018, S. 112). Auch wurde im Arbeitskreis »Mobile IT-Systeme« für verschiedene Softwarelösungen der Abfallwirtschaft eine Schnittstelle u. a. zwischen der Büro-IT, der in Entsorgungsfahrzeugen eingesetzten Software definiert (BDE/VKU 2016, S. 33). Das Ziel einer vollständigen datentechnischen Integration aller Systeme entlang der Wertschöpfungskette ist allerdings noch weit (Berg et al. 2019, S. 118 f.). Weitere Standards für Schnittstellen und die Vereinheitlichung von Systemen sind nötig, wobei immer auch auf die Anschlussfähigkeit an europäische oder globale Lösungen geachtet werden muss. Im Idealfall sollten Standards wertschöpfungskettenübergreifend gelten.

Wissenslücken schließen

Die Digitalisierung der Abfallwirtschaft ist in einigen Bereichen der Abfallwirtschaft fortgeschritten. Allerdings bestehen noch Wissenslücken in einigen Bereichen. Dies betreffen insbesondere folgende Forschungsfelder:

Digitale Anwendungen und ihren Grundlagetechnologien weiterentwickeln

Das Portfolio der digitalen Technologien speziell für Anwendungen in der Abfallwirtschaft ist im Vergleich zu anderen Industriebereichen noch nicht weit ausgereift und könnten durch eine Intensivierung der Forschung und Entwicklung in diesem Bereich weiter ausgebaut werden. Dies gilt beispielsweise für Sensorsysteme und Robotikanwendungen für die Abfallsammlung und -sortierung oder für integrierte Telemetrielösungen zur Optimierung der Sammellogistik. Darüber hinaus sind viele digitale Lösungen für die Abfallwirtschaft von der Entwicklung bzw. vom Reifegrad der ihnen zugrunde liegenden Basistechnologien abhängig. Hier zu nennen sind etwa die LoRaWAN-Technologie, Bilderkennungssoftware, Netzwerkinfrastrukturen, aber auch generell die Robotik, Sensorik oder KI-Anwendungen, die es weiterentwickeln gilt (Berg et al. 2019, S. 94 ff.).



Verbreitung und Nutzung digitaler Lösungen

Genaue Informationen zur Verbreitung und Nutzung digitaler Technologien in der Abfallwirtschaft fehlen aktuell weitgehend. Repräsentative Studien und Statistiken dazu, welche digitalen Technologien in welchen Umfang wo eingesetzt werden, sind noch nicht verfügbar. Um eine vorausschauende Planung einer digitalen Abfallwirtschaft vor allem für Kommunen zu ermöglichen, wäre eine Wissensbasis zu Verbreitungs- und Nutzungstendenzen von zentraler Bedeutung.

Ökologische und sozioökonomische Auswirkungen

Die ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Digitalisierung der Abfallwirtschaft wurden bislang kaum erforscht. Wissenslücken betreffen z. B. die Auswirkungen auf den sektorübergreifenden Treibhausgasausstoß oder Ressourceneinsatz. Auch die Auswirkungen der Digitalisierung auf die Beschäftigung, die Qualifikationsanforderungen oder die Arbeitsbedingungen in der Abfallwirtschaft wurden bislang wenig erforscht (OECD 2020, S.22 ff.). Um ökologische und sozioökonomische Effekte der Digitalisierung der Abfallwirtschaft besser zu verstehen, muss die Datenlage verbessert werden.

4 Wasserwirtschaft

Als weiteres Fallbeispiel für die Untersuchung von Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen wurde die Wasserwirtschaft behandelt.

Bezüglich der Digitalisierung der Versorgungsinfrastrukturen lag der Fokus der öffentlichen und politischen Aufmerksamkeit vor allem auf der Energiewirtschaft, deren digitale Transformation als ein wesentliches Element der Energiewende gilt und daher politisch hohe Priorität genießt (dazu und zum Folgenden Hempel et al. 2021, S. 21 f.). Auf der Grundlage digitaler Technologien sollen nicht nur Erzeugung und Verteilung von Energie neu organisiert, sondern auch neue Geschäftsmodelle für den Energiemarkt realisiert werden. In der Wasserwirtschaft hingegen war Digitalisierung abseits der Nutzung von Automatisierungstechnik zur Unterstützung betrieblicher Prozesse, wenn überhaupt, lange Zeit nur ein Randthema. So ist beispielsweise im Wasserversorgungskonzept 2040 für Berlin von 2008 an keiner Stelle von Digitalisierung als strategischer Bestandteil der Unternehmensentwicklung die Rede (Möller/Burgschweiger 2008). Zwar wurden im Konzept verschiedene Herausforderungen angesprochen und digitale Systeme genannt. Es wurde jedoch keine Verbindung zwischen beiden Aspekten in dem Sinne hergestellt, dass die Digitalisierung als unternehmerische Teilstrategie den Hebel zur Lösung künftiger Herausforderungen wie bei der Energiewirtschaft darstellen könnte. In den letzten 5 bis 10 Jahren wandelte sich dieses Bild jedoch klar. Die Digitalisierung spielt in unternehmensstrategischen Überlegungen der Wasserwirtschaft eine zunehmend wichtige Rolle. Neben betrieblichen Effizienzsteigerung tritt angesichts zunehmender Extremwetterereignisse wie Starkregen oder Trockenheit immer stärker auch die Sicherung der Grundlagen der Wasserwirtschaft als Ziel der Digitalisierung in den Vordergrund. Mittlerweile findet sich kaum eine Veröffentlichung, die zwischen den zentralen wasserwirtschaftlichen Herausforderungen und der Digitalisierung keinen Zusammenhang herstellt.

Ziel der vorliegenden Analyse ist es, vor dem Hintergrund der Erwartungen an die Digitalisierung in der Wasserwirtschaft einen nüchternen Blick auf die Chancen und Risiken zu werfen. Nach einer kurzen Einführung in die Ziele, Aufgaben und Herausforderungen der Wasserwirtschaft (Kap. 4.1) werden aus einem eher technischen Blickwinkel heraus der Stand und die Perspektiven der Digitalisierung im Sektor Wasser dargestellt (Kap. 4.2). Dies bildet sodann die Grundlage für die Identifizierung und Beschreibung der Anwendungspotentiale, aber auch der Grenzen von digitalen Technologien in der Wasserwirtschaft, wobei ein Fokus auch auf deren Nutzung für die Bewältigung von Ausnahmesituationen und Krisen gelegt wird (Kap. 4.3 u. 4.4). Schließlich werden Handlungsfelder abgeleitet, um die Erschließung von Digitalisierungspotenziale in der Wasserwirtschaft zu befördern (Kap. 4.5).

4.1 Ziele, Aufgaben und Herausforderungen der Wasserwirtschaft

Analog zur Analyse der Abfallbranche werden in diesem einführenden Kapitel zunächst die Ziele der Wasserwirtschaft (Kap. 4.1.1) sowie die gesetzlichen Anforderungen, die sich aus der Erfüllung dieser Ziele an kommunale Unternehmen der Wasserversorgung und Abwasserentsorgung (im Folgenden Betriebe) stellen, vorgestellt (Kap. 4.1.2). Kapitel 4.1.3 stellt die zentralen Aufgabenbereiche vor, die sich aus dem Rechtsrahmen ergeben. Kapitel 4.1.4 geht auf die Organisation der Branche ein, bevor abschließend die künftigen Herausforderungen der Branche dargestellt werden (Kap. 4.1.5).

4.1.1 Ziele der Wasserwirtschaft

Zu den Aufgaben einer funktionierenden Wasserwirtschaft gehören die Gewässerunterhaltung⁵⁵ und der Schutz der Gewässer, der Landschaftswasserhaushalt⁵⁶, der Küsten- und Hochwasserschutz sowie die Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung. Der Wasserwirtschaft kommt in Deutschland eine besondere Bedeutung zu: Zum einen stellt die Ressource Wasser das Fundament unserer Ökosysteme dar und zum anderen dient sie dem Menschen als Trinkwasser zur Lebensgrundlage, aber auch als Betriebsmittel für die Industrie und zur Erzeugung von Energie. Hauptaufgaben von Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung liegen in

- › der Erhaltung der Gewässer- und Trinkwasserqualität,
- › einer verlässlichen Versorgung mit Trinkwasser bzw. Entsorgung von Abwasser,
- › der Sicherstellung einer nachhaltigen und verbrauchergerechten Bepreisung,
- › dem Schutz der Gewässer vor negativen menschlichen Einflüssen sowie
- › dem Schutz des Menschen vor Gefahren durch Hochwasser und Überflutungen.

Zu Erledigung dieser Aufgaben ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich, in dem neben Betrieben der Wasserversorgung und der Abwasserbeseitigung auch

55 Gewässerunterhaltung bezeichnet die Maßnahmen zur Pflege und Entwicklung von Gewässern. Damit sind die Erhaltung des Gewässerbettes, der Ufer, der Schiffbarkeit und die Förderung der ökologischen Funktionsfähigkeit der Gewässer sowie die Erhaltung des Gewässers in einem Zustand, der hinsichtlich der Abführung oder Rückhaltung von Wasser, Geschiebe, Schwebstoffen und Eis den wasserwirtschaftlichen Bedürfnissen entspricht (WHG § 39).

56 »Landschaftswasserhaushalt, beschreibt die Elemente des Wasserkreislaufs des Niederschlags, der Infiltration, der Grundwasserneubildung, des Abflusses, die verschiedenen Komponenten der Verdunstung sowie Rücklage und Aufbrauch in typischen Landschaften.« (Spektrum.de o. J.)

viele weitere Akteure einbezogen sind (Oelmann/Czichy 2020, S. 8). In diesem Bericht liegt der Fokus auf der kommunalen Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung sowie den hier tätigen Betrieben.

4.1.2 Wasserrecht

Der flächendeckende Gewässerschutz ist Aufgabe des Staates. In seiner Verantwortung liegt es, die europäischen Zielvorgaben in nationales Recht umzusetzen. Im Folgenden werden die Eckpunkte des rechtlichen Rahmens für eine integrierte Wasserbewirtschaftung sowie die Vorgaben, die Wasserversorger und Abwasserentsorger direkt betreffen, kurz dargestellt.

4.1.2.1 Europäischer Rahmen für einen integrierten Gewässerschutz

Seit 2000 bildet die Wasserrahmenrichtlinie den zentralen ordnungspolitischen Rahmen für den Schutz, die Bewirtschaftung und die Nutzung der Gewässer in Europa. In ihr sind weitreichende Ziele für den chemisch-physikalischen, biologisch-ökologischen und mengenmäßigen Zustand des Grundwassers, der oberirdischen Gewässer und der Küstengewässer definiert. Ziel der Richtlinie ist es, einen »guten Zustand« für alle Wasserkörper bis 2015 und in Ausnahmefällen (z. B. bei unverhältnismäßig teuren Maßnahmen) bis 2027 zu erreichen (Urban/Mosbach 2020, S. 168). Die Ziele für 2015 wurden in vielen Ländern, so auch in Deutschland, allerdings verfehlt (Fuhrmann 2016, S. 14). Um die Wasserrahmenrichtlinie fortlaufend umzusetzen, werden Bewirtschaftungspläne und Maßnahmen in einem 6-Jahre-Turnus definiert. Bis 2027 sind alle Flüsse, Seen, Grundwasser und Küstengewässer in einen guten Zustand zu überführen (UBA 2022d).

Mit Blick auf die Aufgaben zur Trinkwasserversorgung und zur Abwasserbeseitigung sind vor allem die Trinkwasserrichtlinie (Neufassung) und die Kommunalabwasserrichtlinie⁵⁷ maßgeblich. Dort sind Ziele und Maßnahmen formuliert, die dazu dienen sollen, die Umweltqualitätsstandards der Richtlinie 2013/39/EU⁵⁸ zu prioritären Stoffen in der Wasserpolitik sowie die Nitratgrenzwerte der Richtlinie 91/676/EWG⁵⁹ einzuhalten. 2021 verabschiedete die Europäische Kommission (EK 2021) den EU-Aktionsplan »Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden«, in welchem quantitative Ziele für eine Reduzierung von Schadstoffen in Luft, Wasser und Boden bis 2030 festgelegt wurden. Auf

57 Am 26. Oktober 2022 veröffentlichte die Europäische Kommission ihren Legislativvorschlag für die Überarbeitung dieser Richtlinie.

58 Richtlinie 2013/39/EU zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik

59 Richtlinie 91/676/EWG zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen



Grundlage dieses Aktionsplans ist eine umfassende Überarbeitung des Rechtsrahmens u. a. im Bereich der Wasserpolitik vorgesehen.

4.1.2.2 Wasserrecht in Deutschland

Konkretisiert und ergänzt werden die europäischen Regelungen im WHG. Die öffentliche Trinkwasserversorgung und die Abwasserbeseitigung werden als Aufgaben der Daseinsvorsorge definiert (§ 50 u. §§ 54 bis 61 WHG). Demnach ist ein sorgsamer Umgang mit Wasser für Wasserversorger und Endverbraucher geboten (§ 50 Abs. 3 WHG). Zur Erhaltung ihrer Funktions- und Leistungsfähigkeit sind Gewässer nachhaltig zu bewirtschaften (§ 6 Abs. 1 WHG). Beeinträchtigungen auch im Hinblick auf den Wasserhaushalt der direkt von den Gewässern abhängenden Landökosysteme und Feuchtgebiete sind zu vermeiden und unvermeidbare, nicht nur geringfügige Beeinträchtigungen so weit wie möglich auszugleichen (§ 6 Abs. 1 Nr. 2 WHG). Es gilt der Besorgnisgrundsatz: Ist eine bleibende, nicht nur geringfügige nachteilige Veränderung nicht mehr mit Sicherheit auszuschließen, ist jegliche Benutzung des Grundwassers nicht mehr zulässig (Urban/Mosbach 2020, S. 186). Was dies speziell für Trinkwasserversorger und Abwasserentsorger bedeutet, wird im Folgenden näher erläutert.

4.1.2.3 Trinkwasserversorgung

Die TrinkwV bildet die gesetzliche Grundlage für die Sicherung und Überwachung der Versorgung mit Wasser für den menschlichen Gebrauch. Dafür werden Mindestanforderungen an die Qualität des Trinkwassers festgeschrieben. So dürfen Genuss oder Gebrauch von Trinkwasser die menschliche Gesundheit nicht schädigen (§ 4 Abs. 1 TrinkwV). Einzuhaltende Grenzwerte betreffen sowohl die mikrobiologische Beschaffenheit des Trinkwassers als auch radiologische und chemische Anforderungen sowie sensorische und physikalisch-chemische Eigenschaften (z. B. Geruch, Geschmack, Färbung, Trübung⁶⁰). Geregelt sind auch Häufigkeit und Umfang der Untersuchungen des Roh- bzw. Trinkwassers (§ 14 TrinkwV). Spezielle Anforderungen bestehen für Probenahmen an den zu einer Wasseranlage gehörenden Schutzzonen sowie im Verteilnetz (§ 19 TrinkwV). Die Probenahmeplanung ist mit dem Gesundheitsamt abzustimmen. Abweichungen bezüglich des Umfangs und der Häufigkeit der Untersuchungen können auf Grundlage einer Risikobewertung vom Gesundheitsamt genehmigt werden. Beispielsweise brauchen nur solche Pflanzenschutzmittel- und Biozidproduktwirkstoffe überwacht zu werden, deren Vorhandensein im betreffenden Wassereinzugsgebiet wahrscheinlich ist.

⁶⁰ Siehe dazu Anlage 3 der TrinkwV.



Wie bzw. mit welchen technischen und organisatorischen Maßnahmen die Wasserversorger die Qualitätsanforderungen einhalten sollen, dazu macht die TrinkwV keine konkreten Vorgaben, stattdessen wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik gefordert (Kasten 4.1).

So müssen z. B. Anlagen für die Gewinnung, Aufbereitung oder Verteilung von Trinkwasser (ungeachtet ihrer Größe) mindestens nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik geplant, gebaut und betrieben werden (§ 17 Abs. 1 TrinkwV). Die Nichteinhaltung dieser Verpflichtung stellt eine Ordnungswidrigkeit dar (§ 25 Nr. 11h TrinkwV). Die grundsätzlichen Anforderungen an Wasserversorgungsunternehmen zur Sicherstellung der Trinkwasserversorgung sind in der Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser (AVBWasserV)⁶¹ festgelegt. Beispielsweise müssen Wasserversorger ihren Kunden Wasser im vereinbarten Umfang und unter dem erforderlichen Druck jederzeit am Ende der Anschlussleitung zur Verfügung stellen (§§ 4,5 AVBWasserV).

Kasten 4.1 Technische Selbstverwaltung

Die Vorgaben des Wasserrechts bilden einen rechtlichen Ordnungsrahmen mit staatlichen Schutzziele u. a. für den Gesundheits-, den Verbraucher- und den Umweltschutz, ohne im Detail Vorgaben zur Einhaltung dieser Ziele zu nennen. Die technisch-wissenschaftliche Konkretisierung solcher Vorgaben liegt überwiegend in der Eigenverantwortung der Wirtschaft, die zu diesem Zweck die allgemein anerkannten Regeln der Technik bzw. den Stand der Technik definieren. Dafür organisiert sich die Wirtschaft in technisch-wissenschaftlichen Vereinen, die in einem transparenten Verfahren in Expertengruppen unter Beteiligung der Fachöffentlichkeit Normen oder technische Regelwerke erarbeiten und kontinuierlich auf den neuesten Stand bringen (Cyris 2010, S.21). Für die Wasserwirtschaft maßgeblich sind insbesondere die technischen Regelwerke des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW), der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) sowie die wasserfachlichen Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN) (Thaler 2019, S. 7 f.).

Private Normen- oder Regelwerke haben kraft ihrer Entstehung nur empfehlenden Charakter⁶² (Cyris 2010, S. 21) und auch das Wasserrecht verlangt

61 Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser vom 20.6.1980, zuletzt am 11.12.2014 geändert

62 Die Anwendung einer Norm wird vom Gesetzgeber nur in wenigen Fällen ausdrücklich verlangt, z. B. im Kontext von genormten Prüfverfahren, um reproduzierbare Ergebnisse zu ermöglichen (DIN o. J.).



nicht ausdrücklich die Einhaltung der Regelwerke von DVGW oder DWA.⁶³ Die Betreiber sind also nicht daran gebunden. Allerdings erkennt die Rechtsprechung die Arbeitsblätter der Regelwerke von DVGW und DWA als schriftliche Fixierung der allgemein anerkannten Regeln der Technik an, so dass Betreiber, die diese Regelwerke anwenden, die gesetzlichen Schutzziele rechtssicher erfüllen (Wetzel 2020). Wenn Betreiber davon abweichen, müssen sie nachweisen, dass die getroffenen Maßnahmen mindestens gleichwertig zu den allgemein anerkannten Regeln der Technik sind.

Ende 2020 trat eine Neufassung der Trinkwasserrichtlinie in Kraft, deren Umsetzung in deutsches Recht bisher noch aussteht (Stand Januar 2023). Wichtige Änderungen mit Bezug zur Digitalisierung betreffen u. a. Risikobewertung und Risikomanagement vom Einzugsgebiet bis zur Entnahmearmatur beim Verbraucher sowie das Monitoring von Trinkwasserverlusten.

4.1.2.4 Abwasserbeseitigung

Nach § 54 Abs. 2 WHG umfasst die Abwasserbeseitigung das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser sowie das Entwässern von Klärschlamm. Es gilt, dass Menge und Schädlichkeit so geringgehalten werden müssen, wie der Stand der Technik es ermöglicht (§ 57 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Die Beseitigung soll zudem das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigen (§ 55 WHG). Die Betreiber von Abwasseranlagen sind verpflichtet, Zustand, Funktionsfähigkeit, Unterhaltung und Betrieb der Anlagen sowie Art und Menge des Abwassers zu überwachen (§ 61 WHG). Die Einhaltung dieser Anforderungen wird wiederum durch die zuständigen Wasserbehörden überwacht (§§ 100 bis 102 WHG).

Um die Ziele des WHG zu erreichen, legt die AbwV gesetzliche Anforderungen an die Qualität von Abwasser fest, die in Gewässer eingeleitet werden dürfen (Anhang 1 der AbwV). Wiederum müssen Betreiber die allgemein anerkannten Regeln der Technik bzw. den Stand der Technik einhalten (§ 60 WHG), die im technischen Regelwerk der DWA konkretisiert werden.

Im Oktober 2022 veröffentlichte die Europäische Kommission (EK 2022b) einen Legislativvorschlag für die Überarbeitung der Kommunalabwasserrichtlinie 1991. Unter anderem ist bis 2035 die Einführung der vierten Reinigungsstufe für alle größeren Kläranlagen (ab 100.000 Einwohnerwerten) vorgesehen, bis 2040 soll dies auch für kleinere Kläranlagen (ab 10.000 Einwohnerwerten) geschehen, wenn höhere Mikroschadstoffkonzentrationen ein Risiko für die menschliche Gesundheit oder die Umwelt darstellen. Nach dem Verursacher-

⁶³ Dies im Unterschied etwa zum Energiewirtschaftsgesetz (§ 49 Abs. 2), gemäß dem die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik vermutet wird, wenn die technischen Regeln des DVGW eingehalten wurden (Vermutungsklausel).

prinzip sollen die Hersteller (z. B. von Medikamenten oder Kosmetika) an der Finanzierung der vierten Reinigungsstufe finanziell beteiligt werden. Außerdem soll die Liste der regulierten Schadstoffe ergänzt werden. Darüber hinaus sieht der Vorschlag vor, dass Kläranlagen mit mehr als 10.000 Einwohnerwerten bis Ende 2030 50 % und bis 2040 100 % der benötigten Energie selber produzieren. Darüber hinaus soll künftig (u. a. motiviert durch die COVID-19-Pandemie) ein regelmäßiges Monitoring von relevanten Gesundheitsparametern im Abwasser durchgeführt werden (BDEW 2022).

4.1.2.5 Vollzug

Das deutsche Wasserrecht ist durch die föderale Kooperation von Bund und Ländern im Rahmen der konkurrierenden Gesetzgebungszuständigkeit (Art. 74 Abs. 1 Nr. 2 GG) geprägt. Demnach können die Bundesländer von den bundesrechtlichen Bestimmungen des WHG abweichen, soweit nicht stoff- oder anlagenbezogene Regelungen betroffen sind. Die föderale Kooperation ist in der LAWA institutionalisiert. Regelungen zu Aspekten des Vollzugs der bundes- und landesrechtlichen Bestimmungen, Behördenzuständigkeiten und Verwaltungsverfahren liegen im Zuständigkeitsbereich der Bundesländer und sind in den Landeswassergesetzen enthalten. Das Landesrecht ergänzt zudem die Regelungen des WHG zur Benutzung von Gewässern, zu Anlagen der Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung, zur Gewässerunterhaltung und zum Ausbau von Gewässern sowie zum Hochwasserschutz und zur Gewässeraufsicht. Die Bundesländer müssen Bewirtschaftungspläne aufstellen, in denen sie Maßnahmen zur schrittweisen Verbesserung der Gewässerqualität bis hin zum guten Zustand darlegen (Thaler 2019, S. 6).

4.1.3 Zentrale Aufgabenbereiche der Wasserwirtschaft

Im Folgenden werden die Hauptaufgaben der Wasserwirtschaft dargestellt. Die Dienstleistungen der Trinkwasserversorgung und Abwasserbeseitigung greifen ineinander und bilden einen geschlossenen Kreislauf. Neben dem Betrieb der Anlagen, die im Folgenden für die Trinkwasserversorgung (4.1.3.1) und die Abwasserbeseitigung (4.1.3.2) näher dargestellt werden, gehören auch die Planung und der Bau von Infrastrukturen sowie deren Instandhaltung zu den Kernaufgaben der wasserwirtschaftlichen Betriebe.

4.1.3.1 Aufgaben der Trinkwasserversorgung

Die Prozesse der Trinkwasserversorgung umfassen die Gewinnung, Aufbereitung, Speicherung und Verteilung von Roh- bzw. Trinkwasser.



Die *Wassergewinnung* bezeichnet alle wasserwirtschaftlichen Prozesse im Bereich der Förderung und der Anreicherung von Rohwasser. In Abhängigkeit vom Wasserdargebot sowie von den geologischen, hydrologischen und klimatischen Gegebenheiten wird Rohwasser aus folgenden Ressourcen entnommen (Rautenberg 2019a, S. 10):

- Grundwasser, das mit Schachtbrunnen, Bohrbrunnen, Sickerleitungen oder Horizontalfilterbrunnen erfasst wird;
- Quellwasser aus Schicht- oder Stauquellen;
- Oberflächenwasser aus Talsperren, Seen oder Flüssen;
- Uferfiltrat, also Fluss- oder Seewasser, das nach Bodenpassage in Ufernähe gewonnen wird;
- angereichertes Grundwasser, also Grundwasser, das anteilig mit planmäßig versickertem Oberflächenwasser angereichert wurde.

Das gewonnene Rohwasser soll gesetzlich definierte physikalische, chemische und mikrobiologische Eigenschaften aufweisen und möglichst naturnah sein. Während beispielsweise in Bremen, Hamburg und Schleswig-Holstein die gesamte öffentliche Wasserversorgung mit Grundwasser erfolgt, dominiert in Sachsen Oberflächenwasser aus Seen und Talsperren, in Berlin hingegen Uferfiltrat (Statistisches Bundesamt 2019, S. 18).

Erfüllt das gewonnene Rohwasser die gesetzlichen Qualitätsanforderungen an Trinkwasser nicht, wird es aufbereitet (Fritsch 2019, S. 136). Die *Trinkwasseraufbereitung* umfasst je nach Wasserqualität physikalische, biologische und chemische Verfahren (Rautenberg 2019a, S. 10). Grundwasser ist mikrobiologisch und chemisch am wenigsten belastet und bedarf häufig nur einer Enteisenung, Entmanganung, Entsäuerung oder Enthärtung, wobei je nach Standort ggf. auch unerwünschte chemische Stoffe (z. B. Pestizide, Halogenkohlenwasserstoffe, Schwermetalle) mit aufwendigeren Verfahren entfernt werden müssen. Soll das Trinkwasser aus Oberflächenwasser gewonnen werden, werden Rechen und Fischabweiser zur Entfernung größerer und kleinerer Verunreinigungen eingesetzt, außerdem ist eine Partikelabtrennung erforderlich, die meist durch Oxidation, Flockung, Sedimentation und Filtration erfolgt. Zur Entfernung organischer Spurenstoffe (z. B. Arzneimittel) wird ggf. ein Adsorptionsverfahren, meist mittels Aktivkohle, eingesetzt. Gasförmige Wasserinhaltsstoffe können durch den Eintrag von Luft in das Wasser zum Ausgasen gebracht werden (Thaler 2019, S. 47 ff.). Als letzten Schritt erfolgt eine Desinfektion, wofür verschiedene Desinfektionsmittel (z. B. Chlor, Hypochlorit, Chlordioxid, Ozon) oder UV-Strahlung zur Abtötung von Krankheitserregern (Viren, Bakterien und Parasiten) zum Einsatz kommen.

Eine zentrale Aufgabe der Wasserversorgung ist es, Verbraucher/innen mit den von ihnen benötigten Wassermengen jederzeit zu versorgen. Dafür sorgen *Wasserspeicherungsanlagen*, die aus einem oder mehreren Wasser(hoch)be-

haltern bestehen. Wasserspeicher dienen insbesondere dazu, Verbrauchsschwankungen auszugleichen und die Versorgung bei Betriebsstörungen sicherzustellen (Rautenberg 2019a, S. 11). Wasserspeicher werden zur vorsorglichen Speicherung von Rohwasser, nach der Gewinnung und Aufbereitung als Reinwasserbehälter, aber auch im Verteilnetz eingesetzt, um einen gleichmäßigen und angemessenen Wasserdruck zu gewährleisten (Weiß 2019a, S. 430).

Einmal aufbereitet und ggf. gespeichert wird das Trinkwasser mithilfe eines Transport- (Zubringer- und Fernleitungen) und eines Versorgungssystems (Haupt-, Versorgungs- und Hausanschlussleitungen) an die Endverbraucher *verteilt*. Pumpwerke und Druckerhöhungsanlagen sorgen für die Gewährleistung des erforderlichen Wasserdrucks. In diesem Wertschöpfungsschritt stellen die Überwachung von Prozessen und die Wartung der Infrastruktur die zentralen Aufgaben dar (Hoch 2019, S. 94).

Um eine unterbrechungsfreie Wasserversorgung entlang aller Wertschöpfungsschritte sicherzustellen, werden zentrale Anlagen und Prozesse (z. B. Brunnen, Aufbereitungsanlagen, Hochbehälter, Pumpwerke) mithilfe von Automatisierungs- und Prozessleittechnik vor Ort und ggf. in einer zentralen Leitstelle überwacht und gesteuert (Kap. 4.2.1).

4.1.3.2 Aufgaben der Abwasserbeseitigung

Aufgaben der Abwasserbeseitigung decken die Sammlung und Ableitung von Abwasser, die Behandlung in Kläranlagen sowie die Einleitung des gereinigten Abwassers in Gewässer ab.

Die Aufgabe der *Abwassersammlung und -ableitung* umfasst die fachmännische Fortleitung des nach Gebrauch entstandenen Schmutzwassers. Dies erfolgt entweder mithilfe einer Mischkanalisation, über die Schmutzwasser gemeinsam mit Niederschlagswasser abgeleitet wird, oder durch eine Trennkanalisation mit separaten Kanälen für Schmutz- und Niederschlagswasser (Oelmann et al. 2019, S. 23). In Abhängigkeit der topografischen Gegebenheiten erfolgt der Abwassertransport ggf. mithilfe von Pumpstationen (Druck- oder Unterdruckentwässerungsanlagen). Eine essentielle Aufgabe dieser Wertschöpfungsstufe ist die fachgerechte Steuerung zur Einhaltung der Kapazitätsgrenzen, die regelmäßige Spülung der Rohre zur Vorbeugung von Korrosion und die Instandhaltung des Rohrnetzes (Resch/Schatz 2010).

Nach Einsammlung wird das Schmutzwasser in einer Kläranlage mit speziellen Reinigungsverfahren behandelt. Für die *Abwasserbehandlung* werden mechanisch-physikalische, biologische und chemische Prozesse eingesetzt (dazu und zum Folgenden Thaler 2019, S. 50 ff.). Zunächst erfolgt die Abtrennung von ungelösten partikulären Stoffen im Abwasser durch verschiedene Abscheide- und Sedimentationsprozesse: Nach der Entfernung von Grobstoffen mit Rechen und Sieben durchfließt das Wasser einen Sand- und Fettfang, um



grobe mineralische Bestandteile sowie Öle und Fette zu entfernen. In der darauffolgenden Sedimentation werden feinste mineralische und organische Stoffe am Beckenboden gesammelt und mechanisch entfernt. Um organische Substanzen im Abwasser abzubauen, werden Mikroorganismen wie Bakterien, Pilze oder Protozoen eingesetzt. Durch Sauerstoffzuführung werden die biologischen Prozesse beschleunigt. Die Belebtschlammflocken, die sich aus diesem Prozess gebildet haben, werden aus dem gereinigten Abwasser mechanisch abgetrennt (Nachklärung). Im Anschluss an die biologische Abwasserbehandlung erfolgt die chemische Behandlung. Hier werden Fäll- oder Flockmittel genutzt, um gelöste Inhaltsstoffe, wie z. B. Stickstoff und Phosphor, in einen mit mechanischen Verfahren abtrennbaren Zustand zu überführen. Zusätzliche Reinigungsstufen können eingebaut werden, um Mikroverunreinigungen anthropogener Herkunft zu eliminieren, die sich auch in sehr geringen Konzentrationen toxisch auf Wasserlebewesen auswirken können (vierte Reinigungsstufe). Die Desinfektion von Abwasser ist derzeit wasserrechtlich nicht Stand der Technik.

Das gereinigte Abwasser wird im Anschluss in ein Gewässer *eingeleitet*. Der aus dem Behandlungsprozess entstandene *Klärschlamm* wird ebenfalls behandelt und ggf. zur Energieproduktion verwendet (Thaler 2019, S. 58 f.). Ab 2029 müssen mittlere und große Betreiber (für Anlagen mit Ausbaugröße oberhalb 50.000 Einwohnerwerten) außerdem Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammverbrennungsasche rückgewinnen (§ 3a AbfKlärV⁶⁴). Die Rückgewinnung ist dann erforderlich, wenn der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 g und mehr je kg Trockenmasse aufweist. Es gelten je nach Ausbaugröße unterschiedliche Fristen (Thaler 2019, S. 68).

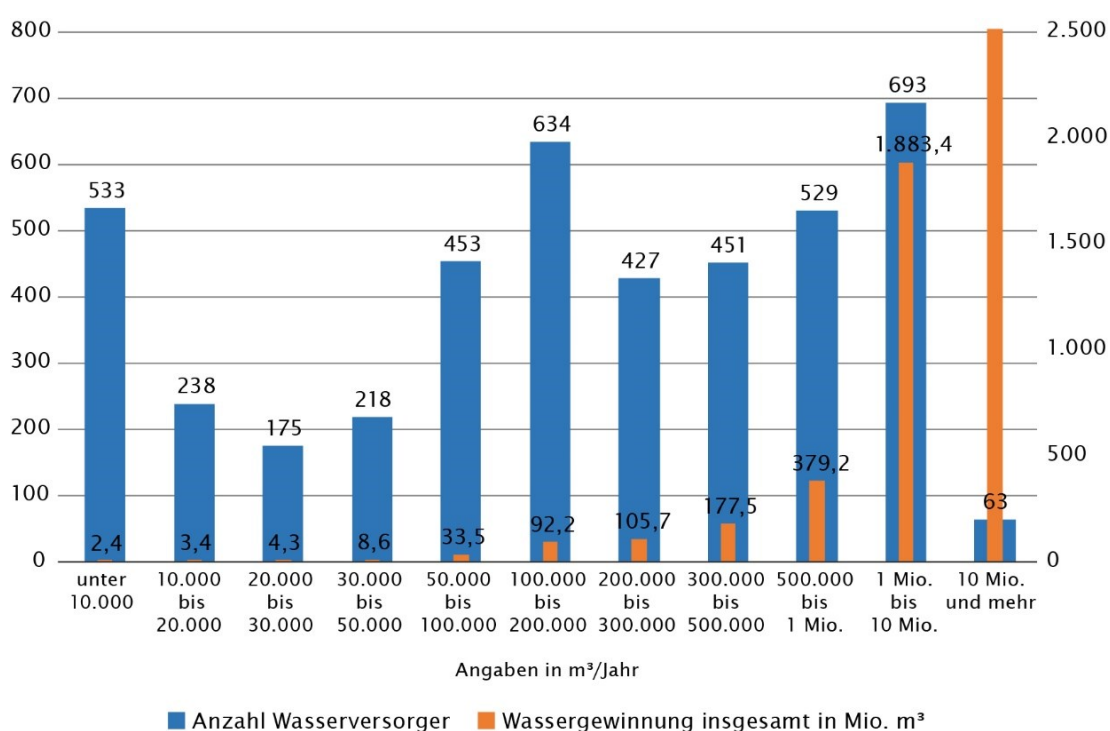
4.1.4 Organisation

Wie in der Abfallwirtschaft (Kap. 3) können Kommunen die öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung selber umsetzen oder auf privatwirtschaftlich organisierte Unternehmen übertragen, wobei die Pflicht immer bei den Kommunen bleibt. Über die Organisationsform sowie die Entgeltgestaltung entscheiden Kommunen bzw. Kommunalvertretende in Verbandsgremien, die für die Unterhaltung der Gewässer zuständig sind. Insgesamt gibt es in Deutschland 5.845 Unternehmen der Wasserversorgung (Statistisches Bundesamt 2018, S.22) und mehr als 6.500 Abwasserentsorgungsbetriebe (ATT et al. 2020, S.24). In Bezug auf die Organisationsform dominieren öffentlich-rechtliche Unternehmen, wozu Regie- und Eigenbetriebe, Anstalten des öffentlichen Rechts, Zweckverbände und Wasserversorgungsverbände zählen (Thaler 2019, S.18 ff.). Im Bereich der Wasserwirtschaft waren 2016 in Deutschland rund 250.000 Personen beschäftigt (Thaler 2019, S.25). Sowohl die Wasserversor-

⁶⁴ Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost vom 27.9.2017, zuletzt am 19.6.2020 geändert

gung als auch die Abwasserbeseitigung wird in Deutschland von einer großen Zahl kleiner Unternehmen bestritten, die jeweils einen nur sehr geringen Anteil zum Gesamtwasseraufkommen bzw. zur insgesamt behandelten Abwassermenge beitragen (Thaler 2019, S.27). Exemplarisch für den Bereich der Wasserversorgung zeigt die Abbildung 4.1 die Größenstruktur der insgesamt 4.414 Wasserversorgungsunternehmen mit eigener Wassergewinnung in Abhängigkeit der Höhe der Wassergewinnung.

Abb. 4.1 Wassergewinnung durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen nach Größenklassen der betrieblichen Wassergewinnung



Eigene Darstellung auf Grundlage von Daten des Statistisches Bundesamts 2019

4.1.5 Aktuelle Herausforderungen

Die Vision der digitalisierten Wasserwirtschaft speist sich aus der Suche nach Lösungen für bestehende Herausforderungen, die sich für Unternehmen sowohl der Trinkwasserversorgung als der Abwasserbeseitigung stellen. Welche diese sind, wird im Folgenden beschrieben.



4.1.5.1 Erneuerung der Infrastrukturen

Die Erneuerung der Infrastrukturen stellt Wasserver- und Abwasserentsorger vor große Herausforderungen. In Großstädten sind Kanalisationssysteme zur Entwässerung teils vor über 100 Jahren entstanden (Engelhart et al. 2020, S. 276) und 40 % der Trinkwasserleitungen sind älter als 50 Jahre (Thaler 2019, S. 61 f.). Eine Umfrage von 2016 ergab, dass 75 % der befragten Unternehmen kurz- bis mittelfristig Anpassungen ihrer Entwässerungssysteme infolge zunehmender Starkregenereignisse planen (Statista 2016b). Knapp über die Hälfte verbindet damit mittel- bis langfristig erhebliche Kosten (Statista 2016a). Auch nötige Anpassungen an die Folgen des Klimawandels lösen größere Investitionsbedarfe aus (Bernemann 2019). Zu den hohen Investitionserfordernissen kommen sinkende Einnahmen hinzu. So nehmen der tägliche Pro-Kopf-Verbrauch von Trinkwasser und damit auch die Einnahmen aus der Wasserabgabe tendenziell ab. In den letzten 30 Jahren ist der Wasserverbrauch pro Einwohner/in und Tag um 15 % gesunken (Statista 2023). Dies ist auf den demografischen Wandel, auf Bevölkerungsrückgänge und eine steigende Anzahl an 1-Personen-Haushalten, aber auch auf die vermehrte Nutzung wassereffizienter Haushaltsgeräte zurückzuführen (Oelmann/Czichy 2020, S. 22).

4.1.5.2 Fachkräftemangel

Eine weitere Herausforderung für den Wassersektor betrifft den Fachkräftemangel. Die Wasserwirtschaft ist durch ein hohes Durchschnittsalter der Mitarbeiter/innen gekennzeichnet (Oelmann/Czichy 2020, S. 39). Neue Technologien machen spezifische Kompetenzen der Beschäftigten erforderlich und Unternehmen haben Schwierigkeiten, qualifizierte Nachwuchskräfte zu finden (IFA 2021, S. 16).

4.1.5.3 Wasserverfügbarkeit und Nutzungskonkurrenzen

Die Auswirkungen des Klimawandels in Form von langanhaltenden Dürren, Hitzewellen oder lokalen Starkregenereignissen stellen für die Auslastung der Wasserdargebote Herausforderungen dar (Bundesregierung 2019a, S. 11 f.; Hempel et al. 2021, S. 50 f.). Auch wenn bislang kein flächendeckender Wasserstress in Deutschland herrscht (UBA 2022c), führen Wasserentnahmen infolge des Temperaturanstiegs zu niedrigeren Grundwasserpegeln (Gelati et al. 2020, S. 238).⁶⁵ Außerdem dürften längere Trockenperioden in den kommenden Jahren und Jahrzehnten häufiger eintreten und in manchen Gebieten

⁶⁵ Siehe auch Entwicklung Grundwasserspiegel nach Landkreisen zwischen 1990 und 2021 (Joeres et al. o.J.).

Deutschlands die Nutzungskonkurrenz bedeutsam verschärfen (Kahlenborn et al. 2021, S. 67; Leese et al. 2021, S. 6). Erste Wassernutzungskonflikte entstehen in unterschiedlichen Teilen Deutschlands, so etwa in Hamburg (ZfK 2021) oder bei der Errichtung der neuen Tesla-Fabrik in Brandenburg (Fröhlich 2020). Im Hitzesommer 2018 kam es zu lokalen Einschränkungen der Wasserversorgung (Bundesregierung 2019a, S. 8). Für Trinkwasserversorger macht sich die Zunahme an Trocken- und/oder Hitzeperioden insbesondere auf der Nachfrageseite als Spitzenverbräuche bemerkbar (Oelmann/Czichy 2020, S. 31). Dies ist besonders in solchen Regionen problematisch, in denen die Wasserversorgung bereits angespannt ist und es daher gelegentlich bereits zu Beschränkungen der Wassernutzung gekommen war (Bundesregierung 2019a, S. 11). 2018 waren insbesondere kleine Wasserversorger von den Einschränkungen bei der Wasserversorgung betroffen (DVGW 2020). Vor diesem Hintergrund werden künftig regionale Anpassungen der Wasserspeicher- und -förderkapazitäten notwendig, um Wasserspitzenbedarfe zu decken (IFA 2021, S. 14).

4.1.5.4 Gewässerschutz und Aufrechterhaltung der Trinkwasserqualität

Betreiber müssen Quantität und Qualität der Trinkwasserversorgung jederzeit sicherstellen können. Voraussetzung dafür ist, dass die Beschaffenheit der Trinkwasserressourcen nachhaltig aufrechterhalten wird (UBA 2022e). Herkunft und Pfade stofflicher Einträge in Oberflächengewässer und Grundwasser sind vielfältig und werden sowohl durch punktuelle als auch diffuse Quellen aus Industrie, Landwirtschaft oder Haushalten verursacht.

Drei Entwicklungen belasten die Qualität der natürlichen Trinkwasserressourcen besonders:

- die Zunahme von klimabedingten Extremereignissen (Starkregen, Trocken- und Hitzeperioden),
- der anhaltend hohe Eintrag von Stickstoffverbindungen sowie
- die zunehmende Verunreinigung mit Spurenstoffen.

Zunahme von Starkregenereignissen, Trocken- und Hitzeperioden

Bei heftigem Starkregen können lokal Schadstoffe in die Gewässer gelangen. Insbesondere in dicht bebauten und versiegelten Städten bringen Starkregenereignisse die abwasserwirtschaftliche Infrastruktur regelmäßig an ihre Belastungsgrenzen (Oelmann/Czichy 2020, S. 36). Dies gilt insbesondere in Kommunen mit Mischkanalisationssystemen, wo Regen- und Schmutzwasser im selben Kanal abgeleitet wird. Reichen die Kapazitäten von Regenüberlauf-, -rückhalte- und -klärbecken nicht aus, kann das Schmutz- und Niederschlagswasser in den Kläranlagen nicht mehr behandelt werden und gelangt ungereinigt direkt in die



Gewässer (Mischwasserüberlauf) (Geidel et al. 2021, S. 21). In Deutschland tragen Mischwasserüberläufe nach Starkregenereignissen zu einer weniger als guten Qualität von Flüssen bei, denn die in Gewässerökosystemen dadurch entstehenden Konzentrationsspitzen an Schadstoffen können deren Leistungsfähigkeit beeinträchtigen (Leese et al. 2021, S. 6; WISE Freshwater o. J.). Starkregenereignisse treten zwar (noch) vergleichsweise selten auf, verdienen jedoch aufgrund des wirtschaftlichen, ökologischen und gesellschaftlichen Schadensausmaßes besondere Beachtung. Sie erfordern eine Anpassung der Dimensionierung von Anlagen und stellen deren Planung vor neue Herausforderungen (Oelmann/Czichy 2020, S. 36).

In Trockenperioden können Oberflächengewässer durch die Einleitung des behandelten Abwassers bei Niedrigwasserverhältnissen zusätzlich belastet werden, wenn die Konzentration der noch vorhandenen chemischen Substanzen nach Vermischung im Gewässer nicht mehr ausreichend reduziert wird (Kahlenborn et al. 2021, S. 66). Inwieweit sich dies nachteilig auf die Trinkwassergewinnung aus Oberflächengewässern auswirkt, hängt von vielen standortspezifischen Faktoren ab und muss im Einzelfall untersucht werden (UBA 2018). In Phasen großer Trockenheit können außerdem die Abwasserinfrastrukturen infolge der geringeren Durchflüsse im Mischwassersystem mit einem erhöhten Anteil an Feststoffen konfrontiert sein, was zu Ablagerungen im Kanalnetz, Verstopfungen und Verkeimungen führen und Infrastrukturschäden verursachen kann (LAWA 2017, S. 222).

Grundsätzlich führt die klimawandelbedingte Zunahme der Luft- und Bodentemperaturen langfristig zu einem Temperaturanstieg in Oberflächengewässern und im Grundwasser, was sich negativ auf die Wasserqualität auswirken kann. Außerdem begünstigt die Erwärmung die Entwicklung wasserbürtiger Keime in Trinkwasserleitungen (Kahlenborn et al. 2021, S. 66).

Belastung des Grundwassers mit Nitrat

Die zunehmende Belastung von Wasserkörpern mit Nitrat stellt eine besondere Herausforderung für die Gewährleistung der Trinkwasserqualität dar, da eine erhöhte Nitrataufnahme durch den Menschen potentiell krebserregend wirkt (IARC 2010, S. 325). Nitrat kann in menschlichen und tierischen Organismen wieder zu Nitrit reduziert werden, das z. B. bei einer akuten Exposition zu Gesundheitsschäden bei Säuglingen führen kann (UBA 2022b).

2018 wurde der Grenzwert von 50 mg/l Nitrat an rund einem Fünftel aller Messstellen nicht eingehalten (Bundesregierung 2021, S. 204). Dies ist auf den kontinuierlichen Eintrag von Stickstoffverbindungen in die Gewässer durch die Landwirtschaft (etwa zu 50 %), aber auch durch die Industrie und private Haushalte zurückzuführen (UBA 2021). Aber auch Kläranlagen belasten Gewässer mit Nährstoffen, dies allerdings vor allem in Zeiten eines geringen Abflusses



(Geidel et al. 2021, S. 34). Nitrat als auch Nitrit sind aus dem Abwasser zu entfernen.

Gemäß der TrinkwV müssen Wasserversorger einen Nitratgrenzwert von 50 mg/l im Trinkwasser einhalten. Wird dieser Grenzwert überschritten, ist der Wasserversorger dazu verpflichtet, Maßnahmen zur Reduzierung der Nitratbelastung zu ergreifen. Ein Ansatz sind Kooperationsverträge mit Landwirten, um die Einträge von stickstoffhaltigen Düngemitteln zu reduzieren. Sinkt dadurch die Konzentration nicht in ausreichendem Maße, kann das belastete Wasser mit weniger belastetem Rohwasser vermischt werden (UBA 2022b). Reicht auch dies nicht aus, pachten Wasserversorger die betroffenen Flächen selbst oder verlagern Brunnen. Ohne Stabilisierung der Einträge ist mit erhöhten Trinkwasseraufbereitungskosten zu rechnen (Geidel 2021, S. 38). Die Entfernung von Stickstoffverbindungen ist derzeit bereits mit steigenden Kosten verbunden (Sundermann et al. 2020).

Mikroverunreinigungen

Mikroverunreinigungen – auch Spurenstoffe genannt – werden zunehmend in Gewässern nachgewiesen. Dabei handelt es sich um Rückstände von Arzneimitteln, Pflanzenschutzmitteln, Bioziden und anderen Chemikalien (Ahting et al. 2018). Problematisch sind solche Stoffe, wenn sie einerseits schwer abbaubar sind und andererseits eine hohe öko- und humantoxikologische Schadwirkung aufweisen (Oelmann/Czichy 2020, S. 35) bzw. schon in geringen Konzentrationen schädliche Wirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit haben. Auch wenn Wissenslücken zu den Auswirkungen beispielsweise von Arzneimitteln auf Gesundheit und Umwelt bestehen, ist besondere Wachsamkeit bei Risikogruppen wie dem ungeborenen Leben, Kleinkindern, Heranwachsenden sowie älteren Menschen geboten (TAB 2019, S. 11). Chemikalien, die bereits in kleinsten Mengen hormonähnliche Wirkungen aufweisen, stellen für Abwasserunternehmen ein Problem dar, weil deren Monitoring den Einsatz von vielen verschiedenen Analyseverfahren erfordert (Fuchs et al. 2020, S. 30). Derzeit umfasst das gesetzlich geforderte Monitoring nur einen Bruchteil der chemischen Stoffvielfalt und potenziellen Erreger. Die 2020 novellierte Trinkwasserrichtlinie (Neufassung) sieht allerdings eine strengere Regulierung und Überwachung von Mikroverunreinigungen vor. Insbesondere zu Mikroplastik und Stoffen mit endokriner Wirkung wurden neue bzw. strengere Grenzwerte festgelegt. Darüber hinaus soll eine risikobasierte Bewertung von Gefährdungen entlang der Versorgungsketten von der Entnahmestelle bis zum Hahn verpflichtend durch die Wasserversorger vorgenommen werden. Die Umsetzung der novellierten TrinkwV ins deutsche Recht steht noch aus (Stand Januar 2023) (BMG 2020). Im Rahmen des Spurenstoffdialogs des Bundes (UBA 2022f) wurde ein Orientierungsrahmen zur Überprüfung einer weitergehenden



Abwasserbehandlung zur Spurenstoffreduktion entwickelt (BMU/UBA 2019). Diese Konzeption soll vom 2021 gegründeten Spurenstoffzentrum des Bundes weiterentwickelt und den Bundesländern Hinweise zur Anwendung gegeben werden (UBA 2022g).

4.1.5.5 Energieeffizienz

Die Wasserwirtschaft zählt zu den größten kommunalen Energieverbrauchern (Oelmann/Czichy 2020, S. 38). In Deutschland verbrauchen Trinkwasserversorger und Abwasserentsorger jährlich 6,6 TWh Strom (dies entspricht dem Stromverbrauch von rund 2 Mio. 2-Personen-Haushalten), was mit jährlichen Kosten von ca. 1,5 Mrd. Euro verbunden ist (DWA 2018c, S. 1). Neue Anforderungen an die Abwasserbehandlung (z. B. die Elimination von Spurenstoffen und die Klärschlamm Entsorgung) dürften den Stromverbrauch künftig noch erhöhen (DWA 2018c). Umso wichtiger ist die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, wovon Energieeinsparungen von bis zu 25 % erwartet werden (BMWK 2014). Zugleich erzeugen einige Kläranlagen mit durch Faulung gewonnenen Klärgas Strom für den Eigenverbrauch. Um zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft (UBA 2023) beizutragen, bemühen sich Wasserbetriebe, Energieeinsparung und -effizienz voranzutreiben und gleichzeitig den Anteil eigenerzeugter Energie weiter auszubauen (Oelmann/Czichy 2020, S. 38). Für die Erreichung des europäischen Klimaneutralitätsziels bis 2050 wird die Abwasserbehandlung als eine zentrale Herausforderung angesehen (EK 2020b, S. 3).

4.2 Digitalisierung der Wasserwirtschaft: technischer Stand und Entwicklungstrends

Eine erste digitale Transformation der Wasserwirtschaft begann bereits vor über 40 Jahren. In den 1980er Jahren wurden erstmals Computermodelle zur numerisch-physikalischen Berechnung von Wassersystemen eingesetzt. In der betrieblichen Praxis fanden digitale Lösungen durch die Einbindung von Feldsensoren in betriebliche IT-Systeme und den Einsatz von Elektronik für die Anlagensteuerung immer stärker Einzug (Vestner/Keilholz 2016, S. 1 f.). Die rasche Weiterentwicklung von Hard- und Software führte in den letzten Jahren dazu, dass selbst einfache Steuerungen günstiger mit Digitaltechnik zu verwirklichen sind als mit herkömmlicher Relais-technik. Mittlerweile setzen die meisten Betreiber in weiten Teilen ihrer Anlagen Automatisierungstechnik ein (Urban/Mosbach 2020, S. 217), wobei Soll- und Grenzwerte vorgegeben sind und Abweichungen durch Warn- und Störmeldungen an das Betriebspersonal weitergegeben werden (Rautenberg 2019b, S. 859). Die Automatisierungstechnik größerer Anlagen (z. B. Klärwerke), aber auch von räumlich verteilten Anlagen

(z. B. Pumpwerke, Aufbereitungsanlagen) ist häufig über Prozessleit- und Fernwirktechnik mit einer zentralen Leitstelle verbunden, in der die Anlagen und Prozesse visualisiert und durch das Betriebspersonal überwacht werden können. Von der Leitstelle aus sind auch Eingriffe in die Steuerung möglich (teilautomatisierter Betrieb), etwa wenn auf Warn- oder Störmeldungen reagiert werden muss oder für die Durchführung von Betriebs- und Instandhaltungsarbeiten (Oelmann/Czichy 2020, S. 78; Rautenberg 2019b, S. 859).

Aufbauend auf die vorhandenen Prozessleit- und Automatisierungstechnik findet derzeit eine weitere digitale Transformation in der Wasserwirtschaft statt. Damit verbunden ist – in Analogie zu *Industrie 4.0* – die Vision einer *Wasserwirtschaft 4.0*, die eine über die Digitalisierung von Einzelanwendungen hinausgehende, umfassend vernetzte Wasserwirtschaft auf der Grundlage digitaler Technologien beschreibt. Die Grundlage dafür bildet die Vernetzung und Integration bisher getrennter IKT-Komponenten, Ressourcen, Anlagen, Wertschöpfungsketten, Unternehmensbereiche oder Organisationen (Hempel et al. 2021, S. 26 f.; Oelmann/Czichy 2020, S. 43). Anhand der digitalen Transformation soll perspektivisch die Wettbewerbsfähigkeit der Wasserwirtschaftsunternehmen ausgebaut und wachsenden Herausforderungen wie zunehmende Extremwetterereignisse oder auch strukturellen und demografischen Veränderungen betriebswirtschaftlich sinnvoll begegnet werden, u. a. durch Einsparung von Ressourcen wie Personal oder Betriebsmittel (Wasser, Energie) (Hempel et al. 2021, S. 22 ff.; Holländer et al. 2019; Valentin/Urban 2020, S. 217). Darüber hinaus werden digitalen Anwendungen Umweltentlastungspotenziale zugesprochen, wie beispielsweise im Bereich der Kontrolle von Stoffeinträgen in Gewässer (Holländer et al. 2019, S. 95).

Der Weg zu einer Wasserwirtschaft 4.0 ist allerdings noch weit. Wie im folgenden Kapitel gezeigt wird, wurden mittlerweile zwar zahlreiche innovative digitale Technologien für die Wasserwirtschaft entwickelt und marktreif bzw. als einsatzbereite Prototypen verfügbar, allerdings handelt es sich dabei meist noch um Einzelanwendungen, die dem Anspruch einer umfassenden digitalen Vernetzung und Integration noch nicht gerecht werden. Darüber hinaus hat die Verbreitung solcher Innovationen in die Praxis gerade erst begonnen. Treiber für die Diffusion sind in erster Linie einzelne innovative Unternehmen, die aufgrund ihrer Größe über die nötigen finanziellen und personellen Ressourcen zur Erprobung und Einführung neuer digitaler Technologien verfügen. Generell aber zeichnet sich die deutsche Wasserwirtschaft im Vergleich zu anderen Wirtschaftssektoren stärker durch Kontinuität als durch digitale Innovationsbereitschaft aus (Kasten 4.2). In der Folge kann in Bezug auf die Adaption von Innovationen eher eine abwartende Haltung festgestellt werden, die sich durch ein langsames Herantasten an neue digitale Möglichkeiten, welche sich in anderen Branchen bereits etabliert haben, charakterisieren lässt (Oelmann/Czichy 2020, S. 19).



Eine empirische Untersuchung, die den Diffusionsstand digitaler Technologien in der Wasserwirtschaft auch vor dem Hintergrund der stark differenzierten Größen- und Organisationsstruktur des Sektors umfassend erhoben hat, existiert bisher jedoch nicht. Die folgenden Ausführungen erheben daher nicht den Anspruch, den Verbreitungsgrad einzelner digitaler Technologien abzuschätzen oder den Status quo der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft zu bestimmen. Vielmehr werden relevante digitalen Innovationen aufgezeigt, die vor dem Hintergrund einer umfassenden systemtechnischen Verknüpfung im Sinne einer Wasserwirtschaft 4.0 besondere Relevanz haben.

Die Darstellung der digitalen Innovationen erfolgt nach folgender Logik: In Kapitel 4.2.1 werden zunächst der Aufbau und die Funktionen der Automatisierungs- und Prozessleittechnik erläutert, die als Ausgangspunkt für viele Digitalisierungsanwendungen dient. Weil Daten die Grundlage jeder Digitalisierungslösung sind, wird sich in den folgenden Kapiteln mit neuen technischen Entwicklungen in den Bereichen der Datenaufnahme durch Sensorik (Kap. 4.2.2), der Datenübertragung (Kap. 4.2.3) sowie der Datenspeicherung und -verarbeitung (Kap. 4.2.4) befasst. Die Kapitel 4.2.5 und 4.2.6 zeigen schließlich Möglichkeiten, die sich aus dem Einsatz leistungsstarker Datenanalyseverfahren sowie durch die Verknüpfung von bereichs- und unternehmensübergreifenden Datenbeständen ergeben. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt auf der technischen Perspektive, während Anwendungsfelder und Potenziale digitaler Innovationen für die verschiedenen Wertschöpfungsstufen der Wasserwirtschaft in Kapitel 4.3 vertieft behandelt werden.

Kasten 4.2 Digitale Innovationsbereitschaft der Wasserwirtschaft

Die Wasserwirtschaft in Deutschland zeichnet sich durch eine große Vielfalt an Betrieben unterschiedlicher Größe und Organisationsformen aus (Kap. 4.1.5). Neben wenigen großen (mit mehreren hundert Mitarbeiter/innen) und einigen mittleren Betrieben (mit mehr als 50 Beschäftigten) existiert aufgrund der in Deutschland fest verankerten kommunalen Selbstverwaltung eine sehr große Zahl an kleinen und Kleinstunternehmen, die teilweise nur eine Handvoll an Mitarbeiter/innen beschäftigen. Diese kleinen Betriebe sind überwiegend als Regie- oder Eigenbetriebe der Kommunen oder im Rahmen von interkommunalen Kooperationen als Zweckverbände organisiert und nicht selten fungiert hier der/die Bürgermeister/in als Geschäftsführer/in bzw. als Verbandsvorsitzende/r. Während innovative mittlere und große Unternehmen teilweise begonnen haben, die Adaption von digitalen Lösungen in allen Unternehmensbereichen zu fördern und dafür



vereinzelt auch eigene Kompetenzzentren aufgebaut haben⁶⁶, halten kleine Unternehmen meist noch am Einsatz von langjährig bewährter Technik fest. So verfügen viele Betreiber gar nicht über die finanziellen und personellen Ressourcen, um digitale Innovationen, die bei größeren Unternehmen bereits als etabliert gelten können, eigenständig zu erproben und einzuführen. Außerdem erzeugen digitale Lösungen für kleinere Unternehmen mitunter auch gar keinen betrieblichen Mehrwert. Schließlich sind Betreiber der Wasserwirtschaft infolge ihrer besonderen Stellung als Einrichtungen der kommunalen Daseinsvorsorge keinem direkten Wettbewerbsdruck ausgesetzt. Mangelnde Effizienzbemühungen durch Digitalisierungslösungen bleiben in der Wasserwirtschaft daher meist ohne Folgen, während sie für ein im starken Wettbewerb stehendes Unternehmen mitunter existenzbedrohend sein können.

Quellen: Oelmann/Czichy 2020, S. 12 f. u. 44 ff.; Thaler 2019, S. 18 ff.

4.2.1 Automatisierungs- und Prozessleittechnik

An die Prozessführung von wasserwirtschaftlichen Anlagen werden viele Anforderungen gestellt (z. B. effiziente Wassernutzung, Sicherstellung der Wasserqualität und Versorgungssicherheit, wirtschaftlicher Betriebsablauf). Die Erfüllung dieser Anforderungen setzt ein optimales Zusammenwirken aller, in der Wasserwirtschaft oft auch räumlich weit verteilten technischen Komponenten in Abhängigkeit der jeweiligen Prozessbedingungen voraus (Weiß 2019b, S. 723). Für diese Aufgabe setzen heute die meisten Betreiber in weiten Teilen ihrer Anlagen IT-basierte Automatisierungs- und Prozessleittechnik ein (Urban/Mosbach 2020, S. 217). Automatisierungstechnik ersetzt die zum Zweck der Prozessführung früher eingesetzte Relais-technik durch signalverarbeitende, programmierbare Komponenten. Prozessleitsysteme verknüpfen die Automatisierungstechnik einzelner Aggregate auch über räumlich verteilte Anlagen zu einem Netzwerk und ermöglichen so eine übergreifende Überwachung und Steuerung der wasserwirtschaftlichen Prozesse in zentralen Leitwarten (Hempel et al. 2021, S. 55 f.).

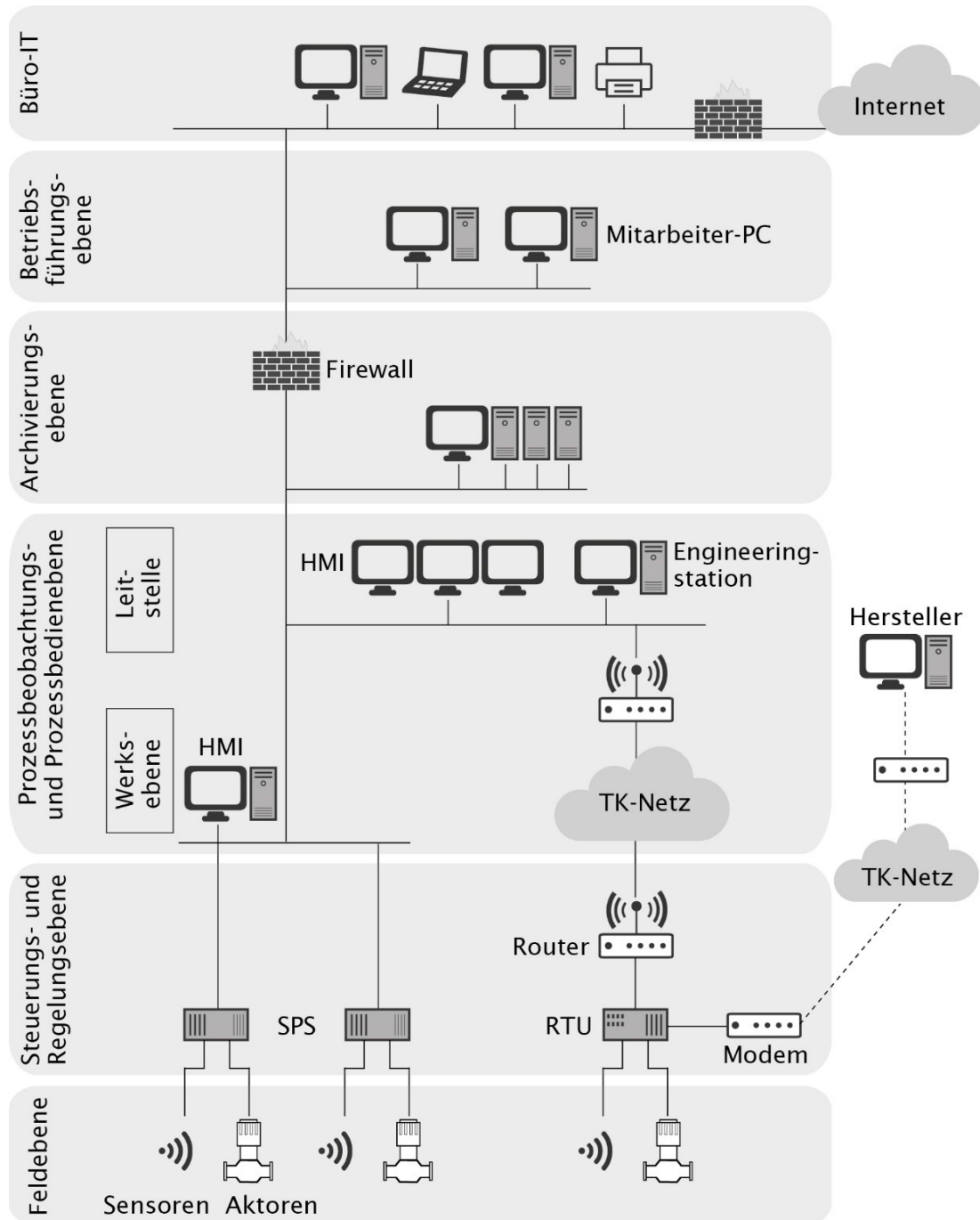
Aufbau und Funktionen von Automatisierungs- und Prozessleittechnik

Die Automatisierungs- und Prozessleittechnik fügt sich in die IT-Infrastruktur der wasserwirtschaftlichen Betriebe ein (Abb. 4.2).

⁶⁶ Beispiele sind das Center of Excellence Digitalisierung der Berliner Wasserbetriebe oder das Core-Team des Wasserwirtschaftsverbands Emschergenossenschaft und Lippeverband. Diese Kompetenzzentren sollen als Think Tanks und Labore zur Umsetzung der digitalen Transformation in Unternehmen die Transformation hin zu einer Wasserwirtschaft 4.0 fördern (Hempel et al. 2021, S. 43).



Abb. 4.2 Architektur der IT-Infrastruktur von wasserwirtschaftlichen Betrieben



Eigene Darstellung in Anlehnung an Hassanzadeh et al. 2020, S. 2; Malatji 2022, S. 3



Deren Aufgaben und Komponenten sind dabei verschiedenen Ebenen zugeordnet (dazu und zum Folgenden DWA 2011, S. 13 ff.; Hempel et al. 2021, S. 55 ff.)⁶⁷:

- *Feldebene*: Die unmittelbar an die wasserwirtschaftlichen Prozesse angebundene Feldebene umfasst die Sensoren für die Prozessdatenerfassung (z. B. Durchflussmessgeräte, Füllstandsensoren) sowie die Aktoren für die unmittelbare Prozesssteuerung (z. B. Antriebe für Pumpen, Ventile, Schieber).
- *Steuerungs- und Regelungsebene*: Die Steuerungs- und Regelungsaufgaben werden eine Ebene höher bearbeitet. Für diese Aufgaben werden speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) (Abb. 4.3), Fernwirkgeräte (Remote Terminal Unit – RTU) oder andere signalverarbeitende Komponenten eingesetzt. Die Geräte legen anhand eines festgelegten Ablaufprogramms die Stellsignale für die Aktoren in Abhängigkeit der Messsignale aus den Sensoren fest (z. B. das Ein- und Ausschalten von Pumpen in Abhängigkeit des Füllstands eines Hochbehälters). Sie verfügen, wenn überhaupt, nur über rudimentäre Anzeige- und Bedienelemente, da die Prozessüberwachung und -steuerung in der Regel der nächst höheren Ebene zugeordnet sind. Die Programmierung der SPS erfolgt über mobile Geräte (Laptops mit Spezialsoftware), an speziellen Computerarbeitsplätzen in höheren Ebenen (Engineeringstationen) oder über Fernzugriffe durch Hersteller oder Dienstleister (BSI 2022e, S. 1).
- *Prozessbeobachtungs- und Prozessbedienungsebene*: In dieser Ebene findet die Interaktion zwischen Betriebspersonal und Prozess statt, sie wird deshalb auch Human-Machine-Interface(HMI)-Ebene genannt. An Computerarbeitsplätzen bzw. HMI beobachtet und bedient das Betriebspersonal die wasserwirtschaftlichen Prozesse. Dazu werden Anlagen, Prozesse und wichtigste Prozessinformationen als Prozessbilder auf Bildschirmen visualisiert. Warn- oder Störmeldungen weisen das Personal auf unerwartete Prozesszustände hin, die manuelle Eingriffe in die automatisierte Anlagensteuerung verlangen. Auch die Programmierung der SPS kann über Engineeringstationen von hier aus erfolgen. Als Geräte kommen PCs und Server mit Spezialsoftware (z. B. Supervisory-Control-and-Data-Acquisition[SCADA]-Software) zum Einsatz. Die Arbeitsplätze der Prozessbeobachtungs- und -bedienungsebene können in Abhängigkeit der Betriebsstruktur für einzelne Anlagen, auf Werksebene oder werksübergreifend in einer zentralen Leitstelle (Abb. 4.4) eingerichtet werden. Moderne Systeme ermöglichen auch einen Fernzugriff über das Internet, wobei sich Mitarbeiter/innen die Bedienober-

67 Für die Zuordnung der Ebenen der Prozessleit- und Automatisierungstechnik existieren unterschiedliche Definitionen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die Definition in DWA (2011).



fläche z. B. über einen Webbrowser auf einem beliebigen PC oder auf mobilen Endgeräten anzeigen lassen können.

- *Archivierungsebene:* Hier werden wichtige Prozessdaten gesammelt und gespeichert. Aufgrund der hohen Datenmengen werden Prozessdaten nicht kontinuierlich, sondern in der Regel nur in regelmäßigen Zeitintervallen (z. B. stündlich) und ggf. verdichtet (z. B. als Mittelwerte, Summenwerte, Min./Max.-Werte) archiviert (DWA 2017b, S. 21). Die aggregierten Prozessdaten werden beispielsweise für die Darstellung historischer Verläufe, für Plausibilitätskontrollen, für Simulations- und Prognoseaufgaben oder zur Erfüllung geschäftlicher oder gesetzlicher Dokumentationspflichten genutzt (Weiß 2019b, S. 723). Im Meldungsarchiv werden zudem Steuerbefehle, Betriebs-, Stör- und Systemmeldungen gespeichert (DWA 2017b, S. 30).

Abb. 4.3 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)



Für SPS gibt es vielfältige Realisierungen, als Baugruppe (Abbildung), Einzelgerät oder PC-Einsetzkarte (BSI 2022e).

Quelle: surasakib99/123RF

Über den Ebenen der Automatisierungs- und Prozessleittechnik ist die *Betriebsführungsebene* angesiedelt. In dieser Ebene werden betriebsnahe Aufgaben ausgeführt, z. B. die Einsatzplanung, die Lagerverwaltung, das Lieferantenmanagement oder die Geräte- und Anlagenverwaltung. Hard- und softwaretechnisch

kommen handelsübliche Büro-IT-Produkte zur Anwendung. Die Aufgaben verlangen meist eine Anbindung an das Internet sowie an weitere Büro-IT-Systeme der Unternehmensverwaltung (z.B. Personalwirtschaft, Finanz- und Rechnungswesen) oder des Kundenmanagements (Kundenservice, Abrechnungswesen). Daher sind die IT-Systeme dieser Ebene an das Büro-IT-Netzwerk angebunden und somit nicht mehr im engeren Sinne Teil der Automatisierungs- und Prozessleittechnik (Leps 2018a, S. 35). Aus Gründen der Informationssicherheit werden die Netze der Automatisierungs- und Prozessleittechnik sowie der Büro-IT physisch oder durch den Einsatz von Firewalls logisch voneinander getrennt (Kap. 5.1.1.2).

Abb. 4.4 Zentrale Leitstelle für die Überwachung und Steuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen



Quelle: Hessenwasser GmbH & Co. KG

Zwischen den verschiedenen Ebenen der Automatisierungs- und Prozessleittechnik findet ein Informationsaustausch statt, für den je nach Anforderungen (z.B. Verfügbarkeit, Echtzeitfähigkeit) unterschiedliche Übertragungsverfahren und -wege eingesetzt werden. Bei den Übertragungsverfahren haben für die Anbindung der Feldgeräte an die Geräte der Steuerungs- und Regelungsebene digitale Feldbusse die analoge Signalübertragung meist abgelöst (DWA 2011, S. 19 ff.). Für die Datenübertragung zwischen der Steuerungs- und Regelungsebene zu den höheren Ebenen sowie die Vernetzung innerhalb dieser Ebenen setzen sich bereits seit 10 Jahren Übertragungsprotokolle auf Basis des offenen Ethernet TCP/IP-Standards gegenüber herstellerspezifischen Lösungen immer



stärker durch (z. B. Industrial Ethernet; DWA 2011, S. 20 ff.). In Bezug auf die für die Standortvernetzung genutzten Übertragungswege werden zur Anbindung der verteilten Anlagen (z. B. Brunnen, Hochbehälter) aus Sicherheitsgründen betriebseigene Lösungen bevorzugt (z. B. erdverlegte Kupfer- oder Lichtwellenleiter, eigene Funknetze auf Basis von LoRaWAN). Aus wirtschaftlichen Gründen oder wenn längere Strecken zu überwinden sind, wird häufig auch auf öffentliche Telekommunikationsnetze (TK-Netze) zurückgegriffen (Weiß 2019b, S. 731). Möglichkeiten hierzu bestehen (Treibert et al. 2021, S. 175; Weiß 2019b, S. 731 f.)

- über das Festnetz, z. B. Festverbindungen (früher Standleitungen) als Datendirektverbindung,
- über das Mobilfunknetz, z. B. für bedarfsorientierte oder zyklische Datenübertragungen über Wählverbindungen oder SMS,
- oder über das Internet, z. B. durch die Realisierung von virtuellen privaten Netzwerken (VPN) mit entsprechenden Routern.

Aktuelle Einsatzfelder

Der Einsatz von Automatisierungs- und Prozessleittechnik ist in der Wasserwirtschaft weitgehend etabliert. Bei den meisten Wasserversorgungsunternehmen erfolgt die Anlagensteuerung automatisiert, wobei Soll- und Grenzwerte vorgegeben sind und Abweichungen durch Warn- oder Störmeldungen an das Betriebspersonal weitergegeben werden. Die Überwachung größerer Anlagen erfolgt optimalerweise von einer zentralen Leitstelle aus, von wo das Betriebspersonal auch in die automatisierte Steuerung eingreifen kann (z. B. für die Durchführung von Betriebs- und Instandhaltungsaufgaben). Nur bei kleinen und zum Teil auch bei sehr großen Wasserversorgungsanlagen erfolgt die Anlagensteuerung manuell, wobei das Betriebspersonal auf Grundlage der Beobachtung der Betriebszustände die Anlagen zu- oder abschaltet (Rautenberg 2019b, S. 859). Auch in Bereich der Abwasserentsorgung hat sich die Automatisierungs- und Prozessleittechnik etabliert, sodass heute nahezu jede abwassertechnische Anlage mit einem den Erfordernissen angepasstem Überwachungs- und Steuerungssystem ausgestattet ist (DWA 2017b, S. 3).

Die in der betrieblichen Praxis verwendete Automatisierungs- und Prozessleittechnik ist allerdings in Bezug auf ihren Aufbau und Funktionsumfang sehr heterogen. So zeichnen sich die verbauten technischen Lösungen generell durch eine große Vielfalt an Hard- und Softwarekomponenten unterschiedlicher Hersteller, Architekturen und Generationen aus (BSI 2022g; Leps 2018a, S. 25). Die Installationen sind in Abhängigkeit der jeweiligen betrieblichen Erfordernisse meist durch Ergänzungen und Erneuerungen über Jahrzehnte gewachsen, sodass in einzelnen Unternehmen unterschiedlichste technische Realisierungen im Einsatz stehen (Fauth et al. 2017, S. 48). Weitere Unterschiede bestehen in



Bezug auf den Grad der Einbindung der Anlagen in die Automatisierungs- und Prozessleittechnik. So haben z. B. in mittleren und kleinen Kläranlagen nicht immer alle Verfahrensstufen (z. B. Rechen, Sandfang) oder Aggregate (z. B. Schieber) eine IT-Anbindung und werden trotz vorhandenem Prozessleitsystem vom Betriebspersonal manuell betrieben (Löwen et al. 2023, S. 19 ff.).

Schließlich unterscheidet sich die Nutzung von Automatisierungs- und Prozessleittechnik auch entlang der wasserwirtschaftlichen Wertschöpfungsstufen. So weisen die stärker werksgebundenen Infrastrukturen der Wassergewinnung und -aufbereitung (z. B. Brunnen, Wasseraufbereitungsanlagen) sowie der Abwasserreinigung (Kläranlagen) meist einen höheren Automatisierungsgrad auf als die räumlich verteilten Infrastrukturen der Wasserverteilung und Abwasserableitung. Zwar sind hier wichtige Anlagen wie Hochbehälter oder Pumpwerke mit Automatisierungstechnik ausgestattet und ggf. an ein Prozessleitsystem angeschlossen, dies trifft jedoch seltener auf die in der Fläche verteilten Rohrleitungs- und Kanalnetze zu, deren Ausstattung mit vernetzter Sensorik und Aktorik derzeit noch schwach ausgeprägt ist. So haben Betreiber oftmals nur unzureichende Informationen über das Geschehen im Rohr- und Kanalnetz, sodass sie von einer Schadenssituation zuweilen auch erst durch ihre Kunden erfahren (Oelmann/Czichy 2020, S. 78 f.).

Ausblick

Die Fortschritte bei der IKT üben einen starken Einfluss auf die Automatisierungs- und Prozessleittechnik aus. In den vergangenen Jahren erzielte Weiterentwicklungen betreffen u. a. die Bildschirmtechnologie, die Zugriffsmöglichkeiten durch mobile Endgeräte, die weitgehend entfallenen Speicherplatzbeschränkungen sowie erweiterte Möglichkeiten durch leistungsfähige Software u. a. für verbesserte Darstellungsformen und schnellere Berechnungen (DWA 2017b, S. 3). Künftige Entwicklungen setzen hier an und beinhalten in Verbindung mit Fortschritten in der Sensorik und Datenverarbeitung beispielsweise eine verstärkte Einbindung von Daten unterschiedlicher Formate und aus verschiedenen Quellen (Kamm et al. 2021), den Einsatz fortschrittlicher Datenanalyseverfahren für Prozessoptimierungen (KIT 2021), die Früherkennung und Bewertung von Sicherheitsvorfällen (Barjenbruch et al. 2017, S. 15) oder die Verknüpfung von Steuerungsaufgaben mit Simulations- und Prognosewerkzeugen (Kap. 4.2.5). Weitere Themen betreffen die Reduktion der Kosten für Anschaffung und Inbetriebnahme von Automatisierungs- und Prozessleittechnik, beispielsweise durch modulare Lösungen (Hoernicke et al. 2020), oder die Nutzung von Cloudarchitekturen und -anwendungen (Kap. 4.2.4). Damit bildet die Prozessleit- und Automatisierungstechnik einen wichtigen Ausgangspunkt für zahlreiche digitale Innovationen in der Wasserwirtschaft.

4.2.2 Sensorik

Sensoren liefern die für die Überwachung und Steuerung der Anlagen und Prozesse notwendigen Echtzeitdaten der Betriebszustände. Die kontinuierliche Messung von physikalischen und chemischen Parametern wie Druck, Durchflussmenge, Wasserstand, Temperatur, pH-Wert oder Energieverbrauch bilden die Grundlage für eine verfahrenstechnische und wirtschaftliche Optimierung des Betriebs (DWA 2020, S. 8; Rautenberg 2019b, S. 859). Durch die Digitalisierung hat die Messtechnik in den letzten Jahren wesentliche Fortschritte erzielt. Dies betrifft die Signalverarbeitung, aber auch die Miniaturisierung und generell Leistungssteigerungen bei den Mikroprozessoren, die neben Funktionserweiterungen auch eine zunehmende Verlagerung der Datenverarbeitung in die Sensoren erlauben (DWA 2020, S. 3). Eine breite Anwendung von Sensoren in Verbindung mit Prozessleit- und Automatisierungstechnik hat eine Reihe von betrieblichen Vorteilen, u. a. (vgl. DWA 2018d, S. 13):

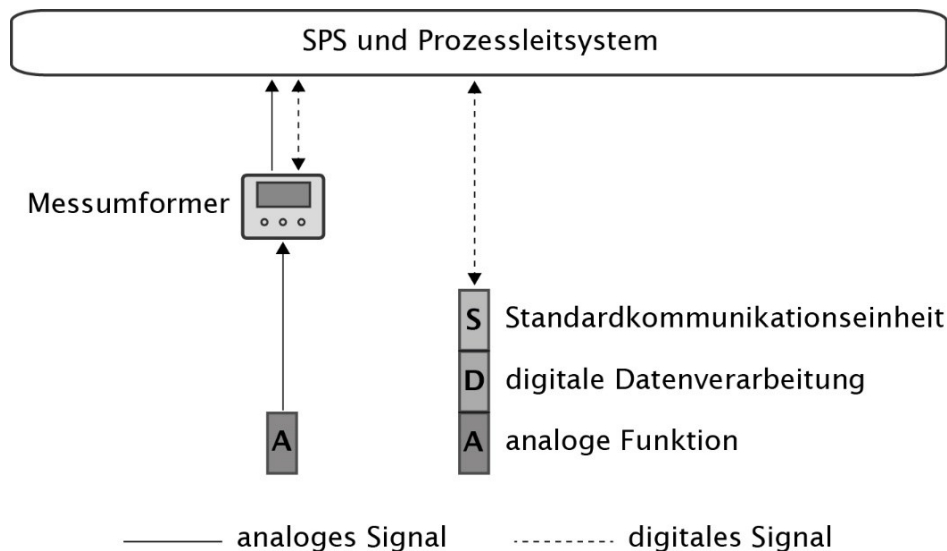
- der Arbeitsaufwand für die erforderlichen Messungen wird reduziert;
- die Transparenz der Wasserbeschaffenheit und von Teilprozessen der Wasserversorgung und Abwasserbehandlung wird erhöht;
- die Kontrolle und Dokumentation der Reinigungsleistung einzelner Prozessschritte der Wasseraufbereitung bzw. Abwasserbehandlung wird erleichtert, allfällige Störungen im Betriebsablauf werden schneller erkannt;
- die Datengrundlage für gezielte Prozesseingriffe mit dem Ziel eines effizienten und ressourcenschonenden Mitteleinsatzes wird erweitert;
- Grundlagendaten für weitergehende Analysen und Vorhersagen werden erzeugt (z. B. für Simulationen).

Digitale Sensoren

Die Grundlage aller analogen oder digitalen Sensoren bildet ein, je nach Messgröße, elektrochemischer oder optischer Messwertaufnehmer, der ein elektrisches Signal (z. B. Strom, Spannung, Frequenz) erzeugt, dessen Stärke mit der Quantität der Messgröße in Zusammenhang steht (dazu und zum Folgenden DWA 2020, S. 15 ff.). Bei analogen Sensoren wird dieses Signal zu einem sensorspezifischen Messumformer übertragen und dort zu einem Einheitssignal mit definiertem Wertebereich umgeformt. Dieses Einheitssignal wird angezeigt und in analoger oder digitaler Form an die Steuerungs- und Regelungsebene der Prozessleit- und Automatisierungstechnik weitergeleitet (Abb. 4.5 links).

In digitalen Sensoren wird die primär analoge Funktion des Messwertaufnehmers um eine digitale Datenverarbeitung sowie eine Standardkommunikationseinrichtung ergänzt (Abb. 4.5 rechts). Dies ermöglicht eine digitale Datenübertragung ab dem Sensor und eine direkte Anbindung an die Prozessleit- und Automatisierungstechnik. Die grundlegenden Vorteile bestehen darin, dass die

Abb. 4.5 Analoge versus digitale Sensoren



Eigene Darstellung in Anlehnung an DWA 2020, S. 15

digitale Datenübertragung gegenüber äußeren Störungen resistenter ist und sensorspezifische Fehler (z. B. Nullpunktfehler, Drift) bereits im Sensor kompensiert werden können. Immer kleinere und leistungsfähigere Mikroprozessoren ermöglichen sehr kompakte hochfunktionale digitale Sensoren. Diese intelligenten oder smarten Sensoren bieten erweiterte Funktionalitäten, z. B. (DWA 2020, S. 16):

- > Speicherung von Sensorkennndaten (z. B. Kalibrierdaten),
- > automatische Sensordiagnose,
- > Plausibilitätsprüfung der Messwerte,
- > Erkennung von Fehlern bei der Datenübertragung,
- > Alarm- und Warnmeldefunktionen,
- > automatisierte Sensoridentifikation und Parametrisierung,
- > Datenanalysen (z. B. Kennzahlenermittlung).

Schließlich bilden digitale Sensoren mit intelligenten Funktionen in Verbindung mit internetbasierten Übertragungstechniken und cloudbasierten Datenverarbeitungsinfrastrukturen die Basis für Anwendungen im IoT-Bereich (Caradot/Schäfer 2022, S. 21).

Sensorsysteme für die Prozessüberwachung und -steuerung

Echtzeitfähige Sensorsysteme für die Prozessüberwachung und -steuerung kommen heute vor allem in den Anlagen der Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung zum Einsatz. In den Wasserwerken der Trinkwasseraufbereitung



weitgehend etabliert sind Sensorsysteme zur Messung von Temperatur, pH-Wert, Trübung und elektrische Leitfähigkeit. Eine wichtige Größe ist vor allem der pH-Wert, über den die Mitteldosierung (z. B. Flockungsmittel, Natronlauge) geregelt wird. Die Wasserdeseinfektion mit chlorhaltigen Mitteln wird häufig auf Basis von Messdaten von Chlor- bzw. Chlordioxidsensoren gesteuert, für eine Ozonung werden Ozonmessgeräte genutzt. Zur Aufbereitung von Oberflächenwasser wird in der Regel der spektrale Absorptionskoeffizient (SAK) gemessen, um Wasserverunreinigungen durch organische Verbindungen beurteilen zu können (Schmidt/Wagner 2016, S. 59). Für die Überwachung und Steuerung der Reinigungsprozesse in Kläranlagen spielen darüber hinaus Sensorsysteme zur Erfassung von Stickstoff- und Phosphorverbindungen sowie der organischen Kohlenstoffbelastung eine wichtige Rolle (DWA 2018d).

Im Vergleich dazu ist der Ausstattungsgrad mit Sensortechnik für Echtzeitmessungen in den Bereichen Wasserverteilung (Leitungsnetz, Hochbehälter) und Abwasserableitung (Kanalnetz) geringer (Schmidt/Wagner 2016, S. 60). Beispielsweise wird anhand von Durchflusssensoren zwar die Wassermenge gemessen, die am Ausgang des Wasserwerks in das Verteilnetz eingespeist wird, im Leitungsnetz selber werden weitere kontinuierliche Messungen der Wassermenge jedoch allenfalls an ausgewählten Stellen vorgenommen (Oelmann/Czichy 2020, S. 26). Eine Ausnahme bilden Fernwasserversorgungssysteme, bei denen im Schadensfall große austretenden Wassermengen ein wesentliches Gefährdungspotenzial bilden und die daher weitergehende Überwachungskonzepte mit verteilten Messsystemen erforderlich machen (Rautenberg 2019b, S. 860 f.).

Weiterentwicklungen im Bereich der Sensortechnik betreffen u. a. die Robustheit der Systeme, die in der Wasserwirtschaft häufig unter schwierigen Bedingungen (z. B. hohe Drücke, Verschmutzungen) zuverlässig und möglichst wartungsarm funktionieren müssen. Ein Beispiel ist die Entwicklung von Trübheitssensoren, die durch den Einsatz von Laser- und Kamertechnik ohne direkten Wasserkontakt arbeiten (Caradot/Schäfer 2022, S. 23). Außerdem sollen die Messwerte vieler Sensoren künftig verstärkt zusammengeführt und integriert ausgewertet werden, woraus sich neue Anwendungsfelder für eine bessere Nutzung von Sensordaten in der betrieblichen Praxis ergeben.

Sensorsysteme für die Überwachung der Wasserqualität

Die zuvor genannten Sensorsysteme für physikalische und chemische Parameter werden nicht nur für Aufgaben der Prozessüberwachung und -steuerung, sondern auch für die kontinuierliche Überwachung der Wasserqualität eingesetzt. Allerdings können Messparameter wie pH-Wert, Trübung oder elektrische Leitfähigkeit allenfalls indirekt auf humantoxikologische oder mikrobiologische Wasserverunreinigungen hinweisen (Schmidt/Wagner 2016, S. 59 f.).



Die Untersuchung der Wasserbeschaffenheit auf anorganische oder organische Verbindungen bis in den Spurenbereich (z. B. Belastungen mit Rückständen von Pflanzenschutzmitteln, Arzneimitteln oder Industriechemikalien) sowie von biologischen und mikrobiologischen Parametern (z. B. bakterielle Krankheitserreger) erfolgt aktuell im Rahmen der Analyse von Wasserproben in betriebseigenen oder speziellen Labors (Wricke 2019, S. 366). Zwar zeichnet sich Labormesstechnik durch hohe Nachweisempfindlichkeiten aus, die Analyseverfahren (z. B. Massenspektrometrie, Kulturverfahren, molekularbiologische Verfahren) sind aber apparativ oft anspruchsvoll und zeitintensiv in der Durchführung (Leese et al. 2021, S. 13). Messungen in (quasi) Echtzeit sind damit nicht möglich.

An der Entwicklung und Verbesserung von echtzeitfähigen Sensorsystemen für chemische Spurenstoffe sowie biologische und mikrobiologische Parameter wird intensiv gearbeitet und erste Sensorsysteme stehen auch bereits kommerziell zur Verfügung (Favere et al. 2021). Ein routinemäßiger Einsatz in der Wasserwirtschaft findet jedoch noch nicht statt. Wesentliche Herausforderungen bestehen darin, die hohen Empfindlichkeiten von laborbasierten Analyseverfahren zu erreichen, außerdem müssen die Sensorsysteme praxistauglich, wartungsarm und robust sein, um auch unter schwierigen Einsatzbedingungen (z. B. hoher Wasserdruck, Verunreinigungen, wechselnde Temperaturen) zuverlässige Messwerte liefern zu können. Einige Beispiele für Innovationen in diesem Bereich sind:

- Das Sensorsystem WATERTRACE zur Messung organischer Komponenten in einer Wasserprobe wurde in einem durch das BMWi geförderten Projekt zwischen 2009 und 2011 als Laboraufbau entwickelt und seitdem zu einem praxistauglichen Aufbau in einem Schaltschrankgehäuse weiterentwickelt. Der komplexe Messprozess erfolgt automatisch und beinhaltet folgende Schritte: Die Wasserprobe wird verdampft, der Dampf in einem Kühler kondensiert, das Kondensat in eine Messküvette gebracht, wo schließlich das Absorptionsspektrum aufgenommen und ausgewertet wird. Zwischen 2018 und 2021 wurde die das System in Kooperation mit den Stadtwerken Raststatt und dem Klärwerk Mannheim erprobt (Happel et al. 2020, S. 110 ff.). Im praktischen Kläranlagenbetrieb konnte z. B. das Korrosions- und Frostschutzmittel Benzotriazol quantitativ bestimmt werden, was eine bedarfsgerechte Dosierung der Hilfsstoffe Ozon und Aktivkohle zur Elimination von Spurenstoffen ermöglicht (DBU 2020).
- Im Rahmen von biologischen Testverfahren sollen toxische Substanzen anhand ihrer Wirkung auf lebende Testorganismen (z. B. Mikroorganismen) ermittelt werden, ohne dass die genaue Zusammensetzung der Substanzen bekannt ist. Ein Beispiel ist der biologische Breitbandsensor aus dem durch das BMBF geförderten Forschungsprojekt »AquaBioTox« (Laufzeit: 2007 bis 2010). In Messzellen werden verschiedene Mikroorganismen



kontinuierlich mit aus dem Trinkwassernetz abgezweigten Wasser umspült. Eine Kamera mit automatischer Bildauswertung wertet die Vitalität der Mikroorganismen kontinuierlich aus, um bei signifikanten Änderungen automatisch ein Alarmsignal auszulösen (Abb. 4.6). Die Leistungsfähigkeit des Sensorsystems wurde unter realitätsnahen Bedingungen in einem Test-Wassernetz der Berliner Wasserbetriebe nachgewiesen (Fraunhofer IOSB o. J.a). Für einen robusten Langzeitbetrieb müssen jedoch die hydraulischen Komponenten (Pumpen, Leitungen) optimiert werden (Trick et al. 2018, S. 14).

Abb. 4.6 Biologischer Breitbandsensor AquaBioTox



Quelle: Fraunhofer IOSB/indigo

- Mithilfe von Nanotechnologie sollen die optischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Messwertaufnehmer und damit die Genauigkeit der Sensoren verbessert werden. Nanosensoren wurden bereits für verschiedene anorganische und organische Chemikalien und diverse Mikroorganismen (z.B. Legionella, E. Coli) entwickelt. Für einen verbreiteten Einsatz ist jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit nötig (Caradot/Schäfer 2022, S. 23).
- Bei der nicht zielgerichteten Analytik werden anhand der Chromatografie und der Massenspektrografie Informationen über die in einer Wasserprobe enthaltenen Substanzen gesammelt (z.B. Molekülmassen und -ladungen, Stoffkonzentrationen). Aufgrund der Vielzahl an (teilweise auch unbekannten) Inhaltsstoffen sowie von Messschwankungen innerhalb einzelner

Molekülararten entstehen dabei große Datensätze, die mit (KI-basierten) Algorithmen ausgewertet und interpretiert werden. Ziel ist es, die Information aus dem ursprünglichen Messdatensatz so zu verdichten, dass sie mit anderen Proben oder einer Datenbank verglichen werden kann, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu identifizieren. Die Methode eignet sich beispielsweise, um Veränderungen in den Substanzkonzentrationen festzustellen oder Hinweise auf neue (unbekannte) Inhaltsstoffe zu generieren. Noch sind die Ergebnisse allerdings stark vom Auswertungsalgorithmus abhängig und nicht immer zuverlässig. So werden aufgrund von Verunreinigungen oder Messartefakten teilweise Substanzen identifiziert, die in der eigentlichen Probe gar nicht vorhanden sind. Dennoch zeigen zahlreiche Publikationen die Potenziale dieses Ansatzes (Renner/Hohrenk-Danzouma 2021).

Luft- und satellitengestützte Sensorsysteme

Luft- und satellitengestützte Sensorsysteme ermöglichen die Beobachtung der Erdoberfläche in unterschiedlichsten Maßstäben und generieren beispielsweise Daten zu Niederschlag oder Wasserhaushalt auf regionaler Ebene. Messparameter wie Chlorophyll-a, Wassertrübung oder Oberflächentemperatur können Hinweise auf mögliche Beeinträchtigungen der Wasserqualität von Oberflächengewässern liefern (Earthdata o. J.). Am DLR wurden im Rahmen der Forschung zur optischen Gewässerfernerkundung beispielsweise Algorithmen entwickelt, die anhand einer großflächigen Seegrasüberwachung die Beobachtung und Beurteilung der Wasserqualität von Küsten- und Binnengewässern ermöglicht (DLR o. J.). Generell ermöglichen luft- und satellitengestützte Sensorsysteme gegenüber Vor-Ort-Messungen am Boden bzw. zu Wasser die Generierung von Daten mit höherer räumlicher und zeitlicher Auflösung (Callejas 2022). Hochaufgelöste Daten zur Bodenfeuchte werden auch bereits dazu genutzt, um mögliche Rohrbrüche zu lokalisieren. Perspektivisch könnten solche Informationen auch die Vorhersagen zur Entwicklung des Abflussgeschehens nach Regenereignissen unterstützen (Holländer et al. 2019, S. 52).

Künftig könnten räumlich und zeitlich hochaufgelöste luft- und satellitengestützte Wasserqualitätsdaten eine vorausschauende Steuerung von Speicher- und Aufbereitungsanlagen oder die Überwachung von Einleitungen unterstützen (Holländer et al. 2019, S. 55). Allerdings sind Fernerkundungsdaten bis auf Weiteres nur als Ergänzung und nicht als Ersatz für die Überwachung der Wasserqualität vor Ort durch die Betriebe anzusehen. Bislang können nur eine begrenzte Anzahl von Wasserqualitätsparametern mit luft- oder satellitengestützten Sensorsystemen erfasst werden (Earthdata o. J.). Außerdem sind die Generierung und die Auswertung solcher Daten kostspielig (Holländer et al. 2019, S. 52). Gleichwohl werden die bereits vorhandenen Potenziale der Fernerkundung in der Wasserwirtschaft bislang nur unzureichend genutzt (Holländer et



al. 2019, S. 81). Dies betrifft z.B. die Gewässerüberwachung durch Umwelt- und Wasserbehörden, wo mit Fernerkundung kontinuierlich und systematisch Informationen über die Gewässerzustände gesammelt werden könnten, um beispielsweise Ereignisse wie die Algenblüte in der Oder im Sommer 2022 frühzeitig entdecken zu können.

Digitale Wasserzähler

Gegenüber den konventionellen mechanischen sind beim Endkunden installierte digitale Wasserzähler in der Lage, Messwerte wie den Wasserdurchfluss nicht nur zu erfassen, sondern auch zu speichern, zu analysieren und zu übertragen. Sie werden daher auch als digitale oder intelligente Wasserzähler, Smart Meter oder Fernlesewasserzähler bezeichnet (Oelmann/Czichy 2020, S. 75 ff.).

Im Zuge notwendiger Geräteerneuerungen tauschen aktuell immer mehr Wasserversorgungsunternehmen die analogen durch digitale Wasserzähler aus.⁶⁸ Im Vergleich zum Energiesektor, wo es für den Rollout intelligenter Messsysteme politische Zielvorgaben gibt⁶⁹, verläuft die Umstellung in der Wasserwirtschaft aber deutlich langsamer. Treiber für den Einsatz in der Wasserwirtschaft sind vor allem betriebliche Einsparpotenziale bei der Zählerablesung, die bisher manuell durch Mitarbeiter/innen oder durch Endkunden mithilfe von Ablesekarten erfolgt. Die digitalen Wasserzähler senden stattdessen die Verbrauchsdaten verschlüsselt in Intervallen von einigen Sekunden (z. B. alle 15 Sekunden) über einen Funkstandard bis in eine Entfernung von 500 Metern. Im Drive-by-Ausleseverfahren fahren Mitarbeiter/innen zu den jährlichen Ableseterminen in einem mit Empfangstechnik ausgerüsteten Servicefahrzeug die Versorgungsgebiete ab, um die Daten zu erheben. In einer ersten Einführungsphase mit 450 digitalen Wasserzählern beim Wasserzweckverband Inn-Salzach konnte so die Bearbeitungszeit für das Ablesen von 6 Wochen (für Druck, Verteilung, Rücksendung und Korrektur von Ablesekarten) auf 2,5 Tage für das Abfahren des Versorgungsgebiets und die Abrechnung reduziert werden. Neben Verbrauchsdaten speichern digitale Wasserzähler weitere technische Daten wie Trockenlauf, Rückfluss oder Temperatur, die vor Ort über eine Bluetoothschnittstelle auf ein mobiles Gerät übertragen werden können und deren Auswertung Hinweise auf Leckagen oder mögliche Verunreinigungen des Trinkwassers durch Rückfluss geben kann (Oelmann et al. 2021, S. 118 f.).

68 Beispielsweise: Stadtwerke Löhne (www.stadtwerke-loehne.de/digitale-wasserzaehler; 21.12.2022), Märkischer Abwasser- und Wasserzweckverband (www.mawv.de/service/smart-meter.html, 21.12.2022), Wasserzweckverband Inn Salzach (www.wasserzweckverband-inn-salzach.de, 21.12.2022)

69 Gemäß dem Entwurf eines Gesetzes zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende des BMWK (2022a) soll die Ausstattung mit digitalen Stromzählern bis Ende 2032 weitestgehend vollzogen sein.

Eine kontinuierliche Übertragung von (quasi) Echtzeitdaten aus digitalen Wasserzählern an das Prozessleitsystem eines Wasserversorgers wird gegenwärtig (soweit bekannt) nicht praktiziert. Aus Betreibersicht würde dadurch die Sensorausstattung und damit die Transparenz des Versorgungsnetzes deutlich erhöht, was z. B. für die Leckageerkennung, für genaue Verbrauchsprognosen oder für die Ableitung von Möglichkeiten zum Wassersparen von Nutzen wäre (Cominola et al. 2020, S. 116). Allerdings würden Echtzeitverbrauchsdaten auch detaillierte Einblicke in die Gewohnheiten der Endkunden erlauben, weswegen ihre Nutzung aus Gründen des Datenschutzes kritisch diskutiert wird (Oelmann et al. 2021, S. 77).

Herausforderungen und Ausblick

Installation, Betrieb und Instandhaltung von Sensorsystemen sind mit Kosten verbunden, sodass ihr Einsatz trotz der damit verbundenen Vorteile für die Transparenz der wasserwirtschaftlichen Prozesse auch unter betriebswirtschaftlichen Aspekten abgewogen werden muss. Der Nutzen hängt außerdem stark von der jeweiligen Anlagenkonfiguration und der Größe des jeweiligen Betriebes ab. Kosten-Nutzen-Analysen für einen optimalen Einsatz fortschrittlicher Sensorsysteme für unterschiedliche Einsatzzwecke in Abhängigkeit der betrieblichen Gegebenheiten liegen bislang – soweit ersichtlich – keine vor.

4.2.3 Datenübertragung

Für viele digitale Anwendungen ist eine leistungsfähige Telekommunikationsinfrastruktur für eine schnelle und sichere Datenübertragung notwendig. Steht diese nicht, nicht vollständig oder nicht kontinuierlich zur Verfügung, so stellt dies für die Realisierung von Digitalisierungsvorhaben eine hohe Hürde dar. Dies gilt insbesondere auch für die Wasserwirtschaft, wo es häufig um die Vernetzung von in der Fläche weit verteilten Anlagen geht. Akteure der Wasserwirtschaft bemängeln in diesem Zusammenhang den zögerlichen Ausbau einer flächendeckenden Breitbandversorgung insbesondere in ländlichen Räumen (Oelmann/Czichy 2020, S. 134 f.).

Im Rahmen von Digitalisierungsprojekten stehen Betreiber daher oft vor der Frage nach geeigneten Datenübertragungstechniken zur Einbindung weit entfernter oder schlecht zugänglicher Anlagenkomponenten in ein Prozessleitsystem. Eine viel diskutierte Lösung stellen spezielle Funknetze dar (LoRaWAN) (dazu und zum Folgenden Hempel et al. 2021, S. 81 f.). Das Protokoll und die Systemarchitektur der LoRaWAN-Technologie ermöglichen es, über große Areale Kommunikationsverbindungen aufzubauen, um Daten weiträumig und mit geringem Energieaufwand zu übertragen. Im Gegensatz zu vielen anderen Übertragungstechniken bietet LoRaWAN die Möglichkeit, Gebäude zu



durchdringen. Die Reichweite kann im freien Gelände bis zu 50 km erreichen. In Abhängigkeit der Umweltbedingungen, Geländetopologie, Bebauungsdichte und Gebäudebeschaffenheit sind in der Praxis jedoch wesentlich niedrigere Reichweiten von einigen hundert Metern zu erwarten. Die Gerätekomponenten von LoRaWAN basieren auf einem Batteriebetrieb, dessen Lebensdauer von der Art der Verbindung abhängt. Der durch die Bundesnetzagentur administrierte Frequenzbereich von 863 MHz ist lizenzfrei nutzbar. Daher ist der Aufbau eigener oder öffentlich geteilter Netze auch für Betreiber der Wasserwirtschaft mit niedrigen Hürden möglich.

Der Einsatz von LoRaWAN wird in der Wasserwirtschaft in Pilotvorhaben bereits erprobt. So wurde etwa in Berlin ein eigenes Probenetz aufgebaut, um u. a. Drucksensoren im Abwasserkanalisationsnetzes zu vernetzen (DWA 2019a; ver.di 2020b, S. 6). Der Druck in den Abwasserdruckleitungen im Stadtgebiet wird so kontinuierlich überwacht, um Rohrbrüche zu erkennen und hydraulische Netzsimulationen zu kalibrieren (InfraLab o. J.).

4.2.4 Datenspeicherung und -verarbeitung

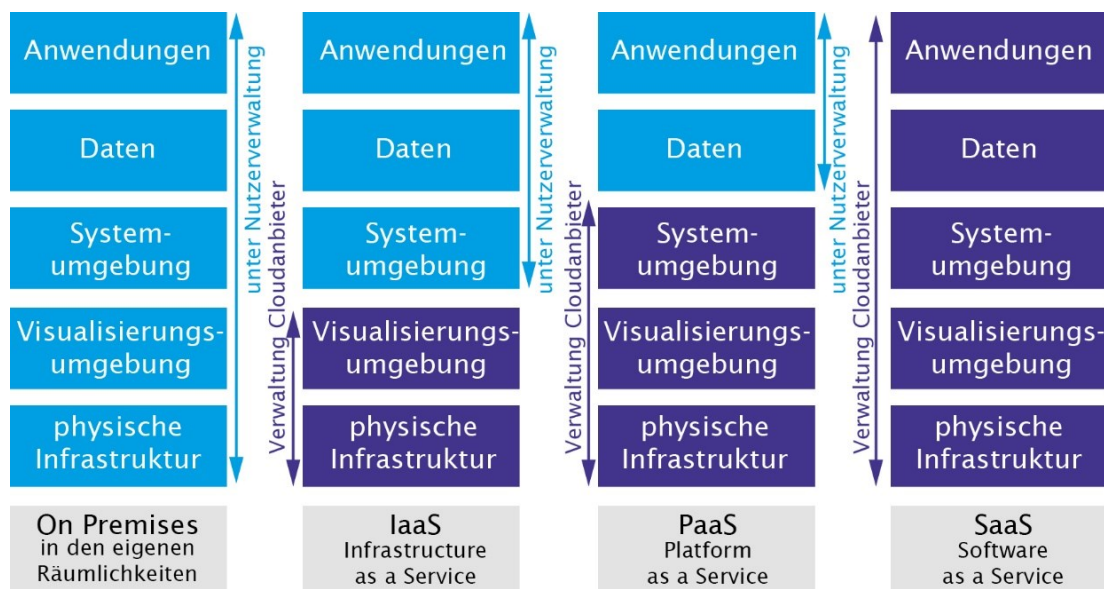
Die Wasserwirtschaft ist sehr daten- und rechenintensiv. Neben kontinuierlich anfallenden Prozessdaten, die verarbeitet und archiviert werden müssen (Kap. 4.2.1), kommen zahlreiche weitere betriebliche (z. B. Planungsunterlagen, Betriebshandbücher, Notfallpläne, Infrastrukturdaten) und verwaltungsbezogene (z. B. Personal- oder Kundendaten) Datenbestände hinzu. So betreibt beispielsweise der Wasserwirtschaftsverband Emschergenossenschaft und Lippeverband (EGLV) als größter Abwasserentsorger in Deutschland ein eigenes Rechenzentrum, das rund 38.000 Gigabyte Daten für die Beschäftigten aller Unternehmensbereiche bereitstellt (Lippeverband 2020, S. 45). Durch die Digitalisierung erhöhen sich die Anforderungen an die IT-Systeme in den Betrieben weiter, da immer größere Datenmengen erhoben, verarbeitet und bereitgestellt werden müssen. Um von den Potenzialen digitaler Innovationen zu profitieren, müssen Betreiber folglich eine leistungsfähige IT-Infrastruktur vorhalten, die aber nicht nur teuer in der Anschaffung ist, sondern auch hohe Wartungs- und Energiekosten verursacht sowie IT-Fachpersonal erfordert. Vor diesem Hintergrund steigt auch in der Wasserwirtschaft das Interesse an der Nutzung von cloudbasierten Dienstleistungen. Perspektivisch könnte Cloud Computing vor allem für Betreiber, die nicht in der Lage sind, eigene leistungsfähige IT-Systeme aufzubauen und zu unterhalten, an Relevanz gewinnen, um auch ihnen die Teilhabe an der digitalen Entwicklung zu ermöglichen (Hempel et al. 2021, S. 66 f.).

Cloud Computing bezeichnet das an den Bedarf angepasste Anbieten, Nutzen und Abrechnen von IT-Dienstleistungen über ein Netzwerk (dazu und zum Folgenden BSI 2022j, S. 1). Angebot und Nutzung dieser Dienstleistungen

erfolgen über definierte technische Schnittstellen und Protokolle. Das Spektrum der Dienstleistungen kann die IT-Infrastruktur (z. B. Rechenleistung, Speicherplatz), Plattformen (z. B. Betriebssysteme) und Software (z. B. Büroanwendungen) umfassen. In Abhängigkeit der durch ein Unternehmen in Anspruch genommenen Dienstleistungen kann zwischen verschiedenen Servicemodellen unterschieden werden (Abb. 4.7) (UP KRITIS 2020, S. 9 ff.):

- *On Premise(s)*: Sämtliche IT-Dienstleistungen (Infrastruktur, Plattformen und Anwendungen) werden durch das Unternehmen in einem eigenen Cloudrechenzentrum bereitgestellt und unterhalten.
- *Infrastructure as a Service (IaaS)*: Nur Hardwareressourcen wie Rechenleistung oder Datenspeicher werden durch einen externen Cloudanbieter bereitgestellt, auf denen das Unternehmen eigene Betriebssysteme, Plattformen und Anwendungen laufen lassen kann.
- *Platform as a Service (PaaS)*: Der Cloudanbieter stellt die komplette Infrastruktur einschließlich Betriebssystem und Plattformen bereit. Das Unternehmen lässt darauf eigene Anwendungen laufen.
- *Software as a Service (SaaS)*: Sämtliche IT-Dienstleistungen werden durch einen externen Cloudanbieter bereitgestellt. Beschäftigte im Unternehmen greifen z. B. über eine Weboberfläche auf Anwendungssoftware wie Textverarbeitung, Kontaktdatenmanagement, Finanzbuchhaltung zu.

Abb. 4.7 Servicemodelle von Clouddienstleistungen



Quelle: nach UP KRITIS 2020, S. 10



Cloud Computing durch externe Anbieter bietet für Unternehmen viele Vorteile (BSI 2022j, S. 1): IT-Dienstleistungen können bedarfsgerecht, skalierbar und flexibel genutzt und je nach Funktionsumfang, Nutzungsdauer und Anzahl der Benutzer abgerechnet werden. Auch kann auf spezialisierte Kenntnisse und Ressourcen des Cloudanbieters zugegriffen werden, wodurch interne Ressourcen für andere Aufgaben freigesetzt werden können. Speziell für Betreiber Kritischer Infrastrukturen sind externe Clouddienstleistungen allerdings auch mit Risiken behaftet, u. a. (UP KRITIS 2020, S. 7 f.):

- › es werden Abhängigkeiten zum Cloudanbieter erzeugt und die Kontrolle über IT-Prozesse und Daten geht verloren;
- › die tatsächliche Verfügbarkeit der Clouddienstleistungen entspricht ggf. nicht den Anforderungen des Betreibers;
- › internetbasierte Verbindungen zum Cloudanbieter können unzuverlässig sein oder lange Signallaufzeiten (Latenzzeiten) aufweisen;
- › große Cloudanbieter sind attraktive Ziele für Cyberangriffe, was zu Datenexposition, Störungen oder Ausfällen führen kann;
- › beim Betreiber droht ein Verlust von IT-Expertise.

Umfragen zeigen, dass Betreiber Kritischer Infrastrukturen aufgrund von Sicherheitsbedenken eher zurückhaltend bei der Nutzung von externen Clouddienstleistungen sind (dazu und zum Folgenden Caradot/Schäfer 2022, S. 33). Cloudlösungen werden vorrangig in den kaufmännischen Unternehmensbereichen realisiert, während die für die Versorgungssicherheit relevanten IT-Systeme der Automatisierungs- und Prozessleittechnik bisher weniger im Fokus stehen. Wenn Betreiber auch Prozessleitsysteme in eine Cloud migrieren, so werden die Clouddienstleistungen meist in einem eigenen oder in einem gemeinsam mit anderen Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen betriebenen Rechenzentrum (Community Cloud) bereitgestellt.

Ein Beispiel hierfür ist das Projekt des EGLV zur Migration von Prozessleitsystemen in eine betriebseigene Cloud. Zum Anlagenverbund des EGLV gehören rund 800 Außenanlagen (darüber 59 Kläranlagen und 132 Pumpwerke), wovon ein erheblicher Teil eigene Prozessleitsysteme unterschiedlicher Ausprägungen betreibt, was mit einem erheblichen Aufwand für Wartung und Pflege einhergeht. Die lokalen Installationen werden innerhalb der nächsten Jahre nach und nach durch standardisierte virtuelle Prozessleitsysteme ersetzt, die im zentralen Rechenzentrum in Essen laufen. Für die Anbindung werden gesicherte VPN-Verbindungen über öffentliche TK-Netze genutzt. Anfängliche Bedenken über zu lange Reaktionszeiten, die eine Echtzeitsteuerung behindern könnten, haben sich nicht bestätigt. Treiber für die Umstellung waren u. a. wirtschaftliche Überlegungen. Durch die Virtualisierung und Zentralisierung der Prozessleitsysteme sollen Kosteneinsparungen von mindestens 20% erzielt werden (Hempel et al. 2021, S.83; Mülbaier 2021). Die Lösung des EGLV

könnte auch ein Modell für kleine und mittlere Betreiber sein, die durch den gemeinsamen Betrieb eines Cloudrechenzentrum ihre IT-Ressourcen und -Kompetenzen bündeln könnten.

4.2.5 Simulations- und Prognosewerkzeuge

Simulations- und Prognosesoftware ist heute in allen Bereichen der Wasserwirtschaft zu finden (Hempel et al. 2021, S.60). Meist handelt es sich dabei um Software zur Modellierung von dynamischen Prozessen in wasserwirtschaftlichen Anlagen, mit deren Hilfe sich beispielsweise das Anlagenverhalten bei unterschiedlichen Fahrweisen simulieren lässt. Ein weiteres Anwendungsfeld sind Simulationen zum Wasserhaushalt, um beispielsweise auf Basis von geografischen und meteorologischen Daten Vorhersagen zum Grundwasserstand zu treffen. Bei solchen Simulations- und Prognosewerkzeugen handelt es sich meist um Einzelanwendungen, deren Ergebnisse als Grundlage für Planungsentscheidungen dienen.

Davon abzugrenzen sind Echtzeitsimulationswerkzeuge, die als Teil des Prozessleitsystems operieren und für Aufgaben der unmittelbaren Prozessüberwachung und -steuerung eingesetzt werden.

Simulations- und Prognosewerkzeuge zur Entscheidungsunterstützung in Planungs- und Betriebsprozessen

Die Infrastruktursysteme der Wasserwirtschaft und die darin ablaufenden dynamischen Prozesse sind oft von einer hohen Komplexität gekennzeichnet. Um für die Planung und den Betrieb von wasserwirtschaftlichen Anlagen notwendiges Wissen bereitzustellen, wurde eine Vielzahl an Simulationssoftware entwickelt, die auf der Basis von Infrastrukturdaten und ggf. historischen Prozessdaten Anlagen und Prozesse modelltechnisch abbilden und ihr Verhalten berechnen können (z. B. die Druckverteilung in Rohrleitungsnetzen). Die Simulationsergebnisse werden beispielsweise für Planungszwecke (z. B. Dimensionierung von Anlagen), für die Erarbeitung neuer Betriebskonzepte (z. B. Sollwerte für eine ressourcensparende Anlagenfahrweise) oder für das Training (z. B. Simulation des Anlagenverhaltens bei Störungen) verwendet.

Ein wichtiges Hilfsmittel sind darüber hinaus Simulations- und Prognosewerkzeuge für Vorhersagen zu möglichen Veränderungen im Wasserhaushalt, beispielsweise zur Entwicklung der Wasserverfügbarkeit oder der Wassernachfrage in einem Versorgungsgebiet infolge des Klimawandels. Diese Werkzeuge integrieren geografische, meteorologische, demografische oder wirtschaftliche Daten und dienen beispielsweise der Ermittlung künftiger Kapazitäts- und Infrastrukturbedarfe. Vor allem vor dem Hintergrund zunehmender Extremwetterereignisse (langanhaltende Trockenheit, Starkregen, Hochwasser) erhalten



diese Instrumente eine hohe Relevanz für die Wasserwirtschaft, um entsprechende Anpassungsstrategien zu entwickeln. Dafür notwendig ist es jedoch, dass die integrierte Modellierung von Klima, Land und Wasserhaushalt in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung weiterentwickelt wird, um kurzfristige Prognosen zu verbessern und langfristige Projektionen von Dürren und Starkregen zu ermöglichen (Leese et al. 2021, S. 10). Werkzeuge, die Infrastrukturen, Prozesse und Wasserhaushalt integriert abbilden und simulieren, erlauben es schließlich, ein besseres Verständnis über künftige Herausforderungen (z. B. häufigere Mischwasserüberläufe durch Starkregenereignisse) zu entwickeln, um auf dieser Basis geeignete Bewältigungsstrategien abzuleiten (z. B. in Bezug auf das Risikomanagement oder den Infrastrukturausbau).

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden einige marktverfügbare Softwarelösungen vorgestellt (Hempel et al. 2021, S. 62 ff.):

- Das Softwarepaket »EPANET«⁷⁰ wird weltweit für hydraulische Berechnungen in Rohrleitungsnetzen eingesetzt. Auf der Basis von Infrastrukturdaten zum Rohrnetz und zu Komponenten (Armaturen, Pumpen etc.) sowie ggf. von importierten Prozessdaten (z. B. Durchflussmengen, Stoffkonzentrationen) können Simulationen zur Druckverteilung, zu Strömungsgeschwindigkeiten, zu Druckverlusten an Bruchstellen oder zum Wasserbedarf erstellt werden. Zudem sind Wasserqualitätssimulationen möglich, z. B. zur Modellierung der Verteilung von Substanzen (z. B. Chlorrückstände) im Leitungsnetz. Die Simulationen dienen auch dazu, Reparaturarbeiten zu planen, den Energieeinsatz für Pumpen zu berechnen oder Ausbaubedarfe zu bestimmen.
- Die Software »STOAT« (WRc o. J.) erlaubt dynamische Kläranlagensimulationen. Es lassen sich wichtige Transport- und Umwandlungsprozesse entlang der Fließwege von Abwasser und Klärschlamm abbilden sowie Frachten und Konzentrationen relevanter Stoffparameter berechnen, um das Verhalten von Kläranlagenprozessen über die Zeit zu modellieren. Typische Einsatzfelder der Software sind die Berechnung von Ablaufwerten oder von Energieverbräuchen, die Simulation des Anlagenverhaltens bei veränderten Randbedingungen (z. B. Änderungen in der Fahrweise, im Anlagendesign, der Beschaffenheit der Abwasserströme im Zulauf oder infolge des Ausfalls von Anlagenteilen) oder das Training des Betriebspersonal z. B. im Umgang mit Störungen (Sieker o. J.).
- Mit der Software »InfoWorks ICM« (InnoAqua o. J.) können einzeln oder kombiniert Abwasserkanäle, oberirdische Niederschlagsabflüsse und Flüsse modelliert werden. Dazu werden Geoinformationen städtischer Umgebungen und Flusseinzugsgebieten mit wasserwirtschaftlichen Infrastrukturdaten

70 »EPANET« wurde ursprünglich von der US-amerikanischen Environmental Protection Agency entwickelt und wird bis heute als offenes Softwarepaket angeboten und weiterentwickelt (<http://epanet.de/index.html.de>; 25.9.2023)



(z. B. Schächte, Kanäle, Schleusen, Pumpen) integriert. Neben Kanalnetzrechnungen ermöglicht die Software Simulationen zu Mischwasserüberläufen und der damit verbundenen Ausbreitung von Verschmutzungen oder zu Überflutungen durch Starkregen, was beispielsweise der Planung neuer Kanalnetze, der Gefahrenanalyse oder der Überflutungsvorsorge dient. In einem Livemodul können zusätzlich historische Prozessdaten aus dem Prozessleitsystem und aktuelle Wettervorhersagedaten integriert werden, um das Eintreten und den Umfang von Überflutungsereignissen vorherzusagen und Warnungen auszulösen.

Bei solcher Simulations- und Prognosesoftware handelt es sich in der Regel um komplexe Einzelanwendungen, wobei die Modellierungen und Berechnungen Spezialkenntnisse erfordern und zeitaufwendig sind. Die Werkzeuge werden entsprechend von speziell geschultem Personal in verschiedenen Fachabteilungen eingesetzt und haben insofern wenig mit den alltäglichen Überwachungs- und Steuerungsaufgaben in der Leitstelle zu tun. Eine Anbindung an das Prozessleitsystem besteht – abgesehen von der Möglichkeit für den Import von historischen Prozessdaten aus den Archivierungssystemen – meist nicht (Hempel et al. 2021, S. 64 f.).

Echtzeitsimulationswerkzeuge für Überwachungs- und Steuerungszwecke

Für Aufgaben der Anlagenüberwachung und -steuerung in Echtzeit spielen Simulations- und Prognosewerkzeuge bisher keine relevante Rolle. Die Steuerungsstrategien der Automatisierungs- und Prozessleittechnik basieren bisher fast ausschließlich auf einfachen Wenn-dann-Beziehungen auf der Basis von aktuellen Betriebszuständen (z. B. »Starte Förderpumpe, wenn Füllstand Wasserbehälter festgelegten Wert unterschreitet.«) (Hempel et al. 2021, S. 56). Neben einer regelbasierten Steuerungslogik beschränkt sich die Datenverarbeitung der Prozessleittechnik gegenwärtig auf Anzeige- und Meldeaufgaben (z. B. Prozessvisualisierung, Darstellung von Prozessdaten und relevanter Kennzahlen als Kurvendiagramme im Zeitverlauf oder als Tabellen, Alarmierung bei Sollwertabweichungen) sowie auf einfache Formen der Datenauswertung von historischen Prozess- und Meldedaten z. B. zur Erstellung formalisierter Berichte (z. B. um gesetzliche Dokumentationspflichten zu erfüllen), zur Auswertung von Störungsmeldungen (z. B. um störintensive Anlagenteile zu identifizieren), zur Erstellung von Stoff- oder Energiebilanzen oder für die Ermittlung von Energiebedarfsspitzen (DWA 2017b, S. 52 ff.).

In der Koppelung der Automatisierungs- und Prozessleittechnik mit leistungsstarken Simulations- und Prognosewerkzeugen wird ein großes Potenzial für betriebsoptimierte Steuerungskonzepte gesehen. Das Ziel besteht darin, das Anlagenverhalten in Echtzeit auf der Grundlage von historischen und aktuellen



Prozesswerten sowie von externen Daten (z. B. Wetterdaten) zu simulieren, um kontinuierlich optimale Fahrweisen abzuleiten und perspektivisch über autonome Eingriffe des Prozessleitsystems in die Anlagensteuerung zeitgleich zu realisieren (Hempel et al. 2021, S. 56). Erste Schritte in Richtung einer adaptiven Echtzeitsteuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen gibt es bereits. Die Stadt Wien beispielsweise testet eine Kanalnetznetzsteuerung mit Niederschlagsvorhersage und Echtzeitsimulation für die optimale Bewirtschaftung der Speicherräume im Kanalnetz. Ziele sind die Minimierung von Regenwasserausleitungen aus dem Kanalnetz in die Gewässer sowie die Optimierung des Zusammenspiels Kanalnetz, Kläranlage und Ausleitungen. Dazu werden laufend eintreffende Messdaten aus dem System zusammen mit den prognostizierten Abflüssen und Wasserständen des Echtzeitsimulationsmodells dazu verwendet, um Steuerungseinrichtungen so zu betreiben, dass bestimmte Sollwerte nicht überschritten werden. Durch die implementierte Steuerung konnte das Mischwasserentlastungsvolumen um rund 50 % gesenkt werden (German Water Partnership o. J. S. 17).

Herausforderungen für die Umsetzung von simulationsbasierten Steuerungsstrategien bestehen unter anderen in Bezug auf die Verfügbarkeit und Qualität von Echtzeitdaten als Grundlage für die Simulationen sowie auf die Echtzeitfähigkeit der Simulationssoftware, um valide Ergebnisse für zeitkritische Entscheidungen rechtzeitig und zuverlässig bereitzustellen (Hempel et al. 2021, S. 65). Außerdem stellt sich mit Blick auf die Gewährleistung der Versorgungssicherheit die grundsätzliche Frage, inwieweit künftig autonome Eingriffe des Prozessleitsystems in die Anlagensteuerung gewünscht bzw. zulässig sein sollen (Holländer et al. 2019, S. 32).

4.2.6 Verknüpfung und Auswertung von bereichs- und unternehmensübergreifenden Daten

In der Wasserwirtschaft werden bereits heute große Datenmengen erhoben und im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung werden es künftig immer mehr werden. Zurzeit allerdings liegen diese Daten häufig nur fragmentiert und voneinander getrennt auf verschiedenen IT-Systemen und in unterschiedlichen Unternehmensbereichen vor. So werden relevante Prozess- und Betriebsdaten in aggregierter Form in den Archivierungssystemen des Prozessleitsystems abgelegt. Planungs- und Infrastrukturdaten liegen meist in singulären IT-Systemen mit Spezialsoftware z. B. für die Erstellung von Grundwassermodellen oder für hydraulische Netzberechnungen vor. Weitere Einzellösungen existieren beispielsweise in den Bereichen Lagerhaltung, Verbrauchsgebührenabrechnung, Abrechnung von Flurschäden, Einsatzplanung und Kundenverwaltung. Schließlich gibt es Softwaresysteme für die Dokumentenablage und -archivierung oder für die Instandhaltung (Oelmann/Czichy 2020, S. 49). Ein Austausch

der Daten zwischen den verschiedenen IT-Systemen ist über Datenschnittstellen in der Regel zwar grundsätzlich möglich, dies ist aber zumeist nicht Standard und daher unter Umständen mit hohem Arbeitsaufwand verbunden bzw. nur durch Hinzuziehen von Dienstleistern möglich. In den Betrieben herrscht dadurch selten Transparenz über den Datenfundus und meist wird auch nur ein Bruchteil der vorhandenen Daten in Entscheidungsprozessen berücksichtigt (Oelmann/Czichy 2020, S. 89). Auch der BDEW (2017) identifizierte weniger einen Mangel an verfügbaren Daten als vielmehr die fehlende Nutzung als Problem. Als wesentliche Gründe wurden dabei neben technischen Restriktionen ein fehlendes Gespür für Daten und deren Bedeutung in der Weiterverwendung sowie Hürden in Form von datenschutzrechtlichen Vorgaben genannt.

Mit einer weitergehenden Nutzung, Verknüpfung und Auswertung der im Betrieb vorliegenden Daten, aber auch von externen Daten (z. B. Wetterdaten) werden vielfältige Anwendungspotenziale assoziiert. Insbesondere durch die Verschneidung von Prozessdaten, kaufmännischen Daten, Geodaten oder Zustandsinformationen verschiedener Anlagen ergeben sich neue Erkenntnisse für Betriebsoptimierungen (Höchel 2022, S. 40). Entsprechend richtet sich auch ein Fokus der wissenschaftlichen Diskussionen auf die Frage, welche Datenmengen wie zusammengeführt und welche Herausforderungen damit adressiert werden können (Oelmann/Czichy 2020, S. 89). Für die Realisierung solcher Anwendungen muss grundsätzlich die Organisation der Datenbereitstellung und -haltung verbessert sowie die Vernetzung bestehender Datenbestände vorangetrieben werden. Dazu notwendig sind die Standardisierung und/oder Harmonisierung der Bereitstellung und Nutzung von Daten (Holländer et al. 2019, S. 16 f.).

Geo- und Netzinformationssysteme

Ein Lösungsansatz für die Organisation und Vernetzung bislang isolierter Datenbestände sind GIS. Grundsätzlich ermöglichen GIS die Informationserfassung und Datenverarbeitung von Geodaten und -informationen. Sie basieren auf Softwarelösungen, die geografische Daten mit raumbezogenen Objekten zu digitalen Karten visuell aufbereiten. Je nach Qualität der Geodaten können verschiedene Operationen und Interaktionen zu Zwecken der Übersicht, Auswertung und Erfassung durchgeführt werden. GIS dienen somit nicht nur dazu, Geodaten abzubilden, sondern auch zu archivieren und über die Zeit zu aktualisieren (Hempel et al. 2021, S. 58).

In der Wasserwirtschaft finden GIS aufgrund des räumlichen Bezugs derzeit vor allem für die Visualisierung von Rohrleitungs- bzw. Kanalnetzen Verwendung, weshalb sie häufig auch als Netzinformationssysteme (NIS) bezeichnet werden (dazu und zum Folgenden Hempel et al. 2021, S. 58 f.). NIS enthalten in der Regel ein Abbild der gesamten Netztopologie einschließlich relevanter Infrastrukturen und Anlagen, Verwaltungsgrenzen und Straßen. Je nach



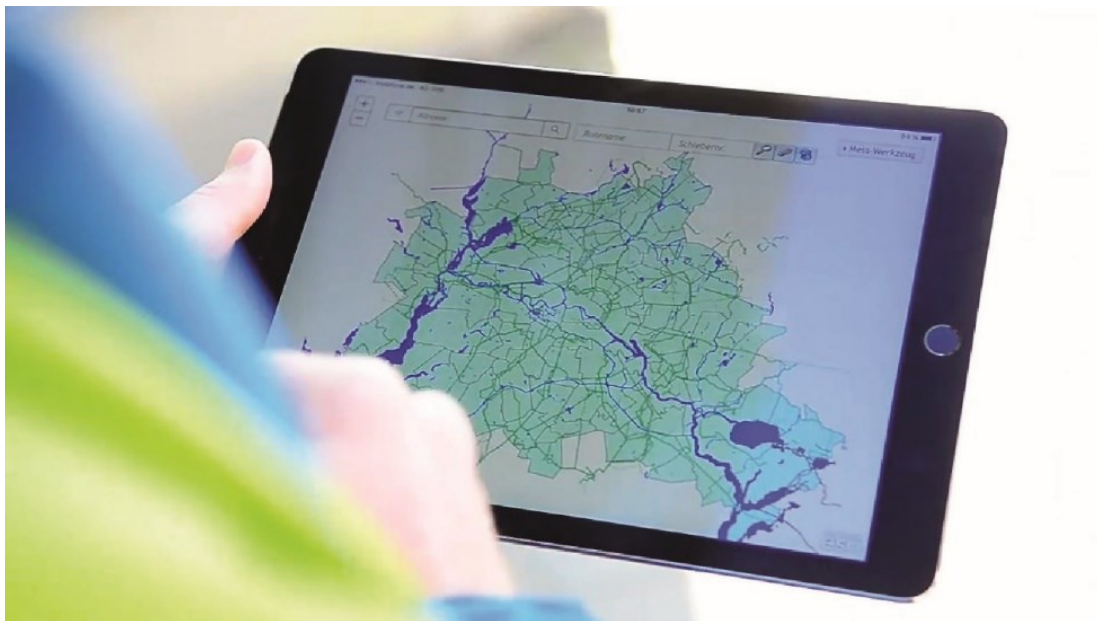
Aufgabengebiet können weitere thematische Ebenen mit Objekten von wasserwirtschaftlichem Interesse ergänzt werden, z. B. zu Grundwassermessstationen, Wasserschutzgebieten oder Infrastrukturen anderer Sektoren. Durch Such- und Zoomfunktionen können Standorte und Verläufe einzelner Objekte zügig ermittelt, aber auch schnell ein Überblick über das Gesamtsystem gewonnen werden. Für Zwecke der Arbeitsorganisation und Arbeitsplanung lassen sich zu den Objekten nicht nur spezifische Informationen (z. B. Bau- oder Betriebspläne), sondern auch aktuelle Arbeitsanweisungen und Aufgabenbeschreibungen hinterlegen. Mitarbeiter/innen vor Ort erhalten über mobile Endgeräte wie Tablets oder Smartphones Zugriff auf die Informationen und können im System die Ausführung von Wartungsarbeiten eintragen, falsche Einträge korrigieren, Schadensfälle melden oder weitere Arbeitsaufträge auslösen. Der Einsatz von GIS bzw. NIS ist in der Wasserwirtschaft nicht nur bei großen Betreibern verbreitet. Teilweise werden NIS für die Versorgungsinfrastrukturen (Wasser, Energie, Telekommunikation) auch von Kommunen in Zusammenarbeit mit Universitäten oder Forschungseinrichtungen erstellt, z. B. in Bremen (Landesamt GeoInformation Bremen o. J.).

Der Nutzen von GIS hängt vom Grad der unternehmensweiten Vernetzung und Informationsvermittlung ab. Digitale Innovationen setzen hier an und verfolgen die Integration, Verknüpfung und Auswertung von immer mehr Daten auch in Echtzeit. Ein Beispiel ist das in einem Pilotprojekt der Berliner Wasserbetriebe sich in der Umsetzung befindende Assistenzsystem »SmartLISA« (dazu und zum Folgenden Hempel et al. 2021, S. 86 f.; Höchel 2022, S. 40 ff.). Das System stellt einen Druckrohratlas zur Verfügung, der auf der bestehenden automatisierten Kanalnetzsteuerung sowie einer Druckleitungssimulation aufbaut und sukzessive relevante Kanalnetzinformationen in digitaler Form zur Verfügung stellt (z. B. GIS-Datensätze zum Kanal- und Druckleitungsnetz, aktuelle Betriebsdaten aus dem Prozessleitsystem, hydraulische Zustandsinformationen aus der Simulation), sodass sie für das Kanalnetzmanagement und für alle Mitarbeiter/innen in ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereichen einheitlich und ortonabhängig verfügbar und bearbeitbar sind. Die Aktualisierung der Kanalnetzinformationen erfolgt als Onlinekarte auf einem mobilen Endgerät in einer Webanwendung (Abb. 4.8). Über Interaktionsmöglichkeiten können vor Ort manuell vorgenommene Schaltungen von Schiebern dokumentiert werden. Zurzeit wird das System weiterentwickelt, um auch Daten aus Niederschlagsvorhersagen zu integrieren, damit auch das Ableitungssystem im Vorlauf der Pumpwerke abgebildet werden kann. Außerdem wurden Algorithmen zur Analyse von Havarien integriert, wobei das System mögliche Reaktionsmaßnahmen vorschlägt (ver.di 2020a, S. 6).

Eine bedeutende Herausforderung für die Fortentwicklung der Systeme stellt die Integration von Daten unterschiedlicher Quellen und Qualität dar, da heute vorliegende Daten teilweise einen unzureichenden Detailgrad aufweisen

und es an kompatiblen Datenformaten bzw. Schnittstellen oft mangelt. Die Datenanalyse wird perspektivisch stärker an KI-basierten Auswertemethoden ausgerichtet werden, um die Funktion von NIS von einem reinen Monitoring- und Dokumentationssystem hin zu einem System für die Entscheidungsunterstützung zu erweitern.

Abb. 4.8 Assistenzsystem SmartLISA



Quelle: Höchel 2022, S. 40

Building Information Modeling

Building Information Modeling (BIM) bezeichnet eine Technologie, mit derer Hilfe alle relevanten Informationen zur Planung, Ausführung und Bewirtschaftung von Gebäuden und anderen Bauwerken digital erfasst, verwaltet und zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht werden können. Ausgangspunkt für BIM bilden die vorhandenen digitalen Modelle der Bauplaner und Architekten, die durch Daten für Bauteile und Flächen ergänzt werden. Weitere relevante Projektinformationen können integriert werden, wie Daten zu Kosten, Terminen oder zur Organisation von Personal, aber auch Betriebsdaten sowie Informationen zu Wartung und Instandhaltung bis hin zum Abbruch eines Projekts durch Abriss oder Rückbau. Damit geht BIM in Bezug auf Informationsgehalt und Detailgrad deutlich über die derzeit in der Wasserwirtschaft gebräuchlichen GIS hinaus. BIM hat vor allem in der Bauwirtschaft Einzug gehalten, während es in der Wasserwirtschaft noch kaum zum Einsatz kommt. Allerdings wird der Technologie aufgrund der hier typischen komplexen Anlagen und langen



Nutzungszeiten von Bauwerken ein hohes Potenzial beigemessen, um die Qualität und Innovation von Projekten zu steigern (Hempel et al. 2021, S. 88; Oelmann/Czichy 2020, S. 81 f.).

BIM-Software speziell für Anwendungen in der Wasserwirtschaft steht am Markt aktuell noch nicht zur Verfügung, sie ist aber Gegenstand vielfältiger Forschungsbemühungen (z. B. Kamunda et al. 2021; Pham et al. 2021; Söbke et al. 2021). In Deutschland wurden erste Pilotprojekte initiiert, z. B. das Projekt »Dokumentation 4.0« der Berliner Wasserbetriebe. Ziel des Projekts ist es, ein Informationsmodell und einen Informationsfluss über den gesamten Weg eines Anlagenkomplexes von der Grobplanung über das fertige Baumodell bis hin zu den Kennzahlen des Modellbetriebs zu generieren. Die mit der Anlage verbundenen Aufgaben und Dienstleistungen sollen damit einfacher zu erledigen sein, da das Informationsmodell im Idealfall über den gesamten Lebenszyklus hinweg ständig aktualisiert wird (ver.di 2020a, S. 7; Hempel et al. 2021, S. 88 f.).

Die Herausforderungen für die Entwicklung von BIM für die Wasserwirtschaft und deren verbreitete Nutzung sind allerdings noch vielfältig. Eine wesentliche Schwierigkeit stellen fehlende BIM-Objektkataloge dar. Die Kataloge definieren die Objektinformation und deren standardisierte Integration in die Modellierung. Objektkataloge für die in der Wasserwirtschaft typischen Infrastrukturelemente sowie daran anknüpfend frei verfügbaren Bauteilebibliotheken fehlen aktuell aber noch (Hempel et al. 2021, S. 88 f.; Business Geomatics Online 2021). Vielfach fehlt es außerdem an einer lückenlosen Erfassung der zumeist historisch gewachsenen Infrastruktur in Form von digitalen Daten, die aber die Basis vor für die Modellierungen darstellen. Für die Integration von Echtzeitdaten müssen schließlich standardisierte Datenformate und Schnittstellen entwickelt werden.

Digitale Zwillinge

Während BIM relevante Planungs-, Zustands- und Betriebsdaten von Anlagen sammelt und bereitstellt, geht die Modellierung und Visualisierung durch digitale Zwillinge noch weit darüber hinaus. Hier ist der Anspruch, den kompletten Datenbestand einer realen Anlage (z. B. ein Pumpwerk, ein Klärwerk) oder auch eines gesamten Systemverbunds bis hin zu einzelnen Kennzahlen und Betriebsparametern in ein virtuelles Echtzeitabbild zu überführen. Die Anwendungsmöglichkeiten für digitale Zwillinge sind vielfältig und reichen von der Analyse und Optimierung von Arbeitsprozessen über Forschung und Entwicklung, Aus- und Weiterbildung bis hin zur vorausschauenden Wartung und Planung von Anlagen über deren gesamten Lebenszyklus. Digitale Zwillinge sowie die darin hinterlegten Anlagen- und Betriebsdaten bilden auch den Ausgangspunkt für Simulationen des Anlagenverhalten unter ungewöhnlichen Betriebsbedingungen. Dies kann beispielsweise genutzt werden, um Ausnahmesituationen zu

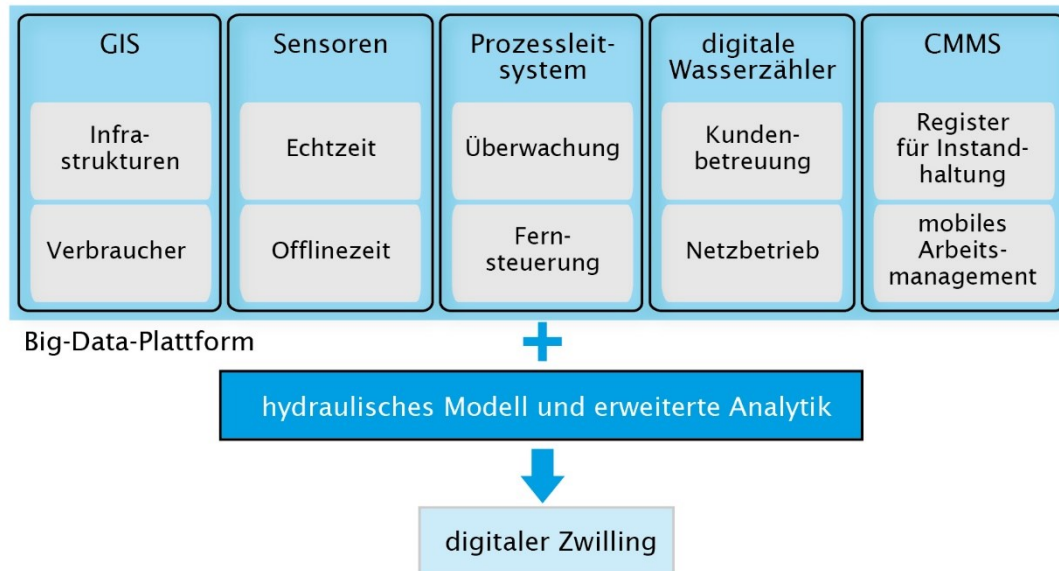


simulieren und geeignete Reaktionsmöglichkeiten zu entwickeln (Hempel et al. 2021, S. 83).

In der Wasserwirtschaft arbeiten Unternehmen erst vereinzelt und pilothaft mit digitalen Zwillingen. So haben beispielsweise die Berliner Wasserbetriebe ein virtuelles Abbild eines Wasserwerks entwickelt, um das Betriebspersonal zu schulen. Im Fokus stehen die sichere und effiziente Bedienung der Anlagen im Normalbetrieb, die schnelle und angemessene Reaktion auf Störungen, die Verbesserung der Koordination der Verbundfahrweise der Werke sowie das Störfalltraining für Extremsituationen. Die Virtualisierung umfasst ein konkretes Abbild der Gebäude, von Subsystemen wie Pumpen, Filter, Armaturen, Sensoren und Aktoren wie auch der Steuerungsprogramme und Bedien- und Überwachungssysteme (Hempel et al. 2021, S. 83).

Hervorzuheben ist das Pilotprojekt zur Entwicklung und Einführung in den Realbetrieb eines digitalen Zwillings für das Wasserverteilnetz in der Metropolregion der Stadt Valencia in Spanien (ca. 1,6 Mio. Verbraucher) durch die Unternehmen Omnium, Go Aqua sowie die Universität Valencia (Universitat Politècnica de València) (dazu und zum Folgenden Conejos Fuertes et al. 2020). Die Virtualisierung umfasst ein detailliertes Abbild des gesamten Wasserverteilungssystems mit allen Netzwerkelementen, die einen Einfluss auf den Wasserfluss haben (Leitungen, Speicher, Pumpen, Schieber, Gebäudeanschlüsse etc.). Dazu wurden bereichs- und unternehmensübergreifende Daten verwendet und miteinander verknüpft, u. a. GIS-Datenbestände zu Infrastrukturen und Verbraucher, aktuelle Sensor- und Betriebsdaten aus dem Prozessleitsystem, Verbrauchsdaten aus digitalen Wasserzählern oder Informationen zu Instandhaltungsarbeiten aus Computerized-Maintenance-Management-System(CMMS)-Software. Die Daten bilden die Grundlage für den Aufbau und die Kalibrierung eines hydraulischen Netzwerkmodells zur Simulation des historischen, aktuellen und künftigen Zustands des Gesamtsystems (Abb. 4.9).

Abb. 4.9 Struktur eines digitalen Zwillings für Wasserverteilnetzwerke



Quelle: nach Conejos Fuertes et al. 2020, S. 706

Der digitale Zwilling dient der Optimierung laufender Betriebsprozesse, der Planung von Betriebsprozessen (z. B. in Hinblick auf Reparatur- und Erneuerungsarbeiten, die Reduktion des Energieverbrauchs oder die Detektion von Anomalien). Außerdem kann das Systemverhalten auch unter Ausnahmbedingungen simuliert werden, was beispielsweise für Schulungszwecke nützlich ist. Für Echtzeitanwendungen ist das detaillierte Modell des Gesamtsystems allerdings zu umfangreich. Aktuell wird daher an einem Algorithmus gearbeitet, der aus dem detaillierten Modell automatisiert ein reduziertes Modell mit wichtigen Netzwerkelementen für Echtzeitanwendungen ableiten kann. Derzeit wird für Echtzeitanwendungen im Realbetrieb noch mit einem vereinfachten Basismodell gearbeitet, das kontinuierlich mit Betriebsdaten aus dem Prozessleitsystem aktualisiert werden muss. Mit diesem Basismodell können Mitarbeiter/innen der Leitwarte beispielsweise das Systemverhalten nach Steuerungseingriffen in Echtzeit simulieren, was die Entscheidungsfindung bei Änderungen der Fahrweise unterstützen kann.

Das Pilotprojekt in der Metropolregion Valencia zeigt die noch bestehenden Herausforderungen für die Umsetzung von digitalen Zwillingen für die Wasserwirtschaft auf. Die Echtzeitfähigkeit detaillierter Modelle von komplexen Versorgungssystemen ist noch nicht gegeben. Außerdem mussten die Daten aus den unterschiedlichen Quellen teilweise mit hohem Aufwand aufbereitet werden, um sie für den digitalen Zwilling nutzbar zu machen. Schließlich müssen die solchen Modellierungen zugrundeliegenden Softwarewerkzeuge für

hydraulische Berechnungen weiterentwickelt werden, um neue Elemente moderner Versorgungssysteme abbilden zu können (Conejos Fuertes et al. 2020, S. 708 f.).

Virtual- und Augmented-Reality-Anwendungen

Die Modellierung und Virtualisierung von Anlagen und Bauwerken durch BIM und digitale Zwillinge ermöglicht perspektivisch auch den Einsatz von Virtual-Reality(VR)- und Augmented-Reality(AR)-Anwendungen in der Wasserwirtschaft (Business Geomatics Online 2021). Solche Anwendungen sind bereits Gegenstand der Forschung oder erster Pilotprojekte. Beispielsweise haben die Emschergenossenschaft und der Lippeverband (EGLV) für ein Pumpwerk vorhandene 3-D-Daten als virtuelle Simulation aufgearbeitet. Das Modell ermöglichte noch vor Fertigstellung und Inbetriebnahme des eigentlichen Bauwerks virtuelle Begehungen für die Belegschaft zur Planung künftiger Betriebsabläufe (Grün 2018). Darüber hinaus können diese Technologien für die Unterstützung der Mitarbeiter/innen bei Aufgaben durch Expert/innen aus der Ferne eingesetzt werden. Dadurch könnte ortsunabhängiges Expertenwissen nutzbar gemacht werden.

4.3 Anwendungsfelder und Potenziale

Mit dem Einsatz von digitalen Technologien in der Wasserwirtschaft sind vielfältige Erwartungen verknüpft. Ihnen wird das Potenzial zugesprochen, die Effizienz von Betriebsabläufen sowie die Arbeitsproduktivität zu erhöhen. Außerdem sollen sie einen wesentlichen Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen leisten, denen sich die Wasserwirtschaft zunehmend ausgesetzt sieht. Hier versprechen fortschrittliche digitale Technologien neue Lösungsansätze für den Umgang mit veränderten Wasserverfügbarkeiten und steigenden Wassernutzungskonkurrenzen. Auch der Gewässerschutz und die Aufrechterhaltung der Trinkwasserqualität können vom Einsatz digitaler Technologien profitieren. Schließlich helfen sie dabei, den Energieverbrauch und die CO₂-Emissionen von Unternehmen der Wasserwirtschaft zu senken.

Wie hoch die Potenziale von digitalen Innovationen für die Wasserwirtschaft tatsächlich sind, an welche Grenzen sie stoßen und welche Herausforderungen für die Umsetzung und Anwendung zu überwinden sind, wird im folgenden Kapitel entlang der wasserwirtschaftlichen Wertschöpfungsstufen diskutiert.

4.3.1 Wassergewinnung und -aufbereitung

Informationen über die Verfügbarkeit und Qualität von Trinkwasserressourcen bilden die Grundlage für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit in der Wasserwirtschaft. Auch wenn Deutschland als wasserreiches Land gilt, sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Trinkwasserressourcen deutlich sichtbar und die Sorge um Wasserknappheit nimmt zu (Kap. 4.1.5.3). Nachhaltige Nutzungskonzepte verlangen nicht nur eine bessere Datenbasis über die vorhandenen Wasserressourcen, sondern auch Vorhersagen zur Entwicklung der Wasserverfügbarkeit, um kurzfristig die wasserwirtschaftlichen Betriebsprozesse besser planen und langfristig die Infrastrukturen entsprechend vorbereiten zu können. Mit der Wasserverfügbarkeit eng verbunden ist auch die Wasserqualität. Nicht nur sind Gewässer in Deutschland grundsätzlich steigenden Belastungen durch Schad- und Spurenstoffe ausgesetzt (Kap. 4.1.5.4), auch führen sinkende Wasserstände im Grundwasser oder in Oberflächengewässern dazu, dass sich die Stoffkonzentrationen zusätzlich erhöhen (Hempel et al. 2021, S. 50 ff.), wodurch der Aufwand sowohl für die Qualitätsüberwachung als auch für die Wasseraufbereitung steigt. Digitale Innovationen können hier nicht nur betriebliche Prozesse optimieren, sondern auch einen Beitrag zur Bewältigung dieser gesellschaftlichen Herausforderungen leisten, wie im Folgenden anhand wichtiger Aufgabefelder im Bereich der Wassergewinnung und -aufbereitung erläutert wird.

Überwachung von Rohwasserquellen und Trinkwasser

Die regelmäßige Überwachung von Trinkwasserschutzgebieten ist gesetzlich vorgeschriebener Teil der Aufgaben von Wasserversorgungsunternehmen (§ 14 Abs. 4 TrinkwV). Die zur Wasserversorgungsanlage gehörenden engeren Schutzzonen sind mindestens vierteljährlich zu begehen (Rautenberg 2019b, S. 861). Ihre Besichtigung soll ggf. vorliegende Gefährdungen der Wassergüte im Schutzgebiet aufdecken. Neben dem Objektschutz für Anlagen der Wasserversorgung wird auch die Qualität des Grund- und Rohwassers durch eine zumeist händisch durchgeführte Probenentnahme mit Schöpfern oder Sonden überwacht (Zigelli 2016, S. 12 ff.).

Digitalisierungsinnovationen setzen hier bei der Datenerhebung und -analyse für die Wasserqualitätsüberwachung an. Für viele physikalische oder einige chemische Parameter der Wasserqualität sind Sensorsysteme etabliert, die eine kontinuierliche Messung und Überwachung der Wassergüte durch die Wasserbetriebe selbst ermöglichen (Kap. 4.2.2). Der Einsatz solcher Sensorsysteme in der Trinkwassergewinnung kann zu einem flexiblen und effizienten Einsatz von Betriebsmitteln führen (Urban/Mosbach 2020, S. 217). Wird die Rohwasserquelle beispielsweise so ausgewählt, dass die Wasserqualität bereits einen guten

Zustand vorweist, kann der Aufwand für die Aufbereitung des Rohwassers zu Trinkwasser minimiert werden (Masse-Dufresne et al. 2021). Eine kontinuierliche Überwachung von Qualitätsparametern ist insbesondere im Zusammenhang mit Extremwetterereignissen wichtig, denn die Konzentrationen von schädlichen Stoffen können nach Starkregenereignissen oder während Trockenphasen stark variieren. Außerdem wird die Beobachtung der Qualität des Rohwassers vor dem Hintergrund steigender Temperaturen in für die Trinkwassergewinnung genutzten Oberflächengewässern und Grundwässern zunehmend wichtig.

Allerdings deckt die aktuelle Sensortechnik nur einen Teil der chemischen, biologischen und mikrobiologischen Parameter ab, die gemäß der TrinkwV durch die Betriebe routinemäßig überwacht werden müssen und für die Grenzwerte einzuhalten sind. Außerdem reagieren manche Sensoren sensibel auf Witterungs- und andere Umgebungsbedingungen, was eine häufige Rekalibrierung oder sogar den regelmäßigen Austausch der Messtechnik nötig macht (Gallé et al. 2020, S.303). Viele Parameter der Wassergüte werden daher nicht in Echtzeit, sondern mit labortechnischen Verfahren gemäß den gesetzlich vorgeschriebenen Häufigkeiten nur diskontinuierlich überwacht (Wricke 2019, S.366). Damit können Grenzwertüberschreitungen nicht unmittelbar erkannt werden, sodass im Kontaminationsfall notwendige Gegenmaßnahmen (z.B. manuelle Prozesseingriffe, Betriebsunterbrechungen, Bevölkerungswarnungen) vielfach nicht kurzfristig erfolgen können. An der Weiterentwicklung von echtzeitfähigen Sensoren wird derzeit gearbeitet (Kap. 4.2.2). Perspektivisch könnte eine engere Zusammenarbeit bzw. ein intensiverer Datenaustausch zwischen Umweltbehörden und Wasserunternehmen erfolgen, indem beispielsweise die in den Betrieben mit bodengestützten Sensorsystemen gewonnenen Daten mit Fernerkundungsdaten von Satelliten und ggf. Drohnen ergänzt werden, um auf diese Weise die Informationsgrundlagen über die Wasserqualitäten zu verbessern. Damit könnte auch ein Beitrag zur vorausschauenden Steuerung von Speicher- und Aufbereitungsanlagen geleistet werden (Holländer et al. 2019, S.55).

Umgang mit Spurenstoffen

Digitalen Technologien wird bei der Erkennung von Spurenstoffen eine wachsende Bedeutung beigemessen. Die etablierten Verfahren sind aufwendig und nur einzelne Stoffe bzw. potenzielle Krankheitserreger können bislang erkannt werden. Onlinesensoren für eine Stofferkennung im Spurenbereich vor Ort und in Echtzeit stehen noch am Anfang, sodass eine breite Anwendung weder kurz- noch mittelfristig zu erwarten ist (Leese et al. 2021, S. 11 f.). Das Anwendungspotenzial digitaler Technologien für die Erkennung von Spurenstoffen ist perspektivisch vor allem dann relevant, wenn ein systematisches wiederkehrendes Risiko für die Trinkwasserqualität oder den Gewässerschutz erkannt wird. Dies



gilt beispielsweise für Regionen mit hoher Viehbesatzdichte, wo ein systematisches Risiko der Überschreitung von Antibiotikagrenzwerten besteht (Hannappel et al. 2016), für Kläranlagenabläufe oder für Mischwassereinleitungen (Leese et al. 2021, S. 11 f.).

Eine umfassende Anwendung von Onlinesensoren für die Analyse einzelner Spurenstoffe ist auch aufgrund der immensen Stoffvielfalt langfristig nicht zu erwarten.⁷¹ Daher könnte perspektivisch vor allem die nicht zielgerichtete Analytik (Kap. 4.2.2) zu einem wichtigen Instrument werden, um Erkenntnisse über die Zusammensetzung einer Wasserprobe mit bekannten und unbekannten Stoffen zu generieren. Dafür ist es jedoch nötig, die Methoden weiterzuentwickeln und ihre Zuverlässigkeit zu erhöhen. Ein verstärktes Monitoring von Arzneimittelrückständen und anderen Mikroverunreinigungen im Roh- bzw. Trinkwasser ist insbesondere für städtische Regionen von Interesse, um das Verständnis der Eintragsquellen und der Auswirkungen solcher Belastungen zu erhöhen (TAB 2019, S. 135 f.). Die Überwachung von Wasserqualitäten ist nicht allein Aufgabe der Trinkwasserbetriebe, sondern auch von Umweltbehörden im Rahmen des Gewässerschutzes und von Betreibern von Kläranlagen im Rahmen der Überwachung der Qualität vom gereinigten Abwasser. Vor diesem Hintergrund dürften solche Technologien nicht nur für Wasserbetriebe, sondern vor allem auch für Wasserbehörde relevant werden.

Umgang mit hoher Nitratbelastung

Die Trinkwasserqualität kann insbesondere durch zu hohe Nitratkonzentrationen beeinträchtigt werden (Kap. 4.1.5.4). Für die Einhaltung der Nitratgrenzwerte können digitale Lösungen die Identifizierung temporärer Nitratbelastungsereignisse unterstützen und beispielsweise zur Prognose von toxischen Algenblüten beitragen. Mithilfe von Sensornetzwerken kann der Gehalt an Stickstoffoxiden sowohl in Rohwasserquellen als auch im aufbereiteten Trinkwasser in Echtzeit quantifiziert werden, wie ein Pilotprojekt in den USA zeigte (dazu und zum Folgenden Jones et al. 2020). Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden kann eine erhöhte Frequenz des Monitorings erreicht werden, wodurch sich temporäre Grenzwertüberschreitungen besser erkennen lassen. Auf der Basis der Echtzeitinformationen können zielgerichtete Maßnahmen entwickelt und die Kosten der Aufbereitung von Trinkwasser minimiert werden. Mit dem ergänzenden Einsatz von KI-basierten Datenauswertungsmethoden lassen sich außerdem toxische Algenblütenereignisse (Sagan et al. 2020) und die räumliche und zeitliche Verteilung des Nitrats im Grundwasser besser verstehen und vorhersagen (DVGW-Technologiezentrum Wasser 2020).

⁷¹ Allein in Europäischen Union werden etwa 140.000 chemische Substanzen produziert oder importiert (Leese et al. 2021, S. 12).

Durch eine verstärkte Datenerfassung zum Düngepraxisverhalten der Landwirte sowie weiteren Daten zu Einflussfaktoren der Nitratversickerung (z.B. Klima- und Wetterdaten, Daten zur Bodenbeschaffenheit) könnten künftig lokale Wirkungszusammenhänge zwischen Düngeverhalten und Wasserqualität analysiert und besser verstanden werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 97). Eine datenbasierte Modellierung eines Wassereinzugsgebiets auf Grundlage der erhobenen Daten würde es erlauben, sowohl Risikoregionen als auch die Treiber der Überschreitung von Grenzwerten (Pennino et al. 2020) ebenso wie Landflächen mit hoher Nitratadsorptionskapazität (Singh/Horne 2020) zu identifizieren. Gegebenenfalls lassen sich darauf aufbauend Kooperationsvereinbarungen zwischen land- und wasserwirtschaftlichen Betrieben effizienter gestalten und perspektivisch finanzielle Anreize für einen ökologischeren Nitratsatz im landwirtschaftlichen Betrieb setzen (Oelmann/Czichy 2020, S. 97). Bislang liefern Stoffstrom- bzw. Eintragsmodelle allerdings keine rechtsverbindlichen Ergebnisse, die z. B. Vor-Ort-Kontrollen ersetzen könnten, und eine solche Funktionalität ist aus heutiger Perspektive auch noch nicht absehbar (Holländer et al. 2019, S. 57).

Mit einer Humus- und Nitratbilanzierungssoftware und auf Grundlage von Daten aus Grund- und Sickerwassermessstellen lassen sich auch die Auswirkungen von Nitratreduktionsmaßnahmen (z. B. extensive Grünlandnutzung) auf die Nitratkonzentrationen in einer Trinkwasserschutzzone bewerten und die Effekte weiterer Maßnahmen prognostizieren (Ihling/Petzold 2020). Bislang werden solche Studien im Rahmen von universitären Forschungsprojekten (Ihling/Petzold 2020; Pennino et al. 2020; Singh/Horne 2020) oder durch Umwelt- und Wasserbehörden (Ihling/Petzold 2020; Wriedt et al. 2019) durchgeführt und gehen über die Kapazitäten der meisten deutschen Wasserunternehmen hinaus. Zudem sind für die Überwachung der Qualität von Oberflächengewässern regionale Wasser- bzw. Umweltbehörden zuständig, sodass eine enge Abstimmung zwischen diesen und den Wasserbetrieben erforderlich ist.

Monitoring Wasserverfügbarkeit und Wassernutzungskonkurrenzen

Wasserunternehmen sehen sich zunehmend klimatischen Veränderungen ausgesetzt, die sich u. a. durch Extremwetterlagen wie längere Hitze- und Trockenperioden oder Starkregenereignisse manifestieren (Kap. 4.1.5.3). Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland planen seit den Erfahrungen des niederschlagsarmen und heißen Sommers 2018 überwiegend technische Maßnahmen wie z. B. die Steigerung der Aufbereitungskapazitäten für Trinkwasser, die Erhöhung der Durchsatzleistung von Filteranlagen oder den Bau von zusätzlichen Förderbrunnen oder Wassertransportleitungen (Simon et al. 2019, S. 19). Digitale Lösungen könnten insbesondere für die Bewältigung von



Wasserengpässen während Trockenperioden relevanter werden (Kap. 4.4.2) und bauliche Maßnahmen ergänzen.

Auch wenn das Problem der Wasserknappheit infolge einer signifikanten Zunahme von Hitze und Trockenheit nicht alleine mit digitalen Lösungen zu bewältigen sein wird, kann die Erhebung und Nutzung von Daten zu Wasserständen insbesondere kurzfristig Abhilfe schaffen. Stellen Umweltämter Information über Grundwasserstände bzw. Wasserdargebote zur Verfügung, wie es u. a. das Bayerische Landesamt für Umwelt mit seinem Niedrigwasserinformationsdienst tut⁷², können Entscheidungen zur schonenden Nutzung der Ressource Wasser frühzeitig und koordiniert getroffen werden (Riedel et al. 2021, S. 20). Die Nutzung von Echtzeitdaten und Wasserfluss- bzw. Wasserbedarfsprognosen erhöht die Fähigkeit der Wasserverbraucher, beispielsweise in der Landwirtschaft Bewässerungsentscheidungen zu treffen, die nicht nur erwartete Effekte auf die Produktion, sondern auch soziale und ökologische Werte insbesondere in Zeiten von Trockenheit berücksichtigen (Ellison et al. 2019). Bislang setzen vor allem Staaten bzw. Regionen auf digitale Technologien zur Beeinflussung des Wasserverbrauchs, die bereits heute mit gravierenden Wasserversorgungsengpässen zu kämpfen haben (z. B. Taiwan, Australien, Kalifornien).

Instandhaltung

Die Zustandserfassung von Trinkwasserbrunnen erfolgt bisher meist über Pumpentests sowie die Inspektion von Korrosion und Alterung mittels Videoüberwachung. Die so ermittelten Daten bzw. Videobilder werden manuell von technischen Fachkräften ausgewertet. Mit einer sensortechnischen Erfassung und Auswertung größerer Datenmengen in Echtzeit können diese Aufgaben stärker automatisiert werden. Hierdurch werden eine höhere Präzision in der Zustandsbestimmung und eine effizientere langfristige Planung der Instandhaltung von Infrastrukturen erwartet. Erste Erprobungen einer KI-gestützten und an das Prozessleitsystem angeschlossenen Software in Berlin dürften Ergebnisse in naher Zukunft liefern (Digital Water City o. J.a).

4.3.2 Wasserverteilung

Im Gegensatz zu den eher werksgebundenen Infrastrukturen wie Brunnen, Wasserwerke oder Kläranlagen sind die in der Fläche verteilten Rohrleitungsnetze messtechnisch in der Regel weniger gut ausgestattet (Kap. 4.2.1). Ein verstärkter Einsatz von Sensorsystemen und Datenanalyse in den Wasserverteilnetzen bietet daher vielfältige Anwendungspotentiale für die Qualitätsüberwachung, Betriebsoptimierung und für Ressourceneinsparungen.

72 www.nid.bayern.de/ (15.3.2023)

Überwachung der Trinkwasserqualität in Verteilnetzen

Der kontinuierlichen Überwachung der Trinkwasserqualität in Verteilnetzen wird eine zunehmende Bedeutung beigemessen. Die zeitweisen hohen Temperaturen im Sommer begünstigen das Wachstum von wasserbürtigen Keimen in Trinkwasserleitungen (Kahlenborn et al. 2021, S.66). Außerdem fließt das Trinkwasser bei sinkendem Wasserverbrauch (z. B. in Zeiten von Wasserknappheit) nur langsam durch die Leitungen, was für die Entwicklung von Keimen ebenfalls förderlich ist (Hempel et al. 2021, S. 53). Nicht zuletzt ermöglicht eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung die frühzeitige Detektion von Kontaminationen z. B. im Fall von Rohrleitungsschäden oder von kriminellen oder terroristischen Handlungen.

Digitale Innovationen für eine verbesserte Gefahrenerkennung und -alarmierung beim Monitoring der Wasserqualität werden vor allem durch eine geschickte Kombination fortschrittlicher Sensortechnik und Datenanalyseverfahren erwartet. Einige Beispiele:

- Im Forschungsprojekt »SMaRT Online^{WDN} – Frühwarn- und Sicherheitsmanagementsystem für Wasserversorger« (Laufzeit: 2012 bis 2015) wurde ein Simulationswerkzeug zur optimalen Platzierung von Sensoren zur Qualitätsüberwachung in Trinkwasserversorgungsnetzen entwickelt. Im Falle einer Verunreinigung können der Ort der Eintragsquelle der Verschmutzung eingegrenzt sowie die weitere Ausbreitung im Versorgungsnetz simuliert werden (Fraunhofer IOSB o. J.a). Dies ermöglicht schnelle Gegenmaßnahmen (z. B. die Absperrung betroffener Netzteile).
- Im Forschungsprojekt »ResiWater – Sichere Sensornetzwerke und Analyse-Tools« (Laufzeit: 2015 bis 2018) wurde u. a. untersucht, welche Sensoren und Sensorkombinationen für die automatisierte Erfassung von Kontaminationen am besten geeignet sind (Fraunhofer IOSB o. J.b).
- Im Forschungsprojekt »Online-Monitoring und digitale Steuerung in Trinkwasserversorgungssystemen« (Laufzeit: 2020 bis 2023) soll durch die Weiterentwicklung gängiger Analyseverfahren (Fluoreszenzspektroskopie, Durchflussszytometrie) ein Sensorsystem zur Echtzeitüberwachung der Wasserqualität etabliert werden. Basierend auf den Messwerten soll zudem ein Algorithmus zur schnellen Detektion von Anomalien, zur Simulation in Verteilnetzen und zur Generierung automatisierter Antworten auf Veränderungen (z. B. Desinfektionsdosis, Öffnung/Schließung von Ventilen, Änderungen in der Fließgeschwindigkeit) entwickelt werden (TUHH o. J.).

Installation, Betrieb und Instandhaltung von Sensorsystemen zur Überwachung der Wasserqualität sind mit hohen Anschaffungs- und Betriebskosten verbunden, sodass ihr Einsatz auch unter betriebswirtschaftlichen Aspekten abgewogen werden muss. Studien, die Kosten-Nutzen-Vergleiche bezüglich eines Nutzens für Unternehmen unterschiedlicher Größen aufstellen, liegen nicht vor.



Instandhaltung sowie Ermittlung und Ortung von Leckagen

Leckagen führen zu Wasserverlusten und damit zu höheren Kosten für die Wasserversorgung. Außerdem bergen sie die Gefahr für Verunreinigungen des Trinkwassers durch Rücksaugen oder von Ausspülungen mit der Folge von Setzungen. Größere Leckagen können einen Druckabfall im Leitungsnetz bewirken und zu Versorgungseinschränkungen führen (Rautenberg 2019b, S. 862 f.).

Da in Verteilnetzen eine kontinuierliche Messung der Wassermengen derzeit nicht flächendeckend, sondern in der Regel allenfalls an ausgewählten Stellen stattfindet, sind Wasserversorger meist nicht in der Lage, Leckagen anhand von Messdaten ausfindig zu machen (Oelmann/Czichy 2020, S. 26). Die Ermittlung und Ortung von Leckagen erfolgt gegenwärtig mit folgenden Methoden (Rautenberg 2019b, S. 865 ff.):

- › Bei der Nullverbrauchsmessung wird der Zufluss in ein Netzabschnitt in Zeiten gemessen, in denen davon ausgegangen wird, dass kein regelmäßiger Wasserverbrauch stattfindet (z. B. zwischen zwei und vier Uhr nachts). Alternativ können kontinuierliche Zuflussmessungen vorgenommen werden, wobei plötzliche Wassermehrverbräuche auf eine Leckage hindeuten. Eine Lokalisierung der Leckstelle ist mit diesen Methoden nur grob möglich.
- › Verfahren zur Lokalisierung von Leckstellen beruhen darauf, das Geräusch des ausströmenden Wassers zu orten. Dazu wird das Rohrnetz an zugänglichen Stellen mit tragbaren Horchdosen, Horchrohren oder Geräuschmessgeräten abgehört. Die Schadensstelle kann so auf einen Leitungsabschnitt zwischen zwei Messpunkten oder auf eine bestimmte Anschlussleitung eingegrenzt werden. Zur Bestimmung von Leckstellen im Untergrund werden tragbare Bodenmikrophone eingesetzt (Rautenberg 2019b, S. 867 f.).

Ermittlung von Leckagen mittels Prozessleitsystem und Messtechnik

Größere Wasserunternehmen überwachen die Rohrleitungsnetze in der Regel zentral durch ein Prozessleitsystem (dazu und zum Folgenden Klosok-Bazan et al. 2021, S. 41189). Allerdings ermitteln Prozessleitsysteme Leckagen erst ab einem gewissen Umfang des Wasserverlustes (Rautenberg 2019b, S. 867 f.). Durch digitale Innovationen sollen künftig auch kleinere Leckagen automatisiert und zuverlässig erkannt werden können. Der Fokus liegt auf der Entwicklung von verteilter echtzeitfähiger Messtechnik mit dazugehöriger Datenauswertung. Dies geschieht anhand eines kontinuierlichen Abgleichs der Echtzeitdaten mit Wasserbedarfsprognosen. Ziel ist es, die Kosten, die durch Leckagen entstanden wären, einzusparen (Benítez et al. 2019; Gupta/Kulat 2018; Kapelan et al. 2020, S. 8 ff.). Zur automatisierten Leckageortung gibt es eine Vielzahl von Forschungs- und Entwicklungsprojekten und erste Systeme werden bereits in der Praxis erprobt bzw. sind marktverfügbar. Einige Beispiele:

- Die Software des Unternehmens PipePredict nutzt die Messdaten bereits vorhandener Sensorik, um KI-basierte Algorithmen zu trainieren. Die Algorithmen sollen dann in der Lage sein, Veränderungen im Rohrnetz und somit Leckagen in Echtzeit zu erkennen. Durch eine optimierte Platzierung zusätzlicher Sensorik kann die Genauigkeit der Ortung verbessert werden.⁷³
- In zwei Pilotanlagen in Chile konnte mit der Erhebung und Analyse von verfügbaren Echtzeitdaten aus dem Prozessleitsystem sowie von Verbrauchsdaten durch Optimierungsalgorithmen und Frühwarnsysteme der Wasserverlust um rund 8 % reduziert werden (Cassidy et al. 2021).
- Eine Ursache für Leckagen kann ein zu hoher Wasserdruck in den Rohrleitungen sein. Hier können Druckmanagementsysteme Abhilfe schaffen, die aus im Verteilnetz optimal platzierten Drucksensoren und druckmindernden Ventilen aufgebaut sind (Gupta/Kulat 2018, S.3258; Kapelan et al. 2020). Durch den Einsatz solcher Systeme konnten in Großbritannien und Malaysia Leckagen um 26 bis 36 % und die Rohrbruchrate um 40 bis 48 % reduziert werden (UK Water Partnership 2019, S. 18).

Erforderlich für die Erschließung der Potenziale ist eine hohe räumliche und zeitliche Dichte an Zustandsdaten, die mithilfe von KI-Methoden ausgewertet werden, um Alterungsvorgänge und voraussichtliche Mängel im Verteilnetz zu identifizieren und eine vorausschauende Wartung zu ermöglichen. In Syracuse im Staat New York (USA) konnten mit der Anwendung eines Systems zur Vorausschau von Leckagen 52 Stellen identifiziert werden, die einem solchen Risiko ausgesetzt waren. Davon erlitten 33 in einem Zeitraum von 2 Jahren tatsächlich einen Schaden (Kumar et al. 2018, S. 3). Ungewöhnlich hohe Wasserverluste können ggf. auch mithilfe von satellitengestützten Sensorsystemen erkannt werden, wie ein Pilotprojekt in England aufgezeigt hat (Suezwater 2017). Die beim Synthetic-Aperture-Radar (SAR) verwendete Mikrowellenstrahlung ist empfindlich für Feuchtigkeit, sodass mit Wasser vermischte Erde detektiert werden kann. Durch Überlagerung der Satellitenbilder mit GIS-Karten kann eine genaue Lokalisierung erfolgen (Suezwater o. J.).

Ermittlung von Leckagen mithilfe von digitalen Wasserzählern

Auch Informationen aus digitalen Wasserzählern können Hinweise auf Wasserverluste durch Leckagen oder Rohrbrüche liefern. In einem Forschungsprojekt unter Beteiligung der Stadtwerke Hersbruck wurden Daten aus digitalen Wasserzählern sowie weiteren im Verteilnetz vorhandene Sensoren zum Training eines KI-basierten Algorithmus zur Leckageortung herangezogen. Als Herausforderung hat sich insbesondere das Datenschutzrecht erwiesen, da alle involvierten Kund/innen der Datenverwertung einzeln zustimmen mussten. Daher wurden vorerst nur Daten aus unternehmenseigenen Messstellen sowie von

⁷³ <https://pipepredict.com/de/produkte/> (29.11.2022)



ausgewählten Kunden genutzt. Eine Ausweitung der involvierten Kunden soll erst erfolgen, wenn der Nutzen des Algorithmus erkennbar wird (Oelmann/Czichy 2020, S. 116).

Mit digitalen Wasserzählern können außerdem Grundstückseigentümer über mögliche Leckagen im Hausnetz zeitnah informiert werden, beispielsweise wenn die Wasserverbräuche nachts überdurchschnittlich hoch sind (Monks et al. 2019). In Rahmen eines Pilotprojekts in Sacramento (USA) wurden private Haushalte über eine Onlineplattform mit Informationen zu ihrem Verbrauchsverhalten und Warnungen über mögliche Leckagen versorgt. Auf diese Weise konnten Leckagen im Durchschnitt 4 Tage schneller behoben werden als im Normalfall ohne Warnung (Schultz et al. 2018). In einem ähnlichen Pilotversuch in South East Queensland (Australien) konnten die Wasserverluste durch Leckagewarnungen um 89% reduziert werden (Britton et al. 2013).⁷⁴ In Deutschland berichtete ein Wasserzweckverband, der gegenwärtig seine Kund/innen mit digitalen Wasserzählern ausstattet, dass mit den ersten 400 installierten Zähler in der Anfangsphase bereits 21 Leckagen ermittelt wurden (Oelmann/Czichy 2020, S. 118).

Monitoring und Beeinflussung des Wasserverbrauchsverhaltens

In verschiedenen Untersuchungen wurde sich mit der Frage beschäftigt, ob Echtzeitinformatoren zum Wasserverbrauch ein wassersparendes Verhalten bei Verbraucher/innen befördern könnten. Dazu wurden mit digitalen Wasserzählern Echtzeitinformatoren zu Wasserverbrauch und Kosten erfasst und über eine Onlineplattform oder eine App an die Verbraucher weitergegeben (Cominola et al. 2020). In einer Studie mit 120 Haushalten in Sydney (Australien) konnten so tägliche Wassereinsparungen von durchschnittlich 4,2% erreicht werden (Liu et al. 2017). In einer weiteren Untersuchung in Großbritannien konnte der Wasserverbrauch über 12 Monate um 8% reduziert werden (Aquatech 2018). In Leeuwarden stellte der niederländische Wasserbetreiber Vitens einem Teil seiner Kunden eine App⁷⁵ zur Verfügung, die auf Grundlage von Daten aus digitalen Wasserzählern über ein Spiel zum Wassersparen anregen soll. Bei Wassereinsparungen während Stoßzeiten erhalten die Spieler/innen Vorteile im Spiel. Dadurch konnte eine durchschnittliche Reduktion der Wasserverbräuche um 7% erreicht werden (Aquatech 2018). Der Forschungsstand ist allerdings noch unausgereift. So fehlt es an Langzeitstudien, um eine dauerhafte Wirkung der Einspareffekte zu belegen. Außerdem müssen die Ursachen (Informationsbereitstellung, Gamification) für potenzielle Verhaltensänderungen eingehender untersucht werden. Auch stellt sich die Frage, welche Wirkung solche digitalen Lösungen auf weniger technologieaffine Verbraucher/innen

⁷⁴ Für eine Übersicht der Ergebnisse auch Randall/Koech (2019).

⁷⁵ <https://waterbattle.nl/water-battle-en/> (15.3.2023)



ausüben könnten. Schließlich wäre zu prüfen, ob mit kostengünstigeren Kommunikationsmaßnahmen ähnliche hohe Einsparungen beim Wasserverbrauch erreicht werden könnten (Stein et al. 2023, S. 1280 f.).

Energieeinsparung

Mit Instrumenten zur Modellierung und Simulation können Maßnahmen zur Optimierung des Rohrdrucks in Echtzeit und zur Netzentkoppelung erprobt werden. Mit solchen Maßnahmen sind Stromeinsparungen von 10 bis 15 % und in Einzelfällen von über 60 % möglich (DWA 2018c, S. 4). Insbesondere stellt die Optimierung des Pumpenbetriebs eine zentrale Stellschraube dar, da Pumpensysteme bis zu 90 % zum Energiekonsum der wasserwirtschaftlichen Aktivitäten beitragen. Durch die Erhebung von Daten in Echtzeit und eine darauf basierende intelligente Steuerung von Pumpen kann ihr Betrieb optimiert werden. Beispielhaft hierfür ist die aus einem EU-Forschungsprojekt hervorgegangene Software »WatEner«, welche eine Managementplattform bereitstellt, um ein Betriebsmonitoring von Trinkwassernetzen zu ermöglichen. »WatEner« dokumentiert Betriebsdaten und ermöglicht eine Prognose des nächsttägigen Wasserbedarfs auf der Basis einer KI-basierten Datenauswertung. Damit soll die Effizienz der Netzpumpensteuerung gesteigert werden (Aquatech 2018). Ein Versuch in Brasilien zeigte, dass die Regulierung der Fließgeschwindigkeit mit KI-basierten Auswertemethoden den spezifischen Energieverbrauch von Pumpen im Wasserverteilungsnetz um bis zu 80 % reduzieren konnte (Moreira et al. 2021). Die mehrfach ausgezeichnete KI-basierte Software eines kanadischen Start-ups nutzt Daten von Prozessleitsystemen, um Einstellungen von Pumpen in Echtzeit zu optimieren und Energiekosten einzusparen. Mit ihrem Einsatz konnten in einem Pilotprojekt Kosteneinsparung von 22 % erreicht werden (Aquatech 2018). Ramos et al. (2020) zeigten in ihrer Studie, dass anhand einer sensorbasierten Überwachung der Verteilnetze auf Wasserverluste in Echtzeit neben der Strommenge auch die Treibhausgasemissionen erheblich reduziert werden konnten. Nicht zuletzt können durch digitale Wasserzähler induzierte Verhaltensänderung beim Wasserverbrauch dazu beitragen, den Energieverbrauch zu reduzieren (Monks et al. 2019, S. 845).

Zwar sind die Energieeinsparpotenziale durch Digitalisierung in der Trinkwasserversorgung nicht unerheblich. Allerdings lassen sich Einsparungen nicht allein durch die Optimierung von Betriebsabläufen mithilfe digitaler Technologien realisieren. Auch neue technische Verfahren und Methoden, wie der Einsatz von Pumpen als Turbinen in der Trinkwasserversorgung (DWA 2018c, S. 2; Geidel et al. 2021, S. 31), die Anpassung der technischen Infrastrukturen (z. B. Dimensionierung der Verteilnetze), die Auswahl der Aufbereitungsverfahren (Urban/Mosbach 2020, S. 216 f.) oder die Nutzung der Abwasserwärme zur Ergänzung von Strom oder Wärme, können wesentlich zu Energieeinsparungen



beitragen. Nur durch die Kombination von digitalen Lösungen und technischen Anpassungen lassen sich die Energieeinsparungspotenziale vollständig erschließen. Darüber hinaus sind die meisten Wasserbetriebe aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht in der Lage, in hochwertige Pumpenoptimierungsprogramme zu investieren. Nur selten wird der Fokus auf einfache und praktische Steuerungsmethoden für den Betrieb von Pumpen gelegt, die sich mit der Software bestehender Prozessleitsysteme umsetzen lassen (Salomons/Housh 2020).

4.3.3 Abwasserableitung und -reinigung

Digitale Innovationen können sowohl bei der Abwasserableitung (Bewirtschaftung, Inspektion und Instandhaltung von Kanalnetzen) als auch bei der Abwasserreinigung in Kläranlagen Vorteile für Wasserbetriebe und Gesellschaft generieren. Darüber hinaus haben diverse Forschungsprojekte den Nutzen digitaler Lösungen für Energieeinsparungen sowie für die Optimierung der Stromerzeugung aus Klärschlamm aufgezeigt.

Digitale Kanalnetzbewirtschaftung

Die Kanalnetze für die Abwasserableitung sind gegenwärtig in den meisten Fällen nur spärlich mit Sensormesstechnik ausgestattet. Vielfach erfahren Betreiber erst durch entsprechende Meldungen von Anwohnern oder Einsatzkräften, dass Störungen im Kanalnetz aufgetreten sind und es zu Überläufen gekommen ist (Hempel et al. 2021, S. 174).

Grundvoraussetzung für die Anwendung digitaler Lösungen ist die Ausstattung von Kanalnetzen mit der entsprechenden Sensormesstechnik sowie – sofern nicht auf öffentliche Telekommunikationsnetze zurückgegriffen werden kann – der Aufbau von kabel- oder funkgebundenen Übertragungsnetzen für die Vernetzung und ggf. Anbindung der Sensorsysteme an ein zentrales Prozessleitsystem. Durch ein kontinuierliches Monitoring von Kanalnetzen kann die Steuerung der Abflüsse optimiert werden, außerdem wird eine bessere Überwachung von illegalen Einträgen in die Kanalisation ermöglicht.

Optimierung der Steuerung von Abflüssen und Regenwasser

Auf Grundlage einer sensorbasierten Echtzeitüberwachung der Auslastung der Kanalisation in Mischsystemen kann die Steuerung der Abflüsse optimiert werden. Wichtig ist dies beispielsweise bei Starkregenereignissen, um den Kläranlagenzufluss dynamisch anzupassen (LAWA 2017, S. 224). Können nämlich die außergewöhnlich hohen Mischwassermengen in Kläranlagen nicht mehr ausreichend behandelt werden, sinkt die Wasserqualität in den Gewässern, in die das

ungereinigtes Wasser eingeleitet wird. Mit einer echtzeitgesteuerten Bewirtschaftung von Kanalnetzen und Kläranlagen können Stauräume besser genutzt werden und so problematische Stoffeinträge nach Starkregenereignissen erheblich reduziert werden (Holländer et al. 2019, S. 52). Bei Niedrigwasserverhältnissen während längerer Trockenperioden kann hingegen der Fall eintreten, dass das gereinigte Abwasser ggf. unzureichend verdünnt wird, wenn es in Flüsse mit sehr niedrigem Wasserstand eingeleitet wird. Auch hier kann eine Anpassung der Abflusssteuerung in Echtzeit durch eine bessere Nutzung von Speicherkapazitäten dazu beitragen, dass insbesondere kleine und mittlere Flussläufe vor Verunreinigungen besser geschützt werden (Engelhart et al. 2020, S. 256).

Derzeit marktreife Softwarelösungen ermöglichen beispielsweise die Steuerung der Kanalsystemauslastung in Abhängigkeit von aktuellen Regendaten. Ein Ziel ist es, durch die optimale Nutzung von Speicherkapazitäten Mischwasserüberläufen entgegenzuwirken (HST Systemtechnik 2020b). Die Datenauswertung geschieht je nach Lösung mittels einfacher Algorithmen bis hin zu KI-basierten Datenanalysen (Dietz 2021). In der Stadt Nürnberg beispielsweise wird eine digitale Kanalnetzbewirtschaftung seit vielen Jahren praktiziert. Mithilfe der automatisierten Überwachung von aktuellen Ist-/Sollwerten im System und dem Abgleich mit historischen Daten können die Abflüsse bei Starkregenereignissen feiner gesteuert werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 113). In Cincinnati (USA) konnten mit dem Aufbau eines Sensornetzes mit 1.000 Messstellen und einer auf Wetterprognosedaten basierten Datenauswertung innerhalb der ersten beiden Jahre die Zahl der Überlaufereignisse um 80 % sowie die Wartungskosten um über 40 % reduziert werden (Ahlvers 2022, S. 11 ff.). Im Projekt »i-SEWER« (Laufzeit: 2022 bis 2024) im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme »Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Digitalisierung« wird derzeit eine Methodik zur Entwicklung einer skalierbaren, autonomen und KI-basierten Kanalnetzsteuerung zur Reduzierung von Abwasserüberläufen aus der Mischwasserkanalisation erarbeitet. Ein solches System wird dann in Freiburg erprobt (Digital GreenTech o. J.). Vor dem Hintergrund klimawandelbedingter längerer Dürre- oder Hitzeperioden wird eine angepasste Kanalnetzsteuerung perspektivisch auch für das Speichern von Niederschlagswasser zur Bewässerung und Stadtkühlung zunehmend wichtiger.

Mit Assistenzsystemen zum Betrieb von Kanalnetzen können u. a. Unter- oder Überlastungen von einzelnen Rohrabschnitten identifiziert, Rohrspülungsstrategien zur Schonung der Infrastrukturen entwickelt oder der Energieverbrauch reduziert werden. Diese Ziele werden bei der Entwicklung und Erprobung des mobilen Druckrohratlas »SmartLISA« für die Abwasserkanalisation in Berlin verfolgt (Kap. 4.2.6). Mit dem Assistenzsystem können Mitarbeiter/innen auch in anspruchsvollen Lagen (z. B. bei witterungsbedingt notwendigen Umverteilungen der Abwassermengen) schnell und ortsunabhängig auf



aktuelle Informationen über die Auslastung der Pumpwerke und Leitungen zugreifen, außerdem können Handlungsszenarien getestet werden. Allerdings erweist sich die Entwicklung und Umsetzung solcher Assistenzsysteme insbesondere für Bestandsanlagen als sehr zeit- und ressourcenintensiv (Höchel 2022, S. 41).

Digitale Lösungen zur Optimierung der Kanalnetzbewirtschaftung können wirtschaftlicher sein als der Neubau zusätzlicher Infrastrukturen bzw. Speicherkapazitäten (Johnson 2022, S. 22 f.), außerdem ermöglichen sie schnellere Antworten auf Herausforderungen wie Starkregenereignisse, während die Planungshorizonte für eine Erweiterung der physischen Infrastrukturen bis zu mehreren Jahrzehnten erreichen. Ein Beispiel in Deutschland ist die Stadt Siegen, wo für nahezu alle 16.000 Sinkkästen der Straßenentwässerung u. a. Position und Zeitpunkt der letzten Reinigung digital erfasst wurde. Durch eine Gefährdungsklassifizierung und die Verknüpfung mit Niederschlagsprognosen können mithilfe eines entsprechenden Analysealgorithmus die Wartungsarbeiten gezielter vorgenommen und Personal- und Anfahrkosten eingespart werden. An ausgewählten Standorten unterstützen einfache Füllstandsensoren die Bewertung der akuten Gefährdungsanalyse. Bei drohendem Starkregen können die Kästen präventiv gereinigt werden, um Überschwemmungen auf ein Minimum zu reduzieren (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2019).

Überwachung illegaler Einträge in das Abwasserkanalisationssystem

Leiten Gewerbe- oder Industriebetriebe ihre Abwässer (ggf. nach einer Vorbehandlung) in die kommunalen Kanalisationsnetze und Kläranlagen ein (Indirekteinleitung), so bedarf dies einer Genehmigung durch die zuständigen Behörden. Außerdem sind Qualitätsanforderungen zu beachten, insbesondere wenn die Abwässer mit Schadstoffen belastet sind, die in kommunalen Kläranlagen nicht oder nur unzureichend eliminiert werden (§ 58 WHG). Werden die Anforderungen nicht eingehalten, so drohen Schäden für die Abwasseranlagen, das Personal oder die Umwelt.⁷⁶

Digitale Lösungen können künftig einen Beitrag zur Überwachung bzw. Bekämpfung von illegalen Einleitungen in das öffentliche Abwasserkanalisationssystem leisten. Bislang erfolgt die Prüfung der Einhaltung von Abwassergrenzwerten anhand von Indirekteinleiterkatastern. Diese Verzeichnisse enthalten Daten aller im Einzugsgebiet einer Kläranlage angesiedelten abwasserproduzierenden Gewerbe- und Industriebetriebe, wobei die Daten von den Betrieben im Rahmen der Selbstüberwachung durch Betriebsbegehungen oder Probenahmen erhoben werden. Darauf aufbauend wird das Gefahrenpotenzial ermittelt und die Frequenz der angeforderten Probenahmen festgelegt (DWA 2019b).

⁷⁶ Wird eine Erlaubnis erteilt bzw. entspricht das Abwasser ggf. nach Behandlung auf einer Betriebskläranlage bereits den Anforderungen aus § 57 WHG, kann es auch direkt in ein Gewässer eingeleitet werden (Direkteinleitung).

Mit der Automatisierung von Messungen und der Übermittlung von Daten zu Stoffeinträgen an Abwasserentsorger und/oder Behörden könnte die Einhaltung von Grenzwerten für Schadstoffe systematisch überwacht werden. Ein stringenter Gewässerschutz und Kostenersparnisse durch eine Anpassung des Kläranlagenbetriebs könnten so erreicht werden (Holländer et al. 2019, S. 53).

Darüber hinaus könnten Abwasserbetriebe perspektivisch mögliche Kontaminationen in der Abwasserkanalisation selbst identifizieren und entsprechende Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden für Infrastrukturen und Ökosysteme vornehmen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts konnten auf der Grundlage von Sensormessungen zum pH-Wert und zur elektrischen Leitfähigkeit bekannte industrielle Schadstoffe in der Abwasserkanalisation einer großen europäischen Stadt mit einer Präzision von bis zu 96 % detektiert und die Quelle der Kontamination lokalisiert werden (Buras/Solano Donado 2021, S. 16). Vor allem der Einsatz von Infrarotkameras (Lepot et al. 2017), Temperatursensoren (Digital Water City o. J.b) oder Sensoren zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit (Digital Water City o. J.c) werden – teilweise in Kombination mit einer automatischen Probenahme – zur Detektion illegaler Einleitungen in Abwasserkanalisationssysteme für vielversprechend gehalten. Allerdings existieren bislang noch keine praxistauglichen und wirtschaftlichen technischen Lösungen, an der Entwicklung wird jedoch im Rahmen internationaler Forschungsprojekte intensiv gearbeitet (DECHEMA 2021).

Inspektion und Instandhaltung von Kanalnetzen

Der Einsatz von Robotersystemen für die Reinigung wie auch für die Inspektion von Kanalnetzen ist in der Abwasserwirtschaft bereits etabliert und wird im Regelwerk der DWA (o. J.) beschrieben. Grundlage der Kanalinspektion ist die optische Erfassung und Zustandsbewertung des Kanalrohrs. Die Datenaufnahme erfolgt anhand von Kameras, die auf fernsteuerbaren kabelgebundenen Robotern installiert sind (Abb. 4.10).

Abb. 4.10 Einsatzwagen und Ausstattung für Robotereinsatz im Kanalnetz



Quelle: ProKASRO Mechatronik GmbH

Die Auswertung der Videobilder und Zustandsbewertung erfolgt derzeit meist manuell durch Fachkräfte, was eine zeitintensive Aufgabe darstellt. Die Automatisierung dieser Aufgabe steht derzeit im Fokus von Forschungs- und Pilotprojekten beispielsweise im Vereinigten Königreich, in Finnland, Australien, Österreich (Kapelan et al. 2020, S. 9) und auch in Deutschland. Beispielsweise wurde im Projekt »AUZUKA« der Berliner Wasserbetriebe zwischen 2016 und 2022 ein KI-basiertes Assistenzsystem zur Schadenserkennung entwickelt, das Schadensbilder mit einer Trefferquote von durchschnittlich über 80 % erkennen und markieren kann. Die Fachkräfte können ihre Auswertung auf Grundlage der KI-Vorerfassung durchführen und entsprechende Ergänzungen und Korrekturen vornehmen. Das Assistenzsystem wird bei den Wasserbetrieben im Rahmen einer Testanwendung seit September 2022 betrieblich genutzt (Berliner Wasserbetriebe o. J.).

Weitergehende Lösungen, die sich gegenwärtig in der Umsetzung und Erprobung befinden, zielen auf die virtuelle Begehung von Abwasserkanälen ab. Beispielsweise bietet der Wasserwirtschaftsverband Emschergenossenschaft und Lippeverband (ELGV) Kanalinspektoren die Möglichkeit, für einen Teil des Abwasserkanalnetzes Daten in 2-D auf dem Bildschirm oder in 3-D mit einer VR-Brille zu visualisieren (umweltwirtschaft.com 2019). Im erwähnten



Projekt »AUZUKA« wurde ein Funktionsmuster eines 3-D-Inspektionsroboters realisiert. Erste im Projekt erzeugte Testaufnahmen zeigen das Potenzial hochauflöser 3-D-Aufnahmen für die Kanalinspektion (BWB o. J.).

Durch den Einsatz von Assistenzsystemen zur (teil)automatischen Erkennung von Kanalschäden können perspektivisch die Fehleranfälligkeit des Prozesses reduziert und Kosten eingespart werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 108), außerdem kann ein Beitrag zur Bewältigung des Fachkräftemangels geleistet werden.

Optimierung der Betriebsprozesse in Kläranlagen

Die Abwasserbehandlung ist vielfach automatisiert und digitale Technologien werden im Regelbetrieb eingesetzt. Innovationen in diesem Bereich betreffen u. a. die weitergehende Automatisierung einzelner mechanischer Verfahrensschritte. Ein Beispiel ist die Ausstattung von Rechen mit automatischen Reinigungsvorrichtungen, um lastabhängige Reinigungsprozesse zu ermöglichen. Erste marktfähige Produkte lassen sich in das zumeist vorhandene Prozessleitsystem integrieren (HST Systemtechnik 2020a). Weiterentwicklungen im Bereich der Sensorik zielen auf eine bessere Echtzeiterfassung von Analyseparametern für die Abwasserbehandlung ab, darunter auch organische Spurenstoffe (Kap. 4.2.2) (DVGW-Technologiezentrum Wasser o. J.). Die Detektion von Schadstoffen in Abwässern in (quasi) Echtzeit stellt aktuell noch ein weites Forschungsfeld dar. Es existieren gegenwärtig kaum marktreife digitale Innovationen zur Spurenstoffanalytik organischer Komponenten.

Ein weiteres Anwendungsgebiet von digitalen Lösungen besteht in der Optimierung der Betriebsprozesse, z. B. in Bezug auf den Einsatz der Betriebsmittel. So können beispielsweise Flockungsmittel verschmutzungsabhängig dosiert werden (Reckter 2021). Im Rahmen des vom BMWi geförderten Projekts »Flocki« wurde ein Verfahren entwickelt, um die Primärflockenbildung kontinuierlich sensortechnisch zu erfassen und auszuwerten. Mit dem Gerätedemonstrator konnten bis zu 20 % der Flockungsmittel eingespart werden. Die Bedingungen für den Praxiseinsatz sind allerdings komplex und müssen an die jeweilige Kläranlage individuell angepasst werden (Pfaff/Sonntag 2022, S. 63). Außerdem können die Prozesse der Begasung optimiert werden, um so u. a. die Emissionen von Treibhausgasen wie Lachgas oder Methan zu reduzieren. Ein Verfahren, das derzeit in einer Kläranlage in England erprobt wird, ist in der Lage, flüchtige Komponenten im Abwasser sowie austretende Gase automatisch zu messen und KI-basiert zu analysieren, um auf dieser Grundlage Begasungsprozesse zu optimieren (Stier/Gehardt 2022, S. 58 f.). In Singapur wurde eine Software in Betrieb genommen, die Echtzeitdaten zu Abwassermengen und ausgewählten Parametern wie Ammoniak, Nitrate, Sauerstoff oder Phosphor erfasst. Auf der Grundlage von historischen Daten prognostiziert ein KI-basierter Algorithmus



die Abwasserströme und -belastungen sowie die Bedarfe und Dosierungen der Chemikalien zur Behandlung des Abwassers. Dies ermöglicht es, die Prozesse der Abwasserbehandlung zu optimieren und automatisch zu steuern, außerdem können Anomalien einfacher erkannt werden (Kapelan et al. 2020, S. 9 f.).

Durch die Inspektion von Anlagen und Pumpwerken aus der Ferne mithilfe der Messung, Übermittlung und ggf. automatischen Auswertung von Betriebsdaten oder von Videoaufnahmen können lange Anfahrtswege zu abgelegenen Anlagen vermieden und so Zeit- und Personalressourcen eingespart werden. Außerdem kann eine (KI-basierte) Schalldiagnostik für Pumpen frühzeitig auf nötige Instandhaltungsmaßnahmen hinweisen (Bender et al. 2022, S. 49 f.). Solche Lösungen könnten vor allem für große Betreiber mit einer Vielzahl von Anlagen perspektivisch Vorteile bringen.

Ein wesentliches Hemmnis für die weitere Verbreitung von digitalen Lösungen zur Optimierung des Kläranlagenbetriebs ist, dass viele und insbesondere kleine Anlagenbetreiber nicht über ausreichende personelle und fachliche Ressourcen verfügen, um solche Lösungen einzuführen und an die jeweiligen Besonderheiten ihrer Anlagen anzupassen (Eerikäinen et al. 2020, S. 2686). Dies gilt insbesondere dann, wenn seitens der kommunalen Eigentümer keine starken Anreize für einen kosten- und ressourceneffizienten Betrieb gesetzt werden. Zu beachten ist allerdings auch, dass entsprechende Sensorsysteme aufgrund der vielfach schwierigen Einsatzbedingungen meist aufwendig gewartet werden müssen, was hohe Betriebs- und Instandhaltungskosten verursachen kann. Vor der Realisierung entsprechender Vorhaben muss daher der erzielbare Nutzen gegenüber dem finanziellen und betrieblichen Aufwand genau abgewogen werden, wobei nicht monetäre Aspekte wie eine Erhöhung der Transparenz der Prozesse ebenfalls zu berücksichtigen sind (DWA 2018d, S. 13).

Energieeinsparung

Kenntnisse über den Abwasserzufluss, insbesondere Informationen zu Menge und Schmutzfracht des Abwassers, ermöglichen es, dass Kläranlagen gleichmäßiger gefahren (z. B. durch eine optimierte Belüftung der biologischen Reinigungsstufe) und der Energieverbrauch auf diese Weise gesenkt werden kann (Oelmann/Czichy 2020, S. 103 f.). Einsparpotenziale durch eine optimierte Anlagensteuerung bestehen außerdem auch bei der für die Belüftung und die Abwasserförderung aufzuwendenden Energie (DWA 2018d, S. 13). Mithilfe von Simulationen zur Optimierung der Anlagekonfiguration und des Anlagenbetriebs könnten laut Reinecke et al. (2018) mehr als 20% an Energie gegenüber dem Referenzbetrieb eingespart werden. Wie bei der Trinkwasserversorgung gilt allerdings auch bei der Abwasserbeseitigung, dass digitale Technologien alleine nicht ausreichen, um vorhandene Energieeinsparpotenziale vollumfänglich zu erschließen (DWA 2018c, S. 2; Geidel et al. 2021, S. 31).

Optimierung der Stromerzeugung

Auch die Energieerzeugung in Kläranlagen kann von digitalen Technologien profitieren. So kann beispielsweise die Produktion von Klärgas und die anschließende Stromerzeugung in betriebseigenen Blockheizkraftwerken mithilfe von digitalen Lösungen flexibler gestaltet werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 103 f.). Mögliche Optionen zur Optimierung der Faulgasverwertung und Reduzierung von Lastspitzen durch einen flexiblen Kraftwerksbetrieb wurden im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojekts »WindNODE« (Laufzeit: 2016 bis 2020) untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass eine Spitzenlastreduzierung am Pilotstandort Klärwerk Münchehofe um mehr als 30 % möglich ist (Niederste-Hollenberg et al. 2021, S. 64).

4.3.4 Verwaltung und Kundenservice

Im Bereich der Verwaltungs- und Planungsprozesse von Unternehmen der Wasserwirtschaft wird der Digitalisierung ebenfalls ein hohes Potenzial für die Optimierung der Arbeitsabläufe zugesprochen. In diesen Bereichen steht die Vernetzung unterschiedlicher digitaler Anwendungen noch am Anfang (Oelmann/Czichy 2020, S. 46; VKU 2017). Die Erledigung von Aufgaben wie Bilanzierung, Verbrauchsabrechnung, Personalplanung oder auch behördliche Dokumentations- und Genehmigungspflichten erfolgt meist auf Basis spezifischer Software (zumeist basierend auf Büro-IT), wobei eine Vielzahl an Systemen und Software für die verschiedenen Aufgaben existiert. Eine Kompatibilität zwischen einzelnen Systemen ist oft nicht gegeben, stattdessen erfordern Datenübertragungen ein Umformatieren der Daten oder den manuellen Austausch von Datenträgern (Holländer et al. 2019, S. 81; Oelmann/Czichy 2020, S. 49). Auch ein medienbruchfreier Informationsaustausch mit externen Dienstleistern, Behörden oder Kunden ist nur selten möglich (Oelmann/Czichy 2020, S. 55). Die Verbesserung der Kompatibilität zwischen Softwaresystemen bietet Potenziale für effizientere Arbeitsprozesse und durch Integration eine bessere Nutzung vorhandener Datenbestände.

Außerdem existieren nach wie vor Prozesse und Betriebsaufgaben, die bislang typischerweise ohne Softwareunterstützung abgewickelt werden, z. B. die Dokumentenablage und -archivierung (Oelmann/Czichy 2020, S. 49). Hier zeigen Unternehmen der Wasserwirtschaft zunehmend Interesse an einer Digitalisierung dieser Prozesse (Oelmann/Czichy 2020, S. 55, 65 u. 67). Der Fokus aktueller Initiativen liegt auf verwaltungsinternen Prozessen, wie einem zunehmenden Einsatz von Software für Projektplanungsprozesse, der Einführung von digitalen Dokumentenmanagementsystemen oder eines digitalen Auftragswesens (Auftragserteilung, -abwicklung und -abrechnung). Aber auch eine Digitalisierung der Kundenkommunikation in Form von webbasierten



Kundenplattformen (z.B. für die Zählerstanderfassung oder die Abwicklung von Anträgen auf Hausanschlüsse) sowie der Einsatz von Social-Media-Instrumenten für die Kundenkommunikation werden zunehmend umgesetzt (Hempel et al. 2021, S. 105).⁷⁷ In Verbundunternehmen lassen sich hier auch Synergien zu anderen Unternehmensparten (Strom, Gas) z.B. über eine Mitnutzung von Smart Meter Gateways erschließen.

Administrative Prozesse und Kundenmanagement

Webbasierte Kundenplattformen in Verbindung mit digitalen Wasserzählern ermöglichen durch die Optimierung des Abrechnungsprozesses betriebswirtschaftliche Vorteile (Monks et al. 2019; OE/BDEW 2018; Oelmann/Czichy 2020, S. 79). Außerdem entfällt die manuelle Ablesung der Zähler durch Mitarbeiter/innen. Beispielsweise waren früher 6 Monate zum Ablesen der Wasserverbrauchsdaten von ca. 2.000 Wasseranschlüssen erforderlich. Heute erledigt beispielsweise der Zweckverband Gruppenwasserwerk Florenberg diese Aufgabe dank Fernauslese in nur 2 Tagen (Kamstrup A/S Germany 2015).

Planungsprozesse

Wasserwirtschaftliche Baumaßnahmen können vor dem Hintergrund unterschiedlicher Szenarien mit mathematischen Modellen simuliert und ggf. mithilfe von GIS bzw. NIS visualisiert sowie mit anderen städtebaulichen Maßnahmen abgestimmt werden. Dadurch erhöht sich die Effizienz im Management der vielfach räumlich verteilten Infrastrukturen insbesondere bei größeren Wasserunternehmen (Holländer et al. 2019, S. 66). GIS können das Fundament der Planung bilden, indem dort alle Daten zusammenlaufen und miteinander verknüpft werden. So kann z.B. die Bestimmung der Über- und Unterdimensionierung von Leitungsnetzen und des damit zusammenhängenden Erneuerungsbedarfs der Trinkwasserkanalisation mithilfe von Planungsunterstützungssystemen genauer berechnet werden (Kropp/Angermair 2016). Darüber hinaus können Kosten-Nutzen-Verhältnisse von infrastrukturellen Baumaßnahmen im Vergleich zu beispielsweise Regenwasserversickerungsmaßnahmen erörtert und verglichen werden (IWA; Xylem Inc. 2019, S. 20).

Dokumentation- und Nachweispflichten

Neben einer Standardisierung bei der Bereitstellung wasserwirtschaftlich relevanter Daten über Plattformen und Portale zeigen sich auch Initiativen zur Förderung einheitlicher Datenformate, Übermittlungswege und Schnittstellen zur

⁷⁷ <https://waterloo.io/splashy-der-weltweit-erste-chatbot-fuer-wasserversorger/> (10.3.2023)

weiteren Automatisierung der Dokumentations- und Nachweispflichten von wasserwirtschaftlichen Unternehmen gegenüber staatlichen Stellen. Ziele sind Vereinfachungen und Effizienzsteigerungen bei der Berichterstattung.⁷⁸ So ist es beispielsweise im Bundesland Thüringen vorgeschrieben, dass die Übermittlung der Ergebnisse von Trinkwasseruntersuchungen mit einem einheitlichen EDV-Verfahren und durch verbindlich festgelegte Schnittstellenformate erfolgen muss (TLV 2018). Die bessere Nutzung von Daten im Zuge der Digitalisierung anhand von offenen Datenplattformen kann Wasserbehörden darin unterstützen, das Vollzugsdefizit aufgrund mangelnder finanzieller und personeller Ausstattung zu reduzieren.

Integrierte Informations- und Entscheidungsgrundlage

Für ein effizientes Informations- und Wissensmanagement ist der Datenaustausch zwischen Wasserbetrieben, Kommunen, Wasser- und Katasterbehörden wesentlich. Allerdings liegen ein Großteil der erforderlichen Daten beispielsweise zur kontinuierlichen Überwachung der Trink- und Abwassergüte oder Hochwasserdaten nicht digital vor und sind nicht allen Akteuren offen zugänglich (Oelmann/Czichy 2020, S. 138).

Aktuell zeigen sich daher verstärkt Bemühungen auf der Ebene der Europäischen Kommission, des Bundes, der Länder und Kommunen, aber auch der privatwirtschaftlichen Unternehmen, die Digitalisierung dieser Daten voranzutreiben und zugleich eine Standardisierung für die Bereitstellung der Daten über öffentlich zugängliche Portale und Plattformen anzustreben (dazu und zum Folgenden Holländer et al. 2019). Etliche Pilotprojekte, initiiert durch Bund und Länder, verfolgen dieses Ziel. Ein Beispiel ist das Datenportal »Wasser-DE«⁷⁹, das durch die LAWA initiiert wurde. Das Portal stellt fachspezifische Informationen (Gesetze, Verordnungen, Berichtsdocumentationen, Geoinformationen) zur Verfügung, um eine verwaltungsübergreifende Informationsintegration zu ermöglichen. Aufgabe ist es zudem, perspektivisch verschiedene Datenquellen übergreifend zu verknüpfen sowie Daten für unterschiedliche Zwecke und Anwendungen wiederzuverwenden. Auch das Geoportal der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG)⁸⁰ stellt gewässerbezogene Daten (Gewässernetze, Schutzgebiete, Umweltüberwachung) bereit. Ebenso zeigen sich auf europäischer Ebene Bestrebungen, wasserbezogene Daten zentral und einheitlich von unterschiedlichen europäischen sowie nationalen Institutionen zusammenzuführen

78 Die Interoperabilität von Softwaresystemen im Planungsprozess wie auch in der Umwelt- und Informationspolitik soll auf Basis einheitlicher Vorgaben, Vereinbarungen und Standards realisiert werden, dies schrieben Richtlinien wie die Richtlinie 2007/2/EG zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE) rechtsverbindlich fest (Difu 2016, S. 214).

79 www.wasser-de.de/ (10.3.2023)

80 <https://geoportal.bafg.de/ggina-portal/> (10.3.2023)



und bereitzustellen⁸¹. Ein Potenzial solcher Plattformen besteht in der Beschleunigung von Meldewegen z. B. im Zusammenhang mit auffälligen Befunden (Hempel et al. 2021, S. 95 u. 151). Trotz zahlreicher Initiativen zeigen sich jedoch noch etliche Herausforderungen bezüglich der Nutzung von behördlichen Portalen und Plattformen. So kommt eine Studie von Holländer et al. (2019, S. 32 f.) beispielsweise zu dem Schluss, dass bestehende Angebote in der Wasserwirtschaft noch wenig bekannt sind und dementsprechend auch kaum genutzt werden.

Umsetzung von Finanzierungslösungen

Digitale Innovationen können perspektivisch zur Umsetzung von Lösungen für die verursachergerechte Abrechnung von Wassergebühren eingesetzt werden. Dies gilt insbesondere für die Schadstoffverschmutzung in Abwässern. Dafür könnten die Hersteller gewässerschädigender Grundstoffe bzw. der in den Verkauf gelangenden Produkte über ein automatisches Abrechnungssystem einen Beitrag in ein Fonds einzahlen. Der Beitrag könnte sich an den Mengen und der relativen Schädlichkeit der in den Verkehr gebrachten Spurenstoffe orientieren. Aus diesem Fonds würden dann die Nachrüstung von Kläranlagen mit einer vierten Reinigungsstufe sowie die diesbezüglichen Betriebskosten finanziert werden. Möglich wäre auch die Finanzierung von Maßnahmen zur Spurenstoffreduktion bei der Trinkwasseraufbereitung (Oelmann et al. 2021, S. 11).

4.3.5 Voraussetzungen zur Erschließung von Digitalisierungspotenzialen

Die Potenziale der Digitalisierung sind nicht für alle Betriebe einheitlich, sondern werden auch durch betriebs- und regionalspezifische Gegebenheiten (z. B. Größe des Versorgungsgebiets, Anlagenbestand, Wasservorkommen und -verfügbarkeit, Mobilfunknetzabdeckung, Personalsituation) bestimmt. Über die Erwartungen an Effizienzgewinne hinaus hängt es von den aktuellen und künftig zu erwartenden Herausforderungen an das Unternehmen ab, ob bzw. welche digitalen Innovationen nutzbringend von einem Wasserbetrieb eingeführt werden können: Wird eine steigende Wassernutzungskonkurrenz im Versorgungsgebiet erwartet? Sind wiederkehrende Überschreitungen von Grenzwerten durch problematische Stoffe zu befürchten? Sind die vorhandenen Infrastrukturen den künftig häufiger auftretenden Extremwetterereignissen noch gewachsen? Ist das Unternehmen stark vom Fachkräftemangel betroffen? Ausgehend von den übergeordneten Unternehmenszielen und insbesondere der Versorgungssicherheit sind die Informationsbedarfe jedes einzelnen Unternehmens zu

81 <https://water.europa.eu/> (10.3.2023)

ermitteln, um abzuschätzen, welcher Nutzen sich durch digitale Anwendungen sinnvoll generieren lässt. Dabei ist eine maximal mögliche Digitalisierung aller Prozesse und Aufgaben in jedem Geschäftsbereich nicht für jedes Unternehmen zwangsläufig erstrebenswert. Je geringer die Anzahl und Vielfalt der Infrastrukturen ist, desto niedriger ist auch der zu erwartende Nutzen, der durch Digitalisierungsmaßnahmen für Effizienzsteigerungen im Betrieb und für die Bewältigung künftiger Herausforderungen potenziell erzielt werden kann (Hempel et al. 2021, S. 194).

Ohne die Schaffung zukunftsfähiger Infrastrukturen sind viele digitale Lösungen nicht anwendbar. Denn das Potenzial vieler technischer Innovationen zeigt sich erst anhand von Echtzeitverfahren und damit hinsichtlich einer Übertragung und Verarbeitung von Daten während laufender Betriebsprozesse. Eine flächendeckende Breitbandversorgung stellt vielfach die Grundlage für einen reibungslosen Datenfluss zwischen den in der Fläche verteilten wasserwirtschaftlichen Anlagen dar. In Bezug auf eine flächendeckende und robuste Verfügbarkeit von mobilem Internet zeigen sich aktuell in Deutschland allerdings noch Defizite. Dies hat vor allem für kleine und mittlere Betriebe der Wasserwirtschaft in ländlichen Regionen zur Folge, dass die Realisierungsbedingungen für digitale Vorhaben nicht gleichwertig ausgestaltet sind (Oelmann und Czichy 2020, 142 f.).

Ein wesentliches Hemmnis für künftige Digitalisierungsbemühungen stellen außerdem unzureichend kompatible Schnittstellen dar (dazu Oelmann et al. 2021, S. 135 f.). Eine herstellerübergreifende Datenübermittlung und ein Datenaustausch in Echtzeit sind bislang vielfach nicht einfach möglich. Dies gilt für den Datenaustausch innerhalb eines Unternehmens, beispielsweise um Informationen zur aktuellen Wassernachfrage entlang der Wertschöpfungsstufen zu übermitteln, um die Betriebsprozesse flexibler zu gestalten. Dies gilt aber genauso für Datenübermittlungen zwischen Unternehmen und Behörden. Je mehr Unternehmen, Kommunen und Behörden digital miteinander kooperieren, desto wichtiger werden einheitliche Schnittstellen zwischen Software und Systemen. Um das volle Potenzial der Digitalisierung zu entfalten, bedarf es neben einheitlichen Schnittstellen auch Dateninfrastrukturen, die sich durch kompatible Datenbanken und -formate in und zwischen Systemen.

Aufgrund zu kleiner Datensätze ohne ausreichende zeitliche oder räumliche Reichweite sind viele Anwendungen der KI in der Wasserwirtschaft aktuell noch limitiert. Daten werden nicht zentral verwaltet und sind über unterschiedliche Behörden und Forschungseinrichtungen verteilt und teilweise nicht kompatibel. Darüber hinaus könnten die Kosten, die mit dem Transfer großer Datenmengen einhergehen, Wasserbetriebe oder Kommunen davon abhalten, Sensornetze zu verdichten und die Häufigkeit der Datenübermittlung zu erhöhen.

Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Nutzung von cloudbasierten Speicher-, Rechen- und Softwarelösungen könnten sich neue Risiken ergeben.



Es zeigt sich bereits eine zunehmende Konzentration von privaten Anbietern von Clouddienstleistungen und eine Stärkung der Position einzelner Technologiekonzerne. Da datengetriebene Plattformen ab einer gewissen Größe Monopolbildungen begünstigen, sollte insbesondere die weitere Entwicklung von datengetriebenen Geschäftsmodellen für eine weiterführende Digitalisierung weiter beobachtet werden, um wachsenden Abhängigkeiten von einigen wenigen Dienstleistern und damit Marktkonzentrationen entgegenzuwirken (Hempel et al. 2021, S. 41, 45 u. 66 ff.; TAB 2021, S. 222 f.).

Nicht zuletzt ist es für erfolgreiche Digitalisierungsprojekte unerlässlich, Akzeptanz für die damit einhergehenden Veränderungen im Betrieb zu schaffen. Prozesse und Praktiken, die sich etabliert haben und von der Einführung digitaler Innovationen betroffen sind, müssen angepasst werden. Dabei sind Veränderungsängste der Betroffenen ernst zu nehmen (Hempel et al. 2021, S. 197; Oelmann/Czichy 2020, S. 139). Schließlich bedeutet Digitalisierung auch, dass sich an vielen Stellen in den Unternehmen Tätigkeiten verlagern und auch bestehende Berufsbilder verändern, was direkte Auswirkungen auf die Mitarbeiter/innen hat. Um in der Belegschaft Akzeptanz für digitale Technologien zu erreichen, ist es sinnvoll, Beschäftigte frühzeitig in die Einführung von Innovationen einzubeziehen.

4.3.6 Zwischenfazit

Der Einsatz von digitalen Innovationen in Unternehmen der Wasserwirtschaft bietet vielfältige Möglichkeiten, die Betriebsabläufe zu optimieren sowie Betriebsmittel und Trinkwasserressourcen einzusparen. Ressourcen können auch durch die digital unterstützte Zustandsbestimmung von wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen beispielsweise durch KI-basierten Algorithmen zur Auswertung von Sensordaten eingespart werden, was außerdem zur Entschärfung des Problems des Fachkräftemangels beitragen kann. Potenziale der Digitalisierung von Verwaltungs- und Planungsprozessen betreffen insbesondere eine bessere Nutzung der vorhandenen Daten durch Datenaustausch und -integration. Das Kosten-Nutzen-Verhältnis von digitalen Technologien für die Wasserwirtschaft ist jedoch stark von den Gegebenheiten und Rahmenbedingungen in den jeweiligen Betrieben abhängig und ist gegenwärtig generell noch schwer abzuschätzen.

Digitale Lösungen können insbesondere den Umgang mit veränderten klimatischen Bedingungen wie eine zunehmende Trockenheit oder häufigere Starkregenereignisse unterstützen. Eine vielversprechende Möglichkeit, Einfluss auf die Wasserverbräuche zu nehmen, bietet der Einsatz von digitalen Wasserzählern in Verbindung mit Onlineplattformen, die Verbraucher/innen über die aktuellen Wasserverbräuche informieren und so Anreize zum Wassersparen schaffen. Digitale Wasserzähler ermöglichen darüber hinaus eine

schnellere Ermittlung und damit Behebung von Leckagen, was die Wasserressourcen ebenfalls schont. Für einen breiten Einsatz der Technologie müssen aktuell jedoch noch diverse Hemmnisse abgebaut werden. Diese betreffen insbesondere die Kosten eines umfassenden Roll-outs, die Zuverlässigkeit der Daten, die Gewährleistung des Datenschutzes oder die flächendeckende Datenübertragung. Gegebenenfalls können hier Synergien mit dem Stromsektor (Smart Meter Gateways) genutzt werden. Neben Verbrauchsdaten ist die Erhebung und zur Verfügungstellung von Informationen zum Wasserhaushalt eine zentrale Grundlage, um die Nutzung der Wasserressourcen strategisch zu steuern.

Für die Bewältigung von Starkregenereignissen kann der Einsatz von digitalen Technologien zur Überwachung und Steuerung der Abflüsse in Kanalisationssystemen die Gewässerbelastung reduzieren, indem vorhandene Stauräume besser genutzt werden, um Überläufe zu vermeiden. Digitale Lösungen bieten hier kurzfristig Flexibilität, können langfristig aber eine notwendige Anpassung der physischen Infrastrukturen vielfach nicht ersetzen.

Was den Schutz von Gewässern und Trinkwasserressourcen angeht, so können digitale Lösungen die Überwachung des Schadstoffeintrages (z. B. von Nitrat oder von Spurenstoffen) verbessern und den Austausch solcher Daten zwischen Wasserbetrieben, Behörden und den verursachenden Wirtschaftssektoren wie die Landwirtschaft oder die Industrie erleichtern. Der Einsatz digitaler Lösungen und Messtechnik steht hier allerdings noch am Anfang. Weitere Verbesserungen bei den Sensorsystemen zur Detektion und Identifikation von Spurenstoffen sind notwendig, da bisher nur ein kleiner Teil der problematischen Stoffe überhaupt bzw. zuverlässig erkannt werden kann. Zudem scheitert der Einsatz der Überwachungssysteme oftmals an den Kosten für die Anschaffung und Instandhaltung.

Der Einsatz digitaler Lösungen und insbesondere von KI-basierten Algorithmen für die Optimierung von Energieverbräuchen und die Energieerzeugung hat bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt. Dies betrifft insbesondere die Optimierung des Pumpenbetriebs, aber auch die Belüftung von Becken in Kläranlagen. Dennoch lassen sich die Gesamtenergieeinsparungspotenziale nur zum Teil durch die Optimierung von Betriebsabläufen mithilfe digitaler Technologien erschließen.

Welche digitalen Lösungen für ein bestimmten Betrieb die größten Vorteile bringen, ist auch von seiner Größe und den lokalen Gegebenheiten abhängig. Viele Potenziale lassen sich z. B. überwiegend für größere Anlagennetze erschließen und erst durch die Einbeziehung der Mitarbeiter/innen in die Auswahl und Einführung der Lösungen. Weitere wichtige Voraussetzungen sind eine flächendeckende Breitbandversorgung, die Standardisierung von IT- und Datenschnittstellen sowie ausreichende und sichere Rechen- und Speicherkapazitäten.

4.4 Nutzen der Digitalisierung für die Störungs- und Krisenbewältigung

Mithilfe der im Kapitel 4.2 vorgestellten digitalen Innovationen für die Wasserwirtschaft wird Systemverhalten – insbesondere unerwünschtes – zunehmend vorhersehbar. Durch Detektions- und Frühwarnsysteme werden Anomalien besser, schneller und früher erkannt, außerdem wird die Bestimmung der jeweiligen Ursache mit Analyse- und Simulationswerkzeugen einfacher. Auch das Erfahrungswissen und Systemkenntnisse der jeweiligen Akteure führen zu einer präziseren Beurteilung der Lage (Hempel et al. 2021, S. 150 f.). Ausnahmesituationen drohen so seltener zu Krisen zu eskalieren. Dennoch sind der Vorhersehbarkeit Grenzen gesetzt. Nicht alle unerwünschte Systemzustände können durch präventive Vorausschau frühzeitig erkannt werden. Insbesondere neuartige Ereignisse werden von Algorithmen in der Regel nicht zuverlässig erkannt. So lässt sich nicht vollständig ausschließen, dass es doch zu einem unerwünschten Systemverhalten kommt, und dies unabhängig von der Sensordichte oder der Rechenleistung (Hempel et al. 2021, S. 182).

Von einer Krise spricht man, wenn die betriebsgewöhnlichen Mittel und/oder Organisationsstrukturen eines Betriebes nicht mehr ausreichen, um eine Ausnahmesituation zu bewältigen.⁸² Anderenfalls handelt es sich um eine Betriebsstörung, die zum Normalbetrieb dazugehört. Ob sich eine Betriebsstörung zu einer Krise auswächst, also nur mit Unterstützung durch Dritte und der Mitwirkung der zuständigen Behörden bewältigt werden kann, hängt zum einen von den Ereigniszusammenhängen ab. Während es sich z.B. bei einer Verunreinigung durch einen Gefahrgutunfall, einem Starkregenereignis oder einem Stromausfall um Gefahren handelt, die unvorhersehbar und schlagartig auftreten sowie für die gesamte Infrastruktur bzw. die Qualität des Wassers bzw. Abwassers unmittelbar ein hohes Risiko mit potenziell langfristigen Folgen auch für die Gesundheit der Abnehmer bedeuten, geht es bei einem Rohrbruch oder einer Verstopfung um Ereignisse mit eher lokaler Bedeutung (Hempel et al. 2021, S. 143). Zum anderen variiert die Einschätzung des möglichen Ausmaßes von Einzelereignissen nach Kontext (z.B. Zeitpunkt, Nutzungsansprüche und ggf. -konflikte), Kapazitäten oder Art der Dienstleistung (Trinkwasserversorgung vs. Abwasserbeseitigung) (Hempel et al. 2021, S. 143 ff.). Erfordert die Lösung von Konflikten ausreichend Ressourcen und Kapazitäten, so besteht bei großen Betrieben offenkundig mehr Spielraum, um Ausnahmesituationen zu absorbieren (z.B. indem bei Starkregenereignissen mehr Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen). Für kleinere Betriebe sind die eigenen Kapazitäten rascher erreicht, weshalb hier eine Betriebsstörung

⁸² DIN EN 15975-1:2016 Sicherheit der Trinkwasserversorgung – Leitlinien für das Risiko- und Krisenmanagement – Teil 1

schneller zu einer Unterbrechung der Ver- oder Entsorgung und damit potenziell zu einer Krise führen kann (Hempel et al. 2021, S. 146).

Die Ausnahme ist im Normalbetrieb dauerhaft präsent und die Hauptaufgabe der Belegschaften von wasserwirtschaftlichen Betrieben besteht darin, Betriebsstörungen nicht zur Krise werden zu lassen. Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden erörtert, inwiefern digitale Innovationen zu einer Erhöhung der Resilienz in der Wasserwirtschaft beitragen können, indem sie zu einer Verringerung der Dauer und der Auswirkungen von Störungen bis zur Wiederherstellung des Normalbetriebs führen, oder ob sie die Bewältigung von Ausnahmesituationen eher behindern. Dabei wird zunächst auf aktuelle Nutzungspraktiken von digitalen Technologien für die Ereignisbewältigung eingegangen. Daran schließt sich eine Analyse der Perspektiven der Digitalisierung für die Störungsbewältigung an. Schließlich erfolgt ein Exkurs zur Bedeutung der menschlichen Erfahrung bei einer Krisensituation.

Bei den nachfolgenden Ausführungen handelt es sich um gekürzte Version der Kapitel 4 und 5 des Gutachtens von Hempel et al. (2021, S. 90 ff.). Für die Erarbeitung der nachfolgenden Informationen führte das Gutachterteam eine Fallstudie zur Wasserver- und Abwasserentsorgung in der Metropolregion Berlin-Brandenburg durch. Als Methode kamen szenariobasierte Planspiele zum Einsatz.

4.4.1 Fallstudie: Metropolregion Berlin-Brandenburg

Die Metropolregion Berlin-Brandenburg umfasst 16 Wasserversorgungsunternehmen unterschiedlicher Größe und Organisationsform. Die Unternehmen unterscheiden sich hochgradig bezüglich der Wasserbedarfe und der Erbringung verschiedener wasserbezogener Dienstleistungen, der Nutzungsrechte und der Dimensionierung der Versorgungs- und Entsorgungsanlagen, aber auch hinsichtlich der Abnehmer und der Implementierung digitaler Technologien. Während es sich bei den Berliner Wasserbetrieben um das größte Wasserversorgungsunternehmen in Deutschland handelt, zeichnet sich das Umland sowohl durch sehr kleine als auch durch mittlere Unternehmen aus. Die Abwasserentsorgung in der Metropolregion wird wesentlich durch die sechs Kläranlagen der Berliner Wasserbetriebe geprägt, von denen nur eine innerhalb des Berliner Stadtgebiets liegt. Berlin betreibt insbesondere im Innenstadtbereich ein Mischsystem mit Regenüberlaufbecken, Stauraumkanälen, Wehren und Drosseln. Von den übrigen 15 Unternehmen betreiben neun zwischen einer und drei Kläranlagen, wobei die Anzahl auch durch Inselnetze bedingt ist. Die Mehrheit leitet ihr Abwasser über Kanal- und Drucknetze entweder zusätzlich oder ausschließlich in Richtung der Kläranlagen der Berliner Wasserbetriebe ab.



Kasten 4.3 Methodik

Neben Literaturrecherchen, Interviews und einer Netzwerkanalyse führte das Gutachterteam szenariobasierte Planspiele mit Praktikern der wasserwirtschaftlichen Unternehmen in der Metropolregion Berlin-Brandenburg durch. Die Planspiele erfolgten online mithilfe der Software »erganto STAGE«. Dabei wurden die Mitspieler/innen mit konkreten Handlungssituationen konfrontiert, durch welche die Aufrechterhaltung der Versorgungs- und/oder Entsorgungssicherheit gefährdet wurde. Um die Ausnahmesituation in den Griff zu bekommen, konnten die Mitspieler/innen nicht nur auf die jeweils vorhandene Technik, sondern auch prototypische digitale Innovationen zurückgreifen, wenn erstere sich als nicht ausreichend erwies. Die im Rahmen der Planspiele verwendeten Handlungsstränge waren:

- > Starkregen,
- > Stromausfall,
- > Gefahrgut/Verunreinigung,
- > Hitzewelle/Versorgungsengpass,
- > Rohrbruch,
- > Verstopfung,
- > Waldbrand,
- > IT-Störung/Cyberangriff sowie
- > Bombenentschärfung.

Jeder Handlungsstrang wurde von unterschiedlichen Teams bzw. Konstellation von Personen und Organisationen gespielt. An den Planspielen haben insgesamt 24 Praktiker von 9 der 16 wasserwirtschaftlichen Unternehmen der Metropolregion Berlin-Brandenburg teilgenommen.

4.4.2 Aktuelle Nutzung von digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen

Das Management von Betriebsstörungen und Krisen ist ohne den zumindest begleitenden Einsatz von digitalen Technologien heute nicht mehr denkbar. Dies geht aus der empirischen Analyse von Hempel et al. (2021) klar hervor. Die folgenden Ausführungen gehen darauf ein, welche digitale Technologien *aktuell* zur Bewältigung von Ausnahmesituationen angewendet werden. Dazu wurden Ausnahmeereignisse als Einlagen in die Planspielübungen für die verschiedenen Handlungsstränge eingespielt. Für jedes Ereignis wurden die Mitspieler/innen aufgefordert, eine Lagebeurteilung abzugeben und Maßnahmen zur Bewältigung des beschriebenen Ereignisses in Form von Steuerungs- und Wiederherstellungsaktivitäten und/oder Kommunikationsmaßnahmen zu skizzieren. Auf ein Ereignis konnte mit beliebig vielen Reaktionen geantwortet



werden. Entscheidend war, dass die Mitspieler/innen angaben, ob bzw. welche der heute vorhandenen digitalen Technologien sie für die Situationsbewältigung nutzten. Aus der Gesamtzahl der Antworten wurden die relativen Häufigkeiten bestimmt, mit welchen die verschiedenen digitalen Technologien für die Situationsbewältigung eingesetzt wurden.

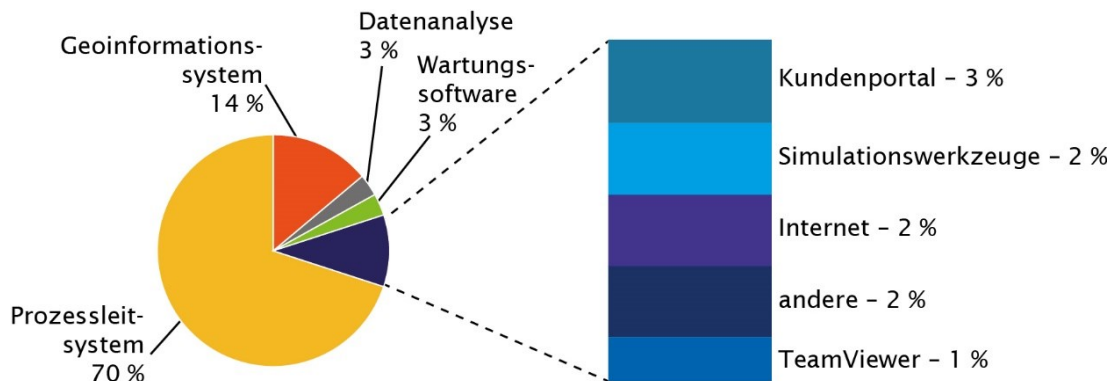
Nutzung von digitalen Technologien für Steuerungs- und Wiederherstellungsaktivitäten

Für die Beurteilung und Bewältigung von Ausnahmesituationen werden heutzutage vielfältige Werkzeuge genutzt. Die eingesetzten Instrumente reichen von der manuellen und eher rudimentären Datenanalyse mit Stift und Zettel, Taschenrechner oder Tabellenkalkulationssoftware über die datenbasierte Analyse von kausalen Zusammenhängen bis hin zu Prognosen und Simulationen mit entsprechender Software. Intern stehen die Visualisierungskomponenten des Prozessleitsystems im Vordergrund. Sie bilden die Grundlage für die präventive Überwachung der technischen Infrastruktur. Mit der hochintegrierten Darstellung des zu überwachenden oder zu steuernden Prozessablaufs mit Bildschirmgeräten und den darauf abgebildeten Anzeige- und Steuerungsinstrumenten erhalten Mitarbeiter/innen in der Leitwarte einen Überblick über wichtige Parameter, die das gesamte Netz und die Anlagen betreffen, außerdem werden Störmeldungen zu den einzelnen Prozessen generiert (z. B. Sollwertabweichungen). Die Informationen aus dem Prozessleitsystem können parallel durch Detektions- und Frühwarnsysteme, aber auch durch vorhandene Analyse- und Simulationswerkzeuge ergänzt werden.

Die Abbildung 4.11 zeigt die während der Planspielübungen gemessenen Einsatzhäufigkeiten aktueller digitaler Technologien für *betriebsinterne* Reaktionen auf die gespielten Ausnahmesituationen. Hier spielte insbesondere das Prozessleitsystem eine wichtige Rolle, das in 70 % der gespielten Ereignisse eingesetzt wurde, um Reaktionsmaßnahmen im Betrieb umzusetzen. Ebenfalls relativ häufig verwendet wurden GIS zur Übermittlung von Ortsdaten z. B. an Mitarbeiter/innen vor Ort (in 14 % der Ereignisse). Hingegen wurden Datenanalyse- und Simulationstools während kritischen Situationen vergleichsweise selten genutzt (Häufigkeiten von 3 oder weniger Prozent). Solche Analysen bzw. Simulationen werden offenbar nur dann erstellt, wenn es die konkrete Lage verlangt. Dies liegt daran, dass komplexe Simulationsmodelle zeitaufwendige Kalibrierungen erfordern. Ihr Einsatz erfolgt daher in der Regel zeitversetzt, um Ursachen und Verlauf einer zurückliegenden Situation einschließlich ihrer Bewältigung zu rekonstruieren. Damit sollen Schwachstellen identifiziert und möglichst behoben werden.



Abb. 4.11 Nutzung digitaler Technologien für betriebsinterne Reaktionen

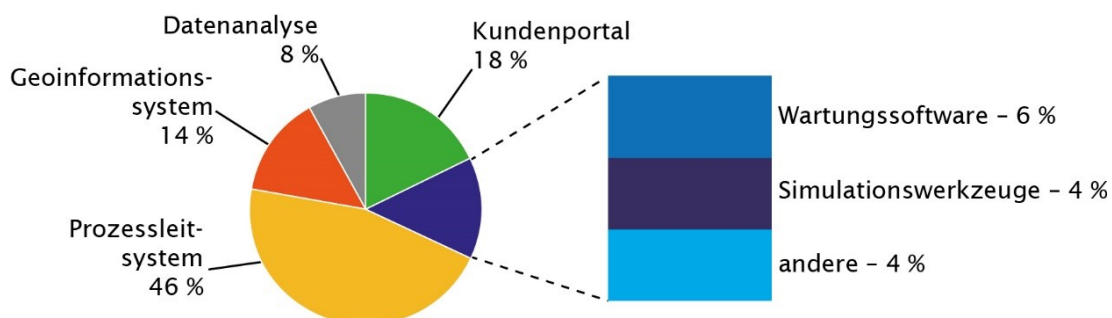


Anteil der Ereignisse, auf die die mit der jeweiligen Technologie reagiert wurde

Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 160

Im Vergleich dazu zeigt die Abbildung 4.12 die Einsatzhäufigkeiten der digitalen Technologien im Rahmen der Zusammenarbeit mit *externen Akteuren* wie Behörden, Bürgermeister, anderen Versorgern oder externen Dienstleistern. Erwartungsgemäß spielte hier das Prozessleitsystem eine etwas geringere Rolle (Nutzung in 46 % der Ereignisse). Dafür kamen insbesondere Kundenportale z.B. für die Informationsübermittlung an Kund/innen stärker zum Einsatz (in 18 % der Ereignisse). Der gegenüber der internen Nutzung leicht häufigere Einsatz von Datenanalysesoftware und Simulationswerkzeugen lässt sich dadurch erklären, dass entsprechende Analyseergebnisse vor allem von externen Akteuren wie Feuerwehren und Regulationsbehörden abgefragt werden.

Abb. 4.12 Nutzung digitaler Technologien im Rahmen von Aktivitäten mit externen Akteuren



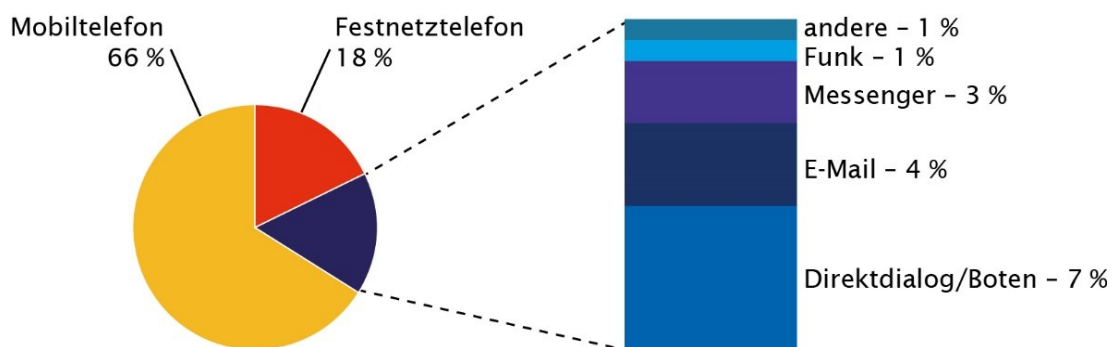
Anteil der Ereignisse, auf die die mit der jeweiligen Technologie reagiert wurde

Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 160

Nutzung von Kommunikationstechnologien

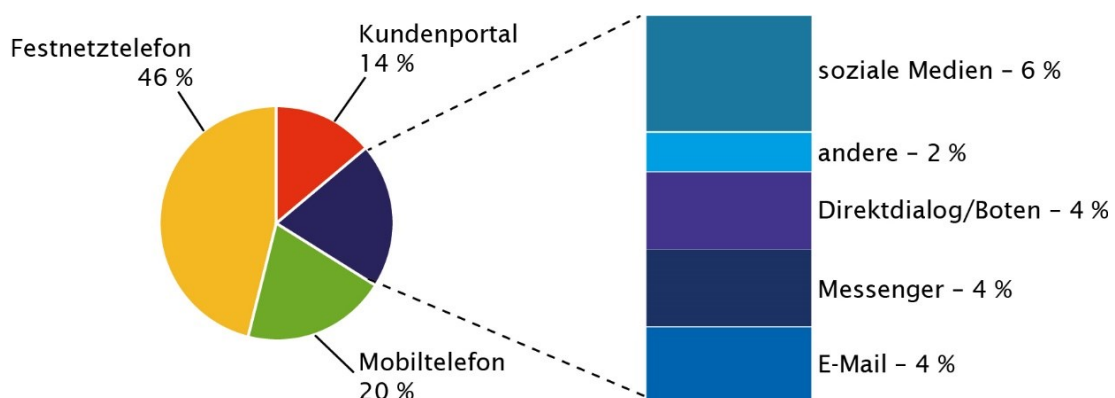
Kommunikationstechnologien spielen ebenfalls eine wichtige Rolle für die Störungs- und Krisenbewältigung. Die Kommunikation in Ausnahmesituationen beinhaltet in der Regel die Meldung von Störungen, Schadensereignissen oder Statusberichten, die Mitteilung und Abstimmung geplanter oder eingeleiteter Maßnahmen oder die Weitergabe von Prognoseinformationen, z. B. über die Dauer eines Versorgungsausfalls. In Bezug auf die Nutzung unterschiedlicher Kommunikationstechnologien zeigten sich in den Planspielübungen teilweise deutliche Unterschiede zwischen der betriebsinternen Kommunikation (Abb. 4.13) und der Kommunikation mit externen Akteuren (Abb. 4.14).

Abb. 4.13 Nutzung von Kommunikationstechnologien für die interne Kommunikation



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 158

Abb. 4.14 Nutzung von Kommunikationstechnologien für die Kommunikation mit externen Akteuren



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 158

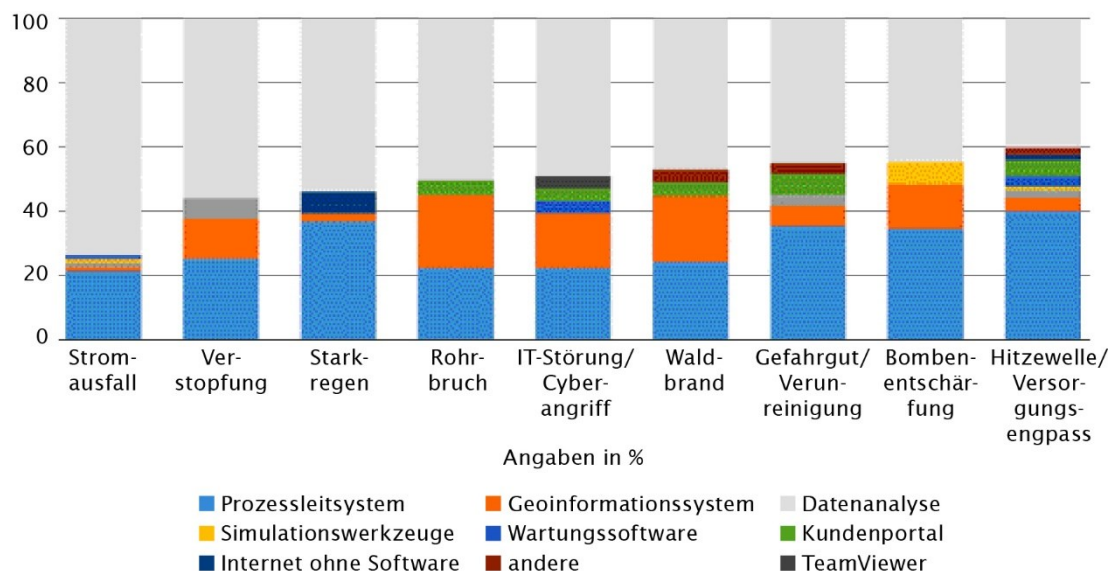


Während die Informationsübermittlung innerhalb des Unternehmens vorrangig über das Mobiltelefon lief, spielte das Festnetztelefon für die Kommunikation mit externen Akteuren wie Behörden, Bürgermeister, andere Versorger, Dienstleister oder einzelne große Abnehmer wie Krankenhäuser die wichtigste Rolle. Digitale Kommunikationsdienste wie E-Mail, Messenger oder soziale Medien wurden dagegen für die interne und externe Kommunikation nur vergleichsweise selten genutzt (jeweils in 6 oder weniger Prozent der Ereignisse). Einzig webbasierte Kundenportale wurden etwas häufiger für die Informationsübermittlung an die Verbraucher eingesetzt (in 14 % der Ereignisse). Gleichwohl deutet die – zwar noch etwas zögerliche – Nutzung von internetbasierten Kommunikationsdiensten auf eine Digitalisierung der Krisenkommunikation hin. In Zukunft kann eine stärkere Nutzung von digitalen Kommunikationsdiensten erwartet werden. Zunehmend zeichnet sich eine technische Konvergenz von Sprachkommunikation, Informationsaustausch und Echtzeitsteuerung auf mobilen Endgeräten ab. Auf Tablets ist je nach Aufgabenstellung einer Fachkraft vom Kundenmanagementsystem bis zum GIS alles installiert, was zur Erledigung der Aufgaben benötigt wird. Mittlerweile sind webbasierte Kommunikationsplattformen für das Ereignismanagement im Ausnahmefall auf dem Markt erhältlich. Diese bieten neben Gruppenchatfunktionen auch die Möglichkeit, Alarmmeldungen und Priorisierungen über vordefinierte Einstellungen zu optimieren und Informationen aus unterschiedlichen Quellen (z. B. Videos, Fotos und Lagepläne) gezielt an vorab spezifizierte Akteure zu verteilen. Neben der mobilen und schnellen Erreichbarkeit in zeitkritischen Situationen ist es vor allem die Multifunktionalität, die den strategischen Vorteil der mobilen Endgeräte im Kontext der Kommunikation im Störungs- bzw. Krisenfall ausmacht.

Ergebnisauswertung nach Handlungsstrang

Die Anwendung digitaler Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen ist stark von der Art der Betriebsstörung bzw. vom Krisenszenario abhängig. In den Planspielübungen fiel die Nutzungsintensität von digitalen Lösungen im Szenario Stromausfall erwartungsgemäß hinter der aller anderen Handlungssträngen zurück (Abb. 4.15). Die im Szenario durchgeführten Handlungen bezogen sich z. B. auf das Abschalten des Prozessleitsystems oder den erneuten Zugriff nach Sicherstellung der Notstromversorgung. Am häufigsten kamen digitale Technologien im Handlungsstrang Hitzewelle zum Einsatz. Die überwiegende Mehrheit der Reaktionen bezog sich hier auf die Nutzung des Prozessleitsystems, um die begrenzt vorhandenen Wasserressourcen durch eine situationsangepasste manuelle Steuerung bestmöglich nutzen zu können. Auch im Szenario Starkregen wurden Prozessleitsysteme intensiv genutzt, allerdings war hier der Handlungsspielraum infolge von limitierten Speicherkapazitäten deutlich enger.

Abb. 4.15 Nutzung digitaler Lösungen nach Handlungsstrang



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 161

Auch die Handlungsstränge Waldbrand und Bombenentschärfung fielen durch verhältnismäßig viele Reaktionen durch digitale Hilfsmittel auf. Im Waldbrandszenario wurden etwa anhand des Prozessleitsystems die Kapazitäten für die Löschwasserbereitstellung berechnet, um sie an die Feuerwehr zu kommunizieren, mit GIS Brandherde oder Hydranten lokalisiert oder über Webseiten bzw. Kundenportale Kund/innen vor Gefahren gewarnt. Im Szenario zur Bombenentschärfung wurde ebenfalls eine Simulation zur Netzhydraulik durchgeführt, um im Falle eines Schadens an einer Abwasserdruckleitung entscheiden zu können, welche Abwasserpumpwerke abzustellen sind. Im Falle des Gefahrgutunfalls wurde u. a. das Kundenportal genutzt, um die Bevölkerung über eine mögliche Gesundheitsgefährdung zu informieren.

4.4.3 Potenzieller Nutzen künftiger digitaler Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen

Im Rahmen der Planspielübungen wurde außerdem untersucht, ob bzw. inwiefern die zunehmende Digitalisierung der wasserwirtschaftlichen Anlagen und Prozesse durch die in Kapitel 4.2 diskutierten digitalen Innovationen für die Beherrschung von Ausnahmesituationen von Nutzen sein könnten. Dazu wurden die Mitspieler/innen gefragt, ob zusätzlich zu den aktuell verfügbaren Informationen und technischen Mitteln neue digitale Innovationen hilfreich oder sogar notwendig wären, um die in den verschiedenen Handlungssträngen gespielten Ausnahmeereignisse (besser) bewältigen zu können. Um Vergleichbarkeit



herzustellen, wurde den Teilnehmer/innen eine Auswahl an prototypischen Digitalisierungsinnovationen präsentiert, die für die Situationsbewältigung eingesetzt werden konnten, sobald die vorhandenen Mittel nicht mehr ausreichten. Folgende Innovationen standen zur Auswahl (siehe auch Kap. 4.2):

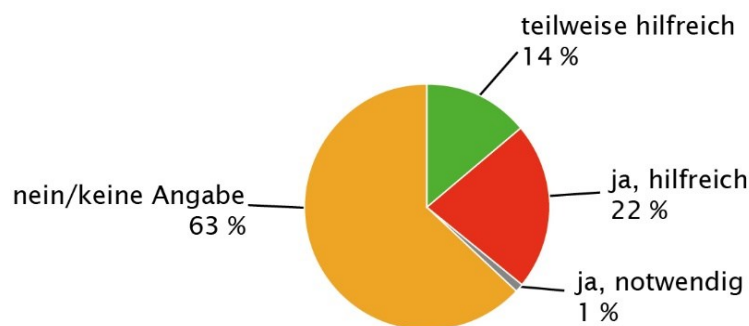
- *digitaler Zwilling Wasserwerk/Abwasserpumpwerk* zur Simulation von Anlagen und Anlagenteilen (z. B. Pumpen, Filter, Armaturen, Sensoren) für die Verbesserung von Entscheidungsgrundlagen und das Störfalltraining;
- *Expertenassistenz aus der Ferne durch VR und AR* zur Unterstützung der Mitarbeiter/innen durch schnell und ortonabhängig zugängliches Expertenwissen;
- *mobiler Druckrohratlas Wasser/Abwasser* zur hydraulischen Berechnung von Druck und Durchfluss im Leitungssystem, um Schadstellen in Echtzeit zu lokalisieren und Schadensfolgen zu simulieren;
- *Leckortung durch Geräuschellogger (Wasser)* zur Ermittlung und Lokalisierung von Leckagen im Versorgungsnetz durch zielgenaue Ortung und Überwachung;
- *LoRaWAN Wasser/Abwasser* zur besseren Überwachung und Steuerung von Netzen und Anlagen durch den internetunabhängigen Ausbau von Sensornetzen;
- *Löschwasserbereitstellung* zur automatisierten Berechnung von Löschwassermengen und der spezifischen Anforderungen für den jeweiligen Objektschutz;
- *offene Plattform für Wasseranalysedaten (Wasser)* für den Datenaustausch zwischen Wasserbetrieben, Laboren und Behörden, um den Verwaltungsaufwand zu reduzieren und Meldewege zu beschleunigen;
- *versorgerübergreifende Plattform Wasser* zur Integration und Vernetzung von Daten von Wasserbetrieben und Behörden, um kurzfristige Abstimmungen von Stabilisierungsmaßnahmen zu vereinfachen und langfristige Planungen gemeinsamer Infrastrukturvorhaben zu erleichtern;
- *automatische Zustandsanalyse von Kanalnetzen (Abwasser)* zur Erstellung von 3-D-Modellen mittels roboterbasierten Kamerasystemen und virtuellen Begehung des Kanalnetzes, um Schäden (teil)automatisch zu identifizieren und Sanierungsbedarfe zu ermitteln;
- *dezentrale Automatisierung des Abwasserpumpnetzes (Abwasser)* zur besseren Ausnutzung von Rückhaltekapazitäten und Stauraumpotenziale bei Starkregenereignissen durch Optimierung der Steuerung.

Ausgleich von Informationsdefiziten

In Bezug auf die Frage, ob neue digitale Innovationen in der Lage wären, bestehende Informationsdefizite in Ausnahmesituationen zu reduzieren, zeigte sich folgendes Bild. Von den Mitspieler/innen wurde in immerhin 37% der

gespielten Ausnahmeereignisse ein zusätzlicher Informationsbedarf geltend gemacht, um dann auch einzelne Digitalisierungsinnovationen auszuwählen, die den entstandenen Informationsbedarf hätten decken können (Abb. 4.16). Auffallend ist, dass zusätzliche Information überwiegend als (teilweise) hilfreich, aber nur sehr selten auch als notwendig erachtet wurden.⁸³ Die jeweiligen Ausnahmesituationen konnten in der Regel also auch mit den vorhandenen Informationen und technischen Mitteln bewältigt werden, wenn auch insgesamt weniger gut als möglich.

Abb. 4.16 Einschätzung des Nutzens digitaler Lösungen in Ausnahmesituationen



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 163

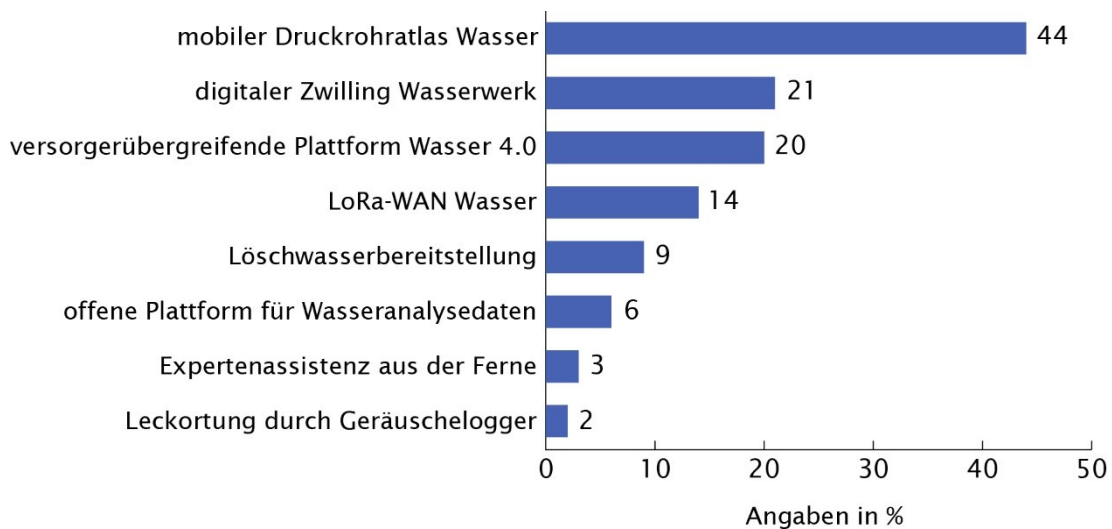
Nutzen in der Trinkwasserversorgung

Für den Bereich der Trinkwasserversorgung zeigt die Abbildung 4.17, durch welche digitalen Innovationen die für die Situationsbewältigung als hilfreich errichteten Zusatzinformationen hätten bereitgestellt werden können. In 44 % der Reaktionen hätte dies durch einen mobilen Druckrohratlas erfolgen können, um die Wasserverteilung und Druckschwankungen im Verteilnetz besser beurteilen und die Risiken potentieller Versorgungsengpässe schneller identifizieren zu können. In 21 % der Reaktionen wurde ein Bedarf für den digitalen Zwilling Wasserwerk gesehen, der als Grundlage für die Modellierung und Simulation von unerwarteten Ereignissen dienen könnte. Damit ließen sich die Auswirkungen situationsbedingter und unerwarteter Wasserbedarfe infolge z. B. von Hitzewellen oder des temporären Ausfalls einzelner Anlagen (besser) prognostizieren. Ebenfalls in jeder fünften Reaktion wurde die versorgerübergreifende Plattform Wasser nachgefragt. Weniger häufig wurde die LoRaWAN-Technologie gefordert (in 14 % der Reaktionen). Alle anderen Innovationen wurden in weniger als 10 % der Reaktionen nachgefragt.

⁸³ Letzteres bezog sich auf den Ausfall technischer Systeme im Falle eines Cyberangriffs bzw. das Fehlen von technischen Systemen für die Gefahrenstofferkennung.



Abb. 4.17 Nachfrage nach digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Trinkwasserversorgung

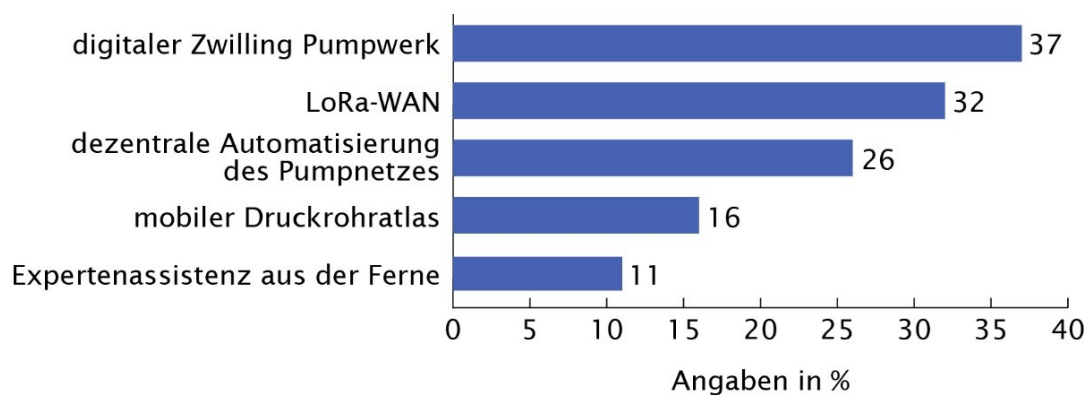


Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 166

Nutzen in der Abwasserentsorgung

Die Nachfrage nach Digitalisierungsinnovationen in der Abwasserentsorgung erwies sich etwas schwächer als in der Trinkwasserversorgung (Abb. 4.18). Der Bedarf nach digitalen Innovationen für eine bessere Informationsgrundlage betraf hier insbesondere den digitalen Zwilling Abwasserpumpwerke (in 37% aller Reaktionen, für die zusätzlicher Informationsbedarf festgestellt wurde).

Abb. 4.18 Nachfrage nach digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Abwasserentsorgung



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 173



Abwasserpumpwerke stellen wegen der Gefahr von Verstopfungen und Überschwemmungen, aber auch wegen der hohen Zahl dieser Anlagen sensible Knotenpunkte der Abwasserentsorgung dar. Ihr Ausfall hat oft Folgen, die nicht sofort kompensiert werden können, sondern zu Unterbrechungen zumindest von Teilen des Netzes führen. Mithilfe eines digitalen Zwillings von Abwasserpumpwerken könnten Verstopfungen, Rückstaueffekte und Überschwemmungen simuliert und entsprechende entscheidungsrelevante Erkenntnisse erlangt werden. An zweiter und dritter Stelle wurden mit jeweils 32 % und 26 % der Reaktionen die LoRaWAN-Technologien sowie die dezentrale Automatisierung des Abwasserpumpnetzes nachgefragt. Letzteres diene dazu, vorhandene Kapazitäten bedarfsorientiert bestmöglich auszunutzen und Abwasserüberläufe zu verhindern. Ein mobiler Druckrohratlas für das Kanalisationsnetz wurde in 16 % der Reaktionen für hilfreich empfunden, wobei die Kartierung in Echtzeit z. B. für die Ermittlung alternativer Förderwege oder Zielkläranlagen von Nutzen wäre. Anzumerken ist, dass die Technologien nicht unabhängig voneinander zu betrachten sind. Die dezentrale Automatisierung des Abwasserpumpnetzes und der mobile Druckrohratlas setzen auf dem Einsatz von LoRaWAN auf. Außerdem wurde die dezentrale Automatisierung des Abwasserpumpnetzes immer in Verbindung mit dem digitalen Zwilling Abwasserpumpwerk genannt. Insbesondere bei Starkregenereignissen stellen die begrenzten Speicherkapazitäten im Kanalisationsnetz physische Grenzen für die Bewältigung der Situationen dar. Generell und anders als bei der Wasserversorgung lässt sich die Abwasserinfrastruktur insofern nur bedingt an Ausnahmesituationen adaptieren, wobei auch digitale Innovationen hieran wenig ändern können. Ihr Nutzen für die Bewältigung von Ausnahmesituationen ist daher im Abwasserbereich geringer als in der Trinkwasserversorgung.

4.4.4 Bedeutung menschlicher Erfahrung in Ausnahmesituationen

In Ausnahmesituationen müssen Entscheidungen oft unter hohem Zeit- und Handlungsdruck sowie Unsicherheit gefällt werden. In solchen Situationen greifen menschliche Akteure oft auf implizites, schnell verfügbares Erfahrungswissen zurück, um Gefahren zu antizipieren und Handlungsoptionen zu prüfen. Der Nutzen von digitalen Lösungen zur Beherrschung von Ausnahmesituationen muss daher auch immer im Verhältnis zur menschlichen Erfahrung bewertet werden. Dabei kann die menschliche Erfahrung durch den Einsatz von digitalen Technologien langfristig auch verloren gehen, wenn Ausnahmesituation zunehmend automatisiert gelöst werden.



Rolle menschlicher Erfahrung

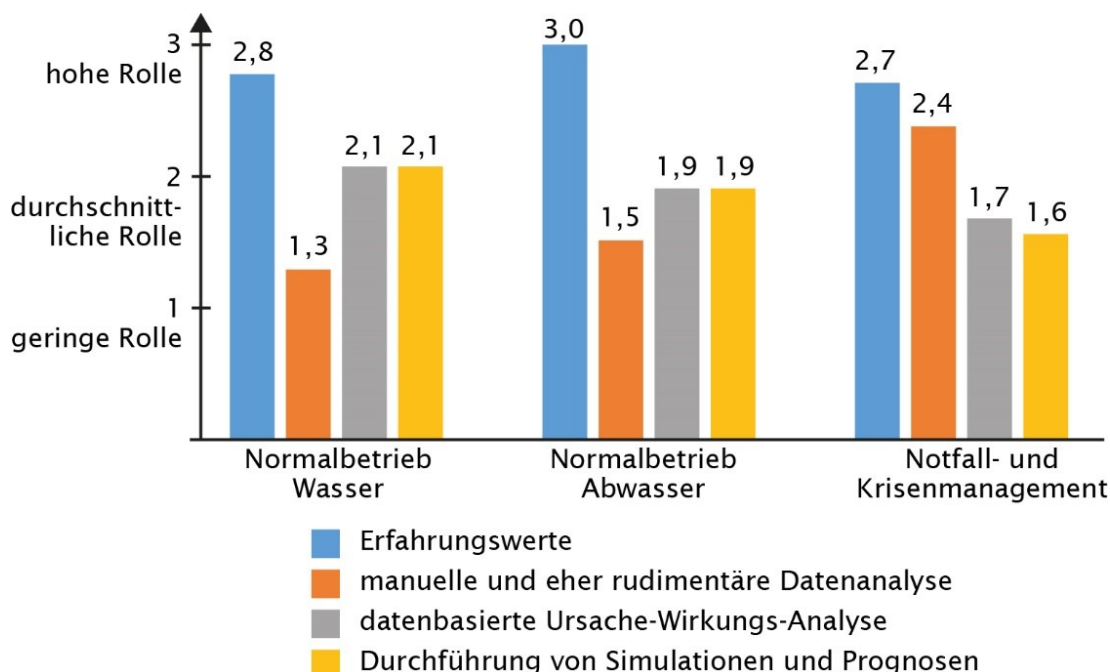
Die Befragung der am Planspiel teilnehmenden Unternehmensvertreter/innen nach der jeweiligen Rolle unterschiedlicher Verfahren zur Entscheidungsfindung im Normalbetrieb sowie im Kontext des Notfall- und Krisenmanagements stellte die entscheidende Bedeutung der menschlichen Erfahrung in beiden Handlungskontexten klar hervor. Gleichzeitig wurde deutlich, dass Erfahrung immer auch durch technische Verfahren unterstützt wird, allem voran durch Zustandsinformationen aus dem Prozessleitsystem. Auf der Grundlage solcher Daten stehen für die Entscheidungsfindung weitere Instrumente zur Verfügung, die von der manuellen Berechnung bis hin zu Prognosen und Simulationen mittels entsprechender Software reichen.

In Abbildung 4.19, die auf den Einschätzungen von 12 der 16 teilnehmenden Unternehmensvertreter/innen beruht, werden die Anteile unterschiedlicher Erkenntnismethoden an typischen Entscheidungsfindungsprozessen in unterschiedlichen Handlungskontexten (Normalbetrieb Wasser, Normalbetrieb Abwasser, Notfall- und Krisenmanagement) dargestellt. Bei den Erkenntnismethoden handelt es sich um: Erfahrungswerte, manuelle und eher rudimentäre Datenanalyse, datenbasierte Ursache-Wirkungs-Analysen sowie Durchführung von Simulationen und Prognosen.

Grundsätzlich wird in allen drei Handlungskontexten den erfahrungsbasierten und damit eher informellen Verfahren eine höhere Bedeutung beigemessen als den stark datengetriebenen formalisierten Verfahren. Vergleicht man darüber hinaus Normalbetrieb und Ausnahmesituation, zeigt sich wie bei der Auswertung der Planspiele, dass nicht etwa komplexe Analyse- und Simulationsverfahren zusätzlich in den Fokus geraten, sondern das Erfahrungswissen gemeinsam mit einfachen Methoden der Datenanalyse noch einmal an Bedeutung gewinnen.

Erfahrungswissen spielt demgemäß als Erkenntnismethode zur Entscheidungsfindung (noch) die entscheidende Rolle. Gerade in kritischen Situationen, die schwierige Entscheidungen verlangen, steigt die Bedeutung von Erfahrung.

Abb. 4.19 Einschätzung der Rolle von Erkenntnismethoden zur Entscheidungsfindung



Quelle: nach Hempel et al. 2021, S. 178

Unregelmäßigkeiten gehen tendenziell mit einem Vertrauensverlust in technisch erzeugte Information einher. Ermöglichen teilautomatisierte Systeme den Bediener/innen, individuell zu entscheiden, ob und in welcher Intensität eine Automatik genutzt werden soll, ist es an ihnen zu intervenieren, sobald es zum Widerspruch zwischen Anzeige- und Erfahrungswert kommt und eine korrekte Erkennung der Situation durch die Maschine angezweifelt werden muss. Im Planspiel wurde beobachtet, dass technisch erzeugte Informationen im Falle von Unregelmäßigkeiten immer wieder manuell kontrolliert wurden. Der Mangel an Adaptionfähigkeit der Automatik, ihre Starrheit und Determiniertheit, führen immer wieder zu der Entscheidung, ihren Einsatz auszusetzen. Der Einzelne schöpft aus seinem individuellen Erfahrungsschatz, den er in der Interaktion mit anderen Akteuren, aber auch mit der Technik erlernt hat (Hempel et al. 2021, S. 179).

Verlust entscheidender Krisenkompetenzen durch Einsatz digitaler Technologien

Werden alltägliche betriebliche Störungen immer häufiger automatisiert durch den Einsatz von Technik gelöst, kommt das Personal immer seltener dazu, die Bewältigung von Ausnahmesituationen zu üben. Mit der Digitalisierung von



Anlagen und Prozessen und durch den Einsatz zunehmend autonomer Entscheidungssysteme entkoppelt sich die menschliche Erfahrung von den technischen Prozessen immer stärker. Hierbei gehen auf lange Sicht aber entscheidende Kompetenzen der Mitarbeiter/innen für den Umgang mit Störungen und Krisen verloren. Es ergibt sich die als »Ironie der Automatisierung« (Bainbridge 1983) bekannte paradoxe Situation, wonach sich die ursprüngliche Handlungskompetenz der Operateure auf das Bedienen am Bildschirm reduziert, während in kritischen Situationen der Mensch benötigt wird, um als Redundanz zur Verfügung zu stehen (Manzey 2012, S.338). Es fehlt der langfristig angeeignete Erfahrungsschatz, der auf Basis impliziten Wissens eine Bewältigung von Ereignissen ermöglichen würde. Tritt jedoch eine komplexere Krise ein, die auch die Automatisierung nicht bewältigen kann, sind die Menschen überfordert (Hempel et al. 2021, S.184 f.).

4.4.5 Zwischenfazit

Die Digitalisierung spielt heute bereits eine zentrale Rolle bei der Bewältigung von Ausnahmesituationen und wird angesichts zunehmender Anforderungen künftig eine noch stärkere Rolle spielen. Frühwarnsysteme sind nötig, um die Folgen drohender Ereignisse frühzeitig und besser abschätzen zu können. Erforderlich sind auch Echtzeitsimulationen mit einem Höchstmaß an Verlässlichkeit, insbesondere um verfügbare Ressourcen gezielter einsetzen zu können. Noch sind komplexe Analyse- und Simulationswerkzeuge als Entscheidungsunterstützung in Störungs- oder Krisensituationen zu langsam bzw. die Kalibrierung von Modellen und die Durchführung der Berechnung zu zeitaufwendig, weswegen bisher einfache technische Lösungen präferiert werden.

Welche digitalen Technologien sich für die Störungs- und Krisenbewältigung als besonders hilfreich erweisen, hängt vom Ausnahmeereignis wie auch von den infrastrukturellen Gegebenheiten im Betrieb ab. Für kleinere Betriebe schränken die physischen Kapazitätsgrenzen den Spielraum für Reaktionen auf Ausnahmeereignisse stark ein, wobei auch digitale Technologien die physischen Grenzen nicht überwinden können. Trotz der voranschreitenden Digitalisierung bleiben daher Investitionen in zusätzliche physische Infrastrukturen wichtig, um die Wasserwirtschaft auf künftige Herausforderungen vorzubereiten. Hierfür sind neben finanziellen Ressourcen insbesondere auch zielgerichtete Strategien notwendig, in welchen bauphysikalische und Maßnahmen der Digitalisierung berücksichtigt werden. Von nutzen könnte die Digitalisierung und Vernetzung für die Etablierung von Unternehmenskooperationen zwischen benachbarten kleinen und mittleren Betreibern sein, um die vorhandenen Infrastrukturen gemeinsam zu nutzen. Ähnlich wie bei großen Betreibern könnten so die Redundanzen im System erhöht sowie flexiblere Betriebsweisen gerade auch in Störungs- und Krisensituationen ermöglicht werden.

Auch wenn die Potenziale der Digitalisierung für die Bewältigung von Ausnahmesituationen deutlich sind, bleibt die menschliche Erfahrung und die Krisenkompetenz der Mitarbeiter/innen entscheidend, um außergewöhnliche Situationen zu bewältigen bzw. den Normalbetrieb möglichst rasch wieder herzustellen.

4.5 Handlungsfelder

Die Digitalisierung von Betriebs- und Verwaltungsaufgaben in der Trinkwasserversorgung und Abwasserentsorgung bietet vielfältige Möglichkeiten zur Optimierung der wasserwirtschaftlichen Prozesse und damit zur Erhöhung der betriebswirtschaftlichen Effizienz, wobei solche Vorteile allerdings nicht zwangsläufig für alle Betriebe zu erwarten sind. Digitale Lösungen können zur Bewältigung von Herausforderungen beitragen, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel, dem Schutz der Trinkwasserressourcen oder der Transformation des Energiesystems stehen. Das Potenzial der digitalen Innovationen für die Wasserwirtschaft kann aktuell aber von vielen Betrieben noch nicht vollständig ausgeschöpft werden. Ein wesentliches Hemmnis sind die oft hohen Anschaffungs- und Instandhaltungskosten, die insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen nicht immer zu bewältigen sind. Vielfach ist die in den Betrieben eingesetzte Technik veraltet, außerdem fehlt es an IT-Kompetenzen und Digitalisierungsstrategien. Darüber hinaus sind die notwendigen infrastrukturellen Rahmenbedingungen zur Einführung digitaler Lösungen nicht immer und überall vorhanden. Im Folgenden werden Handlungsoptionen aufgezeigt, die für eine weiterführende Entwicklung der Chancen der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen in der Wasserwirtschaft als wesentlich erachtet werden. Die kürzlich beschlossene nationale Wasserstrategie greift etliche der aufgezeigten Herausforderungen auf. Die im Folgenden abgeleiteten Handlungsfelder können bei der Konkretisierung und Umsetzung der Strategie eine Informationsgrundlage bieten (BMUV 2023). Folgende Ziele stehen dabei im Fokus:

- überbetriebliche Potenziale für die gesamte Branche erschließen,
- Zugang zur Digitalisierung auch für kleine und mittlere Unternehmen erleichtern,
- infrastrukturelle Rahmenbedingungen schaffen,
- rechtliche Grundlagen anpassen,
- Auf- und Ausbau digitaler Expertise stärken sowie
- forschungs- und innovationspolitische Instrumente anpassen.



Überbetriebliche Potenziale für die gesamte Branche erschließen

Eine stärkere Vernetzung und Integration von wasserwirtschaftlich relevanten Daten zwischen Betrieben, Behörden und Industrie eröffnen vielfältige Optionen für eine bessere Datennutzung und damit für eine Optimierung wasserwirtschaftlicher Prozesse. Dazu ist jedoch ein besserer Datenaustausch und eine Standardisierung von Datenschnittstellen nötig.

Integration wasserwirtschaftlicher Daten organisieren

Die Erschließung von Digitalisierungspotenzialen lässt sich über die Integration von Daten aus unterschiedlichen Quellen sowie durch die Erleichterung des Zugangs zu für die Wasserwirtschaft relevante Daten befördern. Mit hochaufgelösten Daten beispielsweise zur Gewässerqualität, Bodenfeuchte, zu Grundwasserpegelständen oder mit Wetter- und Klimadaten aus der Fernerkundung können Wasserbetriebe genauere Prognosen zur Wasserverfügbarkeit und -qualität, zur Trinkwassernachfrage oder zur Auslastung der Abwasserkanalisation erstellen, um auf dieser Grundlage die wasserwirtschaftlichen Prozesse effizienter zu steuern. Über solche Daten verfügen teilweise die Umwelt- und Wasserbehörden. Diese werden meist jedoch ausschließlich für den unmittelbaren Erhebungszweck gesammelt und genutzt, weswegen sie für wasserwirtschaftliche Betriebe nur schwer zugänglich sind bzw. nur mit einem hohen Aufbereitungsaufwand nutzbar gemacht werden können (Oelmann/Czichy 2020, S. 141). Zwar gibt es erste behördliche Portale und Plattformen für den Datenaustausch, diese zeichnen sich aktuell allerdings durch einen geringen Bekanntheitsgrad und eine wenig verbreitete Nutzung aus (Holländer et al. 2019, S. 32). Die Erstellung eines öffentlichen Verzeichnisses von verfügbaren relevanten Daten, die Aufbereitung der Daten zur einfacheren Handhabung und die Vereinfachung der Prozesse zur Anforderung von Daten bei Behörden stellen vor diesem Hintergrund zentrale Stellschrauben dar, um die Datennutzung in der Wasserwirtschaft zu verbessern (Oelmann/Czichy 2020, S. 138). So wären z. B. eine Vereinheitlichung und Integration der vorhandenen Einzeldaten zu Grundwasserständen hilfreich, um den Zugang zu diesen Daten für die Wasserwirtschaft zu erleichtern. Die Grundlagen hierzu könnten etwa durch die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) geschaffen werden.

Künftig können ggf. auch Daten aus anderen Sektoren (z. B. Daten zur Landnutzungs- und Düngepraxis aus der Landwirtschaft, Wasserqualitätsdaten aus der Industrie) oder von privaten Dritten (z. B. Daten aus privaten Wetterstationen) integriert und verknüpft werden (Holländer et al. 2019, S. 74). Relevante Daten könnten zentral in einer übergeordneten Struktur (Datendrehscheibe) zur Verfügung gestellt werden, mit Metadaten versehen und benutzerfreundlich aufbereitet werden, damit auch kleinere Kommunen und Betriebe davon pro-

fitieren können (Holländer et al. 2019, S. 99 ff.). Mit dem Portal »Wasser-DE« der LAWA⁸⁴ werden bereits digitale Daten zentral öffentlich zugänglich gemacht (z. B. Messstellen nach Richtlinie 91/676/EWG, Daten aus dem Schadstofffreisetzungs- und -verbringungsregister). Allerdings nimmt die Initiative die kommunale Ebene bislang wenig in den Blick. Wichtig wäre, den Fokus des Portals über die aktuellen Berichtspflichten hinaus auf weitere Potenziale der Digitalisierung auszuweiten und die kommunale Ebene stärker zu adressieren. Die Internetplattform »W-Net 4.0«, die im Rahmen eines vom BMWi geförderten Projekts entwickelt wurde und über die Geoinformations- und Simulationsdaten sowie Werkzeuge für die Datenanalyse für Wasserversorgungsunternehmen bereitgestellt werden sollen, bietet hier einen Anknüpfungspunkt (Fraunhofer IOSB o. J.c). Eine zentrale Dateninfrastruktur wäre dauerhaft in den Organisationsstrukturen der Wasserwirtschaft zu verankern (Verbände, Behörden) und in der Wasserwirtschaft zu bewerben. Vor diesem Hintergrund ist eine umfangreiche politische Koordinierungsaufgabe notwendig (Holländer et al. 2019, S. 96).

Datenschnittstellen standardisieren

Digitale Innovationen in wasserwirtschaftlichen Betrieben setzen in der Regel einen reibungslosen und echtzeitfähigen Datenaustausch zwischen Geräten, Anlagen und IT-Systemen unterschiedlicher Hersteller voraus. Die Durchgängigkeit von Daten innerhalb eines Unternehmens, insbesondere zwischen verschiedenen Wertschöpfungsstufen, ist aber aktuell häufig nicht gegeben, da Hersteller teilweise unterschiedliche Datenschnittstellen verwenden. Um das volle Potenzial der Digitalisierung zu entfalten, bedarf es daher Standards für die Kompatibilität und Lesbarkeit von Datenformaten in und zwischen Systemen. Dazu sind einheitliche technische Standards zu definieren und ihre Umsetzung zu befördern. Dieser Prozess sollte von der Politik unterstützt werden. Vor diesem Hintergrund ist der Ansatz in der Zukunftsstrategie Forschung und Innovation der Bundesregierung, Normierung und Standardisierung in den Forschungs- und Entwicklungsprozess zu verankern (Bundesregierung 2023, S. 59), zu begrüßen.

Nicht nur die innerbetriebliche Datenverwendung gilt es durch Standardisierung zu verbessern, sondern auch den organisationsübergreifenden Datenaustausch zwischen Betreibern, kommunalen Akteuren und Behörden (z. B. Angaben zur Wasserabgabe, Planungsdaten für Bauwerke, Grundwasseruntersuchungen, Messdaten von Direkteinleitern) (Oelmann/Czichy 2020, S. 137). Durch Inkompatibilitäten entstehen hier zurzeit erhebliche Ineffizienzen und Digitalisierungsbemühungen werden ausgebremst. Erste Referenzarchitekturen für einen besseren Datenaustausch wurden von Bund, Ländern, Kommunen und

84 www.wasser-de.de/ (30.1.2023)



Wasserunternehmen entwickelt und Standardisierungsgremien ins Leben gerufen (Holländer et al. 2019, S. 99). Diese Aktivitäten sollten fortgesetzt, intensiviert und koordiniert werden. Eine wesentliche Rolle kann in diesem Zusammenhang die LAWA einnehmen.

Zugang zur Digitalisierung auch für kleine und mittlere Unternehmen erleichtern

Die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben ist vielfach mit hohen Investitionskosten verbunden und geht mit neuen Management-, Personal- und Kompetenzbedarfen einher. Die Digitalisierung der Wasserwirtschaft wird daher vorrangig von großen Unternehmen vorangetrieben, während mittlere und vor allem kleine Betriebe meist nicht über die notwendigen finanziellen und personellen Ressourcen verfügen, um eigenständig größere Digitalisierungsvorhaben durchzuführen. Damit auch diese Betriebe von den Digitalisierungspotenzialen profitieren können, müssen bestehende Einstiegshürden soweit wie möglich abgebaut und die Betriebe bei der Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben unterstützt werden.

Formen der überbetrieblichen Zusammenarbeit anreizen und unterstützen

Ein Ansatz zur Reduzierung des Problems fehlender Ressourcen in kleinen und mittleren Unternehmen besteht in der Etablierung von (regionalen) Kooperationen, um größere Digitalisierungsvorhaben gemeinsam zu stemmen (Oelmann/Czichy 2020, S. 137). Eine niedrigschwellige Form der Zusammenarbeit ist die gemeinsame Beschaffung und ggf. Nutzung von IT-Komponenten (z. B. digitale Wasserzähler, Robotersysteme für die Kanalinspektion), um die Kosten zu reduzieren. Weitergehende Kooperationsformen bestehen beispielsweise in der Gründung gemeinsamer Tochterunternehmen, um die personellen und fachlichen Ressourcen im Bereich der Digitalisierung zu bündeln, wodurch gleichzeitig auch dem Fachkräftemangel und der aktuell eingeschränkten Verfügbarkeit von spezialisierten IT-Dienstleistern begegnet werden könnte. Die Etablierung von betriebsübergreifenden Formen der Zusammenarbeit für die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben sollte durch Kommunen, Länder und Bund unterstützt bzw. zumindest nicht behindert werden. So wäre beispielsweise zu prüfen, inwiefern verschiedene Kooperationsformen Auswirkungen auf die Besteuerung der Unternehmen hätten, damit Anreize der Zusammenarbeit nicht durch nachteilige (steuerliche) Rahmenbedingungen konterkariert werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 137).

Neue Formen der überbetrieblichen Zusammenarbeit werden künftig auch für die Bewältigung von Engpässen (z. B. infolge längerer Trockenphasen) an Bedeutung gewinnen, um durch den betriebsübergreifenden Einsatz digitaler



Technologien die Nutzung der vorhandenen infrastrukturellen Kapazitäten zu optimieren. Voraussetzung dafür ist, dass sich Betriebe auf einer regionalen Ebene zu einem dauerhaften Informationsaustausch entschließen und ihre Reservekapazitäten (z.B. Wasserspeicher, Regenentlastungsbauwerke) im Bedarfsfall auch anderen Betreibern zur Verfügung stellen. Es existieren bereits Kooperationsmodelle (z.B. versorgerübergreifende Verbünde oder Betriebsführerschaften), um wechselseitig Redundanzen benachbarter Unternehmen zu integrieren. Die Unterstützung von unternehmensübergreifenden Netzwerken könnte zur Stärkung der Resilienz von wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen beitragen (Hempel et al. 2021, S. 191 u. 196).

Neben Betriebskooperationen können schließlich auch neue Formen der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen der Wasserwirtschaft und IT-Dienstleister oder andere relevante Akteure von Nutzen sein. Um Kompetenzen in den Bereichen Datenhaltung, Modellierung und Auswertung für die kleineren Betriebe zugänglich zu machen, wäre der Aufbau von übergeordneten Kompetenzzentren, auf die kleine und mittlere Unternehmen zurückgreifen können, erstrebenswert (Holländer et al. 2019, S. 98). Ein Beispiel für eine solche Infrastruktur ist der von zwei Bundesländern gegründete und auf den öffentlichen Sektor spezialisierte IT-Dienstleister [dataport.kommunal](https://www.dataport-kommunal.de/)⁸⁵. Auch im Rahmen der Förderung von Smart-City-Strategien könnte der Digitalisierung der Wasserwirtschaft einen größeren Stellenwert eingeräumt werden, um so Synergien zwischen den Versorgungssektoren und Verwaltungsbereichen zu erschließen.

Digitalisierungsvorhaben fördern

Kleine und mittlere Unternehmen benötigen bei der Einführung von digitalen Innovationen fachliche und finanzielle Unterstützung. Dies beginnt bereits bei der Identifizierung von betriebsspezifischen Potenzialen, betrifft aber genauso die Planung, Durchführung und Finanzierung von Digitalisierungsvorhaben sowie damit einhergehende Aufgaben wie die Personalqualifizierung. Zum Teil können Investitionen in digitale Lösungen über die Förderung von Maßnahmen zum Klima- und Ressourcenschutz finanziell unterstützt werden. Dies gilt z.B. für Energieeffizienzmaßnahmen, die über Darlehen⁸⁶, themenspezifische Förderprogramme der Länder (z.B. Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz von wasserwirtschaftlichen Anlagen⁸⁷) oder Förderprogramme des Bundes

85 www.dataport-kommunal.de/ (31.1.2023)

86 www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/NRW/nrwbank-effizienzcredit.html (2.11.2022)

87 www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Sachsen-Anhalt/wasserwirtschaftliche-vorhaben.html; www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/Rheinland-Pfalz/foerderrichtlinien-wasserwirtschaftsverwaltung.html; www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Land/NRW/ressourceneffiziente-abwasserbeseitigung.html (2.11.2022)



wie die Klimaschutzinitiative⁸⁸ unterstützt bzw. bezuschusst werden. Allerdings ist die Antragstellung für Förderleistungen arbeitsaufwendig und setzt Fachkompetenzen voraus, was kleinere Betriebe schon überfordern könnte. Um weniger erfahrenen Einrichtungen den Zugang zu solchen finanziellen Unterstützungsmaßnahmen zu erleichtern, bedarf es fachlicher Beratung. Bestehende Förderprogramme wie »go-digital« oder »Digital jetzt« des BMWK setzen bei der fachlichen Beratung an und unterstützen branchenunabhängig KMU u. a. durch förderfähige Beratungsleistungen, die der Ausarbeitung und Umsetzung einer unternehmensspezifischen Digitalisierungsstrategie dienen,⁸⁹ oder durch Zuschüsse bei Investitionen in digitale Technologien und in die Mitarbeiterqualifizierung. Von solchen Förderprogrammen können auch kleine und mittlere Betriebe der Wasserwirtschaft profitieren, weshalb sie fortgesetzt, ausgebaut und in der Wasserwirtschaft aktiv beworben werden sollten. Ein Nachteil ist allerdings, dass sich die bestehenden Förderprogramme nicht speziell an die Wasserwirtschaft richten. Aufgrund der branchenspezifischen Anforderungen (z. B. im Kontext der Rolle der Wasserwirtschaft als Kritische Infrastruktur) erscheint es wichtig, dass förderfähige Beratungsdienstleistungen nur von Beratungsunternehmen mit profunden Kenntnissen der Wasserwirtschaft erbracht werden, um den Besonderheiten des Sektors ausreichend Rechnung zu tragen. Auch ist von einer finanziellen Bezuschussung von isolierten Digitalisierungsprojekten abzuraten, wenn diese nicht in eine Gesamtstrategie für die Digitalisierung des Betriebs eingebettet sind (Oelmann/Czichy 2020, S. 136). Speziell auf die Wasserwirtschaft zugeschnittene Förderprogramme könnten diese Bedingungen eher erfüllen als branchenübergreifende Förderprogramme zur Einführung digitaler Lösungen.

Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse in die wasserwirtschaftliche Praxis sicherstellen

Die Fragmentierung der Wasserwirtschaft stellt für die Verbreitung digitaler Technologien eine Herausforderung dar. Um insbesondere auch kleine und mittlere Betriebe zu erreichen, ist es wichtig, Mechanismen für den besseren Transfer von Erkenntnissen aus Forschungsprojekten und Best-Practice-Beispielen in die wasserwirtschaftliche Praxis zu etablieren. Dazu sind in einigen Bundesländern bereits erste Initiativen und Plattformen entstanden. Das vom Land Nordrhein-Westfalen und mehreren Wasserunternehmen gegründete Kompetenzzentrum Digitale Wasserwirtschaft (KDW-NRW) stellt eine solche regionale Vermittlungsplattform dar. Das KDW-NRW organisiert

88 www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMU/richtlinie-zur-foerderung-von-klimaschutzprojekte.html (2.11.2022)

89 www.bmwk.de/Redaktion/DE/FAQ/go-digital/faq-go-digital.html?cms_artId=591850 (2.11.2022)



Veranstaltungen und stellt eine digitale Plattform zur Verfügung, um Best-Practice-

Beispiele vorzustellen, Kontakte zu vermitteln und den Transfer und Erfahrungsaustausch zwischen Forschung und Praxis zu fördern.⁹⁰ Von dieser Erfahrung und Kompetenz könnten andere Bundesländer profitieren, wofür der Austausch über Ländergrenzen hinweg zu intensivieren wäre. Zudem könnten dem KDW-NRW entsprechende Strukturen auch auf Bundesebene angedacht werden. Eine relevante Rolle könnten hier ggf. die Branchen- (DVGW, DWA, BDEW) und Fachverbände (Kommunal 4.0⁹¹) spielen, die ihre Aktivitäten in diesem Bereich (ggf. durch staatliche Förderung unterstützt) intensivieren könnten, oder auch die Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities (BMWSB o.J.). Auch Onlineplattformen könnten den Wissenstransfer unterstützen.⁹²

Infrastrukturelle Rahmenbedingungen schaffen

Ohne die Schaffung zukunftsfähiger Infrastrukturen der IKT sind viele digitale Lösungen nicht anwendbar. Denn das Potenzial vieler technischer Innovationen zeigt sich erst anhand von Echtzeitverfahren und der Übertragung und Verarbeitung großer Datenmengen. Grundlage dafür sind leistungsfähige und flächendeckend verfügbare Datenübertragungsnetze sowie der Zugang zu ausreichenden Rechen- und Speicherkapazitäten.

Breitbandausbau

Akteure der Wasserwirtschaft bemängeln Defizite hinsichtlich einer robusten und flächendeckenden Verfügbarkeit von Breitbandinfrastruktur. Dies hat vor allem für kleine und mittlere Betriebe der Wasserwirtschaft in ländlichen Regionen zur Folge, dass die Bedingungen für die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben nicht gleichwertig ausgestaltet sind. Der flächendeckende Breitbandausbau stellt somit auch für die Wasserwirtschaft eine wesentliche Realisierungsbedingung für eine voranschreitende Digitalisierung dar (Oelmann/Czichy 2020, S. 142 f.).

90 www.kompetenzzentrum-digitale-wasserwirtschaft.de/ (31.1.2023)

91 Der Bundesverband Kommunal 4.0 ist aus dem Fördermittelprojekt »Kommunal 4.0« des BMWK zur Erweiterung der Smart-Service-Welt entstanden (<https://bvk4-0.de>; 30.1.2023).

92 Um die Verbreitung digitaler Lösungen in der Wasserwirtschaft zu fördern, bietet seit Kurzem die Plattform »Digital Lotse Wasser« Informationen über verfügbare Lösungen, ihre Funktionalitäten und damit einhergehende Vorteile (www.digital-lotse-wasser.org; 20.2.2023).



Alternative Datenübertragungsnetze ausbauen

Alternativ bzw. ergänzend zur Datenübertragung über bestehende öffentliche Telekommunikationsnetze wird der Aufbau und Betrieb spezieller Funknetze z. B. auf Basis der LoRaWAN-Technologie in Betracht gezogen. Auf- und Ausbau solcher Übertragungsnetze erfordern hohe Investitionen, die für einzelne Betriebe ohne finanzielle Unterstützung in der Regel nicht zu leisten sind (Oelmann/Czichy 2020, S. 137). Allerdings können vom Aufbau eines kommunalen LoRaWANs nicht nur die Wasserwirtschaft, sondern auch alle anderen kommunalen Infrastrukturen profitieren (z. B. die Abfallwirtschaft). Vor diesem Hintergrund sollten solche Vorhaben im Rahmen einer sektorübergreifenden Zusammenarbeit geplant und durchgeführt werden. Kommunen, Länder und Bund könnten hier durch die Koordinierung und Unterstützung solcher Kooperationen und Investitionsvorhaben einen wesentlichen Beitrag leisten (Oelmann/Czichy 2020, S. 140).

Öffentliche Clouddienstleistungen bereitstellen

Im Bereich der IT sind viele und insbesondere kleine und mittlere Unternehmen der Wasserwirtschaft auf externe Dienstleister angewiesen, so auch für die Speicherung und Verarbeitung großer Datenmengen, wo zunehmend Clouddienstleistungen in Anspruch genommen werden. Dadurch entstehen jedoch ggf. Abhängigkeiten zu einzelnen großen kommerziellen Cloudanbietern, was nicht zuletzt auch Sicherheitsfragen aufwirft. Nicht nur geraten möglicherweise sensible Daten in den Einflussbereich gewerblicher Anbieter, auch könnte von einem Ausfall eines großen Cloudanbieters gleichzeitig eine größere Zahl an Unternehmen der Wasserwirtschaft betroffen sein (Hempel et al. 2021, S. 45 u. 186). Vor diesem Hintergrund wäre zu prüfen, ob und inwiefern durch die Entwicklung einer staatlichen Cloud, an der z. B. mit »Gaia X«⁹³ schon gearbeitet wird, die Abhängigkeiten zu gewerblichen Anbietern sowie Sicherheitsbedenken reduziert werden könnten. Eine staatliche Cloudinfrastruktur würde außerdem mögliche Wettbewerbsnachteile vor allem für finanzschwächere kleine und mittlere Unternehmen der Wasserwirtschaft verringern sowie das Teilen und Nutzen von Daten vereinfachen.

Rechtliche Grundlagen anpassen

Vielfach kann das Potenzial digitaler Innovationen erst erschlossen werden, wenn eine Anpassung des regulatorischen Rahmens erfolgt. Dies gilt beispielsweise für folgende Aspekte.

93 <https://gaia-x.eu/> (2.2.2023)

Gesetzliche Rahmenbedingungen für dynamische Preismodelle schaffen

Infolge des Klimawandels wachsen die Sorgen vor immer häufigeren und längeren Trockenheitsperioden, die verstärkt zu Engpässen beim Wasserdargebot und damit bei der Wasserversorgung führen könnten. Außerdem drohen häufigere Kapazitätsengpässe, wenn in heißen Tagesstunden die Wassernachfrage in die Höhe schnellte. Um Versorgungs- und Kapazitätsengpässen vorzubeugen, könnten Anreize für einen sorgsamsten Wassernutzung in Zeiten von Knappheit hilfreich sein. Als Ansatz hierzu werden dynamische Preismodelle diskutiert, die verbraucherseitig Lenkungswirkungen entfalten sollen. Gegenwärtig sind die Endkundenpreise für Trinkwasser in aller Regel konstant und damit unabhängig von der Gesamtnachfrage zu einem spezifischen Zeitpunkt. Weder (drohende) Dargebotsengpässe noch das mögliche Erreichen von Kapazitätsgrenzen kommen in den Preisen zum Ausdruck (Hempel et al. 2021, S. 46).

Im Fall eines Engpasses beim Wasserdargebot bestünde das Ziel darin, eine Senkung der Nachfrage zu bewirken. In der einfachsten Form ließe sich dies beispielsweise durch eine differenziertere Bepreisung für verschiedene Monate erreichen, wobei die Wasserversorger die Preise in Abhängigkeit der kurz- und mittelfristigen Dargebotssituation festlegt würden. Die Anforderungen an die Zählerausstattung der Kunden wären dabei vergleichsweise gering, denn zu Abrechnungszwecken würden monatscharfe Werte genügen. Um Kapazitätsengpässen zu begegnen, wäre hingegen eine zeitliche Verlagerung des Wasserverbrauchs mit dem Ziel einer Glättung von Lastspitzen erforderlich. Hierbei wäre insbesondere die Struktur der Tages- bzw. Stundennachfrage zu analysieren, denn von ihr hängt das notwendige Ausmaß der Verlagerung ab. Dynamische Preismodelle mit tageszeitabhängigen Preisen stellen höhere Anforderungen an die Zählerausstattung beim Kunden, da Nachfragedaten quasi in Echtzeit für die Preisgestaltung und für Abrechnungszwecke erhoben werden müssen (Hempel et al. 2021, S. 46 f.). Ergänzend wäre daher eine staatliche Unterstützung für die technologischen Investitionen zur Umsetzung dynamischer Wasserpreise (vor allem digitale Wasserzähler) in Erwägung zu ziehen. Demgegenüber stünden die vermiedenen Investitionskosten für den Ausbau der Infrastruktur zur Deckung der Lastspitzen.

Mit Blick auf die Wasserversorger könnten Wasserentnahmeentgelten, die dazu dienen, Anreize für einen vorsorgenden Ressourcenschutz zu setzen und die Erhaltung und Verbesserung der Gewässer, aus denen Wasser entnommen wird, zu finanzieren (Geidel et al. 2021, S. 72), dynamisch berechnet werden und an die Auslastung der Versorgungsinfrastruktur in Echtzeit gekoppelt werden. So könnte die Wasserentnahme aus Grund- und Oberflächengewässer gelenkt werden. Seit Jahren ist die Umsetzung des Verursacherprinzips im Wasserbereich hoch umstritten (Geidel et al. 2021, S. 73) und erfordert eine politische Entscheidung des Gesetzgebers.



Datenschutz und Datensicherheit sicherstellen

Entscheidend für eine digitale Transformation hin zu einer stark vernetzten digitalen Wasserwirtschaft ist die Schaffung einer rechtlichen Grundlage für den Umgang sowohl mit personenbezogenen Daten, beispielsweise im Rahmen des Einsatzes von digitalen Wasserzählern, als auch mit Maschinen- und Betriebsdaten. Der Umgang mit personenbezogenen Daten ist mittlerweile durch das Datenschutzrecht umfassend geregelt. Zu strenge datenschutzrechtliche Regelungen führen bei Betreibern der Wasserwirtschaft jedoch teilweise zu Verunsicherung und könnten so die Umsetzung von Digitalisierungsvorhaben (z. B. die Einführung von digitalen Wasserzählern) behindern. Vor diesem Hintergrund wäre zu prüfen, inwiefern branchenspezifische datenschutzrechtliche Regelungen möglich und sinnvoll wären (Oelmann/Czichy 2020, S. 140).

Für den Umgang mit wasserwirtschaftlichen Daten (u. a. Maschinen- und Betriebsdaten, Wasserqualitätsdaten) existieren spezifische, allerdings nicht immer kohärente Vorgaben (Holländer et al. 2019, S. 88). Auch Artikel 14 Abs. 1 der Richtlinie (EU) 2019/1024⁹⁴, der das Konzept von hochwertigen Datensätzen mit besonderen gesellschaftlichen Vorteilen (darunter auch Umweltdaten) einführt und dazu verpflichtet, diese Daten in maschinenlesbarer Form, über Programmierschnittstellen aufzubereiten, und eine Herunterladung zu ermöglichen spezifiziert nicht, welche Umweltdaten im Einzelnen von dieser Vorgabe betroffen sind (Martini/Ruscheimer 2021, S. 529). Entstehen künftig unternehmensübergreifende Verbünde, werden einzelne Betriebe Unternehmensdaten teilen und ggf. die Datenhoheit abgeben müssen. Um diese Daten zu schützen, aber auch um einen diskriminierungsfreien Zugang zu öffentlichen Daten zu gewährleisten, die ein vorrangiges Interesse der Allgemeinheit rechtfertigen, ist eine Regulierung von Zugriff, Verarbeitung und Weitergabe von Daten erforderlich (Holländer et al. 2019, S. 87; Oelmann/Czichy 2020, S. 143). Wichtig ist dabei, Regulierungslücken zu identifizieren, zu schließen und die Rechte und Pflichten des öffentlichen Sektors und von privaten Unternehmen zu klären. Auch zu klären sind Haftungsfragen für Fälle von Datenmissbrauch, Missachtung von Schutz- und Sicherheitsstandards (Holländer et al. 2019, S. 88 f.) und bei fehlerhaft ausgelösten automatisierten Betriebsprozessen.

Auf- und Ausbau digitaler Expertise stärken

Die Einführung von digitalen Innovationen erfordert den Auf- bzw. Ausbau digitaler Expertise im Betrieb. Insbesondere die hohe Innovationsdynamik steht häufig im Konflikt zur etablierten Betriebspraxis sowohl in der operativen Betriebsführung als auch in funktionalen Bereichen, wie dem Personalmanage-

⁹⁴ Richtlinie (EU) 2019/1024 über offene Daten und die Weiterverwendung von Informationen des öffentlichen Sektors (Neufassung)



ment. Dies stellt insbesondere kleine und mittlere Unternehmen mit beschränkten finanziellen und personellen Ressourcen vor große Herausforderungen. Die notwendige IT-Expertise wird daher in der Regel durch externe Dienstleister in den Betrieb geholt, wodurch aber Abhängigkeiten entstehen. Gerade bei Störungen oder Ausfällen der digitalen Technologien sind die Betreiber vielfach nicht in der Lage, die Probleme eigenständig zu beheben, und daher auf unmittelbar verfügbare externe Fachunterstützung angewiesen. Um solche Abhängigkeiten zu reduzieren, ist ein innerbetrieblicher Kompetenzaufbau notwendig. Dieser kann z. B. durch eine staatliche Unterstützung von Schulungsmaßnahmen (z. B. durch Bezuschussung, steuerliche Absetzung), den Ausbau der Schulungsangebote oder durch die Aufnahme von IT-Lerninhalten in die Rahmenlehrpläne und Ausbildungsordnungen der wasserwirtschaftlichen Aus- und Weiterbildungsberufe sowie in die Curricula entsprechender Studiengänge gefördert werden (Hempel et al. 2021, S. 196 f.).

Forschungs- und innovationspolitische Instrumente anpassen

Aus der Analyse des Stands der Technik und von Potenzialen für die Wasserwirtschaft können folgende Forschungsfelder abgeleitet werden, die eine Anpassung der existierenden Forschungs- und innovationspolitische Instrumente nach sich ziehen:

Digitale Technologien für die Wasserwirtschaft weiterentwickeln

Mit Blick auf digitale Innovationen für die Wasserwirtschaft wurden im vorliegenden TA-Projekt noch vielfältige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe identifiziert. Diese betreffen u. a.:

- die Entwicklung preiswertiger und zuverlässiger Onlinesensoren für Wasserqualitätsanalysen;
- die Weiterentwicklung von analytischen Auswertungsmethoden zur Erfassung der Stoffvielfalt und von Verunreinigungen durch Spurenstoffe im Wasser einschließlich der Entwicklung von Systemen zur automatischen Gefahrenerkennung;
- Technologien zur Ermittlung von Rohrbrüchen und Leckagen mittels Sensor- und Fernerkundungsdaten zur vorausschauenden Wartung und Instandhaltung;
- Verfahren zur automatischen Ursachenforschung für Kontaminationen, insbesondere in Leitungsnetzen
- ein verbessertes und empirisch fundiertes Verständnis der räumlichen und zeitlichen Verteilung von Nitrat in Grund- und Oberflächengewässer durch die Kopplung von Daten aus der Wasser- und Landwirtschaft;



- › technische Verfahren zur Erkennung und Ermittlung illegaler Einträge in die Abwasserkanalisation;
- › technische Verfahren zur Überwachung der Verbreitung von Krankheiten im Abwasser.

Außerdem könnte eine Förderung von Pilotvorhaben und Reallaboren angestrebt werden, denen eine hohe Breitenwirkung für die gesamte Branche zugesprochen wird. Dabei könnten insbesondere solche digitalen Lösungen erprobt werden, die hohe Investitionen für einzelne Betriebe erfordern und zugleich Vorteile für andere Nutzer bringen würden (Enablertechnologien wie LoRa-WAN). Von Bedeutung könnten Reallabore außerdem für die Durchführung realitätsnaher Kosten-Nutzen-Analysen für neue digitale Innovationen sein, deren Ergebnisse in die Beratungs- und Vermittlungspraxis überführt werden (Oelmann/Czichy 2020, S. 137).

Insbesondere wird digitalen Technologien zur indirekten Verhaltenssteuerung ein großes Potenzial zur Steuerung der Wasserverbräuche beigemessen. Dafür bietet es sich an, Reallabore zur Erprobung der Auswirkungen von Instrumenten der indirekten Verhaltenssteuerung und insbesondere auch von dynamischen Wasserpreisen und dynamisch berechneten Wasserentnahmegelten auf das Wasserverbrauchsverhalten und auf den Schutz der Trinkwasserressourcen zu fördern.

Über die Erarbeitung technischer Lösungen im Rahmen von Forschungsprojekten hinaus stellt insbesondere die Überführung von Forschungsergebnissen in marktfähige Lösungen eine Herausforderung dar. Transdisziplinäre Verbundprojekte, wie sie z. B. im Rahmen des Programms »Digital GreenTech« gefördert werden, sind dafür ein wichtiger Ansatzpunkt. Ergänzend wäre eine begleitende und/oder an die Forschungsprojekte anschließende Zusammenarbeit mit relevanten Multiplikatoren (z. B. Branchen- und Fachverbänden, Koordinierungs- und Transferstelle Modellprojekte Smart Cities) zu prüfen.

Fördermöglichkeiten für Digitalisierungsvorhaben ausweiten und Förderprogramme einfacher ausgestalten

Betreiber bemängeln teilweise, dass die Fördermöglichkeiten für Forschung im Bereich der Digitalisierung eingeschränkt und bestehende Programme zur Forschungsförderung kompliziert ausgestaltet sind. Gemäß den durch Oelmann und Czichy (2020, S. 137 f.) durchgeführten Betreiber- und Experteninterviews wünschen sich wasserwirtschaftliche Betriebe Fördermittel, die

- › in einem unbürokratischeren Antragsverfahren beantragt werden können,
- › eine für die Unternehmen unmittelbar relevante Forschung im Fokus haben,
- › auch eine Mitarbeiterqualifizierung bezüglich der Digitalisierung fördern,
- › stärker auf Unternehmen der kommunalen Daseinsvorsorge abzielen und
- › umfassend beworben werden.



Empirisches Wissen zum Stand der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft erweitern

Der Wissensstand zur Verbreitung und Nutzung von digitalen Technologien in der Wasserwirtschaft ist sehr lückenhaft. So fehlen nähere Informationen dazu, welche digitale Technologien eingesetzt werden und von welcher Art von Betrieben (z. B. in Abhängigkeit der Unternehmensgröße, Organisationsform, erbrachten Dienstleistungen) sie bevorzugt werden. Vorliegende Studien sind größtenteils nicht repräsentativ, weisen keine Differenzierung nach Technologietypen auf und/oder stellen nur Momentaufnahmen dar. Ein genaueres, systematisches und regelmäßiges Abbild der Digitalisierung der Wasserwirtschaft in Deutschland wäre wichtig, um Unterstützungsbedarfe festzustellen, auf verschiedene Unternehmensarten angepasste Fördermöglichkeiten zu entwickeln und gute Praxisbeispiele zu identifizieren bzw. zu erarbeiten, die in die Beratung von wasserwirtschaftlichen Betrieben einfließen können.

Nutzen von digitalen Technologien evaluieren

Der Einsatz von digitalen Technologien zur Optimierung betrieblicher Aufgaben oder zur Bewältigung künftiger Herausforderungen stellt unter Nachhaltigkeitsaspekten nicht immer die beste Lösung dar. So ist der Einsatz auch mit Auswirkungen verbunden, z. B. auf die Mitarbeiter/innen, die Informationssicherheit oder den Energieverbrauch der IKT-Infrastrukturen. Vor diesem Hintergrund sind für Digitalisierungsvorhaben auch stets die unerwünschten Wirkungen zu betrachten und gegenüber dem Nutzen abzuwägen. Dies ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, weil eine Bilanzierung sehr stark von den betrieblichen (z. B. Unternehmensgröße und -struktur, technische Ausstattung) und lokalen Gegebenheiten (z. B. Wasserdargebot und Topologie im Einzugsgebiet) abhängig ist. Außerdem fehlt es für die meisten digitalen Technologien vielfach an Daten zu den betriebswirtschaftlichen und ressourcenbezogenen Auswirkungen. Zwar verweisen einige Einzeluntersuchungen auf optimierte betriebswirtschaftliche Prozesse, jedoch fehlen umfassende repräsentative Studien. Insbesondere die Kausalbeziehungen zwischen IT-Systemen und ihrer Umweltwirkungen (inkl. Energieverbrauch durch intensive Datennutzung) sind noch wenig verstanden. Das Schließen dieser Wissenslücken ist daher von großer Relevanz.

5 Implikationen der Digitalisierung für die Informationssicherheit

Die Digitalisierung bietet vielfältige Potenziale für die Bewältigung der Herausforderungen, denen sich die Wasser- und die Abfallwirtschaft zu stellen haben. Außerdem können digitale Lösungen für die Beherrschung von unvorhergesehenen Störungen und Krisen im täglichen Betrieb von Nutzen sein. Weil die beiden Wirtschaftsbereiche zu den Kritischen Infrastrukturen gezählt werden, ist es wichtig, die Potentiale der Digitalisierung zu heben, um die Ver- und Entsorgungssicherheit auch unter den künftigen Rahmenbedingungen jederzeit gewährleisten zu können.

Zugleich aber stellt die voranschreitende Digitalisierung auch eine große Herausforderung für die Gewährleistung einer sicheren Daseinsvorsorge dar. Denn durch die Digitalisierung von wasser- oder abfallwirtschaftlichen Prozessen erhöht sich auch deren Anfälligkeit gegenüber Bedrohungen der Informationssicherheit. Dazu zählen etwa menschliche Fehlhandlungen (z. B. aufgrund der zunehmenden Komplexität der IT-Systeme), technische Defekte in Soft- oder Hardware, aber verstärkt auch Bedrohungen durch vorsätzliche Cyberangriffe auf Kritische Infrastrukturen. Hier zeichnet sich insbesondere infolge des russischen Angriffskrieges gegen die Ukraine eine steigende Bedrohungslage ab. Die Aufgabe besteht darin, die IT-Systeme der Kritischen Infrastrukturen durch adäquate technische und organisatorische Maßnahmen vor Bedrohungen der Informationssicherheit⁹⁵ zu schützen.

Am Beispiel der Wasserwirtschaft werden in diesem Kapitel die Implikationen der voranschreitenden Digitalisierung und Vernetzung Kritischer Infrastrukturen aus dem Blickwinkel der Informationssicherheit aufgezeigt. Im Fokus der Betrachtungen stehen die potenziellen Gefährdungen der Informationssicherheit sowie notwendige präventive Maßnahmen, um diese Gefährdungen zu beseitigen, damit IT-Sicherheitsvorfälle mit unter Umständen ernsten Auswirkungen für die Versorgungssicherheit gar nicht erst eintreten. Zu einem umfassenden Schutzkonzept gehören darüber hinaus auch die Vorbereitung von reaktiven Maßnahmen, um dennoch eingetretene IT-Sicherheitsvorfälle möglichst rasch bewältigen bzw. die betroffenen IT-Systeme und kritischen Prozesse zeitnah wiederherstellen zu können. Reaktive Maßnahmen konnten im Rahmen dieses Projekts allerdings nicht vertieft behandelt werden, dies hätte den Umfang des vorliegenden Berichts gesprengt. Aus demselben Grund konnten auch mögliche Auswirkungen und Folgen eines langanhaltenden

⁹⁵ Die Begriffe IT-Sicherheit und Informationssicherheit werden meist synonym benutzt. Letzterer ist aber umfassender, weil er sich nicht nur auf den Schutz der Informationstechnik, sondern generell von Informationen bezieht (BSI 2017a, S. 8).



Stromausfalls auf die IT- und Kommunikationssysteme der Wasserwirtschaft nicht näher betrachtet werden.

Das Kapitel ist wie folgt aufgebaut. In Kapitel 5.1 geht es zunächst um eine generelle Einschätzung der aktuellen Gefährdungslage der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft sowie um die Frage, welchen Einfluss die voranschreitende Digitalisierung auf die Gefährdungslage ausübt. Dazu werden für die in der Wasserwirtschaft eingesetzten IT-Infrastrukturen typische Gefährdungen sowie notwendige Maßnahmen, um diesen Gefährdungen entgegenzuwirken, exemplarisch vorgestellt. Die Umsetzung entsprechender Maßnahmen der Informationssicherheit liegt in der Verantwortung der Betreiber, wobei aktuell nur große Betreiber auch gesetzlich dazu verpflichtet sind, nicht aber mittlere oder kleine Betreiber. Wieso das so ist, wird in Kapitel 5.2 diskutiert. Wenn kleine und mittlere Betreiber ihre IT-Systeme auf freiwilliger Basis absichern möchten, sind sie angesichts der hier oft knappen finanziellen, personellen und fachlichen Ressourcen im hohen Maße auf externe Unterstützung angewiesen. Das Spektrum und die Reichweite an Unterstützungsleistungen im Bereich der Informationssicherheit sind daher Thema in Kapitel 5.3. Im anschließenden Kapitel 5.4 wird der empirische Wissensstand zum Niveau der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft dargestellt. Weil der Stand seit 2015 nicht mehr systematisch erhoben wurde, wurden im Rahmen des vorliegenden Projekts qualitative Interviews mit Betreibern sowie mit Vertreter/innen von Fachverbänden und Behörden geführt, außerdem wurde eine auf quantitative Ergebnisse ausgerichtete Onlineumfrage unter Betreibern durchgeführt. Dies bildet schließlich die Grundlage für die Ableitung von politischen Handlungsoptionen zur Förderung von Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft (Kap. 5.5).

5.1 Gefährdungen der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

IT-Systeme sind grundsätzlich einer Reihe von Bedrohungen ausgesetzt, die sich grob in folgende Kategorien einteilen lassen (Leps 2018c, S. 12):

- › höhere Gewalt (z. B. Extremwetterereignisse)
- › organisatorische Mängel (z. B. fehlender Brandschutz)
- › menschliche Fehlhandlungen (z. B. Konfigurations- oder Bedienungsfehler)
- › technisches Versagen (z. B. Soft- oder Hardwarefehlfunktionen, Verschleiß, Stromausfall)
- › vorsätzliche Handlungen (z. B. Cyberangriffe)

Eine Bedrohung wird jedoch erst dann zu einer Gefährdung für ein IT-System, wenn sie auf eine hier vorhandene Schwachstelle trifft. Beispielsweise sind IT-Systeme generell einer Bedrohung durch Schadprogramme ausgesetzt. Eine

Gefährdung durch ein geladenes spezifisches Schadprogramm besteht jedoch nur dann, wenn das fragliche IT-System anfällig für diesen Typ von Schadprogramm ist. Diese Anfälligkeit bzw. Schwachstelle kann z. B. durch einen wirksamen Virenschutz oder eine Konfiguration, die das Funktionieren des Schadprogramms verhindert, beseitigt werden, wodurch das Schadprogramm keine weitere Gefahr mehr darstellt (BSI 2022d, S. 3). Die Gewährleistung der Informationssicherheit verlangt folglich die Analyse der Bedrohungen und Schwachstellen für ein IT-System und die Beseitigung der Schwachstellen durch technische und organisatorische Sicherheitsmaßnahmen.

Die Gefährdungslage der Informationssicherheit kann für eine Organisation somit durch zwei unterschiedliche Entwicklungen verschärft werden, zum einen durch einen Anstieg der Bedrohungen, denen die IT-Systeme dieser Organisation ausgesetzt sind, und zum anderen durch die Entstehung neuer Schwachstellen innerhalb der IT-Systeme der Organisation. Wie in diesem Kapitel näher erörtert wird, treffen auf Unternehmen der Wasserwirtschaft derzeit beide Entwicklungen zu: Auf der einen Seite hat sich die allgemeine Bedrohungslage etwa durch Schadprogramme oder Cyberangriffe in den letzten Jahren für Unternehmen generell stark erhöht. Auf der anderen Seite führen innovative digitale Lösungen für die Wasserwirtschaft dazu, dass gerade die für die Anlagenüberwachung und -steuerung verantwortlichen IT-Systeme gegenüber solchen Bedrohungen immer anfälliger werden.

Das folgende Kapitel ist wie folgt strukturiert. Die in der Wasserwirtschaft weit verbreitete Automatisierungs- und Prozessleittechnik stellt einige besondere Anforderungen an die Informationssicherheit, die zunächst erörtert werden. Auf dieser Grundlage werden dann typische Gefährdungen für die Informationssicherheit von Unternehmen der Wasserwirtschaft (im Folgenden Betriebe) exemplarisch diskutiert. Neben den aktuellen Bedrohungen und Schwachstellen geht es hierbei auch um die Frage, wie sich die beobachtbaren Digitalisierungstrends auf die Gefährdungsbeurteilung auswirken. Das Kapitel endet mit einer Einschätzung zur aktuellen Gefährdungslage der Informationssicherheit im Bereich der Wasserwirtschaft.

5.1.1 Eigenschaften von IT-Systemen der Wasserwirtschaft

Wie in Kapitel 4.2.1 anhand einer exemplarischen Systembeschreibung dargestellt, setzen Betreiber für die verschiedenen unternehmerischen Aufgaben unterschiedliche IT-Systeme ein:

- für die Überwachung und Steuerung der wasserwirtschaftlichen Prozesse und Anlagen kommt spezielle Automatisierungs- und Prozessleittechnik (Prozess-IT) zum Einsatz;



- › für Aufgaben der Betriebsführung (z. B. Einsatzplanung, Lagerverwaltung) der Unternehmensverwaltung und des Kundenmanagements wird handelsübliche Büro-IT-Hardware und -Software eingesetzt.

5.1.1.1 Besondere Anforderungen der Prozess-IT an die Informationssicherheit

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungskontexte stellt die Prozess-IT gegenüber der klassischen Büro-IT weitergehende Anforderungen an die Informationssicherheit. Im Bereich der Büro-IT steht die Informationsverarbeitung und entsprechend auch der Schutz der Informationen vor schädlichen Einflüssen im Fokus. Die Prozess-IT dient vorrangig der Überwachung und Steuerung von technischen Anlagen und Prozessen, weshalb hier zusätzlich auch der Schutz von Mensch und Umwelt vor den Gefahren durch einen anormalen Anlagenbetrieb adressiert werden muss. Die funktionale Sicherheit, also die Gewährleistung eines gefahren- und störungsfreien Anlagenbetriebs, stellt damit einen integralen Bestandteil der Informationssicherheit im Bereich der Prozess-IT dar (Lass/Kotarski 2014, S. 402).

Infolgedessen sind beispielsweise die Fehler- und Ausfalltoleranzen bei Prozess-IT-Installationen meist viel geringer als in der Büro-IT (Leps 2018c, S. 13). Bezogen auf die Wasserwirtschaft bedeutet dies etwa, dass vor allem die prozessnahen Komponenten hohe Anforderungen an die Verfügbarkeit stellen, da Prozesse in der Regel kontinuierlich und in Echtzeit überwacht und gesteuert werden müssen. In der Büro-IT stellen kurze Ausfallzeiten (z. B. für geplante Wartungsarbeiten) hingegen meist kein großes Problem dar (BSI 2013, S. 26). Auch die Risiken durch fehlerhafte Daten sind von unterschiedlicher Qualität: Führen diese in der Büro-IT beispielsweise zu Fehlabbuchungen der Wassergebühren beim Kunden, so können falsche Sensordaten die wasserwirtschaftlichen Prozesse stören oder Fehlhandlungen beim Bedienpersonal auslösen, durch welche im schlimmsten Fall Anlagen beschädigt oder Menschen bzw. die Umwelt gefährdet werden können.

Weitere Unterschiede zwischen der Büro- und Prozess-IT begründen abweichende Anforderungen an die Informationssicherheit:

- › *lange Einsatzzeiten*: Während die Hard- und Software im Bereich der Büro-IT meist nur 3 bis 5 Jahre im Einsatz steht, leitet sich der Lebenszyklus von Komponenten der Prozess-IT aus den dazugehörigen Anlagen ab und kann teilweise bis zu 20 Jahre erreichen (BSI 2013, S. 14). Dadurch sind viele Altsysteme im Betrieb, die aber oft nur über eingeschränkte Sicherheitsmechanismen verfügen (Leps 2018c, S. 13). Neuen Mitarbeiter/innen fehlt zudem häufig das nötige Fachwissen zur Pflege und Wartung älterer Prozess-IT-Komponenten (BSI 2021d, S. 4).



- › *hohe Systemkomplexität*: Prozess-IT-Umgebungen zeichnen sich im Allgemeinen durch eine große Vielfalt an Komponenten unterschiedlicher Hersteller, Architekturen und Generationen aus (Kap. 4.2.1). Auch die Vernetzung vieler in der Fläche verteilter Anlagen trägt zu einer hohen Systemkomplexität der Prozess-IT selbst in kleinen Unternehmen bei.

Die unterschiedlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen führen dazu, dass etablierte Schutzmaßnahmen nur eingeschränkt von einem auf den anderen Bereich übertragbar sind, sodass die Gewährleistung der Informationssicherheit im Unternehmen jeweils spezifische Vorgehensweisen und Fachkenntnisse für die Büro- und Prozess-IT erforderlich macht (BSI 2021d, S. 1). Dadurch erhöht sich aber der Personal- und Ressourcenaufwand, was insbesondere kleine und mittlere Unternehmen vor Herausforderungen stellt.

5.1.1.2 Konvergenz von Prozess- und Büro-IT

In der Vergangenheit wurden Prozess-IT-Installationen als physisch isolierte Systeme zumeist auf Basis von proprietären Technologien konzipiert. Verbindungen zur Büro-IT im Unternehmen, zu fremden Datennetzen oder gar ins Internet bestanden nicht, weil es hierzu keinen Bedarf gab oder weil dies aufgrund von technologischen Barrieren gar nicht realisierbar war. Die Prozess-IT war damit weitgehend vor äußeren Einflüssen durch andere Informationstechnik geschützt (BSI 2013, S. 1 u. 26).

Die strikte Abschottung von Prozess-IT-Umgebungen von Büro-IT-Komponenten und -Netzwerken wird jedoch zunehmend aufgegeben. So werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und Integrationsfähigkeit in Prozess-IT-Umgebungen immer öfter auch Standardkomponenten der Büro-IT eingesetzt (BSI 2021d, S. 1). Typische Beispiele sind Büro-IT-Betriebssysteme wie Microsoft Windows in Geräten der Prozess-IT oder die Nutzung von Ethernet TCP/IP-Standardnetzwerktechnik und öffentlichen TK-Netzen für die Vernetzung (BSI 2013, S. 28, 2019b, S. 6). Letzteres ermöglicht es auch, die Prozess-IT stärker gegenüber dem unternehmensinternen Büro-IT-Netzwerk, aber auch gegenüber fremden Unternehmensnetzwerken oder gar dem Internet zu öffnen. Treiber für diese Entwicklung sind vor allem die Trends der Digitalisierung bzw. die damit einhergehende Integration und Vernetzung von Daten und Systemen. Dazu einige Beispiele:

- › Mit der Digitalisierung einhergehende betriebliche Optimierungspotenziale setzen oft einen Datenaustausch zwischen technischen und kaufmännischen Unternehmensbereichen voraus (Kap. 4.2.6). Beispiele sind die Einspeisung von prozessbezogenen Daten in die Managementsysteme der Büro-IT für die Leistungsabrechnung, Materialwirtschaft, Einsatzplanung, Instandhaltung oder das Berichtswesen (DWA 2011, S. 30; Thim/Kotarski 2015).



- › Viele digitale Innovationen wie Echtzeitsimulationswerkzeuge, GIS bzw. NIS oder digitale Zwillinge benötigen in der Regel nicht nur einen ständigen Datenaustausch zwischen der Prozess-IT und betriebsinternen Datenbeständen (z. B. Planungsdaten, Infrastrukturdaten), sondern auch mit externen Datenbanken (z. B. Wetterdaten), was eine Anbindung an das Internet voraussetzt (Kap. 4.2.5 u. 4.2.6).
- › Die Kopplung der Prozess-IT an das Internet ermöglicht neue Formen der Arbeitsorganisation. Ein Beispiel ist mobiles Arbeiten, indem Beschäftigte sich die Bedienoberfläche des Prozessleitsystems über eine Weboberfläche auf einem beliebigen PC oder mobilen Endgerät anzeigen lassen können (Kap. 4.2.1). Außerdem werden Prozess-IT-Komponenten über die Einrichtung von Fernwartzugängen häufig nicht mehr durch die Betreiber, sondern aus der Ferne direkt durch die Hersteller oder durch spezialisierte Dienstleister gewartet (BSI 2019b, S. 12).

Die zunehmende Konvergenz der Prozess- und Büro-IT hat weitreichende Konsequenzen für die Informationssicherheit. Durch die zunehmende Nutzung von Büro-IT-Standardkomponenten und die Öffnung gegenüber anderen Netzwerken sind Prozess-IT-Umgebungen zunehmend denselben Bedrohungen ausgesetzt, wie sie für die Büro-IT bestehen. Gleichzeitig aber können Schutzmaßnahmen, die in der Büro-IT etabliert sind, aufgrund der besonderen Anforderungen (Kap. 5.1.1.1) nicht immer problemlos auf die Prozess-IT übertragen werden (BSI 2013, S. 26). Von entscheidender Bedeutung ist, dass der Datenstrom zwischen den Prozess- und Büro-IT-Umgebungen kontrolliert (z. B. mithilfe von Firewalls) und auf das betrieblich absolut notwendige Maß beschränkt wird. Damit wird anstelle der früher üblichen physischen eine logische Trennung der Prozess-IT von anderen IT-Systemen errichtet (BSI 2013, S. 63). Gegenüber Insellösungen besteht zwischen logisch getrennten Netzwerkzonen allerdings eine höhere Durchlässigkeit, weshalb sie prinzipiell ein geringeres Schutzniveau bieten.

Welche Auswirkungen die Konvergenz von Prozess- und Büro-IT auf die Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft hat, wird im Folgenden anhand einiger typischer Gefährdungen und Schilderung konkreter IT-Sicherheitsvorfälle näher erläutert.

5.1.2 Typische Gefährdungen der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft und Auswirkungen der Digitalisierung

Zur Frage, wie sich die Gefährdungslage der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft aktuell darstellt und angesichts der voranschreitenden Digitalisierung verändert, lohnt es sich, typische Gefährdungen für die hier eingesetzten IT-Systeme näher zu beleuchten. Entsprechend der thematischen Ausrichtung des Berichts richtet sich das Interesse dabei vor allem auf solche Gefährdungen,

aus denen Risiken für die Ver- bzw. Entsorgungssicherheit resultieren können. Diesbezüglich sind in erster Linie Gefährdungen für die Prozess-IT als kritisch einzustufen, da sich IT-Sicherheitsvorfälle in diesem Bereich unmittelbar auf die Überwachung und Steuerung der wasserwirtschaftlichen Prozesse und Anlagen auswirken können. Beschränkt sich ein IT-Sicherheitsvorfall hingegen nur auf die Büro-IT und lässt die Prozess-IT unberührt, so bleibt die Prozessführung weiterhin gewährleistet und eine Beeinträchtigung oder gar ein Ausfall der Wasserversorgung bzw. Abwasserentsorgung sind eher nicht zu erwarten. Daher werden im Folgenden Gefährdungen nicht vertieft behandelt, die ausschließlich die Büro-IT betreffen.⁹⁶ Durch die zunehmende Konvergenz der Prozess- und Büro-IT-Systeme (Kap. 5.1.1.2) allerdings wächst das Risiko, dass sich IT-Sicherheitsvorfälle in der Büro-IT auch auf die Prozess-IT ausdehnen und so im ungünstigen Fall die Daseinsvorsorge gefährden.

Im Folgenden werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige der häufig in der Wasserwirtschaft anzutreffenden Gefährdungen der Informationssicherheit erörtert. Damit im Zusammenhang stehende IT-Sicherheitsvorfälle in der Wasserwirtschaft werden exemplarisch beschrieben und mögliche Auswirkungen von Digitalisierungstrends thematisiert.⁹⁷

5.1.2.1 Einsatz veralteter IT-Komponenten in der Prozess-IT

Aufgrund der oft langen Lebenszyklen von Komponenten der Prozess-IT finden sich in Unternehmen der Wasserwirtschaft verbreitet noch Hard- oder Softwarekomponenten aus einer Zeit, in der Sicherheitsaspekte von untergeordneter Bedeutung waren. Diese Komponenten bieten entsprechend keine oder nur eingeschränkte Sicherheitsmechanismen. Ein Beispiel ist der Einsatz veralteter Kommunikationsprotokolle, die Daten unverschlüsselt sowie ohne Integritätssicherung und Geräteauthentifizierung übertragen (Qassim et al. 2021, S. 238 f.).

Auch der zunehmende Einsatz von Büro-IT-Standardprodukten wie z. B. Betriebssysteme trägt zur verbreiteten Nutzung veralteter IT-Komponenten in Prozess-IT-Umgebungen bei, da diese Komponenten hier deutlich länger im Einsatz stehen, als dies in der Büro-IT üblich ist. Reichen die Einsatzzeiten über den

⁹⁶ Zu betonen ist allerdings, dass auch auf die Büro-IT beschränkte IT-Sicherheitsvorfälle weitreichende Folgen für die betroffenen Unternehmen haben können. Diese reichen von Störungen in den kaufmännischen Prozessen (z. B. Personalverwaltung, Verbrauchsabrechnung, Kundenservice) bis hin zum Verlust oder Diebstahl von Unternehmens- oder Kundendaten, was mit Imageschäden oder Lösegeldforderungen einhergehen kann. Einen mittelbaren Einfluss auf die Ver- oder Entsorgungssicherheit haben solche IT-Sicherheitsvorfälle ggf. dann, wenn längere Ausfallzeiten in Softwaresystemen für die Personaleinsatzplanung, das Lieferanten- oder Dienstleistungsmanagement dazu führen, dass notwendige Wartungs- oder Reparaturprozesse an der Infrastruktur nicht mehr fristgerecht durchgeführt werden können.

⁹⁷ Ausführliche Informationen zu Gefährdungen der Informationssicherheit liefert beispielsweise das IT-Grundschutz-Kompendium des BSI (2022h).



Zeitraum der Herstellerunterstützung hinaus, so werden keine Updates zur Behebung von Sicherheitslücken mehr bereitgestellt. Gleichzeitig aber sind Werkzeuge, die bekannte Sicherheitslücken in gängigen Büro-IT-Produkten ausnutzen, oft frei im Internet verfügbar. Dies ermöglicht es selbst nicht versierten Angreifern, unbefugt in Prozess-IT-Umgebungen einzudringen (BSI 2021d, S. 3 f.; Kasten 5.1). Außerdem werden auch keine Updates zur Behebung von Softwarefehlern angeboten, wodurch sich das Risiko für technisches Versagen erhöht.

Kasten 5.1 IT-Sicherheitsvorfälle in US-amerikanischen Unternehmen

Nach einer Reihe von Cyberangriffen auf US-amerikanische Wasserver- und Abwasserentsorger zwischen 2020 und 2021 veröffentlichten die zuständigen nationalen Behörden eine Sicherheitswarnung (FBI et al. 2021). Ausdrücklich wird auf die Gefahren durch den Einsatz nicht mehr unterstützter bzw. veralteter Betriebssysteme und Softwareprodukte hingewiesen, da Angreifer wahrscheinlich versuchen würden, damit einhergehende Schwachstellen auszunutzen. Es wird moniert, dass Unternehmen der Wasserwirtschaft dazu tendierten, die vorhandenen Mittel eher in die physische Infrastruktur als in die Modernisierung der IT-Systeme zu investieren. Zum Einsatz veralteter IT-Systeme trage aber auch die inkonsistente Mittelausstattung der Betriebe bei, weshalb die Ressourcen für eine adäquate Informationssicherheit oft fehlten.

Die wichtigste Schutzvorkehrung besteht darin, veraltete Komponenten, die nicht mehr auf den aktuellen Sicherheitsstand gebracht werden können, zu ersetzen. Dies kann unter Umständen mit hohen Kosten verbunden sein, etwa dann, wenn aus Kompatibilitätsgründen zahlreiche weitere IT-Komponenten ausgetauscht werden müssen. Außerdem setzt die Identifikation betroffener Komponenten eine sorgfältige Dokumentation voraus, die den aktuellen Zustand aller eingesetzten Soft- und Hardwarekomponenten abbildet. Gemäß Treibert et al. (2021, S. 197) fehlt es bei Betreibern der Wasserwirtschaft mitunter jedoch an einem genauen Überblick über die eingesetzten IT-Systeme.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Die durch die Digitalisierung angestoßene Modernisierung von Prozess-IT-Umgebungen wirken dem Problem des Einsatzes veralteter Technik entgegen. Zugleich aber verfügen innovative Digitallösungen im Vergleich zu klassischen Prozess-IT-Installationen tendenziell über kürzere Innovationszyklen und sind mit einem höheren Wartungsaufwand verbunden (z. B. durch häufigere Softwareupdates). Dadurch steigen die Anforderungen an Instandhaltung und Dokumentation der IT-Infrastrukturen.

5.1.2.2 Unsichere Konfiguration von Komponenten

Komponenten der Prozess-IT sind ab Werk häufig so konfiguriert, dass sie leicht in Betrieb genommen werden können und auch in heterogenen Systemlandschaften korrekt funktionieren. Sicherheitsmechanismen und -vorkehrungen stehen diesen Zielen jedoch oft entgegen. Daher sind in der Standardkonfiguration Sicherheitsfunktionen wie Firewalls in der Regel abgeschaltet, alle Dienste, Protokolle und Schnittstellen aktiviert oder Gerätezugriffe uneingeschränkt möglich, da herstellerseitig keine bzw. unsichere Standardpasswörter (z. B. »0000«) gesetzt wurden (BSI 2013, S. 30; 2021e, S. 2). Die sichere Konfiguration der Komponenten ist mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden und setzt detailliertes Fachwissen und Produktkenntnisse voraus. In der Praxis besteht daher ein Anreiz, neue Komponenten mit den unsicheren Werkseinstellungen in Betrieb zu nehmen.

In den früher üblicherweise abgeschotteten Prozess-IT-Umgebungen ohne Verbindungen zu fremden Datennetzen waren unsichere Systemkonfigurationen bis zu einem gewissen Grad tolerierbar, da die Isolation einen hohen Schutz gegen vorsätzliche Angriffe von außen gewährleistete (gegen Innentäter bieten isolierte Systeme allerdings keinen Schutz). Durch die zunehmende Öffnung von Prozess-IT-Umgebungen gegenüber fremden Datennetzen schwindet dieser Schutz zusehends. Erlangt ein Angreifer über eine unzureichend gesicherte Datenschnittstelle Zugang zu Prozess-IT-Komponenten (Kap. 5.1.2.5), so wird ihre Übernahme und Manipulation beispielsweise durch Standardpasswörter erheblich erleichtert (Kasten 5.2). Die kompromittierte Komponente kann in der Folge auch als Ausgangspunkt für weitere Angriffe genutzt werden (BSI 2021e, S. 2).

Kasten 5.2 Angriff auf Mobilfunkrouter

Für die Datenübertragung zwischen der Leitstelle und den dezentralen Pumpstationen nutzte ein US-amerikanischer Wasserversorger eine internetbasierte Mobilfunkverbindung. Ende 2016 erhöhte sich die monatliche Mobilfunkrechnung von durchschnittlich 300 plötzlich auf über 45.000 US-Dollar. Hacker hatten die eingesetzten Mobilfunkrouter übernommen und sie für eigene Internetverbindungen verwendet. Eine Gefahr für die Versorgungssicherheit bestand nicht. Zum Erfolg des Angriffs trug bei, dass der Zugang zu den Mobilfunkroutern ab Werk nur durch ein festcodiertes Standardpasswort geschützt wurde. Zwar beseitigte der Hersteller diese Schwachstelle durch ein Softwareupdate, welches vom Unternehmen allerdings nicht installiert worden war (Hassanzadeh et al. 2020, S. 8).



Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Es ist zu erwarten, dass sich das Funktionenspektrum von Prozess-IT-Komponenten im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung kontinuierlich erweitert (z. B. um Schnittstellen für Fernzugriffe über Webclients oder die Nutzung von Clouddienstleistungen). Dies erhöht den Aufwand für die sichere Konfiguration der Komponenten. Die durch die Digitalisierungstrends angeschobene Öffnung der Prozess-IT gegenüber fremden Datennetzen und dem Internet erhöht generell das Risiko für externe Angriffe, denen unsicher konfigurierte Komponenten wenig entgegensetzen können.

5.1.2.3 Verzögerte Installation von Sicherheitsupdates

Büro-IT-Systeme werden nach Bekanntwerden von Fehlern oder Schwachstellen in der Software im Idealfall möglichst schnell durch Installation von Patches nachgebessert. Damit einhergehende kurze Wartungsausfälle etwa durch Startvorgänge (Booten) sind meist unproblematisch (BSI 2013, S. 15 u. 26).

In Prozess-IT-Umgebungen stellt das Beheben von Softwareschwachstellen hingegen grundsätzlich eine Herausforderung dar. Ein Grund sind die hohen Verfügbarkeitsanforderungen, da bereits kurze wartungsbedingte Unterbrechungen die Prozessführung und betrieblichen Abläufe empfindlich stören können. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Systemeingriffe keine Fehlfunktionen nach sich ziehen. Diesbezügliche Garantien seitens der Hersteller sind aufgrund der komplexen und heterogenen Systemlandschaften oft nicht möglich, sodass die korrekte Funktionsweise der Patches vor der Installation durch Tests überprüft werden sollte.⁹⁸ Funktionstests am laufenden System sind aber nur eingeschränkt realisierbar und dafür geeignete Testumgebungen stehen meist nicht zur Verfügung. Die Betreiber sind daher gezwungen, die Risiken der Softwareschwachstellen gegenüber den Risiken der Installation von Patches abzuwägen. In der Praxis führt dies oft dazu, dass Sicherheitsupdates gar nicht (BSI 2015b, S. 106; Treibert et al. 2021, S. 177) oder nur verzögert (z. B. im Rahmen von größeren Wartungsarbeiten) durchgeführt werden (Burghouwt et al. 2017, S. 44).

Eine weitere Herausforderung für die Installation von Sicherheitsupdates besteht in der hohen Komplexität und Komponentenvielfalt von Prozess-IT-Umgebungen, durch welche bereits die Identifikation vorhandener Softwareschwachstellen schwierig ist. Prinzipiell müssen dafür kontinuierlich sämtliche Schwachstellenmeldungen von den jeweiligen Herstellern, aber auch von Institutionen wie dem BSI oder der US-amerikanischen Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA) ausgewertet und daraufhin geprüft werden,

⁹⁸ DIN EN ISO/IEC 27002:2017 Informationstechnik – Sicherheitsverfahren – Leitfaden für Informationssicherheitsmaßnahmen

ob die eigene IT-Infrastruktur betroffen ist. Soweit ersichtlich gibt es bisher noch kein Informationsangebot, das speziell für den Sektor Wasser die hier relevanten Schwachstellenmeldungen vorselektieren würde. Das Schwachstellenmanagement stellt daher eine ressourcenintensive Aufgabe dar, für die insbesondere bei mittleren und kleinen Betreibern das notwendige Personal und die Fachkompetenzen fehlen dürften.

Wiederum gilt, dass der Einsatz von IT-Komponenten, die nicht durch Updates auf dem jeweils neusten Sicherheitsstand gehalten werden, vor allem dann ein Risiko darstellt, wenn die Komponenten über Schnittstellen zu externen Datennetzen oder ins Internet verfügen, über die externe Angriffe ausgeführt werden können.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Die mit der Digitalisierung einhergehende Öffnung der Prozess-IT gegenüber fremden Datennetzen und dem Internet verschärft die Gefahren durch nicht oder nur mit großer Verzögerung eingespielte Sicherheitsupdates erheblich. Dazu trägt auch der zunehmende Einsatz von Standardkomponenten der Büro-IT, die im hohen Maße von Schwachstellen betroffen sind, in Prozess-IT-Umgebungen bei.

5.1.2.4 Unsichere Kommunikationsverbindungen

Für die Standortvernetzung werden je nach Anforderungen und räumlichen Distanzen unterschiedliche Übertragungstechniken eingesetzt (Kap. 4.2.1). Die Absicherung der Datenübertragung gegen unbefugte vorsätzliche oder versehentliche Zugriffe ist vor allem dann wichtig, wenn funkbasierte Lösungen oder öffentliche Telekommunikationsnetze verwendet werden (Weiß 2019b, S. 730). Angreifer mit physischem oder logischem Zugang zum Übertragungsmedium können unzureichend geschützte Daten mitlesen und verändern, etwa um anhand gefälschter Sensorwerte das Betriebspersonal zu schädlichen Systemeingriffen zu bewegen. Durch Einschleusen von manipulierten Steuerbefehlen kann auch direkt in die Prozesse eingegriffen werden (BSI 2021e, S. 2; Kasten 5.3).

Verschiedene Ursachen können jedoch dazu beitragen, dass Betreiber ihre Kommunikationsverbindungen nur unzureichend absichern:

- Infolge der langen Lebenszyklen von wasserwirtschaftlichen Anlagen werden teilweise noch Prozess-IT-spezifische Kommunikationsprotokolle eingesetzt, die nicht unter den Gesichtspunkten der Informationssicherheit entwickelt wurden und entsprechend nur über eingeschränkte bzw. keine Sicherheitsmechanismen verfügen (BSI 2021d, S. 4). Selbst neuere Protokolle auf der Basis des Ethernet-TCP/IP-Standards (z.B. die weit verbreiteten Protokolle IEC 60870-5-104 und IEC 61850, Kap. 5.2.4.1) bieten ohne



zusätzliche Maßnahmen keine sichere Integritätsüberprüfung, Authentifizierung oder Verschlüsselung (OE/BDEW 2018, S. 39).

- › Wird zur Überbrückung größerer räumlicher Distanzen auf Internetverbindungen zurückgegriffen, so müssen diese aktiv und konsequent durch Virtuelle Private Netze (VPN) oder ähnliche Sicherheitslösungen abgesichert werden (BSI 2021d, S. 3), wodurch sich der Konfigurations- und Bedienungsaufwand erhöht.
- › Neben den Übertragungsstrecken sind auch die Endpunkte der Kommunikation vor unbefugten Zugriffen zu schützen. Während beispielsweise Smartmeterlösungen beim Kunden mit Sicherheitsmechanismen wie Authentisierung, Verschlüsselung oder Zugriffskontrolle ausgestattet sind, gilt dies nicht immer für die Komponenten der Feld- oder der Steuerungs- und Regelungsebene (z. B. Sensoren, Aktoren, SPS) – insbesondere dann, wenn es sich um ältere Geräte handelt. Gelingt es Angreifern, sich physischen Zugriff auf diese Komponenten zu verschaffen (z. B. in unbemannten Außenanlagen wie Brunnen, Pumpwerke oder Messstationen), so können sie sich von hier aus in das Netzwerk einwählen. So sind beispielsweise Schaltschränke für kleinere dezentrale Pumpanlagen, die im öffentlichen Raum stehen, im Gegensatz zu größeren Anlagen nur schlecht vor physischen Zugriffen geschützt (Jansen/Fiedler 2020).

Kasten 5.3 Angriff auf ungesicherte Funkverbindung eines Abwassersystems

Das Unternehmen Maroochy Water Services (Australien) betreibt ein Abwassersystem mit über 140 in der Fläche verteilten Pumpstationen, die über ein SCADA-System zentral überwacht und gesteuert werden können. Im März 2000 beobachteten Mitarbeiter/innen Unregelmäßigkeiten: Pumpen arbeiteten fehlerhaft, außerdem traten Ausfälle in der Datenübermittlung und Fehlalarme auf. Als Ursache wurde ein Angriff auf die unzureichend geschützte Funkverbindung zwischen der Leitstelle und den Pumpstationen ermittelt. Einem ehemaligen Dienstleister war es mithilfe eines Funksenders und einer Raubkopie der SCADA-Software gelungen, sich Zugriff auf die Steuerung der Pumpstationen zu verschaffen. Über einen Zeitraum von 3 Monaten wurden so 1 Mio. l ungereinigtes Abwasser in die Gewässer eingeleitet. Der Täter handelte aus Rache, da sein Vertrag mit dem Wasserunternehmen nicht verlängert worden war.

Quelle: Slay/Miller 2008, S. 74 ff.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Mit der Digitalisierung verbundene Trends gehen in der Regel mit einer stärkeren Vernetzung von Prozess-IT-Komponenten einher. Im Sinne des IoT beispielsweise werden selbst Sensoren mit Mikroprozessoren, Software und unterschiedlichen Schnittstellen wie WLAN oder Bluetooth für die Messwertübertragung und für Diagnose- und Parametrisierungsaufgaben ausgestattet (BSI 2022f, S. 1). Die Herausforderung, sämtliche Kommunikationsverbindungen wirksam abzusichern, wird daher weiter zunehmen.

5.1.2.5 Unzureichend geschützte Schnittstellen für Fernzugriffe über öffentliche Telekommunikationsnetze

Schnittstellen für Fernzugriffe auf Komponenten der Prozess-IT sind weit verbreitet. Komponenten auf der Feld- oder der Steuerungs- und Regelungsebene (Kap. 4.2.1) verfügen oft über Fernwartungszugänge, die betriebsintern von den IT-Administratoren, aber auch von externen Fachkräften für Konfigurations- und Wartungsarbeiten verwendet werden (BSI 2019b, S. 12). Vor allem kleine und mittlere Unternehmen, die das notwendige IT- und gerätespezifische Fachwissen nicht vorhalten können bzw. wollen, sind auf Fernwartungslösungen zur Einbindung von Herstellern, Lieferanten oder Dienstleistern angewiesen (Treibert et al. 2021, S. 185). Auf der Ebene der Prozessbeobachtung und -bedienung werden Schnittstellen für Fernzugriffe zudem oft aus Gründen der Arbeitsorganisation und für Anwendungen des mobilen Arbeitens eingerichtet. Ein Beispiel sind Remote-Desktop-Verbindungen, über die das Personal von einem beliebigen PC eine Verbindung zu einem Arbeitsplatzrechner in der Leitstelle herstellen kann. Zudem bieten moderne Prozess-IT-Komponenten immer häufiger auch die Möglichkeit, dass Betriebsparameter über Webapplikationen direkt auf einem Tablet oder Smartphone überwacht und verändert werden können (BSI 2019b, S. 14).

Schnittstellen für Fernzugriffe über öffentliche Telekommunikationsnetze erweitern grundsätzlich die Angriffsfläche auf die Prozess-IT und lösen daher einen hohen Schutzbedarf aus. Gleichwohl kommt es in der Praxis vor, dass Komponenten über solche Schnittstellen entgegen den Herstellerempfehlungen direkt mit dem Internet verbunden werden, sodass sie über Internetsuchmaschinen oder Internetscans leicht auffindbar sind (BSI 2019b, S. 11). Werden diese Komponenten zusätzlich mit unsicheren Konfigurationen betrieben (etwa mit herstellerseitig gesetzten Standardpasswörtern, Kap. 5.1.2.2) oder bestehen Softwareschwachstellen (Kap. 5.1.2.3), so ist es für Angreifer eine leichte Übung, diese Komponenten zu übernehmen und sie für weiterführende Angriffe im Prozess-IT-Netzwerk zu missbrauchen. Werden zunehmend mobile Endgeräte für Fernzugriffsanwendungen verwendet, besteht außerdem die Gefahr des



Diebstahls oder Verlustes dieser Geräte. Darauf gespeicherte Informationen (z.B. Benutzerkennungen und zugehörige Passwörter) erleichtern Unbefugten den Zugriff auf die Prozess-IT erheblich (BSI 2019b, S. 14).

Die Absicherung von Zugängen für Fernzugriffe ist aufgrund der tiefen Eingriffsmöglichkeiten in die IT-Systeme von besonderer Bedeutung (BSI 2021f, S. 1). Wichtige technische und organisatorische Maßnahmen beinhalten u. a. die sichere Konfiguration der Schnittstellen (z.B. Nutzung sicherer Anmeldeverfahren wie starke Passwörter oder Zwei-Faktor-Authentisierung, Abschalten nicht benötigter Dienste), den Einsatz von VPN-Lösungen und von Firewalls zur Kontrolle und Beschränkung der Zugriffe, die Freischaltung der Zugänge nur nach Bedarf und nur für die Dauer der Nutzung, die Protokollierung von Fernzugriffen zur Gewährleistung der Nachvollziehbarkeit (BSI 2019b, S. 11 f.) bis hin zur aktiven Überwachung und Auswertung des gesamten Datenverkehrs mithilfe von Systemen zur Angriffserkennung, um potenzielle Cyberangriffe in Echtzeit erkennen zu können. Umsetzung und konsequente Anwendung der Schutzmaßnahmen sind allerdings mit einem beträchtlichen Aufwand für die Betreiber, aber auch für den einzelnen Anwender verbunden. In der Praxis könnte dies dazu führen, dass Schnittstellen für Fernzugriffe aus Ressourcen Gründen oder auch aus Bequemlichkeit nur unzureichend abgesichert werden (Kasten 5.4).

Kasten 5.4 Angriffe auf Schnittstellen für Fernzugriffe

Angriffe auf wasserwirtschaftliche Anlagen durch Ausnutzung von Schnittstellen für Fernzugriffe ereigneten sich bereits mehrfach. Einige Beispiele:

- Im Februar 2021 verschafften sich Angreifer Zugang zum Prozessleitsystem einer Wasseraufbereitungsanlage der Gemeinde Oldsmar im US-Bundesstaat Florida und erhöhten die Konzentration von Natriumhydroxid, das zur Entsäuerung von Rohwasser verwendet wird, um mehr als den Faktor 100 über dem Sollwert. Die Manipulation wurde durch einen Mitarbeiter unmittelbar bemerkt und wieder rückgängig gemacht. Der unbefugte Zugriff erfolgte über die weit verbreitete Remote-Desktop-Software »TeamViewer«, die im Unternehmen zur Fernüberwachung der Betriebsprozesse verwendet wurde. Diverse Sicherheitslücken begünstigten den Angriff. So waren alle Computer im Unternehmen an das Prozessleitsystem und gleichzeitig ohne Schutzvorkehrungen (z.B. Firewalls) an das Internet angeschlossen. Als Betriebssystem wurde eine veraltete Version von Windows 7 benutzt, außerdem verwendeten alle Beschäftigten dasselbe Passwort für den Fernzugriff (Commonwealth of Massachusetts o.J.).

- 2016 wurde das BSI (2017b, S. 14) auf mehrere offene, aus dem Internet einsehbare Steuerungssysteme von Wasserwerken in Deutschland aufmerksam gemacht. Dabei handelte es sich um die Bedienoberflächen der Prozess-IT, die mindestens einen lesenden Zugriff aus dem Internet erlaubten. Steuerungszugriffe konnten nicht ausgeschlossen werden. Der Zugriff wurde offenbar dadurch erleichtert, dass für das Weblogin aus Gründen der Bequemlichkeit der Nutzernamen bereits vorausgefüllt war und auch genau dem Passwort entsprach (Wellbrock 2019). Die Betreiber wurden durch das BSI auf die Sicherheitslücke aufmerksam gemacht, woraufhin die Zugänge kurzfristig geschlossen wurden. Ihnen war die Erreichbarkeit der Systeme aus dem Internet nicht bewusst (BSI 2017b, S. 14).
- Zur Fernüberwachung und -steuerung der Schleuse eines kleineren Hochwasserdamms in Rye (New York, USA) wurde 2013 ein Fernzugang auf das Steuerungssystem über eine Webapplikation eingerichtet. Aufgrund einer unsicheren Implementierung war ein direkter Zugriff über das Internet möglich. Angreifer nutzten dies aus und verschafften sich Zugang zum System. Da dieses zum Zeitpunkt des Angriffs aus Wartungsgründen nur zu Überwachungs-, nicht aber zu Steuerungszwecken eingesetzt wurde, war es den Angreifern nicht möglich, Schaden anzurichten (Hassanzadeh et al. 2020, S. 6).

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Die verstärkte Anbindung räumlich weit verteilter Infrastrukturen an zentrale Prozessleitsysteme, neue Formen des mobilen Arbeitens oder die verstärkte Nutzung von cloudbasierten Dienstleistungen sind Trends, die den Bedarf an Fernzugriffsmöglichkeiten erhöhen. Damit steigen auch die Herausforderungen, die verwendeten Schnittstellen wirksam gegen unbefugte Zugriffe zu schützen, und folglich auch damit verbundene fachliche, personelle und finanzielle Ressourcenbedarfe.

5.1.2.6 Verhinderung von Diensten (Denial of Service)

Mit Denial-of-Service(DoS)-Angriffen wird das Ziel verfolgt, die Verfügbarkeit von IT-Dienstleistungen, -Funktionen oder -Geräten einzuschränken. Aus dem Internet erreichbare Komponenten können durch eine Vielzahl von gleichzeitigen Anfragen überlastet werden. Drahtlose Kommunikation über Mobilfunknetze oder WLAN kann etwa durch gezielte Überlagerung mit Störsendern unterbrochen werden (BSI 2013, S. 32 f.).

DoS-Angriffe in der Wasserwirtschaft können u. a. auf funkgebundene oder internetbasierte Kommunikationsverbindungen der Standortvernetzung abzie-



len, wodurch die Übertragung von Mess- und Steuerdaten beeinträchtigt wird (Kasten 5.5). Ein weiterer möglicher Angriffspunkt sind Schnittstellen für Fernzugriffe, was zum Ausfall einzelner Komponenten der Prozess-IT führen kann (BSI 2019b, S. 10). In beiden Fällen können die wasserwirtschaftlichen Abläufe unter Umständen empfindlich gestört werden.

Kasten 5.5 DoS-Angriff auf einen VPN-Router

2018 kam es bei einem großen deutschen Unternehmen der Wasserwirtschaft zu einem DoS-Angriff auf einen VPN-Router, durch den eine bestehende internetbasierte Kommunikationsverbindung beeinträchtigt wurde. In der Leitstelle kam es zu einer Fehlermeldung, da für eine kurze Zeitspanne Messwerte von Pumpen gefehlt hatten und keine Steuerung mehr möglich war. Die Versorgungssicherheit wurde allerdings nicht beeinträchtigt.

Quelle: BSI 2018, S. 32

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

DoS-Angriffe stellen für eine zunehmend von funktionierenden Informations- und Kommunikationsinfrastrukturen abhängige Wasserwirtschaft generell eine steigende Bedrohung dar. Beispielsweise gewinnt das Thema Cloud Computing auch in der Wasserwirtschaft an Bedeutung. Große Cloudanbieter stellen aber ein attraktives Ziel für DoS-Angriffe dar (Treibert et al. 2021, S. 199 f.).

5.1.2.7 Infektion mit Schadprogrammen

Schadprogramme werden mit dem Ziel entwickelt, unerwünschte und meistens schädliche Funktionen auszuführen, etwa Passwörter auslesen, Schutzsoftware deaktivieren, Systeme fernsteuern oder Daten ausspionieren (BSI 2021b, S. 39). In jüngerer Zeit mehrten sich vor allem Angriffe mit Ransomware (Ransom = Lösegeld). Diese Schadprogramme verhindern durch Verschlüsselung den Zugriff auf lokale oder im Netzwerk erreichbare Daten und Systeme. Bei Zahlung eines Lösegelds wird die Wiederherstellung der Daten in Aussicht gestellt (BSI 2021a, S. 12). Die Rekonstruktion der IT-Systeme nach einem Ransomwareangriff kann in Abhängigkeit der Verfügbarkeit von Datensicherungen Tage bis mehrere Wochen oder Monate dauern (BSI 2021c, S. 3).

Angriffe mit Schadprogrammen finden aktuell zum überwiegenden Teil nicht zielgerichtet statt und bedrohen vor allem Standardkomponenten der Büro-IT mit hohem Verbreitungsgrad (z.B. Betriebssysteme, Bürosoftware, Netzwerkprodukte), da sich Angreifer hier die höchsten Erfolgschancen ausrechnen (BSI 2013, S. 28). Die Schadprogramme verbreiten sich meist über das



Internet und gelangen z.B. über Links auf maliziöse Webseiten, kompromittierte E-Mail-Anhänge oder unbemerkte Downloads im Hintergrund auf ein IT-System (BSI 2021a, S. 10). Ein weiterer Verbreitungsweg sind infizierte Wechseldatenträger wie USB-Sticks oder externe Hardware.

Nicht zielgerichtete Angriffe mit Schadprogrammen der Büro-IT nehmen weltweit generell zu (BSI 2021a, S. 10 ff.), wodurch konsequenterweise auch deren Zahl in Unternehmen der Wasserwirtschaft ansteigt (Kasten 5.6). Bei den in Deutschland bislang bekannt gewordenen Fällen waren jedoch, soweit ersichtlich, jeweils nur die Büro-IT-Systeme der kaufmännischen Unternehmensbereiche betroffen (Stand Januar 2023). Eine Ausbreitung der Schadprogramme in die Prozess-IT und damit eine Gefährdung der Ver- und Entsorgungssicherheit konnte bisher durch die vorhandenen Schutzvorkehrungen, insbesondere durch die physische oder logische Trennung von Prozess- und Büro-IT (Kap. 5.1.1.2), vermieden werden.

Kasten 5.6 IT-Sicherheitsvorfälle durch Schadprogramme in Deutschland

In letzter Zeit mehren sich Vorfälle mit Schadprogrammen in deutschen Unternehmen der Wasserwirtschaft. Soweit bekannt handelte es sich hierbei meist um nicht zielgerichtete Angriffe mit Ransomware. Einige Beispiele sind:

- Im November 2019 blockierte eine Ransomware die kaufmännische Datenverwaltung und E-Mail-Kommunikation der Langenfelder Stadtwerke und des Verbandswasserwerks Langenfeld-Monheim. Die Prozess-IT und somit die Sicherheit der Wasserversorgung waren nicht betroffen (Meisel 2019).
- Im April 2020 wurden die Technischen Werke Ludwigshafen AG (TWL 2020) Opfer eines Ransomwareangriffs durch einen infizierten E-Mail-Anhang. Ein Zugriff auf die Prozess-IT sowie die Verschlüsselung von Daten konnten verhindert werden. Allerdings wurden über 500 GB an Kunden-, Mitarbeiter- und Geschäftsdaten erbeutet und nach Ablehnung einer Lösegeldforderung im Darknet veröffentlicht.
- Im September 2021 wurden durch eine Ransomware Teile des IT-Systems der Stadtwerke Wismar GmbH (2021) verschlüsselt. Das Schadprogramm gelangte mutmaßlich über eine Softwareschwachstelle in die Büro-IT, worauf der Zugriff auf Kundendaten, Telefone oder E-Mails nicht mehr möglich war. Betroffen war der kaufmännische Bereich, die Prozess-IT und damit die Versorgung war nicht gefährdet (Werfel 2021).
- Im April 2022 wurde ein IT-Dienstleister der Donau-Stadtwerke Dillingen-Lauingen Opfer eines Ransomwareangriffs. In der Folge wurden



auch Systeme bei den Kunden des Dienstleisters verschlüsselt. Die Wasserver- und Abwasserentsorgung war jedoch nicht betroffen (Hildebrandt/Geiser 2022).

IT-Sicherheitsvorfälle im Ausland zeigen allerdings, dass sich nicht zielgerichtete Schadprogramme auch auf die Prozess-IT auswirken können (Kasten 5.7). Durch den zunehmenden Einsatz von Büro-IT-Standardkomponenten in Prozess-IT-Umgebungen werden diese anfällig für Schadprogramme, die eigentlich auf die Büro-IT abzielen. Über infizierte Laptops oder USB-Sticks, die z. B. zu Wartungszwecken mit der Prozess-IT verbunden werden, können solche Schadprogramme auch in (vermeintlich) isolierte Umgebungen eingebracht werden. Aber auch unzureichend abgesicherte Datenverbindungen zur Büro-IT oder ins Internet (Kap. 5.1.2.5) sind mögliche Einfallstore für Schadprogramme (BSI 2021e, S. 3). Die Gefährdung wird dadurch verschärft, dass sich in der Büro-IT bewährte Schutzmaßnahmen gegen Schadprogramme nicht ohne Weiteres auf Prozess-IT-Umgebungen übertragen lassen. So gestaltet sich hier nicht nur das Schwachstellenmanagement als schwierig (Kap. 5.1.2.3), auch kann beispielsweise der Einsatz von Virenschutzsoftware ein Risiko darstellen, etwa dann, wenn damit verbundene Systemeingriffe den operativen Betrieb gefährden (BSI 2021d, S. 3). Umso wichtiger sind daher flankierende organisatorische Maßnahmen wie Regelungen und Vorkehrungen für einen sicheren Einsatz von Wartungslaptops (z. B. Einrichtung von Quarantänenetzen für den Zugang externer Dienstleister; BSI 2019b, S. 5) oder die Sensibilisierung der Beschäftigten, um beispielsweise das Infektionsrisiko durch kompromittierte E-Mail-Anhänge zu verringern.

Kasten 5.7 IT-Sicherheitsvorfälle durch Schadprogramme im internationalen Kontext

- Zwischen September 2020 und August 2021 kam es bei US-amerikanischen Unternehmen der Wasserwirtschaft zu mindestens vier Vorfällen mit Ransomware. In drei Fällen war auch die Prozess-IT betroffen, wobei in zwei Betrieben nur Teile des Systems bzw. nur Systeme für die Überwachung und nicht für die Steuerung ausfielen. Ein Betreiber der Wasserentsorgung musste jedoch auf Handbetrieb umschalten, bis die IT-Systeme repariert werden konnten (FBI et al. 2021, S. 3).
- 2018 wurden in der Prozess-IT eines europäischen Unternehmens verdächtige Aktivitäten beobachtet, so u. a. neue externe Datenverbindungen. Eine Analyse der IP-Adressen führte zu einer Plattform für Kryptowährungen. Die Prozess-IT wurde von einem Schadprogramm infiziert, das die Computerressourcen für das Mining von Kryptowährungen ausnutzte. Manipulationen an den Überwachungs- und Steuerungssys-



temen konnten keine festgestellt werden (Hassanzadeh et al. 2020, S. 9). Gleichwohl können solche Schadprogramme wegen der hohen Verfügbarkeitsanforderungen zu Beeinträchtigungen in den Prozessen führen.

Von der ungerichteten Verbreitung von Schadprogrammen zumeist für Standardkomponenten der Büro-IT abzugrenzen sind zielgerichtete Angriffe mit verbesserten Angriffstechniken. Mit Methoden des Social Engineering beispielsweise können Täter, die ein bestimmtes Unternehmen ins Visier nehmen, die Erfolgchancen des Angriffs erheblich steigern. Eine Möglichkeit ist, für eine Angriffs-E-Mail zuvor ausgespäte Kommunikationsinhalte zu nutzen, um sie für das Opfer authentischer erscheinen zu lassen (BSI 2021c, S. 1). Haben die Angreifer einmal eine Schadsoftware in die Büro-IT eines Unternehmens eingeschleust, so können in einem Folgeangriff weitere Schadprogramme und Werkzeuge nachgeladen werden, die – eine unzureichende physische oder logische Trennung der Netze vorausgesetzt – ein weiteres Vordringen bis in die Prozess-IT ermöglichen (BSI 2019b, S. 6).

Spätestens seit dem »Stuxnet«-Vorfall 2010 ist zudem bekannt, dass auch speziell auf Komponenten der Prozess-IT zugeschnittene Schadprogramme entwickelt werden. »Stuxnet«, das mit enormem Aufwand programmiert wurde, zielte ausschließlich auf Prozess-IT-Komponenten ab, auf denen die SCADA-Software »WinCC« von Siemens verwendet wurde (BSI 2011, S. 16). Die Schadsoftware wurde erst bei Vorliegen einer bestimmten Anlagenkonstellation aktiv. Ziel von »Stuxnet« war offenbar, den Prozess der Urananreicherung in einer iranischen Anlage zu sabotieren. Seit »Stuxnet« sind weitere Schadprogramme für gezielte Angriffe auf Prozess-IT-Umgebungen hinzugekommen. Davon betroffen war bisher meist der Energiesektor, etwa die Stromversorgung in der Ukraine, die 2015 mit dem Schadprogramm »Black Energy 3« und 2016 mit »Industroyer/CrashOverride« angegriffen wurde (Erdrich/Kluge 2018, S. 28 f.). Vergleichbare zielgerichtete Angriffe mit Schadprogrammen auf Unternehmen der Wasserwirtschaft in Deutschland oder weltweit sind dem TAB bislang nicht bekannt (Stand Januar 2023), wären jedoch jederzeit genauso möglich.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Die Digitalisierungstrends befördern die Öffnung von Prozess-IT-Umgebungen gegenüber Büro-IT-Komponenten und -Netzwerken. Dadurch steigt auch die Anfälligkeit der Prozess-IT für Infektionen durch nicht zielgerichtete Schadprogramme der Büro-IT, die in enorm hoher Anzahl zirkulieren. Die Datenschnittstellen zwischen den Umgebungen stellen aber auch neue potenzielle Einfallstore für zielgerichtete Angriffe mit Schadprogrammen dar, die speziell auf die Prozess-IT ausgerichtet wurden.

5.1.2.8 Unzureichende Dokumentation der IT-Infrastruktur

Die oft hohe Komplexität von Prozess-IT-Umgebungen erschwert deren Dokumentation.⁹⁹ Eine lückenhafte oder veraltete Dokumentation kann jedoch zu Fehlkonfigurationen im System führen und damit technische Fehler begünstigen, die Risikoanalyse und Umsetzung von Schutzmaßnahmen behindern (z. B. das Einspielen von Sicherheitsupdates) oder im Schadensfall die Fehlerdiagnose und -behebung verzögern oder gar unmöglich machen (BSI 2013, S. 27; CISA 2021).

Beobachtungen von Treibert et al. (2021, S. 197) offenbarten, dass es selbst in großen Unternehmen der Wasserwirtschaft beim zuständigen Fachpersonal zu Wissenslücken hinsichtlich der genauen Aufbaustruktur der IT-Systeme und Netzwerke kommen kann. Dieses Problem dürfte sich auch bei kleinen und mittleren Betreibern (ggf. noch verschärft) zeigen, die nur über beschränkte personelle und fachliche Ressourcen verfügen, deren Prozess-IT-Umgebungen allerdings auch von hoher Komplexität sein können, wenn z. B. viele in der Fläche verteilte Anlagen vernetzt sind. Dabei sind gerade kleinere Unternehmen bei schwerwiegenden IT-Sicherheitsvorfällen auf die Unterstützung durch externe Fachleute angewiesen. Ein aktuelles und genaues Abbild der betroffenen Systemumgebung ist aber die Grundvoraussetzung für ein schnelles und zielgerichtetes Eingreifen durch anlagenfremde Personen.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

Die mit der Digitalisierung verfolgte Integration und Vernetzung von IT-Systemen und -Komponenten und damit einhergehende Funktions- und Schnittstellenerweiterungen steigern die Komplexität von Prozess-IT-Umgebungen weiter, wodurch sich auch Anforderungen und Aufwand für die Dokumentation erhöhen.

5.1.2.9 Mangelndes Sicherheitsbewusstsein

Die Umsetzung von technischen und organisatorischen Maßnahmen zum Schutz der IT-Systeme in einem Betrieb erfordert angemessene personelle, zeitliche und nicht zuletzt auch finanzielle Ressourcen – vor allem dann, wenn externer Sachverstand benötigt wird. Der Prozess zur Stärkung der Informationssicherheit muss daher von der Unternehmensführung initiiert oder zumindest unterstützt werden. Fehlt es in der Leitungsebene allerdings an einem ausrei-

99 Zur Dokumentation gehören u. a. ein aktuelles Abbild aller eingesetzten System- und Softwarekomponenten inkl. verwendeter Produktversionen, ein Netzplan mit allen Datenverbindungen zwischen Komponenten inkl. verwendeter Kommunikationsverfahren und -protokolle und Freigaben in Firewalls sowie alle Zuständigkeiten (BSI 2021d, S. 5).

chenden Bewusstsein für die Gefährdungen der Informationssicherheit, so sind diese Voraussetzungen unter Umständen nicht gegeben.

Nicht nur die Leitungsebene, sondern auch das Fachpersonal muss über ein ausreichendes Sicherheitsbewusstsein verfügen, damit einmal eingeführte technische und organisatorische Maßnahmen im Arbeitsalltag ausreichend beachtet und umgesetzt werden. So nützen beispielsweise Virtuelle Private Netze (VPN) oder ähnliche Sicherheitslösungen zur Absicherung der Kommunikationsverbindungen wenig, wenn sie vom Personal aus Bequemlichkeitsgründen nicht konsequent angewendet werden. Zu beachten ist außerdem, dass Prozess-IT-Umgebungen teilweise besondere Anforderungen an die Informationssicherheit stellen (Kap. 5.1.1.1), sodass Sicherheitskenntnisse und -kompetenzen der Beschäftigten im Bereich der Büro-IT nicht ohne Weiteres auch für die Prozess-IT anwendbar sind. Die Fachkräfte müssen sich daher mit den relevanten Gefährdungen vertraut machen und wissen, wie sich diese auf den Betrieb auswirken können (BSI 2022k). Voraussetzung dafür sind regelmäßige Sensibilisierungsmaßnahmen, die wiederum von der Unternehmensleitung initiiert werden müssen.

Auswirkungen von Digitalisierungstrends

In der Wasserwirtschaft treffen innovative digitale Lösungen vielfach auf Geschäftsführungen und Belegschaften mit einem hohen Durchschnittsalter, die Prozess-IT-Umgebungen ggf. noch als abgeschottete und insofern vor externe Gefährdungen weitgehend geschützte Systeme kennengelernt haben. Hier fehlt es mitunter an einem ausreichenden Problembewusstsein und Fachwissen in Bezug auf neu entstehende Gefährdungen infolge der zunehmenden Öffnung der Prozess-IT gegenüber fremden Datennetzen. Die trügerische Sicherheit könnte zu einem sorglosen Umgang mit neuen digitalen Lösungen führen (BSI 2013, S. 29).

5.1.2.10 Zwischenfazit

Deutlich wird, dass die in der Vergangenheit noch gültige Auffassung, dass Prozess-IT-Umgebungen als isolierte Systeme vor äußeren Bedrohungen weitgehend geschützt sind, durch die fortschreitende Öffnung infolge der Digitalisierung zunehmend an Bestand verliert. Dadurch ist die Prozess-IT in wachsendem Maße denselben Bedrohungen ausgesetzt, wie sie auch für die Büro-IT gelten. Dabei treffen diese Bedrohungen hier auf zahlreiche Schwachstellen, deren Ursachen in den besonderen Anforderungen an bzw. Eigenschaften von Prozess-IT-Umgebungen liegen (z. B. lange Einsatzzeiten oder geringe Ausfalltoleranzen). Dies führt letztlich zu vielfältigen Gefährdungen für die Prozess-IT, die durch die Trends der Digitalisierung weiter verstärkt werden.



Für Betreiber besteht die Herausforderung darin, kontinuierlich alle diese Gefährdungen mit geeigneten technischen und organisatorischen Schutzmaßnahmen zu kontrollieren, denn jede einzelne davon kann potenziell in einen betriebskritischen IT-Sicherheitsvorfall resultieren. Die Aufgabe, ein ausreichendes Maß an Informationssicherheit zu etablieren und dauerhaft aufrechtzuerhalten, stellt sich damit als sehr anspruchsvoll und ressourcenintensiv dar. Dies setzt bei Betreibern unabhängig ihrer Größe ein hohes Maß an Engagement voraus, auf Ebene der Unternehmensleitungen in Bezug auf die Initiierung und Unterstützung des Prozesses zur Steigerung der Informationssicherheit (insb. durch die Bereitstellung ausreichender personeller und finanzieller Ressourcen) und auf Ebene der Fachkräfte in Bezug auf die Beachtung und konsequenten Anwendung der geschaffenen organisatorischen Regelungen und technischen Schutzmaßnahmen im täglichen Betrieb.

5.1.3 Aktuelle Bedrohungslage für Kritische Infrastrukturen und speziell für die Wasserwirtschaft

Die allgemeine Bedrohungslage der Informationssicherheit hat sich in den vergangenen Jahren u. a. durch die Zunahme von Cyberangriffen mit Ransomware oder anderen Schadprogrammen, durch vermehrte DoS-Angriffe oder durch den Zuwachs an Schwachstellen in Softwareprodukten stetig erhöht und sich auch vor dem Hintergrund des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine weiter zugespitzt (BSI 2022b, S. 11 ff.). Kritische Infrastrukturen und die Unternehmen der Wasserwirtschaft bleiben hiervon nicht unberührt. Neben vorsätzlichen Handlungen gilt es weiterhin technische und menschliche Fehler im Blick zu behalten. Denn auch Konfigurations- oder Bedienfehler oder Fehlfunktionen in Soft- oder Hardware können zu betriebskritischen IT-Störungen führen, insbesondere dann, wenn es infolge der zunehmenden Vernetzung zu Kaskadeneffekten kommt.

5.1.3.1 Allgemeine Bedrohungslage für Kritische Infrastrukturen

Cyberangriffe auf die Prozess-IT von Kritischen Infrastrukturen wurden bis 2010 wegen der vermeintlich geringen Eintrittswahrscheinlichkeit meist als Restrisiko akzeptiert. Nach dem Auftreten von »Stuxnet« und weiteren Schadprogrammen, die speziell auf Prozess-IT-Komponenten abzielten (Kap. 5.1.2.7), hat sich diese Einschätzung jedoch geändert (BSI 2011, S. 16 f.). Gezielte Cyberangriffe gelten mittlerweile als eine besondere Bedrohung für Kritische Infrastrukturen, da politisch motivierte Angreifer wie Hackaktivisten, Nachrichtendienste oder Terroristen es vor allem auf einen hohen gesellschaftlichen Schaden abgesehen haben könnten (BSI 2015a, S. 44; 2016a, S. 39). Eine wachsende Bedrohung geht aber auch von nicht zielgerichteten Angriffen mit

Schadprogrammen aus, die immer häufiger auch Kritische Infrastrukturen (BSI 2016b, S. 38) und Unternehmen der Wasserwirtschaft treffen (Kap. 5.1.2.7). Neben Cyberangriffen identifizierte das BSI (2015a, S. 46) vor allem die zunehmende Vernetzung und Komplexität der IT-Systeme in Kritischen Infrastrukturen als Herausforderung für die Informationssicherheit, da sich dadurch immer mehr mögliche Fehlerquellen ergeben. Insgesamt bewertete das BSI die allgemeine Bedrohungslage für Kritische Infrastrukturen in den vergangenen Jahren als anhaltend hoch (BSI 2018, S. 10; 2019a, S. 46; 2020a, S. 54; 2021a, S. 57).

Der russische Angriffskrieg gegen die Ukraine hat zu einer Neubewertung der allgemeinen Bedrohungslage geführt. Aufseiten beider Konfliktparteien beteiligen sich staatliche, staatlich gelenkte oder unabhängige Cybergruppierungen am Kriegsgeschehen (BfV 2022b, S. 1 f.). So kam es vor und während des Einmarschs der russischen Truppen in die Ukraine zu zahlreichen Cyberangriffen auf ukrainische Infrastrukturen und regierungsnahe Unternehmen (BSI 2022a). Dazu gehörte mutmaßlich auch ein Cyberangriff auf das Satellitennetzwerks für Kommunikationsdienste KA-SAT am 24. Februar 2022, dessen Begleiterscheinungen weit über die Ukraine hinaus reichten. Der Angriff führte europaweit zum Ausfall von ca. 30.000 Satellitenterminals, darunter beispielsweise auch 5.800 Terminals, die zur Fernüberwachung und -wartung von Windenergieanlagen in Zentraleuropa eingesetzt wurden (Enercon 2022). Die Bedrohungen gehen jedoch über solche Kollateralschäden hinaus. Im März 2022 kam es beispielsweise zu einem Cyberangriff auf einen deutschen Mineralölhändler mit russischem Mutterkonzern. Die IT-Systeme des Unternehmens mussten daraufhin abgeschaltet und in einen Notbetrieb versetzt werden (BSI 2022b, S. 50). Auch das Bundesamt für Verfassungsschutz (BfV 2022a, S. 2) warnte vor wachsenden Risiken für direkte russische Cyberangriffe auf Kritische Infrastrukturen in Deutschland im Zuge der Sanktionen gegen Russland und der Waffenlieferungen an die Ukraine. Das BSI (2022c) sieht im Kontext des Krieges vor allem den Energiesektor als attraktives Ziel für Cyberangriffe, grundsätzlich könnten aber alle Anlagen der Kritischen Infrastrukturen betroffen sein. Die Sicherheitsbehörden haben Unternehmen und Organisationen generell dazu aufgerufen, die Sicherheitsmaßnahmen zu überprüfen und ggf. anzupassen, und stellen dazu Umsetzungshinweise bereit (z. B. BfV 2022b, S. 4 f.; BSI 2022i).

5.1.3.2 Betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle

Erst wenn Bedrohungen auf Schwachstellen der Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen einwirken und sich dadurch zu einer Gefährdung entwickeln, können sie zu IT-Sicherheitsvorfällen mit potenziellen Folgen für die Versorgungssicherheit führen. Es stellt sich somit die Frage, inwiefern die sich verschärfende Bedrohungslage in der Vergangenheit tatsächlich zu betriebskritischen IT-Sicherheitsvorfällen in Kritischen Infrastrukturen und speziell bei

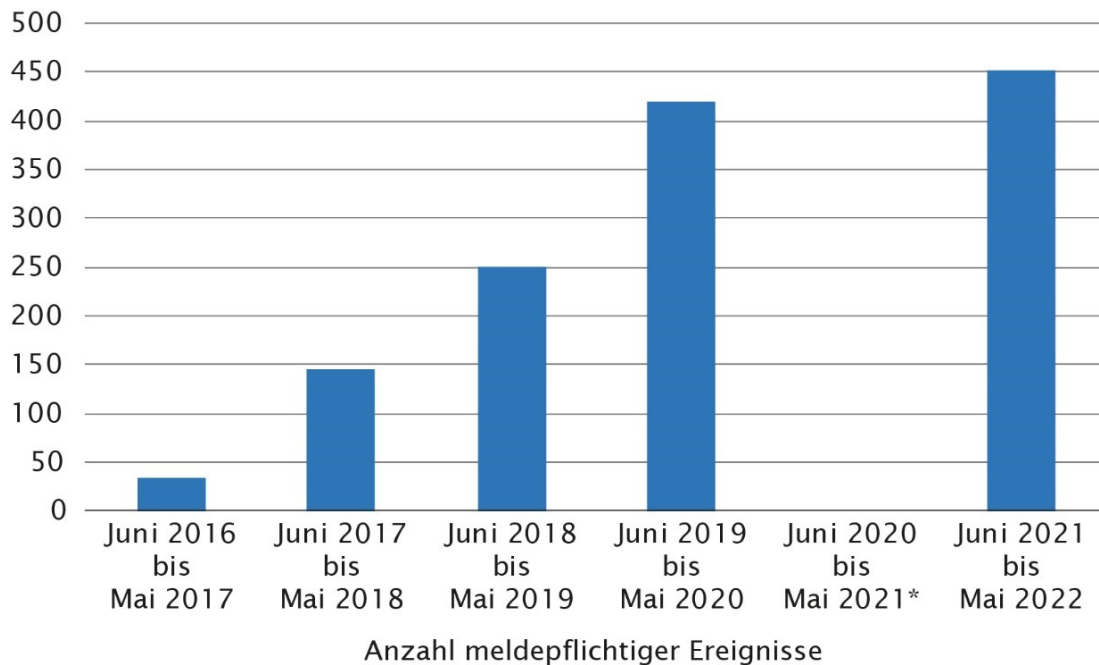


Betreibern der Wasserwirtschaft geführt hat. Die öffentlich zugängliche Datengrundlage lässt leider nur eine sehr unvollständige Antwort auf diese Frage zu. So wurden Meldepflichten für betriebskritische IT-Störungen an das BSI erst durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 eingeführt¹⁰⁰ und dies auch nur für große Unternehmen (konkret für KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG; dazu ausführlich Kap. 5.2.2). Erkenntnisse aus diesen Meldungen veröffentlichte das BSI in seinen jährlich erscheinenden Berichten zur Lage der IT-Sicherheit in Deutschland, allerdings mit einer Lücke für das Berichtsjahr 2020/2021 sowie generell nur in einer sehr aggregierten Form. Für kleine und mittlere Unternehmen der Wasserwirtschaft, die nicht zu den KRITIS-Betreibern zählen, fehlt es hingegen gänzlich an einer belastbaren Datengrundlage in Bezug auf das Auftreten von betriebskritischen IT-Sicherheitsvorfällen.

Die Situation bei KRITIS-Betreibern lässt sich wie folgt zusammenfassen. In Bezug auf die Gesamtzahl der betriebskritischen IT-Sicherheitsvorfälle bei KRITIS-Betreibern (Summe über alle meldepflichtigen KRITIS-Sektoren) ist im Zeitverlauf eine starke Zunahme zu verzeichnen (Abb. 5.1), von 34 meldepflichtigen Ereignissen im Berichtszeitraum 2016/2017 (hier allerdings noch ohne die KRITIS-Sektoren Finanz- und Versicherungswesen, Gesundheit sowie Transport und Verkehr) auf 452 Meldungen im Berichtszeitraum 2021/2022. Zu den Ursachen für die Vorfälle machte das BSI nur vereinzelte und qualitative Angaben. Demnach wurden die meisten Vorfälle durch technisches Versagen (z. B. Hardwaredefekte, fehlerhafte Software) oder menschliche Fehler (z. B. falsche Konfigurationen) verursacht (BSI 2017b, S. 10; 2019a, S. 46; 2020a, S. 55). Cyberangriffe waren weniger häufig die Ursache für betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle, hier standen etwa im Berichtsjahr 2019/2020 DoS-Angriffe (Kap. 5.1.2.6) und Ransomwarevorfälle (Kap. 5.1.2.7) im Vordergrund (BSI 2020a, S. 55). Dies heißt jedoch nicht, dass KRITIS-Betreiber nur selten von Cyberangriffen betroffen wären – laut BSI (2021a, S. 57) finden sie mittlerweile beinahe täglich statt –, vielmehr konnten die Angriffe bisher in der Regel mithilfe der implementierten Schutzmaßnahmen abgewehrt werden oder sie hatten nur geringfügige Auswirkungen. Im Berichtszeitraum 2019/2020 stand vor allem der Energiesektor im Fokus, wo Angreifer u. a. versuchten, mithilfe von Internetscans direkt mit dem Internet verbundene IT-Komponenten und darin enthaltene Schwachstellen ausfindig zu machen, um in die Systeme eindringen zu können (Kap. 5.1.2.5) (BSI 2020a, S. 54). Für den Zeitraum nach Ausbruch des Krieges in der Ukraine stehen bislang nur vereinzelt öffentlich zugängliche Daten zur Verfügung (Kasten 5.8; Stand Januar 2023).

100 Die Meldepflichten für Unternehmen aus den KRITIS-Sektoren Wasser, Energie, Ernährung sowie Informationstechnik und Telekommunikation traten im Mai 2016 in Kraft, jene für Unternehmen aus den KRITIS-Sektoren Finanz- und Versicherungswesen, Gesundheit sowie Transport und Verkehr ein Jahr später (BSI 2017b, S. 10).

Abb. 5.1 Gesamtzahl der meldepflichtigen IT-Sicherheitsvorfälle bei KRITIS-Betreibern



* keine Daten für das Berichtsjahr 2020/2021

Eigene Darstellung mit Daten aus BSI 2017b, S. 10, 2018, S. 11, 2019a, S. 47, 2020a, S. 54, u. 2022b, S. 69

Kasten 5.8 Auswirkungen des Krieges in der Ukraine auf die Meldedaten von IT-Sicherheitsvorfällen

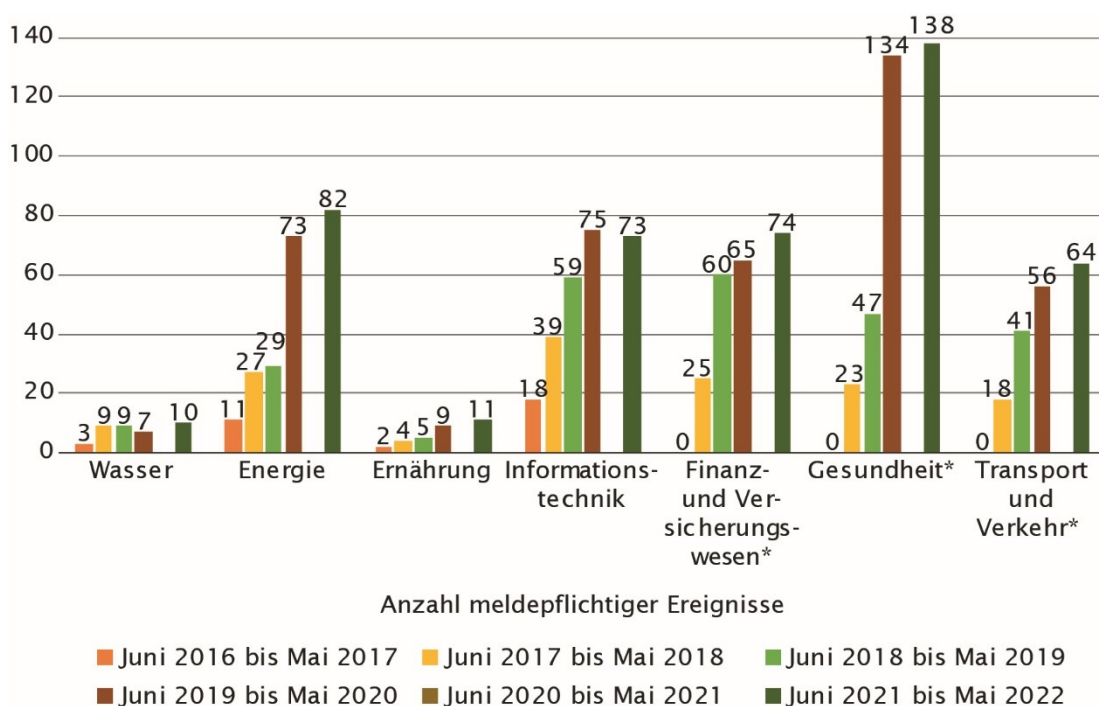
Laut Auskunft der Bundesregierung (2022a, S. 3) haben KRITIS-Betreiber dem BSI im Zeitraum vom 24. Februar 2022 bis 9. September 2022 insgesamt 253 betriebskritische IT-Sicherheitsvorfälle gemeldet.¹⁰¹ Demnach zu urteilen hat sich die Gesamtzahl der meldepflichtigen Ereignisse entgegen ersten Befürchtungen bislang nicht massiv erhöht. Im Zusammenhang mit dem Krieg beobachtete das BSI (2022a) einzelne gezielte Angriffe auf Unternehmen und Organisationen auch aus dem Bereich der Kritischen Infrastrukturen (Kap. 5.1.3.1; Stand August 2022), die aber allem Anschein nach keine größeren Auswirkungen hatten. Auch laut Bundesregierung (2022b, S. 3) konnten mit Stand November 2022 bisher keine breit angelegten Angriffskampagnen gegen Kritische Infrastrukturen in Deutschland beobachtet werden.

¹⁰¹ Auf 1 Jahr hochgerechnet würde dies rund 470 Meldungen entsprechen.



Eine differenzierte Auswertung der Meldezahlen für einzelne KRITIS-Sektoren zeigt, dass nicht alle Sektoren gleichermaßen von der starken Zunahme an meldepflichtigen IT-Sicherheitsvorfällen betroffen waren (Abb. 5.2).

Abb. 5.2 Meldungszahlen nach KRITIS-Sektoren



Für das Berichtsjahr 2020/2021 liegen keine Daten vor

* noch keine gesetzlichen Berichtspflichten für das Berichtsjahr 2016/2017

Eigene Darstellung mit Daten aus BSI 2017b, S. 10, 2018, S. 11, 2019a, S. 47, 2020a, S. 54, u. 2022b, S. 69

Auffallend ist, dass insbesondere die Meldezahlen aus dem Sektor Wasser vergleichsweise niedrig waren und – im Gegensatz zu allen anderen KRITIS-Sektoren – sich seit 2017 auch nicht substanziell erhöht haben. Im Vergleich zu anderen KRITIS-Sektoren weist die Wasserwirtschaft allerdings bislang einen geringeren Digitalisierungsgrad auf, weswegen sie den Bedrohungen der Informationssicherheit insgesamt weniger stark ausgesetzt ist. Außerdem kann vermutet werden, dass der Sektor Wasser bisher weniger im Fokus von gezielten Cyberangriffen stand. So könnte z. B. der jüngste deutliche Anstieg bei den Fallzahlen im Gesundheitssektor auch damit zusammenhängen, dass dieser Sektor durch die COVID-19-Pandemie stark im öffentlichen Fokus stand (BSI 2021a, S. 39). Klar ist aber auch, dass durch die voranschreitende Digitalisierung auch die Wasserwirtschaft künftig anfälliger gegenüber den Bedrohungen der Informationssicherheit werden wird. Außerdem sind Kritische Infrastrukturen durch

den russischen Angriffskrieg gegen die Ukraine generell stärker in den Fokus von Gruppierungen geraten, die durch Angriffe ihre politischen Ziele durchzusetzen versuchen, was nicht zuletzt die Sabotageakte auf die Nordstream-Pipelines 1 und 2 im Herbst 2022 zeigten. Mit Blick auf die Zukunft muss also eher von einer steigenden Bedrohungslage für die Wasserwirtschaft ausgegangen werden, wodurch sich der Bedarf an Schutzmaßnahmen der Informationssicherheit erhöht.

5.2 Regulatorische Grundlagen zur Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

Rechtliche Regelungen mit potenzieller Bedeutung für die Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft finden sich im deutschen Wasserrecht sowie – da der Sektor Wasser zu den Kritischen Infrastrukturen zählt – in der Gesetzgebung des Bundes zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. Der Rahmen für diese nationalen Vorschriften wird durch das europäische Recht aufgespannt. Zu beachten sind ferner Normen, Regelwerke und Leitlinien, welche die technische und organisatorische Umsetzung der gesetzlichen Vorgaben konkretisieren (untergesetzliches Regelwerk). Hierzu gehören u. a. die technischen Regeln der technisch-wissenschaftlichen Fachverbände (z. B. des DVGW oder der DWA) oder die Normen des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN-Vorgaben).

5.2.1 Deutsches Wasserrecht

Die Gesetze und Verordnungen des deutschen Wasserrechts beschränken sich auf die Festlegung staatlicher Schutzziele u. a. für den Gesundheits-, den Verbraucher- und den Umweltschutz. Konkrete technische oder organisatorische Vorgaben, wie die Betreiber die staatlichen Schutzziele zu erfüllen haben, sind im Wasserrecht nicht ausgeführt. Stattdessen wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik gefordert (Kap. 4.1.2), so z. B. in § 17 Abs. 1 TrinkwV, wonach Anlagen für die Gewinnung, Aufbereitung oder Verteilung von Trinkwasser (ungeachtet ihrer Größe) mindestens nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik geplant, gebaut und betrieben werden müssen. Bei den allgemein anerkannten Regeln der Technik handelt sich um die niedrigste Anforderungsstufe, die an den Entwicklungsstand der angewendeten technischen und organisatorischen Verfahren gestellt wird (Kasten 5.9).



Kasten 5.9 Anforderungsstufen für technische Regeln

Für die Beschreibung des Entwicklungsstands technischer Regeln zur Einhaltung staatlicher Schutzziele hat sich im Technik- und Umweltrecht eine 3-Stufen-Theorie durchgesetzt:

- Als *allgemein anerkannte Regeln der Technik* gelten technische Festlegungen für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach herrschender Auffassung der beteiligten Kreise zur Zielerreichung geeignet sind, als Teil der Verhältnismäßigkeitserwägungen wirtschaftliche Gesichtspunkte berücksichtigen und sich in der Praxis allgemein bewährt haben;
- Der *Stand der Technik* beschreibt fortschrittliche Verfahren, die nach herrschender Auffassung führender Fachleute die Zielerreichung gesichert erscheinen lassen, wirtschaftliche Gesichtspunkte bei Verhältnismäßigkeitserwägungen je nach gesetzlicher Zielvorgabe nachrangig berücksichtigen und deren langjährige Bewährung in der Praxis noch aussteht;
- Beim *Stand von Wissenschaft und Technik* handelt es sich um die fortschrittlichsten Verfahren, die nach Auffassung führender Fachleute auf der Grundlage neuester wissenschaftlicher Erkenntnisse für die Zielerreichung als erforderlich gehalten werden und bei denen wirtschaftliche Gesichtspunkte in Verhältnismäßigkeitserwägungen im Bereich der Vorsorge nachrangig, im Bereich der Gefahrenabwehr nicht berücksichtigt werden.

Quelle: Cyris 2010, S. 22

Folgerichtig enthält das Wasserrecht auch keine konkreten technischen oder organisatorischen Vorgaben in Bezug auf die Informationssicherheit in wasserwirtschaftlichen Betrieben. Soweit jedoch die Einhaltung der staatlichen Schutzziele durch IT-bedingte Störungen gefährdet werden könnte, erstreckt sich die Pflicht zur Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik prinzipiell auch auf Vorkehrungen der Informationssicherheit, um ebensolche Gefährdungen zu beseitigen. Für die Wasserwirtschaft maßgeblich sind insbesondere die technischen Regelwerke von DVGW und DWA, in denen die allgemein anerkannten Regeln der Technik in Form von Arbeitsblättern veröffentlicht sind. Zurzeit allerdings existieren in diesen Regelwerken keine Arbeitsblätter, die das Thema Informationssicherheit umfassend behandeln und konkrete technische und organisatorische Schutzmaßnahmen benennen würden (Stand Januar 2023; Kap. 5.2.4.4). Insofern fehlt es für die Wasserwirtschaft momentan an einer schriftlichen Fixierung von allgemein anerkannten Regeln der Technik, die (bzw. dazu gleichwertige Maßnahmen) von *allen* Betreibern

zur Absicherung ihrer IT-Systeme als Mindestanforderungen gesetzlich verpflichtend umgesetzt werden müssten.

5.2.2 Gesetzgebung zum Schutz der Kritischen Infrastrukturen

Die Wasserwirtschaft gehört nach der Sektoreneinteilung von Bund und Ländern zu den Kritischen Infrastrukturen und ist somit in den strategischen Handlungsrahmen zum Schutz der Kritischen Infrastrukturen eingebunden. Wie in Kapitel 2.3 erörtert, lag und liegt der Schwerpunkt der nationalen Schutzstrategien im kooperativen Ansatz als Form der freiwilligen Zusammenarbeit zwischen Staat und Wirtschaft. Diesem Ansatz folgend genießen freiwillige Selbstverpflichtungen der Wirtschaft grundsätzlich Vorrang vor gesetzlichen Regelungen, weshalb es in Deutschland bislang auch kein übergreifendes »Gesetz für den Schutz Kritischer Infrastrukturen« gibt (BBK 2020, S. 41). In der KRITIS-Strategie von 2009 hat sich der Bund jedoch die Möglichkeit für gesetzliche Regelungen vorbehalten, wenn sich das Prinzip der Freiwilligkeit als unzureichend erweisen sollte, um festgestellte Sicherheitsmängel zu beseitigen (BMI 2009, S. 13).¹⁰² Hiervon wurde 2015 mit dem IT-Sicherheitsgesetz auch Gebrauch gemacht. Der Verabschiedung des Gesetzes vorausgegangen war die Beobachtung, dass der rein freiwillige Ansatz nicht immer zum nötigen Engagement in der Wirtschaft geführt bzw. nicht flächendeckend gewirkt hatte, um ein angemessenes Schutzniveau der Informationssicherheit in allen KRITIS-Sektoren zu erreichen (BSI 2016a, S. 5).

5.2.2.1 Schutz der Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen durch das IT-Sicherheitsgesetz

Das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 legte den gesetzlichen Rahmen für die Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen fest. Als Artikelgesetz änderte bzw. ergänzte das IT-Sicherheitsgesetz vor allem das BSIG, aber auch das Energiewirtschafts- (EnWG)¹⁰³, das Telekommunikationsgesetz¹⁰⁴ und weitere Gesetze. Ziel war die Verbesserung der Sicherheit und des Schutzes der IT-Systeme und -Dienste, insbesondere auch im Bereich der Kritischen Infrastrukturen (BSI 2016a, S. 5).

Für die Wasserwirtschaft maßgeblich sind die Regelungen im BSIG. Diese umfassen Pflichten an die Betreiber von Kritischen Infrastrukturen (im Folgenden KRITIS-Betreiber) zur Absicherung ihrer IT-Systeme:

¹⁰² Eine weitere Notwendigkeit für gesetzliche Regelungen ergibt sich aus europäischen Vorgaben, die in nationales Recht überführt werden müssen.

¹⁰³ Energiewirtschaftsgesetz vom 7.7.2005, zuletzt am 26.7.2023 geändert

¹⁰⁴ Telekommunikationsgesetz vom 23.6.2021, zuletzt am 14.3.2023 geändert



- › KRITIS-Betreiber sind verpflichtet, angemessene¹⁰⁵ organisatorische und technische Vorkehrungen zur Vermeidung von Störungen in ihren zur Erbringung von kritischen Dienstleistungen eingesetzten IT-Systemen umzusetzen. Dabei ist der Stand der Technik einzuhalten (§ 8a Abs. 1 BSIG).
- › KRITIS-Betreiber und ihre Branchenverbände können den jeweils aktuellen Stand der Technik als branchenspezifische Sicherheitsstandards (B3S) beschreiben. Das BSI stellt fest, ob diese geeignet sind, die gesetzlichen Anforderungen angemessen zu erfüllen (§ 8a Abs. 2 BSIG).

Außerdem wurden Nachweis- und Meldepflichten für KRITIS-Betreiber festgelegt:

- › KRITIS-Betreiber müssen die Einhaltung der Anforderungen an die Informationssicherheit alle 2 Jahre gegenüber dem BSI z. B. durch Sicherheitsaudits nachweisen. Sofern Sicherheitsmängel aufgedeckt werden, darf das BSI im Einvernehmen mit den zuständigen Aufsichtsbehörden deren Beseitigung anordnen (§ 8a Abs. 3 BSIG).
- › Das BSI ist auch berechtigt, die Einhaltung der Anforderungen bei den Betreibern zu überprüfen (§ 8a Abs. 4 BSIG).
- › Störungen in den IT-Systemen, die zu einem Ausfall oder einer Beeinträchtigung von kritischen Dienstleistungen geführt haben oder führen können, sind von den KRITIS-Betreibern unverzüglich an das BSI zu melden (§ 8b Abs. 4 BSIG).

Schließlich wurde das BSI mit neuen Aufgaben betraut und der Prozess für den Informationsaustausch geregelt:

- › Das BSI sammelt und wertet Informationen aus (z. B. zu Sicherheitslücken, Schadprogrammen, Cyberangriffen) und erstellt daraus ein aktuelles Lagebild. KRITIS-Betreiber werden unverzüglich mit den für sie relevanten Informationen versorgt (§ 8b Abs. 2 BSIG).
- › Für die Informationsübermittlung müssen Betreiber eine jederzeit erreichbare Kontaktstelle einrichten (§ 8b Abs. 3 BSIG).

Die gesetzlichen Vorgaben wurden 2021 durch das zweite IT-Sicherheitsgesetz ergänzt. Für KRITIS-Betreiber der Wasserwirtschaft sind folgende Neuerungen im BSIG relevant:

- › Seit Mai 2023 müssen KRITIS-Betreiber Systeme zur Angriffserkennung einsetzen, die kontinuierlich Bedrohungen im laufenden Betrieb erkennen können (§ 8a Abs. 1b BSIG).
- › Die betriebenen Kritischen Infrastrukturen müssen beim BSI registriert werden (§ 8b Abs. 3 BSIG).

¹⁰⁵ Organisatorische und technische Vorkehrungen gelten als angemessen, wenn der dafür erforderliche Aufwand nicht außer Verhältnis zu den Folgen eines Ausfalls oder Beeinträchtigung der betroffenen Kritischen Infrastruktur steht (§ 8a Abs. 1 BSIG).

- › Der Einsatz von kritischen Komponenten¹⁰⁶ muss dem Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) angezeigt werden. Das BMI kann den Einsatz untersagen, wenn nach Prüfung eine Beeinträchtigung der öffentlichen Ordnung oder Sicherheit nicht auszuschließen ist (§ 9b BSIG).¹⁰⁷

Außerdem hat das BSI zusätzliche Befugnisse bei der Detektion von Sicherheitsrisiken und der Abwehr von Angriffen erhalten. Beispielsweise darf das BSI gemäß § 7b BSIG gezielte Portscans bei KRITIS-Betreibern durchführen, wenn anzunehmen ist, dass hier unzureichend geschützte Schnittstellen zum Internet bestehen. Werden Sicherheitslücken entdeckt, sind die Verantwortlichen unverzüglich zu informieren.

Zu beachten ist, dass diese Regelungen grundsätzlich nur auf IT-Systeme anzuwenden sind, die zur Erbringung von kritischen Dienstleistungen eingesetzt werden. IT-Systeme, die keinen Einfluss auf die Versorgungs- bzw. Versorgungssicherheit haben, werden durch das BSIG nicht adressiert (z. B. die IT-Systeme der Unternehmensverwaltung).

5.2.2.2 Kritische Infrastrukturen i. S. d. BSIG

Die Regelungen des IT-Sicherheitsgesetzes von 2015 adressierten nicht alle Unternehmen bzw. Organisationen in den Sektoren, die Bund und Länder als Kritische Infrastrukturen definiert hatten (Kap. 2.3.5), sondern nur solche Einrichtungen und Anlagen dieser Sektoren¹⁰⁸, die von »hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind, weil durch ihren Ausfall oder ihre Beeinträchtigung erhebliche Versorgungsengpässe oder Gefährdungen für die öffentliche Sicherheit eintreten würden« (§ 2 Nr. 10 BSIG in der am 25.7.2015 geltenden Fassung). Die weitere Konkretisierung anhand messbarer Kriterien erfolgte im Wege der BSI-KritisV. Darin wurden für die jeweiligen Sektoren die als kritisch anzusehenden Dienstleistungen, die für die Erbringung dieser Dienstleistungen notwendigen Anlagenkategorien sowie für diese Anlagenkategorien ein als bedeutend anzusehender Versorgungsgrad anhand von anlagen-spezifischen Schwellenwerten festgelegt.¹⁰⁹ Erreicht oder überschreitet der Versorgungsgrad einer Anlage diesen Schwellenwert, so gilt sie als *Kritische Infrastruktur i. S. d. BSIG* (im Folgenden kritische Anlage). Unternehmen oder

¹⁰⁶ Kritische Komponenten sind IT-Produkte, bei denen Störungen zum Ausfall oder zur erheblichen Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit Kritischer Infrastrukturen führen können (§ 2 Abs. 13 BSIG).

¹⁰⁷ Was als kritische Komponenten gilt, wird vom Gesetzgeber festgelegt (§ 2 Nr. 13 BSIG). Für den Sektor Wasser wurden bislang keine kritischen Komponenten festgelegt (Stand Oktober 2022; DVGW o. J.).

¹⁰⁸ Ausgenommen sind hiervon nur die Sektoren Staat und Verwaltung sowie Medien und Kultur.

¹⁰⁹ Die Vorgaben der BSI-KritisV wurden durch Vertreter des BSI, des BMI, des BBK, der fachlichen zuständigen Bundesressorts sowie von KRITIS-Betreibern und deren Verbänden ausgestaltet (BBK 2020, S. 65).



Organisationen, die kritische Anlagen betreiben, gelten als *KRITIS-Betreiber* und sind folglich an die Vorgaben des BSI-G gebunden.

Zur Festlegung der anlagenspezifischen Schwellenwerte wurde anlagen- und sektorübergreifend von einem Regelschwellenwert von 500.000 zu versorgenden Personen ausgegangen. Ein gemeinsamer Ausgangswert sollte – soweit möglich – ein über alle Sektoren einheitliches Vorgehen gewährleisten. Die anlagenspezifischen Schwellenwerte ergeben sich dann daraus, dass der Regelschwellenwert anhand von branchenspezifischen Umrechnungsfaktoren in eine anlagenbezogene Bemessungsgröße (Leistungs- oder Mengenwert) übersetzt wird. Beispielsweise muss ein Wasserwerk bei einem angenommenen durchschnittlichen Wasserverbrauch von 44 m³ pro Person und Jahr insgesamt 22 Mio. m³ Wasser pro Jahr aufbereiten, um 500.000 Personen zu versorgen. In Tabelle 5.1 sind die kritischen Anlagenkategorien und die dazugehörigen Schwellenwerte aus der BSI-KritisV für den Sektor Wasser aufgeführt.

Tab. 5.1 Anlagenkategorien und Schwellenwerte im Sektor Wasser

Anlagenkategorie	Bemessungsgröße	Schwellenwert
<i>Trinkwasserversorgung</i>		
Gewinnungsanlage	gewonnene Wassermenge	22 Mio. m ³ /Jahr
Aufbereitungsanlage (Wasserwerk)	aufbereitete Trinkwassermenge	22 Mio. m ³ /Jahr
Wasserverteilungssystem	verteilte Wassermenge	22 Mio. m ³ /Jahr
Leitzentrale	von gesteuerten/überwachten Anlagen gewonnene, transportierte oder aufbereitete Wassermenge	22 Mio. m ³ /Jahr
<i>Abwasserbeseitigung</i>		
Kanalisation	angeschlossene Einwohner/innen	500.000
Kläranlage	Ausbaugröße in Einwohnerwerten*	500.000
Leitzentrale	Ausbaugrößen der Anlagen in Einwohnerwerten oder angeschlossene Einwohner/innen der gesteuerten oder überwachten Anlagen	500.000

* Einwohnerwerte entsprechen der Summe aus der Zahl der angeschlossenen Einwohner/innen und dem Einwohnergleichwert, der ein Maß für die Belastung einer Kläranlage durch gewerbliches oder industrielles Schmutzwasser darstellt (Treibert et al. 2021, S. 95).

Quelle: Anhang 2, Teil 3 BSI-KritisV

Im Zuge der Novellierung des BSIg durch das zweite IT-Sicherheitsgesetz von 2021 wurde auch die BSI-KritisV angepasst.¹¹⁰ Für den Sektor Wasser wurden – abgesehen von redaktionellen Anpassungen sowie der Aufnahme von Stauanlagen in der Kategorie Gewinnungsanlagen – keine Änderungen vorgenommen, insbesondere auch nicht in Bezug auf die Höhe der anlagenspezifischen Schwellenwerte.

5.2.2.3 Festlegung der Höhe der Schwellenwerte und Bedeutung für die Wasserwirtschaft

Die Höhe des einheitlichen Regelschwellenwerts ergab sich aus der Überlegung, dass Ausfälle Kritischer Infrastrukturen nur bis zu einer gewissen Größenordnung durch die vorhandenen Notfallkapazitäten aufgefangen werden können. Übersteigen solche Ausfälle die Kompensationsfähigkeit der Notfallvorsorge, kommt es zu Engpässen bei der Versorgung der Allgemeinheit. Durch eine exemplarische Analyse wurde eine Kapazitätsgrenze in einem Korridor um 500.000 betroffene Personen ermittelt (BSI o. J.c). Zu betonen ist, dass hier die Kapazitäten der Notfallvorsorge auf der *gesamtstaatlichen Ebene* unterstellt wurden. Bei einem Ausfall der Trinkwasserversorgung beispielweise würde dies die Bereitstellung einer Ersatz- bzw. Notfallwasserversorgung durch mobile Aufbereitungsanlagen, Leitungen oder Tankfahrzeuge unter Aufbietung aller vorhandenen Ressourcen auf betrieblicher, kommunaler, Landes- (Katastrophenschutz der kreisfreien Städte, Kreise und der Länder) und Bundesebene (u. a. Technisches Hilfswerk, Vorsorgemaßnahmen gemäß § 8 Wassersicherstellungsgesetz¹¹¹) implizieren (BBK 2019b, S.18 f.). Wären Länder oder Kommunen bei der Krisenbewältigung auf sich alleine gestellt, so wäre die Leistungserbringung bereits beim Ausfall wesentlich kleinerer Infrastrukturen gefährdet (BBK 2019a).

Die Anzahl der kritischen Anlagen in der Wasserwirtschaft, die die Schwellenwerte der BSI-KritisV erreichen oder überschreiten, bzw. die Anzahl der KRITIS-Betreiber mit solchen Anlagen, ist öffentlich nicht bekannt und auch das BSI gibt darüber keine Auskunft (Treibert et al. 2021, S. 109).¹¹² In der Begründung zur BSI-KritisV schätzte das BMI (2016) die Anzahl der kritischen Anlagen in der Trinkwasserversorgung auf 150 und in der Abwasserbeseitigung auf 80. Die Anzahl der KRITIS-Betreiber liegt darunter, da ein Betreiber ggf. mehrere kritische Anlagen betreibt (z.B. mehrere Wasserwerke, ein Verteilungssystem und eine Leitzentrale). Laut der Antwort der Bundesregierung (2020a, S.23) auf eine entsprechende parlamentarische Anfrage liegt diese

¹¹⁰ Zweite Verordnung zur Änderung der BSI-Kritisverordnung vom 6.9.2021

¹¹¹ Wassersicherstellungsgesetz vom 24.8.1965, zuletzt am 19.6.2020 geändert

¹¹² Gemäß eines im Rahmen des Projekts von Treibert et al. (2021) durchgeführten Experteninterviews (Kap. 5.4.4) mit einem Vertreter des BBK wurde nicht einmal das BBK über die genaue Anzahl der KRITIS-Betreiber im Wassersektor in Kenntnis gesetzt.



Anzahl in der Trinkwasserversorgung bei 47 Unternehmen¹¹³, was – gemessen an der Anzahl der in Deutschland insgesamt vorhandenen Wasserversorgungsunternehmen von 5.845 (Statistisches Bundesamt 2018, S. 26 ff.) – einem Anteil von 0,8 % entspricht. Die Kleinteiligkeit der deutschen Wasserwirtschaft führt somit dazu, dass derzeit über 99 % der Wasserversorgungsunternehmen nicht unter die Regelungen des BSIG fallen (für den Bereich der Abwasserbeseitigung können ähnliche Größenordnungen vermutet werden; Treibert et al. 2021, S. 100 ff.).

Aufgrund ihrer Größe sind KRITIS-Betreiber gleichwohl für einen substantiellen Anteil der deutschen Wasserversorgung verantwortlich (ähnliche Überlegungen gelten für den Bereich der Abwasserbeseitigung). Genau quantifizieren lässt sich dieser Anteil wegen der fehlenden öffentlichen Daten allerdings nicht. Bezogen auf die Wassergewinnung lässt sich ein oberer Grenzwert für den Bereich der Wasserversorgung wie folgt grob abschätzen: Bei den Unternehmen mit eigener Wassergewinnung zeichnen sich gemäß des Statistischen Bundesamts (2019) 63 große Wasserversorgungsunternehmen (Wassergewinnung über 10 Mio. m³/Jahr) für 48,3 % der gesamten öffentlichen Wassergewinnung in Deutschland verantwortlich (Tab. 5.2).

Tab. 5.2 Wassergewinnung durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen mit eigener Wassergewinnung (nach Größenklasse)

jährliche Wassergewinnung der VWU in m ³	Wassergewinnung gesamt in m ³	Anteil an der Gesamtgewinnung in %	Anzahl VWU
unterhalb 500.000	0,43 Mrd.	8,2	3.129
500.000 bis 10 Mio.	2,26 Mrd.	43,5	1.222
10 Mio. und mehr	2,51 Mrd.	48,3	63
insgesamt	5,20 Mrd.	100,0	4.414

WVU: Wasserversorgungsunternehmen

Quelle: Statistisches Bundesamt 2019, S. 53 (Auszug)

Ein Teil davon sind KRITIS-Betreiber¹¹⁴, die somit maximal knapp die Hälfte der Wassergewinnung in Deutschland beitragen. Dies bedeutet aber auch, dass mehr als die Hälfte des Wassers in Deutschland von über 4.300 kleinen und mittleren Unternehmen gewonnen wird, die nicht unter die Regelungen des

¹¹³ Für den Bereich der Abwasserbeseitigung wurden keine Angaben gemacht.

¹¹⁴ In der Erhebung des Statistischen Bundesamtes wird als oberste Größenklasse eine jährliche Wassergewinnung von 10 Mio. m³ und mehr betrachtet. Daher sind nicht alle 63 Unternehmen in dieser Größenklasse auch KRITIS-Betreiber (Schwellenwert für Wassergewinnung: 22 Mio. m³ und mehr; Tab. 5.1).

BSIG fallen (im Folgenden Nicht-KRITIS-Betreiber) und die folglich, wenn überhaupt, nur auf freiwilliger Basis Vorkehrungen zum Schutz ihrer IT-Systeme umsetzen.

Die Festlegung von kritischen Anlagen nur anhand der Anlagengröße hat den Nachteil, dass lediglich Ausfälle *einzelner* Anlagen unterstellt werden, nicht jedoch das Szenario betrachtet wird, dass *gleichzeitig* mehrere (voneinander unabhängige) kleinere Anlagen ausfallen, die *gemeinsam* 500.000 oder mehr Personen versorgen. Auch in diesem Fall würden die vorhandenen Notfallkapazitäten nicht ausreichen, um die Versorgungsunterbrüche zu kompensieren.¹¹⁵ Die Frage stellt sich, wie wahrscheinlich das Szenario ist, dass es bei mehreren Nicht-KRITIS-Betreibern zu gleichzeitigen IT-bedingten Ausfällen in der Wasserver- oder Abwasserentsorgung kommt. Eine Antwort darauf kann im Rahmen dieses TA-Projekts nicht gegeben werden, vielmehr handelt es sich hierbei um eine offene Forschungsfrage. Folgende Fragen spielen hierbei eine wichtige Rolle:

- *Wie gut sind kleine und mittlere Unternehmen gegen Bedrohungen der Informationssicherheit geschützt?* Wie zuvor dargelegt, bestehen derzeit für über 99% der Unternehmen in der Wasserwirtschaft keine gesetzlich verbindlichen Vorgaben zum Schutz ihrer IT-Systeme. Schwachstellen der Informationssicherheit sind hier unter Umständen weit verbreitet und könnten durch die Digitalisierung noch verstärkt werden (Kap. 5.4).
- *Sind bestimmte kritische Komponenten weit verbreitet?* Werden bestimmte kritische Prozess-IT-Komponenten eines Herstellers oder Dienstleisters in der Wasserwirtschaft besonders häufig eingesetzt, würde dies die Wahrscheinlichkeit für gleichzeitig auftretende IT-Störungen erhöhen. Beispielsweise führte der Cyberangriff auf den Kommunikationsdienst KA-SAT vom Februar 2022 zum gleichzeitigen Ausfall von 5.800 Satellitenterminals zur Fernüberwachung und -wartung von Windenergieanlagen (Kap. 5.1.3.1).
- *Welche Motive haben potenzielle Angreifer für parallele Cyberangriffe?* Ein koordinierter Cyberangriff auf mehrere kleinere, dafür schlecht gesicherte Unternehmen könnte ggf. einfacher auszuführen sein als ein Angriff auf ein großes, gut geschütztes Unternehmen, wobei das Schadensmaß (gemessen an der Zahl betroffener Personen) vergleichbar wäre.

¹¹⁵ Eine große räumliche Distanz zwischen den Versorgungsgebieten der betroffenen Betreiber könnte die Allokation der vorhandenen Notfallkapazitäten erschweren, sodass die kritische Schwelle ggf. auch deutlich unter 500.000 betroffener Personen liegen könnte.

5.2.3 Europäisches Recht

NIS-Richtlinie

Mit dem Ziel, den Grad der Informationssicherheit in der EU zu erhöhen, wurde 2016 die NIS-Richtlinie verabschiedet. Dadurch wurde ein einheitlicher Rechtsrahmen für den EU-weiten Aufbau nationaler Kapazitäten für die Informationssicherheit und für eine stärkere Zusammenarbeit der Mitgliedstaaten untereinander geschaffen (BBK 2020, S. 84). In der NIS-Richtlinie sind u. a. Mindestsicherheitsanforderungen an die Informationssicherheit sowie Meldepflichten für die Betreiber wesentlicher Dienste formuliert. Die Ermittlung dieser Betreiber in der Trinkwasserlieferung und -versorgung sowie in weiteren sechs Sektoren¹¹⁶ ist Aufgabe der Mitgliedstaaten. Die Mitgliedstaaten haben sicherzustellen, dass die Betreiber wesentlicher Dienste angemessene technische und organisatorische Maßnahmen zur Absicherung ihrer IT-Systeme unter Berücksichtigung des Stands der Technik treffen (Art. 14 NIS-Richtlinie).

Die Richtlinie musste bis Mai 2018 in nationales Recht umgesetzt werden. In Deutschland waren wesentliche Regelungselemente der Richtlinie durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 (u. a. Mindestsicherheitsanforderungen und Meldepflichten für KRITIS-Betreiber) sowie durch die BSI-KritisV von 2016 (rechtsverbindliche Ermittlung der Betreiber wesentlicher Dienste bzw. der KRITIS-Betreiber) zu diesem Zeitpunkt bereits umgesetzt.

NIS-2-Richtlinie

Um der zunehmenden Digitalisierung des Binnenmarkts sowie der sich rasch weiterentwickelnden Bedrohungen für die Cybersicherheit Rechnung zu tragen, legte die Europäische Kommission (EK 2020a) Ende 2020 einen Vorschlag für eine neue NIS-Richtlinie vor. Mit dem Vorschlag sollte außerdem das Ziel verfolgt werden, den Regelungsaufwand für die zuständigen Behörden zu senken, was u. a. durch den Wegfall der Zuständigkeit der Mitgliedstaaten für die Ermittlung der Betreiber, die in den Anwendungsbereich der Richtlinie fallen, erreicht werden sollte. Die NIS-2-Richtlinie trat nach Durchlaufen des ordentlichen Gesetzgebungsverfahrens im Dezember 2022 in Kraft. Die Vorgaben der NIS-2-Richtlinie müssen laut Artikel 41 bis Oktober 2024 in nationales Recht umgesetzt werden.

Die Pflichten zur Absicherung der IT-Systeme sowie Meldepflichten bei IT-Sicherheitsvorfällen gelten künftig EU-weit einheitlich für alle mittleren und

¹¹⁶ Diese sind Energie, Verkehr, Bankwesen, Finanzmarktinfrastrukturen, Gesundheitswesen sowie digitale Infrastrukturen (Anhang II NIS-Richtlinie).

großen Einrichtungen in den erfassten Sektoren¹¹⁷ (Art. 21 u. 23 i.V.m. Art. 2 u. 3 NIS-2-Richtlinie), während nur noch kleine oder Kleinstunternehmen vom Anwendungsbereich der NIS-2-Richtlinie ausgenommen sind.¹¹⁸ Als kleine und Kleinstunternehmen gelten solche, die weniger als 50 Personen beschäftigen und deren Jahresumsatz bzw. Jahresbilanz 10 Mio. Euro nicht übersteigt.¹¹⁹ In Bezug auf das Anforderungsniveau der diesen Einrichtungen auferlegten Sicherheitsmaßnahmen wird im Gegensatz zur NIS-Richtlinie nicht mehr nur der Stand der Technik maßgeblich sein. Für die Mitgliedstaaten wurde darüber hinaus die Möglichkeit geschaffen, bei der Festlegung der Mindestanforderungen auch die Umsetzungskosten der Maßnahmen, das Ausmaßes der Risikoexposition der Einrichtung, die Größe der Einrichtung und die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Sicherheitsvorfällen und deren Schwere zu berücksichtigen (Art. 21 Abs. 1 NIS-2-Richtlinie).

Auswirkungen der NIS-2-Richtlinie auf die KRITIS-Gesetzgebung und die Wasserwirtschaft in Deutschland

Die Verabschiedung der NIS-2-Richtlinie hat weitreichende Auswirkungen auf die Gesetzgebung zur Informationssicherheit und die Wasserwirtschaft in Deutschland. Durch ein drittes IT-Sicherheitsgesetz (nach 2015 und 2021) müssen die einschlägigen Fachgesetze und Verordnungen novelliert werden, wobei große Anpassungsbedarfe insbesondere aus der Umstellung des bisher praktizierten anlagenbezogenen Ansatzes zur Ermittlung der regulierten Unternehmen auf eine unternehmensbezogene Methodik resultieren. Da sich in Deutschland der Fokus bisher auf große KRITIS-Betreiber richtete, wird die Ausdehnung des Anwendungsbereichs auch auf mittlere Unternehmen die Zahl der erfassten Betriebe deutlich erhöhen. Dies gilt insbesondere für die Wasserwirtschaft, die sich durch wenige große, aber viele mittlere (und sehr viele kleine) Betriebe auszeichnet. Laut einer Branchenanalyse von ver.di (2015), die alle Unternehmen der deutschen Wasserver- und Abwasserentsorgung mit mehr als 20 Beschäftigten erfasste, gab es damals mindestens 496 Betriebe mit mehr als 50

¹¹⁷ Die erfassten Sektoren wurden erweitert und neu nach dem Grad ihrer Kritikalität zwei Kategorien zugeordnet. Zu den »Sektoren mit hoher Kritikalität« gehören Energie, Verkehr, Bankwesen, Finanzmarktinfrastrukturen, Gesundheitswesen, Trinkwasser, Abwasser, Digitale Infrastrukturen, Verwaltung von IKT-Diensten, öffentliche Verwaltung und Weltraum (Anhang I NIS-2-Richtlinie). Die sonstigen kritischen Sektoren sind Post- und Kurierdienste, Abfallbewirtschaftung, chemische Stoffe, Produktion, Herstellung und Handel mit chemischen Stoffen, Produktion, Verarbeitung und Vertrieb von Lebensmitteln, Verarbeitendes Gewerbe/Herstellung von Waren, Anbieter digitaler Dienste sowie Forschung (Anhang II NIS-2-Richtlinie).

¹¹⁸ Ausnahmen hiervon gibt es beispielsweise für bestimmte digitale Dienste und Einrichtungen der öffentlichen Verwaltung (Art. 3 Abs. 1 NIS-2-Richtlinie).

¹¹⁹ Empfehlung 2003/361/EG der Kommission vom 6.5.2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen (ABl. L 124 vom 20.5.2003, S. 36).



Beschäftigten (2015, S. 6), die also einen der Schwellenwerte für mittlere Unternehmen erreichten bzw. überschritten. Zum Vergleich: Gegenwärtig wird die Zahl der KRITIS-Betreiber in der Trinkwasserversorgung mit 47 Unternehmen angegeben (Kap. 5.2.2.3; die Zahl der KRITIS-Betreiber in der Abwasserentsorgung ist dem TAB nicht bekannt). Die genaue Wirkung auf die Zahl der regulierten Betriebe ist allerdings schwer abzuschätzen, da die unternehmensbezogene Definition aufgrund der in der Wasserwirtschaft teilweise komplizierten Beteiligungsstrukturen (z. B. in Verbundunternehmen) nicht einfach in der Anwendung ist. Mit einer steigenden Anzahl an regulierten Unternehmen erhöht sich gleichzeitig der behördliche Vollzugsaufwand z. B. im Hinblick auf die Betreuung der verpflichteten Betreiber oder die Überprüfung der regelkonformen Maßnahmenumsetzung. Klar ist aber auch, dass aufgrund der starken Kleinteiligkeit der deutschen Wasserwirtschaft mit insgesamt über 12.000 Unternehmen (Kap. 4.1.4) auch nach Überführung der Vorgaben der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht eine sehr große Zahl an kleinen Betreibern nicht unter die neuen Regelungen fallen wird.

5.2.4 Regelwerke, Normen und Empfehlungen zur Informationssicherheit

Das Thema Informationssicherheit ist Gegenstand einer Vielzahl von internationalen und nationalen Regelwerken, Normen und Empfehlungen. Als Teil des untergesetzlichen Regelwerks ergänzen solche Dokumente die rechtlichen Grundlagen, indem sie gesetzliche Bestimmungen durch technische und organisatorische Vorgaben konkretisieren und damit die Rechtssicherheit für die Gesetzesadressaten erhöhen. Für Unternehmen, die den Schutz ihrer IT-Systeme auf freiwilliger Basis verbessern möchten, können Normen und Regelwerke Orientierung und nützliche Hinweise bieten.

Ohne Anspruch auf Vollständigkeit werden im Folgenden relevante Normen, Regelwerke und Empfehlungen im Bereich der Informationssicherheit vorgestellt und in Hinblick auf ihren Nutzen für die Wasserwirtschaft diskutiert.¹²⁰ Dazu gehören branchenübergreifende Normen und Regelwerke zur Informationssicherheit, die international z. B. durch die International Organization for Standardization (ISO) und national durch das BSI herausgegeben werden. Speziell für die Wasserwirtschaft von Bedeutung sind die branchenspezifischen technischen Regelwerke des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. (DVGW) sowie der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), hier insbesondere der in diesen Regelwerken verankerte branchenspezifische IT-Sicherheitsstandard Wasser/Abwasser (B3S WA).

¹²⁰ Eine ausführlichere Darstellung wichtiger nationaler und internationaler Regelwerke und Normen findet sich beispielsweise in BSI (2013, S. 36 ff.).

5.2.4.1 Internationale Normen und Regeln

ISO-Normen zur Informationssicherheit

Die internationalen Normungsorganisationen ISO und IEC fassen die Normen zur Informationssicherheit in der 2700x-Reihe zusammen, die seit 2005 existiert und regelmäßig aktualisiert und erweitert wird. Die Normen beschäftigen sich mit verschiedenen Aspekten des Aufbaus und Betriebs eines Managementsystems für die Informationssicherheit (Informationssicherheitsmanagementsystem ISMS). Mit einem ISMS legt eine Organisation die grundlegenden Methoden und Prozesse für die Initiierung, Steuerung, Überwachung und Verbesserung von Informationssicherheit fest. Dazu gehört u. a. die Identifikation von Sicherheitsdefiziten und die Ausarbeitung eines Sicherheitskonzepts mit geeigneten Maßnahmen, um nicht akzeptable Risiken der Informationssicherheit handzuhaben.¹²¹ Die Normenreihe gilt branchenübergreifend, zusätzlich existieren einige Normen mit sektorspezifischen Vorgaben (z. B. für den Energiesektor, nicht jedoch speziell für den Wassersektor). Die Normenreihe behandelt vorrangig organisatorische Aspekte und die Empfehlungen richten sich in erster Linie an die Managementebene. Konkrete technische Umsetzungshinweise zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen fehlen dagegen weitgehend (BSI 2017a, S. 9 f.).

Die Normenreihe ISO/IEC 2700x hat sich weltweit als Standard für die Informationssicherheit etabliert. Organisationen können sich nach ISO/IEC 27001 zertifizieren lassen und damit die Implementierung eines ISMS nachweisen. Für die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 8a BSIG durch KRITIS-Betreiber reicht eine Zertifizierung nach ISO/IEC 27001 allerdings nicht aus (BSI 2020d, S. 20).

IEC-Normen

Die IEC hat diverse Normen herausgegeben, die unterschiedliche Aspekte von Automatisierungs-, Prozessleit- und Fernwirktechnik behandeln und auch Bezüge zur Informationssicherheit aufweisen. Die Normen gehen nicht auf die Spezifika der Wasserwirtschaft ein, sie können aber auf viele hier eingesetzte Systeme angewendet werden. Ein Beispiel ist die Normreihe IEC 62443, die sich mit der IT-Sicherheit für Netze und Systeme industrieller Kommunikationsnetze befasst. Außerdem basieren viele Übertragungstechniken, die in der Fernwirktechnik zum Einsatz kommen, auf IEC-Normen, z. B. die Kommunikationsstandards nach IEC 60870 oder IEC 61850. Zur Absicherung dieser

¹²¹ DIN EN ISO/IEC 27000:2020 Informationstechnik – Sicherheitsverfahren – Informationssicherheitsmanagementsysteme – Überblick und Terminologie



Kommunikationsstandards kann wiederum die IEC-Norm 62351 angewendet werden (VDE o.J.b S. 4 f.).

5.2.4.2 IT-Grundschutz des BSI

Der IT-Grundschutz des BSI ist ein nationaler Standard für die Informationssicherheit. Er existiert seit 1994, die Inhalte werden aber kontinuierlich auf dem Stand der Technik weiterentwickelt. Der IT-Grundschutz verfolgt einen ganzheitlichen Ansatz und richtet sich an Institutionen aller Branchen und Größen (BSI 2017a, S. 10; 2020b).

Zentrale Bestandteile des IT-Grundschutzes sind die BSI-Standards und das IT-Grundschutz-Kompendium. In den BSI-Standards wird Schritt für Schritt der Aufbau und Betrieb eines ISMS erläutert. Die Vorgehensweise ist kompatibel mit den Vorgaben der internationalen Norm ISO/IEC 27001 (Kap. 5.2.4.1), die einzelnen Themen werden aber ausführlicher behandelt (BSI 2017a, S. 12 f.). Im IT-Grundschutz-Kompendium werden in einzelnen Bausteinen zu allen relevanten IT-Einsatzfeldern aktuelle Gefährdungen erläutert und Sicherheitsanforderungen zur Erreichung des Stands der Technik formuliert (BSI 2021g, S. 61). Für Betriebe der Wasserwirtschaft von Bedeutung ist beispielsweise der Baustein IND: Industrielle IT. Zu vielen Bausteinen gibt es praxisbezogene Umsetzungshinweise, die detailliert beschreiben, wie die Anforderungen durch passende organisatorische und technische Sicherheitsmaßnahmen erfüllt werden können (BSI 2017a, S. 11).

Mit dem ICS-Security-Kompendium veröffentlichte das BSI (2013) außerdem ein Grundlagenwerk für die Informationssicherheit in industriellen Steuerungs- und Automatisierungssystemen. Für die Betreiber der Systeme werden notwendige Grundlagen der Informationssicherheit erläutert und die Anwendung des IT-Grundschutzes auf Steuerungs- und Automatisierungssysteme wird erörtert. Schließlich enthält das Kompendium eine Sammlung von konkreten Sicherheitsmaßnahmen.

Gegenüber den eher allgemein gehaltenen Vorgaben und Maßnahmen der ISO/IEC-2700x-Reihe (Kap. 5.2.4.1) liefert der IT-Grundschutz des BSI weiterführende Handlungsempfehlungen und unterstützt die Anwender auch mit konkreten technischen Umsetzungshinweisen. Da auf den Stand der Technik abgestellt wird, geht das Anforderungsniveau des IT-Grundschutzes allerdings über allgemein anerkannte Regeln der Technik hinaus, die von allen Betreibern unabhängig ihrer Größe verpflichtend einzuhalten sind.

5.2.4.3 Nationale Normen und Regelwerke von DIN, VDI/VDE und BDEW zur Informationssicherheit

Bei den Normen zur Informationssicherheit des Deutschen Instituts für Normung e. V. (DIN) handelt es sich meist um deutsche Übersetzungen der jeweiligen internationalen Normen (Kap. 5.2.4.1).

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und der Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (VDE) haben die Richtlinie VDI/VDE 2182¹²² herausgegeben. Für Unternehmen der Energieversorgung hat der BDEW gemeinsam mit dem Verein Österreichs E-Wirtschaft einen Katalog mit Anforderungen an sichere Steuerungs- und Telekommunikationssysteme veröffentlicht (OE/BDEW 2018). Die Empfehlungen von VDI/VDE und BDEW richten sich nicht speziell an die Wasserwirtschaft, aufgrund der teilweise ähnlichen IT-Systemkonfigurationen können sie allerdings nützliche Hinweise liefern.

5.2.4.4 Technische Regelwerke von DVGW und DWA

Die technischen Regelwerke der Vereinigungen von DVGW und DWA sind von zentraler Bedeutung für die Wasserwirtschaft. Sie behandeln übergreifend alle wasserfachlichen Themen (z. B. Planung, Bau, Betrieb, Instandhaltung und Sanierung von Anlagen, Betriebsorganisation, nachhaltige Wassernutzung) und definieren dazu Anforderungen insbesondere an die technische Sicherheit, die Hygiene, den Umweltschutz, die effiziente Wassernutzung, die Gebrauchstauglichkeit, den Verbraucherschutz, die Unternehmensorganisation und die Personalqualifikation. Die Regelwerke bestehen im Wesentlichen aus Arbeitsblättern und Merkblättern (DVGW 2021, S. 11 f.; DWA 2018a, S. 9 f.):

- *Arbeitsblätter* zielen darauf ab, allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beschreiben, auf die Rechtsvorschriften oft Bezug nehmen (Kap. 5.2.1).
- *Merkblätter* ergänzen die Regelwerke durch Hinweise auf fortschrittliche Verfahren, deren Praxisbewährung noch aussteht. Die Voraussetzungen für eine allgemein anerkannte Regel der Technik bzw. eine Veröffentlichung als Arbeitsblatt sind somit (noch) nicht erfüllt.

Arbeitsblätter

Die Arbeitsblätter behandeln spezifische anlagen- und verfahrensbezogene Aufgabenstellungen der Wasserver- oder Abwasserentsorgung oder thematisieren übergeordnete Aufgabenstellungen der Wasserwirtschaft. Soweit ersichtlich spielt das Thema Informationssicherheit in den Arbeitsblättern von DVGW und

¹²² Richtlinie VDI/VDE 2182 Blatt 1 zur Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung – Allgemeines Vorgehensmodell



DWA bislang allerdings eine nur untergeordnete Rolle. Auf die allgemeine Bedeutung des Schutzes der eingesetzten IT-Systeme wird an geeigneten Stellen zwar hingewiesen, allerdings ohne diesen Aspekt durch spezifische Definitionen, Anforderungen oder konkrete Schutzmaßnahmen zu vertiefen. Insofern existieren in den für die Wasserwirtschaft einschlägigen Regelwerken von DVGW und DWA bislang keine Arbeitsblätter, die das Thema Informationssicherheit dezidiert und umfänglich behandeln. Damit fehlt es in Bezug auf die Informationssicherheit derzeit auch an einer schriftlichen Fixierung von allgemein anerkannten Regeln der Technik, zu deren Umsetzung alle Betreiber unabhängig ihrer Größe gesetzlich verpflichtet wären (Stand Januar 2023).

Merkblätter

Merkblätter ergänzen die Arbeitsblätter u. a. durch Empfehlungen und Hinweise zur Lösung technischer und betrieblicher Aufgabenstellungen (DWA 2018a, S. 10). In diesem Rahmen adressieren einzelne Merkblätter auch den Einsatz von IT-Systemen und damit im Zusammenhang stehende Aspekte der Informationssicherheit. Zwei Beispiele:

- Das Merkblatt DWA-M 253: Leit- und Automatisierungstechnik auf Abwasseranlagen von 2011 stellt Konfiguration und Systemaufbau entsprechender Lösungen vor und spiegelt diese an den Anforderungen der Abwassertechnik. Die Bedeutung der IT-Sicherheit wird hervorgehoben. Die zunehmende Kopplung von Prozess- und Büro-IT wird problematisiert und Maßnahmen zur Absicherung von Netzübergängen werden empfohlen. Weitere Themen sind Datensicherung und die Systempflege z. B. durch Softwareupdates.
- Das Merkblatt DWA-M 207: Informations- und Kommunikationsnetzwerke für die Abwassertechnik von 2007 beschreibt Techniken der Datenübertragung und geht auch auf Sicherheitsaspekte ein. Auf die Gefahr unautorisierter Zugriffe infolge der zunehmenden Nutzung internetgestützter Übertragungstechniken wird hingewiesen. Wichtige Maßnahmen zur Absicherung der Kommunikation werden aufgeführt, allerdings ohne sie im Detail zu behandeln.

2017 haben die beiden Vereinigungen gemeinsam die inhaltsgleichen Merkblätter DVGW W 1060 bzw. DWA-M 1060: »IT-Sicherheit – Branchenstandard Wasser/Abwasser« herausgegeben, in denen sich dezidiert mit dem Schutz der in der Wasserwirtschaft eingesetzten IT-Systeme auseinandergesetzt wird. Die Merkblätter sind Teil des branchenspezifischen Sicherheitsstandards (B3S) für den Sektor Wasser, der gestützt auf § 8a Abs. 2 BSIG durch die Vereinigungen von DVGW und DWA zur Beschreibung des durch KRITIS-Betreiber zu erfüllenden Stands der Technik entwickelt wurde (Kap. 5.2.2.1). Inhalte und Anwen-

derung der Merkblätter bzw. des branchenspezifischen Sicherheitsstandards werden im folgenden Kapitel erörtert.

Da die Inhalte von Merkblättern über die Anforderungsstufe von allgemein anerkannten Regeln der Technik hinausgehen, haben sie nur empfehlenden Charakter und müssen von Betreibern nicht verpflichtend berücksichtigt werden.

5.2.4.5 Branchenspezifischer Sicherheitsstandard (B3S WA)

Der B3S für den Sektor Wasser wurde erstmalig 2017 als DVGW-Merkblatt W 1060 bzw. DWA-Merkblatt M 1060 in Verbindung mit einer Webapplikation veröffentlicht und liegt mittlerweile in seiner dritten Version (B3S WA 2021) vor (DWA/DVGW 2022).¹²³ Die Umsetzung des B3S WA zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 8a BSIG ist für KRITIS-Betreiber nicht verpflichtend. Möchte ein KRITIS-Betreiber die gesetzlichen Vorgaben auf andere Weise erfüllen, muss er die Einhaltung des Stands der Technik gegenüber dem BSI nachweisen, was den Aufwand für das Nachweisverfahren deutlich erhöht. Alle 2 Jahre müssen KRITIS-Betreiber den Prozess wiederholen und die Umsetzung geeigneter Maßnahmen gegenüber dem BSI erneut nachweisen (§ 8a Abs. 3 BSIG).

Allgemeine Vorgehensweise und Nachweisverfahren

Der B3S WA basiert auf dem IT-Grundsatz des BSI (Kap. 5.2.4.2). Die Webapplikation »IT-Sicherheitsleitfaden« unterstützt die Betreiber darin, aus der Gesamtheit der Sicherheitsanforderungen des BSI-Grundsatz-Kompends diejenigen auszuwählen, die in Abhängigkeit der jeweiligen Anlagen- und IT-Konfigurationen mindestens zu erfüllen sind, um den Stand der Technik zu erreichen. Die Umsetzung des B3S WA verläuft in folgenden grundlegenden Schritten (DWA 2017a, S. 9 ff.; Fricke/Stecken 2022; Marquardt et al. 2021):

1. Die kritischen Anlagen i. S. d. BSIG (Kap. 5.2.2.2) und die für diese Anlagen betriebsrelevanten IT-Systeme werden bestimmt. Für jede kritische Anlage ist der B3S WA gesondert anzuwenden.
2. Die Webapplikation stellt 27 Anwendungsfälle zur Auswahl, die grundsätzliche IT-Systemkonfiguration beschreiben (z. B. Zugriff steuernd im gesicherten Kontrollraum, Datenverbindung über Netzwerke anderer Anbieter, Einsatz von IoT-Geräten). Die Anwendungsfälle, die auf die kritische Anlage zutreffen, werden bestimmt.
3. Auf Basis der gewählten Anwendungsfälle generiert die Webapplikation eine Liste von Gefährdungen der Informationssicherheit.

¹²³ Ein B3S muss alle 2 Jahre auf den aktuellen Stand gebracht und seine Eignung anschließend durch das BSI festgestellt werden (Marquardt et al. 2021).



4. Für die identifizierten Gefährdungen werden die korrespondierenden Risiken ermittelt. Risiken mit mittlerer oder hoher Eintrittswahrscheinlichkeit, die zum Ausfall einer Anlage führen, sind für kritische Anlagen nicht mehr akzeptabel (DVGW/DWA 2017, S. 16).
5. Auf Basis der Anwendungsfälle und Gefährdungen ermittelt die Webapplikation die zu erfüllenden Anforderungen aus dem IT-Grundschutz-Kompendium. Umsetzungshinweise unterstützen bei der Identifikation von konkreten Schutzmaßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen.
6. Sobald die Anforderungen umgesetzt und dokumentiert sind, findet eine Restrisikobewertung statt. Falls nicht alle Risiken hinreichend reduziert wurden, werden weitere Schutzmaßnahmen ermittelt.

Alle Schritte der Anwendung des B3S WA und der Maßnahmendurchführung sind zu dokumentieren. Im Rahmen der nach § 8a Abs. 3 BSIG vorgeschriebenen Auditierung überprüft ein durch den Betreiber beauftragtes Prüfteam einer anerkannten Prüfstelle anhand dieser Dokumente und Vor-Ort-Begutachtungen, ob die relevanten Anforderungen zur Erreichung des Stands der Technik berücksichtigt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen umgesetzt wurden. Bei erfolgreicher Prüfung erstellt das Prüfteam ein Nachweisdokument, das durch den KRITIS-Betreiber beim BSI einzureichen ist (DWA 2018b).

Anwendung des B3S WA durch Nicht-KRITIS-Betreiber

Der B3S WA wurde durch die Vereinigungen von DVGW und DWA so konzipiert, dass er nicht nur von KRITIS-Betreibern, sondern – mit niedrigerem Umsetzungsaufwand – auch von kleinen und mittleren Betreibern ohne kritische Anlagen i. S. d. BSIG angewendet werden kann. Dazu wurde die im IT-Grundschutz-Kompendium des BSI eingeführte Kategorisierung der Anforderungen nach Basis- und Standardanforderungen auch in die Webapplikation »IT-Sicherheitsleitfaden« übernommen. Die Basisanforderungen aus dem IT-Grundschutz-Kompendium ermöglichen eine grundlegende Erstabsticherung mit einem vergleichsweise geringen finanziellen, personellen und zeitlichen Aufwand. Um den Stand der Technik zu erreichen, sind zusätzlich auch die Standardanforderungen zu berücksichtigen (BSI 2020a, S. 61 f.). Kleine und mittlere Betreiber haben bei der Anwendung des B3S WA somit die Möglichkeit, nur die Basisanforderungen zu berücksichtigen, um mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand eine Grundabsicherung ihrer betriebskritischen IT-Systeme zu erzielen (Fricke/Stecken 2022). Gleichwohl dürfen die Anstrengungen auch in diesem Fall nicht unterschätzt werden. Fricke und Stecken (2022, S. 51 f.) führten das Beispiel eines kleinen Wasserversorgers an (3 Mio. m³ Wasserdurchsatz), der für die Umsetzung des B3S WA knapp 6 Monate benötigte, während bei einigen Arbeitssitzungen auch »Blut, Schweiß und Tränen« geflossen seien.

5.2.5 Zwischenfazit und Ausblick

In Bezug auf die rechtlichen Vorgaben zur Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft existiert aktuell eine klare Trennung zwischen wenigen großen KRITIS-Betreibern und vielen mittleren und kleinen Nicht-KRITIS-Betreibern. Für KRITIS-Betreiber bestehen seit 2015 gesetzliche Pflichten zur Absicherung der betriebskritischen IT-Systeme, außerdem wurden verbindliche Nachweis- und Meldepflichten etabliert. Der gesetzlich geforderte Stand der Technik wurde durch die technischen Regelsetzer des Sektors als branchenspezifische Sicherheitsstandards schriftlich fixiert.

Ganz anders stellt sich die Situation derzeit für Nicht-KRITIS-Betreiber dar, für die es keine gesetzlichen Regelungen zur Informationssicherheit gibt. Zwar müssen alle Betreiber unabhängig ihrer Größe die allgemein anerkannten Regeln der Technik umsetzen, in Bezug auf die Informationssicherheit allerdings fehlt es in den Regelwerken von DVGW und DWA gegenwärtig an einer schriftlichen Fixierung solcher auf die Bedürfnisse der Wasserwirtschaft zugeschnittenen Regeln als Arbeitsblatt. Die Merkblätter DVGW W 1060 bzw. DWA-M 1060 bzw. der B3S WA bieten auch für Nicht-KRITIS-Betreiber eine Methodik zur Erhöhung der Informationssicherheit, dieser fehlt allerdings die gesetzliche Verbindlichkeit von allgemein anerkannten Regeln der Technik. Aktivitäten zur Erhöhung der Informationssicherheit finden bei Nicht-KRITIS-Betreibern aktuell somit nur auf freiwilliger Basis statt. Dazu bieten zahlreiche internationale und nationale Normen- und Regelwerke vielfältige Hilfestellungen, allerdings fehlt es hier teilweise an konkreten technischen Umsetzungshinweisen (z. B. in der Normenreihe ISO/IEC 2700x) oder die Sicherheitsanforderungen übersteigen die Schutzbedarfe kleinerer Betriebe (z. B. beim IT-Grundschutz des BSI). Außerdem setzt die Umsetzung entsprechender Sicherheitsmaßnahmen erhebliche zeitliche, personelle und fachliche Ressourcen voraus, was für mittlere und insbesondere für kleine Betreiber generell eine hohe Hürde für ein freiwilliges Vorgehen darstellt.

Die Überführung der Vorgaben der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht impliziert bedeutende Änderungen des gegenwärtigen rechtlichen Rahmens. Da künftig auch mittlere Unternehmen unter die Regelungen fallen werden, wird sich die Zahl der verpflichteten Betreiber deutlich erhöhen. Eine Differenzierung des Anforderungsniveaus der auferlegten Pflichten nach Unternehmensgröße – wie dies durch die NIS-2-Richtlinie ausdrücklich ermöglicht wird (Kap. 5.2.3) – könnte sich hier als sinnvoll erweisen, um einerseits mittlere Unternehmen fachlich, personell und finanziell nicht zu überfordern und andererseits auch den behördlichen Vollzugsaufwand in Grenzen zu halten.

5.3 Unterstützungsangebote durch staatliche Stellen oder privatwirtschaftliche Organisationen

Orientierung im Bereich der Informationssicherheit bieten nicht nur verschriftlichte Normen, Regelwerke und Empfehlungen, sondern auch diverse Plattformen, Informationsangebote und Unterstützungsleistungen, die in den vergangenen rund 15 Jahren von staatlichen und/oder privatwirtschaftlichen Organisationen initiiert wurden. Niedrigschwellige Unterstützungsangebote sind vor allem für kleine und mittlere Betreiber wichtig, die aus eigenem Antrieb die Informationssicherheit im Betrieb erhöhen wollen, dazu aber auf fachliche Hilfe und Informationen angewiesen sind. Dieses Kapitel stellt ohne Anspruch auf Vollständigkeit eine Auswahl derartiger Initiativen, die (auch) für die Wasserwirtschaft von Bedeutung sind, kurz vor. Der Fokus liegt dabei auf Aktivitäten unter Beteiligung staatlicher Stellen oder von Branchen- bzw. Fachverbänden. Das sehr weite Feld der privaten Beratungsdienstleistungen im Bereich der Informationssicherheit kann an dieser Stelle nicht beleuchtet werden.

5.3.1 UP KRITIS

Der UP KRITIS dient als Plattform der öffentlich-private Kooperation zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (dazu und zum folgenden BBK 2020, S. 63 f.; BSI/UP KRITIS o. J.). Er steht seit 2007 allen Unternehmen und Organisationen der KRITIS-Sektoren unabhängig von ihrer Größe (und damit unabhängig vom Status als KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG), nationalen Fach- und Branchenverbänden sowie den zuständigen Bundes- und Landesbehörden offen. Die Teilnahme ist freiwillig und kostenlos. Themenschwerpunkt ist die Informationssicherheit von Büro- und Prozess-IT, es werden aber auch andere Aspekte wie der physische Schutz von Kritischen Infrastrukturen behandelt. Alle teilnehmenden Unternehmen und Organisationen erhalten vom BSI speziell aufbereitete Lageinformationen, Warnmeldungen und Hintergrundinformationen zur Informationssicherheit. Im Rahmen der operativ-taktischen Zusammenarbeit können sich die Mitglieder über Auffälligkeiten, IT-Sicherheitsvorfälle oder die aktuelle Bedrohungslage austauschen sowie durch Meldungen von IT-Sicherheitsvorfällen im eigenen Unternehmen zum gemeinsamen Lagebild beitragen. Im Rahmen der strategisch-konzeptionellen Zusammenarbeit werden branchenspezifische und branchenübergreifende Themenfelder in Arbeitskreisen bearbeitet. Branchenarbeitskreise beteiligen sich beispielsweise an der Erstellung von branchenspezifischen Sicherheitsstandards zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 8a BSIG. Themenarbeitskreise beschäftigen sich mit sektorübergreifenden Themen wie etwa Empfehlungen zur Krisenvorsorge oder die Organisation von Übungen. Über einen Wirtschaftsbeirat, der aus Vertreter/

innen der Wirtschaft besteht, kann der UP KRITIS zudem etwa im Rahmen von Regulierungsvorhaben beteiligt und angehört werden.

Im UP KRITIS waren mit Stand Oktober 2022 840 Unternehmen und Behörden vertreten (BSI 2022b, S. 70). Dem TAB liegen keine Informationen dazu vor, um wie viele Unternehmen aus der Wasserwirtschaft es sich dabei handelt. Angesichts der über 12.000 in der deutschen Wasserver- und Abwasserentsorgung tätigen Betriebe (Kap. 4.1.4) handelt es sich allerdings um einen sehr kleinen Anteil. Außerdem wurde für den Sektor Wasser – im Gegensatz zu anderen KRITIS-Sektoren, wie z. B. Banken/Finanzen, Telekommunikation, – noch keine Meldestelle als Bindeglied zwischen Unternehmen und BSI-Lagezentrum eingerichtet (Stand Januar 2023; BSI o. J.e). Insgesamt werden die Möglichkeiten des UP KRITIS durch die Wasserwirtschaft also noch nicht optimal ausgeschöpft.

5.3.2 Allianz für Cybersicherheit

Die Allianz für Cybersicherheit ist eine öffentlich-private Partnerschaft, die 2012 durch das BSI und den Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und Neue Medien (Bitkom e. V.) gegründet wurde. Die Plattform soll den Wissens- und Erfahrungsaustausch zwischen dem BSI und den teilnehmenden Wirtschaftsunternehmen fördern. Sie steht allen Unternehmen mit Sitz in Deutschland kostenfrei offen (also auch Unternehmen außerhalb der KRITIS-Sektoren) (BSI o. J.h). Das BSI stellt u. a. tagesaktuelle Warnmeldungen, monatliche Lagebilder zur Bedrohungslage und diesbezügliche Informationsmaterialien zur Verfügung. Die teilnehmenden Unternehmen können eigene Angebote wie Fachpublikationen oder Schulungsmaßnahmen beisteuern. Regelmäßige Veranstaltungen sollen den Erfahrungsaustausch fördern, z. B. deutschlandweit organisierte Cybersicherheitstage oder Expertenkreise. Über die Plattform können außerdem IT-Sicherheitsvorfälle gemeldet werden, die das BSI analysiert und für Warnmeldungen verwendet (Pawlowska 2022). Mittlerweile hat die Allianz für Cybersicherheit über 6.600 Teilnehmer/innen (Stand Januar 2023), darunter aber nur etwas über 60 Wasserbetriebe oder Stadtwerke.

5.3.3 Cyber-Sicherheitsnetzwerk

Mit der Allianz für Cybersicherheit verzahnt ist das Cyber-Sicherheitsnetzwerk, das 2021 durch das BSI initiiert wurde. Es handelt sich dabei um einen freiwilligen Zusammenschluss von Expert/innen für die Bearbeitung von IT-Sicherheitsvorfällen, die ein Qualifizierungsprogramm durchlaufen. Betroffene Unternehmen (aber auch Privatpersonen) können sich bei der Geschäftsstelle des Netzwerks melden und erhalten geeignete Expertise vermittelt. Ziel ist der Aufbau einer flächendeckenden dezentralen Struktur, die effizient und kosten-



günstig kleinen und mittleren Unternehmen sowie Bürger/innen bei IT-Sicherheitsvorfällen Unterstützung anbietet (BSI o.J.b, 2022b, S. 82).

5.3.4 Dienstleistungen des BSI

Zusätzlich zu den Aktivitäten der zuvor genannten Initiativen bietet das BSI weitere Services speziell für KRITIS-Betreiber. Dazu gehört die regelmäßige Betreuung von KRITIS-Betreibern im Kontext der Umsetzung der Anforderungen nach § 8a, b BSIG (Kap. 5.2.2.1) durch kostenlose Handreichungen, Informationsveranstaltungen, die Beantwortung von Anfragen und generell durch einen kontinuierlichen Austausch zwischen BSI, Betreibern und Verbänden. Gestützt auf § 3 Abs. 3 BSIG können KRITIS-Betreiber auch kostenpflichtige individuelle Beratungs- und Unterstützungsleistungen beim BSI anfordern (BSI o.J.a).

Im nationalen IT-Lagezentrum des BSI wird die Lage der Informationssicherheit rund um die Uhr beobachtet und ausgewertet. Die hier erstellten Lagebilder gehen u. a. auch an den UP KRITIS (BSI o.J.d). KRITIS-Betreiber werden über sie betreffende besondere Bedrohungslagen unverzüglich über die gemäß § 8b Abs. 3 BSIG eingerichteten Kontaktstellen in Kenntnis gesetzt und mit relevanten Informationen versorgt.

Bei einem IT-Sicherheitsvorfall bietet das BSI betroffenen Organisationen, also grundsätzlich auch kleinen und mittleren Betreibern, fachliche Unterstützung bei der Lagefeststellung und -beurteilung. Weiterführende Unterstützungsleistungen richten sich aber vorrangig an KRITIS-Betreiber. Diese umfassen die Bereitstellung von Expertise in den Bereichen Schadprogrammanalyse, Digitale Forensik oder Logdatenanalyse. In besonders schwerwiegenden Fällen kann zudem ein mobiles Reaktionsteam (Mobile Incident Response Team – MIRT) aus BSI-Fachleuten zum Betreiber entsandt werden, um diese vor allem darin zu unterstützen, die betroffenen kritischen Prozesse aufrechterhalten bzw. zeitnah wiederherstellen zu können (BSI o.J.f u. o.J.g).

5.3.5 Informations- und Beratungsangebote von Landesbehörden

Wie das BSI bieten auch einige Landesbehörden spezifische Beratungsangebote für Unternehmen und Organisationen der KRITIS-Sektoren. Hervorzuheben sind z. B. die Aktivitäten des bayerischen Landesamts für Sicherheit in der Informationstechnik (LSI Bayern)¹²⁴, das in Kooperation mit Betreibern ein spezielles Beratungsangebot für Unternehmen der Wasserwirtschaft entwickelt hat.

¹²⁴ Bayern hat als bisher einziges Bundesland ein eigenes LSI gegründet (www.lsi.bayern.de, 15.11.2022).

Aufgrund der stark fragmentierten Betreiberlandschaft in Bayern richtet sich das Angebot insbesondere an kleinere Trinkwasserversorger. Ziel ist es, die Einführung von individuell angepassten IT-Sicherheitskonzepten zu unterstützen. Dazu wurde 2022 eine frei zugängliche Checkliste (LSI Bayern o. J.) zur Mindestabsicherung entwickelt, mit der das aktuelle Sicherheitsniveau erhoben werden kann, außerdem werden angemessene Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit vorgeschlagen. Für mittelgroße Betreiber wurde eine Handlungsempfehlung mit weitergehenden Maßnahmen erarbeitet (LSI Bayern o. J.). Das Unterstützungsangebot des LSI Bayern steht in gewisser Konkurrenz zum B3S WA der Branchenverbände, im Vergleich dazu ist der Zugang aber niedrigschwelliger und die Anwendung der Checkliste einfacher, was die Inanspruchnahme des Angebots durch Betreiber befördern könnte.

Seit Oktober 2022 unterstützt der Verfassungsschutz des Landes Rheinland-Pfalz insbesondere kommunale Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen durch ein neues kostenloses Cyberschutzportal (Ministerium des Innern und für Sport des Landes Rheinland-Pfalz 2022). Auf dem Portal werden u. a. tagesaktuelle Bedrohungsindikatoren (z. B. zu böseartig genutzten E-Mail-Adressen), Informationen zur Absicherung von IT-Infrastrukturen sowie Hilfestellungen im Falle eines vermuteten Angriffs bereitgestellt. Mit dem Angebot reagierte das Ministerium des Innern und für Sport des Landes Rheinland-Pfalz (2022) auf die erhöhte Bedrohungslage infolge des russischen Angriffskriegs gegen die Ukraine.

5.3.6 Informations-, Schulungs- und Beratungsangebote von Verbänden

Zum Thema Informationssicherheit bieten die Branchenverbände der Wasserwirtschaft DVGW, DWA und BDEW, aber auch Fachvereinigungen wie der VDI und weitere Verbände wie der Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU) ihren Mitgliedern und interessierten Personen vielfältige Informations-, Schulungs- und Beratungsangebote. Das Spektrum der Inhalte und Formate ist sehr breit und reicht von kostenlosen Informationsmaterialien und -veranstaltungen, Beiträgen in Fachzeitschriften und Austauschplattformen über kostenpflichtige Seminare, Fort- und Weiterbildungsangebote für Führungs- und Fachkräfte bis hin zu individuellen Beratungsdienstleistungen durch IT-Fachexpert/innen für Unternehmen der Wasserwirtschaft (z. B. im Rahmen der Umsetzung des B3S WA, Kap. 5.2.4.5).

5.3.7 CERT@VDE

CERT@VDE ist eine Plattform für Informationssicherheit, die 2016 vom VDE initiiert wurde. Die branchenübergreifende Plattform richtet sich vorrangig an



KMU und bietet Informationsangebote und Unterstützung speziell im Bereich der Prozess-IT. Ein CERT (Computer Emergency Response Team) besteht generell aus Sicherheitsexperten und IT-Fachleuten, die präventive Handlungsempfehlungen erarbeiten, vor aktuellen Gefährdungen (z. B. durch Sicherheitslücken) warnen und Hilfe bei der Bewältigung von IT-Sicherheitsvorfällen bereitstellen (VDE o. J.a). Ausgangspunkt für die Gründung des CERT@VDE war die Diagnose eines Informationsdefizits bezüglich der Informationssicherheit in Prozess-IT-Umgebungen sowie die Feststellung, dass KMU aufgrund mangelnder Ressourcen bei IT-Sicherheitsvorfällen meist überfordert sind (Harner 2017). Von der CERT@VDE-Plattform können auch Unternehmen der Wasserwirtschaft profitieren, speziell auf diesen Sektor zugeschnittene Leistungen gibt es jedoch nicht.

5.3.8 Kompetenzzentrum Digitale Wasserwirtschaft

Das Kompetenzzentrum Digitale Wasserwirtschaft (KDW) wurde 2020 als gemeinnützige GmbH durch das Land Nordrhein-Westfalen und mehreren Unternehmen der Wasserwirtschaft gegründet. Ziel ist die Weiterentwicklung von Kompetenzen im Bereich der Digitalisierung der Wasserwirtschaft insbesondere im Bundesland Nordrhein-Westfalen. Zum meist kostenlosen Angebot gehören Informationsangebote, Handreichungen, eine Onlineplattform für Vernetzung und Erfahrungsaustausch sowie regelmäßige Veranstaltungen und Workshops zu Themen der Digitalisierung.¹²⁵ Dem Thema Informationssicherheit wird große Bedeutung zugemessen. Regelmäßige Informationsveranstaltungen und Workshops dazu richten sich an alle Betreiber der Wasserwirtschaft. Zurzeit finden Überlegungen statt, in Anlehnung an das CERT@VDE eine auf die Wasserwirtschaft zugeschnittene Plattform für Informationssicherheit zu etablieren. Die Plattform soll u. a., speziell für den Sektor Wasser aufbereitete Warnhinweise und Lösungshinweise (z. B. im Kontext von Schwachstellen und Sicherheitslücken in Prozess-IT-Komponenten der Wasserwirtschaft) sowie Hilfestellungen bei IT-Sicherheitsvorfällen bereitzustellen.

5.3.9 Zwischenfazit

Deutlich wird, dass es für Betreiber der Wasserwirtschaft aller Größenklassen bereits ein breites Spektrum an Unterstützungsangeboten etwa in Form von Informationsmaterialien, Austauschplattformen oder praktischen Hilfestellungen speziell auch im Bereich der Prozess-IT vonseiten staatlicher oder privatwirtschaftlicher Organisationen gibt und dass die Angebotspalette auch kontinuierlich ausgebaut wird. Die Inanspruchnahme der Unterstützungsangebote bzw.

¹²⁵ www.kompetenzzentrum-digitale-wasserwirtschaft.de (6.10.2022)

die Teilnahme an Plattformen und Netzwerken erfolgen aber immer auf freiwilliger Basis. Folglich profitieren davon vor allem solche Betreiber, die über ein entsprechendes Problembewusstsein verfügen und sich proaktiv (und bei KRITIS-Betreibern auch von Gesetzes wegen) um die Verbesserung der Informationssicherheit kümmern. Mittlere und vor allem kleine Betreiber, die dem Thema Informationssicherheit auf Führungs- oder Fachkräfteebene keine oder eine nur geringe Bedeutung zumessen, werden durch freiwillige Unterstützungsangebote hingegen selten erreicht (was sich nicht zuletzt in den niedrigen Beteiligungsquoten von Betreibern der Wasserwirtschaft am UP KRITIS oder der Allianz für Cybersicherheit widerspiegelt). Festzustellen ist außerdem, dass die Angebotspalette in ihrer Vielfalt an Inhalten, Formaten und Anbietern immer unübersichtlicher wird, sodass es Betreibern zunehmend schwerfallen könnte, das für sie passende Angebot zu identifizieren. Es gilt also nach Wegen zu suchen, wie auch kleine und mittlere Betreiber stärker in bestehende Plattformen einbezogen und von den Unterstützungsleistungen profitieren können. Vorschläge dazu werden in Kapitel 5.5 gemacht.

5.4 Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft

Der Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft wurde erstmalig in der 2015 erschienenen KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser im Auftrag des BSI (2015b) systematisch erhoben und dargestellt. Durch die im selben Jahr eingeführten Nachweis- und Meldepflichten gemäß § 8a, b BSIG für KRITIS-Betreiber verfügt seitdem das BSI über einen guten Überblick zum Sicherheitsniveau bei großen Betreibern. Erkenntnisse dazu wurden durch das BSI in den jährlich erscheinenden Berichten zur Lage der IT-Sicherheit in Deutschland veröffentlicht.

Im Gegensatz dazu ist der Wissensstand zum Sicherheitsniveau in kleinen und mittleren Unternehmen, die nicht unter die Regelungen des BSIG fallen, äußerst limitiert. Eine systematische Erhebung fand (soweit aus öffentlich zugänglichen Quellen ersichtlich) seit der KRITIS-Sektorstudie von 2015 nicht mehr statt. Um den aktuellen Stand der Informationssicherheit auch für Nicht-KRITIS-Betreiber abzubilden, wurden im Rahmen des vorliegenden Projekts eine Reihe von qualitativen Interviews mit Betreibern und Vertretern von Fachverbänden und Behörden geführt sowie eine auf quantitative Ergebnisse ausgerichtete Onlineumfrage unter Betreibern durchgeführt (Treibert et al. 2021). Im Januar 2023 wurden außerdem Ergebnisse aus einer Bestandsaufnahme des IT-Sicherheitsniveaus von kleinen und mittleren Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen veröffentlicht (Löwen et al. 2023).

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Untersuchungen zusammenfassend dargestellt und erörtert. Um die in den letzten Jahren ggf. erzielten



Fortschritte bei der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft zu bewerten, werden als Vergleichsgrundlage zunächst die Ergebnisse der KRITIS-Sektorstudie von 2015 rekapituliert. Da die KRITIS-Sektorstudie den Stand der Informationssicherheit erfasste, wie er kurz vor dem Inkrafttreten des IT-Sicherheitsgesetzes von 2015 vorzufinden war, ist ein Vergleich auch vor dem Hintergrund einer Wirkungsabschätzung der Gesetzgebung zur Informationssicherheit von Interesse.

5.4.1 KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser von 2015

Die KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser wurde 2014 durch das BSI in Auftrag gegeben und von der Wirtschaftsprüfungs- und Beratungsgesellschaft KPMG durchgeführt. Neben einer Beschreibung der Sektoren sollten der aktuelle Stand der Informationssicherheit sowie diesbezügliche Probleme und Trends herausgearbeitet werden. Als Informationsgrundlagen dienten Experteninterviews, öffentlich verfügbare Informationen sowie die Ergebnisse einer Befragung wichtiger Betreiber, Verbände und weiterer Branchenakteure. Für die Ergebnisauswertung wurden die befragten Betreiber verschiedenen Größenklassen zugeordnet: große Betreiber mit über 500.000 versorgten Einwohner/innen, mittlere Betreiber mit 100.000 bis 499.999 versorgten Einwohner/innen sowie kleine Betreiber mit 50.000 bis 99.999 versorgten Einwohner/innen (BSI 2015b, S. 90).¹²⁶

Der Stand der Informationssicherheit wurde entlang der folgenden sechs Themenfeldern erhoben und dargestellt (BSI 2015b, S. 104 ff.).

Sicherheitsorganisation und -management

Organisatorische Prozesse der Informationssicherheit wurden vielfach bereits initiiert, allerdings zum Teil lückenhaft (BSI 2015b, S. 105 f.). Vor allem größere Betreiber orientierten sich an internationalen Standards (z. B. ISO/IEC 2700x) und hatten ein ISMS aufgebaut (Kap. 5.2.4.1), wobei jedoch wichtige Elemente eines ISMS teilweise noch fehlten. Prozesse und Verantwortlichkeiten für den Umgang mit Störungen der Prozess-IT waren bei den meisten Betreibern unabhängig ihrer Größe gut geregelt. Es herrschte jedoch Unklarheit darüber, welche externen Stellen bei IT-Sicherheitsvorfällen informiert werden müssen. Eigenständiges Personal für die Informationssicherheit hatten nur die größten Betreiber angestellt, bei den restlichen verteilten sich die Zuständigkeiten auf Mitarbeiter/innen im Fachbereich der Leittechnik bzw. Anlagensteuerung, bei denen Erfahrungen und Kompetenzen auf dem Gebiet der Informationssicherheit allerdings nicht zum klassischen Rollenprofil gehörten. Die

¹²⁶ Pro Größenklasse wurden mindestens zwei Betreiber befragt. Außerdem wurden Vertreter eines Branchenverbands und eines -vereins befragt (BSI 2015b, S. 90).



Bereitstellung ausreichender finanzieller, personeller und zeitlicher Ressourcen für die Informationssicherheit stellte Betreiber aller Größen vor Herausforderungen (BSI 2015b, S. 105 f.).

IT-Sicherheit

In Bezug auf die technischen Vorkehrungen zum Schutz der Informationssicherheit hatten alle befragten Betreiber ihre Prozess- und Büro-IT-Umgebungen getrennt, bei mittleren und kleinen Betreibern erfolgte aber meist keine physische, sondern nur eine logische Trennung (vermutlich aus Kostengründen). Bei neu angeschafften IT-Komponenten wurden sichere Konfiguration vorgenommen (Kap. 5.1.2.2). Sicherheitsupdates zur Behebung von Fehlern oder Schwachstellen in der Software wurden durch die Betreiber unabhängig ihrer Größe jedoch nur sehr selten eingespielt (Kap. 5.1.2.3). Datenverbindungen zwischen der Prozessbedienungs- und Feldebene wurden meist durch VPN-Techniken abgesichert. Auf der Feldebene wurden aber häufig Übertragungsprotokolle ohne Verschlüsselung eingesetzt (Kap. 5.1.2.4) (BSI 2015b, S. 106 f.).

Überwachung und Monitoring

Detektive Maßnahmen wurden nicht konsequent eingesetzt, sodass Störungen, Manipulationen oder unautorisierte Zugriffe möglicherweise unbemerkt blieben. So wurde der Netzwerkverkehr in der Regel nicht aktiv überwacht (Kap. 5.1.2.5). Eingriffe der Administratoren in die Prozess-IT wurden zwar meist protokolliert, die Auswertung der Protokolle erfolgte aber nicht automatisch oder regelmäßig, sondern nur anlassbezogen. Bei den Betreibern waren interne Ansprechpartner/innen und Prozesse häufig vorhanden, um bei IT-Sicherheitsvorfällen schnell reagieren zu können. Kontakte zu externen Fachexpert/innen (wie z. B. CERTs) bestanden in den meisten Fällen aber nicht (BSI 2015b, S. 108).

Externe Abhängigkeiten

Die Befragung förderte markante Abhängigkeiten der Betreiber von externen Dienstleistern zutage. So vertrauten die Betreiber stark darauf, dass Hersteller und Ausrüster sichere Hard- und Softwarekomponenten lieferten und für eine sichere Konfiguration der Systeme sorgten. Die Betreiber besaßen nicht genug Ressourcen, um eigene Sicherheitsanalysen durchzuführen. Vor allem kleine und mittlere Betreiber waren nicht in der Lage, IT-Kompetenzen in der eigenen Organisation zu halten. Die nötige Expertise wurde im Bedarfsfall über externe



Dienstleister beschafft. Die Informationssicherheit erwies sich somit zu großen Teilen von externen Akteuren abhängig (BSI 2015b, S. 108 f.).

Notfallmanagement

Die befragten Betreiber maßen dem Notfallmanagement einen hohen Stellenwert bei. Es existierten entsprechende Leit- und Richtlinien, die Rollen und Verantwortlichkeiten im Betrieb waren festgelegt und die erforderlichen Prozesse waren implementiert. Ebenso wurden Ausfallszenarien erstellt und die implementierten Prozesse durch Übungen getestet. Die notwendigen Analysen zur Ausfallsicherheit und Notfallbewältigung der betriebskritischen IT-Systeme fanden jedoch nur selten statt (BSI 2015b, S. 109).

Sicherheitsbewusstsein

Das Sicherheitsbewusstsein war über die verschiedenen Unternehmensebenen und -bereiche hinweg unterschiedlich. In der Leitungsebene war das Verständnis für Gefährdungen, die durch den Einsatz der IT entstehen, unzureichend ausgeprägt. Ohne diese Sensibilität viel es der Führung schwer, Aspekte der Informationssicherheit in die Risikobetrachtungen einfließen zu lassen. Auf fachlicher Ebene waren Mitarbeiter/innen der Prozess-IT sehr stark hinsichtlich der Informationssicherheit sensibilisiert, nicht jedoch bei Mitarbeiter/innen der Büro-IT. Die Sensibilisierung für das Thema Informationssicherheit wurde bei den befragten Betreibern nicht unbedingt durch die Unternehmensführungen getrieben. Mitarbeiter/innen mit einem hohen Sicherheitsbewusstsein hatten dies meist selbstständig durch den Aufbau von fachlichem Wissen erworben (BSI 2015b, S. 110).

5.4.2 Erkenntnisse für KRITIS-Betreiber aus dem Nachweisverfahren nach § 8a BSIG

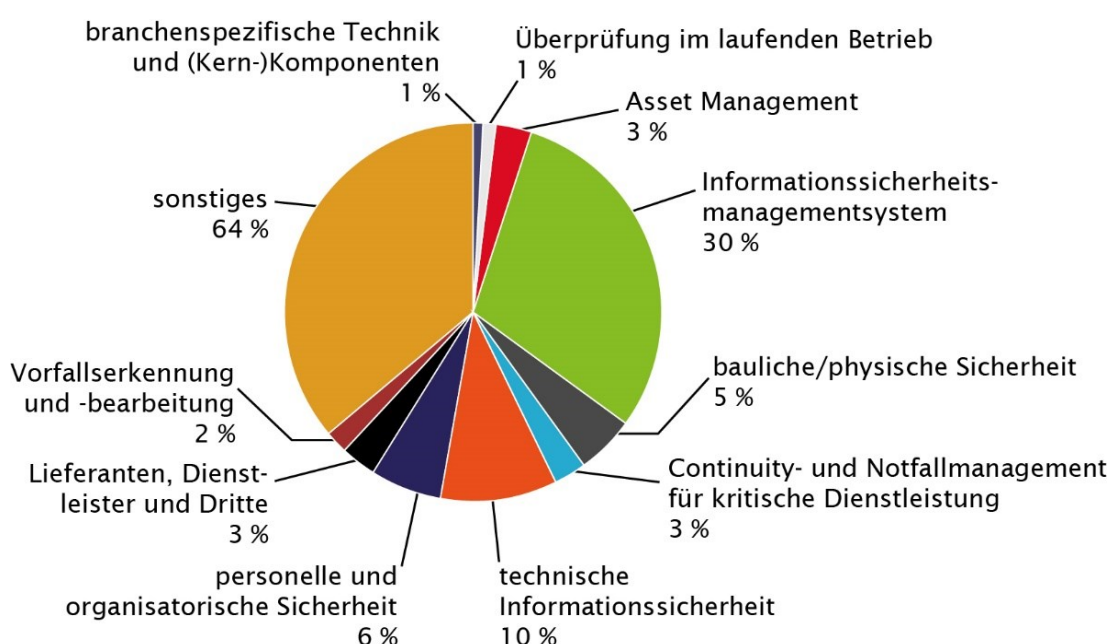
Im Rahmen des alle 2 Jahre stattfindenden Nachweisverfahrens nach § 8a Abs. 3 BSIG müssen KRITIS-Betreiber neben den umgesetzten Maßnahmen auch die im Rahmen der Nachweisprüfung aufgedeckten Sicherheitsmängel dokumentieren. Das BSI (2021a, S. 57 ff.) hat die aus dem jüngsten Nachweiszyklus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Dazu wurden die identifizierten Sicherheitsmängel verschiedenen Kategorien zugeordnet und anteilig dargestellt (Abb. 5.3).¹²⁷

Die meisten der im Rahmen der Nachweisprüfung aufgedeckten Sicherheitsmängel bei KRITIS-Betreibern des Wassersektors betrafen

¹²⁷ Die Zahl der insgesamt im KRITIS-Sektor Wasser aufgedeckten Sicherheitsmängel wurde nicht genannt.

organisatorische Schwächen im Zusammenhang mit dem Aufbau und Betrieb von ISMS (Kap. 5.2.4.1). Gründe hierfür können etwa lückenhafte strategische Vorgaben zur Informationssicherheit, fehlende Richtlinien oder unzureichend definierte Zuständigkeiten sein (BSI 2020c, S. 6 f.). Der Wassersektor schnitt hier deutlich schlechter ab als die KRITIS-Sektoren Energie (23 % der Mängel im Bereich ISMS), Informationssicherheit und Telekommunikation (6 %) und Finanz- und Versicherungswesen (11 %) (BSI 2021a, S. 58).

Abb. 5.3 Mängel gemäß Nachweisverfahren nach BSIG im Wassersektor



Quelle: nach BSI 2021a, S. 58

10% der Sicherheitsmängel betrafen die technische Informationssicherheit. Mängel dieser Kategorie können z. B. ungenügend gesicherte Netzübergänge, ein unzureichender Schutz vor Schadprogrammen, Mängel im Umgang mit Schwachstellen oder der Einsatz unsicherer Authentifizierungs- und Übertragungsverfahren sein (BSI 2020c, S. 15 ff.). Da diese Kategorie viele Mängel subsummiert, stellt der erreichte Wert von 10 % ein gutes Ergebnis dar. Im Sektorenvergleich war der Wassersektor technisch ähnlich gut aufgestellt wie der Energiesektor (8% der Mängel im Bereich technische Informationssicherheit), aber besser als die KRITIS-Sektoren Informationssicherheit und Telekommunikation (20%) sowie Finanz- und Versicherungswesen (22%) (BSI 2021a, S. 58).

Weitere 6% der aufgedeckten Mängel betrafen die personelle und organisatorische Sicherheit. Gründe hierfür können etwa unklare Zugangs- und Zugriffsberechtigungen oder unzureichende Maßnahmen zur Schulung und



Sensibilisierung der Mitarbeiter/innen sein (BSI 2020c, S. 25 ff.). In 5 % der Fälle waren Schwächen bei der physischen Zugriffs- und Zutrittskontrolle oder ein mangelhafter Schutz vor Feuer, Stromausfällen und weitere externe Bedrohungen der Grund für Beanstandungen. Auch in diesen Bereichen erzielte der Wassersektor vergleichbare Ergebnisse wie der Energiesektor und bessere Ergebnisse als die KRITIS-Sektoren Informationssicherheit und Telekommunikation sowie Finanz- und Versicherungswesen.

Die Anteile der Sicherheitsmängel anderer Kategorien waren niedrig (jeweils 3 % und darunter). Hervorzuheben sind die geringen Mängelquoten in den Bereichen Überprüfung im laufenden Betrieb (1 %), Vorfallerkennung und -bearbeitung (2 %) sowie Continuity- und Notfallmanagement für kritische Dienstleistungen (3 %). Demnach haben die allermeisten Betreiber Prozesse beispielsweise zur Erkennung von Schwachstellen, Störungen und Fehlern, zur Bearbeitung und Meldung von IT-Sicherheitsvorfällen oder zur Wiederherstellung betriebskritischer IT-Systeme etabliert (BSI 2020c, S. 13 ff.). Auch bezüglich dieser Kategorien schnitt der Wassersektor ähnlich gut wie der Energiesektor und insgesamt besser ab als KRITIS-Sektoren Informationssicherheit und Telekommunikation sowie Finanz- und Versicherungswesen (BSI 2021a, S. 58).

In der Gesamtbetrachtung wiesen KRITIS-Betreiber der Wasserwirtschaft vor allem noch organisatorische Optimierungspotenziale im Bereich ISMS auf, also beispielsweise hinsichtlich der Planung und Durchführung der Managementsysteme, der strategischen Vorgaben zur Informationssicherheit oder der Festlegung der Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten im Betrieb. In Bezug auf technische Aspekte der Informationssicherheit, die Erkennung von möglichen Schwachstellen und Störungen sowie die Behandlung von IT-Sicherheitsvorfällen konnte hingegen ein gutes Schutzniveau festgestellt werden.

5.4.3 Qualitative Interviews mit Betreibern und Expert/innen durch Treibert et al. 2021

Im Rahmen des Gutachtens von Treibert et al. (2021) wurden leitfadengestützte Interviews mit Betreibern sowie Expert/innen aus dem Wassersektor durchgeführt (Kasten 5.10). Ein wesentliches Ziel war es, die Ergebnisse der KRITIS-Sektorstudie Ernährung und Wasser (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1) zu reflektieren sowie die seitdem erzielten Fortschritte zu diskutieren. Gegenüber der damaligen Situation veränderten sich durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 vor allem gesetzlichen Rahmenbedingungen für große Betreiber deutlich.

Kasten 5.10 Auswahl Interviewpartner

Es wurden insgesamt zehn Interviews mit wichtigen Akteuren der Wasserwirtschaft in Deutschland durchgeführt (Treibert et al. 2021, S. 11 f.). Drei Gespräche fanden mit Betreibern der Trinkwasserversorgung statt. Als Interviewpartner wurden Vertreter von Unternehmen unterschiedlicher Größe und Unternehmensorganisation ausgewählt:

- Großes Stadtwerk (ca. 2.500 Beschäftigten) mit einer Sparte Trinkwasserversorgung (ca. 105 Beschäftigte) mit Prozessen in den Bereichen Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung sowie Leitzentrale. Das Stadtwerk versorgte zum Zeitpunkt der Befragung ca. 600.000 Einwohner/innen mit Trinkwasser und war KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG. Als Interviewpartner stellten sich der Leiter Informationssicherheit und IT-Qualitätsmanagement sowie der Anlagenmeister zur Verfügung.
- Mittlerer Wasserversorger (ca. 37 Mitarbeiter/innen) mit Prozessen in den Bereichen Wassergewinnung und -aufbereitung. Das Unternehmen produzierte Trinkwasser für rund 105.000 Einwohner/innen und war kein KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG. Das Interview wurde mit dem Geschäftsführer sowie dem Informationssicherheitsbeauftragten des Unternehmens geführt.
- Mittleres Stadtwerk (ca. 200 Beschäftigte) mit einer Sparte Trinkwasserversorgung (ca. 25 Beschäftigte) mit Prozessen in den Bereichen Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung sowie Leitzentrale. Das Unternehmen belieferte ca. 120.000 Einwohner/innen mit Trinkwasser und war kein KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG. Das Gespräch wurde mit dem Abteilungsleiter Trinkwassergewinnung und -aufbereitung geführt.

Zwei Interviews wurden mit Vertretern der Vereinigungen von DVGW und DWA geführt. Die Fachverbände haben den B3S WA konzipiert, bieten vielfältige Unterstützungsangebote zum Thema Informationssicherheit und engagieren sich in themenrelevanten Branchen- und Arbeitskreisen (z. B. im UP KRITIS). Die im Rahmen dieser Aktivitäten gewonnen Erkenntnisse waren das Hauptziel der Befragungen. Außerdem wurde je ein Vertreter des BSI und des BBK interviewt, um Einschätzungen zum Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft aus Behördensicht zu erhalten. Schließlich wurde ein Auditor einer Zertifizierungsstelle befragt, der im Auftrag von KRITIS-Betreibern die Prüfungen zum Nachweis der Umsetzung der gesetzlich geforderten Schutzvorkehrungen durchführt.

Die Ausführungen in diesem Kapitel basieren auf einer Auswertung der transkribierten Interviewergebnisse.



Inhaltlich deckten die Interviews dieselben sechs Themenfelder wie die KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1) ab, um Anschluss- und Vergleichsfähigkeit herzustellen. Als weiteres Themenfeld wurden die seit 2015 neu hinzugekommen rechtlichen Rahmenbedingungen für KRITIS-Betreiber einschließlich der Anwendung des B3S WA diskutiert. Die Aussagen stellen den Sachstand zum Zeitpunkt der Interviews im Sommer 2020 dar. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sich insbesondere mit Blick auf die Betreiber um eine sehr kleine Anzahl von Interviews handelt. Die abgeleiteten Aussagen lassen sich nicht ohne Weiteres auf den ganzen Wassersektor generalisieren. Nichtsdestotrotz ermöglichen die Interviewaussagen relevante Einsichten.

Sicherheitsorganisation und -management

Durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 konnte eine flächendeckende Einführung von ISMS bei KRITIS-Betreibern erreicht werden, was zuvor noch nicht der Fall war. Laut dem Vertreter des BSI, das infolge der gesetzlichen Nachweispflichten einen guten Überblick zum Stand der Informationssicherheit bei KRITIS-Betreibern hat, sei dadurch gerade in der Wasserwirtschaft eine deutliche Verbesserung des Sicherheitsniveaus durch organisatorische, personelle und technische Maßnahmen ermöglicht worden. Als Folge des IT-Sicherheitsgesetzes könne laut BSI-Vertreter aber auch bei nicht regulierten Unternehmen grundsätzlich ein Trend zu mehr Prävention festgestellt werden. Die Bemühungen um den B3S WA, der für den gesamten Sektor ein gutes Maß an Informationssicherheit festgelegt habe, würden Früchte tragen. Der befragte Auditor stellte gleichwohl noch Verbesserungsbedarfe fest (z. B. in Bezug auf das Wissensmanagement), insbesondere auch im direkten Vergleich zum Energiesektor.

Von den drei befragten Unternehmen hatte das große Stadtwerk als KRITIS-Betreiber zusätzlich zu einem ISMS nach ISO/IEC 27001 (Kap. 5.2.4.1) auch den B3S WA (Kap. 5.2.4.5) zur Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 8a BSIG umgesetzt. Von den beiden befragten nicht regulierten Unternehmen hatte aber nur eines auf freiwilliger Basis ein ISMS nach ISO/IEC 27001 eingeführt.

IT-Sicherheit

Übereinstimmend zu den Ergebnissen der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) hatten alle Betreiber ihre Prozess- und Büro-IT-Umgebungen logisch und sogar physisch voneinander getrennt. Laut Betreiberaussagen steigere die Digitalisierung den Druck, sich von den abgeschotteten Netzen zu verabschieden, jedoch enorm. Durch die wachsende Zahl an Schnittstellen (z. B. um Sicherheitsupdates aus dem Internet zu beziehen oder um Daten aus dem Prozessleitsystem zu entnehmen) sei das Zusammenwachsen der Netze kaum noch aufzuhalten.



Auch vonseiten des BSI wurden Trends wie dauerhaft aktive Fernzugriffsmöglichkeiten für Komponentenhersteller (Kap. 5.1.2.5) oder die zunehmende Verlagerung von Dienstleistungen in die Cloud als große Herausforderungen für die Informationssicherheit benannt.

Für die Betreiber stellten die Komplexität und Heterogenität der Systeme Herausforderungen für die Umsetzung von technischen Maßnahmen der Informationssicherheit dar. Oft stehe sehr alte und hochmoderne Technik gleichzeitig im Einsatz. Alte und neue Technik auf ein einheitliches Sicherheitsniveau nach dem Stand der Technik zu bringen, sei jedoch sehr schwierig und aufwendig. Weil die Hersteller der alten Systeme teilweise gar nicht mehr existierten, sei häufig keine Unterstützung mehr möglich. Daher müssten vielfach komplette Anlagen ersetzt werden, was mit hohen Kosten verbunden sei.

Die Vertreter der beiden mittleren Unternehmen brachten ihre Sorgen zum Ausdruck, mit der raschen technischen Entwicklung nicht mehr Schritt halten zu können. So bereiteten digitale Funktionserweiterungen zuweilen auch Probleme, etwa wenn neue Komponenten sich in die Cloud einwählen würden, obwohl sie nicht zu diesem Zweck angeschafft worden seien. Auch würden ständig neue und leistungsfähigere Systeme hinzukommen, es fehle aber das Personal, das diese Systeme auch bedienen könne. Es sei schwierig, die Sicherheit noch im Blick zu behalten. Auch ein Verbandsvertreter verwies darauf, dass durch Vernetzung und Automatisierung die Arbeitsweise der Systeme von den Nutzenden nicht mehr ohne Weiteres nachvollzogen werden könnten.

Überwachung und Monitoring

Maßnahmen zur aktiven Überwachung des Netzwerkverkehrs oder zur Protokollierung und Auswertung von Systemzugriffen waren nur durch den KRITIS-Betreiber implementiert worden. Von einem der befragten mittleren Betreiber wurden solche Maßnahmen als nicht notwendig erachtet, da die Zugänge zum Netzwerk (z. B. in dezentralen Anlagen wie Brunnen) durch den Perimeter-schutz vor fremden Zugriffen geschützt seien, außerdem wurde auf einen hohen Umsetzungsaufwand verwiesen. Unautorisierte Zugriffe durch eigenes oder beauftragtes Personal (z. B. externe Wartungskräfte) oder unter Ausnutzung von Fernzugriffsmöglichkeiten bleiben so aber unentdeckt (Kap. 5.1.2.5).

Externe Abhängigkeiten

Die in der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) im Bereich der Informationssicherheit beobachtete hohe Abhängigkeit der Betreiber von externen Organisationen (z. B. Komponentenhersteller, Lieferanten, Dienstleister) hat gemäß den durchgeführten Interviews weiter Bestand. Als Ursachen nannten die befragten Betreiber vor allem die begrenzten personellen und fachlichen Ressourcen im



eigenen Betrieb. Der Aufbau interner Kompetenzen werde nicht nur durch finanzielle Restriktionen, sondern auch durch die schwierige Suche nach qualifizierten Fachkräften erschwert. Neue Mitarbeiter/innen müssten neben fachlichen Kenntnissen gleichzeitig auch Kompetenzen in den Bereichen Informationssicherheit und Automatisierungstechnik mitbringen, was in dieser Kombination jedoch sehr selten sei. Fehlende Kompetenzen würden daher durch Fortbildungen vervollständigt, was jedoch Zeit in Anspruch nehme. Betreiber mit knappen Personalressourcen könnten die wenigen Beschäftigten nicht auch noch auf Seminare schicken. In diesem Zusammenhang wurde die Bedeutung von Neueinstellungen betont, um die Mitarbeiter/innen nicht zu überlasten. Informationssicherheit on top bzw. nebenher einzuführen, das funktioniere nicht.

Von einem Betreiber positiv hervorgehoben wurde der Lernprozess, der bei den Herstellern von Prozess-IT-Komponenten zu beobachten sei: Während vor einigen Jahren Sicherheitsfunktionalitäten meist noch explizit eingefordert und teuer bezahlt werden mussten, sei ein hohes Schutzniveau mittlerweile eher die Regel.

Notfallmanagement

Von den befragten Unternehmen hatte nur der KRITIS-Betreiber die Rollen, Prozesse, Reaktionspläne und Übungen des Notfallmanagements im Betrieb fest verankert. Bei den beiden nicht regulierten Unternehmen wies das Notfallmanagement hingegen Lücken auf, beispielsweise fehlten Reaktionspläne oder notwendige Übungen wurden nicht durchgeführt.

Sicherheitsbewusstsein

Vonseiten der Branchen- und Behördenvertreter wurde betätigt, dass das Problembewusstsein durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 bei KRITIS-Betreibern, aber auch bei nicht regulierten Unternehmen deutlich zugenommen habe. Laut Aussage des Auditors stelle sich die Situation in der Wasserwirtschaft im Vergleich zum Energiesektor allerdings schlechter dar. Dies zeige sich etwa dadurch, dass in Verbundunternehmen die Prioritäten bei der Informationssicherheit meist auf den Sparten Gas und Strom gelegt würden, während Sparte Wasser in der Regel nebenherlaufe.

Alle befragten Unternehmensvertreter maßen der Informationssicherheit einen hohen Stellenwert bei. Das in der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) festgestellte unterschiedliche Sicherheitsbewusstsein entlang der Unternehmensebenen scheint allerdings noch vorhanden zu sein. So verwiesen die interviewten Unternehmensvertreter aus der Fachebene auf Schwierigkeiten, erforderliche Investitionen gegenüber den Unternehmensleitungen zu begründen, da der betriebswirtschaftliche Nutzen von Maßnahmen der Informationssicherheit

nicht gut bezifferbar sei. Es fehle teilweise an Verständnis dafür, dass die Gewährleistung von Informationssicherheit keine einmalige, sondern eine Daueraufgabe sei, die langfristige Investitionen in Personal und Technik erforderlich mache. Ein Verbandsvertreter verwies in diesem Zusammenhang darauf, dass Cyberangriffe, die zur Gefährdung der Wasserversorgung geführt haben, in Deutschland bislang nicht vorgekommen seien, weswegen in der Wasserwirtschaft der Eindruck bestehe, selbst nicht so stark betroffen zu sein (trotz des Wissens um die allgemeine Gefährdungslage).

Die fachliche Ebene betreffend schätzte ein Unternehmensvertreter das Sicherheitsbewusstsein bei langjährig angestellten Beschäftigten als weniger stark ausgeprägt ein. Eine klassische Aussage laute hier: »Seit 30 Jahren ist doch nichts passiert«. Jüngere Mitarbeiter/innen wurden, trotz einer gewissen digitalen Sorglosigkeit, als grundsätzlich sensibler beschrieben. Die Bedeutung von regelmäßigen Schulungen wurde hervorgehoben, da zur Verfügung gestellte Dokumente (z. B. Leitlinien, Sicherheitskonzepte) von den Mitarbeiter/innen nur selten gelesen würden.

Einhellig stimmten die befragten Betreiber der Aussage zu, dass die Informationssicherheit als Bestandteil der Versorgungssicherheit zunehmend wichtiger wird, weil die Abhängigkeit von IT-Systemen immer größer wird. Die Folgen eines Ausfalls von IT-Systemen wurden je nach Betriebsgröße allerdings unterschiedlich bewertet: Während die Vertreter des großen KRITIS-Betreibers die Verfügbarkeit von Trinkwasser nach einem Ausfall der Prozess-IT bereits nach 8 Stunden als gefährdet einschätzten, sahen sich die beiden mittleren Betreiber eher in der Lage, die Versorgung durch einen manuellen Betrieb auch für einen längeren Zeitraum (2 Wochen) aufrechterhalten zu können. Dafür müssten alle Wasserwerke rund um die Uhr mit Personal besetzt werden, was bei längeren Ausfallzeiten aufgrund knapper Personalressourcen allerdings schwierig sei. Ein IT-Ausfall von mehr als 8 Stunden wurde als Krise bezeichnet, die starke Anpassungen in den organisatorischen Abläufen erfordere und für die Mitarbeiter/innen eine enorme Belastung darstelle. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Möglichkeit für einen manuellen Handbetrieb nicht in jedem Betrieb gegeben sein muss. Ein Grund seien fehlende Erfahrungen beim Fachpersonal, da die Handebene aufgrund der zunehmenden Automatisierung nicht mehr praktiziert werde. Personal, das noch Schalten kann, sei oft rationalisiert worden. Auch technische Ursachen wurden genannt, etwa wenn die Handebene bereits digitalisiert wurde (z. B. Bedienung über Touchpanels) und damit ebenfalls vom Systemausfall betroffen sei.

Gesetzliche Rahmenbedingung und Umsetzung des B3S WA

Die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen an die Informationssicherheit wurde von einem Verbandsvertreter als grundsätzlich sehr zeit- und



kostenintensiv bezeichnet. Daran änderte auch der B3S WA wenig, dessen Umsetzung durch die befragten Betreiber und den Auditor als kompliziert und ohne externe Unterstützung durch spezialisierte Berater als kaum durchführbar beschrieben wurde. Für kleinere Unternehmen sei der B3S WA überdimensioniert und würde daher viele abschrecken. Auch fehle es teilweise an Unterstützung für die Umsetzung des B3S WA seitens der Fachverbände. Außerdem wurden die Kosten für den B3S WA hinterfragt, die insbesondere kleinere Betreiber davon abhalten könnten, sich damit zu beschäftigen.¹²⁸

Die Vertreter der Fachverbände hatten eine andere Sicht auf den B3S WA. Indem mithilfe der Webapplikation Gefährdungen und Anforderungen selektiert werden können, die auf den jeweiligen Betreiber zutreffen, werde das Verfahren vereinfacht. Das Problem liege eher im unzureichenden Fachwissen im Bereich der Informationssicherheit vor allem bei kleinen und mittleren Betreibern. Auf die von einem Betreiber monierte mangelnde Unterstützung angesprochen verwiesen die Verbandsvertreter auf ihr breites Informations- und Beratungsangebot. Die unterschiedlichen Auffassungen könnten Ausdruck dessen sein, dass es Betreibern angesichts der Fülle an Unterstützungsangeboten nicht immer leichtfällt, die für sie passenden Angebote auszuwählen (Kap. 5.3.9). Zu den Kosten wurde angeführt, dass die Erarbeitung und Umsetzung (insbesondere der Webapplikation) gegenfinanziert werden müsse, außerdem stelle das BSI seit Oktober 2019 die Eignungsfeststellung branchenspezifischer Sicherheitsstandards in Rechnung,¹²⁹ was die Entwicklung und Durchsetzung des B3S WA weiter erschwere.

Vonseiten eines Vertreters eines Stadtwerks wurden die unterschiedlichen gesetzlichen Anforderungen an die Informationssicherheit in unterschiedlichen Unternehmenssparten kritisiert, wodurch drei unabhängige Nachweisverfahren mit entsprechendem Arbeits- und Kostenaufwand durchgeführt werden müssten.¹³⁰ Die Verbands- und Behördenvertreter verwiesen in diesem Zusammenhang auf die unterschiedlichen Zuständigkeiten: Für den Sektor Wasser ist das BSI zuständig, für den Energiebereich die Bundesnetzagentur, was zu

128 Die Kosten für eine Einzelplatzversion der Webapplikation zum B3S WA belaufen sich auf 387,50 Euro, die jährliche Wartungs- und Updategebühr beträgt 123,44 Euro. Das dazugehörige Merkblatt 1060 W wird für 54,21 Euro bereitgestellt (alle Preise zzgl. 7% USt). Mitglieder der Fachverbände erhalten einen Preisnachlass von rund 20% (DVGW/DWA 2022).

129 Die anfallenden Kosten bemessen sich am Zeitaufwand für die Prüfung durch das BSI, siehe Abschnitt 7, Nr. 6 Besondere Gebührenverordnung BMI vom 2.9.2019, zuletzt am 10.9.2021 geändert.

130 Für die Sparte Wasser gelten die Anforderungen nach § 8a BSIG, für den Strom- und Gasnetzbetrieb diejenigen nach § 11 Abs. 1a EnWG und für die Stromerzeugung die Anforderungen von § 11 Abs. 1b EnWG.

unterschiedlichen Sicherheitsanforderungen geführt habe.¹³¹ Außerdem gab es die Bestimmungen des EnWG schon vor dem IT-Sicherheitsgesetz von 2015, weshalb sie als Bestandsregularien weitergeführt werden mussten.

Die Festlegung der Höhe der Schwellenwerte für die Bestimmung der kritischen Anlagen im Wassersektor wurde hinterfragt. Die aktuellen Schwellenwerte führen dazu, dass der weit überwiegende Teil der Unternehmen nicht als KRITIS-Betreiber gilt und daher nicht unter die Regulierung des BSIG fällt (Kap. 5.2.2). Laut den Verbandsvertretern konnte die kleinteilige Wasserwirtschaft im Gegensatz zu anderen Sektoren von der Entscheidung für einen sektorübergreifenden Regelschwellenwert von 500.000 zu versorgenden Personen profitieren, da es nur wenige große Wasserver- und Abwasserentsorger und insofern KRITIS-Betreiber gibt. Allerdings könnten Unternehmen die Nichteinstufung als KRITIS-Betreiber implizit oder explizit als Rechtfertigung für fehlende Investitionen in die Informationssicherheit heranziehen. Einer der befragten Betreiber meinte sinngemäß, dass nicht regulierte Unternehmen die Lage ganz entspannt beobachten könnten. Auch der Vertreter des BBK gab zu bedenken, dass sich kleinere Betriebe dadurch nicht zwingend angesprochen fühlten. Es fehle noch an Verständnis dafür, dass sich die Einstufung als KRITIS-Betreiber an den Notfallkapazitäten auf gesamtstaatlicher Ebene orientiere, jedoch alle Betreiber unabhängig ihrer Größe zu den Kritischen Infrastrukturen zählten und insofern die Versorgungssicherheit gewährleisten müssten.

Eine Herabsenkung der Schwellenwerte würde laut Betreiberaussagen die Aufmerksamkeit für die Informationssicherheit im Wassersektor erhöhen, aber auch viele kleine und mittlere Unternehmen angesichts limitierter Ressourcen vor Probleme stellen. Dies könnte zu einer stärkeren Kooperation zwischen betroffenen Unternehmen führen, um die Probleme gemeinsam zu lösen, es könne aber auch sein, dass Unternehmen sich gezwungen sähen, etwa die eigene Leitstelle aufzugeben, weil umfangreiche Sicherungsmaßnahmen nicht umgesetzt werden können. Dies allerdings würde dem Ziel der Digitalisierung zuwiderlaufen.

5.4.4 Quantitative Befragung durch Treibert et al. 2021

Für das TAB haben Treibert et al. (2021) auch eine quantitative Befragung bei wasserwirtschaftlichen Unternehmen durchgeführt. Vorrangiges Ziel dieser Befragung war es, den aktuellen Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft auch in quantitativer Hinsicht zu präzisieren.

¹³¹ Für Betreiber von Strom- und Gasnetzen (unabhängig ihrer Größe) sowie für Betreiber von Energieanlagen, die als kritische Anlagen i. S. d. BSIG bestimmt wurden, hat die Bundesnetzagentur zwei unterschiedliche IT-Sicherheitskataloge mit Sicherheitsanforderungen entwickelt, deren Umsetzung gegenüber der Bundesnetzagentur nachzuweisen ist (Bundesnetzagentur 2015, 2018).



Als Untersuchungsraum für die quantitative Befragung wurde das Bundesland Nordrhein-Westfalen gewählt. Die Größenstruktur der Wasserver- und Abwasserentsorgung in NRW zeichnet sich – genauso wie in ganz Deutschland (Kap. 4.1.4) – durch eine kleinteilige Betreiberlandschaft mit vielen kleinen und mittleren Unternehmen in eher ländlich geprägten Räumen einerseits sowie durch eine Reihe großer Unternehmen in den Ballungsgebieten andererseits aus. Dies erlaubte es, alle Größenklassen von Unternehmen in die Umfrage einzu beziehen. Das Fallbeispiel NRW ist auch deshalb interessant, weil in zahlreichen Städten (z. B. Mönchengladbach, Neuss, Düsseldorf, Köln, Bonn) Verbundunternehmen für die Versorgung der Bevölkerung mit Wasser, Strom und Gas verantwortlich sind, wobei die Wassersparten dieser Unternehmen typischerweise von den Digitalisierungstrends in den Energiesparten profitieren und daher bereits einen hohen Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad aufweisen (Treibert et al. 2021, S. 3 f.). Aufgrund der kleinen Stichprobenzahl (insgesamt wurden die Antworten von 56 Unternehmen aller Größenklassen ausgewertet) können die Ergebnisse der quantitativen Befragung allerdings nicht als repräsentativ für die ganze Wasserwirtschaft gelten. Außerdem ist zu bedenken, dass an der vorliegenden Onlineumfrage mutmaßlich vor allem Betreiber teilgenommen haben, die für das Thema bereits sensibilisiert waren, sodass die Ergebnisse unter Umständen ein zu optimistisches Bild des allgemeinen Sicherheitsniveaus in der Wasserwirtschaft zeichnen. Dies vor Augen erlauben die Umfrageergebnisse dennoch interessante Einsichten in die Praxis.

5.4.4.1 Themenfelder, Datenerhebung und -bereinigung

Die Datenerhebung für die quantitative Befragung erfolgte als schriftliche Onlinebefragung. Inhaltlich deckte der Fragebogen dieselben sechs Themenfelder ab wie die KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1), um Anschluss- und Vergleichsfähigkeit herzustellen. Zusätzlich wurde nach wichtigen Hemmnissen für die Umsetzung von Maßnahmen der Informationssicherheit gefragt. Außerdem wurden statistische Angaben zum jeweiligen Unternehmen abgefragt, z. B. die jährlich verarbeitete Wassermenge oder die Einstufung des Unternehmens als KRITIS-Betreiber. Abschließend konnten Anmerkungen in Freitextform gemacht werden. Die Beantwortung aller Fragen nahm ca. 20 Minuten in Anspruch.

Über den Fachverband DVGW, Landesgruppe Nordrhein-Westfalen, wurden 230 Wasserversorgungsunternehmen mit der Aufforderung zur Teilnahme an der Onlinebefragung direkt angeschrieben.¹³² Zusätzlich wurde die Onlinebefragung über den Newsletter des DVGW sowie über soziale Medien

¹³² Dies entspricht etwa der Hälfte der laut Statistischem Bundesamt (2018, S. 27) 473 insgesamt in NRW ansässigen Wasserversorgungsunternehmen (mit Versorgung von Einwohnern).

beworben. Im Bereich der Abwasserbeseitigung wurden durch die Gutachter zusätzlich 100 von insgesamt 305 Kläranlagenbetreibern sowie 50 von insgesamt 130 Kanalisationsnetzbetreibern angeschrieben¹³³ (Treibert et al. 2021, S. 15).

Der Rücklauf bestand aus insgesamt 80 Datensätzen. 25 Datensätze enthielten wenige bis keine Informationen und wurden entfernt. Ein weiterer Datensatz wurde gelöscht, weil es sich hierbei offenkundig um eine Dopplung handelte. Bereinigt lagen somit Rohdaten von 28 Unternehmen der Wasserversorgung und 26 Unternehmen der Abwasserbeseitigung vor. Auch diese Datensätze wiesen zum Teil unterschiedliche Bearbeitungszustände auf, da von einzelnen Unternehmen nicht alle Themenfelder bearbeitet wurden. Um dies zu berücksichtigen, werden im Folgenden die Ergebnisse als relative Werte, d. h. normiert auf die Gesamtzahl der *pro Themenfeld* jeweils eingegangenen Antworten, dargestellt.

Die Auswertung der bereinigten Rohdaten erfolgte zum einen getrennt nach Unternehmen der Trinkwasserversorgung und der Abwasserbeseitigung. Ziel war es herauszufinden, ob es zwischen den beiden Branchenzweigen relevante Unterschiede in Bezug auf die Informationssicherheit gibt. Zum anderen wurden die Rohdaten differenziert nach der Unternehmensgröße (gemessen an der jährlich verarbeiteten Wassermenge bzw. der Anzahl der angeschlossenen Einwohner/innen oder der Ausbaugrößen) ausgewertet. Hier stand die Fragen im Fokus, ob bzw. inwiefern das implementierte Schutzniveau bzw. mögliche Hemmnisse für die Umsetzung von Schutzmaßnahmen von der Unternehmensgröße abhängen. Da nicht alle Unternehmen Angaben zur jährlich verarbeiteten Wassermenge bzw. zur Anzahl der angeschlossenen Einwohner/innen oder der Ausbaugröße gemacht hatten, reduzierte sich die Grundgesamtheit für diesen Teil der Auswertung auf 14 Unternehmen der Wasserversorgung und 20 Unternehmen der Abwasserbeseitigung. Diese Unternehmen wurden gemäß der in Tabelle 5.3 angegebenen Wertebereiche, die sich auch an den Schwellenwerten aus der BSI-Kritisverordnung orientieren (Kap. 5.2.2.2), in die Größenklassen groß, mittel und klein eingeteilt.¹³⁴ Bei den 34 Unternehmen handelte es sich demzufolge um 6 große, 18 mittlere und 10 kleine Unternehmen, sodass alle Größenklassen repräsentiert sind.

¹³³ Die Auswahl erfolgte so, dass Unternehmen aller Größenklassen gleichermaßen berücksichtigt wurden (Treibert et al. 2021, S. 15).

¹³⁴ Die Zuordnung erfolgte anhand des jeweils größten angegebenen Werts der verarbeiteten Wassermenge für die Bereiche Wassergewinnung, -aufbereitung, -speicherung, -verteilung oder Leitzentrale (für die Wasserversorgung) bzw. der Anzahl der angeschlossenen Einwohner/Ausbaugröße für die Bereiche Kanalisation, Kläranlagen oder Leitzentrale (für die Abwasserbeseitigung).



Von den sechs als groß eingeordneten Unternehmen gaben alle an, auch KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG zu sein.¹³⁵ Zwar hatten auch einige der als mittel oder klein eingeordneten Unternehmen dies angegeben, da jedoch die jährlich verarbeitete Wassermenge bzw. die Anzahl der angeschlossenen Einwohner und der Ausbaugröße dieser Unternehmen die KRITIS-Schwellenwerte unterschritten, wurde hier von fehlerhaften Antworten ausgegangen. Ein Grund dafür könnte sein, dass der Wassersektor insgesamt zu den Kritischen Infrastrukturen gezählt wird (Kap. 2.3), jedoch nur Betreiber von Anlagen, die die KRITIS-Schwellenwerte erreichen oder überschreiten, auch als KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG gelten (Kap. 5.2.2.2).

Tab. 5.3 Einordnung der Unternehmen in Größenklassen

Größen- klasse	Trinkwasserversorgung jährlich verarbeitete Wassermenge	Abwasserbeseitigung Anzahl angeschlossener Einwohner/innen und der Ausbaugröße in Einwohnerwerten
groß	über 22 Mio. m ³ /Jahr	über 500.000
mittel	zwischen 1 und 22 Mio. m ³ /Jahr	zwischen 22.700 und 500.000
klein	weniger als 1 Mio. m ³ /Jahr	weniger als 22.700

Eigene Zusammenstellung

5.4.4.2 Ergebnisse der quantitativen Befragung

Im Folgenden werden die Umfrageergebnisse für jedes Themenfeld in Form von zwei Netzdiagrammen dargestellt, jeweils differenziert nach Branchen-zweig (Trinkwasserversorgung oder Abwasserbeseitigung) und nach Unterneh-mensgröße (groß, mittel, klein). Für jedes Themenfeld wurde den Unternehmen eine Reihe von Aussagen präsentiert, die sie jeweils mit »trifft zu« oder »trifft nicht zu« bewerten konnten. Die Aussagen wurden so konzipiert, dass zustim-mende Antworten in der Regel auf ein höheres Sicherheitsniveau im Unterneh-men hindeuten. Für jede Aussage gibt der jeweilige Achsenwert im Netzdia-gramm den Anteil der Unternehmen an, der diese Aussage mit »trifft zu« be-wertet hat (in Prozent, normiert auf die Gesamtzahl der pro Themenfeld einge-gangenen Antworten). Der Wertebereich reicht von 0 % (alle Unternehmen ant-worteten mit »trifft nicht zu«) im Zentrum des Netzdiagramms bis 100 % (alle

¹³⁵ Aus der insgesamt jährlich verarbeiteten Wassermenge bzw. der Gesamtzahl der ange-schlossenen Einwohner/innen und Ausbaugröße eines Unternehmens lässt sich noch nicht sein Status als KRITIS-Betreiber ableiten, da das Unternehmen auch mehrere Anlagen betreiben könnte, die einzeln den KRITIS-Schwellenwert nicht erreichen.



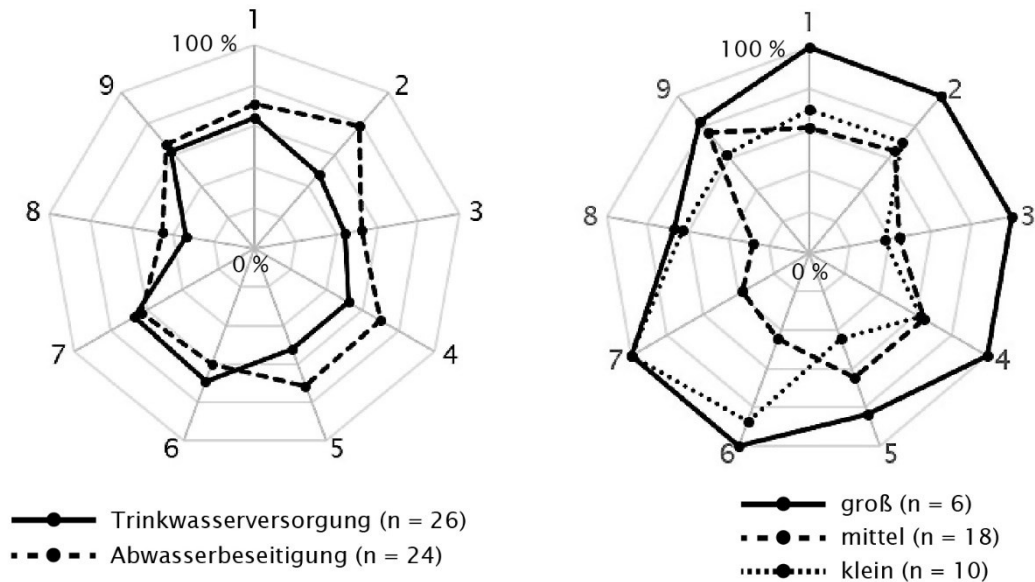
Unternehmen antworteten mit »trifft zu«) am äußeren Rand. Je größer der Abstand eines Wertes zum Zentrum ist, desto höher ist folglich das Schutzniveau bezogen auf die jeweilige Aussage einzuschätzen. In der Legende zu den Netzdiagrammen ist die Anzahl der Unternehmen angegeben, die das jeweilige Themenfeld bearbeitet haben. Im Anschluss werden die Ergebnisse interpretiert. Die Ausführungen hierzu basieren in wesentlichen Teilen auf Treibert et al. (2021, S. 207 ff.).

Sicherheitsorganisation und -management

Um den aktuellen Sachstand in Bezug auf organisatorische Aspekte der Informationssicherheit im Unternehmen abzufragen, wurden die in Abbildung 5.4 aufgeführten Aussagen konzipiert, die von den Unternehmen mit »trifft zu« bzw. »trifft nicht zu« bewertet werden sollten.



Abb. 5.4 Ergebnisse »Sicherheitsorganisation und -management« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Das Management bzw. die Geschäftsleitung legt relevante Rollen und Verantwortlichkeiten zur Sicherstellung und Aufrechterhaltung der Informationssicherheit fest.
2. Es existiert eine strukturierte, nachvollziehbare und dokumentierte Vorgehensweise zur Identifikation möglicher Informationssicherheitsrisiken und zum Umgang mit diesen.
3. Es besteht ein kontinuierlicher Verbesserungsprozess, welcher u.a. durch Sicherheitsanalysen/Audits implementiert ist.
4. Es ist mindestens eine Stelle als Beauftragter für die Informationssicherheit (Informationssicherheitsbeauftragter) besetzt.
5. Das Management stellt die notwendigen Ressourcen (finanziell, fachlich, personell) zur Erreichung der Informationssicherheitsziele zur Verfügung.
6. Eine schriftliche Informationssicherheit-Strategie bspw. in Form von Leitlinien ist vorhanden.
7. Die Informationssicherheits-Konzepte und -Richtlinien stehen den Mitarbeiter/innen in schriftlicher Form zur Verfügung.
8. Es findet mindestens einmal pro Jahr ein Austausch mit Fachverbänden und Vereinen der Wasserwirtschaft (z. B. BDEW, DVGW, DWA oder VKU) über informationssicherheitsbezogene Themen statt.
9. Die Informationssicherheit wird als Teilgebiet der Versorgungssicherheit verstanden.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Im Hinblick auf strategisch-konzeptionelle Aspekte der Informationssicherheit zeigten sich zwischen den beiden Branchenzweigen keine wesentlichen Unterschiede (Abb. 5.4 links): Jeweils rund zwei Drittel der befragten Trinkwasserversorger und Abwasserentsorger erachteten die Informationssicherheit als wichtiger Pfeiler der Versorgungssicherheit (Frage 9), hatten zum Zeitpunkt der Abfrage Strategien (z. B. Leitlinien) zur Informationssicherheit erarbeitet und diese den Mitarbeiter/innen zugänglich gemacht (6 u. 7) sowie im Unternehmen die Verantwortlichkeiten festgelegt (1). In Bezug auf die praktische Umsetzung der Sicherheitskonzepte schien allerdings der Bereich der Trinkwasserversorgung etwas schwächer aufgestellt zu sein: Nur ungefähr die Hälfte der befragten Trinkwasserversorger gab an, einen Informationssicherheitsbeauftragten o. Ä.



zu beschäftigen (4), konkrete Maßnahmen dokumentiert zu haben (2) oder die Sicherheit durch Sicherheitsanalysen o.Ä. kontinuierlich zu verbessern (3). Ebenfalls nur jeder zweite Trinkwasserversorger war der Meinung, dass seitens des Managements ausreichende Ressourcen (finanziell, fachlich, personell) für die Informationssicherheit zur Verfügung gestellt werden (5). Bei den Unternehmen der Abwasserbeseitigung lagen die Zustimmungswerte für diese Aussagen (außer in Bezug auf die Implementierung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses) deutlich höher bei knapp über 70 %. Schließlich kam es nur bei rund einem Drittel der Trinkwasserversorger bzw. bei rund der Hälfte der Abwasserentsorger zu einem regelmäßigen themenbezogenen Austausch mit den Fachverbänden der Wasserwirtschaft (8).

Die Analyse nach Größenklassen offenbart deutliche Unterschiede (Abb. 5.4 rechts): Alle großen Unternehmen erreichten (außer bei Aussage 8 zum Austausch mit Fachverbänden) Zustimmungswerte von über 80 bzw. meist 100 % und übertrafen damit die mittleren und kleinen Betriebe bei allen Aussagen deutlich. Dieses Ergebnis war zu erwarten, da alle teilnehmenden großen Unternehmen als KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG verpflichtet waren, organisatorische Maßnahmen zur Gewährleistung der Informationssicherheit umzusetzen. Bei den kleinen und mittleren Unternehmen bewegten sich die Zustimmungswerte meist bei 70 % oder darunter. Beispielsweise schien es mit abnehmender Betriebsgröße auch eine geringere Bereitschaft seitens der Unternehmensführung zu geben, die nötigen finanziellen, fachlichen und personellen Ressourcen zur Gewährleistung der Informationssicherheit zur Verfügung zu stellen (5). Erklärungsbedürftig sind die vergleichsweise hohen Zustimmungswerte bei kleinen Unternehmen in Bezug auf das Vorhandensein von Strategien zur Informationssicherheit (6 u. 7). Eine Erklärung könnte sein, dass bei kleinen Unternehmen ggf. unklare Vorstellungen über Anforderungen und Umfang entsprechender Strategien existieren.

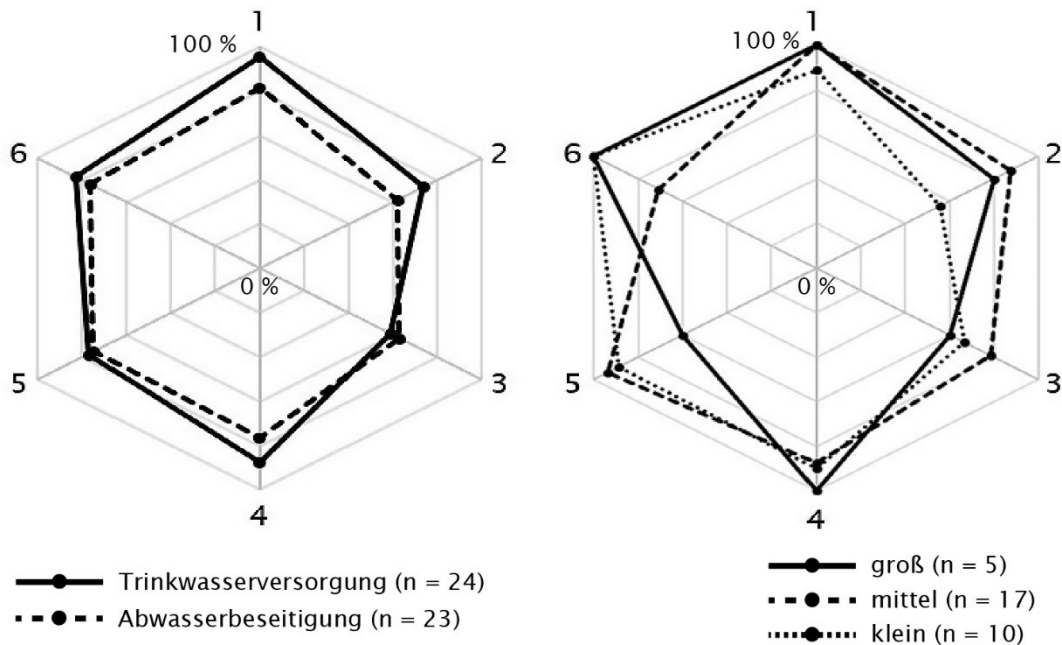
Insgesamt zeigen sich große Unternehmen im Einklang mit den Zielen des IT-Sicherheitsgesetzes von 2015 im Bereich Sicherheitsorganisation -managements deutlich besser aufgestellt sind als kleine und mittlere Unternehmen, was als Erfolg der Gesetzgebung zum Schutz der Kritischen Infrastrukturen gewertet werden kann. Bei kleinen und mittleren Unternehmen offenbarten sich vorhandene Sicherheitsdefizite. Hier scheint es mit abnehmender Betriebsgröße vor allem an den nötigen Ressourcen für die Informationssicherheit zu fehlen.

IT-Sicherheit

Die in Abbildung 5.5 genannten Aussagen wurden konzipiert, um den aktuellen Umsetzungsgrad in Bezug auf präventive technische Schutzmaßnahmen zur Gewährleistung der Informationssicherheit in den Unternehmen zu erheben.



Abb. 5.5 Ergebnisse »IT-Sicherheit« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Systeme, Netze und Infrastrukturen werden nach Schutzniveau logisch segmentiert, z. B. logische Netzwerksegmentierung von Büro-IT-Netz und Prozess-IT-Netz.
2. Systeme, Netze und Infrastrukturen werden nach Schutzniveau physisch isoliert, z. B. zwei unterschiedliche Technikräume für die Aufbewahrung der IT-Komponenten der Büro-IT und Prozess-IT.
3. Es wird mindestens jährlich überprüft, ob sicherheitsrelevante Updates für Übertragungstechniken in der Automatisierung (Modems, Repeater, Hubs, Switches, etc.) zur Verfügung stehen und entsprechend eingespielt werden.
4. Zutritts-, Zugangs- und Zugriffsrechte werden nach dem Rechte-nach-Bedarf-Prinzip zugeteilt, regelmäßig kontrolliert und angepasst.
5. Bei kritischen Systemen, Netzwerken und Remotezugängen, werden Sicherheitsprozesse im Bereich der Authentifizierung, wie z.B. die 2-Faktor-Authentifizierung, implementiert und umgesetzt?
6. Es existieren Verfahren zur Erzeugung und Handhabung von persönlichen Authentifizierungsdaten (z.B. Passwörtern).

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

In Bezug auf die implementierten präventiven Sicherheitsmaßnahmen zeigten beide Branchenzweige ein ähnliches Bild, wenngleich Unternehmen der Trinkwasserversorgung leicht bessere Werte erzielten als ihre Pendanten in der Abwasserbeseitigung (Abb. 5.5 links). Zum Zeitpunkt der Befragung hatte die große Mehrzahl der befragten Unternehmen ihre Büro- und Prozessnetze logisch getrennt (Frage 1), rund zwei Drittel der Unternehmen hatten zusätzlich eine physische Trennung vorgenommen (2). Auch organisatorische und technische Maßnahmen für den physischen Zugangsschutz sowie zur Absicherung von (Fern-)Zugriffen auf die Netzwerke wurden in beiden Branchen mit Zustimmungswerten von rund 80% mehrheitlich angewendet (4, 5 u. 6). Auf ein wesentliches Sicherheitsdefizit weisen hingegen die vergleichsweise niedrigen Zustimmungswerte zu Aussage 3 hin, wonach weniger als zwei Drittel der befragten Unternehmen regelmäßig prüften, ob Sicherheitsupdates für die einge-



setzten IT-Komponenten zur Verfügung standen und diese ggf. auch einspielten.

Dabei scheinen sich die Probleme im Schwachstellenmanagement nicht nur auf mittlere oder kleine Unternehmen zu beschränken, denen ggf. die hierfür notwendigen fachlichen und personellen Ressourcen fehlen. So waren es vor allem die großen Unternehmen, also KRITIS-Betreiber, die zu 40 % auf regelmäßige Sicherheitsupdates verzichteten (Abb. 5.5 rechts Aussage 3). Dies könnte ein Ausdruck der in Kapitel 5.1.2.3 beschriebenen Herausforderungen bei der Installation von Sicherheitsupdates in komplexen Prozess-IT-Umgebungen sein, die eine Abwägung der Risiken der Softwareschwachstellen gegenüber den Risiken der Installation notwendig machen. Nicht behobene Softwareschwachstellen stellen jedoch grundsätzlich eine Gefahr für vorsätzliche Angriffe oder fehlerhaftes Systemverhalten dar. In Bezug auf die anderen Aussagen erzielten große Unternehmen erwartungsgemäß meist bessere Werte als mittlere oder kleine Betriebe (Zustimmungswerte von bis zu 100 %). Eine Ausnahme bildet Aussage 5 zur Implementierung von sicheren Anmeldeverfahren bei kritischen Systemen und Netzwerken. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass die zwei großen Abwasserentsorger, die Aussage 5 verneinten, gleichzeitig angaben, keine Remotezugriffsmöglichkeiten für ihre Systemleittechnik im Einsatz zu haben, was auch deren Absicherung unnötig machte.

Insgesamt zeigten sich die befragten Unternehmen in Bezug auf die Implementierung präventiver Sicherheitsvorkehrungen bis auf das Problemfeld der Sicherheitsupdates in der Regel gut bis sehr gut aufgestellt. Dieses bereits in der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) identifizierte Sicherheitsdefizit (Kap. 5.4.1) scheint damit in der Wasserwirtschaft immer noch verbreitet zu sein.

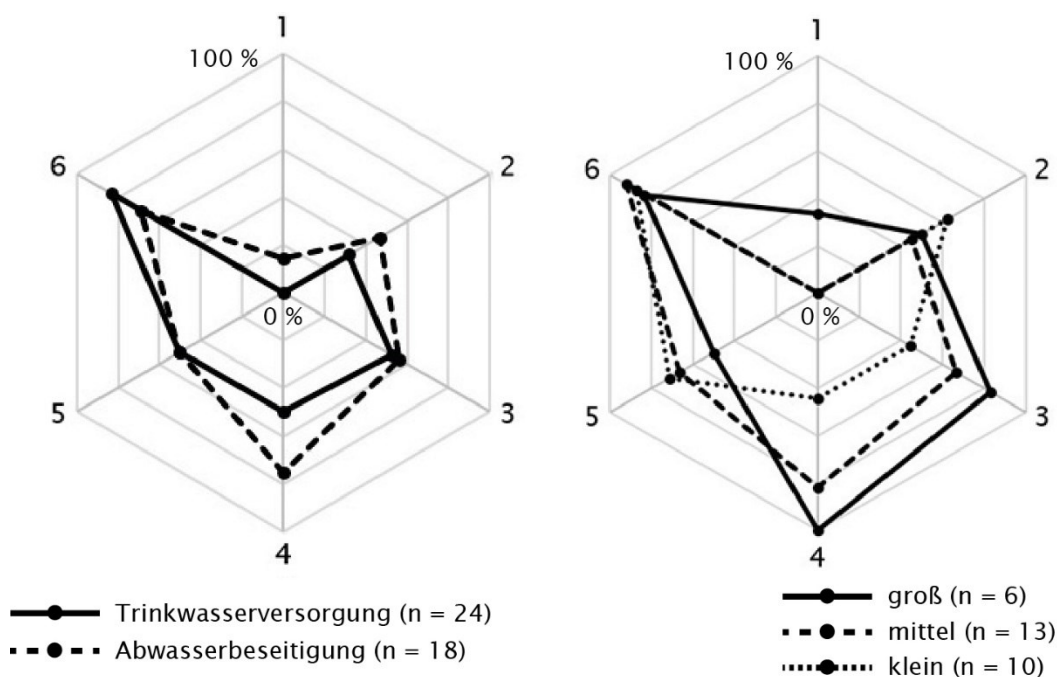
Überwachung und Monitoring

Zum Themenkomplex Überwachung und Monitoring wurden insgesamt sechs Aussagen formuliert (Abb. 5.6). Gemäß Umfrageergebnisse wurden Maßnahmen zur Überwachung und zum Monitoring von Netzwerkaktivitäten in beiden Branchen nicht durchgängig umgesetzt (Abb. 5.6 links): Von den 36 Unternehmen, die Aussage 1 bewerteten, gaben lediglich zwei Abwasserentsorger an, Systeme zur Überwachung der gesamten Netzwerkaktivitäten im Unternehmen einzusetzen, um potenzielle Cyberangriffe oder andere Bedrohungen in Echtzeit erkennen zu können (Kap. 5.1.2.5). Ein Drittel der Trinkwasserversorger sowie immerhin etwa die Hälfte der Abwasserentsorger überprüften zumindest den Datenverkehr zu den Feldkomponenten durchgängig auf Korrektheit (2). Anmeldeversuche auf Prozess-IT-Systeme wurden hingegen von der Mehrzahl der Unternehmen überwacht (6). Nicht kontinuierlich, aber zumindest einmal jährlich untersuchten zwischen 50 % (Trinkwasserversorger) und 75 % (Abwasserentsorger) der befragten Unternehmen die protokollierten Logdateien auf mög-



liche Anomalien (4). Zu Sofortmaßnahmen im Falle eines detektierten Sicherheitsvorfalls wäre gleichwohl vermutlich nur jedes zweite der befragten Unternehmen in der Lage gewesen, weil sie auch die dafür benötigte Fachexpertise im Unternehmen vorhielten (5). Ebenfalls nur ungefähr die Hälfte der befragten Unternehmen gab schließlich an, Firewalls und Sicherheitsgateways regelmäßig (mindestens quartalsweise) zu administrieren (3).

Abb. 5.6 Ergebnisse »Überwachung und Monitoring« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Der Datenverkehr innerhalb der organisationsinternen Netzwerke wird aktiv durch ein Security Information and Event System (SIEM) überwacht.
2. Die Integrität (Korrektheit) der Prozessdaten der Feldebene wird durchgängig überwacht und Alarmfunktionen sind implementiert.
3. Firewalls und Sicherheitsgateways werden mindestens quartalsweise administriert.
4. Interne Aktivitäten im System werden durch Logfiles protokolliert und jährlich auf Anomalien untersucht.
5. Es ist mindestens eine Person bezüglich der Reaktion auf Systemanomalien in der Prozess-IT geschult.
6. Anmeldeversuche auf Prozess-IT-Systeme werden durch technische Lösungen überwacht.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Die Auswertung nach Betriebsgröße zeigt (Abb. 5.6 rechts), dass Überwachungs- und Monitoringmaßnahmen bei großen Betreibern meist etwas stärker verbreitet waren als bei mittleren und kleinen Betreibern. Gleichwohl zeigten sich auch hier Defizite in Bezug auf die aktive Überwachung der gesamten Netzwerkaktivitäten bzw. des Datenverkehrs zu den Feldkomponenten (1 u. 2). Auffallend ist auch, dass große Unternehmen in Bezug auf die Schulung der eigenen Mitarbeiter/

innen schlechtere Zustimmungswerte erzielten als mittlere oder kleine Betriebe (5). Eine Erklärung könnte sein, dass große Unternehmen in Anbetracht des Umfangs und der Komplexität ihrer IT-Systeme in Bezug auf die Anomaliebehandlung weitgehend auf externe Fachexpertise angewiesen sind.

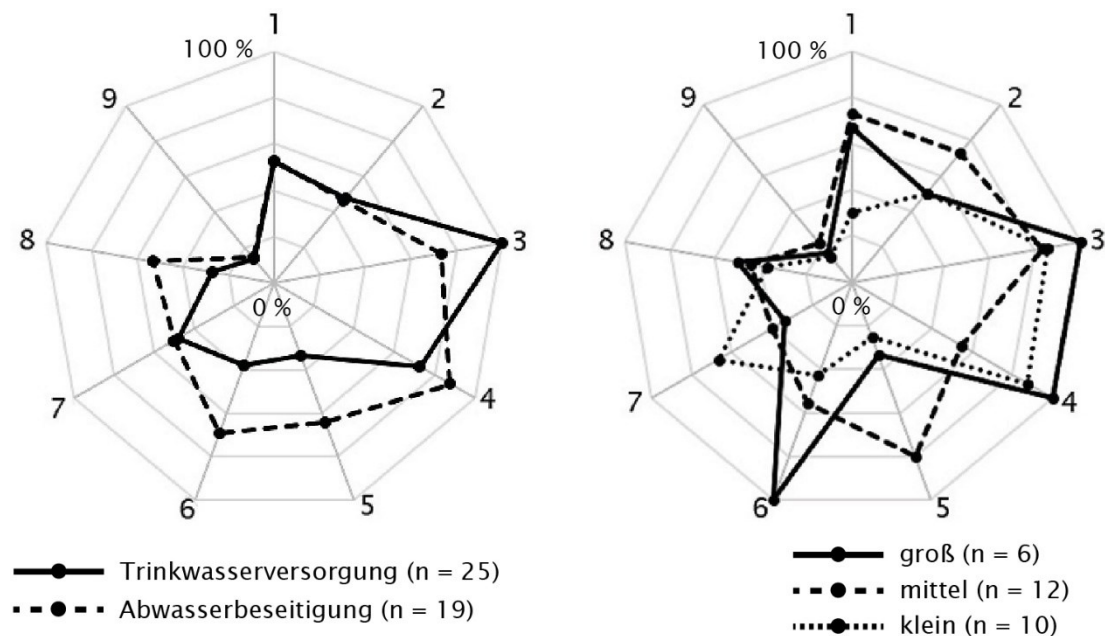
Insgesamt zeigen die Umfrageergebnisse eine zum Zeitpunkt der Datenerhebung noch lückenhafte Verbreitung von detektiven Schutzmaßnahmen zur Überwachung von Netzwerkaktivitäten, und zwar teilweise über alle Betriebsgrößen hinweg. Diesbezüglich scheint sich also das Sicherheitsniveau seit der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1) nicht wesentlich verbessert zu haben. Zumindest bei großen Unternehmen dürfte sich die Situation künftig verbessern, da KRITIS-Betreiber gemäß der jüngsten Novelle des BSIG seit Mai 2023 verpflichtet sind, Systeme zur kontinuierlichen Angriffserkennung einzusetzen (Kap. 5.2.2.1). Für kleine und mittlere Unternehmen jedoch besteht der mit der Anschaffung und den Betrieb solcher Systeme verbundene hohe finanzielle und fachliche Ressourcenaufwand als Hemmnis für deren Einsatz vorläufig fort.

Externe Abhängigkeiten

Um den Themenkomplex der externen Abhängigkeiten zu beleuchten, wurden insgesamt neun Aussagen entwickelt (Abb. 5.7). Die Aussagen 1 bis 3 thematisieren den Prozess der Beschaffung und Inbetriebnahme neuer Hard- oder Softwarekomponenten. In beiden Branchen gab nur jeweils rund die Hälfte der befragten Unternehmen an, ausschließlich zertifizierte Produkte zu verwenden (Abb. 5.7 links Aussage 1) oder bei maßgeschneiderten Lösungen auf die Einhaltung von Sicherheitskriterien zu bestehen (2). Damit hatte jeder zweite Betrieb möglicherweise IT-Komponenten ohne angemessene Schutzvorkehrungen im Einsatz. Ohne ausreichende Fachexpertise sind daraus resultierende Sicherheitsrisiken allerdings nur schwer zu erkennen, geschweige denn zu beheben. Bei neu angeschafften IT-Komponenten wurden aber mehrheitlich sichere Konfigurationen vorgenommen (3). Die Aussagen 4 und 5 befassten sich mit externen Abhängigkeiten im betrieblichen Alltag. Knapp drei Viertel der befragten Trinkwasserversorger sowie fast alle Abwasserentsorger gaben an, beim Betrieb der Prozess-IT auf externe Dienstleistungen angewiesen zu sein (4). Gleichzeitig aber gaben nur ein Drittel der Trinkwasserversorgung bzw. zwei Drittel der Abwasserentsorger an, dass die ausgelagerten Prozesse und eingesetzten IT-Lösungen durch die externen Dienstleister dokumentiert und diese Informationen den Unternehmen zur Verfügung gestellt wurden (5). Trotz Prozessauslagerungen bleiben Unternehmen aber in der Verantwortung, sodass sie bei ihren Auftragnehmern ein adäquates Informationssicherheitsniveau sicherstellen und dafür Sorge tragen müssen, dass kein sicherheitsrelevantes Prozesswissen verloren geht.



Abb. 5.7 Ergebnisse »Externe Abhängigkeiten« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Bei der Anschaffung von extern bezogener Hard- und Software in der Fernwirktechnik und bei Prozessleitsystemen werden ausschließlich zertifizierte Produkte berücksichtigt.
2. Bei Individuallösungen werden Prinzipien der sicheren Softwareentwicklung, z.B. Schwachstellenanalysen, vertraglich festgelegt.
3. Vorkonfigurationen werden überprüft und ggf. für einen sichereren Betrieb verändert.
4. Tätigkeiten der Prozess-IT-Abteilung werden teilweise oder vollständig outgesourct.
5. Das outgesourcte Prozess-Know-How und unternehmenseigene Lösungen werden dokumentarisch durch den Auftragnehmer für Ihre Organisation bereitgestellt.
6. Es existiert ein Sicherheitszonenkonzept, das die Kritikalität der betrieblichen Standorte und Räume berücksichtigt und den Sicherheitszonen einen Perimeterschutz zuordnet.
7. Es existieren Arbeits- bzw. Verfahrensanweisung, die regeln, wie und wann Partnerfirmen, wie z.B. Putzfirmen, in den kritischen Sicherheitszonen ihre Tätigkeiten durchführen sollen.
8. Kommunikationsverbindungen von und zu den SPS sind durch verschlossene Kabeltrassen vor dem Zugang von unberechtigten Dritten geschützt.
9. Es werden Lieferantenaudits bei kritischen Dienstleistern durchgeführt.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Beides setzt einen intensiven Informationsaustausch zwischen Unternehmen und Dienstleistern voraus, der gemäß Umfrageergebnissen aber nicht immer gewährleistet zu sein scheint. Die Aussagen 6 bis 8 adressieren Schutzvorkehrungen gegen unerlaubte Systemzugriffe durch Fremdpersonal. Über ein Sicherheitszonenkonzept mit unterschiedlich stark zugangsgeschützten Standorten verfügten mehr Abwasserentsorger als Trinkwasserversorger und nur jedes zweite Unternehmen hatte organisatorische Vorkehrungen getroffen, um potenziellen Gefahren durch externes Personal in kritischen Unternehmensbereichen zu begegnen. Auch waren die Kommunikationsverbindungen zu den Steuerungsgeräten der Feldebene nur bei der Hälfte der Abwasserentsorger bzw. bei

einem Viertel der Trinkwasserversorger durch verschlossene Kabeltrassen geschützt. Die Auswertung zu Aussage 9 zeigt schließlich, dass nur eine kleine Anzahl der befragten Betriebe die Leistungsfähigkeit ihrer Dienstleister durch Audits überprüfte.

Entgegen der Erwartung zeigte die Auswertung nach Unternehmensgröße (Abb. 5.7 rechts), dass große Unternehmen gegenüber kleinen und mittleren Unternehmen nur in Bezug auf die Implementierung von Sicherheitszonenkonzepten eindeutig besser aufgestellt waren (6), während sie bei den anderen Aussagen vergleichbare oder sogar deutlich schlechtere Zustimmungswerte erzielten.

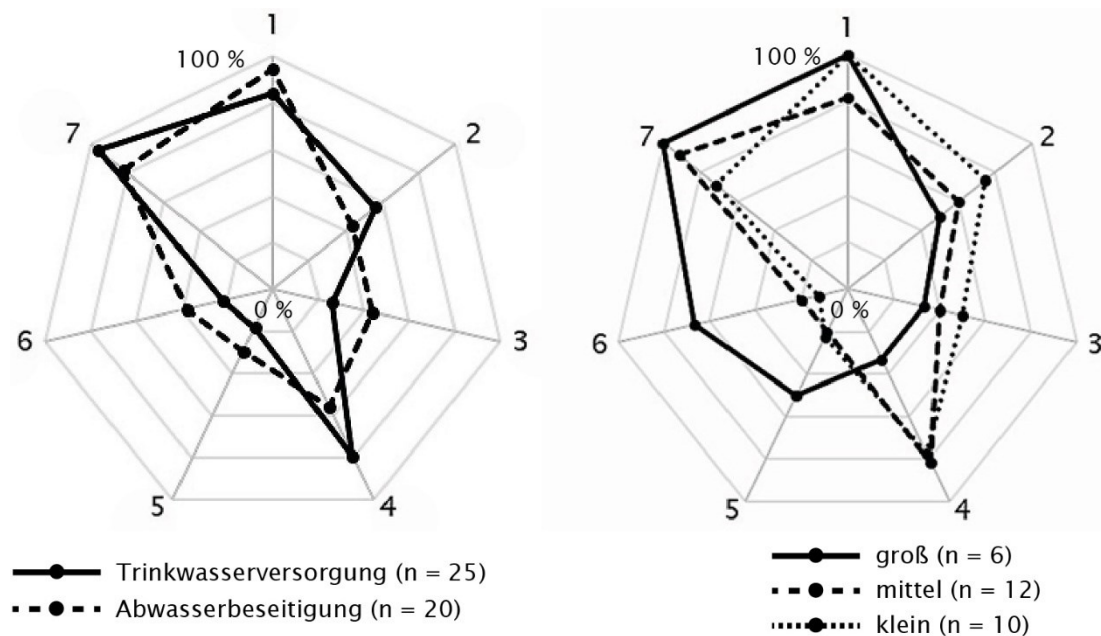
Wie schon in der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1) zeichnen sich auch in der vorliegenden Befragung starke Abhängigkeiten der Betreiber zu externen Dienstleistern ab. Gleichzeitig lassen die Umfrageergebnisse bei vielen Betrieben Sicherheitsdefizite im Beschaffungsprozess, beim Zugangs- und Zugriffsschutz und der organisatorischen Zusammenarbeit mit Dienstleistern vermuten, und zwar unabhängig von der Betriebsgröße. Ein Erklärungsversuch für diese Nachlässigkeit könnte sein, dass Kooperationen mit externen Dienstleistern in der Wasserwirtschaft traditionell auf sehr guten Vertrauensverhältnissen basieren, wodurch Sicherheitsaspekte ggf. aus dem Blickfeld geraten könnten. Dies birgt jedoch erhebliche Risiken für die Informationssicherheit.

Notfallmanagement

Um den aktuellen Stand in Bezug auf das Notfallmanagement in Erfahrung zu bringen, wurden die Unternehmen mit folgenden Aussagen konfrontiert (Abb. 5.8). In Bezug auf die Planung von Reaktionsmaßnahmen zeigten sich die befragten Unternehmen beider Branchenzweige gut bis sehr gut auf IT-Sicherheitsvorfälle vorbereitet (Abb. 5.8 links). Bei fast allen Unternehmen lagen Leit- und Richtlinien zum Störungs- und Notfallmanagement vor, zudem hatten über 50% der Abwasserentsorger sowie knapp 80% der Trinkwasserversorger Ausfallszenarien und entsprechende Wiederherstellungspläne für die Prozess-IT erarbeitet (Aussagen 1 u. 4). Auch Meldewege sowie Prozesse zur Aufnahme und Bewertung von IT-Sicherheitsvorfällen waren größtenteils festgelegt (7). Die in der Theorie definierten Prozesse wurden allerdings nicht immer von entsprechenden Vorkehrungen in der Praxis begleitet. Nur knapp die Hälfte oder weniger der befragten Unternehmen hatte eigens einen IT-Notfallmanager angestellt (2) bzw. aus den Reihen der Mitarbeiter/innen ein IT-Notfallteam mit definierten Rollen und Verantwortlichkeiten zusammengestellt (3). Außerdem gab nur rund jeder Dritte Abwasserentsorger bzw. jeder Fünfte Trinkwasserversorger an, die entwickelten Maßnahmenpläne und Prozesse z. B. durch Übungen auch auf ihre praktische Anwendbarkeit und Wirksamkeit hin zu überprüfen (4 u. 5). Bei der Mehrzahl der befragten Unternehmen war eine erfolgreiche Systemwiederherstellung nach einem Vorfall somit unter Umständen nicht gewährleistet.



Abb. 5.8 Ergebnisse »Notfallmanagement« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Es existieren Leit- und Richtlinien zum Störungs-, Problem- und Notfallmanagement.
2. Es ist mindestens eine Stelle als IT-Notfallmanager besetzt.
3. Es existiert ein internes IT-Notfallteam mit definierten Rollen und Verantwortlichkeiten.
4. Ausfallszenarien und Wiederherstellungspläne sind erarbeitet, um die Betriebsfähigkeit der Prozess-IT zu gewährleisten.
5. Die Notfallorganisation sowie die implementierten Prozesse werden durch Szenariosimulationen und Vollübungen getestet.
6. Es werden Penetrationstests zur Überprüfung der Einhaltung technischer Vorgaben durchgeführt.
7. Es bestehen Prozesse (Meldewege, Aufnahme, Bewertung und Maßnahmeentwicklung) zur Handhabung von Informationssicherheitsvorfällen.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Bei der Auswertung der Umfrageergebnisse nach Betriebsgröße (Abb. 5.8 rechts) fällt auf, dass alle befragten großen Unternehmen zwar Leit- und Richtlinien sowie Meldewege und Bewertungsprozesse für das Notfallmanagement erarbeitet hatten (1 u. 7), jedoch nur vergleichsweise selten auch Ausfallszenarien und entsprechende Wiederherstellungspläne für ihre Prozess-IT entwickelt hatten (4). Ein möglicher Grund dafür könnte sein, dass die Wiederherstellung großer und komplexer Prozess-IT-Umgebungen sowieso nur durch externe IT-Spezialisten geleistet werden kann, sodass sich diesbezügliche interne Maßnahmenpläne erübrigen. Dies könnte auch die vergleichsweise niedrigeren Zustimmungswerte der großen Unternehmen in Bezug auf die personellen Ressourcen und Rollenzuweisungen im Bereich des Notfallmanagements erklären (2 u. 3). Hinsichtlich der praktischen Überprüfung der definierten Prozesse schnitten die großen Unternehmen zwar deutlich besser als kleine und mittlere Unternehmen ab, allerdings verzichtete auch hier die Hälfte der Unternehmen auf praktische

Notfallübungen bzw. ein Drittel auf Penetrationstests (5 u. 6). Gerade aber wenn große Unternehmen beim Notfallmanagement auf die Hilfe externer Dienstleister angewiesen sind, sollten die Verantwortlichkeiten und Ansprechpersonen festgelegt sein und die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit eingeübt werden.

Vergleichbar zu den Ergebnissen der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) (Kap. 5.4.1) zeigte sich die große Mehrheit der befragten Unternehmen gut auf Notfälle vorbereitet. Wie die vorliegende Umfrage allerdings andeutet, beschränkten sich die Vorbereitungen jedoch teilweise auf theoretische Konzepte, die nicht immer durch entsprechende personelle Ressourcen abgesichert waren oder deren praktische Anwendbarkeit nur vergleichsweise selten durch Simulationen, Notfallübungen oder Penetrationstests überprüft wurde.

Sicherheitsbewusstsein

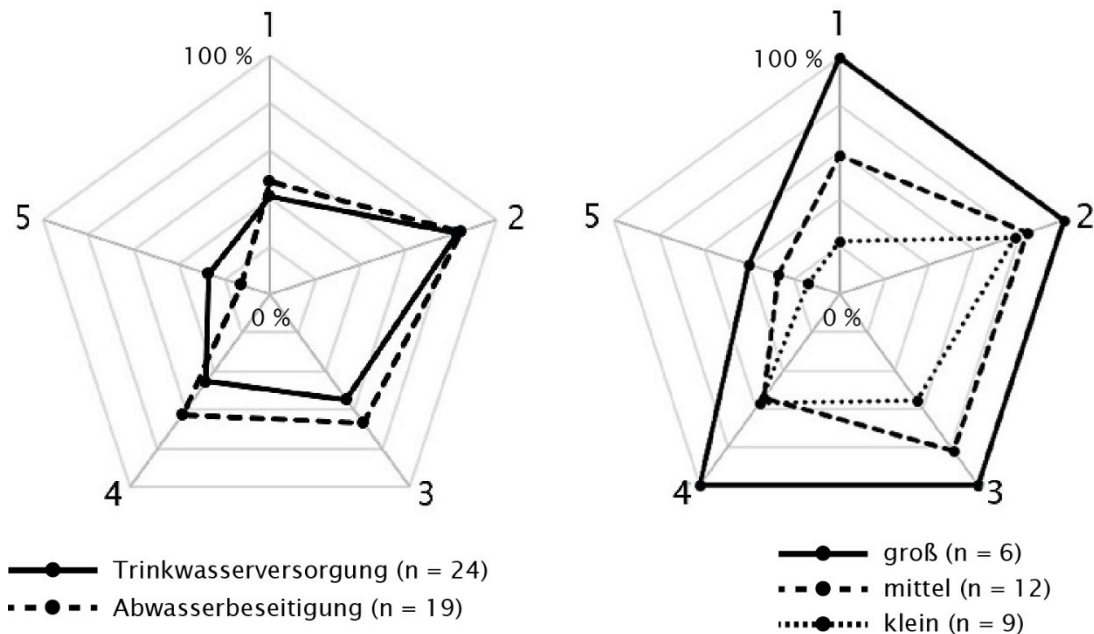
Zum Themenfeld Sicherheitsbewusstsein wurden insgesamt fünf Aussagen konzipiert (Abb. 5.9). Über 80 % der befragten Unternehmen aus beiden Branchen sahen die eigene Belegschaft ausreichend über die allgemeine und unternehmensspezifische Gefährdungslage informiert (Abb. 5.9 links Frage 2). Auch gaben über die Hälfte der Trinkwasserversorger sowie zwei Drittel der Abwasserentsorger an, dass ihre Mitarbeiter/innen die Schutzziele der Informationssicherheit kennen und somit zu einem hohen Schutzniveau im Unternehmen beitragen können. Ob dieses in der Eigenwahrnehmung hohe Sicherheitsbewusstsein unter den Beschäftigten bei allen Unternehmen auch faktisch zutrifft, muss mit Blick auf die anderen Umfrageergebnisse jedoch teilweise angezweifelt werden. So bot weniger als die Hälfte der befragten Unternehmen ihren Mitarbeiter/innen mindestens jährliche Schulungen zur Informationssicherheit an (1). Da Schulungsmaßnahmen von der Unternehmensleitung initiiert oder zumindest unterstützt werden müssen, könnte dies auf ein mangelndes Engagement für das Thema seitens der Geschäftsführungen hindeuten. Wurden Schulungen durchgeführt, so fanden diese bei den allermeisten Unternehmen ohne Mitglieder der Geschäftsführung statt (5), was abermals auf ein gering ausgeprägtes Interesse an der Thematik in den Leitungsebenen hinweisen könnte. Damit geben die Unternehmensleitungen auch kein gutes Vorbild für die Mitarbeiter/innen ab.

Die Auswertung der Umfrageergebnisse nach Betriebsgröße lässt generell auf ein höher ausgeprägtes und durch regelmäßige Schulungsmaßnahmen gefestigtes Sicherheitsbewusstsein in großen als in kleinen und mittleren Unternehmen schließen (Abb. 5.9 rechts). Durch große Unternehmen mehrheitlich verneint wurde einzig Aussage 5 zur Teilnahme der Unternehmensleitung an Schulungsmaßnahmen. Auch wenn in großen Betrieben eigene Abteilungen für die Informationssicherheit zuständig sind, so könnten Mitglieder der Geschäfts-



führung auch hier als Vorbilder und Multiplikatoren wirken, um die Relevanz des Themas klar hervorzuheben.

Abb. 5.9 Ergebnisse »Security Awareness/spezifisches Domänenwissen« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)



1. Es finden mindestens einmal pro Jahr Schulungen zur Erhöhung des Informationssicherheitsbewusstseins statt.
2. Die Mitarbeiter sind über die allgemeine und unternehmensspezifische aktuelle Gefährdungslage aufgeklärt.
3. Den Mitarbeitern sind die Grundwerte bzw. Schutzziele der Informationssicherheit bekannt, sodass diese aktiv zur Sicherstellung und Aufrechterhaltung der Informationssicherheit an ihrem Arbeitsplatz beitragen können.
4. Die informationssicherheitsspezifischen Dokumente (Leitlinien, Richtlinien, Konzepte etc.) werden nach einer Vertraulichkeitsstufe klassifiziert.
5. Mindestens ein Mitglied der Geschäftsführung nimmt mindestens jährlich an Informationssicherheitsschulungen teil.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Insgesamt weisen die Umfrageergebnisse auf ein adäquates Sicherheitsbewusstsein bei Beschäftigten von großen, nicht aber unbedingt von kleinen oder mittleren Unternehmen hin. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Relevanz des Themas von den Unternehmensleitungen nicht immer erkannt wird. Bei kleinen und mittleren Unternehmen mit begrenzten finanziellen Ressourcen könnte dies dazu führen, dass notwendige Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen unterbleiben.



Hemmnisse

Die bisher formulierten Aussagen dienten dazu, den aktuellen Stand der Schutzvorkehrungen zu erheben sowie Hinweise auf mögliche Sicherheitsdefizite in den Betrieben zu erhalten. Ziel dieses Themenblocks war es, mögliche Hürden für die Umsetzung von Maßnahmen der Informationssicherheit zu identifizieren. Zu diesem Zweck sollten die Unternehmen angeben, welche Hemmnisse auf ihre Organisation zutrafen. Um eine Priorisierung zu erreichen, konnte jedes Unternehmen maximal fünf der folgenden Hemmnisse auswählen:

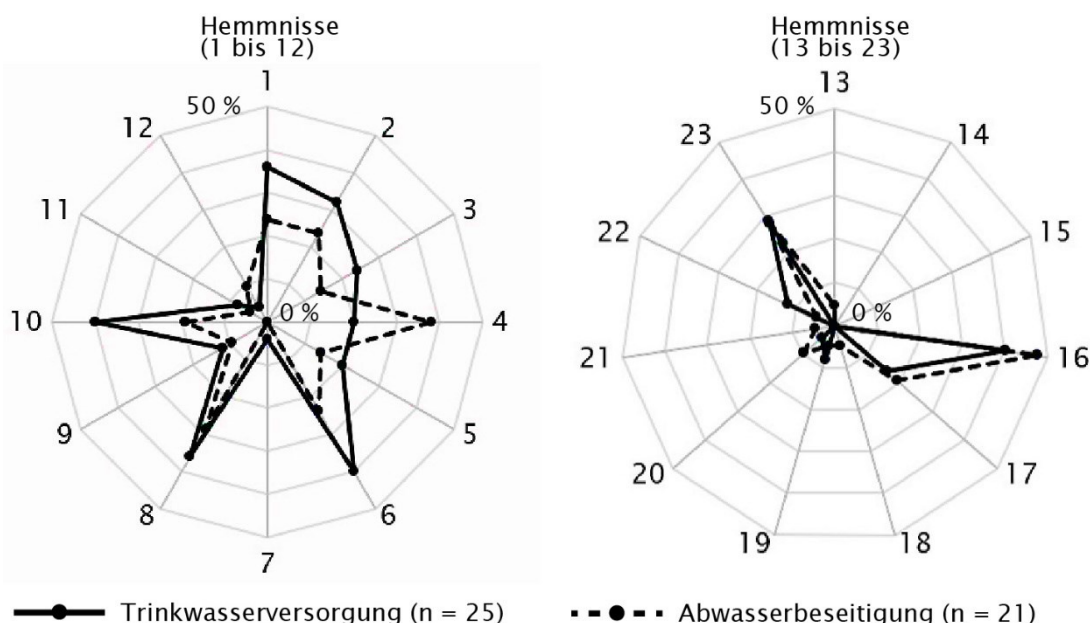
1. Es fehlt hauptsächlich an finanziellen Ressourcen.
2. Die vorhandenen finanziellen Ressourcen werden bevorzugt in neue Infrastruktur, Digitalisierungsprozesse und Automatisierungsprozesse anstatt in die Informationssicherheit investiert.
3. Bei der Finanzierung der fachlichen, zeitlichen, personellen Mehraufwände fehlt staatliche Unterstützung.
4. Es fehlen verfügbare und kompetente Mitarbeiter/innen im Bereich der Informationssicherheit auf dem Arbeitsmarkt.
5. Die Akzeptanz für Informationssicherheit ist bei der Geschäftsführung nicht gegeben, da diese als Mittel zum Zweck verstanden wird.
6. Es besteht keine Notwendigkeit für Investitionen in die Informationssicherheit, da Ihre Organisation kein KRITIS-Betreiber ist.
7. Es besteht keine Notwendigkeit für Investitionen in die Informationssicherheit aufgrund der derzeitigen und zukünftigen Gefahrensituation.
8. Die personelle Ressourcenanbindung ist aufgrund der Überbelastung durch die Vielzahl regulatorischer Anforderungen nicht möglich.
9. Die gesetzlichen Anforderungen im Bereich der Informationssicherheit sind zu intransparent, sodass Unklarheiten bezüglich der Umsetzung bestehen.
10. Die im B3S beschriebenen Vorgehensweisen und Methoden sind nur mit einem hohen internen Aufwand und/oder einem erhöhten Beratungsbedarf zu erfüllen.
11. Es fehlen die sicherheitsstrategischen Konzepte.
12. Diese Konzepte werden durch die Mitarbeiter/innen nur teilweise oder gar nicht umgesetzt, da diese nur auf dem Papier existieren.
13. Es fehlen geeignete Methoden und Standards und Werkzeuge für die Sicherheitsanalyse von IT-Systemen.
14. Es fehlen geeignete IT-Komponenten, welche die informationstechnischen Anforderungen erfüllen.
15. Die interne Kontrolle der Einhaltung von Informationssicherheitsrichtlinien und -leitlinien ist unzureichend.
16. Die zunehmende Komplexität von IT-Systemen.
17. Die Heterogenität der IT-Netzwerklandschaft.
18. Es fehlen Rahmenwerke für die Gestaltung der IT-Architektur.



19. In gesetzlichen Vereinbarungen fehlen Aspekte der Informationssicherheit für externe Lieferanten.
20. Es fehlt an geeigneten Methoden zur Risikoanalyse für die Steuerung der Anlagen über das Prozessleitsystem.
21. Es fehlt eine externe zentrale Anlaufstelle für die Belange der Informationssicherheit.
22. Das Risiko eines Cyberangriffs wird als sehr unwahrscheinlich eingeschätzt, sodass ein System zur Stärkung der Informationssicherheit als nicht notwendig erachtet wird.
23. Aufgrund des hohen Durchschnittsalters der Belegschaft fehlt es an Risikobewusstsein für Informationssicherheit.

Die Ergebnisse differenziert nach Branche sind in Abbildung 5.10 dargestellt. In beiden Branchenzweigen wurden vor allem der hohe finanzielle und personelle Aufwand sowie die zunehmende Komplexität der IT-Systeme als bedeutende Hemmnisse für die Gewährleistung der Informationssicherheit gesehen. Außerdem wurden der Fachkräftemangel sowie ein geringes Sicherheitsbewusstsein in der Belegschaft problematisiert. Jeder fünfte Trinkwasserversorger beklagte ferner einen Akzeptanzmangel für Maßnahmen der Informationssicherheit in den Unternehmensleitungen.

Abb. 5.10 Teilergebnisse »Hemmnisse« differenziert nach Branche



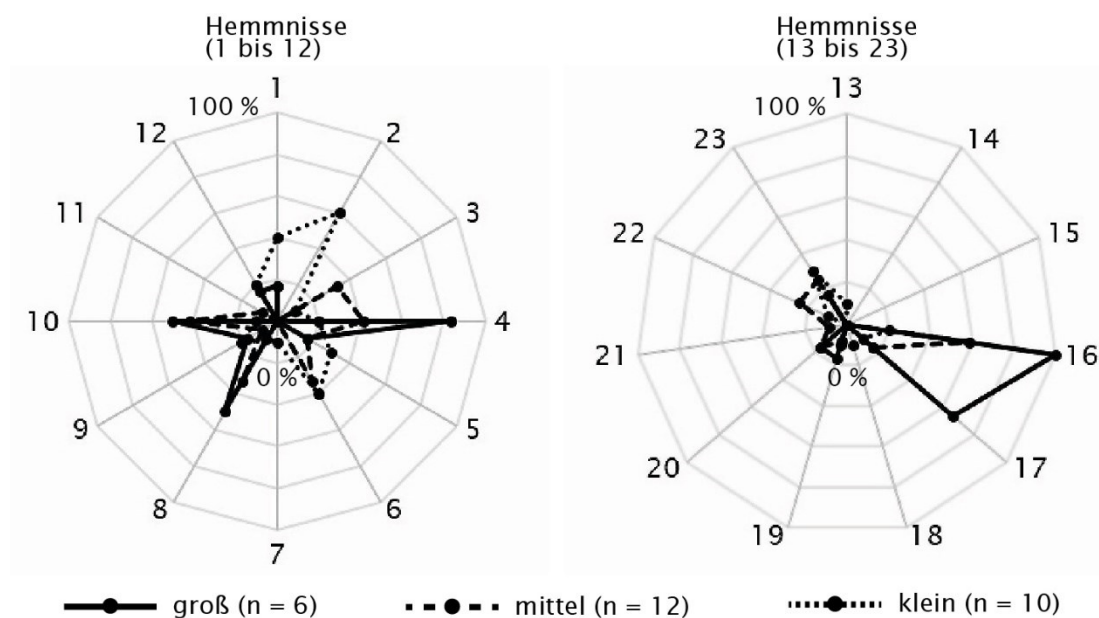
Lesehinweis: Der besseren Lesbarkeit wegen reicht der Wertebereich im Netzdiagramm von 0 bis 50%.

Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Beachtenswert ist, dass 40 % der befragten Trinkwasserversorger sowie immerhin 24 % der Abwasserentsorger keinen Handlungsbedarf im Bereich der Informationssicherheit sahen, weil sie keine KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG waren. Nicht nur wogen sich diese Betreiber (trotz eines offenbar hohen Gefahrenbewusstseins) in falscher Sicherheit, auch lässt sich dieses Umfrageergebnis als Hinweis lesen, dass das Prinzip der Freiwilligkeit, auf dem die Schutzstrategien für Kritische Infrastrukturen außer für KRITIS-Betreiber basieren (Kap. 5.2.2), nicht ausreicht, um flächendeckend ein adäquates Sicherheitsniveau zu erreichen. Im ungünstigsten Fall könnte eine Nichteinstufung als KRITIS-Betreiber sogar als (willkommene) Rechtfertigung für ausbleibende Investitionen in die Informationssicherheit dienen. Keine wesentlichen Hemmnisse für die Umsetzung von Maßnahmen der Informationssicherheit scheinen dagegen ein mangelhaftes Gefahrenbewusstsein (Hemmnisse 7, 22), unklare gesetzliche Anforderungen (9), fehlende Sicherheitskonzepte, Verfahren, Standards, Werkzeuge oder IT-Komponenten (11, 12, 13, 14, 15, 18, 19, 20) sowie das Fehlen einer zentralen Anlaufstelle (21) darzustellen.

Die Auswertung der Umfrageergebnisse nach Unternehmensgröße zeigt eine unterschiedliche Akzentuierung der Hemmnisse (Abb. 5.11).

Abb. 5.11 Teilergebnisse »Hemmnisse« differenziert nach Unternehmensgröße



Eigene Auswertung auf Basis der Rohdaten von Treibert et al. (2021)

Die großen und vielfach auch die mittleren Unternehmen problematisierten insbesondere die zunehmende Komplexität der IT-Systeme und Heterogenität der Netzwerke (Hemmnisse 16 u. 17), den Fachkräftemangel (4) sowie den hohen



Arbeitsaufwand zur Erfüllung der (gesetzlichen) Anforderungen (8, 10). Diese Hemmnisse spielten für kleine Unternehmen keine gewichtige Rolle, hier fehlte es hingegen meist an finanziellen Ressourcen (1) bzw. die vorhandenen Ressourcen wurden bevorzugt in die Modernisierung der Infrastruktur und nicht in die Informationssicherheit investiert (2). 40 % der befragten kleinen Unternehmen sahen keine Handlungsnotwendigkeiten, da sie keine KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG waren (6). Schließlich beklagten jeweils 30 % der kleinen Unternehmen Akzeptanzprobleme für Maßnahmen der Informationssicherheit seitens der Unternehmensleitungen (5) oder ein fehlendes Risikobewusstsein in der Belegschaft (23).

5.4.5 Bestandsaufnahme der Informationssicherheit in kleinen und mittleren Kläranlagen durch Löwen et al. (2023)

Im Forschungsprojekt »subKRITIS« wurde 2021 der Stand der Informationssicherheit in insgesamt 13 kleinen und mittleren Kläranlagen in Nordrhein-Westfalen, welche die Schwellenwerte der BSI-KritisV unterschreiten und die folglich keine Maßnahmen zur Informationssicherheit verpflichtend umsetzen müssen, untersucht (Löwen et al. 2023). Aufgrund der kleinen Stichprobe sind die Untersuchungsergebnisse nicht repräsentativ, erlauben aber einen guten Einblick in Kläranlagen unterschiedlicher Größe (Löwen et al. 2023, S. 30 f.).

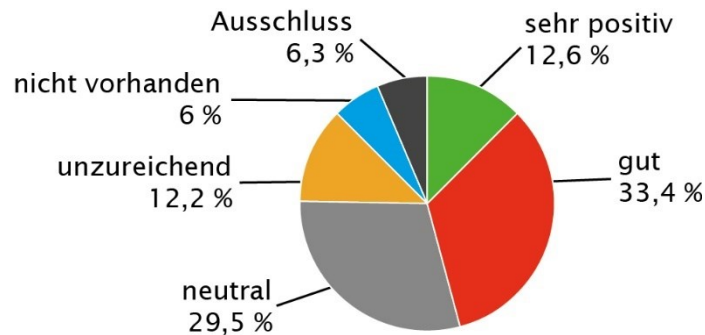
Für die Bewertung des vorgefundenen Stands der Informationssicherheit wurden durch Anwendung des B3S WA (Kap. 5.2.4.5) für alle Kläranlagen die Gefährdungen der Informationssicherheit identifiziert sowie dazugehörige Sicherheitsmaßnahmen, um diesen Gefährdungen entgegenzuwirken, ermittelt. Durch Befragungen vor Ort wurde dann geprüft, inwieweit diese Sicherheitsmaßnahmen in den Kläranlagen bereits umgesetzt worden waren. Zur Beurteilung der Antwortqualität wurde folgendes Bewertungsschema verwendet (Löwen et al. 2023, S. 37):

- *Sehr positiv*: Maßnahmen, um der Gefährdung vollständig entgegenzuwirken, wurden bereits umgesetzt.
- *Gut*: Maßnahmen wurden festgestellt, die Umsetzung ist freigestellt.
- *Neutral*: Maßnahmen wurden festgestellt, ihre Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit werden noch geprüft.
- *Unzureichend*: Getroffene Maßnahmen sind unzureichend, um der Gefährdung entgegenzuwirken.
- *Nicht vorhanden*: Es wurde keine Maßnahmen getroffen.
- *Ausschluss*: Die Gefährdung ist nicht vorhanden.

Abbildung 5.12 zeigt die Befragungsergebnisse als relative Anteile nach Bewertungsschema über alle Kläranlagen. Deutlich wird, dass der auf den Kläranlagen vorgefundene Umsetzungsgrad von Sicherheitsmaßnahmen weit

überwiegend bereits mit sehr positiv (12,6%), gut (33,4%) oder neutral (29,5%) bewertet werden konnte. Nur für wenige der identifizierten Gefährdungen (18,8%) wurden nur unzureichende oder gar keine Sicherheitsmaßnahmen getroffen.

Abb. 5.12 Befragungsergebnisse über alle Kläranlagen nach Bewertungsschema

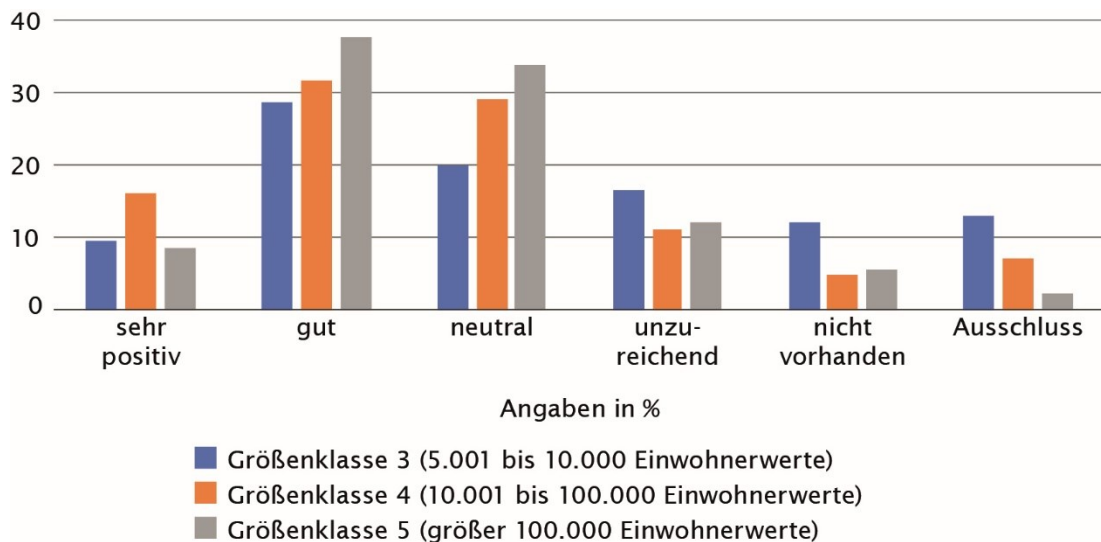


Eigene Darstellung nach Daten von Löwen et al. 2023, S. 40

Die Auswertung der Befragungsergebnisse nach Größenklasse ist in Abbildung 5.13 dargestellt. Erkennbar weisen größere Kläranlagen ein höheres Sicherheitsniveau der Informationssicherheit auf als kleinere Betriebe. In Kläranlagen mit mehr als 100.000 Einwohnerwerten wurden 80 % der Antworten mit sehr positiv, gut oder neutral bewertet, während dieser Anteil in kleinen Kläranlagen mit 5.001 bis 10.000 Einwohnerwerten nur knapp 60 % erreichte (Löwen et al. 2023, S. 42).



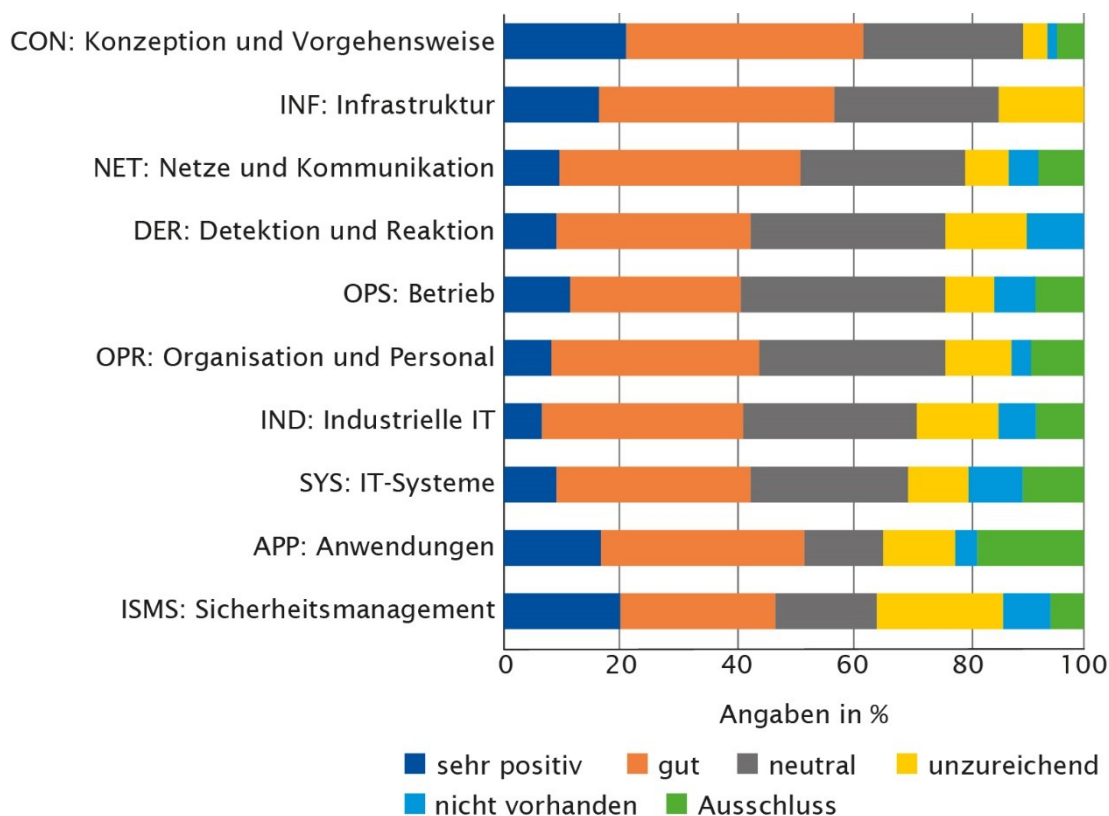
Abb. 5.13 Bewertungsergebnisse nach Größenklasse



Quelle: nach Löwen et al. 2023, S. 42

Die Auswertung der Befragungsergebnisse nach Themenfeldern der Informationssicherheit gibt Auskunft darüber, in welchen Bereichen die größten Sicherheitsmängel bestehen. Das dem B3S WA zugrundeliegende IT-Grundschutz-Kompendium fasst Gefährdungen und Maßnahmen in Bausteinen zusammen (Kap. 5.2.4.2). Die danach aufgeschlüsselten Befragungsergebnisse sind in Abbildung 5.14 aufgeführt (angeordnet nach abnehmender Zahl positiver und neutraler Antworten). Gute Ergebnisse wurden vor allem für die Bausteine »Konzeption und Vorgehensweise« (beinhaltet Themen wie Datenschutz, Datensicherung oder Informationsaustausch), »Infrastruktur« (z. B. Gebäudesicherheit und -management, Verkabelung) und »Netze und Kommunikation« (z. B. Netzarchitektur, Einsatz Firewalls und VPN) erzielt. Demgegenüber fielen der Baustein »Anwendungen« (z. B. Officeprodukte, Webbrowser, mobile Anwendungen) und – mit rund 30 % an unbefriedigenden Antworten – vor allem der Baustein »ISMS« (z. B. strategische Vorgaben, Sicherheitskonzept, Zuständigkeiten) ab (Löwen et al. 2023, S. 44). Ähnlich wie dies das BSI bereits für KRITIS-Betreiber festgestellt hatte (Kap. 5.2.4.1), scheinen damit auch kleinere Betriebe Schwierigkeiten beim Aufbau und Betrieb von ISMS zu haben.

Abb. 5.14 Bewertungsergebnisse nach Bausteinen des IT-Grundschutzes



Quelle: nach Löwen et al. 2023, S. 44

Insgesamt bezeichneten die Studienautoren die auf den untersuchten Kläranlagen vorgefundene Ausgangslage der Informationssicherheit als gut. Im Rahmen der Untersuchung konnte auch Interesse am Thema sowie der Wille zur stetigen Verbesserung der Informationssicherheit bei Verantwortlichen und Beschäftigten festgestellt werden. Allerdings würden die vorhandenen Fachkompetenzen in der Regel nicht mit der Einsicht in die Notwendigkeit Schritt halten können (Kerger et al. 2022, S. 42 ff.). Außerdem sei auf Kläranlagen noch wenig bis kein Bewusstsein für die gegenwärtige Bedrohungslage durch Cyberangriffe und die daraus entstehenden Schäden und Kosten vorhanden. Im Zuge des Ukraine-Kriegs sei das Bewusstsein für die eigene Angreifbarkeit jedoch stark angestiegen (Löwen et al. 2023, S. 90).

5.4.6 Zwischenfazit

Laut der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) erreichten Prozess-IT-Umgebungen bereits vor 2015 eine Komplexität, der mit Blick auf die Informationssicherheit nur große Betreiber mit ausreichenden fachlichen, personellen und finanziellen



Ressourcen gewachsen waren. Demgegenüber waren kleine und mittlere Betreiber zur Absicherung ihrer IT-Systeme meist von externer Expertise abhängig. Trotz oft beschränkter Ressourcen konnte jedoch ein hohes Ambitionsniveau für die Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen festgestellt werden (BSI 2015b, S. 116).

Seit 2015 sind KRITIS-Betreiber gesetzlich verpflichtet, ihre betriebskritischen IT-Systeme (also vor allem die Prozess-IT) nach dem Stand der Technik abzusichern, wodurch das Sicherheitsniveau u. a. durch eine flächendeckende Einführung von ISMS deutlich gesteigert werden konnte. Gleichwohl bestehen noch Verbesserungspotenziale. So stellte das BSI im Rahmen des Nachweiseverfahrens nach § 8a BSIG vor allem bei KRITIS-Betreibern der Wasserwirtschaft noch Mängel in Bezug auf den Aufbau und Betrieb von ISMS fest. Im Hinblick auf die technischen Schutzvorkehrungen werden gemäß den durchgeführten Befragungen Sicherheitsupdates nach wie vor nur zögerlich eingespielt, was in Anbetracht der gestiegenen Bedrohungslage durch Cyberangriffe mit Schadprogrammen jedoch ein wachsendes Risiko darstellt.

Die Herstellung und Gewährleistung von Informationssicherheit stellt für Betreiber aller Größenklassen eine personelle und finanzielle Herausforderung dar. Während KRITIS-Betreiber die dafür nötigen Ressourcen von Gesetzes wegen aufbringen müssen, geschieht dies bei kleinen und mittleren Betreibern aus der Einsicht der Notwendigkeit für Verbesserungen der Informationssicherheit. Das Ambitionsniveau hängt hier somit ganz entscheidend vom Sicherheitsbewusstsein in den Unternehmensleitungen ab, durch die Prozesse der Informationssicherheit initiiert und durch die Bereitstellung ausreichender Ressourcen aktiv unterstützt werden müssen. Die im Projekt durchgeführten Befragungen deuten aber an, dass Informationssicherheit in den Geschäftsführungen eher als Kostentreiber gesehen und der Nutzen nicht immer erkannt wird.

Gleichwohl haben die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten qualitativen und quantitativen Befragungen sowie das Forschungsprojekt »subKRITIS« gezeigt, dass auch viele kleine und mittlere Betreiber proaktiv und im Rahmen ihrer Möglichkeiten Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit umsetzen. Zwar sind diese Ergebnisse nicht repräsentativ für die gesamte Wasserwirtschaft in Deutschland, dennoch zeigen sie, dass es auch zahlreiche ambitionierte kleine und mittlere Unternehmen gibt, die letztlich als Multiplikatoren für die gesamte Wasserwirtschaft dienen können.

In der quantitativen Umfrage war auffallend, dass kleine und mittlere Betreiber vor allem in Bezug auf die Umsetzung von technischen Sicherheitsanforderungen gut abschnitten, nicht jedoch im gleichen Maße bei den organisatorischen Maßnahmen. Eine mögliche Erklärung ist, dass technische Anforderungen oft mit standardisierten technischen Maßnahmen (z. B. durch den Einsatz von Firewalls und VPN-Lösungen) und mit externer Unterstützung durch Hersteller oder Dienstleister erfüllt werden können. Organisatorische

Maßnahmen hingegen verlangen meist die Bereitstellung ausreichender zeitlicher und personeller Ressourcen und den Aufbau interner Fachkompetenzen (Treibert et al. 2021, S.228), was die Bereitschaft für die Umsetzung entsprechender Maßnahmen schmälern könnte. Da ein hohes Sicherheitsniveau jedoch optimal aufeinander abgestimmte technische und organisatorische Maßnahmen voraussetzt, wäre eine Unterstützung kleiner und mittlerer Betriebe insbesondere hinsichtlich von organisatorischen Vorkehrungen sinnvoll.

5.5 Handlungsfelder

In Deutschland basiert der Schutz Kritischer Infrastrukturen traditionell auf freiwilligen Selbstverpflichtungen. Es ist die Aufgabe der Betreiber, für einen sicheren und zuverlässigen Betrieb ihrer Anlagen und Einrichtungen zu sorgen. Von diesem Prinzip abgewichen wurde bisher nur, wenn besondere Schutzbedarfe festgestellt wurden. In Bezug auf die Informationssicherheit wurde ein solcher Bedarf für große Unternehmen der Kritischen Infrastrukturen festgestellt, weswegen diese Unternehmen seit 2015 gesetzlich verpflichtet sind, ihre betriebskritischen IT-Systeme nach dem Stand der Technik abzusichern und dies gegenüber dem BSI regelmäßig nachzuweisen. Dementsprechend ist die deutsche Wasserwirtschaft mit Blick auf die Informationssicherheit heute zweigeteilt: Auf der einen Seite stehen wenige große KRITIS-Betreiber, für die es gesetzliche Bestimmungen für den Schutz ihrer IT-Infrastrukturen mit klar definierten Mindestanforderungen gibt. Auf der anderen Seite gibt es sehr viele kleine und viele mittlere Betreiber, die Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit – wenn überhaupt – nur auf freiwilliger Basis und nach eigenem Ermessen umsetzen. Diese Dualität bestimmt auch die politischen Handlungsoptionen zur Förderung der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft: Während es bei großen KRITIS-Betreibern in der Regel darum geht, ein bereits erreichtes Sicherheitsniveau weiter zu optimieren, müssen mittlere und vor allem kleine Betriebe oftmals erst für das Thema sensibilisiert und generell viel stärker unterstützt werden. Die hier vorgestellten Handlungsoptionen legen den Schwerpunkt auf die bundespolitische Ebene und verfolgen folgende Zielsetzungen:

- Sicherheitsbewusstsein stärken,
- freiwillige Aktivitäten unterstützen,
- rechtliche Grundlagen anpassen sowie
- Wissenslücken schließen.



Sicherheitsbewusstsein stärken

Während KRITIS-Betreiber sich von Gesetzes wegen intensiv und kontinuierlich mit dem Thema Informationssicherheit auseinandersetzen müssen, entscheiden in mittleren und kleinen Betrieben die verantwortlichen Personen nach eigenem Ermessen darüber, welchen Stellenwert sie dem Schutz ihrer IT-Systeme einräumen. Ein Grundverständnis für die Gefährdungen der Informationssicherheit in den Unternehmensleitungen dieser Betriebe ist Voraussetzung dafür, dass Prozesse zur Verbesserung der Informationssicherheit initiiert und durch die Bereitstellung ausreichender finanzieller und personeller Ressourcen kontinuierlich aufrechterhalten werden. Befragungen unter Betreibern und Branchenakteuren (Kap. 5.4) weisen allerdings darauf hin, dass ein adäquates Sicherheitsbewusstsein in den Leitungsebenen insbesondere von mittleren und kleinen Betrieben nicht immer vorausgesetzt werden kann.

Auch auf der Fachebene ist ein ausreichendes Sicherheitsbewusstsein notwendig, damit einmal eingeführte Maßnahmen im betrieblichen Alltag beachtet und konsequent umgesetzt werden. Aufgrund der in den Belegschaften von wasserwirtschaftlichen Betrieben aller Größenklassen nicht selten hohen Altersdurchschnitten fehlt es hier mitunter jedoch an einem ausreichenden Verständnis für neu entstehende Risiken infolge der Digitalisierung.

Es ist daher nach Wegen zu suchen, wie das Sicherheitsbewusstsein für die Gefährdungen der Informationssicherheit in Betrieben der Wasserwirtschaft sowohl auf der Leitungs- als auch auf der Fachebene weiter gestärkt werden kann. Verschiedene Optionen kommen hierfür infrage.

Sensibilisierungskampagnen initiieren und unterstützen

Zielgerichtete Informationskampagnen bieten eine Möglichkeit, um die Führungsebenen von wasserwirtschaftlichen Betrieben stärker für die Gefährdungen der Informationssicherheit zu sensibilisieren. Der Fokus sollte hierbei insbesondere auf kleine und mittlere Betreiber gerichtet werden, da das Problembewusstsein in großen KRITIS-Betreibern durch das IT-Sicherheitsgesetz von 2015 bereits höher ausgeprägt ist. Entsprechende Kampagnen könnten beispielsweise durch das BMI initiiert, finanziell unterstützt und beispielsweise durch die Branchenverbände durchgeführt werden. Eine Möglichkeit dazu bieten ggf. die im Sommer 2022 durch BMI (2022a, S. 11) in der Cybersicherheitsagenda angekündigten Awareness- und Cyber-Resilienz-Projekte für KMU der KRITIS-Sektoren, die vom BSI und von externen Dienstleistern angeboten werden sollen. Für den Erfolg wichtig ist es, dass es sich hierbei um aktive Informationskampagnen handelt, durch die verantwortliche Personen in den Betrieben gezielt und proaktiv angesprochen werden. Passive Kampagnen (z. B. Informationsmaterialien, Internetseite, Messeauftritte) bergen demgegenüber die



Gefahr, dass vorrangig nur Betriebe erreicht werden, die ohnehin schon auf das Thema Informationssicherheit aufmerksam geworden sind und sich damit bereits auseinandersetzen.

Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen für Führungs- und Fachkräfte fördern

Gerade in Belegschaften mit höherem Durchschnittsalter sind regelmäßige Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen elementar, um die Leitungsebene und das Fachpersonal mit den notwendigen Kenntnissen und Kompetenzen für einen verantwortungsvollen Umgang mit den neuen digitalen Möglichkeiten auszustatten. Für mittlere und insbesondere kleine Betriebe mit begrenzten finanziellen und personellen Ressourcen stellen Schulungsmaßnahmen aber immer eine Belastung dar. Eine staatliche Beteiligung an den Schulungskosten, steuerlich absetzbare Schulungskosten oder Angebote für Vor-Ort-Schulungen sind Möglichkeiten, wie diese Betriebe bei der Durchführung von Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen unterstützt werden könnten.

IT-Fachkräftemangel beseitigen

Zur Etablierung und Festigung einer adäquaten Sicherheitskultur in einem Betrieb reichen Schulungsmaßnahmen für das Bestandspersonal unter Umständen nicht aus, weshalb die dafür erforderlichen IT-Fachkompetenzen auch durch Neuanstellungen auf- und ausgebaut werden müssen. Die schwierige Suche nach qualifiziertem Fachpersonal stellt aber eine wesentliche Herausforderung dar. So fehlt es in Deutschland generell an IT-Fachkräften, außerdem sollten geeignete Bewerber/innen neben Kompetenzen in den Bereichen Prozess-IT und Informationssicherheit auch noch branchenspezifisches Wissen im Wasserfach mitbringen. Möglichkeiten zur Entschärfung des IT-Fachkräftemangels für die Wasserwirtschaft bestehen darin, dass Lerninhalte zur Informationssicherheit in die Rahmenlehrpläne und Ausbildungsordnungen der wasserwirtschaftlichen Aus- und Weiterbildungsberufe aufgenommen werden und ebenfalls in den Curricula von Studiengängen der Wasserwirtschaft (stärkere) Berücksichtigung finden.

Freiwillige Aktivitäten kleiner und mittlerer Betreiber unterstützen

Kleine und mittlere Betreiber setzen Maßnahmen zum Schutz ihrer IT-Systeme auf freiwilliger Basis um. Weil dazu aber vielfach die nötigen Ressourcen fehlen, benötigen sie hierfür fachliche, personelle und finanzielle Unterstützung.



Bekanntheit von Austauschplattformen und Unterstützungsleistungen erhöhen

Zum Thema Informationssicherheit existiert für Betreiber der Wasserwirtschaft aller Größenklassen bereits ein breites Spektrum an (meist kostenlosen) Unterstützungsangeboten in Form von Austauschplattformen, Informationsmaterialien, Beratungen oder praktischen Hilfestellungen, die durch diverse staatliche und/oder privatwirtschaftliche Institutionen bereitgestellt werden. Festzustellen ist aber, dass diese Angebote von Betreibern der Wasserwirtschaft noch vergleichsweise selten genutzt werden (Kap. 5.3). Dabei kann beispielsweise die Teilnahme an Austauschplattformen wie UP KRITIS oder Allianz für Cybersicherheit auch für kleine und mittlere Betreiber von großem Nutzen sein, da sie hier von den Erfahrungen und Erkenntnissen von anderen Unternehmen und insbesondere von KRITIS-Betreibern profitieren können. Es gilt daher, nach möglichen Ursachen für die geringe Inanspruchnahme der Angebote durch kleine und mittlere Betreiber zu suchen, um ggf. bestehenden Hürden entgegenzuwirken.

Die Nutzung von freiwilligen Unterstützungsangeboten ist nur möglich, wenn sie den Betreibern auch hinreichend bekannt sind. Messen aber viele kleine und mittlere Unternehmen dem Thema Informationssicherheit nicht die erforderliche Bedeutung zu, so ist auch nicht zu erwarten, dass sie von sich aus auf die Angebote aufmerksam werden. Vor diesem Hintergrund erscheint eine stärkere aktive Bewerbung der Angebote in der Wasserwirtschaft zielführend. Dies könnte – ggf. mit staatlicher finanzieller Unterstützung – entweder direkt durch die anbietenden Institutionen oder angebotsübergreifend durch die Fachverbände der Wasserwirtschaft bzw. durch staatliche Akteure (z. B. BSI, Wasserbehörden) erfolgen. Außerdem sollten die zuvor vorgeschlagenen Sensibilisierungskampagnen auch gleichzeitig zur Steigerung des Bekanntheitsgrades von Unterstützungsangeboten genutzt werden.

Eine weitere Ursache für die bisher nur zögerliche Nutzung von Unterstützungsleistungen könnte in der Unübersichtlichkeit der bestehenden Angebotspalette liegen, wobei auch ständig neue Angebote hinzukommen. Angesichts der großen Vielfalt an (teilweise auch konkurrierenden) Inhalten, Formaten und Anbietern könnte es Betreibern mit begrenzten zeitlichen und fachlichen Ressourcen schlichtweg schwerfallen, das für sie passende Angebot auszuwählen. Abhilfe könnte hier die Entwicklung eines Onlineportals als Orientierungshilfe schaffen, auf dem die vorhandenen Angebote kontinuierlich an den spezifischen Bedürfnissen von Betreibern unterschiedlicher Größe, technischer und digitaler Ausstattung, Organisationsform und weiterer Faktoren gespiegelt und für jede Art von Betrieb konkrete Vorschläge gemacht werden, welche Angebote jeweils am besten geeignet sind.

Finanzielle Unterstützung für freiwillige Maßnahmen

Der hohe finanzielle Aufwand für die Umsetzung von Maßnahmen der Informationssicherheit stellt für Betreiber aller Größenklassen eine große Herausforderung dar. Während jedoch große KRITIS-Betreiber von Gesetzes wegen die dafür erforderlichen Mittel aufbringen müssen, stehen kleine und mittlere Betreiber vor der Wahl, die begrenzt vorhandenen Ressourcen in die Verbesserung der Informationssicherheit oder in andere wichtige Vorhaben wie die Modernisierung der Infrastruktur zu investieren. Die im vorliegenden Projekt durchgeführten Befragungen deuten darauf hin, dass Informationssicherheit in den Unternehmensleitungen eher als Kostentreiber gesehen und ihr Nutzen nicht immer erkannt wird.

Eine finanzielle Unterstützung für freiwillige Maßnahmen zur Verbesserung der Informationssicherheit kann kleine und mittlere Betreiber entlasten und Anreize schaffen, sich stärker mit dem Thema zu beschäftigen. Bestehende Förderinstrumente des Bundes wie z. B. »Digital Jetzt« des BMWi (2020) und »go-digital« des BMWK (2022b) für die Digitalisierung von KMU oder »IKU – Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen« der KfW (o.J.) für die Infrastrukturmodernisierung enthalten in der Regel zwar auch Fördermöglichkeiten mit Bezug zur Informationssicherheit. Allerdings richten sich solche Förderprogramme nicht speziell an die Wasserwirtschaft, weshalb sie in der Branche ggf. wenig bekannt sind und daher besser beworben werden sollten. Ergänzend dazu könnten speziell auf kleine und mittlere Betreiber der Wasserwirtschaft und hier bestehende besondere Anforderungen (vor allem Schutz von Prozess-IT) zugeschnittene Förderprogramme eine Möglichkeit bieten, um die Wirkung von Förderangeboten und damit den Umfang an freiwilligen Aktivitäten der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft zu steigern. Voraussetzung für spezifische Förderangebote wären klar definierte und messbare Ziele, die von den Betrieben erreicht werden müssen, um von der Förderung zu profitieren. Eine Möglichkeit hierzu böte die Umsetzung der Basisanforderungen des B3S WA (Kap. 5.2.4.5). Als ergänzende bzw. alternative Option für eine finanzielle Unterstützung könnten Investitionen in die Informationssicherheit steuerlich absetzbar gemacht werden.

B3S WA kostenfrei zugänglich machen

Für kleine und mittlere Betreiber bietet der B3S WA durch die Berücksichtigung nur der Basisanforderungen eine geeignete Methode, um mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand eine Grundabsicherung der IT-Systeme zu erreichen (Kap. 5.2.4.5). In den Betreiberbefragungen wurden die Kosten für den B3S WA allerdings als ein Hemmnis für dessen Anwendung genannt (Kap. 5.4). Durch einen kostenfreien Zugang zum B3S WA könnte diese Hürde



einfach beseitigt werden. Eine Möglichkeit dazu wäre, dass die bei den Fachverbänden für die Erarbeitung und Umsetzung des B3S WA sowie die beim BSI für die Eignungsfeststellung anfallenden Kosten vom Bund übernommen werden.

Externe Dienstleister stärker in die Pflicht nehmen

Da mittlere und insbesondere kleine Betriebe vielfach nicht in der Lage sind, ausreichende eigene IT-Kompetenzen aufzubauen, sind sie bei Beschaffung, Betrieb, Wartung und Absicherung ihrer IT-Systeme im hohen Maße auf externe Dienstleister angewiesen. Allerdings setzt auch die Vergabe von Leistungen spezifische Fachkenntnisse voraus. So müssen z. B. Aspekte der Informationssicherheit bereits in der Planungsphase von Digitalisierungsvorhaben berücksichtigt werden, um entsprechende Anforderungen in das Lastenheft für die Ausrüster aufzunehmen, außerdem muss deren Einhaltung geprüft und ggf. reklamiert werden. Fehlt es jedoch an betriebseigener IT-Expertise, so hängt das erreichte Sicherheitsniveau im Wesentlichen davon ab, welchen Stellenwert die beauftragten Fachplaner, Ausrüster oder Dienstleister dem Thema Informationssicherheit einräumen. Um vor diesem Hintergrund externe Dienstleister stärker in die Pflicht zu nehmen, bestehen verschiedene Möglichkeiten. Beispielsweise könnten für kleine und mittlere Betreiber Mustervorlagen für Lastenhefte und andere vergaberelevante Unterlagen bereitgestellt werden (z. B. durch die Branchenverbände DVGW und DWA und mit Unterstützung durch das BSI), die branchenspezifische grundlegende Anforderungen an die Informationssicherheit enthalten (BSI 2015b, S. 119). Alternativ bzw. ergänzend könnten zu beachtende vergaberechtliche Regelungen dahingehend erweitert werden, dass Aspekte der Informationssicherheit stärkere Berücksichtigung finden.

Unternehmenskooperationen fördern

Wenn mittlere oder kleine Betreiber die zur Absicherung ihrer IT-Systeme erforderlichen personellen und fachlichen Ressourcen nicht vollständig im eigenen Betrieb vorhalten können, bieten sich ggf. Kooperationen mit anderen Betreibern in ähnlicher Lage an, um die erforderlichen Ressourcen gemeinschaftlich aufzubauen und zu nutzen. Mögliche Formen der Zusammenarbeit reichen von betriebsübergreifenden Schulungs- und Sensibilisierungsmaßnahmen über die Anstellung eines Beauftragten für Informationssicherheit für alle beteiligten Betriebe bis hin zur Gründung eines gemeinsamen Tochterunternehmens für die IT-Dienstleistungen. Die politische Unterstützung bzw. der Abbau möglicher Hemmnisse für solcher Formen der Zusammenarbeit (z. B. steuerliche Nachteile) bieten hier Ansätze, um die Etablierung solcher Unternehmenskooperationen zu fördern.

Optimierung der Informationssicherheit von KRITIS-Betreibern

Verbesserungspotenziale bei KRITIS-Betreibern betreffen aktuell insbesondere in organisatorischer Hinsicht den Aufbau und Betrieb von ISMS sowie in technischer Hinsicht den Umgang mit Softwareschwachstellen (Kap. 5.4.6). Vor dem Hintergrund, dass Sicherheitsmängel im Bereich von ISMS im Sektor Wasser deutlich häufiger identifiziert wurden als in anderen KRITIS-Sektoren (Kap. 5.4.2), könnte es sich als sinnvoll erweisen, nach möglichen systemischen Gründen für diese organisatorischen Schwächen zu suchen, um auf dieser Grundlage erforderliche Anpassungen in den bestehenden Unterstützungsangeboten des BSI und anderer Institutionen für KRITIS-Betreiber der Wasserwirtschaft vornehmen zu können.

Eine stärkere Unterstützung für KRITIS-Betreiber im Bereich des Softwareschwachstellenmanagements könnte durch die Etablierung eines Informationsdienstes erreicht werden, durch den die für die Wasserwirtschaft relevanten Schwachstellen aus der Fülle der täglichen Meldungen vorselektiert werden. Ein solches branchenspezifisches Angebot existiert zurzeit noch nicht und könnte beispielsweise durch das BSI oder durch privatwirtschaftliche Institutionen wie DVGW, DWA oder KDW betrieben werden. Die große Herausforderung in komplexen Prozess-IT-Umgebungen besteht allerdings darin, dass zwischen den Risiken der Softwareschwachstelle einerseits und von Fehlfunktionen durch die Installation der Sicherheitsupdates andererseits abgewogen werden muss (Kap. 5.1.2.3). Abhilfe könnte hier ein staatlich geförderter Aufbau und Betrieb geeigneter Testumgebungen für gängige Prozess-IT-Komponenten der Wasserwirtschaft z. B. durch innovative KRITIS-Betreiber oder Einrichtungen aus dem forschungs- und/oder universitären Bereich schaffen, die für alle KRITIS-Betreiber zugänglich wären und die eine Überprüfung der korrekten Funktionsweise von Sicherheitsupdates ermöglichen.

Gesetzliche Rahmenbedingungen weiterentwickeln

Für den Gesetzgeber bestehen verschiedene Gestaltungsoptionen, um das Niveau der Informationssicherheit in der deutschen Wasserwirtschaft insgesamt anzuheben.

Begrifflichkeiten klären

Der Begriff »Kritische Infrastrukturen« wird derzeit sowohl für die Bezeichnung von besonders schützenswerten Sektoren (z. B. Wasser, Energie, Ernährung; Kap. 2.3) als auch für die Definition von Anlagen verwendet, welche die Schwellenwerte der BSI-KritisV erreichen und damit unter die Regelungen des BSIG fallen (Kap. 5.2.2.2). Dies führt aktuell dazu, dass einerseits *alle*



Betreiber der Wasserwirtschaft unabhängig ihrer Größe zu den *Kritischen Infrastrukturen* zählen und insofern generell dafür Sorge tragen müssen, die Versorgungssicherheit jederzeit auch durch einen ausreichenden Schutz ihrer IT-Systeme gewährleisten zu können, andererseits aber nur Betreiber von *Kritischen Infrastrukturen i. S. d. BSIG* auch gesetzlich dazu verpflichtet sind, ihre IT-Systeme nach dem Stand der Technik abzusichern. Wie die durchgeführten Befragungen es allerdings nahelegen, kann die doppelte Begriffsverwendung bei kleinen und mittleren Betreibern mitunter das Missverständnis auslösen, dass für sie Informationssicherheit weniger bzw. keine Relevanz hat, weil die Schwellenwerte der BSI-KritisV nicht erreicht werden (Kap. 5.4.3 u. 5.4.4). Mit einer differenzierteren Begriffsverwendung, wie dies gegenwärtig durch das zu entwickelnde KRITIS-Dachgesetz angestrebt wird, könnte diese Fehlannahme vermieden werden und das Verständnis dafür gesteigert werden, dass sich die Einstufung als KRITIS-Betreiber i. S. d. BSIG an den vorhandenen Notfallkapazitäten des Bundes orientiert und daher nur große Betreiber adressiert.

Umsetzung der NIS-2-Richtlinie in nationales Recht

Im Zuge der Umsetzung der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht wird sich der Gesetzgeber mit der Frage auseinandersetzen müssen, ob die bisher für KRITIS-Betreiber geltenden Maßnahmen zur Prävention (§ 8a BSIG) und zur Bewältigung (§ 8b BSIG) von betriebskritischen IT-Sicherheitsvorfällen künftig weitgehend unverändert auch für die neu verpflichteten mittleren Unternehmen übernommen werden sollen, oder ob für diese Gruppe weniger strenge Anforderungen an die Informationssicherheit gestellt werden. Die NIS-2-Richtlinie lässt eine Abstufung des Anforderungsniveaus in Abhängigkeit der Unternehmensgröße prinzipiell zu (Art. 21 Abs. 1 NIS-2-Richtlinie). Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Befragungen haben gezeigt, dass die Erfüllung der gesetzlichen Anforderungen nach § 8a, b BSIG selbst für große KRITIS-Betreiber zeit- und kostenaufwendig ist und generell eine Herausforderung darstellt (Kap. 5.4). Insofern könnte ein abgestuftes Vorgehen sinnvoll sein, um einerseits mittlere Betreiber, die über geringere fachliche und personelle und finanzielle Ressourcen verfügen, nicht zu überfordern und andererseits auch den behördlichen Vollzugsaufwand in Grenzen zu halten. Der Aufbau des B3S WA böte hierfür eine Möglichkeit, indem mittlere Betreiber zur Umsetzung der Basisanforderungen (oder dazu gleichwertige Anforderungen) und große Unternehmen (wie bisher) zusätzlich zur Umsetzung der Standardanforderungen (oder dazu gleichwertige Anforderungen) gesetzlich verpflichtend werden. Es müsste allerdings geprüft werden, ob die Basisanforderungen zur Erreichung des Stands der Technik, wie von der NIS-2-Richtlinie verlangt, ausreichen.

Gesetzliche Mindestanforderungen für kleine Betreiber prüfen

Auch nach Überführung der Vorgaben der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht wird es für die große Zahl an kleinen Betreibern der Wasserwirtschaft keine gesetzlichen Vorgaben zur Informationssicherheit geben (Kap. 5.2.3). Allerdings ist das Szenario gleichzeitig auftretender betriebskritischer IT-Störungen bei mehreren kleinen Betreibern beispielweise durch parallel ausgeführte Cyberangriffe, die im Zuge der Digitalisierung tendenziell erleichtert werden, nicht ganz auszuschließen, wobei ein zeitgleicher Ausfall mehrerer kleiner Betriebe in der Summe ebenfalls die Kompensationsfähigkeit der Notfallvorsorge überschreiten könnte (Kap. 5.2.2.3). Als alternative Option zur Förderung von freiwilligen Aktivitäten wären vor diesem Hintergrund gesetzliche Mindestanforderungen an die Informationssicherheit ggf. auch für kleine Betreiber zu diskutieren.

Eine Möglichkeit dazu besteht darin, bei den regelsetzenden Fachverbänden DVGW und DWA darauf hinzuwirken, dass auf kleine Betreiber der Wasserwirtschaft zugeschnittene Mindeststandards der Informationssicherheit als Arbeitsblätter im Regelwerk umgesetzt werden. Diese (oder dazu gleichwertige) Mindeststandards müssten dann im Wege des deutschen Wasserrechts als allgemein anerkannte Regeln der Technik von *allen* Betreibern verpflichtend eingehalten werden (Kap. 5.2.1). Ähnlich wie im EnWG (§ 49 Abs. 2) könnte auch im Wasserrecht zusätzlich eine Vermutungsklausel für die technischen Regelwerke von DVGW und DWA aufgenommen werden, um die Beachtung dieser Mindeststandards durch Betreiber weiter zu befördern.

Alternativ könnte im Zuge der Umsetzung der NIS-2-Richtlinie in deutsches Recht der Anwendungsbereich der neuen Regelungen des BSIG über mittlere und große Unternehmen hinaus auch auf kleine Betreiber ausgedehnt werden. Auch hierfür wären mit Blick auf diese Zielgruppe geeignete Mindestanforderungen zu entwickeln, die einerseits ein ausreichendes Schutzniveau bieten, die andererseits aber auch Rücksicht auf die sehr begrenzten Ressourcen bei kleinen Betreibern nehmen. Vorbild könnten hier ggf. die vom bayerischen LSI für kleine Trinkwasserversorger (Kap. 5.3.5) bzw. die durch Löwen et al. (2023, S. 104 ff.) im Rahmen des Forschungsprojekts subKRITIS (Kap. 5.4.5) für kleine und mittlere Kläranlagen entwickelten Checklisten sein.

Verpflichtende regelmäßige Schulungsmaßnahmen

Gemäß Art. 20 Abs. 2 NIS-2-Richtlinie wird es künftig für Mitglieder der Leitungsebene von mittleren und großen Betrieben verpflichtende Schulungsmaßnahmen im Bereich der Informationssicherheit geben, außerdem sollen die Betreiber aufgefordert werden, entsprechende Schulungsmaßnahmen regelmäßig allen Mitarbeiter/innen anzubieten. Angesichts der Notwendigkeit, dass



Sicherheitsbewusstsein für die Gefährdungen der Informationssicherheit in sämtlichen Betrieben der Wasserwirtschaft und auch auf der Fachkräteebene zu schärfen, könnte im Zuge der Umsetzung dieser Vorgaben in deutsches Recht geprüft werden, die gesetzliche Pflicht für regelmäßige Schulungen auf alle Betriebe unabhängig ihrer Größe und für alle Unternehmensebenen einzuführen.

Wissenslücken schließen

Im Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit »Digital. Sicher. Souverän.« für den Zeitraum von 2021 bis 2026 werden wichtige Forschungsschwerpunkte im Bereich des Schutzes Kritischer Infrastrukturen genannt. Dazu gehören u. a. neue Lösungen und Konzepte zur Bewertung und Analyse der Angriffspotenziale und mögliche Gegenmaßnahmen bei Kritischen Infrastrukturen, neue Schutzkonzepte für die hier vorhandenen IT-Infrastrukturen, Lösungen zur Erkennung sicherheitsrelevanter Ereignisse in Echtzeit oder Maßnahmen zur Schärfung des Problembewusstseins bei KRITIS-Betreibern (BMBF 2021b, S. 19).¹³⁶ Darüber hinausgehende, speziell auf die Wasserwirtschaft ausgerichtete Forschungsbedarfe werden insbesondere in den folgenden Bereichen gesehen.

Empirische Datenlage zum Stand der Informationssicherheit insbesondere bei kleinen und mittleren Betreibern erhöhen

Fundierte Kenntnisse zum jeweils aktuellen Stand der Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft sind für Politik, Behörden, Verbände und Betreiber notwendig, um mögliche Gefährdungen frühzeitig erkennen und geeignete Maßnahmen rechtzeitig ergreifen zu können. Durch die alle 2 Jahre durchzuführenden Nachweisverfahren nach § 8a Abs. 3 BSIG verfügt das BSI über detaillierte Kenntnisse zum Stand der Informationssicherheit bei KRITIS-Betreibern. Erkenntnisse aus dem Nachweisverfahren veröffentlicht das BSI in seinen jährlichen Berichten zur Lage der IT-Sicherheit, bisher allerdings nur in stark aggregierter Form (Kap. 5.4.2). Im Sinne der Transparenz wären Möglichkeiten für eine ausführlichere Berichterstattung zu eruieren, um Politik, Öffentlichkeit, Wissenschaft und nicht zuletzt auch Akteuren der Wasserwirtschaft eine bessere Einschätzung des Sicherheitsniveaus zu ermöglichen, ohne dass gleichzeitig durch Preisgabe von zu vielen Informationen die Sicherheit gefährdet würde.

Im Vergleich dazu liegen für kleine und mittlere Unternehmen, die nicht unter die Regelungen des BSIG fallen, derzeit nur äußerst lückenhafte

¹³⁶ In der Agenda Cybersicherheitsforschung des BMBF (2022) wird das Ziel, sichere und widerstandsfähige digitale Systeme in Deutschland zu schaffen, bekräftigt, die Informationssicherheit in Kritischen Infrastrukturen wird davon abgesehen aber nicht weiter vertieft.



Informationen zum Stand der Informationssicherheit vor. Die vorhandenen Untersuchungen sind entweder älteren Datums (KRITIS-Sektorstudie von 2015) oder basieren auf kleinen, nicht repräsentativen Stichproben (Bestandsaufnahme von Löwen et al. 2023), was genauso für die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten qualitativen und quantitativen Erhebungen gilt. Weitere empirische Studien sind daher dringend geboten, um den Status quo der Informationssicherheit sowie Herausforderungen und Handlungsnotwendigkeiten bei kleinen und mittleren Betreibern vertieft zu untersuchen. Weil die Bestimmung des Sicherheitsniveaus angesichts der sich dynamisch verändernden Bedrohungslagen sowie des durch die Digitalisierung angestoßenen Wandels in den IT-Infrastrukturen immer nur eine Momentaufnahme darstellt, sollte der Stand der Informationssicherheit in regelmäßigen Zeitabständen erfasst werden.

Testumgebungen für Sicherheitsanalysen

Prozess-IT-Umgebungen können durch den Einsatz vielfältiger IT-Komponenten und die Vernetzung vieler Aggregate und Anlagen selbst in kleineren Betrieben eine hohe Systemkomplexität erreichen, wobei die Komplexität mit ansteigender Betriebsgröße tendenziell zunimmt. In komplexen Systemumgebung stellt aber bereits die Ermittlung von spezifischen Gefährdungen der Informationssicherheit eine schwierige Aufgabe dar. Hierfür notwendige umfassende Sicherheitsanalysen wie Penetrationstests oder Schwachstellenanalysen sind im Echtzeitbetrieb aufgrund der Ausfallrisiken in der Regel nicht möglich. Abhilfe sollen hier Testumgebungen schaffen, die als Simulationen oder als physisches Modell der Anlagen und IT-Systeme bzw. einer Kombination davon realisiert werden. Testumgebungen ermöglichen es auch, Szenarien von Cyberangriffen realitätsnah zu simulieren, um relevante Gefährdungen zu identifizieren, optimale Systemkonfigurationen als Best-Practice-Beispiele zu ermitteln und angepasste Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Schließlich könnten sie für die Überprüfung der korrekten Funktionsweise von Sicherheitsupdates nützlich sein. Eine Testumgebung für die Wasserwirtschaft wurde z. B. im BMBF-geförderten Forschungsprojekt »Aqua-IT-Lab« (Labor für IT-Sicherheit bei Wasserversorgern) erforscht und in die Praxis umgesetzt, wobei hier ein Großteil der Anlage simuliert, wichtige Anlagenbereiche aber mit Echtzeitkomponenten physisch in die Testumgebung integriert wurden. Allerdings stellt die große Komplexität und Heterogenität von Prozess-IT-Umgebungen in der Wasserwirtschaft eine große Herausforderung für die Entwicklung von breit anwendbaren, zuverlässig funktionierenden und kostengünstigen Testumgebungen dar, sodass hier weiterer Forschungsbedarf besteht (Leps 2018b). Vor diesem Hintergrund sollte die Forschungsförderung für die Weiterentwicklung von Testumgebungen für die Wasserwirtschaft fortgesetzt und ggf. ausgebaut werden.



Definition einer sicherheitsfreundlichen Standard-IT-Architektur

Vor dem Hintergrund der Komplexität und Heterogenität bestehender Prozess-IT-Installationen in wasserwirtschaftlichen Betrieben wurde bereits in der KRITIS-Sektorstudie (BSI 2015b) die Entwicklung eines Standardmodells für IT-Architekturen in der Prozess-IT angeregt, das unterschiedliche Anforderungen der Informationssicherheit herausstellt und als eine Art Leitbild bzw. Best-Case-Beispiel in der Wasserwirtschaft verfolgt werden könnte (BSI 2015b, S. 122 f.). Soweit bekannt ist dies bisher noch nicht erfolgt. Der Vorschlag könnte im Rahmen eines geförderten Forschungsprojekts realisiert werden.

6 Schlussbemerkung

Seit dem Einzug von Informationstechnik in den 1980er Jahren spielen Digitalisierungsprozesse für die Betreiber der Abfall- und Wasserwirtschaft eine immer wichtigere Rolle. Standen bisher meist die Optimierung und Automatisierung von einzelnen Betriebs- und Verwaltungsprozessen zur Erhöhung der Effizienz und Produktivität und Verbesserung der Arbeitsbedingungen, aber auch für die Aufrechterhaltung und Steigerung der Versorgungs- bzw. Entsorgungssicherheit im Vordergrund, werden künftige Potenziale der Digitalisierung vor allem im Kontext der großen Herausforderungen unserer Zeit, wie der Erreichung von Nachhaltigkeitszielen, der Beherrschung von Klimawandelfolgen, der Ressourcenknappheit oder dem Fachkräftemangel, gesehen. Erwartet wird, dass digitale Innovationen beispielsweise dabei helfen, den Wasserverbrauch zu reduzieren und die Wasserqualität zu sichern, die Infrastrukturen der Abfall- und Wasserwirtschaft energieeffizienter zu betreiben oder die Rückgewinnungsquoten für höherwertige Materialien aus Abfällen zu steigern. Außerdem sollen sie einen besseren Umgang mit klimabedingten Extremen wie Trockenheit oder Starkregen ermöglichen. Erreicht werden soll dies durch eine immer stärkere Vernetzung und Integration bestehender digitaler Einzelsysteme und vorhandener Daten der verschiedenen Wertschöpfungsstufen innerhalb der Betriebe, aber auch über die Betriebs-, Organisations- und Sektorgrenzen hinaus. Auf dem Weg zu einer Wasserwirtschaft 4.0 bzw. Abfallwirtschaft 4.0 haben die Betriebe noch zahlreiche Hindernisse zu überwinden. Aus der Analyse haben sich folgende übergreifende Handlungsfelder gezeigt:

- Vielen mittleren und insbesondere kleinen Betrieben fehlen die finanziellen, fachlichen und personellen Ressourcen für die Realisierung größerer Digitalisierungsvorhaben. Damit auch diese Betriebe von den Potenzialen der Digitalisierung profitieren können, müssen sie durch Kommunen, Länder und Bund unterstützt werden. Beratungsangebote, finanzielle Förderprogramme und Anreize für überbetriebliche Kooperationen bieten Möglichkeiten hierzu.
- Viele digitale Innovationen können erst eingeführt werden, wenn die notwendigen infrastrukturellen Rahmenbedingungen gegeben sind. Dazu gehört insbesondere eine zuverlässige und flächendeckende Breitbandversorgung, an der es in manchen ländlichen Regionen aber noch mangelt. Für einige digitale Anwendungen sind außerdem spezielle Funknetze auf Basis der LoRaWAN-Technologie von Interesse, deren Auf- und Ausbau in der Regel nur durch staatliche Unterstützung möglich sind. Die Bereitstellung öffentlicher Cloudinfrastrukturen würde vor allem kleineren Betreibern, die selber keine leistungsfähigen IT-Systeme aufbauen und unterhalten können,



die Teilhabe an der digitalen Entwicklung erleichtern, ohne sich dabei in Abhängigkeiten zu kommerziellen Cloudanbietern begeben zu müssen.

- › Die Einführung digitaler Innovationen erfordert meist einen Kompetenzaufbau bei den Beschäftigten, um einen fachgerechten und sicheren Umgang mit den Technologien sicherzustellen. Unterstützung hierfür kann durch die finanzielle Förderung von Schulungsmaßnahmen in den Bereichen Digitalisierung und Informationssicherheit, den Ausbau der Schulungsangebote oder durch die Aufnahme von entsprechenden Lerninhalten in die Rahmenlehrpläne und Ausbildungsordnungen sowie in die Curricula der einschlägigen Studiengänge geleistet werden.
- › In vielen Bereichen kann eine proaktive Rechtssetzung Anreize für eine Digitalisierung schaffen. Dazu gehören neben Anpassungen im Abfall- und Wasserrecht (z. B. Anforderungen an die Kennzeichnung von Produkten oder gesetzliche Rahmenbedingungen für dynamische Preismodelle) beispielsweise auch Datenschutzbestimmungen für betriebliche Daten, die etwaige Rückschlüsse auf die Lebensgewohnheiten der Abfallverursacher bzw. Wasserverbraucher zulassen. Haftungsfragen für weitgehend autonome Systeme oder im Kontext von Datenmissbrauch sind ebenfalls zu klären.
- › Um den Einsatz digitaler Technologien zu fördern und überbetriebliche Kooperationen zu ermöglichen, ist die Standardisierung von Datenschnittstellen voranzutreiben. Dafür gilt es, die Kompatibilität, Lesbarkeit und Zugänglichkeit von Daten zu befördern sowie ihre Nutzung in den jeweiligen Sektoren zu bewerben.
- › Hinsichtlich der Technikentwicklung sollten bestehende Programme der Forschungsförderung fortgeschrieben und ausgebaut werden. Insbesondere die Potenziale von digitalen Technologien zur indirekten Verhaltenssteuerung sollen im Rahmen von Reallaboren (Abfallvermeidung, Steuerung von Wasserverbräuchen) weiter erforscht werden. Auch die nicht zielgerichtete Wasseranalytik, bei der große Datensätze zu den in einer Wasserprobe enthaltenen Substanzen mithilfe von KI ausgewertet werden sowie die Entwicklung von Testumgebungen für die Simulation von Cyberangriffen könnten künftige Schwerpunkte für Forschungsförderung darstellen. Wichtig ist zudem, die Überführung von Forschungsergebnissen in marktfähige Lösungen zu unterstützen und die begleitende und/oder fortführende Zusammenarbeit mit relevanten Multiplikatoren des Sektors in den Forschungsprojekten vorzusehen. Darüber hinaus wäre die Verbreitung und der Nutzen einzelner digitaler Technologien regelmäßig zu evaluieren und Auswirkungen auf Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu untersuchen. Dabei sollen nicht nur einzelne Technologien in den Blick genommen, sondern Gesamtsysteme betrachtet werden, um zu evaluieren, inwieweit die Anwendung und Nutzung digitaler Technologien Reboundeffekte birgt und ökologischen Vorteile durch einen hohen Material- oder Energieverbrauch konterkariert.



Für eine zielgerichtete Förderung von Digitalisierungsvorhaben in der Abfall- und Wasserwirtschaft, die nicht nur betriebswirtschaftliche Vorteile zum Ziel haben, sondern auch zur Bewältigung von künftigen Herausforderungen beitragen sollen, haben sich aus der Analyse im TAB-Projekt folgende Aspekte als besonders wichtig herausgestellt:

- Welche digitalen Technologien für einen ausgewählten Betrieb den größten Nutzen bringen, ist von seiner Größe und von weiteren betrieblichen und lokalen Gegebenheiten (z.B. Größe und Struktur des Ver- bzw. Entsorgungsgebiets, Anlagenbestand, Personalsituation, Mobilfunknetzabdeckung) abhängig. Ausgehend von den unternehmensspezifischen Faktoren sind die zentralen Herausforderungen und die dazu passenden digitalen Lösungen für jedes Unternehmen zu ermitteln. Förderfähige Beratungsdienstleistungen sollten vor diesem Hintergrund nur Beratungsunternehmen mit profunden Kenntnissen der Abfall- bzw. Wasserwirtschaft erbracht werden.
- Digitalisierungsvorhaben sollten immer in eine Gesamtstrategie zur Digitalisierung eines Unternehmens eingebettet werden. Das Vorantreiben isolierter und auf einzelne Systeme bezogenen Digitalisierungsprojekte mag zwar kurzfristig Effizienzvorteile bringen. Mittelfristig bestehen die größten Potenziale hingegen in der digitalen Verknüpfung von Anlagen, Unternehmensbereichen und vor- und nachgelerten Wertschöpfungsprozessen. So führt beispielsweise der technologische Fortschritt in einzelnen Wertschöpfungsstufen der Abfallwirtschaft zur Prozessoptimierung, einen Mehrwert für die Kreislaufwirtschaft ergibt sich jedoch erst dann, wenn wertschöpfungsstufen- und branchenübergreifend digitale Lösungen vernetzt und integriert werden. Insbesondere zur Bewältigung von klimawandelbedingten Herausforderungen sind digital unterstützte interorganisationale Zusammenschlüsse und systemische kooperative Ansätze auch zwischen den Branchen und Sektoren unerlässlich.
- Gegenwärtig sind vielfach weder die Vorteile noch die Kosten für Einführung, Betrieb, und Instandhaltung von digitalen Technologien monetär genau quantifizierbar, sodass Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit generell schwierig sind. Auf die Betriebe könnte außerdem hohe Folgekosten zukommen, beispielsweise infolge von notwendigen Mitarbeiterschulungen oder Maßnahmen der Informationssicherheit. Mehr Wissen zu den betriebswirtschaftlichen Auswirkungen der Digitalisierung der Abfall- oder Wasserwirtschaft ist daher dringend nötig.
- Trotz der hohen Erwartungen, die an digitale Technologien gerichtet werden, stellen sie immer nur einen Teil der Lösung zur Bewältigung der gesellschaftlichen Herausforderungen dar. In der Wasserwirtschaft beispielsweise ermöglichen sie zeitnah eine optimierte und überbetriebliche Nutzung der vorhandenen Infrastrukturen wie Trinkwasserspeicher oder Regenüberlaufbecken, um besser auf Extremwetterereignisse oder Wasserversorgungs-



engpässe reagieren zu können. Auf längere Sicht jedoch werden sie notwendige bauliche und organisatorische Anpassungen an den physischen Infrastrukturen der Wasserwirtschaft und darüber hinaus (z. B. die Gestaltung von klimaresilienten Schwammstädten¹³⁷) nicht ersetzen können. Auch in der Abfallwirtschaft sind digitale Lösungen nur ein Teil eines breiten Maßnahmenbündels zur Etablierung der Kreislaufwirtschaft, zu welchem auch beispielsweise ein ökologisches Design, die Reparierbarkeit oder die Wiederverwendung von Produkten gehören. Vor diesem Hintergrund ist die Förderung digitaler Lösungen vor allem dann sinnvoll, wenn sie als Teil einer ganzheitlichen Strategie zur Begegnung der künftigen Herausforderungen betrachtet werden.

- Digitale Lösungen tragen zur Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen erst dann bei, wenn sie zielorientiert eingesetzt werden. So ist ihre Anwendung in der Abfallwirtschaft aus ökologischer Sicht vor allem dann gewinnendbringend, wenn sie nicht nur dem Recycling, sondern auch der Reparierbarkeit und Wiederverwendung von Produkten dienen. In der Wasserwirtschaft entfalten sie vor allem dann Vorteile für die Wasserqualität, den Ressourcenschutz und die Beschäftigten, wenn Lösungen zur Überwachung der Trinkwasserqualität, zur Senkung des Wasserverbrauchs oder zur Entlastung der Mitarbeiter/innen bei monotonen Aufgaben (z. B. Bewertung von Kanalschäden, manuelle Sortierung schädlicher Abfälle) eingeführt werden.
- Gerade der Umgang mit krisenhaften Ereignissen erfordert schnelle Entscheidungen und damit ein hohes Maß an Erfahrungswissen beim Betriebspersonal. Steigt durch den Einsatz digitaler Technologien allerdings der Automatisierungsgrad in den Betrieben immer weiter, so können entscheidende Kompetenzen des Personals im Umgang mit Störungen und Krisen auf lange Sicht verloren gehen. Gerade weil es sich bei der Wasserversorgung bzw. der Abwasser- und Abfallentsorgung um Kritische Infrastrukturen handelt, sind bei der Einführung neuer digitaler Lösungen immer auch die Auswirkungen auf das Personal mitzudenken.
- Mit der zunehmenden Vernetzung und Integration von digitalen Anwendungen und Systemen steigt das Risiko, dass sich Bedienfehler oder technische Störungen in Teilsystemen durch Kaskadeneffekte rasch auf das Gesamtsystem auswirken und zu größeren Ausfällen führen können. Außerdem erhöht sich durch die Digitalisierung die Anfälligkeit der Abfall- und Wasserwirtschaft gegenüber Cyberangriffen. Dies vor Augen ist Sorge zu tragen, dass sich die Digitalisierung nicht selbst zu einer Herausforderung für die

137 Das Prinzip der Schwammstadt beschreibt die Fähigkeit einer Stadt, mit Wetterextremen (z.B. Starkregen und Hitzewellen) umzugehen. Eine Schwammstadt kann bei Starkregen Wasser aufsaugen bzw. speichern und zu einem späteren Zeitpunkt und ggf. bei Bedarf über Verdunstung und/oder Bewässerung wieder abgeben.



Gewährleistung der Ver- und Entsorgungssicherheit entwickelt. Bisher waren nur große Betreiber der Wasserwirtschaft gesetzlich verpflichtet, ihre betriebskritischen IT-Systeme nach dem Stand der Technik abzusichern. Künftig wird dies allerdings auch für mittlere Betreiber (Unternehmen mit 50 und mehr Beschäftigten) der Wasser- und Siedlungsabfallentsorgung gelten. Um mittlere Betreiber, die gegenüber großen Unternehmen über geringere fachliche, personelle und finanzielle Ressourcen verfügen, nicht zu überfordern, könnte es sinnvoll sein, ihnen weniger strenge Sicherheitsanforderungen aufzuerlegen.

- Nicht zuletzt ist es für erfolgreiche Digitalisierungsprojekte unerlässlich, Akzeptanz für die damit einhergehenden Veränderungen im Betrieb zu schaffen. Durch die Digitalisierung werden Tätigkeiten verlagert und Berufsbilder wandeln sich, weshalb Veränderungsängste der Betroffenen ernst zu nehmen sind. Beschäftigte müssen daher frühzeitig in die Einführung von neuen digitalen Technologien einbezogen werden.

Deutlich wird, dass die Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen Gestaltung braucht, damit Potenziale bestmöglich erschlossen und negative Folgewirkungen minimiert werden können. Für die Abfall- und Wasserwirtschaft skizziert dieser TAB-Bericht Gestaltungsoptionen und zeigt damit einen möglichen Orientierungsrahmen speziell für politisches Handeln auf, um den digitalen Fortschritt nachhaltig zu gestalten.



7 Literatur

7.1 In Auftrag gegebene Gutachten

- Berg, H.; Bendix, P.; Nicolas, J.; Wagner, J.; Günther, M. (2019): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen am Beispiel der Abfallwirtschaft. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH; INTECTUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Wuppertal
- Hempel, L.; Wunderlich, S.; Patzer, E. (2021): »Vor die Lage kommen« Auswirkungen der Digitalisierung für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Wasserwirtschaft. Berlin
- Oelmann, M.; Czichy, C. (2020): Chancen und Risiken der Digitalisierung kritischer kommunaler Infrastrukturen am Beispiel der Wasserver- und Abwasserentsorgung. MOCons GmbH & Co. KG, Berlin
- Thaler, S.; (2019): Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef
- Treibert, R.; Koza, E.; Öztürk, A. (2021): Präventive Informationssicherheit in der Wasserwirtschaft: Stand und Herausforderungen. Clavis Institut für Informationssicherheit der Hochschule Niederrhein, Mönchengladbach

7.2 Weitere Literatur

- 320° (2021a): Circular University: Smarte Mülleimer schicken E-Mails, wenn sie voll sind. <https://320grad.de/2021/07/08/circular-university-smarte-muelleimer-schicken-e-mails-> (28.3.2023)
- 320° (2021b): Kopenhagen testet digitales Wasserzeichen. <https://320grad.de/2021/09/06/kopenhagen-testet-digitales-wasserzeichen/> (31.3.2023)
- 320° (2021c): Neue Förderrunde für Green-Tech-Unternehmen. https://320grad.de/2021/05/29/neue-foerderrunde-fuer-green-tech-unternehmen/?mc_cid=afea5832db&mc_eid=d0b21cd5a4 (28.3.2023)
- Acatech (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften) (2021): Urban Mining. München, <https://www.acatech.de/publikation/acatech-horizonte-urban-mining/> (20.4.2023)
- Ahlvers, P. (2022): Intelligente Abwassernetze. Digitalisierung von Kanalisation und Regenrückhaltebecken am praktischen Beispiel der Stadt Cincinnati. Workshop KDW-NRW am 27.1.2022 (digital)
- Ahting, M.; Brauer, F.; Duffek, A.; Ebert, I.; Eckhardt, E.; Hassold, M.; Helmecke, I.; Kirst, B.; Krause, P.; Lepom, S.; Leuthold, C.; et al. (2018): Empfehlungen zur Reduzierung von Mikroverunreinigungen in den Gewässern. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_pos_mikroverunreinigung_final_bf.pdf (30.8.2023)
- Allgemeine Bauzeitung (2020): KI in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft ist Thema. <https://allgemeinebauzeitung.de/abz/ifat-2020-ki-in-der-abfall-und-kreislaufwirtschaft-ist-thema-37429.html> (10.3.2023)



- Altendorfer, M.; Pomberger, R.; Gelbmann, U. (2020): Vergleich abfallwirtschaftlicher Systeme für Siedlungsabfälle mit Schwerpunkt Beschäftigungseffekte. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72(1-2), S. 21–37
- Althoff, T.; Holzhauer, R.; Babnik, E.; Mölter, M.; Wolters, U.; Sußmann, C. (2019): Effizienzsteigerung der Sammelsysteme für die bürgernahe Abfallerfassung. In: Müll und Abfall 04, S. 196–203
- Amann, K. (2020): Müllabfuhr auf neuen Wegen. TRIOLOG 3, <https://www.transfer-und-innovation-ostbayern.de/trio-forum/triojournal/t3muellabfuhr-auf-neuen-wegen/> (20.4.2023)
- AMCS (o.J.): Intelligente Routenoptimierung. <https://www.amcsgroup.com/de/loesungen/intelligente-optimierung/> (22.9.2023)
- Aquatech (2018): Five Progressive Digital Water Technologies to Watch. www.aquatechtrade.com/news/utilities/five-progressive-digital-water-technologies-to-watch/ (20.4.2023)
- ATT (Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren e. V.); BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft; DBVW (Deutscher Bund der verbandlichen Wasserwirtschaft e. V.); DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.); DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.); VKU (Verband kommunaler Unternehmen e. V.) (2020): Branchenbild der Deutschen Wasserwirtschaft. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/leistungen/publikationen/branchenbild-2020.pdf> (30.8.2023)
- Bahn-Walkowiak, B.; Magrini, C.; Berg, H.; Gözet, B.; Beck-O’Brien, M.; Arjomandi, T.; Doranova, A.; Le Gallou, M.; Gionfra, S.; Graf, V.; Kong, M. et al. (2020): Eco-Innovation and Digitalisation. Case studies, environmental and policy lessons from EU Member States for the EU Green Deal and the Circular Economy. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7753/file/7753_Eco-Innovation_Digitalisation.pdf (30.8.2023)
- Bainbridge, L. (1983): Ironies of automation. In: Automatica 19(6), S. 775–779
- Barjenbruch, M.; Donner, C.; Ernst, M.; Göschl, F.; Grünebaum, T.; Günthert, W.; Hetzel, F.; Horn, H.; Klinger, J.; Rosenwinkel, K.-H.; Schwesig, D. et al. (2017): Forschungsbedarf in der Wasserwirtschaft. DWA; DVGW, Bonn/Hennef
- BBK (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe) (2019a): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Identifizierung in sieben Schritten. Arbeitshilfe für die Anwendung im Bevölkerungsschutz. Praxis im Bevölkerungsschutz. Band 20, Bonn, <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-20-schutz-infrastrukturen-identifizierung.pdf> (27.4.2022)
- BBK (2019b): Sicherheit der Trinkwasserversorgung. Teil 2: Notfallvorsorgeplanung. Band 15, <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-15-sicherheit-trinkwasserversorgung-teil2.pdf> (18.2.2022)
- BBK (2020): 10 Jahre »KRITIS-Strategie«. Einblicke in die Umsetzung der Nationalen Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. Band 21, Bonn, <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/PiB/PiB-21-zehn-jahre-kritis-strategie.pdf> (17.2.2022)
- BDE (Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.; VKU (Verband kommunaler Unternehmen e. V.) (2016): Mobile-IT-Systeme. Technische Übersicht und Standards 2016. <https://www.vku.de/publikationen/2016/mobile-it-systeme/> (30.8.2023)



- BDE; VKU (2018): Mobile IT-Systeme. Technische Übersicht und Standards – aktueller Stand Mai 2018. <https://urbis.europarl.europa.eu/urbis/sites/default/files/generated/document/en/BDE-VKU-Mobile-IT-Systeme.pdf> (15.3.2021)
- BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.) (2017): Datennutzung aktuell. <https://www.bdew.de/wasser-abwasser/digitalisierung-der-wasserwirtschaft/datennutzung-aktuell/> (23.8.2023)
- BDEW (2022): EU-Kommission veröffentlicht neue kommunale Abwasserrichtlinie. <https://www.bdew.de/wasser-abwasser/eu-kommission-veroeffentlicht-neue-kommunale-abwasserrichtlinie/> (27.4.2023)
- Bender, S.; Luxenburger, D.; Zasada, D.; Hasselbach, R.; Werth, D. (2022): Remote Inspektion von Kläranlagen und Kanalstandhaltungsmanagement. *umweltwirtschaft.com*, Modernisierungsreport 2020/2021, S. 49–52
- Benítez, R.; Ortiz-Caraballo, C.; Preciado, J.; Conejero, J.; Sánchez Figueroa, F.; Rubio-Largo, A. (2019): A Short-Term Data Based Water Consumption Prediction Approach. In: *Energies* 12(12), S. 2359
- Berg, H.; Le Blévenec, K.; Kristoffersen, E.; Strée, B.; Witomski, A.; Stein, N.; Bastein, T.; Ramesohl, S.; Vrancken, K. (2020a): Digital circular economy – a cornerstone of a sustainable European industry transformation. European Circular Economy Research Alliance. <https://ss-usa.s3.amazonaws.com/c/308476495/media/19365f987b483ce0e33946231383231/201023%20ECERA%20White%20Paper%20on%20Digital%20circular%20economy.pdf> (21.1.2021)
- Berg, H.; Sebestyén, J.; Bendix, P.; Le Blevenec, K.; Vrancken, K. (2020b): Digital Waste Management. European Environmental Agency, European Topic Center on Waste and Materials in a Green Economy, Report Nr. 2020/4
- Berg, H.; Wagner, J.; Richter, R.; Hänseler, J.; Kuhn, T. (2020c): Innovationspotenziale der kommunalen Kreislaufwirtschaft durch Digitalisierung in Sachsen. (unveröffentlicht)
- Berger, C.; Volkmar, M. (2020): Waste Management 4.0: Bedarfsgerechte Entsorgung. In: Etezadzadeh, C. (Hg.): *Smart City – Made in Germany*. Wiesbaden, S. 381–389
- BWB (Berliner Wasserbetriebe) (o. J.): Auzuka. <https://www.bwb.de/de/auzuka.php> (28.8.2023)
- Beukert, T.; Gramlich, L.; Grüttner, A.; Rottmann, O. (2021): Zukunftsorientierte Daseinsvorsorge in der kommunalen Infrastrukturversorgung. Kompetenzzentrum Öffentliche Wirtschaft, Infrastruktur und Daseinsvorsorge e. V., Leipzig
- BfV (Bundesamt für Verfassungsschutz) (2022a): Sicherheitshinweis für die Wirtschaft – 01/2022 – 4.3.2022. Betreff – Krieg in der Ukraine. https://www.verfassungsschutz.de/SharedDocs/publikationen/DE/wirtschafts-wissenschaftsschutz/2022-03-04-Sicherheitshinweis-1.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (30.8.2023)
- BfV (2022b): Sicherheitshinweis für die Wirtschaft, 02/2022 – 23.3.2022. Betreff – Krieg in der Ukraine. https://www.verfassungsschutz.de/SharedDocs/publikationen/DE/wirtschafts-wissenschaftsschutz/2022-03-23-Sicherheitshinweis-2.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (30.8.2023)
- Bilitewski, B.; Wagner, J.; Reichenbach, J. (2018): Bewährte Verfahren zur kommunalen Abfallbewirtschaftung. Umweltbundesamt Nr. 39/2018, Dessau-Roßlau
- BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) (2021a): Karliczek: Mit KI Deutschland zum internationalen Vorreiter für das Kunststoff-Recycling machen. Pressemitteilung 204, <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/2021/09/071021-Anwendungshub-Kunststoffkreislaufe.html> (23.8.2023)



- BMBF (2021b): Digital. Sicher. Souverän. Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit. Bonn, https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/5/31672_Digital_Sicher_Souveraen.pdf (1.3.2023)
- BMBF (2022): Agenda Cybersicherheitsforschung. Maßnahmen im Zuge der Zeitenwende. Bonn, https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/publikationen/bmbf_agenda-cybersicherheitsforschung.pdf/download (1.3.2023)
- BMG (Bundesministerium für Gesundheit) (2020): Europaparlament verabschiedet Neufassung der Trinkwasserrichtlinie. <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/presse/pressemitteilungen/2020/4-quartal/trinkwasserrichtlinie.html> (23.8.2023)
- BMI (Bundesministerium des Innern) (2005): Nationaler Plan zum Schutz der Informationsinfrastrukturen (NPSI). Berlin, https://www.innenministerkonferenz.de/IMK/DE/termine/to-beschluesse/05-12-09/05-12-09-anlage-nr-16.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (30.8.2023)
- BMI (2007): Umsetzungsplan KRITIS des Nationalen Plans zum Schutz der Informationsinfrastrukturen. Berlin, <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/it-digitalpolitik/umsetzungsplan-kritis.pdf> (2.3.2022)
- BMI (2009): Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie). Berlin, <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.pdf> (2.3.2022)
- BMI (2011a): Cyber-Sicherheitsstrategie für Deutschland. Berlin, https://www.cio.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Strategische-Themen/css_download.pdf?__blob=publicationFile (10.3.2022)
- BMI (2011b): Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement (Leitfaden für Unternehmen und Behörden). Berlin, https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis-leitfaden.pdf?__blob=publicationFile&v=7 (30.8.2023)
- BMI (2016): Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung – BSI-KritisV). <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2016/kritis-vo.pdf> (30.8.2023)
- BMI (Bundesministerium des Innern und für Heimat) (2022a): Cybersicherheitsagenda des Bundesministeriums des Innern und für Heimat. Ziele und Maßnahmen für die 20. Legislaturperiode. https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/themen/sicherheit/cybersicherheitsagenda-20-legislatur.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (30.8.2023)
- BMI (2022b): Eckpunkte für das KRITIS-Dachgesetz. https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/nachrichten/2022/eckpunkte-kritis.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (23.3.2023)
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit) (2019): Klimaschutzbericht 2019 zum Aktionsprogramm Klimaschutz 2020 der Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzbericht_2019_kabinettsfassung_bf.pdf (10.9.2020)
- BMU (2020a): Müllverbrennung. <https://www.bmu.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallbehandlung-abfalltechnik/muellverbrennung/> (10.8.2021)
- BMU (2020b): Umweltpolitische Digitalagenda. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Digitalisierung/digitalagenda_bf.pdf (30.8.2023)
- BMU/UBA (Umweltbundesamt) (Hg.) (2019): Ergebnisrapport – Ergebnisse der Phase 2 des Stakeholder-Dialogs »Spurenstoffstrategie des Bundes« zur Umsetzung von



- Maßnahmen für die Reduktion von Spurenstoffeinträgen in die Gewässer.
Bonn/Dessau-Roßlau
- BMUV (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz) (2020): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder. Fortschreibung. Bonn
- BMUV (2023): Nationale Wasserstrategie. Unterrichtung durch die Bundesregierung Nationale Wasserstrategie. Deutscher Bundestag, Drucksache 20/6110, Berlin
- BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2020): Richtlinie zum Förderprogramm »Digital jetzt – Investitionsförderung für KMU« vom 19. Mai 2020. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/richtlinie-zum-foerderprogramm-digital-jetzt-investitionsfoerderung-kmu.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (20.1.2023)
- BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2014): Neues Förderprogramm: Energieeffizienz in der Wasserwirtschaft. <https://www.bmwk-energiehende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2014/09/Meldung/neues-foerderprogramm-energieeffizienz-wasserwirtschaft.html> (23.8.2023)
- BMWK (2022a): Entwurf eines Gesetzes zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende – GNDEW). Referentenentwurf des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Bearbeitungsstand: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Gesetz/entwurf-neustart-der-digitalisierung-der-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (28.2.2023)
- BMWK (2022b): Förderprogramm go-digital. Digitalisierung leicht gemacht. Berlin https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/foerderprogramm-go-digital.pdf?__blob=publicationFile&v=28 (18.1.2023)
- BMWSB (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen) (o. J.): Smart Cities in Deutschland. <https://www.smart-city-dialog.de/modellprojekte/#ktsmpsc> (28.8.2023)
- Bogumil, J.; Holtkamp, L. (2013): Kommunalpolitik und Kommunalverwaltung. Eine praxisorientierte Einführung. Bundeszentrale für politische Bildung. Bonn
- Borchard, R.; Zeiss, R.; Recker, J. (2021): Digitalization of waste management: Insights from German private and public waste management firms. In: Waste management & research, S. 1–18
- Britton, T.; Stewart, R.; O'Halloran, K. (2013): Smart metering: enabler for rapid and effective post meter leakage identification and water loss management. In: Journal of Cleaner Production 54, S. 166–176
- BSI (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) (o. J.a): Beratung von KRITIS-Betreibern. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/KRITIS-und-regulierte-Unternehmen/Kritische-Infrastrukturen/Service-fuer-KRITIS-Betreiber/Beratung-von-KRITIS-Betreibern/beratung-von-kritis-betreibern_node.html (23.3.2023)
- BSI (o. J.b): Cyber-Sicherheitsnetzwerk. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Cyber-Sicherheitsnetzwerk/cyber-sicherheitsnetzwerk_node.htm (23.3.2023)
- BSI (o. J.c): Fragen und Antworten zur BSI-Kritisverordnung. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/KRITIS-und-regulierte-Unternehmen/Kritische-Infrastrukturen/KRITIS-FAQ/FAQ-BSI-KritisV/faq_kritisv_node.html (30.8.2023)
- BSI (o. J.d): Nationales IT-Lagezentrum. Rund um die Uhr für Cyber-Sicherheit. <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/KRITIS-und-regulierte-Unternehmen/>



- Kritische-Infrastrukturen/Service-fuer-KRITIS-Betreiber/IT-Lagezentrum/it-lagezentrum_node.html (23.3.2023)
- BSI (o.J.e): SPOC-Konzept. <https://www.bsi.bund.de/dok/up-kritis-spoc> (30.8.2023)
- BSI (o.J.f): Vorfallunterstützung. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Cyber-Sicherheitslage/Reaktion/Vorfallunterstuetzung/vorfallsunterstuetzung_node.html (30.8.2023)
- BSI (o.J.g): Vorfallunterstützung – Mit CERT-Bund und MIRT. CERT-Bund und Mobile Incident Response Teams leisten BSI-Support vor Ort. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Cyber-Sicherheitslage/Reaktion/Vorfallunterstuetzung/MIRT/mirt_node.html (23.3.2023)
- BSI (o.J.h): Warum Teilnehmer der Allianz für Cyber-Sicherheit werden? <https://www.allianz-fuer-cybersicherheit.de/Webs/ACS/DE/Ueber-uns/Teilnehmer/teilnehmer.html> (30.8.2023)
- BSI (2011): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2011. Bonn, <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2011.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2013): ICS-Security-Kompodium. Version 1.23. Bonn https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/ICS/ICS-Security_kompodium_pdf.pdf (30.8.2023)
- BSI (2015a): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2015. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2015.html> (30.8.2023)
- BSI (2015b): KRITIS-Sektorstudie. Ernährung und Wasser. Öffentliche Version – Revisionsstand 16. März 2015. https://www.kritis.bund.de/SharedDocs/Downloads/Kritis/DE/Sektorstudie_Ern%C3%A4hrung_Wasser.pdf?__blob=publicationFile (14.9.2021)
- BSI (2016a): Das IT-Sicherheitsgesetz. Kritische Infrastrukturen schützen. Bonn <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Broschueren/IT-Sicherheitsgesetz.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2016b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2016. Bonn, www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2016.pdf (30.8.2023)
- BSI (2017a): BSI-Standard 200-1. Managementsysteme für Informationssicherheit (ISMS). www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/BSI-Standards/standard_200_1.pdf (30.8.2023)
- BSI (2017b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2017. Bonn, <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2017.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2018): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2018. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2018.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2019a): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2019. Bonn, <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2019.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2019b): Industrial Control System Security: Top 10 Bedrohungen und Gegenmaßnahmen. https://www.allianz-fuer-cybersicherheit.de/SharedDocs/Downloads/Webs/ACS/DE/BSI-CS/BSI-CS_005.pdf (24.1.2021)



- BSI (2020a): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2020. Bonn <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2020.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2020b): Informationssicherheit mit System. Der IT-Grundschutz des BSI. Bonn www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/sonstiges/Informationssicherheit_mit_System.pdf (30.8.2023)
- BSI (2020c): Konkretisierung der Anforderungen an die gemäß § 8a Absatz 1 BSIG umzusetzenden Maßnahmen. Hinweise zur Umsetzung der Kriterien des § 8a Absatz 1 BSIG für die Beurteilung der Informationssicherheit bei Betreibern Kritischer Infrastrukturen. Bonn, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/KRITIS/Konkretisierung_Anforderungen_Massnahmen_KRITIS.pdf (30.8.2023)
- BSI (2020d): Orientierungshilfe zu Nachweisen gemäß § 8a Absatz 3 BSIG. Version 1.1 vom 21.8.2020. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/KRITIS/oh-nachweise.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2021a): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2021. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2021.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2021b): Elementare Gefährdungen. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. Edition 2021, Bonn, www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2021.pdf (30.8.2023)
- BSI (2021c): Fortschrittliche Angriffe. Neue Qualität aktueller Angriffe und Prognose. https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Cyber-Sicherheit/Themen/Ransomware_Managementabstract-Angriffe.pdf (30.8.2023)
- BSI (2021d): IND.1: Prozessleit- und Automatisierungstechnik. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. Edition 2021, Bonn, www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2021.pdf (30.8.2023)
- BSI (2021e): IND.2.1: Allgemeine ICS-Komponente. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. Edition 2021, Bonn, www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2021.pdf (30.8.2023)
- BSI (2021f): OPS.1.2.5: Fernwartung. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2021.pdf (30.8.2023)
- BSI (2021g): Status Quo: Safety & Security in störfallrelevanten Betriebsbereichen. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Studien/Stoerfallbetriebe/stoerfallbetriebe.pdf> (31.3.2022)
- BSI (2022a): Cyber-Sicherheitsauswirkungen des russischen Angriffs auf die Ukraine. <https://www.allianz-fuer-cybersicherheit.de/dok/ukraine-konflikt> (23.3.2023)
- BSI (2022b): Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2022. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publikationen/Lageberichte/Lagebericht2022-Doppelseite.pdf> (30.8.2023)
- BSI (2022c): Einschätzung der aktuellen Cyber-Sicherheitslage in Deutschland nach dem russischen Angriff auf die Ukraine. Aktualisiert 3.8.2022, https://www.bsi.bund.de/DE/Service-Navi/Presse/Pressemitteilungen/Presse2022/220225_Angriff-Ukraine-Statement.html?nn=1025778 (30.8.2023)



- BSI (2022d): Glossar. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022e): IND.2.2: Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022f): IND.2.3: Sensoren und Aktoren. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022g): IND.3.2 Fernwartung im industriellen Umfeld. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (Hg.) (2022h): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022i): Maßnahmenempfehlungen des BSI im Hinblick auf die aktuelle Lage in der Ukraine. https://www.allianz-fuer-cybersicherheit.de/SharedDocs/Downloads/Webs/ACS/DE/downloads/Massnahmenempfehlungen_BSI_Ukraine.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022j): OPS.2.2 Cloud-Nutzung. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI (2022k): ORP.3: Sensibilisierung und Schulung zur Informationssicherheit. In: BSI (Hg.): IT-Grundschutz-Kompendium. www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Grundschutz/Kompendium/IT_Grundschutz_Kompendium_Edition2022.pdf (30.8.2023)
- BSI; UP KRITIS (o. J.): UP KRITIS. Öffentlich-Private Partnerschaft zum Schutz Kritischer Infrastrukturen in Deutschland. <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/KRITIS/UPK/upk-flyer.pdf> (17.3.2022)
- Buchert, M.; Bleher, D.; Dehoust, G.; Gsell, M.; Hay, D.; Keimeyer, F.; Kießling, L.; Verbücheln, M.; Dähler, S.; Pichl, J. (2017): Demografischer Wandel und Auswirkungen auf die Abfallwirtschaft. Abschlussbericht, Texte 32/2018, BMUB (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit), Dessau-Roßlau
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2019): Kommunal 4.0. Services für die Wasserwirtschaft. https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/SSW_Factsheet_Kommunal%204.0.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (20.4.2023)
- Bundesnetzagentur (2015): IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1a Energiewirtschaftsgesetz. Stand: August 2015. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/IT_Sicherheit/IT_Sicherheitskatalog_08-2015.pdf (30.8.2023)
- Bundesnetzagentur (2018): IT-Sicherheitskatalog gemäß § 11 Absatz 1b Energiewirtschaftsgesetz. Stand: Dezember 2018. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/IT_Sicherheit/IT_Sicherheitskatalog_2018.pdf (30.8.2023)



- Bundesregierung (2019a): Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache Nr. 19/9521, Berlin
- Bundesregierung (2019b): Klimaschutzbericht 2019. Unterrichtung durch die Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache Nr. 19/22180, Berlin
- Bundesregierung (2020a): Antwort des Parlamentarischen Staatssekretärs Dr. Günter Krings vom 17. September 2020 auf die Frage der Abgeordneten Dr. Irene Mihalic (BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN). Schriftliche Fragen mit den in der Woche vom 14. September 2020 eingegangenen Antworten der Bundesregierung. Deutscher Bundestag, Drucksache 19/19/22675, Berlin
- Bundesregierung (2020b): Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung. Fortschreibung 2020. https://www.ki-strategie-deutschland.de/files/downloads/201201_Fortschreibung_KI-Strategie.pdf (30.8.2023)
- Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Weiterentwicklung 2021. Berlin, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998194/1875176/3d3b15cd92d0261e7a0bcd8f43b7839/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf> (30.8.2023)
- Bundesregierung (2022a): Aktueller Stand Umsetzung der Cybersicherheitsagenda. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU – Drucksache 20/3308 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 20/3762, Berlin
- Bundesregierung (2022b): Schutz kritischer Infrastrukturen in Deutschland. Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion der CDU/CSU – Drucksache 20/3915 –. Deutscher Bundestag, Drucksache 20/4267, Berlin
- Bundesregierung (2023): Zukunftsstrategie Forschung und Innovation. Berlin
- Buras, M.; Solano Donado, F. (2021): Identifying and Estimating the Location of Sources of Industrial Pollution in the Sewage Network. In: *Sensors* 21(10), S.3426
- Burgard, W. (2018): Künstliche Intelligenz. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten »Unsere gemeinsame digitale Zukunft«. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin
- Burger, D.; Weiß, J.; Sarkar, A.; Kirsch, K.; Dünnweber, J. (2018): Combining Fill-Level Sensing With Route Optimization for a More Efficient Waste Collection. In: Bouzas-Lorenzo; R.; Cernadas Ramos, A. (Hg.): ECDG 2018 18th European Conference on Digital Government. University of Santiago de Compostela, S. 24–31
- Burghouwt, P.; Maris, M.; van Peski, S.; Luijff, E.; van de Voorde, I.; Spruit, M. (2017): Cyber Targets Water Management. In: Havarneanu, G.; Setola, R.; Nasopoulos, H.; Wolthusen, S. (Hg.): Critical information infrastructures security. 11th International Conference, CRITIS 2016, Cham, S. 38–49
- Business Geomatics Online (2021): Hinkt der Abwasserbereich in Sachen BIM anderen Branchen hinterher? <https://www.business-geomatics.com/2021/07/01/hinkt-der-abwasserbereich-in-sachen-bim-anderen-branchen-hinterher/> (23.8.2023)
- BWB (Berliner Wasserbetriebe) (o.J.): AUZUKA. www.bwb.de/de/auzuka.php (10.2.2023)
- Callejas, I. (2022): Monitoring coastal water quality with satellite data. In: *Nat Rev Earth Environ* 3(9), S. 556



- Cambridge Econometrics; Trinomics; ICF (2018): Impacts of circular economy policies on the labour market. Final report and annexes. Publications Office of the European Union, Brussels
- Caradot, N.; Schäfer, N. (2022): Cybersicherheit im Wassersektor. Analyse der zukünftigen Entwicklung der Wasser- und Abwasserinfrastruktur. Kompetenzzentrum Wasser Berlin gGmbH. <https://www.kompetenz-wasser.de/media/pages/forschung/projekte/cybersecurity/9786b9724b-1655889266/cybersicherheit-im-wassersektor.pdf> (30.8.2023)
- Cassidy, J.; Barbosa, B.; Damião, M.; Ramalho, P.; Ganhão, A.; Santos, A.; Feliciano, J. (2021): Taking water efficiency to the next level: digital tools to reduce non-revenue water. In: *Journal of Hydroinformatics* 23(3), S. 453–465
- CISA (2021): Cyber Risks & Resources for the Water and Wastewater System Sector. Infographic. <https://www.cisa.gov/sites/default/files/publications/infographic-supply-water-national-critical-function-102021-508.pdf> (30.8.2023)
- Cominola, A.; Monks, I.; Stewart, R. (2020): Smart Water Metering and AI for utility operations and customer management: Disruption or incremental innovation? In: *Hydrolink* (4), S. 114–119
- Commonwealth of Massachusetts (o.J.): Cybersecurity Advisory for Public Water Suppliers. <https://www.mass.gov/service-details/cybersecurity-advisory-for-public-water-suppliers> (14.9.2021)
- Conejos Fuertes, P.; Martínez Alzamora, F.; Hervás Carot, M.; Alonso Campos, J. (2020): Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks. In: *Urban Water Journal* 17(8), S. 704–713
- ContextCrew Neue Energie GmbH (2019): Forschungsprojekt »DigitalFire« will Biomassefeuerungen digitalisieren. <https://www.contextcrew.de/forschungsprojekt-digitalfire-will-biomassefeuerungen-digitalisieren/> (29.3.2023)
- Cyris, G. (2010): Technische Regelsetzung im Selbstverwaltungsbereich in Deutschland und Europa. In: *energie wasser-praxis* 2010(5), S. 20–25
- DBU (Deutsche Bundesstiftung Umwelt) (2020): Schadstoffen auf der Spur – Online-Messsystem detektiert Spurenstoffe im Abwasser. DBU aktuell 4, <https://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/230620114835r631.pdf> (21.12.2022)
- DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V. (2021): PROMISCES unterstützt den Aufbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. https://dechema.de/%C3%9Cber+uns/Presse/Pressemitteilungen/46_2021+Promices_Projekt-p-20187750.html (20.4.2023)
- Dehoust, G.; Möck, A.; Merz, C.; Gebhardt, P. (2016): Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System. Bilanz der Umweltwirkungen, Freiburg
- Deubel, T. (2019): Digitalisierung prägt Wirtschaft. DGAW-Regionalveranstaltung am Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Sulzbach-Rosenberg
- DGUV (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e. V.) (o.J.): Rückwärtsfahren bei Müllfahrzeugen. <https://www.dguv.de/de/mediencenter/hintergrund/muellabfuhr/index.jsp> (28.3.2023)
- Difu (Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH) (2016): Wasserinfrastrukturen für die zukunftsfähige Stadt. Beiträge aus der INIS-Forschung. Berlin
- DGAW (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft) (2019): Kreislaufwirtschaft Digital – Anwendungen, Wirtschaftlichkeit, Stand der Technik. <https://www.um>



- sicht-suro.fraunhofer.de/de/presse/pressemitteilungen/2019/Kreislaufwirtschaft_Digital.html (23.3.2023)
- Dietz, S. (2021): Von turnusmäßiger zu bedarfsgerechter Kanalreinigung. B_I MEDIEN GmbH, <https://bi-medien.de/fachzeitschriften/umweltbau/kanalbau-kanalbetrieb/smarte-entwaesserung-von-turnusmaessiger-zu-bedarfsgerechter-kanalreinigung-ul4282> (20.4.2023)
- Digital GreenTech (o. J.): Die nächste Generation der Kanalnetzsteuerung. https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=156&cHash=ef6d34e1f1d9c0f07c10b1d68b8ceb5b (23.8.2023)
- Digital Water City (o. J.a): Mobile Application for Asset Management of Drinking Water Wells. <http://www.digital-water.city/solution/mobile-application-for-asset-management-of-drinking-water-wells/> (23.8.2023)
- Digital Water City (o. J.b): DTS Sensor for Tracking Illicit Sewer Connections. <http://www.digital-water.city/solution/dts-sensor-for-tracking-illicit-sewer-connections/> (23.8.2023)
- Digital Water City (o. J.c): Sensors and Smart analytics for tracking Illicit Sewer Connections Hotspots. <http://www.digital-water.city/solution/sensors-and-smart-analytics-for-tracking-illicit-sewer-connections-hotspots/> (23.8.2023)
- DIN (o. J.): Normung entlastet die staatliche Regelung. <https://www.din.de/de/din-und-seine-partner/public-affairs/normen-und-staatliche-regelsetzung> (16.2.2022)
- DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.) (o. J.): Team: Optische Gewässerfernerkundung (BA). Earth Observation Center, https://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-5425/10349_read-52859 (23.8.2023)
- Dussaux, D.; Glachant, M. (2019): How much does recycling reduce imports? Evidence from metallic raw materials. In: Journal of Environmental Economics and Policy 8(2), S. 128–146
- DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.) (o. J.): IT-Sicherheit – digitaler Schutz im Gas- und Wasserfach. <https://www.dvgw.de/themen/sicherheit/it-sicherheit> (30.8.2023)
- DVGW (2020): Insgesamt sichere Trinkwasserversorgung in Deutschland bei einzelnen regionalen Engpässen. DVGW-Umfrage zum Trockenjahr 2018 mit Ausblick auf 2020. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/verein/aktuelles/presse/pi-dvgw-studie-wasserversorgung-hitzeperiode-15092020.pdf> (30.8.2023)
- DVGW (2021): Geschäftsordnung. DVGW GW 100. Tätigkeit der DVGW-Fachgremien und Ausarbeitung des DVGW-Regelwerkes, Bonn
- DVGW; DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.) (2017): IT-Sicherheit – Branchenstandard Wasser/Abwasser. DVGW-Merkblatt W 1060/Merkblatt DWA-M 1060. Bonn/Hennef
- DVGW; DWA (2022): Wassersektor vor Cyberangriffen schützen – Update des IT-Sicherheitsleitfadens veröffentlicht. DVGW-Presseinformation vom 7.4.2022. <https://www.dvgw.de/der-dvgw/aktuelles/presse/presseinformationen/dvgw-presseinformation-vom-07042022-it-sicherheitsleitfaden-update> (30.8.2023)
- DVGW-Technologiezentrum Wasser (o. J.): Konzeption eines Sensorsystems zur Online-Erfassung von organischen Spurenstoffen (SenSOS). <https://tzw.de/projekte/projektetails/detail/konzeption-eines-sensor-systems-zur-online-erfassung-von-organischen-spurenstoffen-sensos> (28.8.2023)



- DVGW-Technologiezentrum Wasser (2020): Künstliche Intelligenz zum Schutz des Grundwassers. <https://tzw.de/blog-details/detail/kuenstliche-intelligenz-zum-schutz-des-grundwassers> (20.4.2023)
- DWA (o.J.): Merkblattreihe DWA-M 149: Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden. Teile 1 bis 8. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2011): Merkblatt DWA-M 253: Leit- und Automatisierungstechnik auf Abwasseranlagen. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2017a): DWA Handbuch. IT-Sicherheitsleitfaden des Branchenstandards Wasser/Abwasser, Hennef
- DWA (2017b): Merkblatt DWA-M 260: Visualisierung und Auswertung von Prozessinformationen auf Abwasseranlagen. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2018a): Arbeitsblatt DWA-A 400: Grundsätze für die Erarbeitung des DWA-Regelwerks. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2018b): DWA-Orientierungshilfe. Branchenspezifischer Sicherheitsstandard Wasser/Abwasser (B3S WA) – Hinweise zum Nachweisverfahren gemäß § 8a (3) BSIG, Hennef, https://de.dwa.de/files/_media/content/05_PUBLIKATIONEN/DWA-Regelwerk/Arbeitshilfen%20aus%20dem%20DWA-Regelwerk/Branchenspezifischer_Sicherheitsstandard_Wasser_Abwasser.pdf (30.8.2023)
- DWA (2018c): Energieeffiziente und Ressourcenschonende Wasserwirtschaft (ERWAS). Perspektivpapier, Hennef, https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/erwas_perspektivpapier_2018_ansicht.pdf (30.8.2023)
- DWA (2018d): Merkblatt DWA-M 269: Prozessmessgeräte für Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff in Abwasserbehandlungsanlagen. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2019a): Digitale Transformation in der deutschen Abwasserwirtschaft. <https://de.dwa.de/de/presseinformationen-volltext/digitale-transformation-in-der-deutschen-abwasserwirtschaft.html> (23.3.2023)
- DWA (2019b): Merkblatt M 115-3: Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers – Teil 3: Praxis der Indirekteinleiterüberwachung. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA (2020): Merkblatt DWA-M 256-1. Prozessmesstechnik auf Kläranlagen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen. DWA-Regelwerk, Hennef
- DWA; DVGW (2022): 3. Update der Web-Applikation »IT-Sicherheitsleitfaden«. https://shop.wvgw.de/media/62/f9/5a/1648818539/311864-flyer-w_1060_2022.pdf (30.8.2023)
- Earthdata (o.J.): Water Quality Data Pathfinder. Aktualisiert 2022, <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/pathfinders/water-quality-data-pathfinder> (23.8.2023)
- Eckarhardt, M. (2019): Urbane Rohstofflager smart nutzen. Prognos AG, Trendletter Prognos, https://www.prognos.com/fileadmin/images/Newsletter/tl_01_19/2019_01_trendletter_DE.pdf (4.2.2021)
- EEA (European Environment Agency) (2020): Digital technologies will deliver more efficient waste management in Europe. <https://www.eea.europa.eu/themes/waste/waste-management/digital-technologies-will-deliver-more> (30.8.2023)
- Eerikäinen, S.; Haimi, H.; Mikola, A.; Vahala, R. (2020): Data analytics in control and operation of municipal wastewater treatment plants: qualitative analysis of needs and barriers. In: Water Science Technology 82(12), S. 2681–2690
- Ehrich, M.; Hawlitschek, F.; Schmitz, J. (2020): Künstliche Intelligenz – der »FES Sprachassistent«. In: VKU (Hg.): Digitalisierung und Innovation, S. 4–6
- Eicher, D. (2016): Chatbots. <https://www.digitalwiki.de/begriffe/chatbots/> (30.8.2023)



- EK (Europäische Kommission) (o. J.): Roboter sollen unsere Straßen reinigen. Aktualisiert 30.4.2013, <https://cordis.europa.eu/article/id/35690-robots-designed-to-clean-up-our-streets/de> (23.8.2023)
- EK (2020a): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Maßnahmen für ein hohes gemeinsames Cybersicherheitsniveau in der Union und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2016/1148. COM(2020) 823 final, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:be0b5038-3fa8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF (30.8.2023)
- EK (2020b): Revision of the Waste Water Treatment Directive. Inception Impact Assessment. Brüssel
- EK (2021): Auf dem Weg zu einem gesunden Planeten für alle. EU-Aktionsplan: „Schadstofffreiheit von Luft, Wasser und Boden“. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen EMPT, COM(2021) 400 final, Brüssel
- EK (2022a): Nachhaltige Produkte zur Norm machen. Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, COM(2022) 140 final, Brüssel
- EK (2022b): Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Neufassung). COM(2022) 541 final, Brüssel
- Ellison, J.; Smethurst, P.; Morrison, B.; Keast, D.; Almeida, A.; Taylor, P.; Bai, Q.; Penton, D.; Yu, H. (2019): Real-time river monitoring supports community management of low-flow periods. In: *Journal of Hydrology* 572, S. 839–850
- Enercon (2022): Rund 95 Prozent der WEA nach Störung der Satellitenkommunikation wieder online. Pressemitteilung, <https://www.enercon.de/de/aktuelles/rund-95-prozent-der-wea-nach-stoerung-der-satellitenkommunikation-wieder-online/> (30.8.2023)
- Engelhart, M.; Wagner, M.; Behnisch, J. (2020): Abwassertechnik. In: *Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik: Technik – Organisation – Wirtschaftlichkeit*, S. 225–283
- EP (Europäisches Parlament) (2015): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile. <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> (28.3.2023)
- Erdrich, A.; Kluge, J. (2018): Cyber-Gefahren für Industrieanlagen. In: *BSI-Magazin* 2018(1), S. 28–29
- EU-Recycling (2019a): Waagen für die Recyclingindustrie: Auf dem Weg zum »Wiegen 4.0«. *EU-Recycling* 09, S. 14–16
- EU-Recycling (2019b): Pilotprojekt: Daimler Trucks bringt Lkw das Bezahlen bei. *Heft 09*, S. 28
- EU-Recycling (2020): Digitales Tool zur Vermarktung von Kunststoffzyklaten geht in die zweite Runde. *EU-Recycling* 02/20, S. 22–23
- EUWID Recycling und Entsorgung (2022): Fremdstoffentfrachtung von Bioabfällen per Sortierroboter. *Heft 10/2022*
- Fauth, H.; Suchold, N.; Müller-Czygan, G. (2017): Branchenstandard Wasser/Abwasser als Teil von Kommunal 4.0. In: *Automation Blue* 2017(3), S. 48–51
- Favere, J.; Waegenaar, F.; Boon, N.; de Gussem, B. (2021): Online microbial monitoring of drinking water: How do different techniques respond to contaminations in practice? In: *Water Research* 202, S. 117387



- FBI; CISA; EPA; NSA (2021): Ongoing Cyber Threats to U.S. Water and Wastewater Systems. Alert (AA21-287A). <https://www.cisa.gov/uscrt/ncas/alerts/aa21-287a> (30.8.2023)
- Ferri, G.; Manzi, A.; Salvini, P.; Mazzolai, B.; Laschi, C.; Dario, P. (Hg.) (2011): DustCart, an autonomous robot for door-to-door garbage collection: from Dust-Bot project to the experimentation in the small town of Peccioli. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Shanghai, 9.5.2011 – 13.5.2011
- Flamme, S.; Hams, S. (2018): Mitverbrennung von Sekundärbrennstoffen. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 643–659
- Flemming, F. (2019): Eine Cloud-basierte Datenplattform zur Vernetzung von Sortiermaschinen. <https://www.umsicht-suro.fraunhofer.de/content/dam/umsicht-suro/de/documents/Publikationen/2019/Sommersymposium19/DGAW19/2019-06-27%20TOMRA%20Insight%20-%20DGAW%20-%20HANDOUT%20-%20Rev00.pdf> (3.4.2023)
- FNADE (Fédération Nationale des Activités de la Dépollution et de l'Environnement) (2017): Signature d'un accord-cadre sur la transition numérique. FNADE Actualités 143, www.fnade.org/fr/kiosque-agenda/fnade-actualites/1776,signature-acord-cadre-transition-numerique (15.3.2023)
- Fraunhofer IKTS; Vogelsang GmbH & Co. KG; A&U Service- und Vertriebs GmbH (2020): FlexPump – Entwicklung und Demonstration eines pumpenbasierten Mischkonzeptes für den flexibilisierten, effizienzoptimierten und multifeedstockfähigen Betrieb von Biogasanlagen. <https://www.energetische-biomassenutzung.de/projekte-partner/details/project/show/Project/flexpump-604/> (30.8.2023)
- Fraunhofer IOSB (o. J.a): AquaBioTox – Breitband-Sensor zur Überwachung der Trinkwasserqualität. www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/aquabiotox.html (20.4.2023)
- Fraunhofer IOSB (o. J.b): ResiWater – Sichere Sensornetzwerke und Analyse-Tools. <https://www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/resiwater.html> (20.4.2023)
- Fraunhofer IOSB (o. J.c): W-Net 4.0 – Plattform zur Betriebsoptimierung von Wassersystemen. www.iosb.fraunhofer.de/de/projekte-produkte/plattform-betriebsoptimierung-wassersysteme.html (20.4.2023)
- Fraunhofer UMSICHT (o. J.): DigitalFire: Digitalisierung von Biomassefeuerungen. <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/digitalfire.html> (22.9.2023)
- Fricke, D.; Stecken, R. (2022): Der Branchenspezifische Sicherheitsstandard Wasser/Abwasser (B3S WA) – Teil 2: Anwendungshilfe zur Implementierung in einem kleinen Unternehmen. In: energie wasser-praxis 2022(1), S. 50–52
- Fricke, K.; Utermöhlen, R.; Schrey, M. (2018): Umsetzung eines Megatrends – Digitale Transformation in der Abfallwirtschaft. Technikpakete für »smartbins« in der »Abfallwirtschaft 4.0«. In: Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft (10/2018), S. 539–545
- Friege, H.; Dornack, C. (2019): Abfall- und Kreislaufwirtschaft: Prioritäten für nachhaltiges Ressourcenmanagement. In: Englert, M.; Ternès, A. (Hg.): Nachhaltiges Management. Nachhaltigkeit als exzellenten Managementansatz entwickeln. Berlin/Heidelberg, S. 593–611
- Fritsch, P. (2019): Wassergewinnung. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (Hg.): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden, S. 103–225



- Fritzsche, A.; Cimatoribus, C.; Reiser, M.; Fischer, K.; Kranert, M. (2017): Biologische Verfahren. In: Einführung in die Kreislaufwirtschaft, S. 295–422
- Fröhlich, A. (2020): Proteste gegen Gigafabrik. In: Tagesspiel, www.tagesspiegel.de/berlin/tesla-chef-elon-musk-antwortet-den-kritikern-aus-grunheide-4139077.html (9.6.2023)
- Fuchs, S.; Toshovski, S.; Kaiser, M.; Sacher, F.; Thoma, A. (2020): Belastung der Umwelt mit Bioziden realistischer erfassen – Schwerpunkt Einträge über Kläranlagen. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 169/2020, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_169-2020_belastung_der_umwelt_mit_bioziden_realistischer_erfassen_-_schwerpunkt_eintraege_ueber_klaeranlagen.pdf (30.9.2021)
- Fuhrmann, P. (2016): Neuste Entwicklungen und was haben wir bisher bei der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie erreicht? Interview. In: Die Wasserrahmenrichtlinie. Deutschlands Gewässer 2015. Dessau-Roßlau, S. 14–15
- Gailhofer, P.; Franke, J. (2021): Datenregulierung als sozial-ökologische Weichenstellung. In: Zeitschrift für Umweltrecht (10), S. 532–540
- Gallé, T.; Frelat, M.; Huck, V.; Bayerle, M.; Pittois, D.; Braun, C. (2020): Quantitative use of passive sampling data to derive a complete seasonal sequence of flood event loads: a case study for maize herbicides in Luxembourg. In: Environmental Science: Processes Impacts 22(2), S. 294–304
- Geidel, T.; Dworak, T.; Schmidt, G.; Rogger, M.; Matauschek, C.; Völker, J.; Borchardt, D. (2021): Ausgewählte Fachinformationen zur Nationalen Wasserstrategie. Abschlussbericht, Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 86/2021, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-03_texte_86-2021_fachinformation_wasserstrategie_0.pdf (30.8.2023)
- Gelati, E.; Zajac, Z.; Ceglar, A.; Bassu, S.; Bisselink, B.; Adamovic, M.; Bernhard, J.; Malagó, A.; Pastori, M.; Bouraoui, F.; de Roo, A. (2020): Assessing groundwater irrigation sustainability in the Euro-Mediterranean region with an integrated agro-hydrologic model. In: Advances in Science and Research 17, S. 227–253
- German Water Partnership (o.J.): Wasser 4.0. Berlin, <https://germanwaterpartnership.de/en/water-4-0-2/> (19.1.2022)
- Gerth, J.; (2013): Produktionswirtschaftliche Beschreibungs- und Optimierungsmodelle für die Wertstoffsartierung. Dissertation. Technische Universität Ilmenau
- Goldmann, D. (2018): Recycling 4.0 – Auf dem Weg zur Digitalisierung der Kreislaufwirtschaft. In: Thiel, S.; Thomé-Kozmiensky; Goldmann, D. (Hg.): Recycling und Rohstoffe. Neuruppin, S. 3–14
- Gruber, F.; Grähler, W.; Wollmann, P.; Kaskel, S. (2019): Classification of Black Plastics Waste Using Fluorescence Imaging and Machine Learning. In: Recycling 4(4), S. 40
- Grün, E. (2018): Facetten der Digitalisierung: Erste Stationen auf dem Weg zur Wasserwirtschaft 4.0. Vortrag, <https://muelheimer-tagung.de/wp-content/uploads/2018/03/10.35-Gr%C3%BCn.pdf> (23.3.2023)
- Gruner, R. (2018): Informationstechnologie in der Abfallwirtschaft. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 549–463
- Gundupalli, S.; Hait, S.; Thakur, A. (2017): A review on automated sorting of source-separated municipal solid waste for recycling. In: Waste Management 60, S. 56–74



- Gupta, A.; Kulat, K. (2018): A Selective Literature Review on Leak Management Techniques for Water Distribution System. In: *Water Resources Management* 32(10), S. 3247–3269
- Hannappel, S.; Köpp, C.; Zühlke, S. (2016): Aufklärung der Ursachen von Tierarzneimittelfunden im Grundwasser – Untersuchung eintragsgefährdeter Standorte in Norddeutschland. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 54/2016, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_54_2016_aufklaerung_der_ursachen_von_tierarzneimittelfunden_im_grundwasser.pdf (30.8.2023)
- Happel, O.; Junginger, F.; Scheurer, M.; Kasprzyk, O.; Rodriguez, L.; Koch, M.; Krieg, G.; Vollmer, M.; Hoinkis, J.; Atiye, T.; Schäfer, B.; Cakir, U. (2020): Praxiserfahrungen mit dem Online-Sensorsystem WATERTRACE im Bereich der Trinkwasseraufbereitung und Abwasserbehandlung. In: Gesellschaft Deutscher Chemiker (Hg.): *Wasser 2020. Kurzreferate zur Wasser 2020*. Mülheim an der Ruhr, S. 110–115
- Harner, A. (2017): CERT@VDE. VDE – CERT – Was ist ein Response Team? Vortrag DKE Innovation Campus 2017. <https://www.dke.de/resource/blob/1624294/a7ce38689b618f3cb2ed27dc7585ce2a/vde-cert-was-ist-ein-response-team--harner-download-data.pdf> (30.8.2023)
- Hassanzadeh, A.; Rasekh, A.; Galelli, S.; Aghashahi, M.; Taormina, R.; Ostfeld, A.; Banks, M. (2020): A Review of Cybersecurity Incidents in the Water Sector. In: *Journal of Environmental Engineering* 146(5), S. 3120003
- Hein, A.; Offermann, M. (2019): Reifegradmodell Wasserversorgung 4.0. – Ergebnisse eines interaktiven Forschungsprojekts, Teil 1: Konzept, Aufbau und Methodik des Reifegradmodells. In: *energie wasser-praxis* (10/2019), S. 36–41
- Hildebrandt, T.; Geiser, K. (2022): Ransomware: Cyberangriff bei Reitzner AG und Donau-Stadtwerken. Bayerischer Rundfunk, <https://www.br.de/nachrichten/netzwelt/ransomware-cyberangriff-bei-reitzner-ag-und-donau-stadtwerken,T3WwRJP> (23.3.2023)
- Hoch, W. (2019): Hydraulische Berechnungsgrundlagen. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (Hg.): *Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung*. Wiesbaden, S. 55–99
- Höchel, K. (2022): Prognose, Simulation und Steuerung der Abwasserströme in Berlin. In: *wwt Modernisierungsreport 2021/2022*, S. 42–46
- Hoernicke, M.; Stark, K.; Wittenbrink, A.; Bloch, H.; Hensel, S.; Menschner, A.; Fay, A.; Knohl, T.; Urbas, L. (2020): Automation architecture and engineering for modular process plants – approach and industrial pilot application. In: *IFAC-PapersOnLine* 53(2), S. 8255–8260
- Hoffmann, J. (2020): Elektro-Müll-Lkw mit Fernsteuerung. [eurotransport.de](https://www.eurotransport.de/artikel/fuso-ecanter-sensorcollect-elektro-muell-lkw-mit-fernsteuerung-11166568.html), 13.8.2020 <https://www.eurotransport.de/artikel/fuso-ecanter-sensorcollect-elektro-muell-lkw-mit-fernsteuerung-11166568.html>, (29.3.2023)
- Hoffmann, D.; Franz, R.; Hawlitschek, F.; Jahn, N. (2021): Smart Bins: Fallstudienbasierte Bewertung der Nutzenpotenziale von Füllstandssensoren in intelligenten Abfallbehältern. In: *HMD* 58(5), S. 1264–1279
- Hoffmeister, J.; Birnstengel, B.; Faulstich, M.; Harlacz, E.; Schwaab, S.; van Helt, J.; Friege, H. (2018): »Ressourcenstrategie Bundesstadt Bonn«. Optimierung der Sammlung und Verwertung von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen (»critical raw materials«). Management Summary. Düsseldorf, <https://www.bonno>



- range.de/fileadmin/user_upload/downloads/sitzungen_verwaltungsrat/2018/aer-18050_management_summary_bonnorange.pdf (30.8.2023)
- Holländer, R.; Stumpf, L.; Lautenschläger, S.; Interwies, E.; Görlitz, S.; Pielow, C. (2019): Chancen und Herausforderungen in der Verknüpfung der Systeme in der Wasserwirtschaft (Wasser 4.0). Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 29/2020, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-02-05_texte_29-2020_systemverknuepfung-wasserwirtschaft.pdf (30.8.2023)
- Horbach, J.; Rammer, C. (2020): Circular economy innovations, growth and employment at the firm level: Empirical evidence from Germany. In: Journal of Industrial Ecology 24(3), S. 615–625
- HST Systemtechnik (2020a): HSR-Rechen. Der neue 4.0-Standard für Betriebssicherheit und Gewässerschutz. HST-Systemtechnik, Meschede, <https://download.hst.de/download/?wpdmdl=4555> (30.8.2023)
- HST Systemtechnik (Hg.) (2020b): Watervision. Meschede
- IARC (2010): IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 94 IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. International Agency for Research on Cancer, Lyon
- IFA (2021): Branchenbild Energie- und Wasserwirtschaft. Ausführliches Branchenbild aus dem Risikoobservatorium der DGUV. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, https://www.dguv.de/medien/ifa/de/fac/arbeiten_4_0/energie_und_wasserwirtschaft_langfassung.pdf (14.1.2022)
- Ihling, H.; Petzold, R. (2020): Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduzierung der Nitratbelastung im Einzugsgebiet der Quelfassung Schleinitz. In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 25(4), S. 285–299
- InfraLab (o.J.): LoRaWAN-Sensornetzwerk. <https://infralab.berlin/projekte/lorawan-sensornetzwerk/> (9.1.2023)
- InnoAqua GmbH & Co. KG (o.J.): InfoWorks ICM. <https://www.innoaqua.de/software/infoworks-icm/> (25.9.2023)
- Interreg NWE (Interreg North-West Europe) (o.J.). Fibersort: Closing the loop in the textiles industry. <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/bringing-the-fibersort-technology-to-the-market/> (10.3.2023)
- ISWA (International Solid Waste Association) (2017): The Impact of the 4th Industrial Revolution on the Waste Management Sector. Barcelona
- IWA (International Water Association); Xylem Inc. (2019): Digital Water. Industry leaders chart the transformation journey (Sarni, W.; White, C.; Webb, R.; Cross, K.; Glotzbach, R.). https://iwa-network.org/wp-content/uploads/2019/06/IWA_2019_Digital_Water_Report.pdf (30.8.2023)
- Kapelan, Z.; Weisbord, E.; Babovic, V. (2020): Digital Water. Artificial Intelligence Solutions for the Water Sector. International Water Association, https://iwa-network.org/wp-content/uploads/2020/08/IWA_2020_Artificial_Intelligence_SCREEN.pdf (30.8.2023)
- Jansen, F.; Fiedler, M. (2020): Wasserbetriebe gegen Hackerangriffe mangelhaft geschützt. Gutachten warnt vor Zusammenbruch. In: Der Tagesspiegel 28.7.2020; <https://www.tagesspiegel.de/politik/wasserbetriebe-gegen-hackerangriffe-mangelhaft-geschutzt-6863995.html> (3.4.2023)
- Joeres, A.; Steeger, G.; Huth, K.; Donheiser, M.; Wörpel, S. (o.J.): Wo in Deutschland das Grundwasser sinkt. CORRECTIV, <https://correctiv.org/aktuelles/kampf-um-wasser/2022/10/25/klimawandel-grundwasser-in-deutschland-sinkt/> (13.6.2023)



- Jones, C.; Li, T.; Sukalski, A.; Thompson, D.; Cwiertny, D. (2020): Use of real-time sensors for compliance monitoring of nitrate in finished drinking water. In: *Water Science & Technology* 82(12), S. 2725–2736
- Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schauser, I. (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. Umweltbundesamt, Climate Change Nr. 6/2021, Dessau-Roßlau, https://www.adelphi.de/de/system/files/mediathek/bilder/KWRA_2021_Teilbericht_Zusammenfassung_bf_210608.pdf (30.8.2023)
- Kamm, S.; Sharma, K.; Jazdi, N.; Weyrich, M. (2021): A Hybrid Modelling Approach for Parameter Estimation of Analytical Reflection Models in the Failure Analysis Process of Semiconductors. In: 17th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) 2021 IEEE, Lyon, 23.–27.8.2021. In: IEEE, S. 417–422
- Kamstrup A/S Germany (2015): Wie ein Stein ins Rollen gebracht wird... ..oder wie ein Wasserzähler zur interkommunalen Zusammenarbeit beiträgt. Mannheim, <https://www.bdew.de/media/documents/Osthessenverbund-1-Projekt-Digitalisierung-Wasser.pdf> (30.8.2023)
- Kamunda, A.; Renukappa, S.; Suresh, S.; Jallow, H. (2021): BIM in the water industry: addressing challenges to improve the project delivery process. In: *ECAM* 28(2), S. 510–529
- Kaza, S.; Lisa Yao, L.; Bhada-Tata, P.; Van Woerden, F. (2018): What a Waste 2.0: A global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. International Bank for Reconstruction; The World Bank, Washington
- Kerger, S.; Löwen, D.; Stecken, R.; Boos, B. (2022): IT-Sicherheitsniveau kritischer Infrastruktur unterhalb der KritisV. In: *Wasserwirtschaft* 2022(11), S. 42–46
- KfW (Kreditanstalt für Wiederaufbau) (o. J.): IKU – Investitionskredit Kommunale und Soziale Unternehmen. Bauen Sie die Infrastruktur in der Kommune aus. [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/F%C3%B6rderprodukte/Investitionskredit-kommunale-Unternehmen-\(148\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/%C3%96ffentliche-Einrichtungen/Kommunale-Unternehmen/F%C3%B6rderprodukte/Investitionskredit-kommunale-Unternehmen-(148)/) (18.1.2023)
- Kirchhoff, J. (2018): Intelligente Konzepte für Sammelfahrzeuge. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Wiesbaden, S. 601–620
- KIT (Karlsruher Institut für Technologie) (2021): Künstliche Intelligenz: Effizientere Produktionsprozesse dank Algorithmen. <https://www.kit.edu/kit/28983.php> (23.8.2023)
- Klosok-Bazan, I.; Boguniewicz-Zablocka, J.; Suda, A.; Łukasiewicz, E.; Anders, D. (2021): Assessment of leakage management in small water supplies using performance indicators. In: *Environmental science and pollution research international* 28(30), S. 41181–41190
- Knappe, F.; Reinhardt, J.; Kauertz, B.; Oetjen-Dehne, R.; Buschow, N.; Ritthoff, M.; Wilts, H.; Lehmann, M. (2021): Technische Potenzialanalyse zur Steigerung des Kunststoffrecyclings und des Rezyklateinsatzes. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 92/2021, Dessau-Roßlau, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/technische-potenzialanalyse-zur-steigerung-des> (4.2.2022)
- Know-Center GmbH (2021): KI-WASTE: Mit Künstlicher Intelligenz Abfallrecycling verbessern. <https://www.know-center.at/press-release/ki-waste-mit-kuenstlicher-intelligenz-abfallrecycling-verbessern/> (29.3.2023)



- Kommunalwirtschaft.eu (2019): Online Blitzlicht Juni 2019. Thema: Automatisierung. https://kommunalwirtschaft.eu/images/Blitzlicht/201906_Blitzlicht_sheet.pdf (23.8.2023)
- Kommunalwirtschaft.eu (2020): Zum Wegwerfen zu schade – Gebrauchtwaren- und Verschenkbörse auch auf der AbfallApp. <https://kommunalwirtschaft.eu/component/presse/detail/i40937?src=e7cb523b1c626cac323143fa471ba078&catid=134&Itemid=174> (23.8.2023)
- Kommune 21 (2019): Singen. LoRaWAN für Wertstoffhof. https://www.kommune21.de/meldung_31572_LoRaWAN+f%C3%BCr+Wertstoffhof.html (30.8.2023)
- Kranert, M. (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden
- Kropp, I.; Angermair, G. (2016): Planungsunterstützungssystem. 3S Consult GmbH, tandler.com GmbH, Garbsen/Buch am Erlbach
- Krüger, M.; Becker, B.; Fricke, K.; Münnich, K.; Wanka, S.; Zeiner, A.; Spengler, T.; Kieckhäfer, K.; Breitenstein, A.; Dichtl, N.; Fülling, K. et al. (2016): Leitfaden zum Enhanced Landfill Mining. <https://www.oeko.de/uploads/oeko/oekodoc/2602/2016-608-de.pdf> (30.8.2023)
- Krüger, M.; Fricke, K.; Münnich, K.; Wanka, S. (2018): Deponierückbau. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 733–751
- Kumar, A.; Rizvi, S.; Brooks, B.; Vanderveld, R.; Wilson, K.; Kenney, C.; Edelstein, S.; Finch, A.; Maxwell, A.; Zuckerbraun, J.; Ghani, R. (2018): Using Machine Learning to Assess the Risk of and Prevent Water Main Breaks. 24th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, London, 19.–23. August 2018, S. 472–480
- Küppers, B.; Vollprecht, Daniel; Pomberger, R. (2019): Potential of Sensor-based Sorting Technology in Landfill Mining. Detritus, 08/2019, S. 24–30
- Kurte, J.; Esser, K. (2018): Autonomes Fahren. Aktueller Stand, Potenziale und Auswirkungenanalyse. Studie für den Deutschen Industrie- und Handelskammertag e. V., <https://docplayer.org/104790637-Autonomes-fahren-aktueller-stand-potenziale-und-auswirkungsanalyse-studie-fuer-den-deutschen-industrie-und-handelskammertag-e-v.html> (30.8.2023)
- Landesamt GeoInformation Bremen (o.J.): Netzinformationssystem NIS. <https://www.geo.bremen.de/ueber-uns/informationssysteme/netzinformationssystem-nis-12744> (25.9.2023)
- Lange, F.; Pfefferle, M. (2021): Smart City Index 2021. Ausführliche Ergebnisse. Bitkom (Hg.), https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-10/2021-09-30-smart-city-index.pdf?mtm_campaign=smart-city-index-pdf-2021 (30.8.2023)
- Laska, C.; Rombach, G.; Bauerschlag, N. (2019): LIBS-basierte Sortierung. Eine Lösung für Automobilschrott
- Lass, S.; Kotarski, D. (2014): IT-Sicherheit als besondere Herausforderung von Industrie 4.0. In: Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e. V. (HAB): Industrie, S. 397–419
- LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) (2017): Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder. LAWA-Expertengruppe »Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft«, Berlin, https://www.lawa.de/documents/lawa_auswirkungen_des_klimawandels_auf_die_wasserwirtschaft_1552292350.pdf (30.8.2023)



- Lechner, M.; Gehrke, K.; Nordmeier, E. (2014): Makromolekulare Chemie. Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker. Berlin/Heidelberg
- Lepot, M.; Makris, K.; Clemens, F. (2017): Detection and quantification of lateral, illicit connections and infiltration in sewers with Infra-Red camera: Conclusions after a wide experimental plan. In: Water Research, 122, S. 678–691
- Leese, F.; Bernhofer, C.; Borchardt, D.; Bronstert, A.; Flörke, M.; Geist, J.; Gessner, M.; Himmelsbach, T.; Krebs, P.; Olsson, O.; Peiffer, S. et al. (2021): Wassersysteme im Wandel – Herausforderungen und Forschungsbedarfe für die deutsche Wasserforschung. Water Science Alliance, <https://zenodo.org/record/4923068#.YQqL40BCTmE> (30.8.2023)
- Leps, O. (2018a): Der Aufbau von Betriebs- und Steuerungsanlagen. In: Leps (Hg.): Hybride Testumgebungen für Kritische Infrastrukturen: Effiziente Implementierung für IT-Sicherheitsanalysen von KRITIS-Betreibern. Wiesbaden, S. 25–39
- Leps, O. (Hg.) (2018b): Hybride Testumgebungen für Kritische Infrastrukturen: Effiziente Implementierung für IT-Sicherheitsanalysen von KRITIS-Betreibern. Wiesbaden
- Leps, O. (2018c): Informationssicherheit von KRITIS-Betreibern: Eine Übersicht. In: Leps (Hg.): Hybride Testumgebungen für Kritische Infrastrukturen: Effiziente Implementierung für IT-Sicherheitsanalysen von KRITIS-Betreibern. Wiesbaden 2018, S. 9–24
- Lieberknecht, N. (2014): UP KRITIS. Eine öffentlich-private Partnerschaft zum Schutz Kritischer Infrastrukturen. In: BBK Bevölkerungsschutz 2014(4), S. 12–13
- Lindner, C.; Schmitt, J.; Hein, J. (2020): Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2019. Kurzfassung der Conversio Studie. https://issuu.com/plasticseuropeebk/docs/kurzfassung_stoffstrombild_kunststoffe_2019?e=14847134/80757890 (27.3.2023)
- Lippeverband (2020): Geschäftsbericht 2019–2020. https://www.eglv.de/app/uploads/2020/10/LV_Gescha%CC%88ftsbericht-201920_Digital_2_2.pdf (22.12.2022)
- Liu, A.; Giurco, D.; Mukheibir, P.; Mohr, S.; Watkins, G.; White, S. (2017): Online water-use feedback: household user interest, savings and implications. In: Urban Water Journal 14(9), S. 900–907
- Löwen, D.; Kerger, S.; Stecken, R.; Boos, B. (2023): Bestandsaufnahme des IT-Sicherheitsniveaus von kleinen und mittelgroßen Kläranlagen in NRW unterhalb des Grenzwertes der KritisV – subKritis. <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/forschung/Abschlussbericht-A985subKRITIS.pdf> (6.1.2023)
- LSI Bayern (o.J.): Beratungsangebot des LSI für öffentliche Unternehmen im KRITIS-Bereich der Trinkwasserversorgung und der Abwasserentsorgung. <https://www.lsi.bayern.de/kritis/wasser/index.html> (23.3.2023)
- Mackerordt, M. (2019): Mit Detektoren Biomüll-Schummlern auf der Spur. In: Demo 11-12/2019, S. 12
- Maier & Fabris GmbH (2015): Leitfaden zur Einführung des elektronischen Detektionssystems. Teil I. Maier & Fabris GmbH, <https://www.maier-fabris.de/images/Leitfaden23012015.pdf> (6.7.2020)
- Malatji, M. (2022): Industrial control systems cybersecurity: Back to basic cyber hygiene practices. In: IEEE (Hg.): International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). In: IEEE, S. 1–7



- Manzey, D. (2012): Systemgestaltung und Automatisierung. In: Badke-Schaub, P.; Hofinger, G.; Lauche, K. (Hg.): Human Factors. Psychologie sicheren Handelns in Risikobranchen. Berlin/Heidelberg, S. 333–352
- Marquardt, U.; Terhart, L.; Wagner, K.; Hetzel, F. (2021): Der Branchenspezifische Sicherheitsstandard Wasser/Abwasser (Version 2021) – Teil 1: Was sich geändert hat. In: energie wasser-praxis 2021(12), S. 58–60
- Martens, H.; Goldmann, D. (2016): Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Wiesbaden
- Martini, M.; Ruschemeier, H. (2021): Künstliche Intelligenz als Instrument des Umweltschutzes. In: Zeitschrift für Umweltrecht (10), S. 515–531
- Masse-Dufresne, J.; Baudron, P.; Barbecot, F.; Pasquier, P.; Barbeau, B. (2021): Optimizing short time-step monitoring and management strategies using environmental tracers at flood-affected bank filtration sites. In: The Science of the total environment 750, S. 141429
- MCC Verstraete (2019): Richtungsweisende Sortiertechnologie: Holygrail-Projekt stößt in eine Kreislaufwirtschaft vor. <https://iml.mcclabel.com/de/news/richtungsweisende-sortiertechnologie-holygrail-projekt-st%C3%B6sst-eine-kreislaufwirtschaft-vor> (23.8.2023)
- Mechsner, G. (2017): Die Digitalisierung der Abfallwirtschaft – Umfrage deckt Unsicherheit bei Entsorgern auf. Netwaste, <https://www.netwaste.de/blog/waste-5-0/die-digitalisierung-der-abfallwirtschaft-umfrage-deckt-unsicherheit-bei-entsorgern-auf/#more-496> (28.3.2023)
- Meisel, S. (2019): Cyberangriff blockiert Rechner der Stadtwerke. In: RP Online, https://rp-online.de/nrw/staedte/langenfeld/langenfeld-cyberangriff-blockiert-computer-der-stadtwerke_aid-46933969 (3.4.2023)
- Meyer, I.; Sommer, M. (2019): Beschäftigungseffekte abfallwirtschaftlicher Modelle der Restmüllbehandlung. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien, https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=61774&mime_type=application/pdf (30.8.2023)
- Meyer, J.; Fey, D.; Krieg, S. (2017): Kunststoff-Sortierung aus Schredderrückständen mit Hochleistungs-Laserspektroskopie. In: Thomé-Kozmiensky, K.; Goldmann, D.: Recycling und Rohstoffe, Band 10. Neuruppin, S. 193–198
- Ministerium des Innern und für Sport des Landes Rheinland-Pfalz (o. J.): Cyberschutz Rheinland-Pfalz. <https://mdi.rlp.de/themen/verfassungsschutz/cyberschutz/> (28.8.2023)
- Ministerium des Innern und für Sport des Landes Rheinland-Pfalz (2022): Verfassungsschutz unterstützt Unternehmen beim Cyberschutz. 2022, <https://mdi.rlp.de/service/pressemitteilungen/detail/verfassungsschutz-unterstuetzt-unternehmen-beim-cyberschutz> (28.8.2023)
- Möller, K.; Burgschweiger, J. (2008): Wasserversorgungskonzept für Berlin und für das von den BWB versorgte Umland (Entwicklung bis 2040). Auftragsstudie für die Berliner Wasserbetriebe. https://www.berlin.de/sen/uvk/_assets/umwelt/wasser-und-geologie/publikationen-und-merkblaetter/wvk2040.pdf (27.2.2023)
- Monks, I.; Stewart, R.; Sahin, O.; Keller, R. (2019): Revealing Unreported Benefits of Digital Water Metering: Literature Review and Expert Opinions. In: Water 11(4), S. 838
- Moreira, H.; Gomes, H.; Villanueva, J.; Bezerra, S. (2021): Real-time neuro-fuzzy controller for pressure adjustment in water distribution systems. In: Water Supply 21(3), S. 1177–1187



- Mülbaier, M. (2021): Gute Perspektiven für Emscher und Lippe. In: gwf Wasser Abwasser (11), S. 54–56
- Müller, F.; Lehmann, C.; Kosmol, J.; Keßler, H.; Bolland, T. (2017): Urban Mining. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf (30.8.2023)
- Müller-Brehm, J.; Otto, P.; Puntschuh, M. (2020): Einführung und Überblick: Was bedeutet Digitalisierung? In: Bundeszentrale für politische Bildung (Hg.): Digitalisierung. Informationen zur politischen Bildung/izpb, S. 4–7
- Nessi, S.; Bulgheroni, C.; Konti, A.; Sinkko, T.; Tonini, D.; Pant, R. (2018): Environmental sustainability assessment comparing through the means of lifecycle assessment the potential environmental impacts of the use of alternative feedstock (biomass, recycled plastics, CO₂) for plastic articles in comparison to using current feedstock (oil and gas). Draft report for stakeholder consultation, European Commission Joint Research Center. https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/PLAS_TIC_LCI/Plastic_LCA_Report_I_2018.11.20.pdf (30.8.2023)
- New Atlas (2016): Volvo's robot refuse collectors ROAR into life. <https://newatlas.com/volvo-robot-based-autonomous-refuse-handling-project-test/42042/> (29.3.2023)
- Niederste-Hollenberg, J.; Winkler, J.; Fritz, M.; Zheng, L.; Hillenbrand, T.; Kolisch, G.; Schirmer, G.; Borger, J.; Doderer, H.; Dörrfuß, I. (2021): Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale in der Abwasserwirtschaft – aktueller Stand und Perspektiven. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 50/2021, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-04-30_texte_50-2021_klimaschutz_abwasserwirtschaft.pdf (30.8.2023)
- OE (Österreichische E-Wirtschaft); BDEW (2018): Whitepaper Anforderungen an sichere Steuerungs- und Telekommunikationssysteme. Wien/Berlin, https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20180507_OE-BDEW-Whitepaper-Secure-Systems.pdf (30.8.2023)
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2007): Improving Recycling Markets. OECD, Paris, <https://www.oecd.org/env/waste/38093900.pdf> (30.8.2023)
- OECD (2018): Improving Markets for Recycled Plastics: Trends, Prospects and Policy Responses. OECD Publishing, Paris
- OECD (2019): Business Models for the Circular Economy. Paris
- OECD (2020): Labour market consequences of a transition to a circular economy: A review paper (Laubinger, F.; Lansì, E.; Chateau, J.): OECD Environment Working Papers Nr. 62
- Oelmann, M., Czichy, C. Merkel, W.; Hein, A. (2019): Reifegradmodell für eine Wasserversorgung 4.0. Sonderausgabe der Infrastruktur Recht (IR) zur Konferenz »Kommunales Infrastruktur-Management 2018« 01/2019, S. 37–39
- Oelmann, M.; Czichy, C.; Beek, T. aus der; Wencki, K. (2021): Gutachten für den Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: »Gutachten zur Umsetzbarkeit der vom BDEW in die Diskussion gebrachten Fonds-Lösung zur Finanzierung der Spurenstoff-Elimination in Kläranlagen«. MOcons GmbH & Co. KG; IWW Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasser Beratungs- und Entwicklungs-GmbH, Mülheim an der Ruhr, <https://www.bdew.de/media/documents/2022>



- 0112_Gutachten_zur_Finanzierung_der_Elimination_von_Spurenstoffen.pdf (30.8.2023)
- Ökopol (2020): Information flows on Substances of Concern in Products from Supply Chains to Waste Operators. Final Report. European Commission, Brüssel, <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=59d9b462-a9f6-11ea-bb7a-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=> (30.8.2023)
- OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) (2020): Pollution plastique: bombe à retardement? Rapport au nom de l'OPECST. <http://www.senat.fr/rap/r20-217/r20-2171.pdf> (30.8.2023)
- Packaging Europe (2019): Pioneering sorting technology: HolyGrail project moves towards a circular economy. <https://packagingeurope.com/pioneering-sorting-technology-holygrail-project-moves-towards-a-circular-economy/5907.article> (29.3.2023)
- Pawlowska, A. (2022): 10 Jahre Allianz für Cyber-Sicherheit. In: BSI-Magazin 2022(1), S. 20–23
- PCCIP (1997): Critical Foundations. Protecting America's Infrastructure. The Report of the President's Commission on Critical Infrastructure Protection. Washington, <https://www.hsdl.org/?view&did=986> (30.8.2023)
- Pelzl, C. (2020): TU Graz entwickelt autonom fahrenden Elektro-Kompostwender. TU Graz, <https://www.tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-news/einzelansicht/article/tu-graz-entwickelt-autonom-fahrenden-elektro-kompostwender/> (29.3.2023)
- Pennino, M.; Leibowitz, S.; Compton, J.; Hill, R.; Sabo, R. (2020): Patterns and predictions of drinking water nitrate violations across the conterminous United States. In: The Science of the total environment 722, S. 137661
- Pfaff, M.; Sonntag, U. (2022): Mit Kamertechnik und Algorithmen zu sauberem Wasser. Wasserwirtschaft im Spannungsfeld von Krisenmanagement und Zukunftsgestaltung. umweltwirtschaft.com, wwt Modernisierungsreport 2020/2021, Frankfurt a.M.
- Pham, V.-H.; Chen, P.-H.; Pal, A.; Christian; Hsieh, S.-H. (2021): Automatic extraction of daily concrete requirements from 3D BIM and project schedules. In: Central European Symposium on Thermophysics 2021 (CEST 2021). Kazimierz Dolny, 1.–3.9.2021. In: AIP Publishing (AIP Conference Proceedings), S. 20009
- Pinasseau, A.; Zerger, B.; Roth, J.; Canova, M.; Roudier, S. (2018): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Treatment. Joint Research Center of the European Commission, <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/best-available-techniques-bat-reference-document-waste-treatment-industrial-emissions> (30.8.2023)
- Pomberger, R. (2021): Über theoretische und reale Recyclingfähigkeit. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 73(1-2), S. 24–35
- Pretz, T.; Feil, A. (2015): Aufbereitungsmethoden für eine hochwertige Verwertung von NE-Metallen aus Abfallverbrennungsrostaaschen. <https://books.vivis.de/document/aufbereitungsmethoden-fuer-eine-hochwertige-verwertung-von-ne-metallen-aus-abfallverbrennungsrostaaschen/> (30.8.2023)
- Preuss, H. (2019): Modernes InformationsManagement (MIM) versus Google – Wie das Internet die Instandhaltung verändert –. In: vivis (Hg.): Energie aus Abfall Band 16, S. 399-397



- Prognos; INFA (Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH) (2018): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft. Einblicke und Aussichten. BDE; BDSV (Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.); bvse (Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e. V.); ITAD (Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e. V.); PlasticsEurope Deutschland e. V.; VDM (Verband Deutscher Metallhändler e. V.); VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.); VHI (Verband der Deutschen Holzwerkstoffindustrie e. V.); VKU (Verband kommunaler Unternehmen e. V.) (Hg.), Selm, <https://www.vku.de/publikationen/2018/statusbericht-der-deutschen-kreislaufwirtschaft/> (30.8.2023)
- Prognos; INFA (2020): Statusbericht der deutschen Kreislaufwirtschaft 2020. ASA (Arbeitsgemeinschaft Stoffspezifische Abfallbehandlung e. V.); BDE; BDSAV (Bundesverband deutscher Sonderabfallverbrennungsanlagen e. V.); BDSV; bvse; DGAW (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V.); InWesD (Interessengemeinschaft Deutsche Deponiebetreiber e. V.); ITAD; KdK (Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft e. V.); IFAT (Messe München GmbH Messegelände e. V.); PlasticsEurope Deutschland e. V. et al. (Hg.), Selm, https://statusbericht-kreislaufwirtschaft.de/wp-content/uploads/2020/11/2020_Statusbericht_mobil.pdf (30.8.2023)
- Qassim, Q.; Jamil, N.; Mahdi, M.; Cob, Z.; Rahim, F.; Sidek, L. (2021): A Short Review: Issues and Threats Pertaining the Security of SCADA Systems. In: Abdullah, N.; Manickam, S.; Anbar, M. (Hg.): Advances in Cyber Security. Singapur, S. 230–247
- Quicker, P. (2018): Verbrennungsrückstände. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 661–689
- Ramos, H.; McNabola, A.; López-Jiménez, P.; Pérez-Sánchez, M. (2020): Smart Water Management towards Future Water Sustainable Networks. In: Water 12(1), S. 58
- Randall, T.; Koech, R. (2019): Smart Water Metering Technology for Water Management in Urban Areas. In: Water e-Journal 4(1), S. 1–14
- Rautenberg, J. (2019a): Ziele und Aufgaben der Wasserversorgung. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B.: Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden, S. 3–14
- Rautenberg, J. (2019b): Management, Betrieb und Instandhaltung. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B.: Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung. Wiesbaden, S. 837–923
- Reckter, B. (2021): Vom Wasser befreit. In: VDI-Nachrichten 36, S. 19
- Recycling Magazin (2019): IFAT: Künstliche Intelligenz in der Abfallwirtschaft. <https://www.recyclingmagazin.de/2019/12/17/ifat-kuenstliche-intelligenz-in-der-abfallwirtschaft/> (28.3.2023)
- Recycling Magazin (2020a): Cirplus: Neuer Pilotpartner zum Start. <https://www.recyclingmagazin.de/2020/02/27/cirplus-neuer-pilotpartner-zum-start> (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2020b): Digitaler Marktplatz für den Altpapierhandel. <https://www.recyclingmagazin.de/2020/09/28/digitaler-marktplatz-fuer-den-alt-papierhandel/> (31.3.2023)



- Recycling Magazin (2020c): FUSO zeigt fernsteuerbares Müllfahrzeug. www.recyclingmagazin.de/2020/08/11/fuso-zeigt-fernsteuerbares-muellfahrzeug/?utm_ (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2020d): Kunststoffverpackungen nachhaltig gestalten. www.recyclingmagazin.de/2020/09/18/ (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2021a): Metallrecycling mit laserbasierter Sensortechnik. <https://www.recyclingmagazin.de/2021/01/25/metallrecycling-mit-laserbasierter-sensortechnik/> (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2021b): Restabfallsortierung wegweisend zur Erhöhung der Recyclingraten. <https://www.recyclingmagazin.de/2021/12/01/restabfallsortierung-wegweisend-zur-erhoehung-der-recyclingraten/> (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2021c): Sortiertechnologie macht Aluminium »green«. www.recyclingmagazin.de/2021/08/03/sortiertechnologie-macht-aluminium-green/ (29.3.2023)
- Recycling Magazin (2021d): Weltweit erste vollautomatische Textilsortieranlage in Malmö. www.recyclingmagazin.de/2021/02/18/weltweit-erste-vollautomatische-textilsortieranlage-in-malmoe (29.3.2023)
- RecyclingPortal.eu (2020): EWL setzt 160 Euro je Tonne CO₂ bei Abfall-Logistik an. <https://recyclingportal.eu/Archive/57978> (31.3.2023)
- Reinecke, S.; Höffmann, A.; Stachowske, M.; Hampel, U.; Ehrhard, P. (2018): Effizienzsteigerung von Kläranlagen – Vorstellung von Mess- und Simulationstechnischen Methoden. In: GIT Labor-Fachzeitschrift 62(4), S. 53–56
- Renner, G.; Hohrenk-Danzouma, L. (2021): Auf Spurensuche: Non-Target-Screening in der Wasseranalytik. Faszination Chemie, <https://faszinationchemie.de/wissen-und-fakten/news/auf-spurensuche-non-target-screening-in-der-wasseranalytik/> (23.8.2023)
- Resch, H.; Schatz, R. (2010): Abwassertechnik verstehen: Ein kleines 1x1 der Abwassertechnik für Einsteiger und interessierte Laien. Oberhaching/München
- Rettenberger, G. (2018): Deponien. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Wiesbaden, S. 709–731
- Riedel, T.; Nolte, C.; aus der Beek, T.; Liedtke, J.; Sures, B.; Grabner, D. (2021): Niedrigwasser, Dürre und Grundwasserneubildung – Bestandsaufnahme zur gegenwärtigen Situation in Deutschland, den Klimaprojektionen und den existierenden Maßnahmen und Strategien. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 174/2021, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-01-17_texte_174-2021_niedrigwasser_duerre_und_grundwasserneubildung.pdf (23.3.2023)
- Rocca, R.; Rosa, P.; Sassanelli, C.; Fumagalli, L.; Terzi, S. (2020): Integrating Virtual Reality and Digital Twin in Circular Economy Practices: A Laboratory Application Case. In: Sustainability 12(6), S. 2286
- Roland Berger GmbH (2018): GreenTech made in Germany 2018. Umwelttechnik-Atlas für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hg.), Berlin
- Sack, D. (2022): Öffentliche Infrastrukturen, Gewährleistungsstaat und die Zusammenarbeit zwischen Staat, Wirtschaft und Zivilgesellschaft. In: Bürger und Staat 2022, S. 12–18
- Sæther Fasting, M. (2019): Industry 4.0 in Waste Management. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/2619874/no.ntnu%3ainspera%3a2562880.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (2.6.2020)



- Sagan, V.; Peterson, K.; Maimaitijiang, M.; Sidike, P.; Sloan, J.; Greeling, B.; Maalouf, S.; Adams, C. (2020): Monitoring inland water quality using remote sensing: potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. In: *Earth-Science Reviews* 205, Art. 103187
- Salomons, E.; Housh, M. (2020): Practical real-time optimization for energy efficient water distribution systems operation. In: *Journal of Cleaner Production* 275, Art. 124148
- Santarius, T. (2012): Der Rebound-Effekt: Über die unerwünschten Folgen der erwünschten Energieeffizienz. *Impulse zur Wachstumswende* Nr. 5, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal, <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/59299/1/716107694.pdf>; Der (30.8.2023)
- Sarc, R.; Curtis, A.; Kandlbauer, L.; Khodier, K.; Lorber, K.; Pomberger, R. (2019): Digitalisation and intelligent robotics in value chain of circular economy oriented waste management – A review. In: *Waste Management* 95(95), S. 476–492
- Sarc, R.; Curtis, A.; Kandlbauer, L.; Khodier, K.; Lorber, E.; Pomberger, R. (2020): Abfallwirtschaft 4.0. In: Frenz, W. (Hg.): *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Berlin, Heidelberg, S. 989–1014
- Scheller, H. (2017): Kommunale Infrastrukturpolitik: Zwischen Konsolidierung und aktiver Gestaltung. In: *APuZ* 16–17, S. 39–46
- Schindler, J. (2019): Entwicklung des Datenmanagements für Betrieb und Instandhaltung bei der Stadtreinigung Hamburg – Migrationsstrategie für Bestandsanlagen und Neubauprojekte –. In: *vivis* (Hg.): *Energie aus Abfall* Band 16, S. 417–426
- Schleich, B.; Dittrich, M.-A.; Clausmeyer, T.; Damgrave, R.; Erkoyuncu, J.; Haefner, B.; de Lange, J.; Plakhotnik, D.; Scheidel, W.; Wuest, T. (2019): Shifting value stream patterns along the product lifecycle with digital twins. In: *Procedia CIRP* 86, S. 3–11
- Schmidt, W.; Wagner, M. (2016): Zum Stand der Anwendung von Online-Sensoren für die Trinkwasserüberwachung in deutschen Wasserwerken. In: *energie wasser-praxis* 1, S. 58–62
- Schneider, M. (2020): Smart Waste Management für die Smart City. In: Etezadzadeh, C. (Hg.): *Smart City – Made in Germany*. Wiesbaden, S. 376
- Schneider, T.; Schmidt, V. (2020): Rechtsgutachten umweltfreundliche öffentliche Beschaffung. Aktualisierung 2020. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 188, Dessau-Roßlau
- Schultz, W.; Javey, S.; Sorokina, A. (2018): Smart Water Meters and Data Analytics Decrease Wasted Water Due to Leaks. In: *Journal AWWA*, S. E24 – E30
- Shawar, B.-A.; Atwell, E. (2007): Chatbots: are they really useful? In: *Ldv forum* 22(1), S. 29–49
- Sieker (Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH) (o. J.): Modellierung mit STOAT. <https://www.sieker.de/fachinformationen/abwasserbehandlung/klaeranlagensimulation/article/modellierung-mit-stoat-166.html> (25.9.2023)
- Simon, S.; Schöpfer, R.; Schumacher, D.; Meyer, C. (2019): Auswirkungen der Sommertrockenheit 2018 auf die öffentliche Wasserversorgung. In: *energie wasser-praxis* (3), S. 14–19
- Singh, R.; Horne, D. (2020): Water-quality issues facing dairy farming: potential natural and built attenuation of nitrate losses in sensitive agricultural catchments. In: *Animal Production Science* 60(1), S. 67



- Slay, J.; Miller, M. (2008): Lessons Learned from the Maroochy Water Breach. In: Goetz, E.; Shenoi, S. (Hg.): Critical Infrastructure Protection. Boston, IFIP International Federation for Information Processing, Volume 253, S. 73–82
- Smartcity Duisburg (2020): Der digitale Recyclinghof – Wirtschaftsbetriebe Duisburg stellen ihre Projekte vor. <https://www.duisburg.de/microsites/smartcityduisburg/news/digitaler-recyclinghof.php> (28.3.2023)
- Söbke, H.; Peralta, P.; Smarsly, K.; Armbruster, M. (2021): An IFC schema extension for BIM-based description of wastewater treatment plants. In: Automation in Construction 129, S. 103777
- Spektrum.de (o.J.): Landschaftswasserhaushalt. <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/landschaftswasserhaushalt/9251> (23.8.2023)
- SRU (Sachverständigenrat für Umweltfragen) (2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa. Umweltgutachten 2020. Berlin, https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Entschlossene_Umweltpolitik.pdf?__blob=publicationFile&v=27 (30.8.2023)
- Stadtwerke Wismar GmbH (2021): Folgemittelung zum Cyberangriff bei den Stadtwerken Wismar. Pressemitteilung, <https://www.stadtwerke-wismar.de/de/Unternehmen/News/Archiv-2021/Cyberangriff-bei-den-Stadtwerken-Wismar/PM-2-Stadtwerke-Wismar-12.10.pdf> (4.11.2021)
- Statista (2016a): Starkregen – Umfrage zu Anpassungen der Entwässerungssysteme in Deutschland 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585433/umfrage/umfrage-zu-anpassungen-von-entwaesserungssystemen-in-deutschland/> (16.1.2023)
- Statista (2016b): Starkregen – Umfrage zu Kostensteigerung der Entwässerungssysteme in Deutschland 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585538/umfrage/umfrage-zur-kosten-der-zunehmenden-belastung-der-entwaesserungssysteme-in-deutschland/> (16.1.2023)
- Statista (2023): Entwicklung des Wasserverbrauchs pro Einwohner und Tag in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2022. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/12353/umfrage/wasserverbrauch-pro-einwohner-und-tag-seit-1990/> (23.8.2023)
- Statistisches Bundesamt (2018): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung 2016 – Fachserie 19, Reihe 2.1.3. Strukturdaten zur Wasserwirtschaft. Bonn, https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-19.html (30.8.2023)
- Statistisches Bundesamt (2019): Umwelt. Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung – Öffentliche Wasserversorgung – 2016. Fachserie 19, Reihe 2.1.1. Wasserversorgung. Bonn, https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-19.html (30.8.2023)
- Stein, U.; Bueb, B.; Bouleau, G.; Rouillé-Kielo, G. (2023): Making Urban Water Management Tangible for the Public by Means of Digital Solutions. In: Sustainability 15(2), S. 1280
- Stier, M.; Gehardt, J. (2022): Analyseplattform – Optimierte Begasung von Belebungsbecken. umweltwirtschaft.com, wwt Modernisierungsreport 2020/2021
- Suezwater (o.J.): Satellite water leak detection. www.suez.com/en/uk/water-network-management/leakage/satellite-water-leak-detection (20.4.2023)



- Suezwater (2017): Satellite Leak Detection Case Study. www.suezwater.co.uk/wp-content/uploads/2017/11/SUEZ-Satellite-Leak-Detection-Yorkshire-Water-Case-Study-WEB.pdf (20.4.2023)
- Sundermann, G.; Wägner, N.; Cullmann, A.; von Hirschhausen, C.; Kempfert, C. (2020): Nitratbelastung im Grundwasser überschreitet Grenzwert seit Langem: Mehr Transparenz und Kontrolle in der Düngepraxis notwendig. DIW-Wochenbericht Nr. 87, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin, <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/219343/1/1692668579.pdf> (30.8.2023)
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2019): Arzneimittelrückstände in Trinkwasser und Gewässern. (Klauer, K.; Aicher, C.; Bratan, T.; Eberle, U.; Hillenbrand, T.; Kümmerer, K.; Reuter, W.; Schiller, J.; Schulte-Römer, N.; Schramm, E.; Tettenborn, F.; Völker, C.; Walz, A.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 183, Berlin
- TAB (2021): Digitalisierung der Landwirtschaft: gesellschaftliche Voraussetzungen, Rahmenbedingungen und Effekte. (Kehl, C.; Steiger, S.; Meyer, R.) TAB-Arbeitsbericht Nr. 194, Teil II, Berlin
- TUHH (Technische Universität Hamburg) (o.J.): Online-Monitoring und digitale Steuerung in Trinkwasserversorgungssystemen. www.tuhh.de/www/forschung/laufende-projekte/modicon.html (20.4.2023)
- Thim, C.; Kotarski, D. (2015): Herausforderungen der IT-Sicherheit bei kleinen und mittleren Betreibern kritischer Infrastrukturen. In: energie wasser-praxis (10), S. 44–46
- TLV (Thüringer Landesamt für Verbraucherschutz) (2018): Allgemeinverfügung. Bad Langensalza. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjBv8OO-vv9AhX4SfEDHaOtAcwQFnoECBMQAAQ&url=https%3A%2F%2Fverbraucherschutz.thueringen.de%2Ffileadmin%2Fstartseite%2Flebensmittel%2Ftrinkwasser%2Fdoc%2Fallgemeinverfuegung_trinkwasser_edv.pdf&usg=AOvVaw3ouAlpkOcGJit3PFVRiFII (27.3.2023)
- Trick, I.; Burger Kentischer, A.; Kohl, C.; Kerger, C.; Jacubasch, A.; Bernard, T. (2018): Fully automated and long term stable biological Toxicity Sensor. [https://www.iosb.fraunhofer.de/content/dam/iosb/iosbtest/documents/kompetenzen/systemtechnik/MRD/oe121/Sensor%20System%20AquaBioTox-II%20%20\(2018-06-22\).pdf](https://www.iosb.fraunhofer.de/content/dam/iosb/iosbtest/documents/kompetenzen/systemtechnik/MRD/oe121/Sensor%20System%20AquaBioTox-II%20%20(2018-06-22).pdf) (1.3.2023)
- TWL (Technische Werke Ludwigshafen) (2020): Hacker erpressen Technische Werke Ludwigshafen. Technische Werke Ludwigshafen AG, https://www.twl.de/das-ist-twL/newsroom/news/detail?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=153&cHash=baffc4007b88a4e154b54aece70d242 (30.8.2023)
- tz (2021): Sauber! München will smarteste Stadt Deutschlands werden – mit intelligenten Mülleimern. www.tz.de/muenchen/stadt/muenchen-muelleimer-test-smarteste-stadt-deutschlands-intelligent-ziel-zr-90947147.html (28.3.2023)
- UK Water Partnership (2019): Digital Water. Understanding the commercial opportunities for UK PLC. <https://www.theukwaterpartnership.org/wp-content/uploads/2019/12/UK-Water-Partnership-Digital-Water.pdf> (30.8.2023)
- UBA (Umweltbundesamt) (2018): Klarwasser in Flüssen: Herausforderung für das Trinkwasser? <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klarwasser-in-fluessen-herausforderung-fuer-das> (20.4.2023)



- UBA (2020a): Thermische Behandlung. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung#thermische-behandlung-von-siedlungsabfallen> (30.8.2023)
- UBA (2020b): Kommunalfahrzeuge. Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung. Dessau-Roßlau
- UBA (2021): Stickstoff. www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/stickstoff#einfuehrung/ (20.4.2023)
- UBA (2022a): Elektroaltgeräte. www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/produktverantwortung-in-der-ab (31.3.2023)
- UBA (2022b): FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser> (20.4.2023)
- UBA (2022c): Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten. www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten (29.3.2023)
- UBA (2022d): Wasserrahmenrichtlinie. www.umweltbundesamt.de/wasserrahmenrichtlinie (31.3.2023)
- UBA (2022e): Chemischer Zustand der Fließgewässer. www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/fliessgewaesser/chemischer-zustand-der-fliessgewaesser#der-chemische-zustand-der-gewasser (20.4.2023)
- UBA (2022f): Spurenstoffzentrum des Bundes: Über uns. <https://www.umweltbundesamt.de/spurenstoffzentrum-des-bundes-ueber-uns?parent=93380> (20.4.2023)
- UBA (2022g): Spurenstoffzentrum des Bundes: Über uns. <https://www.umweltbundesamt.de/spurenstoffzentrum-des-bundes-ueber-uns?parent=93380> (23.8.2023)
- UBA (2023): Wasser bewirtschaften. www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/wasser-bewirtschaften/nachhaltige-wasserwirtschaft#undefined (20.4.2023)
- Umweltwirtschaft.com (2019): Chancen der Digitalisierung – Wasserwirtschaft 4.0 bei EGLV. <https://www.umweltwirtschaft.com/news/wasser-und-abwasserbehandlung/klaeranlagen/Abwasser-Chancen-der-Digitalisierung--Wasserwirtschaft-4.0-bei-EGLV--12994> (20.4.2023)
- UP KRITIS (2014): Früherkennung und Bewältigung von IT-Krisen (Aktualisierung 2014). https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/KRITIS/UPK/upk-frueherkennung-bewaeltigung-krisen.pdf?__blob=publicationFile&v=1 (3.3.2022)
- UP KRITIS (2020): Empfehlungen zur Nutzung von Cloud-Dienstleistungen in Kritischen Infrastrukturen. Version 1.7, Themenarbeitskreis »Nutzung cloudbasierter Dienste« des UP KRITIS. https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/KRITIS/UPK/upk-empfehlungen-cloudnutzung.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (30.8.2023)
- Urban, W.; Mosbach, J. (2020): Wasserversorgung. In: Valentin, F.; Urban, W. (Hg.): Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik: Technik – Organisation – Wirtschaftlichkeit, Wiesbaden, S. 167–224
- Valentin, F.; Urban, W. (Hg.) (2020): Wasserwesen, Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik: Technik – Organisation – Wirtschaftlichkeit. Wiesbaden
- Van Eygen, E.; Fellner, J. (2020): Nutzen und Kosten eines verstärkten Recyclings von Kunststoffverpackungen. In: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72(1-2), S. 38–46
- VDE (o. J.a): Die erste IT-Sicherheitsplattform in Deutschland für Industrieunternehmen. <https://www.vde.com/topics-de/digital-security/cert-vde> (28.8.2023)



- VDE (o.J.b): Informationssicherheit in der Netz- und Stationsleittechnik nach IEC 62351. VDE SPEC 90002 V1.0. Frankfurt, <https://www.vde.com/resource/blob/1970542/4f06c6778b9321f7f400de26b5415b0d/vde-spec-informationssicherheit-in-der-netz--und-stationsleittechnik---download-data.pdf> (30.8.2023)
- VDI ZRE (VDI Zentrum Ressourceneffizienz) (o.J.): Kreislaufwirtschaft. (<https://www.ressource-deutschland.de/themen/kreislaufwirtschaft/>) (30.8.2023)
- Ver.di (2015): Wasserwirtschaft in Deutschland. Branchenanalyse. Trends und Herausforderungen. Berlin, <https://ver-und-entsorgung.verdi.de/++file++57515f264f5e921529582639/download/ver.di-Branchenanalyse%20Wasserwirtschaft%202015.pdf> (30.8.2023)
- Ver.di (2020a): Reich an Ideen für digitale Erfolgsprojekte. Praxisreport zur Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Berlin
- Ver.di (2020b): Berliner Wasserbetriebe: Reich an Ideen für digitale Erfolgsprojekte. Praxisreport zur Digitalisierung in der Wasserwirtschaft. Berlin
- Versen, M. (2020): Digital GreenTech – Kurzprojekt: OHA-FLIM (Zier, K.). <https://www.th-rosenheim.de/forschung-entwicklung/kompetenzfelder-und-projekte/werkstofftechnik-und-materialwissenschaft/oha-flim/> (12.2.2021)
- Vestner, R.; Keilholz, P. (2016): Was bedeutet der »4.0-Ansatz« für die Wasserwirtschaft? 49. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft, Gewässer, Wasser, Abwasser 239, Aachen
- VKU (Verband kommunaler Unternehmen e. V.) (o. J.): Smart Bins – Erfahrungen mit Sensortechnik. <https://www.vku.de/themen/digitalisierung/smart-bins-erfahrungen-mit-sensortechnik/> (30.8.2023)
- VKU (2017): Auswertungsbericht zur VKU-Mitgliederbefragung »Digitalisierung in der kommunalen Wasserwirtschaft« Befragungszeitraum: 29. Mai bis 14. Juni 2017, Berlin
- VKU (2019): Abfallwirtschaft Digital. Beispiele aus der kommunalen Praxis. Berlin
- VKU (2020): Digitalisierung und Innovationen. Das Interview mit Nico Jahn. VKU-News Nr. 251-12, S. 9
- VKU (2020): Noch immer wenige Abstimmungsvereinbarungen mit den Dualen Systemen. <https://www.vku.de/themen/recht/noch-immer-wenige-abstimmungsvereinbarungen-mit-den-dualen-systemen/> (13.6.2023)
- Volvo Group (2017): Volvo pioneers autonomous, self-driving refuse truck in the urban environment. www.volvogroup.com/en-en/news/2017/may/news-2561936.html (28.3.2023)
- Waste Management World (2021): Waste monitoring helps Ekocharita reduce waste collection costs by 20%. <https://waste-management-world.com/artikel/waste-monitoring-helps-ekocharita-reduce-waste-collection-costs-by/> (23.8.2023)
- Waste360 (2019a): Autonomous Vehicles: The Next Big Trend in the Waste, Recycling Industry? <https://www.waste360.com/fleets-technology/autonomous-vehicles-next-big-trend-waste-recycling-industry> (29.3.2023)
- Waste360 (2019b): Volvo, NVIDIA to Develop AI Platform for Autonomous Trucks. <https://www.waste360.com/trucks/volvo-nvidia-develop-ai-platform-autonomous-trucks> (28.3.2023)
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen) (2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft. https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/wbgu_hg2019.pdf (30.8.2023)



- Weiß, M. (2019a): Energiesatz und Wasserförderung. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (Hg.): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung, Wiesbaden, S. 385–462
- Weiß, M. (2019b): Prozessleittechnik und Messtechnik. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (Hg.): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung, Wiesbaden, S. 723–762
- Wellbrock, B. (2019): Schutz kritischer Infrastrukturen: Klärwerk vollständig gehackt. <https://www.psw-group.de/blog/schutz-kritischer-infrastrukturen-klarwerk-vollstaendig-gehackt/6890> (23.3.2023)
- Werfel, H. (2021): Stadtwerke Wismar jetzt im stabilen Notbetrieb. In: Ostsee-Zeitung, S. 13
- Wetzel, U. (2020): Welche rechtliche Wirkung hat das DVGW-Regelwerk in der Wasserversorgung. In: energie wasser-praxis (3), S. 10–11
- Wilts, H.; Berg, H. (2017): Digitale Kreislaufwirtschaft. Die Digitale Transformation als Wegbereiter ressourcenschonender Stoffkreisläufe. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, in brief Nr. 04/2017, Wuppertal, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6977/file/6977_Wilts.pdf (18.6.2020)
- Wilts, H.; Galinski, L.; von Gries, N.; Saurat, M.; Schinkel, J.; Steger, S.; Spengler, L.; Jepsen, D.; Hirschnitz-Garbers, M. (2019): Geeignete Maßstäbe und Indikatoren zur Erfolgskontrolle von Abfallvermeidungsmaßnahmen. Abschlussbericht. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 79/2019, Dessau-Roßlau, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7424/file/7424_Erfolgskontrolle.pdf (30.8.2023)
- WISE Freshwater Information System for Europe (o. J.): Overview: urban waste water production and its treatment. <https://water.europa.eu/freshwater/countries/uwwt/germany> (23.8.2023)
- WD (Wissenschaftliche Dienste) (2006): Was ist Daseinsvorsorge? Historische Entwicklung, aktueller Stand, Aufgaben der Kommunen, Bedeutung des Begriffs in der aktuellen Debatte. Ausarbeitung. WF III – 035/06, Deutscher Bundestag, Berlin
- Woidasky, J.; Sander, I.; Schau, A.; Moesslein, J.; Richards, B.; Turshatov, A.; Lang-Koetz, C. (2019): Quality Leap in Plastic Waste Management by Tracer Based Sorting. Sustainability 2021, 13, 258
- Wolter, M. (2020): Digitaler Sperrmüllantrag – Vom Pilotprojekt in den Realbetrieb. In: VKU (Hg.): Digitalisierung und Innovation, S. 14–15
- WRc (Water Research Centre) (o. J.): STOAT: Wastewater Plant Modelling Tool. <https://www.wrcgroup.com/services/stoat-wastewater-works-modelling-free-ware/> (25.9.2023)
- Wricke, B. (2019): Wasseraufbereitung. In: Baur, A.; Fritsch, P.; Hoch, W.; Merkl, G.; Rautenberg, J.; Weiß, M.; Wricke, B. (Hg.): Mutschmann/Stimmelmayer Taschenbuch der Wasserversorgung, Wiesbaden, S. 227–383
- Wriedt, G.; de Vries, D.; Eden, T.; Federolf, C. (2019): Regionalisierte Darstellung der Nitratbelastung im Grundwasser Niedersachsens. In: Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie 24(1), S. 27–41
- Zeschmar-Lahl, B.; Schönberger, H.; Waltisberg, J. (2020): Abfallmitverbrennung in Zementwerken. Sachverständigengutachten. Umweltbundesamt, UBA-Texte Nr. 202/2020, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_05_texte_202_2020_abfallverbrennung_zementwerke_1.pdf (30.8.2023)



- ZfK (Zeitung für kommunale Wirtschaft) (2020): Kommunale Unternehmen können Kreislaufwirtschaft nicht allein organisieren. www.zfk.de/entsorgung/abfallwirtschaft/artikel/756933adaa335e3afcbb22c9618aaacf/ (31.3.2023)
- ZfK (2021): Hamburgs Wasserentnahme aus der Nordheide vor Gericht. www.zfk.de/wasser-abwasser/wasser/hamburgs-wasserentnahme-aus-der-nordheide-vor-gericht, 06.10.2021 (31.3.2023)
- Zigelli, N. (2016): Praxisorientierte Überwachung von Wasserschutzgebieten. DVGW-Bezirksgruppen-Winterprogramm 2016/2017, Bonn

8 Anhang

8.1 Abbildungen

Abb. 2.1	Stufen des Reifegradmodells Wasserversorgung 4.0	44
Abb. 3.1	Abfallhierarchie	55
Abb. 3.2	Sensor am Behälter in der Stadt Bochum	69
Abb. 3.3	Unterflurbehälter der Berliner Stadtreinigung	77
Abb. 4.1	Wassergewinnung durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen nach Größenklassen der betrieblichen Wassergewinnung	127
Abb. 4.2	Architektur der IT-Infrastruktur von wasserwirtschaftlichen Betrieben	136
Abb. 4.3	Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	138
Abb. 4.4	Zentrale Leitstelle für die Überwachung und Steuerung wasserwirtschaftlicher Anlagen	139
Abb. 4.5	Analoge versus digitale Sensoren	143
Abb. 4.6	Biologischer Breitbandsensor AquaBioTox	146
Abb. 4.7	Servicemodelle von Clouddienstleistungen	151
Abb. 4.8	Assistenzsystem SmartLISA	159
Abb. 4.9	Struktur eines digitalen Zwillings für Wasserverteilnetzwerke	162
Abb. 4.10	Einsatzwagen und Ausstattung für Robotereinsatz im Kanalnetz	178
Abb. 4.11	Nutzung digitaler Technologien für betriebsinterne Reaktionen	192
Abb. 4.12	Nutzung digitaler Technologien im Rahmen von Aktivitäten mit externen Akteuren	192
Abb. 4.13	Nutzung von Kommunikationstechnologien für die interne Kommunikation	193
Abb. 4.14	Nutzung von Kommunikationstechnologien für die Kommunikation mit externen Akteuren	193
Abb. 4.15	Nutzung digitaler Lösungen nach Handlungsstrang	195
Abb. 4.16	Einschätzung des Nutzens digitaler Lösungen in Ausnahmesituationen	197
Abb. 4.17	Nachfrage nach digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Trinkwasserversorgung	198
Abb. 4.18	Nachfrage nach digitalen Technologien für die Bewältigung von Ausnahmesituationen in der Abwasserentsorgung	198



Abb. 4.19	Einschätzung der Rolle von Erkenntnismethoden zur Entscheidungsfindung	201
Abb. 5.1	Gesamtzahl der meldepflichtigen IT-Sicherheitsvorfälle bei KRITIS-Betreibern	241
Abb. 5.2	Meldungszahlen nach KRITIS-Sektoren	242
Abb. 5.3	Mängel gemäß Nachweisverfahren nach BSIG im Wassersektor	271
Abb. 5.4	Ergebnisse »Sicherheitsorganisation und -management« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	284
Abb. 5.5	Ergebnisse »IT-Sicherheit« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	286
Abb. 5.6	Ergebnisse »Überwachung und Monitoring« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	288
Abb. 5.7	Ergebnisse »Externe Abhängigkeiten« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	290
Abb. 5.8	Ergebnisse »Notfallmanagement« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	292
Abb. 5.9	Ergebnisse »Security Awareness/spezifisches Domänenwissen« differenziert nach Branche (links) und nach Unternehmensgröße (rechts)	294
Abb. 5.10	Teilergebnisse »Hemmnisse« differenziert nach Branche	296
Abb. 5.11	Teilergebnisse »Hemmnisse« differenziert nach Unternehmensgröße	297
Abb. 5.12	Befragungsergebnisse über alle Kläranlagen nach Bewertungsschema	299
Abb. 5.13	Bewertungsergebnisse nach Größenklasse	300
Abb. 5.14	Bewertungsergebnisse nach Bausteinen des IT-Grundschutzes	301

8.2 Tabellen

Tab. 2.1	Einteilung der Sektoren in Kritische Infrastrukturen (Stand Januar 2023)	51
Tab. 5.1	Anlagenkategorien und Schwellenwerte im Sektor Wasser	248
Tab. 5.2	Wassergewinnung durch öffentliche Wasserversorgungsunternehmen mit eigener Wassergewinnung (nach Größenklasse)	250
Tab. 5.3	Einordnung der Unternehmen in Größenklassen	282

8.3 Kästen

Kasten 3.1	Duale Systeme und die Sammlung von Verpackungen	57
Kasten 3.2	Beispiel: KI für die Optimierung von Betriebsabläufen in Müllverbrennungsanlagen	78
Kasten 3.3	Sortierung von Abfällen	79
Kasten 3.4	Dokumentation von nachweispflichtigen Abfällen	87
Kasten 3.5	Beispiel: »Junker Guru«	89
Kasten 3.6	Einschätzung der marktwirtschaftlichen Entwicklungen der Branche	94
Kasten 4.1	Technische Selbstverwaltung	121
Kasten 4.2	Digitale Innovationsbereitschaft der Wasserwirtschaft	134
Kasten 4.3	Methodik	190
Kasten 5.1	IT-Sicherheitsvorfälle in US-amerikanischen Unternehmen	224
Kasten 5.2	Angriff auf Mobilfunkrouter	225
Kasten 5.3	Angriff auf ungesicherte Funkverbindung eines Abwassersystems	228
Kasten 5.4	Angriffe auf Schnittstellen für Fernzugriffe	230
Kasten 5.5	DoS-Angriff auf einen VPN-Router	232
Kasten 5.6	IT-Sicherheitsvorfälle durch Schadprogramme in Deutschland	233
Kasten 5.7	IT-Sicherheitsvorfälle durch Schadprogramme im internationalen Kontext	234
Kasten 5.8	Auswirkungen des Krieges in der Ukraine auf die Meldezahlen von IT-Sicherheitsvorfällen	241
Kasten 5.9	Anforderungsstufen für technische Regeln	244
Kasten 5.10	Auswahl Interviewpartner	273



**BÜRO FÜR TECHNIKFOLGEN-ABSCHÄTZUNG
BEIM DEUTSCHEN BUNDESTAG**

Karlsruher Institut für Technologie

Neue Schönhauser Straße 10
10178 Berlin

Telefon: +49 30 28491-0
E-Mail: buero@tab-beim-bundestag.de
Web: www.tab-beim-bundestag.de
Twitter: @TABundestag