

Von der Realität zum (hybriden) digitalen Zwilling: Intelligente Prozesse in der Wasseraufbereitung

Sebastian Chalupczok*, Nora Pankow,
Steffen Krause, Christian Schaum
Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Universität der Bundeswehr München
Neubiberg, Deutschland,
*sebastian.chalupczok@unibw.de

Meriam Jebali Samet*, Henrik Wienken, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg
Hamburg, Deutschland,
*meriam.jebali@hsu-hh.de

Kurzfassung – Wasserversorgung und Abwasserentsorgung gehören zu den kritischen Infrastrukturen (KRITIS). Kann die Abwasserentsorgung nicht sichergestellt werden, hat das neben hygienischen Problemen auch ernste Folgen für die Umwelt. Bei Kläranlagen handelt es sich um langlebige Infrastrukturen. Sich ändernde Rahmenbedingungen können jedoch für längere Prognosezeiträume nicht sicher vorausgesagt werden. Neben der Sicherstellung der Abwasserbehandlung liegt der Fokus zunehmend auf der Energieeffizienzsteigerung von Kläranlagen als einer der größten Stromverbraucher im kommunalen Umfeld. Dieser Artikel beschreibt die möglichen Störfälle für die Abwasserbehandlung. Außerdem wird beschrieben, wie die Untersuchung von Extremszenarien mithilfe eines hybriden digitalen Zwillings abgebildet und die digitale Abbildung einer Kläranlage für ein intelligentes Entscheidungs- und Energiemanagementsystem je nach Anwendungsfall eingesetzt werden kann.

Stichworte – digitaler Zwilling, Abwasserbehandlung, kritische Infrastruktur, Energieoptimierung, Störfall

NOMENKLATUR

BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BSIG	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
dtec.bw	Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr
GAK	Granulierte Aktivkohle
KRITIS	Kritische Infrastrukturen
NKB	Nachklärbecken
RISK.twin	Intelligente kritische technische Infrastruktur
ÜS	Überschussschlamm
ZEMA	Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen

I. EINLEITUNG

Wasser und Energie zählen zu den kritischen Infrastrukturen (KRITIS), wobei kritische Infrastrukturen anfänglich aus militärischer und wirtschaftlicher Sicht definiert wurden, da es bei Schäden und Unterbrechungen zu ökonomischen oder militärischen Schaden kommen kann [1]. Der Blick auf diese kritischen Infrastrukturen hat sich seitdem auch in Deutschland gewandelt und verfolgt nicht mehr einen kurativen, sondern einen präventiven Ansatz. Demnach existieren verschiedene Definitionen für kritische Infrastrukturen [2, 3]. Ende der 90er Jahre wurden sieben Sektoren der kritischen Infrastruktur zugeordnet [1], wobei nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001 und dem Sommerhochwasser 2002 [4–6] neben der Informationstechnik und Telekommunikation die Aufmerksamkeit auf weitere Sektoren gerichtet wurde [7]. Die (Trink-)Wasserversorgung und Abwasserentsorgung wurde Anfang 2004 dem Bereich der Versorgung zugeordnet und ist seit 2009 in § 2 Abs. 10 des Gesetzes über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSIG) als eigenständiger Sektor aufgeführt [7], was den wichtigen Stellenwert der Wasserver- und -entsorgung hervorhebt.

Eine effektive und sichere Abwasserbehandlung hat eine große Bedeutung für die Gewährleistung eines guten hygienischen Zustandes zur Vermeidung von Seuchen sowie zum Umwelt-, Natur- und Klimaschutz. Abwasserbehandlungsanlagen stehen mit steigenden Anforderungen an die Reinigungsleistung und weiteren Beanspruchungen durch den Klimawandel sowie dem demographischen Wandel vor einer Vielzahl an Herausforderungen. Die zunehmende Digitalisierung in Form von flexibler Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik bietet neben Chancen, durch intelligente Betriebsweisen bei ungewöhnlichen Ereignissen frühzeitig und im geeigneten Maß zu reagieren, auch ein Risiko hinsichtlich zunehmender Komplexität und menschlichem sowie technischem Versagen bzw. Sabotage (z. B. Cyberangriffe/-terrorismus). Ein großes Potenzial zur Systemzustandsüberwachung, Energieoptimierung und Risikovorhersage für zukünftige Abwasserbehandlungsanlagen steckt in digitalen Zwillingen, die ein reales Objekt virtuell spiegeln und simulieren [8]. Der Unterschied zu reinen Simulationsmodellen liegt in der durchgehenden Erfassung von Sensordaten, die einen digitalen Zwilling nicht nur zum Simulieren und Prognostizieren, sondern durch künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen auch zur Echtzeitopti-

mierung und zum Werkzeug für politische Entscheidungsunterstützung und Kommunikation bei Extrem- und Versagenszenarien befähigen. Das Forschungsvorhaben RISK.twin – Intelligente kritische technische Infrastruktur der Universität der Bundeswehr München (UniBwM) und der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg (HSU) befasst sich u. a. mit der Entwicklung von digitalen Zwillingen für Abwasserbehandlungsanlagen, um die Vorteile aus physikbasierten Simulationen und datenbasierten Ansätzen zu einem hybriden digitalen Zwilling zu vereinen und damit die zukünftige Abwasserbehandlung resilient zu gestalten.

II. STÖRFÄLLE AUF KLÄRANLAGEN

Die Abwasserbehandlung kann durch verschiedene Szenarien gefährdet werden, die den herkömmlichen Anlagenbetrieb beeinträchtigen können. Dadurch kann es zu einem unkontrollierten Schadstoffaustritt in die Umwelt kommen, was weitreichende Folgen für Menschen, Tiere und Pflanzen haben kann. Das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) stuft die Risiko- und Gefährdungsszenarien nach dem All-Gefahren-Ansatz in die drei Kategorien (i) Naturereignisse, (ii) technisches bzw. menschliches Versagen und (iii) Terrorismus, Kriminalität sowie Krieg ein [7]. Wenngleich ein Störfall durch kriegerische Handlungen im europäischen Raum als unvorstellbar anzunehmen ist, können sich die genannten Störfälle in der auftretenden Frequenz, Umfang und den spezifischen Eigenschaften unterscheiden [9]. Nach der Störfallverordnung (12. BImSchV §2 Nr. 7) ist ein Störfall definiert als ein Ereignis, dass unmittelbar oder später innerhalb oder außerhalb des Betriebsbereichs zu einer ernststen Gefahr oder zu Sachschäden führt. Dabei ist als Ereignis eine Störung des bestimmungsgemäßen Betriebs unter Beteiligung eines oder mehrerer gefährlicher Stoffe anzusehen. Bei Anlagen zur Abwasserbehandlung sind verschiedene Ursachen und Auswirkung von Störfällen von Relevanz, die im Folgenden vorgestellt werden.

A. Schadstoffe im Zulauf von Kläranlagen

Der Behandlungsprozess in der Kläranlage kann z. B. durch illegales Einleiten von Chemikalien oder eine plötzliche Stoßbelastung in die Kanalisation gestört werden. Problematisch sind für Kläranlagen besonders Stoffe, die Auswirkungen auf das Wachstum der Bakterien in der biologischen Behandlung haben und die Reinigungsleistung hemmen oder die Bakterien abtöten. Daraus ergeben sich bspw. die Fragestellungen, ab welchem Auslastungsgrad (Schadstofffracht) und bei welcher Schadstoffkonzentration (chemischer Sauerstoffbedarf, Stickstoff, Schwermetalle, pH-Wert etc.) die biologische Reinigungsleistung zum Erliegen kommt, sowie welche Pufferwirkung eine Kläranlage mit gegebener Ausbaugröße hat. Ein intelligentes Online-Monitoring mittels entsprechender Sensorik kann helfen, frühzeitig auf Anomalien im Zulauf zu reagieren und so entweder verfahrenstechnisch durch eine erhöhte Sauerstoffzufuhr, durch eine vorübergehende Speicherung oder durch eine gezielte Bypass-Führung bei Spitzenbeaufschlagungen entgegenzuwirken. Daneben wird die Genauigkeit von Überwachungsmessungen, die Sensorplatzierung und die Datenqualität eine Rolle spielen, sowie die Cybersicherheit bei drahtlosen Sensornetzwerken und der entsprechende Störfallplan [10].

B. Störungen durch Klimaeinwirkungen

Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits jetzt durch ausgeprägte Dürren, Trockenheit und intensive Starkregenereignisse, die zu Hochwasserkatastrophen führen können und damit die Abwassermenge und -konzentration beeinflussen. Hinzu kommen starke hydraulische Belastungen, sowie die Versandung der Anlage durch Hochwasser und Starkregenereignisse, welche zum Totalschaden von Kläranlagen führen und Kaskadeneffekte wie Fischsterben auslösen können [11]. Die Auswirkungen des Klimawandels sind schleichende Prozesse, welche die Siedlungswasserwirtschaft bereits jetzt beachten muss, um die zukünftige Wasserver- und -entsorgung resilient zu gestalten.

C. Technisches und menschliches Versagen

Ereignisse und Störfälle können durch technisches und menschliches Versagen herbeigeführt werden. Nach einer Auswertung von Störfällen und sonstigen Ereignissen in industriellen Anlagen des TÜV NORD EnSys GmbH & Co. KG im Auftrag des Umweltbundesamts treten statistisch die häufigsten Störfälle durch menschliche Fehler (26 %) auf, gefolgt von Störfällen durch Instandhaltung und Umbau. Häufig genannte Ursachen waren z. B. unzureichende Entscheidungsfindung durch Verantwortliche oder Zuständige aufgrund falscher bzw. unzureichender Informationen, fehlerhafte Kontrollen (intern oder extern), die mangelnde Gefahrenbewertung (Alarmierungsregeln, Schutzausrüstung, Gefahrensensibilisierung etc.) sowie lückenhafte bzw. veraltete Dokumentationen [12]. Auch im Jahresbericht der ZEMA (2015 – 2017; Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen) werden in den Jahren 2015 – 2017 ca. 34 % der Ursachen technischen Fehlern zugeordnet, gefolgt von ungefähr 31 % durch menschliche Fehler [13].

Die Ursache von technischem Versagen kann z. B. in dem Ausfall oder der Fehlfunktion von Aggregaten und Messgeräten liegen und in der Auswirkung auf die Abwasserbehandlung variieren. In Extremfällen kann die Behandlung nicht aufrechterhalten werden. Auch Explosionen und Brände, wie im Fall der Explosion eines Methanol-Speichers für die nachgeschaltete Denitrifikation in Florida, traten durch eine unzureichende Gefahrensensibilisierung und Sicherheitsbewertung auf. Bei diesem Unfall wurden Methanol-Dämpfe durch Schneidbrennerarbeiten über dem Tank entzündet [14]. Gerade bei der Entscheidungsfindung und Risikobewertung können digitale Zwillinge einen Anteil zur Sicherstellung des Anlagenbetriebs sowie zur Gefahrenreduzierung beitragen.

D. Störungen durch Stromausfall

Bei einem Stromausfall kommt es zum Ausfall der Versorgung mit elektrischer Energie, wobei sich die Arten von Stromausfällen durch die Dauer und die betroffene Fläche unterscheiden [15]. Kläranlagen verfügen in der Regel über eine Notstromversorgung, die einen Betrieb in Volllast erlauben [16]. Falls es sich jedoch um einen längeren Stromausfall handelt und die Notstromaggregate ebenfalls ausfallen, kann das Kläranlage das Abwasser nicht behandeln. Das Abwasser muss dann entweder aufgefangen und durch andere Kläranlagen gereinigt werden oder es wird direkt in das Gewässer eingeleitet, was einen unmittelbaren Umweltschaden nach sich zieht [16]. Eine intelligente Steuerung im Notfallbetrieb könnte das geregelte Herunterfahren der Anlage unter Beachtung der unterbrochenen Daten-

übertragung ermöglichen. Daneben stellt sich die Frage nach der Schwarzstart-Fähigkeit von Kläranlagen nach einem Stromausfall, d. h. dem Anfahren des Kläranlagenbetriebs aus abgeschaltetem Zustand.

E. (Cyber-)Terrorismus und Kriminalität

Die zunehmende Vernetzung von technischen Geräten sowie die voranschreitende Digitalisierung bringen sowohl neue Chancen als auch Risiken für die Siedlungswasserwirtschaft. Während Betriebszustände und Sensordaten durch Fernwirktechnik abgefragt werden können, eröffnet sich gleichzeitig eine neue Gefährdungslage durch Cyber-Angriffe auf die IT-Infrastruktur. Nach einer Analyse der bitkom erlitten 70 % der Unternehmen Schäden durch digitale Angriffe (u. a. durch Schadsoftware und Angriffe auf Passwörter). Dabei waren unter Privatpersonen auch ehemalige Mitarbeiter unter den Tätern [17]. Durch die Anbindung von modernen industriellen Kontrollsystemen (SCADA, SPS, HMI etc.) an das Internet entstehen weitere potenzielle Angriffspunkte für Cyberkriminalität und -terrorismus [18 – 22]. Die Vulnerabilität von SCADA-Systemen steigt besonders dann, wenn die industriellen Kontrollsysteme über TCP/IP mit dem Internet verbunden sind. Aus diesem Grund wird es zukünftig erforderlich sein, neben der Verbesserung von Zugangskontrollen entsprechende Sicherheitsüberwachungstools zu entwickeln, welche eine interne Überwachung sowie Anomaliendetektion ermöglichen. Diese könnte u. a. durch eine gesonderte Authentifizierung für besonders vulnerable Prozesse erfolgen oder dadurch, dass ein bestimmter Datenverkehr über Profibus bzw. Profinet durch interne Firewalls oder durch Kryptographie geschützt ist [22, 23].

III. ABBILDUNG VON STÖRFALL-SZENARIEN FÜR KRITIS DURCH HYBRIDEN DIGITALEN ZWILLING

Im Folgenden werden das methodische Vorgehen sowie die Zusammenarbeit beider Universitäten zur Erreichung eines hybriden digitalen Zwillings für die Abwasserbehandlung, zu den Zwecken der Systemzustandsüberwachung, Risikovorhersage und Verfahrensoptimierung, dargestellt.

A. Risikoanalyse

Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) hat für die Durchführung von Risikoanalysen für die kritische Infrastruktur (KRITIS) einen pragmatischen Ansatz entworfen [24]. Den verschiedenen Verwaltungsebenen soll damit eine systematische Methode an die Hand gegeben werden, um relevante Gefahren zu erkennen, die Verwundbarkeit beschreiben und das Schadensausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit von Szenarien bestimmen zu können. Für die Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hochwasserereignissen und für die Trinkwasserversorgung wurden auf Basis dieser Methode bereits Risikoanalysen durchgeführt [25, 26]. In dieser Arbeit soll diese Methodik auf die Abwasserbehandlung übertragen werden.

Das Vorgehen nach der Methode des BBK umfasst fünf Schritte (siehe ABBILDUNG 1). Im ersten Schritt wird der Kontext der Abwasserbehandlung beschrieben und dafür die möglichen Gefahren zusammengestellt. Das BMI unterteilt die Gefahren in Naturkatastrophen, Unfälle und Anschläge [27].

Diese Gefahren bilden die Grundlage für die Beschreibung der Risikoszenarien mittels spezifischer Parameter. Der Kern der Risikoanalyse ist die Untersuchung der Vulnerabilität der einzelnen Komponenten des beschriebenen Systems in Hinblick auf die einzelnen Szenarien. Im fünften Schritt werden für jedes Szenario das Schadensausmaß und die Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt. Mithilfe dieser beiden Eigenschaften lässt sich das Risiko des jeweiligen Szenarios in einer Risikomatrix darstellen und mit anderen Risiken vergleichen.

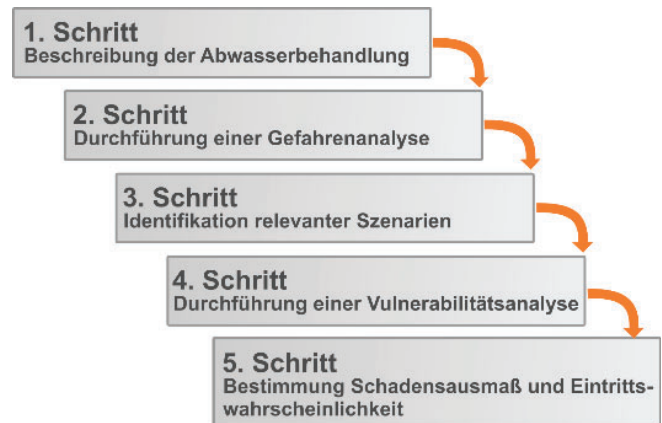


ABBILDUNG 1: ABLAUF EINER RISIKOANALYSE NACH DER METHODE DES BBK [26].

B. Versuchskläranlage

Die Hauptfunktion von Kläranlagen ist die Behandlung von Abwasser. Diese darf zu keinem Zeitpunkt beeinträchtigt werden. Aus diesem Grund ist die Erprobung von Störfall- sowie Extrem- und Versagensszenarien auf realen Kläranlagen nicht möglich. Zur Abbildung einer realen Kläranlage wird aus diesem Grund eine zweistraßige Versuchskläranlage am Standort der Universität der Bundeswehr München aufgebaut, bestehend jeweils aus einem konventionellen Belebtschlammverfahren (Vorlage, Denitrifikation, Nitrifikation, Nachklärung) und Dosiermöglichkeiten, mit optionaler Nachbehandlung mittels Sand-/GAK-Filtration (GAK: granuliert Aktivkohle) sowie Ultrafiltration. Die Anlagen werden mit marktüblicher großtechnischer Mess-, Steuer- und Regelungstechnik sowie der entsprechenden Prozessleittechnik nach Stand der Technik ausgestattet (siehe ABBILDUNG 2). Die Ausbaugröße der Versuchs- bzw. Demonstrationsanlage wird rund 2 Einwohnerwerte (ca. 300 L/d) betragen. Der modulare Aufbau der Versuchsanlage ermöglicht es, diese standortunabhängig zu betreiben und ggf. Abwasser von ausgewählten Kläranlagen vor Ort zu behandeln.

Zur Steuerung, Überwachung und Verwaltung der Prozesstechnik ist der Zugriff auf die Anlage vor Ort als auch aus der Ferne möglich. Dabei werden die Anlagen als kritische Infrastrukturen betrachtet und mit sicheren Webanwendungen und Fernwirktechnik ausgestattet (feingranulare Rechtevergabe, Passworrichtlinien etc.). Die elektrischen Verbrauchswerte aller Hauptenergieverbraucher (Pumpen, Gebläse, Rührwerke etc.) werden zur Energieerfassung in Echtzeit mit einem digitalen Einbaumessgerät erfasst.

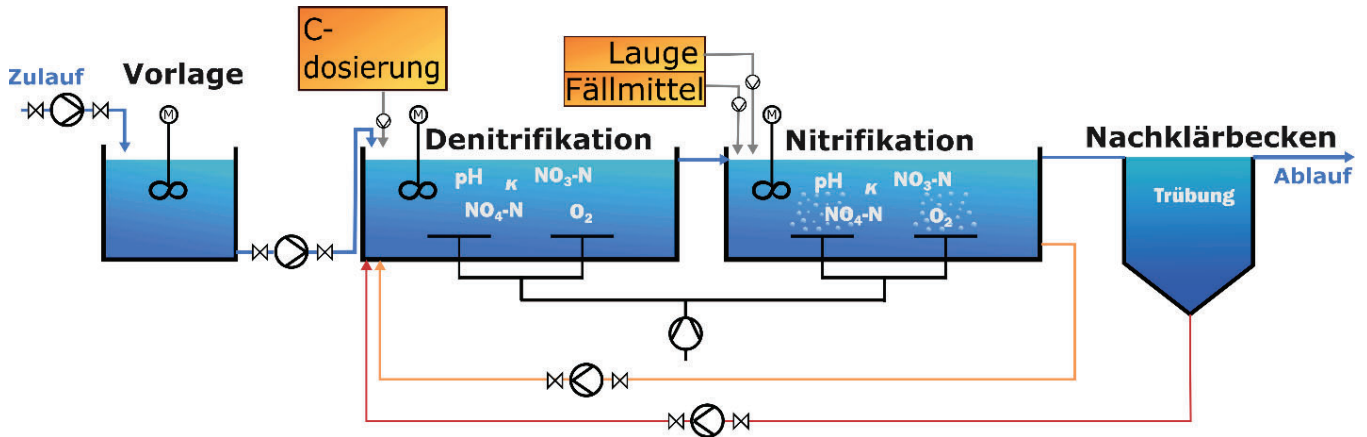


ABBILDUNG 2: BEISPIELHAFTES VERFAHRENSFLIEßBILD UND ÜBERWACHUNGSPARAMETER DER VERSUCHSKLÄRANLAGE DER UNI BW M, BESTEHEND AUS VORLAGEBEHÄLTER, DENITRIFIKATION, NITRIFIKATION UND NACHKLÄRBECKEN.

Neben dem realen Versuchsobjekt erfolgt die digitale Abbildung der Versuchskläranlage mittels simulations-basierter Software. Anhand der Simulationsdaten kann bereits vor den ersten Versuchen das Verhalten der Kläranlage simuliert und eingeschätzt werden. Die gewonnenen Daten aus der Simulation und die reale Versuchsanlage werden im späteren Verlauf des Vorhabens zum Trainieren des hybriden digitalen Zwillings verwendet.

Das Versuchsprogramm sieht vor, gewisse Schadens- und Ausfallszenarien an der Demonstrationsanlage und dem simulationsbasierten Modell zu erproben. Ziel dieser Untersuchungen ist es, eine Datengrundlage für den digitalen Zwilling zu liefern und daraus Handlungsempfehlungen und Optimierungspotentiale zu erarbeiten. Unter Einbezug von realen Kläranlagen und Kläranlagenbetreibern kann auf Erfahrungen im Umgang mit Störfällen zurückgegriffen werden, um bei der Entwicklung des hybriden digitalen Zwillings die potenziellen Nutzer mit einzubinden.

C. Energiemanagement und -optimierung

Abwasserbehandlungsanlagen stellen für Kommunen sowie Städte, zusammen mit Schulen und der Straßenbeleuchtung, die größten Energieverbraucher dar (siehe die beispielhafte Zusammensetzung des Stromverbrauchs in ABBILDUNG 3). Je nach Einwohnerzahl und örtlichen Begebenheiten können die prozentualen Anteile sowie der spezifische Stromverbrauch variieren. Dabei liegt der spezifische Strombedarf von kommunalen Kläranlagen mit > 100.000 Einwohnern bei ca. 38 kWh pro Einwohner und Jahr und ist i. d. R. bei kleineren Kläranlagen höher. Kommunale Kläranlagen tragen mit ca. 31 % zum Stromverbrauch bei (ABBILDUNG 3), wobei den Hauptverbraucher einer Kläranlage die biologische Stufe (Belüftungssystem) darstellt [28, 29].

Einsparpotentiale auf Kläranlagen können mittels einer Energieanalyse nach DWA-A 216 berechnet werden [30]. Durch die Erfassung von Verbrauchs- und Belastungsdaten können anlagenspezifische Kennwerte ermittelt werden. Aus diesen Kennwerten lassen sich Maßnahmenpakete für die Energieoptimierung ableiten.

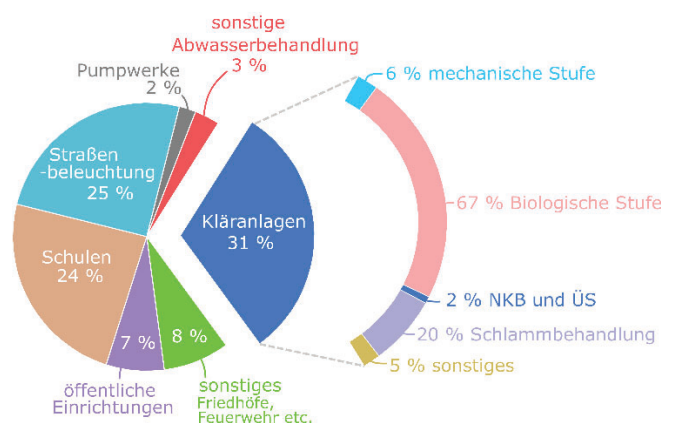


ABBILDUNG 3: BEISPIELHAFTES STROMVERBRAUCHSVERTEILUNG EINER KOMMUNE NACH [28] SOWIE PROZENTUALE VERTEILUNG DES EINWOHNER-SPEZIFISCHEN STROMVERBRAUCHS VON KLÄRANLAGEN OHNE HEBWERKE UND FILTRATION NACH [29]. (ÜS: ÜBERSCHUSSSCHLAMM; NKB: NACHKLÄRBECKEN).

Ein Einsatz von hybriden digitalen Zwillingen bietet hier die Möglichkeit, eine intelligente Energieoptimierung für Kläranlagen durchzuführen. An der Versuchskläranlage wird neben der virtuellen Leitwarte vor Ort eine Fernleitwarte zur Steuerung und Energieoptimierung an der Helmut-Schmidt-Universität errichtet. Dadurch wird der Zugriff auf die Anlagendaten sowohl vor Ort als auch aus der Ferne über eine verschlüsselte Internetverbindung ermöglicht (siehe ABBILDUNG 4).

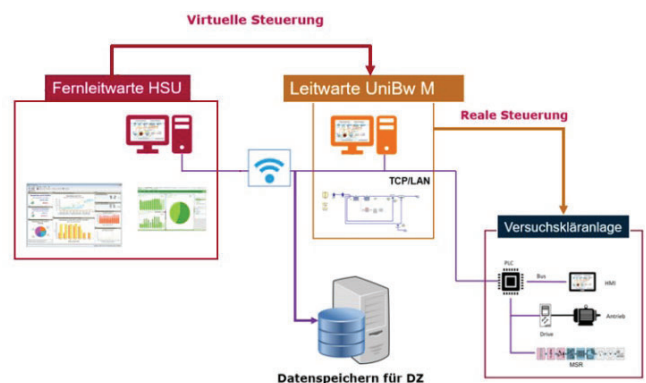


ABBILDUNG 4: TOPOLOGIE UND IMPLEMENTIERUNG DES DIGITALEN ZWILLINGS.

D. Hybrider digitaler Zwilling

Die detaillierte digitale daten- und physikbasierte Abbildung einer physikalisch-technischen Anlage wird als digitaler Zwilling verstanden. Entgegen reinen Simulationsmodellen unterscheidet sich diese darin, dass durch Sensordaten eine fortlaufende Anpassung, Verbesserung und Erweiterung stattfindet. Daher eignen sich digitale Zwillinge für die Optimierung und Überwachung des Anlagenbetriebs sowie zu Echtzeitprognosen, welche zur Unterstützung von Entscheidungsprozessen beitragen können. Das datenbasierte Modell wird durch Echtzeitdaten aus der physikalischen Anlage und dem Simulationsmodell trainiert. Durch die Mensch-Maschinen-Schnittstelle können anschließend die gewonnenen Ergebnisse aus dem Modell durch Vor-Ort-Maßnahmen an der physikalischen Anlage angepasst bzw. das numerische Modell aktualisiert werden.

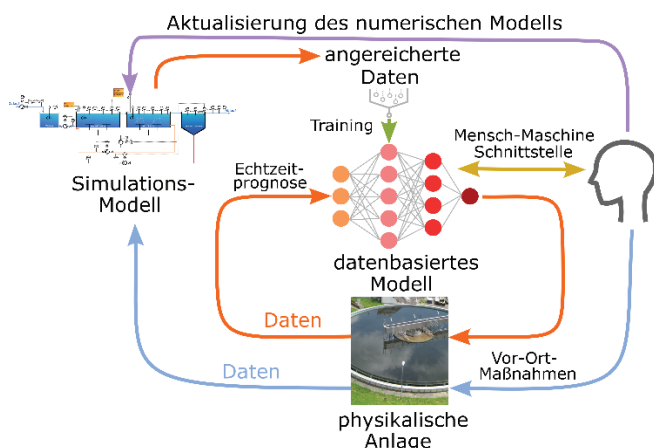


ABBILDUNG 5: SCHEMATISCHER ABLAUF ZUM ERSTELLEN UND TRAINIEREN DES DIGITALEN ZWILLINGS FÜR DIE ABWASSERBEHANDLUNG.

Durch die Verknüpfung von Echtzeit- und Simulationsdaten wird eine künstliche Intelligenz entwickelt, welche im Krisenfall als intelligente Entscheidungshilfe dient und zudem im Normalbetrieb zu einem effizienten Energiemanagement führt.

E. Zusammenarbeit beider Universitäten

Am Standort der UniBwM wird in Anlehnung an reale Kläranlagen eine zweistraßige Versuchsanlage mit praxiserprobten Sensoren und einer virtuellen Leitwarte vor Ort zur Kontrolle der Prozess- und Anlagenparameter aufgebaut. Hauptverantwortlich für die Prozessführung, Untersuchung der Schadensszenarien, die Simulation der Versuchskläranlage sowie den Dialog mit Kläranlagenbetreibern ist die Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der UniBwM. Parallel dazu laufen die Energieoptimierung sowie Errichtung einer Fernleitwarte zur Nutzung eines verteilten Energiemanagement- und Steuerungssystems an der HSU. Alle erzeugten Daten fließen zur Entwicklung eines hybriden digitalen Zwillings an das Institut für Mathematik und Computergestützte Simulation der UniBwM.

IV. ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Bericht zeigt verschiedene Szenarien auf, die den Anlagenbetrieb von Kläranlagen stören und die Abwasserbehandlung beeinträchtigen können. Durch die steigende Automatisierung und Digitalisierung bieten sich die

Möglichkeiten, auf außergewöhnliche Ereignisse frühzeitig reagieren zu können und somit die Abwasserbehandlung zu gewährleisten. Der hybride digitale Zwilling kann als Werkzeug für die Systemzustandsüberwachung, Energieoptimierung und Risikovorhersage verwendet werden und als Entscheidungshilfe für Kläranlagenbetreiber und die Politik dienen. Zu diesem Zweck wird durch ein interdisziplinäres Team aus beiden Universitäten der Bundeswehr ein hybrider digitaler Zwilling für eine zukünftige Abwasserbehandlung aufgebaut.

V. DANKSAGUNG

Diese Publikation ist das Ergebnis des Forschungsvorhabens RISK.twin – Intelligente kritische technische Infrastruktur aus der Kooperation beider Universitäten der Bundeswehr München und Hamburg. Für die Förderung und Unterstützung des Forschungsvorhabens möchten sich die Autoren dieser Publikation an dieser Stelle beim Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw) bedanken.

LITERATUR

- [1] T. Schulze, *Bedingt abwehrbereit: Schutz kritischer Informations-Infrastrukturen in Deutschland und den USA*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften/GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2006.
- [2] *Gesetz über den Zivildienst und die Katastrophenhilfe des Bundes /Zivildienst- und Katastrophenschutzgesetz*: ZSKG, 1997. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/zsg/_17.html.
- [3] H. Greve, „Kritische Infrastrukturen“ (De;de), *DuD*, Jg. 33, Nr. 12, S. 756–758, 2009, doi: 10.1007/s11623-009-0198-9.
- [4] U. Ulbrich, T. Brücher, A. H. Fink, G. C. Leckebusch, A. Krüger und J. G. Pinto, „The central European floods of August 2002: Part 1 – Rainfall periods and flood development“, *Weather*, Jg. 58, Nr. 10, S. 371–377, 2003, doi: 10.1256/wea.61.03A.
- [5] A. Becker und U. Grünwald, „Disaster management. Flood risk in Central Europe“, *Science*, Jg. 300, Nr. 5622, S. 1099, 2003, doi: 10.1126/science.1083624.
- [6] A. Braubach, *Vulnerabilität der kritischen Infrastruktur Wasserversorgung gegenüber Naturkatastrophen: Auswirkungen des Augusthochwassers 2002 auf die Wasserversorgung und das Infektionsgeschehen der Bevölkerung in Sachsen und Sachsen-Anhalt*. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2011.
- [7] Bundesministerium des Innern, *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)*, 17. Aufl. Berlin, Rostock: Bundesministerium des Innern, Referat KM4; Publ.-Versand der Bundesregierung, 2009.
- [8] R. J. Vestner, „Der Digitale Zwilling in der Wasserwirtschaft“, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, Nr. 10, S. 581–586, 2019.
- [9] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, *Sicherheit der Trinkwasserversorgung: Teil 1: Risikoanalyse*, 2016. Aufl. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, 2016.
- [10] D. Ramotsoela, A. Abu-Mahfouz und G. Hancke, „A Survey of Anomaly Detection in Industrial Wireless Sensor Networks with Critical Water System Infrastructure as a Case Study“, *Sensors (Basel, Switzerland)*, Jg. 18, Nr. 8, S. 2491, 2018, doi: 10.3390/s18082491.
- [11] *Fischsterben in Gewässern - Berlin.de*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.berlin.de/ba-tempelhof-schoeneberg/aktuelles/pressemitteilungen/2016/pressemitteilung.505270.php> [Zugriff am: 12. August 2021].
- [12] B. Fahlbruch, *Umfassende systematische Auswertung von Störfällen und sonstigen Ereignissen in industriellen Anlagen, insbesondere mit Auswirkungen auf die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft: Texte 52/2021*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2021.
- [13] Umweltbundesamt, *Zentrale Melde- und Auswertestelle für Störfälle und Störungen in verfahrenstechnischen Anlagen, ZEMA: Jahresbericht 2015 - 2017*. Dessau-Roßlau, Berlin, Dessau: Umweltbundesamt; ZEMA, Umweltbundesamt, 2000.
- [14] *CSB Releases Findings from Fatal Daytona Beach Wastewater Plant Explosion Investigation at Public Meeting; Cites Inadequate Engineering, Lack of Public Worker Safety Coverage - Investigations - News | CSB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.csb.gov/csb-releases-findings-from-fatal-daytona-beach-wastewater-plant-explosion-investigation-at-public-meeting-cites-inadequate->

- engineering-lack-of-public-worker-safety-coverage/ [Zugriff am: 11. August 2021].
- [15] BBK, „Stromausfall: Grundlagen und Methoden zur Reduzierung des Ausfallrisikos der Stromversorgung“. Band 12, Bonn, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/Mediathek/Publikationen/WF/WF-12-stromausfall.pdf>. [Zugriff am: 18. August 2021].
- [16] T. Petermann, H. Bradke, A. Lüllmann, M. Poetzsch und U. Riehm, „Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften - am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung. Endbericht zum TA-Projekt“, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Berlin, 2010.
- [17] A. Berg und M. Niemeier, *Wirtschaftsschutz in der digitalen Welt*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2019-11/bitkom_wirtschaftsschutz_2019.pdf [Zugriff am: 17. August 2021].
- [18] *2016 IEEE Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, 2016.
- [19] *2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*. IEEE: IEEE, Sep. 2019.
- [20] A. Jicha, M. Patton und H. Chen, „SCADA honeypots: An in-depth analysis of Conpot“ in *2016 IEEE Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, 2016, S. 196–198, doi: 10.1109/ISI.2016.7745468.
- [21] D. Pliatsios, P. Sarigiannidis, T. Liatifis, K. Rompolos und I. Siniosoglou, „A Novel and Interactive Industrial Control System Honeypot for Critical Smart Grid Infrastructure“ in *2019 IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Limassol, Cyprus, 9/11/2019 - 9/13/2019, S. 1–6, doi: 10.1109/CAMAD.2019.8858431.
- [22] V. M. Iguere, S. A. Laughter und R. D. Williams, „Security issues in SCADA networks“, *Computers & Security*, Jg. 25, Nr. 7, S. 498–506, 2006, doi: 10.1016/j.cose.2006.03.001.
- [23] R. M. Clark und S. Hakim, Hg., *Securing Water and Wastewater Systems: Global Experiences*. Cham: Springer International Publishing, S. 1-27, 2014.
- [24] BBK, „Methode für die Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz“, Bonn, Wissenschaftsforum Band 8, 2010. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bildungsinstitut-rlp.drk.de/fileadmin/downloads/Fuehrungs- und Leitungskraefte der Bereitschaften/Leitungskraefteausbildungen/Allgemeine_Unterlagen/Band_08_Methode-Risikoanalyse-BS.pdf. [Zugriff am: 11. August 2021].
- [25] BBK, „Abschätzung der Verwundbarkeit gegenüber Hitzewellen und Starkregen“, Bonn, Praxis im Bevölkerungsschutz, 2013. [Online]. Verfügbar unter: https://www.kritis.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Publikationen/Praxis_Bevoelkerungsschutz/PiB_11_Abschaetzung_der_Verwundbarkeit_gegenueber_Hitzewellen_und_Starkregen.pdf. [Zugriff am: 11. August 2021].
- [26] BBK, „Sicherheit der Trinkwasserversorgung: Teil 1: Risikoanalyse“, Bonn, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://bks-portal.rlp.de/sites/default/files/og-group/16214/dokumente/Sicherheit%20der%20Trinkwasserversorgung_Risikoanalyse.pdf. [Zugriff am: 16. August 2021].
- [27] BMI, „Schutz Kritischer Infrastrukturen – Risiko- und Krisenmanagement: Leitfaden für Unternehmen und Behörden“, Berlin, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis-leitfaden.pdf>. [Zugriff am: 6. August 2021].
- [28] C. A. Schaum, *Abwasserbehandlung der Zukunft: Gesundheits-, Gewässer- und Ressourcenschutz*. Darmstadt: Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:tuda-tuprints-54966>
- [29] *Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen*. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2015.
- [30] DWA, *Energiecheck und Energieanalyse: Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen*, 2015. Aufl. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA), 2015.