

Der digitale Zwilling für den Betrieb in der Siedlungswasserwirtschaft

HSGSim – Hochschulgruppe Simulation, AG Digitaler Zwilling

Zusammenfassung

Der digitale Wandel der Arbeitswelt findet auch in der Siedlungswasserwirtschaft statt. Bisher wurden zum Großteil Modelle und Simulationen als Entscheidungshilfen verwandt. Digitale Zwillinge sind noch von geringer Bedeutung, dies wird sich aber in Zukunft, vor allem in anlagenintensiven Bereichen wie der Siedlungswasserwirtschaft ändern. Diese Veröffentlichung stellt das Konzept des Digitalen Zwillings im Sinne der Hochschulgruppe Simulation (HSGSim) vor und zieht eine Abgrenzung zu bereits bestehenden und etablierten Konzepten wie Modellen und Simulationen. Die HSGSim unterscheidet zwischen physischem Zwilling und digitalem Zwilling, die miteinander kommunizieren und stets einander angeglichen werden. Der physische Zwilling beinhaltet die Anlagenkonfiguration, den Betriebszustand der Anlage und erfasst äußere Einflüsse. Der digitale Zwilling speichert und verarbeitet gesammelte Daten. Ein digitaler Zwilling kann Handlungsempfehlungen geben oder deren Ableitung ermöglichen und unterstützt somit die Entscheidungsträger. Der digitale Zwilling bietet ein breites Anwendungsspektrum in der Siedlungswasserwirtschaft und kann für bereits bestehende Anlagen, Neubauten, virtuelle Inbetriebnahmen, Lehrzwecke etc. eingesetzt werden.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Entwässerungssysteme, Digitalisierung, digitaler Zwilling, Modell, Simulation, Siedlungswasserwirtschaft

DOI: 10.3242/kae2024.04.003

Abstract

Using digital twins in urban water management operations

Digital transformation is changing the world of work – and urban water management is no exception. Until now, models and simulations have largely been used to aid in decision-making. Digital twins are still of minor importance, but this will change in the future, especially in technology-intensive areas, such as urban water management. This publication presents the concept of the digital twin as defined by the University Simulation Group Hochschulgruppe Simulation (HSGSim). It also draws a distinction to existing, established concepts, such as models and simulations. HSGSim distinguishes between a physical twin and a digital twin, which communicate with one another and are constantly synchronised. The physical twin contains the technical configuration and the technology's operating status and maps external influences. The digital twin stores and processes the data that is collected. A digital twin can recommend or enable options to be developed, thus supporting decision-makers. The digital twin has a wide spectrum of applications in urban water management and can be used in areas including existing technology, new construction, virtual commissioning and training purposes.

Keywords: Wastewater treatment, municipal, drainage systems, digitalisation, digital twin, model, simulation, urban water management



Aqualogic®

Energieeinsparung, Kostenreduzierung und erhöhte Betriebssicherheit

- erhebliche Energieeinsparung gegenüber herkömmlicher (SPS-) Regelung
- übersichtlich und benutzerfreundlich
- kurzfristig realisierbar
- uneingeschränkte Prozesssicherheit und Gewässerschutz

Fordern Sie jetzt Ihren Testbetrieb an!

Wir ermitteln das Potenzial Ihrer Kläranlage.

Treffen Sie uns auf der IFAT: Halle A1 Stand 151/250

aqualogic.de



1 Einleitung

Mit den Schlagworten „Wasser 4.0“ [1] und „Digitalisierung“ [2] wird häufig der Gesamtprozess der digitalen Transformation in der Siedlungswasserwirtschaft beschrieben. Ein zentrales Konzept der Digitalisierung ist der „Digitale Zwilling“. Digitale Zwillinge werden häufig als wichtiger Schritt hin zu einer ganzheitlichen Betrachtung gesehen und gewinnen in Zukunft insbesondere für anlagenintensive Branchen [3] wie der Siedlungswasserwirtschaft an Relevanz. Durch ein system- und auch anlagenübergreifendes Konzept decken Digitale Zwillinge gegenüber bestehenden Modellen wie zum Beispiel Prozessleitsystemen und Simulatoren das Messdatenmanagement, die Ableitung von Handlungsempfehlungen und die Erfolgskontrolle ab. Die Möglichkeit der ganzheitlichen Betrachtung entsteht aus der technischen Weiterentwicklung von Soft- und Hardware. Sie ermöglicht es in Zukunft, mit den weiterentwickelten Schnittstellen ganzheitliche Konzepte wie Digitale Zwillinge in der Siedlungswasserwirtschaft umzusetzen. Unter dem Sammelbegriff „Industrie 4.0“ existieren bereits seit einigen Jahren erfolgreiche Beispiele von Digitalen Zwillingen aus Produktionsumgebungen [4].

Die Einordnung und Abgrenzung des Digitalen Zwillings in aktuelle Prozesse und Konzepte der Digitalisierung ist auf den ersten Blick nicht eindeutig. Daher soll mit diesem Artikel der Begriff und das Konzept des Digitalen Zwillings in der Siedlungswasserwirtschaft erläutert sowie die Abgrenzung gegen-

Über die HSGSim

Die Hochschulgruppe Simulation (HSGSim) ist eine Gruppe von Forscherinnen und Forschern aus dem zentraleuropäischen Raum, insbesondere DACH, die sich im Austausch mit der Praxis mit „Simulationen in der Siedlungswasserwirtschaft“ im weitesten Sinne beschäftigen. Das Themenfeld Simulation wird dabei derzeit in der aktuellen Arbeitsgruppe der HSG: Digitaler Zwilling, Blaugrüne Infrastrukturen, Messdaten und Machine Learning, NASS, Simulation in der Lehre kritisch betrachtet und diskutiert.

Die Arbeitsgruppe „Digitaler Zwilling“ der HSGSim setzt sich damit auseinander, wie und für welche Anwendungen Digitale Zwillinge einen Mehrwert in der Siedlungswasserwirtschaft generieren können.

über bereits existierenden Konzepten der digitalen Transformation und Digitalisierung dargestellt werden.

Ziel dieses Positionspapiers ist es, das Potenzial zum Einsatz Digitaler Zwillinge auf derzeit bestehende Anlagentypen zur Siedlungsentwässerung und Abwasserreinigung zu fokussieren. Dabei geht es insbesondere um folgende Themen:

- Definition Digitaler Zwillinge: wesentliche Element und Einordnung im Kontext der Siedlungswasserwirtschaft
- Schnittstellen für die Nutzung Digitaler Zwillinge: Abgrenzung und Verknüpfung zu bestehenden Konzepten (zum Beispiel Simulationsmodelle, modellprädiktive Regelungen und Prozessleitsysteme)
- Umsetzung Digitaler Zwillinge: Darstellung von Anwendungsfeldern, Konzeptausprägungen und des damit verbundenen Potenzials für den Einsatz Digitaler Zwillinge in der Praxis).

2 Definition Digitaler Zwilling

2.1 Umfang des ganzheitlichen Konzepts

Nach Stachowiak [5] ist ein Modell immer eine Repräsentation natürlicher oder künstlicher Systeme. Diese können selbst auch Modelle für wieder andere Systeme sein. Der Inhalt eines Modells richtet sich nach dessen beabsichtigter Verwendung und wird vom Modellersteller bzw. -nutzer festgelegt. Diese als Verkürzung bezeichnete Abstraktion eines Originals in einem Modell ergibt sich aus dem Aspekt: Pragmatismus. Ein Modell wird einem Original durch die Fragen „für wen?“, „warum?“ und „wozu?“ zugeordnet. Das Modell wird stellvertretend für ein Original eingesetzt und liefert Ergebnisse, deren Aussagegehalt von der Interpretation des Modellnutzers abhängen.

Ein Digitaler Zwilling ist das Abbild eines real existierenden, physischen Systems (Physischer Zwilling). Der Zusammenhang dieser beiden wesentlichen Elemente im Konzept des Digitalen Zwillings ist in Abbildung 1 dargestellt. Das Schema beschreibt die minimalen Anforderungen an die Ganzheitlichkeit eines Digitalen Zwillings aus Sicht der HSGSim. Sind alle Elemente aus Abbildung 1 vorhanden, handelt es sich um eine bi-direktionale Verbindung des Digitalen Zwillings und Physischen Zwillings.

FÜLLSTANDSÜBERWACHUNG VON ABWASSER



MIT ZUVERLÄSSIGEN
FÜLLSTANDSSONDEN UND
PASSENDEN MESSWERT-
ANZEIGEN ERHALTEN SIE

EIN STARKES TEAM,
WENN DIE ANLAGE IN DIE
JAHRE GEKOMMEN IST
UND MESSTECHNIK
MODERNISIERT
WERDEN MUSS.



>>> www.bdsensors.de







KOSIM

VERSION 7.8

KONTINUIERLICHE LANGZEITSIMULATION

KOSIM wird für den Nachweis von Bauwerken der Regenwasserbehandlung, Regenwasserbewirtschaftung und Regenwasserrückhaltung verwendet.

Mischwasserentlastungen wie auch Regenwassereinleitungen können mit der kontinuierlichen Niederschlag-Abfluss-Schmutzfracht-Modellierung nachgewiesen werden. Dafür werden spezielle PDF-Berichte mit den jeweiligen Nachweisgrößen generiert.

Regenwasserbehandlungen in Form von Regenklärbecken können jetzt mit oder ohne Dauerstau und bei Bedarf mit Schrägklärern berücksichtigt werden.

Das **DWA-Arbeitsblatt 102** wird zum Thema Gesamtemission (**DWA-A 102-2**) durch KOSIM 7.8 vollumfänglich inkl. der DWA-Korrekturblätter Okt. 2021 & Aug. 2022 unterstützt. Die aktuellen weitergehenden Anforderungen für Bayern und Baden-Württemberg sind ebenfalls in die Berechnungen integriert. Die Berechnung nach **ATV-A 128** wird weiterhin unterstützt.

Die Ermittlung der Absetzwirkung für abfiltrierbare Stoffe (**AFS63**) kann für Durchlaufbecken und Regenklärbecken vorab gemäß **DWA-A 102-2 Kap. B.2.3** berechnet werden.

Um für Mittel- und Hochgebirgsregionen die Übereinstimmung von Simulationen und realen Verhältnissen zu verbessern, wurde eine Berücksichtigung von Schneefall und Schneeschmelze integriert. Der Schneeansatz kann mithilfe von Temperaturdaten des DWD optional zugeschaltet werden.

SOFTWARE FÜR DIE SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG



HIGHLIGHTS

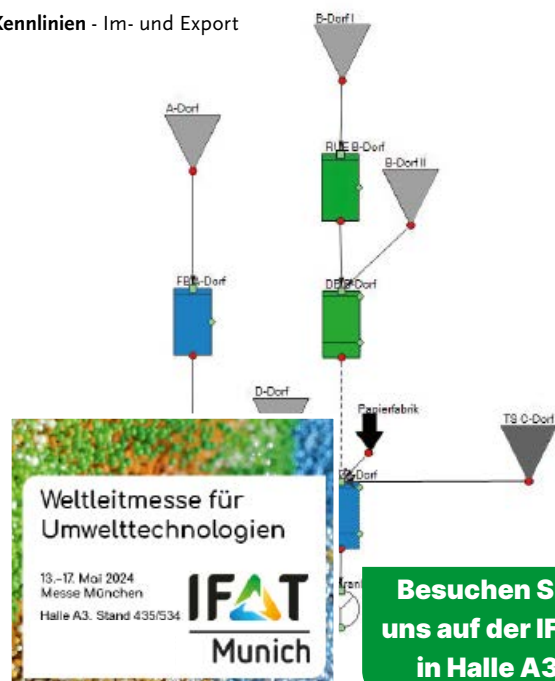
Fiktives Zentralbecken - Berücksichtigung kalibrierter Systeme (Abminderungswert f_D). Keine Einschränkung auf bestimmte Parametersätze

Absetzwirkung - Vorab-Berechnung der Absetzwirkung in Durchlaufbecken und Regenklärbecken

Schneeschmelze - Niederschlag als Schnee und Abfluss

Regenklärbecken - Berücksichtigung (Nachweis) von Regenklärbecken mit und ohne Dauerstau, bei Bedarf mit Schrägklärelement

Kennlinien - Im- und Export



itwh GmbH
30167 Hannover

www.itwh.de

Engelbosteler Damm 22
itwh@itwh.de
0511 971930

**Bestellen Sie
Ihre Software**

Hannover
Dresden
Flensburg
Nürnberg



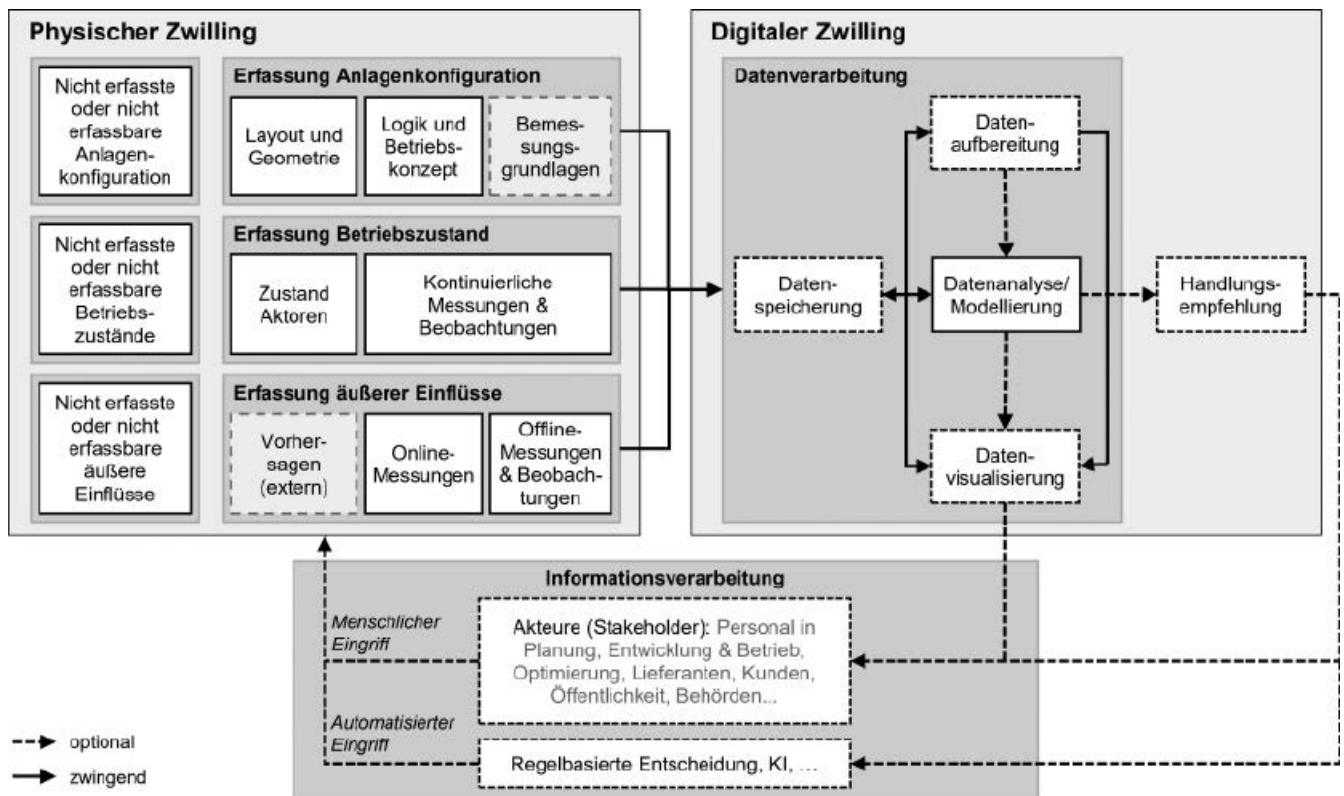


Abb. 1: Schema der (möglichen) Bestandteile Digitaler Zwillinge in der Siedlungswasserwirtschaft (eigene Darstellung)

Der Physische Zwilling ist aufgrund seiner räumlichen Ausdehnung und der Dynamik natürlicher sowie im Allgemeinen dynamischer Prozesse in der Wasserwirtschaft nicht vollständig erfassbar. Die wesentlichen Informationen zur Charakterisierung des Physischen Zwillings im Digitalen Zwilling sind daher die Anlagenkonfiguration, der Betriebszustand und die Rahmenbedingungen, die auf den Physischen Zwilling einwirken.

Die Anlagenkonfiguration ist je nach System unterschiedlich weitreichend zu verstehen. Für Entwässerungssysteme zählen hierzu nicht nur die technischen Ausrüstungen, sondern auch die Rohrleitungen und Sonderbauwerke selbst. Auf Kläranlagen hingegen verringert sich die räumliche Ausdehnung, die Inhalte sind aber angepasst auf die Anlagen und Verfahrenstechnik. In allen Fällen liegen dem Betrieb ein Betriebskonzept, eine Systemlogik und weitere Informationen zugrunde, die die Voraussetzung zur Erfassung des Betriebszustandes bilden.

Der Betriebszustand wird durch kontinuierliche Messungen (zum Beispiel Online-Messungen) und Beobachtungen des Betriebspersonals dokumentiert und so für den Digitalen Zwilling bereitgestellt. Mit der Erfassung des Betriebszustands geht auch die Erfassung und Wiedergabe der Rahmenbedingungen einher. Diese können Bestandteil der Grundlagendaten sein und sind somit direkter Input für den Digitalen Zwilling, zum Beispiel vor Ort gemessene Lufttemperatur. Dem gegenüber gibt es Einflüsse auf den Physischen Zwilling, die gezielt nicht erfasst werden oder nicht erfasst werden können, zum Beispiel die Dynamik der Abwasserzusammensetzung. Entsprechend ihrer Ausprägung und Variabilität sind diese Einflüsse durch Ersatzüberlegungen im Digitalen Zwilling zu berücksichtigen. Rahmenbedingungen sind dynamisch und beeinflussen den Betrieb des Physischen Zwillings. Rahmenbedingungen sind aber bereits bei bzw. für die Planung und Errichtung eines Physischen

Zwillings zu erheben und für einen Digitalen Zwilling bereitzustellen. Da der Digitale Zwilling für den gesamten Lebenszyklus eines Physischen Zwillings verfügbar sein soll, kann der Digitale Zwilling bei einer Neuplanung ebenso wie bei einer Ersatzneubauplanung bereits vor oder zusammen mit dem errichteten Physischen Zwilling aufgebaut werden. Durch den bi-direktionalen Austausch zwischen Physischem Zwilling und Digitalem Zwilling findet darauf aufbauend eine Anpassung des Digitalen Zwillings an den errichteten Physischen Zwilling statt oder umgekehrt eine Anpassung des nächsten zu errichtenden Abschnitts des Physischen Zwillings beispielsweise durch Szenarienuntersuchungen mit dem aktualisierten Digitalen Zwilling.

Neben den beschriebenen erfassbaren Größen aus dem Physischen Zwilling gibt es für jeden Bereich, der für den Digitalen Zwilling bereitzustellen ist, auch Informationen, die noch nicht erfasst oder (noch) nicht erfassbar sind. Wie mit diesen Informationslücken umgegangen wird, ist im Einzelfall zu entscheiden. Es sollte versucht werden, die (noch) nicht erfassbaren Informationen durch andere Informationsquellen zu substituieren. Dafür wurden bereits virtuelle Sensoren in Modellen (sogenannte SoftSensoren) genutzt.

Im Physischen Zwilling werden Informationen gesammelt, die zur Nachbildung im Digitalen Zwilling benötigt werden. Der Digitale Zwilling kann sowohl ein datengetriebenes als auch ein mechanistisches Modell (oder eine Kombination davon) sein. Die darin ablaufenden Verarbeitungsschritte sind in Abbildung 1 als „Datenverarbeitung“ zusammengefasst. Sie werden nachfolgend charakterisiert, um die Anforderungen an den Digitalen Zwilling zu spezifizieren:

Für die „Datenspeicherung“ muss definiert werden, welche Informationen, die der Physische Zwilling und der Digitale

Zwilling bereitstellen können, für nachfolgende Schritte benötigt werden. Die Informationen können zum Beispiel in Form von Datenbank-Einträgen oder Log-Dateien gespeichert werden. Um diese im Digitalen Zwilling verwenden zu können, ist sicherzustellen, dass die Eingabeformate durch entsprechende Schnittstellen aus dem Digitalen Zwilling ausgelesen und interpretiert werden können. Der Datenumfang ist maßgeblich vom betrachteten System mit seiner messtechnischen Ausstattung abhängig. Metrologisch sind hierbei sowohl die räumliche und zeitliche Auflösung relevant. Weiter muss für jede Anlage und somit für jeden Digitalen Zwilling entsprechend der beabsichtigten Verwendung festgelegt werden, welche Informationen in welchem Umfang gespeichert werden müssen.

Die „Datenaufbereitung“ umfasst wesentliche Schritte der Validierung nach DWA-M 181 und DWA-M 151 (derzeit in Überarbeitung zu einer neuen zusammenhängenden Merkblattreihe). Die Auswertung aufbereiteter (Mess-) Daten findet im Schritt (iii) „Datenanalyse“ statt. Es wird erwartet, dass mit den Ergebnissen einer Datenanalyse (iv) „Handlungsempfehlungen“ abgeleitet werden können, die den Akteuren im Gesamtsystem zur Verfügung gestellt werden, um diese bei Entscheidungsfindungen zu unterstützen. Die Bausteine zur Datenverarbeitung sind mit Ausnahme der Datenanalyse als optionale Bestandteile des Digitalen Zwillings definiert, da lediglich die Datenanalyse als unverzichtbare Voraussetzung für die Rückkopplung auf den Physischen Zwilling zur Verfügung steht.

Ein wesentlicher Schritt für die „Datenanalyse“ ist die Plausibilitätsprüfung. Dabei soll für jeden einzelnen Wert, der aus dem Physischen Zwilling durch Messtechnik oder Beobachtungen im Betrieb oder der Planung an den Digitalen Zwilling übergeben wird, festgelegt werden, ob er erklärbar ist oder nicht. Durch den Digitalen Zwilling ist das auch auf übergeordneten Ebenen möglich und lässt nach der Werteübertragung weitere Abgleiche mit übertragenen Daten aus anderen Messstellen oder Beobachtungen unmittelbar zu. Diese Prüfung ist erforderlich, um zum Beispiel grobe Fehler, Ausreißer,

Offsets und Asynchronitäten zu identifizieren, die zu ungünstigen Handlungsempfehlungen führen können. Für die Plausibilitätsprüfung können zum Beispiel

- redundante Informationen
- Erwartungswerte (zum Beispiel aus Simulationen, Erfahrungswerte)
- Kennzahlen
- statistische Auswertungen der zeitlichen Entwicklung eines Signals (zum Beispiel Sprünge, Drift)
- datenbasierte Methoden (zum Beispiel PCA – Principle Component Analysis, Clustering) zum Abgleich mit dem regelmäßigen Betriebsbereich oder verschiedenen typischen Betriebszuständen

hydrograv360

Seit mehr als 20 Jahren digitalisieren wir mit CFD-Simulationen die Planungsprozesse der Wasserwirtschaft

Bauen auch Sie mit uns den digitalen Zwilling Ihrer Anlage und nutzen Sie die hohen Optimierungspotenziale:



Besuchen Sie uns und sprechen Sie mit unseren Experten über Ihren CFD-Anwendungsfall:

IFAT
Munich

13. Mai – 17. Mai 2024
Messe München
Halle A3 | Stand 429

hydrograv
hydraulik • gravitatives trennen

verwendet werden. Die Einordnung des Ergebnisses ist abhängig von ermittelten Unterschieden zwischen zwei Informationen (zum Beispiel gemessene und modellbasiert prognostizierte Zeitreihe des Trockenwetterzuflusses zur Kläranlage) und kann mit statistischen Kennzahlen ausgedrückt werden. Neben Messabweichungen können dadurch auch ungewöhnliche Betriebszustände und Störungen erkannt werden. Simulatoren, Emulatoren und prädiktive Methoden des Machine Learnings können im Rahmen der Datenanalyse darüber hinaus zur Berechnung nicht gemessener oder nicht messbarer Größen sowie zur Prognose zukünftiger Betriebszustände eingesetzt werden. Die Prognose kann auch Optimierungen und Handlungsempfehlungen für die zukünftige Betriebsweise berücksichtigen. Prognosedaten können dabei sowohl aus Prognosemodellen, die Teil des Digitalen Zwilling sind, als auch aus externen Quellen (zum Beispiel Wettervorhersage, Eingabe geplanter Betriebseingriffe durch Personal) bereitgestellt werden. Das kann zum Beispiel das Ableiten von Handlungsempfehlungen mit wissens- bzw. erfahrungsbasierten Modellen (Expertensystem) oder die Berechnung von Bewertungsgrößen zur Optimierung und zum Benchmarking ‚zum Beispiel (spezifischer) Energiebedarf, Treibhausgasemissionen‘ umfassen.

Mit der „Visualisierung“ (zum Beispiel Dashboard) sollen Informationen aus dem Physischen Zwilling durch den Digitalen Zwilling so aufbereitet werden, dass Akteure ihr zukünftiges Handeln danach ausrichten können bzw. abgeleitete Handlungsempfehlungen aus dem Digitalen Zwilling für Akteure (Stakeholder) nachvollziehbar sind. Im Zuge dieser Informationsverarbeitung sind die zwei Möglichkeiten „menschlicher Eingriff“ [6] und „automatisierter Eingriff“ [7] zu unterscheiden (Abbildung 1). Die Datenvisualisierung ist nicht nur als Unterstützung der Akteure für Entscheidungen im Rahmen des menschlichen Eingriffs in die Rückkopplung des Digitalen Zwilling auf den Physischen Zwilling wichtig, sondern auch für die Nachvollziehbarkeit automatisierter Eingriffe.

2.2 Schnittstellen zwischen physischem und digitalem Zwilling

Für die Verbindung von dem Physischen Zwilling und dem Digitalen Zwilling ist es erforderlich, Schnittstellen zu definieren. In der Praxis gibt es bereits zahlreiche Lösungen zur Bereitstellung von Daten über digitale Schnittstellen (zum Beispiel OPC UA, Modbus) und zur Überführung von Informationen eines physischen Systems in Datenbanken zum Beispiel zur Verwendung in Geoinformationssystemen oder Simulationsmodellen. Einige dieser Lösungen können auch für die Kommunikation zwischen dem physischen und digitalen Zwilling verwendet werden, wenn sie eine regelmäßige Anpassung des Digitalen Zwilling an den realen Zustand in systemrelevanten Zeitabschnitten (Aktualisierung) ermöglichen. Die Art und Weise der Anpassung muss dabei ebenfalls systemangepasst sein. Wann ein Kommunikationsweg für die räumliche und zeitliche Auflösung von Informationen und das Synchronisationsintervall adäquat ist, sollte aufgrund der Einzigartigkeit der Systeme in der Wasserwirtschaft eine Einzelfallentscheidung sein. Nachstehend sind zwei grundlegende Varianten unterschieden. Mindestens einer der beiden Kommunikationswege ist dabei umzusetzen:

- Human Machine Interface (HMI): Informationskommunikation zwischen Mensch und Maschine, zum Beispiel Benach-

richtungung bei Alarmierung oder Handlungsempfehlung (per E-Mail oder ähnlich) oder Dateneingabe (Labormessungen oder ähnlich)

- Machine to machine Interface (M2M): Informationskommunikation zwischen Maschinen (softwareseitig), zum Beispiel Übertragung von Sensorwerten in den Digitalen Zwilling oder Verbindung zum Digitalen Zwilling zur Steuerung von Aktoren [7, 8]

Die Kommunikation zwischen dem Digitalen Zwilling und Physischen Zwilling und dadurch zwischen dem Physischen Zwilling und dem Betreiber (Entscheidungsträger) wird auch als „Data Link“ bezeichnet. Sie wird, um den Informationsfluss zu gewährleisten, mit Schnittstellen umgesetzt, die nach den vorstehenden Prinzipien die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Ein Digitaler Zwilling *muss* kontinuierlich in system- und anwendungsrelevanten Zeitschritten an seinen Physischen Zwilling angepasst werden [8].
- Ein Digitaler Zwilling *muss* eine Kommunikation mit dem Physischen Zwilling durchführen [7]. Sie kann unidirektional (Physischer Zwilling zu Digitaler Zwilling) oder bidirektional (zum Beispiel Rückkopplung durch Handlungsempfehlungen) umgesetzt werden.
- Ein Digitaler Zwilling *muss* die direkte Ableitung von Handlungsempfehlungen ermöglichen [9].

Der Entscheidungsträger soll durch den Digitalen Zwilling immer in der Lage sein, auf der Grundlage der Informationsbereitstellung durch den Digitalen Zwilling Entscheidungen zu treffen und nicht nur aus gelerntem Verhalten handeln. Wenn der Entscheidungsträger die notwendige Handlung selbst erkennen muss, wird der Digitale Zwilling nicht genutzt. Dadurch wird der Informationstransport aus dem Physischen Zwilling in den Digitalen Zwilling nicht benötigt, und ausschließlich Szenario-basiertes Lernen führt zu Entscheidungen.

Darüber hinaus ist auch die Kopplung einzelner Module (Abbildung 1) in einem digitalen Zwilling relevant, da jedes Modul für sich einen geringeren Mehrwert für den Informationsgewinn bietet als gekoppelte Module. Der Mehrwert ergibt sich aus einem besseren Prozessverständnis, weitreichenderem Erkenntnisgewinn, Potenzialidentifikation zur Systemoptimierung und Effizienzsteigerungen im Betrieb [9]. Die Modularität ermöglicht eine stetige Erweiterung des Digitalen Zwilling und dadurch auch die Anpassung an und Implementierung von zukünftigen Weiterentwicklungen im Bereich der Schnittstellen.

Die benötigte Datenbasis sollte gegliedert nach Datenform, -umfang und Verwendungszweck bereitgestellt werden. Die aufgezeichneten Daten aus dem Physischen Zwilling sind wie auch die verarbeiteten Daten aus dem Digitalen Zwilling zu speichern, um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit aller Verarbeitungsvorgänge, Handlungsempfehlungen und getroffenen Entscheidungen zu wahren. Für die Datenablage bzw. den Datenbezug stehen bereits etablierte Systeme zur Verfügung, die durch gegebenenfalls weitere Schnittstellen zum Austausch mit dem Digitalen Zwilling zu erweitern sind. Insbesondere Prozessleitsysteme (PLS) und Messdatenmanagementsysteme (MDMS) verfolgen hier unterschiedliche Ansätze (vgl. DWA-M 151), die für den Datenbezug des Digitalen Zwilling relevant sind. Die Grundsätze der Datenablage in einem MDMS und -verarbeitung in einem PLS bleiben davon unberührt. Für

den Aufbau eines Digitalen Zwillings oder die Entwicklung von Steuerungsstrategien sind die umfangreicheren Informationen aus dem MDMS nützlich. Aus dem PLS stammende, häufig bereits aggregierte Informationen sind für den Betrieb des Verbunds aus Physischem und Digitalem Zwilling wichtig.

Beispiele zur Verknüpfung und Szenarienuntersuchung:

- **Datenrepositorien**

Relationale Datenbanken ermöglichen es, die bestehenden Dateninfrastrukturen miteinander zu verbinden, und bilden somit die Grundlage für den Aufbau eines Digitalen Zwillings zu einem bestehenden Physischen Zwilling sowie, um mit dem Austausch zwischen Physischem Zwilling und Digitalem Zwilling an ein bestehendes PLS anzuknüpfen.

- **Virtuelle Inbetriebnahme**

Durch die Simulation eines Digitalen Zwillings kann das Szenario „Inbetriebnahme“ bzw. „Probetrieb“ untersucht werden.

- **SCADA-Systeme**

Die Informationsbeschaffung und Steuerung ist neben der Bereitstellung durch PLS und MDMS in der Praxis bereits etabliert. An den Informationsfluss dieser Systeme sollte ein Digitaler Zwilling anschließen, um die bi-direktionale Kommunikation implementieren zu können.

- **Simulationsmodelle**

Die benötigten Grundlagendaten zum Modellaufbau können aus dem Digitalen Zwilling des abzubildenden Systems übernommen werden. Modelle zur Simulation sollen nicht selbst der Digitale Zwilling sein, sondern von diesem abge-

leitet werden, um den Anforderungen hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Auflösung eines Simulationsmodells/-programms gerecht zu werden/darauf abgestimmt zu sein.

- **Modellprädiktive Regelung**

Mit dem Ziel, zum Beispiel die Effizienz zu steigern, um den Energieverbrauch auf der Kläranlage zu senken oder den Speicherraum im Kanalnetz zur Emissionsminderung besser auszunutzen, werden Simulationsmodelle zur Optimierung (Lösungssuche durch Szenarienauswertung mit einfachem Modell) eingesetzt. Wird das Simulationsmodell als Digitaler Zwilling verstanden, ist dessen Synchronisation mit dem Physischen Zwilling sicherzustellen, um modellbasierte Regelungsentscheidungen zu treffen.

2.3 Umsetzung und Einordnung Digitaler Zwillinge

Mit der Verwendung von Digitalen Zwillingen können in verschiedenen Anwendungsbereichen der Wasserwirtschaft Mehrwerte generiert werden, da sie sich von etablierten Modellkonzepten durch den unmittelbaren Bezug zum Physischen Zwilling unterscheiden. Die (bi-direktionale) Kommunikation ermöglicht prozessdatenbasierte Erkenntnisgewinne, die als Grundlage für das Betriebs- und Systemverständnis sowie deren Anpassung an die dynamischen Rahmenbedingungen in der Siedlungswasserwirtschaft zur Verfügung stehen. So werden zum Beispiel Effizienzsteigerungen, erhöhte Flexibilität, Benchmarking zur Qualitätsverbesserung und Kostenminderung, Risikoverminderung und modellbasierte Schulung von Betriebspersonal möglich.

HUBER auf der IFAT 2024

Besuchen Sie HUBER auf der Weltleitmesse für Umwelttechnologien in München: Wir stellen auf der IFAT 2024 über 50 Produkte auf 1.300 m² Standfläche aus und bieten spannende Exkursionen zu hochmodernen Anlagen.

Unsere innovativen Lösungen zur Steigerung der Wasser- und Energieeffizienz:

- ▶ **Kommunale und industrielle Abwasserreinigung und Schlammbehandlung**
- ▶ **Vierte Reinigungsstufe und Phosphorelimination**
- ▶ **Heizen und Kühlen mit Abwasser**
- ▶ **Digitalisierung**
- ▶ **NEU: Containeranlagen und Mietmaschinen**
- ▶ **Safe Access Solutions – Sicherheit für Wasser, Menschen und Objekte**
- ▶ **Ganzheitlicher HUBER Service**



Besuchen Sie uns auf der IFAT.
von 13. bis 17. Mai 2024
HALLE A2, STAND 351/550



HUBER SE | Telefon: +49-84 62-201-0 | info@huber.de | www.huber.de



Der regelmäßige Datenaustausch soll Änderungen auf der digitalen und physischen Seite darstellen, um nicht nur Bestands- bzw. Echtzeitanalysen, sondern auch aktualisierte Prognosen möglich machen. Es ist zu unterscheiden, ob die Kommunikation permanent oder in größeren und teils unregelmäßigen Zeitschritten stattfindet. Bei einem permanenten Austausch können Live-Überwachungen und -Steuerungen stattfinden, während bei einem selteneren Austausch ein aktuelles Modell gepflegt wird. Ein solches fortgeschriebenes Mo-

dell eignet sich insbesondere für Veranschaulichungs- und Prognosezwecke. Prognostiziert wird im Kontext des Digitalen Zwillings in Szenarienanalysen (offline) und Steuerungsentscheidungen (online), die zum Beispiel auf der Grundlage von Wettervorhersagen (zum Beispiel DWD-Nowcasting) durchgeführt werden.

Für die Intervalllänge der Kommunikation zwischen Physischem Zwilling und Digitalem Zwilling ist je nach Anlagentyp zu entscheiden, welche zeitliche Auflösung mindestens erfor-

Einsatzgebiet	Ziel/Zweck	TRL ^{*)}	Komponenten des Digitalen Zwillings	Quelle
Kläranlage (Kolding)	Online- (Mehrziel-) Systemoptimierung (zum Beispiel modell-prädiktive Steuerung) für Energie- oder Ressourceneinsparungen oder Compliance-Management (zum Beispiel zur Minimierung des CO ₂ -Fußabdrucks) Fehleranalyse, Anlagenmanagement und vorausschauende Wartung zur Investitionsplanung und Entscheidungsunterstützung für Politikgestaltung; Verringerung des Entlastungsvolumens aus Regenüberlaufbecken	6	(Mess-) Datenmanagementsystem, Simulationsmodelle und Beobachtungsmodelle für Anlagen, Prognosemodelle zur Entscheidungsunterstützung durch Szenarienanalyse	[7, 11–15]
Kläranlage (Stadtentwässerung Cottbus)	Monitoring mit Betriebsdaten als Grundlage für Vorkalkulation von Leistungsreserven und -fähigkeiten der Anlage mit Simulationen	6	Verknüpfung von Online-Messungen mit mechanistischem Simulationsmodell und Expertensystem	[6,16]
Kläranlage (EC Erdölchemie Köln)	Online-Simulation der Kläranlage und Prognose für eine Stunde im Voraus	6	Beobachter- und Prognosemodell der biologischen Stufe der Kläranlage	[17]
Kläranlage (Stadt Hildesheim)	Online-Simulation des Kanalnetzes sowie der Kläranlage inkl. Nachklärung	6	Beobachter- und Prognosemodelle für Kanalnetz und Kläranlage	[18–22]
Kläranlage (Stadtentwässerung Münster)	Modellierung des Energieverbrauchs für Belüftungssysteme mit Künstlichen Neuronalen Netzen	6	Messergebnisse aus laufendem Kläranlagenbetrieb, Neuronales Netz	[23]
Schiffskläranlagen	modellgestützte Betriebsunterstützung für Zulaufmanagement und Kläranlagenbetrieb auf Kreuzfahrt- und großen Passagierschiffen	4	mechanistische Modelle für betriebsbegleitende Simulation und Betriebsprognosen	[3]
Weitergehende Abwasserreinigung (EGIX, Dülmen und Bad Sassendorf)	Offline-Nutzung Digitaler Zwilling zur Funktionsprüfung und Prüfung des Automatisierungskonzepts; Online-Nutzung für Monitoring und MBPC (Ozon-/ Aktivkohle-Dosis)	F	mechanistisches Simulationsmodell (SIMBA#5) und Betriebsdaten	[24]
Stadtentwässerungssystem (Stadt Hannover)	Digitaler Zwilling als Basis für proaktive Bewältigung von Wetterextremereignissen im urbanen Raum soll Handlungsempfehlungen situationsbedingt zurückgeben und erklärbar sein.	F	Messdaten, Simulationsmodelle und Prognosen	[25]
Stadtentwässerungssystem (VCS Denmark, Kopenhagen)	Dokumentation der Leistung mit Sensordaten und automatisierten täglichen Modellläufen	6	Messdaten (Wasserstandssensoren, weiterer Ausbau Messnetz, im Jahr 2021: + 300 Sensoren)	[8]
Pumpstation (TU Berlin, Versuchsstand)	Betriebsoptimierung zur Einsparung von Investitionen in Neubauten am Digitalen Zwilling einer Pumpstation (Physischer Zwilling Labor)	F	Pumpensteuerung, Vorhersage von Niederschlag als Input	[26]
Wasseraufbereitungsanlage (PUB Changi, Singapur)	aktuelle Statusauswertungen von gemessenen und Ergebnissen des Digitalen Zwillings für automatische Szenarioanalysen und stündliche 5-Tage-Vorhersagen der Anlagenleistung	6	Hybridmodell mit SCADA-Anbindung zur Abbildung des gesamten Anlagenprozesses; „Beratungsmodus“	[12]

^{*)} TRL – Technology Readiness Level (Technologiereifegrad [10]; F = Forschung)

Tabelle 1: Beispiele Digitaler Zwillinge aus dem Betrieb siedlungswasserwirtschaftlicher Anlagen

derlich ist. Im Bereich der Siedlungsentwässerung beispielsweise sollte für Wasserstandsmessungen in Regenbecken eine Intervalldauer kleiner fünf Minuten gewählt werden, da sonst die Dynamik von Wasserständen bei Regenwetter in der Kanalisation durch Aggregationseffekte oder zu wenige Momentaufnahmen nicht ausreichend genau erfasst werden kann. Für andere Messungen, zum Beispiel für das Schlamminventar auf der Kläranlage, kann es erforderlich sein, nur aggregierte Daten zu speichern, da sich die erwartete Dynamik typischerweise über mehrere Tage entwickelt.

Potenzielle Anwendungen für Digitale Zwillinge ergeben sich aus den Verbesserungspotenzialen existierender Schnittstellen für den Informationsaustausch zwischen Modellen untereinander und dem physischen System. Das physische, reale System wird bisher ausschließlich als Referenz verwendet. Durch die Virtualisierung in einem Digitalen Zwilling wird die interdisziplinäre Kopplung erleichtert. Beispielsweise kann eine Kopplung des Prozessleitsystems mit dem Verwaltungssystem des Betriebs in einem Digitalen Zwilling Bestellprozesse von Betriebsmitteln automatisiert anstoßen. Auf diese Weise könnte zum Beispiel Fällmittel automatisiert bestellt werden, sobald der gemessene Füllstand des Fällmittelbehälters einen Grenzwert unterschreitet. Darüber hinaus können mit Smart Grids auch sektorübergreifende Kopplungen mit dem Energiesektor realisiert werden. Beispiele Digitaler Zwillinge können Tabelle 1 entnommen werden. Die Beispiele in Tabelle 1 sind praxisnah oder im Betrieb siedlungswasserwirtschaftlicher Anlagen umgesetzt. Sie weisen dementsprechend unterschiedliche Technologiereifegrade [10] auf.

3 Ausblick

Das präsentierte Konzept des Digitalen Zwillings zur Anwendung in der Siedlungswasserwirtschaft ist als Grundlage für weitere Betriebs- und Technologieentwicklungen zu verstehen. Mit Digitalen Zwillingen einhergehende Vor- und Nachteile zeigen sich bei einzelnen Pilotvorhaben bereits. Ziele sind dabei insbesondere zukunftsorientierte, nachhaltige Lösungen zur Verbesserung von Entscheidungsabläufen und daran anknüpfende Handlungsanweisungen. Die Grundlage dafür ist eine durchgängige Wissenserhaltung über den gesamten Lebenszyklus einzelner Bauwerke und ganzer Systeme. Dazu stehen Arbeitsmethoden wie das Building Information Modeling zur Verfügung. Diese ermöglichen den uneingeschränkten Wissenstransfer aus der Planungsphase in die Betriebsphase und bei Sanierung/Erweiterung/Rückbau wiederum in die darauffolgende Lebenszyklusphase.

Mit Digitalen Zwillingen führt die Informationsbereitstellung in anderen Disziplinen durch branchenweit festgelegte Kommunikationsstandards zu einer ausgebauten Interdisziplinarität und Interoperabilität bestehender Konzepte. Prozess- und anlagenspezifisch kann untersucht werden, ob die Übertragung von Konzepten aus der Industrie 4.0 in die Siedlungswasserwirtschaft (Wasserwirtschaft 4.0) möglich ist.

Für die Siedlungswasserwirtschaft ergibt sich daraus eine Chance zur Kommunikation zwischen Betreiber und Öffentlichkeit und damit auch die Möglichkeit zur Verbesserung der Governance (Entwurf der EU-Kommunalabwasserrichtlinie 2022 [28]). Darüber hinaus kann der Informationsaustausch



AEROSTRIP®
Streifenbelüfter von AQUACONSULT

-  Kleinere Blasen für geringeren Verbrauch
-  Bis zu 20 Jahre Lebensdauer
-  Einzigartige Polyurethan-Membrane

AEROSTRIP
...damit geht
den Kosten
die Luft aus!

Besuchen Sie
uns gerne auf der
IFAT 2024 in München
Halle A3, Stand 153

Für weitere Informationen kontaktieren sie uns bitte unter
+49-6346 96 594...0 oder **office@aquaconsult.org**

www.aerostrip.at

durch Standardisierung von Formaten und Vorgehensweisen vereinfacht und transparent gestaltet werden. Damit werden eine nachhaltige Wissenserhaltung und -transfer möglich.

Literatur

- [1] D. L. Sedlak: *Water 4.0. The past, present, and future of the world's most vital resource*, Yale University Press, New Haven, 2014
- [2] DWA: *Digitalisierung in der Wasserwirtschaft* (zuletzt geprüft am 28.02.2024), https://de.dwa.de/files/_media/content/01_DIE_DWA/Politikinformationen/Positionspapiere/Positionspapier_Digitalisierung_in_der_Wasserwirtschaft_2020_Netz.pdf
- [3] BMWK-Forschungsprojekt „Online Modellierungs-, Simulations- und (Fern-)Steuerungssysteme für bordeigene Umwelttechnologien auf (Kreuzfahrt-)Schiffen (OSCAR)“, 2019–2022, www.oscar-cloud.de
- [4] R. J. Vestner: Der Digitale Zwilling in der Wasserwirtschaft, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 2019, 12 (10), 581–586
- [5] H. Stachowiak. *Allgemeine Modelltheorie*, Springer, Wien, New York, 1973
- [6] K. Spiller, J. Schmitt: Innovatives Bewirtschaftungs- und Bedienungskonzept für die Kläranlage Cottbus, *gwf Wasser Abwasser* 1994, 135 (4), 213–222
- [7] P. A. Stentoft, L. Vezzaro, P. S. Mikkelsen, M. Grum, T. Munk-Nielsen, P. Tychsen, H. Madsen, R. Halvgaard: Integrated model predictive control of water resource recovery facilities and sewer systems in a smart grid: example of full-scale implementation in Kolding, *Water Science and Technology* 2020, 81 (8), 1766–1777, DOI: 10.2166/wst.2020.266
- [8] A. N. Pedersen, M. Borup, A. Brink-Kjær, L. E. Christiansen, P. S. Mikkelsen: Living and Prototyping Digital Twins for Urban Water Systems: Towards Multi-Purpose Value Creation Using Models and Sensors, *Water* 2021, 13 (5), 592, DOI: 10.3390/w13050592
- [9] H. van der Valk, H. Haße, F. Möller, M. Arbter, J.-L. Henning, B. Otto: A Taxonomy of Digital Twins, *AMICS 2020 proceedings*, AIS eLibrary, 2020
- [10] Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung: *Merkblatt Technologieifegrade*, 2021, <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/Innovationen/Merkblatt-Technologieifegrade.html> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2024)
- [11] M. Eulogi, S. Ostojin, P. Skipworth, S. Kroll, J. D. Shucksmith, A. Schellart: Optimal Positioning of RTC Actuators and SuDS for Sewer Overflow Mitigation in Urban Drainage Systems, *Water* 2022, 14 (23), 3839, DOI: 10.3390/w14233839
- [12] P. Jain, J. Poon, J. Prakash Singh, C. Spanos, S. R. Sanders, S. Kumar Panda: A Digital Twin Approach for Fault Diagnosis in Distributed Photovoltaic Systems, *IEEE Transactions on Power Electronics* 2020, 35 (1), 940–956, DOI: 10.1109/TPEL.2019.2911594
- [13] M. Bartos, B. Kerkez: Pipedream: An interactive digital twin model for natural and urban drainage systems, *Environmental Modelling & Software* 2021, 144, 105120, DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105120
- [14] T. Ruohomaki, E. Airaksinen, P. Huuska, O. Kesaniemi, M. Martikka, J. Suomisto: Smart City Platform Enabling Digital Twin, *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*, IEEE, 25.–27. September 2018, S. 155–161
- [15] M. Poch, M. Garrido-Baserba, L. Corominas, A. Perelló-Moragues, H. Monclús, M. Cermerón-Romero, N. Melitas, S. C. Jiang, D. Rosso: When the fourth water and digital revolution encountered COVID-19, *Science of the total environment* 2020, 744, 140980, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140980
- [16] N. Merkel, J. Schmitt: *Betriebsunterstützung durch innovative Informationssysteme am Beispiel der Kläranlage Cottbus*, *ABB Technik* 1996 (6/7), 4–11, <https://library.e.Abbildung.com/public/ea68973dbe1f9a28c1256ddd003470e1/04-11m212.pdf>

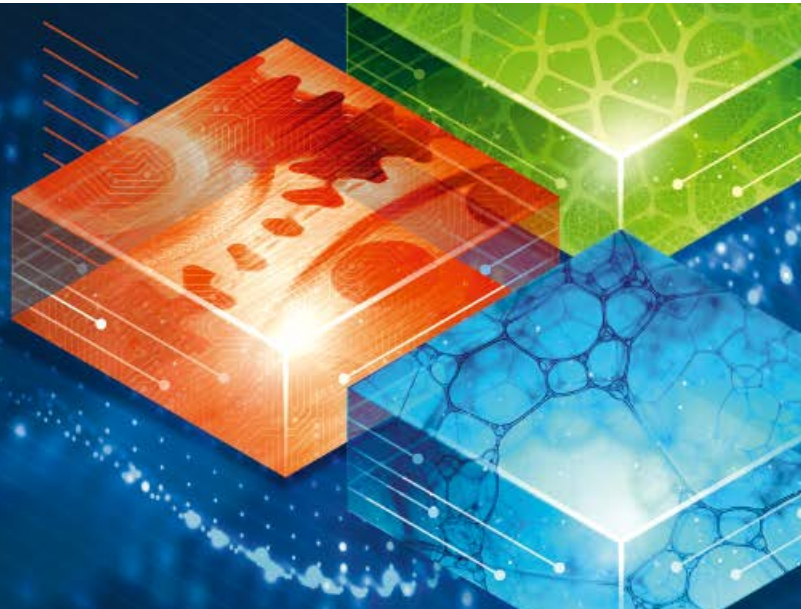
ACHEMA2024

INSPIRING SUSTAINABLE CONNECTIONS

World Forum and Leading Show for the Process Industries

ACHEMA is the global hotspot for industry experts, decision-makers and solution providers. Experience unseen technology, collaborate cross-industry and connect yourself worldwide to make an impact.

Are you ready? Join now!



**+ Special Show
HYDROGEN**

10 - 14 June 2024
Frankfurt am Main, Germany
#ACHEMA24

- [17] J. Alex, J. Nagelmann, A. Mayrhofer, R. Böckler: On-line-Simulation zur Betriebsunterstützung der Kläranlage der EC Erdölchemie Köln, *Chemie Ingenieur Technik* 1999, 71 (9), 1027–1028
- [18] J. Alex, U. Jumar, U. Bitter: On-line simulation of wastewater treatment plants, In: IFAC (Hrsg.): *14th Triennial World Congress Proceedings*, 1999, S. 5794–5799
- [19] F. Obenaus, K.-H. Rosenwinkel, J. Alex, R. Tschepetzki, U. Jumar: Components of a model-based operation system for wastewater treatment plants, *Water Science and Technology* 1999, 39 (4), DOI: 10.1016/S0273-1223(99)00064-5
- [20] F. Obenaus: *Online-Anwendung von deterministischen Prozeßmodellen zur Unterstützung des Betriebs biologischer Kläranlagen*, Dissertation, Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, Leibniz Universität Hannover, 2001
- [21] K. Seggelke, K.-H. Rosenwinkel: Online-simulation of the WWTP to minimise the total emission of WWTP and sewer system, *Water Science and Technology* 2002, 45 (3), 101–108, DOI: 10.2166/wst.2002.0064
- [22] K. Seggelke, K.-H. Rosenwinkel, P. A. Vanrolleghem, P. Krebs: Integrated operation of sewer system and WWTP by simulation-based control of the WWTP inflow, *Water Science and Technology* 2005, 52 (5), 195–203, DOI: 10.2166/wst.2005.0134
- [23] U. Robecke: *Modellierung des Energieverbrauchs für Belüftungssysteme auf Kläranlagen mittels künstlicher neuronaler Netze*, Dissertation, TU Darmstadt, 2015, *Schriftenreihe IWAR*, Bd. 232
- [24] H. Atallah Al-Asad, J. Parniske, J. Qian, J. Alex, S. Ramaswami, K. Kaezel, T. Morck: Development and application of a predictive model for advanced wastewater treatment by adsorption onto powdered activated carbon, *Water Research* 2022, 217, 118427, DOI: 10.1016/j.watres.2022.118427
- [25] A. Krebs: WaX – Verbundprojekt ZwillE. Digitaler Zwilling zum KI-unterstützten Management von Wasser-Extremereignissen im urbanen Raum, <https://zwillE-projekt.de> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2024)
- [26] P. U. Thamsen: *Tröpfchen für Tröpfchen – Wasser 4.0*, 2020, <https://www.tu.berlin/ueber-die-tu-berlin/profil/pressemittelungen-nachrichten/digitaler-zwilling> (zuletzt aufgerufen am 28.02.2024)
- [27] B. R. Johnson, R. Kadiyala, G. Owens, Y. Mak, P. Grace, C. Newbery, S. Sing, A. Saxena, J. Greene: Water Reuse and Recovery Facility Connected Digital Twin Case Study: Singapore PUB's Changi WRP Process, Control, and Hydraulics Digital Twin, *WEFTEC 2021 Conference Proceedings*
- [28] *Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council concerning urban wastewater treatment (recast) in der Fassung vom 26.10.2022, COM(2022) 541 final, 2022/0345 (COD)*, https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-revised-urban-wastewater-treatment-directive_en

Autoren

HSGSim – Hochschulgruppe Simulation, AG Digitaler Zwilling

E-Mail: info@hsgsim.org

Mitwirkende in der AG Digitaler Zwilling:

Tatjana Lorenz (Gießen), Karim Sedki (Kaiserslautern), Dagmar Pohl (Hannover), Peter Schleiffer (Aachen), Ralf Habermehl (Kaiserslautern), Jonas Kleckers (Münster), Tobias Greiner (Stuttgart), Stefan Kroll (Antwerpen), Alexander Behr (Gießen), Janna Parniske (Kassel), Nora Pankow (München), Günter Gruber (Graz)

KA

MACHERY-NAGEL

Spektralphotometer NANOCOLOR® Advance

Besuchen Sie uns auf der IFAT,
Stand C.227/326

IFAT
Munich



Mehr Infos:
www.mn-net.com/advance

Die Zukunft ist spektral

- Universell – Großes Spektrum auswertbarer Testkits
- Intuitiv – Icon-basierte Menüführung
- Sicher – Automatische Erkennung störender Trübungen

MACHERY-NAGEL

www.mn-net.com

