

FlexAqua: Ein holistischer Ansatz zur flexiblen Energienutzung in der Wasserwirtschaft

Leon Springorum¹, Christian Derksen², Omar Ben Chobba², Nils Loose³,
Mathias Brune⁴, Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek⁵

Kurzfassung:

Der steigende Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien erhöht den Bedarf an flexiblen Verbrauchern im Energiesystem. Kommunale Kläranlagen verfügen aufgrund ihrer prozessualen und energetischen Eigenschaften über relevante und bislang nur begrenzt genutzte Flexibilitätspotenziale. Der Beitrag stellt das Projekt FlexAqua vor, welches einen integrierten Ansatz aus Prognosemodellen, Energiesystemmodellierung und einem leitwartenintegrierten Assistenzsystem zur modellprädiktiven Betriebsführung verfolgt. Ziel ist es, Flexibilität systemdienlich und unter Wahrung der Prozessstabilität nutzbar zu machen. Des Weiteren werden identifizierte Herausforderungen beschrieben sowie ein erstes modellbasiertes Anwendungsszenario einer vorausschauenden Betriebsstrategie vorgestellt.

Keywords: Flexibilität, Wasserwirtschaft, Energiewirtschaft, Assistenzsystem

1 Einleitung

Die Transformation des Energiesystems führt zu einer zunehmenden zeitlichen Entkopplung von Stromerzeugung und -verbrauch. Insbesondere der steigende Anteil erneuerbarer Energien mit dargebotsabhängiger Einspeisung verstärkt die Notwendigkeit Erzeugung, Verbrauch und Speicherung auf Systemebene besser aufeinander abzustimmen. Flexibilität gewinnt dabei als Mittel zum systemischen Ausgleich von Angebot und Nachfrage an Bedeutung. Eine zeitlich angepasste Nutzung elektrischer Lasten kann dazu beitragen, Erzeugungsspitzen zu glätten, die Integration erneuerbarer Energien zu fördern und so die Nutzung fossiler Energiequellen zu reduzieren sowie gleichzeitig wirtschaftliche Vorteile durch eine verbesserte Reaktion auf Preissignale zu erschließen.

Kommunale Kläranlagen werden häufig unabhängig von energiewirtschaftlichen Signalen betrieben. Dabei weisen sie betriebliche Eigenschaften auf, welche sie grundsätzlich für eine stärkere Einbindung in ein flexibleres Energiesystem eignen lassen. Der Anlagenbetrieb ist durch wechselnde Abwasserzuflüsse, variierende Prozessanforderungen und unterschiedliche Lastzustände geprägt, sodass der Umgang mit veränderlichen Betriebspunkten zum regulären Betriebsalltag gehört. Vor diesem Hintergrund ist es sinnvoll, Kläranlagen nicht als passive Verbraucher, sondern als potenzielle Akteure innerhalb eines flexiblen Energiesystems zu betrachten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Kläranlagen Teil

¹ Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal, 0202 439 1615, lspringorum@uni-wuppertal.de, <https://www.evt.uni-wuppertal.de/de/>

² EnFlex.IT GmbH, Am Thyssenhaus 1-3, 45128 Essen, {cderksen|obenchobba}@enflex.it, <https://www.enflex.it/>

³ Universität Duisburg-Essen, Universitätsstraße 9, 45141 Essen, nils.loose@uni-due.de, <https://softec.ris.uni-due.de/>

⁴ Stadtentwässerungsbetriebe Köln AöR (StEB Köln), Ostmerheimer Straße 555 51109 Köln, mathias.brune@steb-koeln.de

⁵ Bergische Universität Wuppertal, Gaußstraße 20, 42119 Wuppertal

der kritischen Infrastruktur sind und ihre primäre Aufgabe in der sicheren und regelkonformen Abwasserbehandlung liegt. Eine Nutzung energiewirtschaftlicher Flexibilität kann daher nur im Rahmen klar definierter betrieblicher Grenzen und unter Wahrung der Prozessstabilität erfolgen.

Die zentralen Bestandteile des Projekts FlexAqua sind die Entwicklung eines integrierten Ansatzes aus Prognosemodellen, Energiesystemmodellen und einem darauf aufbauenden Assistenzsystems. Prognosemodelle verarbeiten externe Einflussgrößen wie Wetterprognosen sowie interne betrieblichen Zustands- und Randgrößen und leiten daraus zeitlich aufgelöste Vorhersagen für Prozessgrößen, Lasten und Eigenerzeugung ab. Diese Vorhersagen und die Einflussgrößen selbst dienen anschließend als Eingangsdaten für detaillierte Energiesystemmodelle, welche die technischen Eigenschaften und betrieblichen Randbedingungen der relevanten Betriebsmittel berücksichtigen und daraus die zulässigen Flexibilitätsräume ableiten. Auf dieser Grundlage soll im Projekt Assistenzsystem entstehen, das die operative Betriebsführung unterstützt, indem es ökonomisch oder ökologisch optimierte Betriebsoptionen transparent darstellt. Sowohl Prognosen als auch Modelle sind dabei bewusst als adaptive Systeme ausgelegt, die Unsicherheiten berücksichtigen und durch kontinuierliche Rückkopplung mit realen Betriebsdaten fortlaufend angepasst werden.

Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die konzeptionellen Grundlagen des Projekts FlexAqua und ordnet den gewählten Ansatz in die bestehende Forschungslandschaft ein. Der Fokus liegt auf der Darstellung der methodischen Herangehensweise, der identifizierten Herausforderungen sowie der zugrundeliegenden Annahmen zur Nutzung von Flexibilität im Kläranlagenbetrieb.

2 Hintergrund

Kapitel 2 erläutert die fachlichen Grundlagen für das Projekt FlexAqua. Zunächst wird in Abschnitt 2.1 der Begriff der Flexibilität im energiewirtschaftlichen Kontext eingeordnet und seine Bedeutung für ein zunehmend erneuerbar geprägtes Energiesystem dargestellt. Daran anschließend werden in Abschnitt 2.2 die spezifischen Rahmenbedingungen der Abwasserwirtschaft erläutert, die für die Bewertung, Einordnung und praktische Nutzung von Flexibilität in Kläranlagen von zentraler Bedeutung sind.

2.1 Flexibilität in der Energiewirtschaft

Flexibilität beschreibt in der Energiewirtschaft die Anpassung von Erzeugungs-, Verbrauchs-, und Speichersystemen an veränderte System- oder Marktbedingungen, indem sie ihre elektrische Leistung zeitlich oder in ihrer Höhe variieren [1]. Folglich ist sie als Eigenschaft von Anlagen zu verstehen, die unter geeigneten Rahmenbedingungen wirtschaftlich nutzbar gemacht werden kann. Mit dem fortschreitenden Rückgang konventioneller, steuerbarer Kraftwerke und dem gleichzeitigen Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien gewinnt Flexibilität eine zentrale Bedeutung für die Aufrechterhaltung der Netzstabilität und den Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch [2].

Der steigende Bedarf an Flexibilität ergibt sich dabei aus den Anforderungen an ein stabiles und zuverlässiges Energiesystem unter veränderten Erzeugungsstrukturen. Insbesondere kurzfristige Abweichungen zwischen Prognose und Realisierung erfordern zunehmend

Ausgleichsmechanismen im Intraday-Zeitrahmen [2]. Neben Erzeugungsflexibilität rückt daher die verbrauchsseitige Flexibilität dezentraler Anlagen stärker in den Fokus, da diese einen Beitrag zur Lastverschiebung leisten können, ohne zusätzliche Erzeugungskapazitäten bereitzustellen.

Die wirtschaftliche Nutzung von Flexibilität erfolgt vor allem über kurzfristige Strommärkte wie den Spot- und Intraday-Handel sowie über Systemdienstleistungen am Regenergiemarkt. Der erzielbare Mehrwert ist dabei stark abhängig von der Preisvolatilität, den jeweiligen Marktbedingungen und der Zuverlässigkeit von Prognosen [3].

Vor diesem Hintergrund gewinnen technische Infrastrukturen mit primärer Versorgungsaufgabe, die bereits heute variable Betriebsweisen aufweisen, an Bedeutung. Sie bieten die Möglichkeit Flexibilität nicht als isolierte Betriebsoption, sondern als integralen Bestandteil eines energieadaptiven Anlagenbetriebs zu betrachten. Diese Perspektive bildet die Grundlage für die im Projekt FlexAqua zu untersuchende Einbindung wasserwirtschaftlicher Infrastrukturen in energiewirtschaftliche Fragestellungen.

2.2 Besonderheiten der Abwasserwirtschaft

Kläranlagen gehören zu den größten kommunalen Energieverbrauchern in Deutschland [4]. Sie besitzen ein erhebliches Potential flexibel auf Energieangebot und -nachfrage zu reagieren und damit aktiv zur Energiewende beizutragen. Die Belastung von Kläranlagen unterliegt Schwankungen, die sowohl durch den täglichen Nutzungsrhythmus von Haushalten, Gewerbe und Industrie als auch durch variable Zuläufe in Mischwasserkanalisationen bedingt sind. Kläranlagen sind technisch so ausgelegt, dass sie diese Schwankungen in Menge und Qualität des Abwassers ausgleichen können. Diese Fähigkeit zur Prozessflexibilität lässt sich auch energetisch nutzen.

Hinzu kommt, dass Kläranlagen ihre Energie häufig weitestgehend autark selbst erzeugen - oft sogar im Überschuss. Der dafür verantwortliche Hauptenergieträger ist das Faulgas, das in der Faulung aus dem aus den biologischen Prozessen abgezogenen Schlamm entsteht. Dieses kann gespeichert und bedarfsgerecht mit Hilfe von Blockheizkraftwerken (BHKW) verstromt werden. Auch die dabei entstehende Wärme kann gespeichert und danach selbst genutzt sowie Überschüsse abgegeben werden.

Die Intensität der biologischen Reinigung kann durch Durchflussänderungen oder Einsatz der Luftmenge für den biologischen Prozess angepasst werden. Diese Bereitstellung von Prozessluft für die biologischen Stufen ist der Hauptstromverbraucher auf einer Kläranlage [4].

Darüber hinaus ergeben sich im Projekt auch anlagenspezifische Flexibilitätsoptionen, wenn man das Versuchsobjekt, das Großklärwerk Köln Stammheim (GKW) der Stadtentwässerungsbetriebe Köln (StEB Köln) betrachtet. Die Dachflächen sowie Flächen auf überbauten Prozessen werden für die Installation von Photovoltaikanlagen genutzt und kurz- sowie mittelfristig weiter ausgebaut. Perspektivisch ist zudem die Ergänzung um eine Windkraftanlage vorgesehen. Die zunehmende Eigenerzeugung aus erneuerbaren Energien erweitern die Freiheitsgrade der BHKWs, da deren Einsatz zeitlich stärker von der momentanen Stromnachfrage entkoppelt werden kann. Dadurch ergeben sich zusätzliche Flexibilitätsoptionen, insbesondere durch eine optimierte Nutzung des Biogasspeichers,

dessen Fahrweise im Rahmen einer flexiblen Betriebsstrategie variabler gestaltet werden kann. Darüber hinaus ergeben sich weitere sektorengekoppelte Flexibilitätsoptionen durch die vorhandene Biogasaufbereitungs- und Einspeiseanlage sowie die Auskopplung von Wärme in ein Nahwärmenetz.

Das primäre Ziel der Abwasserbehandlung ist die sichere und regelkonforme Reinigung des Abwassers. Alle weiteren Zielsetzungen, insbesondere energetische oder ökonomische, sind diesem Ziel untergeordnet. Eingriffe in biologische Reinigungsprozesse zur Nutzung energetischer Flexibilität sind daher nur innerhalb klar definierter betrieblicher Grenzen zulässig. Eine Beeinträchtigung der Ablaufqualität kann zu Verstößen gegen wasserrechtliche Vorgaben und zu erheblichen wirtschaftlichen Konsequenzen führen und ist daher auszuschließen

In der bisherigen Forschungslandschaft finden sich mehrere Arbeiten und Projekte, welche sich mit der Flexibilität innerhalb von Kläranlagen und deren potenzieller Rolle im Energiesystem befassen, jedoch andere Schwerpunkte setzen als das Projekt FlexAqua. Im Projekt ARRIVEE wurden kommunale Kläranlagen als Bestandteile intelligenter Verteilnetze untersucht, wobei insbesondere die Nutzung von Blockheizkraftwerken und Gasspeichern sowie konzeptionelle Ansätze zur netzdienlichen Einbindung im Vordergrund standen [5]. Die betrachteten Flexibilitätsoptionen nutzten dabei überwiegend planungs- und simulationsbasierte Methoden und zielten auf eine strukturelle Bewertung vorhandener Potenziale ab. Das Projekt FLXsynErgy befasst sich ebenfalls mit der energetischen Optimierung von Kläranlagen, insbesondere durch die flexible Nutzung biogener Energieträger [6]. FlexAqua erweitert hingegen bestehende Energiemanagementansätze zur Optimierung der Eigenstromnutzung um eine adaptive, systemdienliche Flexibilitätsnutzung im operativen Anlagenbetrieb. Durch die Kombination aus Machine-Learning-gestützten Prognosemodellen, detaillierter Energiesystemmodellierung und einer engen Anbindung an den operativen Betrieb wird die zeitliche Nutzbarkeit von Flexibilität kontinuierlich angepasst und unter realen betrieblichen Randbedingungen bewertet.

3 Konzept und Methodik des Projekts

Der vorliegende Abschnitt erläutert die Einzelbestandteile des ganzheitlichen FlexAqua-Ansatzes zur Steuerung des Großklärwerks Köln-Stammheim. Dieser umfasst jedoch nicht ausschließlich informationstechnologische Aspekte. Vielmehr liegen die Anforderungen des Projekts gleichzeitig in organisatorischen wie auch strukturellen Fragestellungen, die hier adressiert und berücksichtigt werden müssen und in Abschnitt 4 detailliert ausgeführt werden.

3.1 Gesamtarchitektur

Ein Blick auf die Gesamtarchitektur, wie in Abbildung 1 dargestellt, vermittelt einen ersten Eindruck zu den Herausforderungen. Im IT-technologischen Zentrum stehen zunächst Modell- und Aggregationsbildung sowie die Entwicklung einer oder mehrerer Strategien zur Steuerung der beteiligten technischen Systeme und somit zur Steuerung von Energieerzeugung und -verbrauch. Die Modelbildung verfolgt dabei das Ziel digitale Abbilder der beteiligten Systeme zu erstellen, die im weiteren Verlauf als Basis für Optimierung und

Echtzeitsteuerung genutzt werden können. Die Grundlage und die Gleichartigkeit der Modellstrukturen, die durch das Energie-Optionsmodell [7] vorgegeben wird, ermöglicht es ferner Aggregationen - also Systeme von Systemen - zu definieren, die einen Systemverbund digital repräsentieren. Im Ergebnis steht somit ein Digitaler Zwilling zu Verfügung, der sowohl planerisch genutzt werden kann als auch für eine echtzeitnahe, modelprädiktive Steuerung.

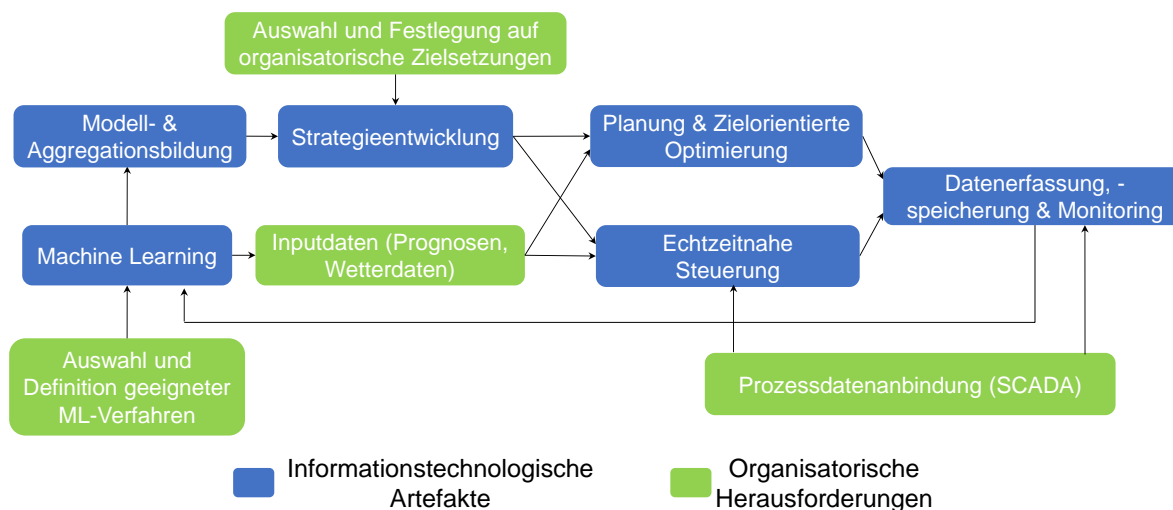


Abbildung 1: Übersicht über die Systemarchitektur des FlexAqua-Ansatzes

Eine zentrale Herausforderung stellt in der Folge die Entwicklung einer oder mehrerer Strategien dar, mit der die Anlage und ihre beteiligten Systeme gesteuert werden sollen. Im Fokus steht dabei die Erreichung unternehmerischer Zielsetzungen, die sowohl ökonomischer als auch ökologischer Natur sein können. Die technische Umsetzung erfolgt durch die Entwicklung von Algorithmen und Optimierungsansätzen zur planerischen oder echtzeitnahen Steuerung der beteiligten Systeme. Hierbei können bereits Prognosen - beispielsweise für Wetter oder Marktpreise - notwendig sein, so dass auf eine entsprechende Wissensbasis zurückgegriffen werden muss. Das Ergebnis der Planung ist ein Fahrplan, der zur Steuerung der Systeme verwendet werden kann. Die Umsetzung vorgefertigter Ergebnisfahrpläne erfolgt im Rahmen einer echtzeitnahen Steuerung. Dabei ist ein kontinuierliches Monitoring des tatsächlichen Anlagenverhaltens erforderlich, um Abweichungen von der Planung festzustellen und gegebenenfalls darauf reagieren zu können.

Die hierbei anfallenden Betriebsdaten und die zugehörige Datenspeicherung stellen im weiteren Verlauf die Grundlage für ein betriebliches Machine Learning (ML) zur Verfügung, das als sog. ML-Plattform für unterschiedliche Aufgaben genutzt werden soll. Neben manuellen Auswertungen sollen hierauf basierend unterschiedliche und aufgabenspezifische ML-Verfahren zum Einsatz gebracht werden können. Beispielsweise sollten sich Prognosen für den Abwasserzulauf o.ä. entwickeln lassen. Ferner sollten aber auch Auswertungen vorgenommen werden können, um das Verhalten einzelner Systeme des Klärwerks in den vorab beschriebenen Systemmodellen besser abzubilden und so die Modellqualität für Planung und Echtzeitsteuerung zu verbessern.

3.2 Modellbildung

Die Modellbildung in FlexAqua dient der strukturierten Beschreibung und Bewertung komplexer energietechnischer Anlagen und ihrer Komponenten. Ziel ist es, reale physikalische Systeme so zu abstrahieren, dass sie sowohl für Simulationen als auch für Planungs- und Optimierungsprozesse geeignet sind. Dabei wird ein systemzentrierter, modularer Ansatz verfolgt, nämlich das Energy Option Model (EOM) [7]. Das EOM beschreibt ein technisches System anhand folgender klar definierter Modellbestandteile: statische Parameter, Messgrößen, Sollwerte sowie Energie- und Güterflüsse. Diese Trennung ermöglicht eine konsistente und wiederverwendbare Modellierung einzelner Komponenten sowie deren Aggregation zu übergeordneten Systemverbänden.

Das dynamische Systemverhalten wird im EOM zustandsbasiert beschrieben. Systemzustände und deren zeitliche Abfolge werden als gerichteter Graph modelliert, wobei die Energie- und Güterflüsse je nach Anwendungsfall konstant, empirisch oder berechnungsbasiert beschrieben werden können. Dadurch entsteht ein bewusster Kompromiss zwischen physikalischer Detailtiefe und rechnerischer Effizienz.

Durch die Möglichkeit, einzelne Systeme zu aggregieren und unterschiedliche Bewertungs- und Optimierungsstrategien anzuwenden, bildet das EOM die Grundlage für simulationsbasierte Analysen sowie für entscheidungsunterstützende Anwendungen in FlexAqua. Die Modellbildung ermöglicht somit eine skalierbare, energieträgerübergreifende Betrachtung von Anlagen und deren Flexibilitätspotenzialen

3.3 Optimierungs- und Steuerungskonzept

Die beschriebenen Systemmodelle und Modell-Aggregationen bilden die Grundlage für das Optimierungs- und Steuerungskonzept, das in FlexAqua implementiert und mit einem Labormuster eines Leitwartenassistenzsystems praxisnah erprobt werden soll. Dieses Konzept ist grundsätzlich zweigeteilt. Es umfasst sowohl die Optimierung und Planung des Anlagenbetriebs im Voraus als auch die konkrete Umsetzung der Planung im laufenden Betrieb.

Die Grundlage für die Planungsphase bilden die Beschriebenen Systemmodelle, sowie Prognosen über relevante Eingangsdaten. Dies können beispielsweise Wetter- oder Marktpreisprognosen oder auch Annahmen über zu erwartende Abwassermenge sein. Auf dieser Basis wird ein Plan ermittelt, um den Anlagenbetrieb unter den gegebenen Bedingungen hinsichtlich definierter Zielkriterien zu optimieren. Zielkriterien können beispielsweise die Minimierung von Kosten oder Emissionen oder die Maximierung der Energie-Autarkie sein.

Dazu können im Kontext des EOM zunächst Einzelfall-spezifisch implementierte, sogenannte „Evaluationsstrategien“ zum Einsatz kommen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, auf Grundlage der Modelle eine mathematische Beschreibung eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems weitgehend automatisiert zu erzeugen. Für diese Problem-Klasse existieren etablierte Solver, die über eine standardisierte Schnittstelle eingebunden werden können. In beiden Fällen ist das Ergebnis ein „Fahrplan“, der das geplante Anlagenverhalten inklusive am System vorzunehmender Sollwert-Vorgaben detailliert beschreibt.

Dieser Fahrplan bildet die Basis für den zweiten Aspekt, die Umsetzung der Planung im laufenden Betrieb. In FlexAqua soll hierzu ein Labormuster eines Assistenzsystems entstehen, das in der Leitwarte Vorschläge für den Betrieb der Anlage macht. Prinzipiell ist auch eine vollautomatisierte Umsetzung denkbar, dies setzt aber natürlich eine umfassende Verifizierung des Systems voraus.

Während der Umsetzung muss das reale Anlagenverhalten kontinuierlich überwacht und mit der ursprünglichen Planung abgeglichen werden, um eventuelle Abweichungen festzustellen. Wenn die Abweichungen zu groß werden, ist gegebenenfalls automatisiert eine Neuplanung unter aktualisierten Bedingungen anzustoßen.

3.4 Prognosen und Machine Learning

Eine wichtige Grundlage für die praktische Nutzbarkeit der beschriebenen Systemmodelle ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Eingangsdaten. Im Bereich der Abwasserreinigung sind hier insbesondere die Menge und Fracht des zu behandelnden Abwassers zu nennen, hinzu kommen beispielsweise Wetterdaten für die erneuerbare Stromerzeugung vor Ort. Für die Erstellung der Modelle und für die wissenschaftliche Untersuchung ausgewählter Szenarien kann mit historischen Daten gearbeitet werden. Beim angestrebten praktischen Einsatz für die Planung des Anlagenbetriebs und als Leitwartenassistent sind jedoch Prognosen zukünftiger Werte zwingend erforderlich. Teilweise kann hier auf externe Datenquellen zurückgegriffen werden, so sind etwa kurzfristige Wetterprognosen in guter Qualität problemlos verfügbar. Dies gilt jedoch nicht für alle relevanten Daten. Im Projekt FlexAqua sollen daher Prognose-Modelle auf Grundlage von ML-Algorithmen in den anlageninternen Bereichen des Abwasserzuflusses, des Energiebedarfs der Klärgasproduktion und der Eigenstromerzeugung, sowie für externe Größen wie Preissignale oder marginale Emissionsfaktoren zur ökonomischen oder ökologischen Optimierung erarbeitet und erprobt werden, um aus vorhandenen internen und externen Daten Prognosen über den weiteren Verlauf relevanter Eingangsgrößen ableiten zu können. Dies erfolgt mit ausreichender Genauigkeit und Verlässlichkeit sowie unter Betrachtung von Unsicherheiten, um als Grundlage für Planungs- und Steuerungsentscheidungen dienen zu können.

Ein weiteres Einsatzfeld für ML ergibt sich im Bereich der Systemmodellierung. Eine theoretische, auf mathematischen Formeln basierende Modellierung kann das Verhalten eines Systems gut abbilden, wird jedoch immer eine Annäherung bleiben. Hinzu kommen Umgebungsaspekte oder Alterungseffekte, die bei theoriebasierter Modellierung schwer zu berücksichtigen sind. In FlexAqua soll daher ein ständiger Abgleich der Modelle mit realen Messdaten erfolgen, um die Qualität der Modelle kontinuierlich zu überwachen. Bei zu großer Abweichung sollen die Modelle mittels ML-Verfahren verbessert und der Realität angenähert werden.

Dabei ist zu beachten, dass das im Projekt zu entwickelnde Labormuster eines Assistenzsystems im realen Betrieb erprobt werden soll, und im Erfolgsfall gegebenenfalls für den produktiven Einsatz weiterentwickelt wird. Folglich sollte auch der Einsatz von ML-Modellen von vornherein den Anforderungen an professionelle, produktive Software-Prozesse genügen. Daher soll im Projekt eine „Lernplattform“ entstehen, die den Anforderungen und Prinzipien des „Machine Learning Operations“ (ML-Ops) entspricht. Dies umfasst neben der Erhebung und Aufbereitung der Trainingsdaten und dem eigentlichen

Training der Modelle auch deren anschließende Bereitstellung als produktiv nutzbare Software-Artefakte. Hinzu kommen das Monitoring der Modelle im Betrieb, sowie im Bedarfsfall deren Aktualisierung durch erneutes Training und anschließende Software-Updates. Dies soll im Projekt FlexAqua prototypisch umgesetzt werden, unter Einhaltung der Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen der StEB Köln als Betrieb der öffentlichen Daseinsvorsorge und Betreiber kritischer Infrastruktur.

3.5 IT/OT- Integration und Dateninfrastruktur

Ziel des Projekts FlexAqua ist die Integration eines Assistenzsystems in die bestehende IT-OT-Infrastruktur des Großklärwerks Köln Stammheim, ohne die etablierte Rolle des Prozessleitsystems als führende Instanz des Anlagenbetriebs zu verändern. Das Assistenzsystem ist dabei nicht als eigenständige Steuerung konzipiert, sondern als unterstützende Instanz, die auf Basis prognose- und modellgestützter Optimierung Vorschläge für eine angepasste Betriebsweise generiert und diese der Prozessführung auf der Leitwarte zur Freigabe bereitstellt. Abbildung 2 zeigt schematisch die geplante Integration sowie wesentliche Datenflüsse innerhalb der IT/OT-Umgebung des Großklärwerks. Zentrales Element ist ein Plant-Assist-Server, der als Schnittstelle zwischen dem Prozessleitsystem, weiteren internen Systemen, dem Plant-Assist-User-Interface und die Lernplattform, sowie externen Datenquellen wie Wetterdiensten, fungiert.

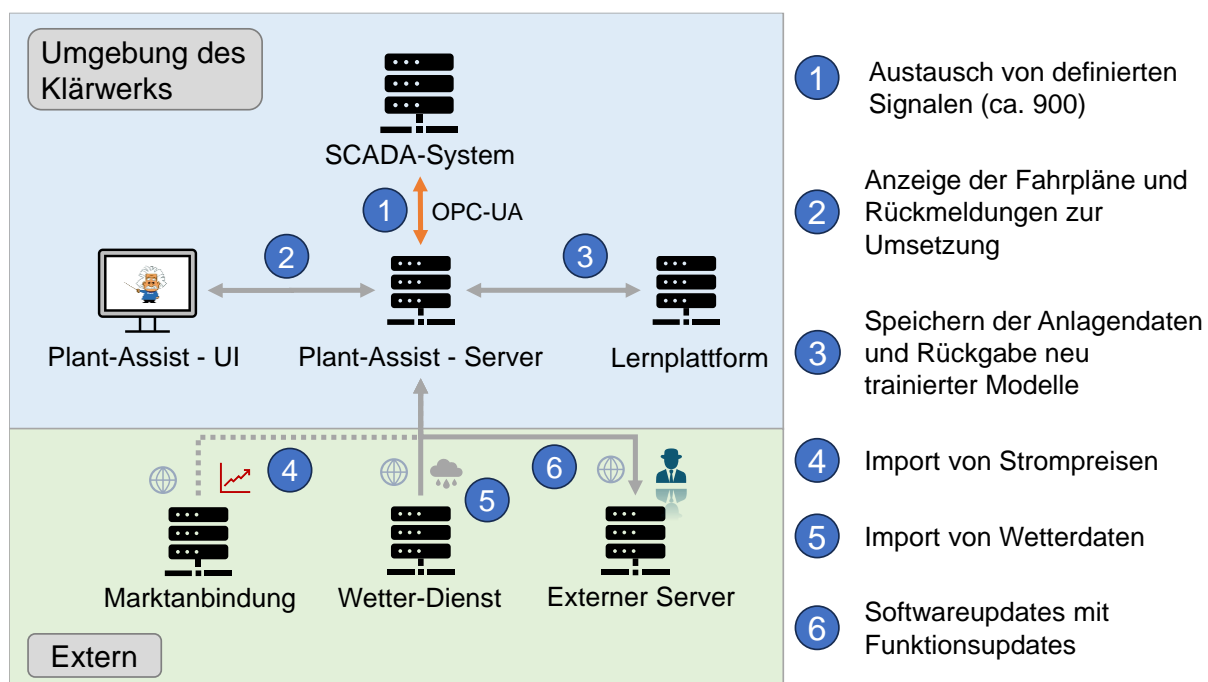


Abbildung 2: Schematische Darstellung der geplanten Integration des Assistenzsystems in die SCADA-Umgebung des Klärwerks

4 Herausforderungen

Die Umsetzung flexibler Betriebsstrategien in kommunalen Kläranlagen stellt ein komplexes Vorhaben dar, welches weit über rein technische Fragestellungen hinausgeht. Obwohl Kläranlagen grundsätzlich über relevante Flexibilitätspotenziale verfügen [5,6], zeigt sich in der praktischen Umsetzung, dass deren systemdienliche Nutzung durch eine Vielzahl

technischer, organisatorischer und energiewirtschaftlicher Rahmenbedingungen begrenzt ist. Im Rahmen des Projekts FlexAqua werden diese Herausforderungen explizit adressiert, um realistische Aussagen über die Umsetzbarkeit und Skalierbarkeit entsprechender Konzepte treffen zu können.

Aus technischer Sicht besteht eine zentrale Herausforderung im Spannungsfeld zwischen Prozessstabilität und Flexibilität. Abwasserbehandlungsprozesse sind durch biologische und chemische Zusammenhänge geprägt, die nur eingeschränkt kurzfristig beeinflussbar sind. Insbesondere biologische Reinigungsstufen reagieren zeitverzögert auf Änderungen der Betriebsweise, weisen nichtlineare Dynamiken auf und unterliegen saisonalen Einflüssen. Flexibilitätsmaßnahmen, welche primär an energiewirtschaftlichen Signalen ausgerichtet sind, dürfen jedoch die Einhaltung der Ablaufqualität nicht gefährden. Dies erfordert eine sorgfältige Abwägung zwischen energetischer Optimierung und prozesstechnischer Sicherheit.

Eng damit verknüpft ist die Herausforderung der Modellgenauigkeit. Für eine vorausschauende Planung und optimierte Fahrweise der Anlage sind Modelle erforderlich, die das dynamische Verhalten zentraler Betriebsmittel und Prozessgrößen realitätsnah abbilden. Ungenauigkeiten in der Modellierung sowie Abweichungen aufgrund von Änderung der Prozesseigenschaften über der Zeit wirken sich unmittelbar auf die berechneten Fahrpläne aus und können zu ineffizienten oder potenziell kritischen Betriebspunkten führen.

Weitere technische Restriktionen ergeben sich auf den Grenzen der eingesetzten Betriebsmittel. Pumpen, Verdichter, Rührwerke und weitere Aggregate unterliegen mechanischen und wartungsbedingten Einschränkungen. Häufige Lastwechsel oder der Betrieb außerhalb etablierter Kennfelder können die Lebensdauer der Komponenten reduzieren und den Instandhaltungsaufwand erhöhen. Flexibilitätsstrategien müssen diese Aspekte berücksichtigen, um eine nachhaltige und betrieblich akzeptable Nutzung zu gewährleisten.

Die Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Systeme stellt eine weitere technische Herausforderung dar. Prognosen, Optimierung und Regelentscheidungen müssen innerhalb enger zeitlicher Grenzen erfolgen, um auf kurzfristige Markt- oder Netzsignale reagieren zu können. Verzögerungen durch Datenübertragung, Modellberechnungen oder Steuerentscheidungen reduzieren den nutzbaren Flexibilitätsgrad und schränken die praktische Anwendbarkeit ein.

Neben den technischen Aspekten spielen organisatorische und betriebliche Herausforderungen ebenfalls eine entscheidende Rolle. Die Umsetzung des Assistenzsystems muss auf der Ebene des Prozessleitsystems erfolgen, da hier die relevanten Zustandsdaten zusammenlaufen und operative Eingriffe stattfinden. Prozessleitsysteme in Kläranlagen sind jedoch stark reglementiert und bewusst abgeschirmt. Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von 500.000 Einwohnerwerten (EW), zu denen auch das Großklärwerk Köln Stammheim mit 1,54 Mio. EW zählt, gehören in Deutschland laut BSI-Kritisverordnung (BSI-KritisV, Anlage 2, Teil 3) zur kritischen Infrastruktur. Damit verbunden sind umfangreiche Pflichten und Verantwortungen an einen sicheren Betrieb, insbesondere im Hinblick auf IT-Sicherheit, physischer Sicherheit sowie Notfallpläne. Neuere Gesetzesvorhaben wie das KRITIS-Dachgesetz oder die NIS-2-Richtlinie verschärfen die Anforderungen an die IT-Sicherheit. Des Weiteren unterliegen Kläranlagen strengen

Vorschriften zur Ablaufqualität. Die Integration flexibler Betriebsstrategien erfordert daher eine enge Abstimmung mit bestehenden Betriebsabläufen und Verantwortlichkeiten. Insbesondere automatisierte und teilautomatisierte Eingriffe in den Anlagenbetrieb werfen Fragen nach Zuständigkeiten und Freigabeprozessen auf.

Die Akzeptanz neuer Betriebsstrategien ist eng mit Fragen der Sicherheit und Transparenz verbunden. Assistenzsysteme müssen erklärbar und nachvollziehbar sein, um Vertrauen beim Betriebspersonal zu schaffen. Rein datengetriebene oder schwer interpretierbare Entscheidungen stoßen im betrieblichen Umfeld häufig auf Skepsis. Gleichzeitig zeigen sich Herausforderungen in der Qualität und Verfügbarkeit historischer Betriebsdaten. Diese wurden für die operative Anlagenüberwachung und Dokumentation erhoben und nicht für datengetriebene Analyse- oder Lernverfahren konzipiert. Entsprechend weisen die Datensätze häufig Lücken, Inkonsistenzen oder eine für ML-Anwendungen unzureichende zeitliche und semantische Auflösung auf, was die Modellbildung, das Training sowie deren Validierung erschwert.

Ein weiterer zentraler Aspekt ist die Qualifikation und Einbindung der Anwender. Die erfolgreiche Nutzung flexibler Betriebsstrategien setzt voraus, dass das Betriebspersonal die zugrundeliegenden Konzepte versteht und in der Lage ist, die vorgeschlagenen Maßnahmen einzuordnen und zu bewerten. Schulung und Kommunikation sind daher wesentlicher Bestandteil der Umsetzung einer flexiblen Betriebsweise.

Auf energiewirtschaftlicher Ebene ergeben sich zusätzliche Herausforderungen durch Preisvolatilität, Prognoseunsicherheiten und regulatorische Rahmenbedingungen. Wirtschaftlicher Mehrwert durch Flexibilitätsbereitstellung entsteht nur bei ausreichender Volatilität der Strompreise, insbesondere in kurzfristigen Märkten. Gleichzeitig können Prognosefehler bei Preisen, Lasten oder Eigenerzeugung die erwarteten Erlöse erheblich reduzieren. Darüber hinaus sind die bestehenden Vermarktungslogiken und regulatorischen Vorgaben häufig auf klassische Erzeuger ausgelegt. Die Einbindung flexibler Verbraucher aus der kommunalen Infrastruktur erfordert daher eine sorgfältige Analyse der Marktmechanismen und rechtlichen Rahmenbedingungen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Nutzung von Flexibilität in Abwasserbehandlungsanlagen ein interdisziplinäres Problem darstellt, bei dem technische, organisatorische und energiewirtschaftliche Aspekte eng miteinander verknüpft sind. Die systematische Identifikation und Analyse dieser Herausforderungen bildet eine wesentliche Grundlage für die weitere Entwicklung und Bewertung energieadaptiver Betriebsstrategien im Rahmen des Projekts FlexAqua.

5 Erste Erkenntnisse

Zur Bewertung des Potenzials prognosebasierter Betriebsstrategien wurde ein vereinfachter Anlagenverbund modelliert, bestehend aus dem Abwasserreinigungsprozess, modelliert über aggregierte Energie- und Stoffflüsse, einem aggregierten Blockheizkraftwerk (BHKW), das vier reale BHKWs mit deren gesamter installierter Leistung repräsentiert, einem Biogasspeicher, einer Biogasaufbereitungsanlage, einer Photovoltaikanlage sowie den Anbindungen an das Strom- und Gasnetz. Technische Restriktionen wie Speicher- und Leistungsgrenzen wurden berücksichtigt. Exemplarisch wurde eine Winterwoche mit

erhöhtem Stromverbrauch infolge hoher Niederschlagsintensität und geringer PV-Erzeugung untersucht. Reale Betriebsdaten dieser Woche, insbesondere elektrischer Anlagenbedarf, Biogasproduktion, PV-Erzeugung und initialer Speicherfüllstand, dienten als Referenz und wurden im Simulationsszenario als verfügbare ideale Prognosen angenommen.

Der reale Anlagenbetrieb folgte einer regelbasierten Strategie mit kurzfristiger Optimierung: Die BHKW-Erzeugung orientierte sich am momentanen Strombedarf sowie am aktuellen Füllstand des Biogasspeichers. Überschüssiges Biogas wurde frühzeitig verstromt, sodass während einer späteren Lastspitze ein Strombezug aus dem Netz über mehr als zehn Stunden erforderlich wurde. Im simulierten Szenario wurde eine vorausschauende Betriebsstrategie angewendet, die auf den angenommenen Prognosen basierte und zukünftige Lastentwicklungen berücksichtigte. Aufgrund des deutlich höheren Arbeitspreises für den Strombezug im Vergleich zur Einspeisung wurde dieser im Optimierungsansatz stärker gewichtet. Dadurch wurde Biogas gezielt gespeichert und in Phasen hoher Stromnachfrage eingesetzt. Der Zeitraum mit Strombezug aus dem Netz konnte gegenüber dem realen Betrieb beim Regenereignis um knapp 40 % reduziert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine modellbasierte, vorausschauende Betriebsführung unter idealisierten Prognoseannahmen zu einer effizienteren Nutzung der vorhandenen Energieressourcen führt. Durch die integrale Berücksichtigung technischer Flexibilitäten und ökonomischer Randbedingungen wird ein wirtschaftlich optimierter Betriebsmodus erreicht. Der dargestellte modulare Ansatz, bestehend aus technischen Systemmodellen, prognostizierten Eingangsgrößen, optimierungsbasierter Entscheidungslogik, kontinuierlicher Datenerfassung und Modellanpassung eignet sich grundsätzlich als übergeordnete Betriebsführungsstrategie für vernetzte Anlagenverbünde und kann auf unterschiedliche Anlagenteile skaliert angewendet werden.

6 Fazit und Ausblick

Der Beitrag zeigt, dass kommunale Kläranlagen aufgrund ihrer prozessualen und energetischen Eigenschaften grundsätzlich geeignet sind, als flexible Akteure im Energiesystem zu agieren. Am Beispiel des Projekts FlexAqua wurde ein integrierter Ansatz vorgestellt, der Prognosemodelle, Energiesystemmodellierung und ein assistenzgestütztes Steuerungskonzept kombiniert, um Flexibilität unter realen betrieblichen Bedingungen nutzbar zu machen.

Die konzeptionelle Einbindung in die bestehende IT/OT-Infrastruktur sowie die explizite Berücksichtigung von Prozessstabilität, Anlagenrestriktionen und organisatorischen Anforderungen verdeutlichen, dass Flexibilitätsnutzung in der Abwasserwirtschaft nur als holistische Aufgabe verstanden werden kann. Erste Simulationsergebnisse zeigen, dass eine vorausschauende, modellbasierte Betriebsführung zu einer effizienteren Nutzung vorhandener Energieressourcen führen kann.

Gleichzeitig wird deutlich, dass der praktische Einsatz prognosebasierter und optimierungsgetriebener Betriebsstrategien an eine Vielzahl technischer, organisatorischer und energiewirtschaftlicher Voraussetzungen geknüpft ist. Die Überführung konzeptioneller Ansätze in den realen Anlagenbetrieb erfordert eine robuste Abbildung der Prozesse mithilfe

dynamischer Systemmodelle, eine verlässliche Daten- und Systemintegration sowie klar definierte Betriebs- und Verantwortungsstrukturen.

Die weiteren Arbeiten im Projekt FlexAqua konzentrieren sich daher auf die schrittweise Erprobung des Assistenzsystems unter realen Betriebsbedingungen, die Bewertung der erzielbaren ökonomischen und ökologischen Effekte sowie die Ableitung übertragbarer Erkenntnisse für vergleichbare wasserwirtschaftliche Infrastrukturen.

Anmerkungen

Die vorliegende Arbeit basiert auf Forschungstätigkeiten im Rahmen des Forschungsprojekts FlexAqua. Das Projekt FlexAqua wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert. Für den Inhalt dieser Veröffentlichung sind ausschließlich die Autoren verantwortlich



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Die Landesregierung
Nordrhein-Westfalen



Literaturverzeichnis

- [1] IEA (2018): *Status of Power System Transformation 2018*, Paris, <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2018>
- [2] Bundesnetzagentur (2017), *Flexibilität im Stromversorgungssystem - Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität*, https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/VerteilerNetz/Flexibilitaet/BNetzA_Flexibilitaetspapier.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- [3] Zöphel, C.; Müller, T. (2016): *Flexibilitätsoptionen am Strommarkt - Eine Analyse zu Hemmnissen und Erlösmöglichkeiten*, 14. Symposium Energieinnovation, Graz, https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2016/files/lf/Session_A3/LF_Zoepfel.pdf
- [4] Umweltbundesamt (2021): *Klimaschutz- und Energieeffizienzpotenziale in der Abwasserwirtschaft – aktueller Stand und Perspektiven*, TEXTE 50/2021, https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/5750/publikationen/2021-04-30_texte_50-2021_klimaschutz_abwasserwirtschaft.pdf
- [5] Schmitt, T. G.; Gretzschel O.; Schäfer, M.; Huesker, F.; Knerr, H.; Salomon, D.; Bidlingmaier, A.; Zdrallek, M.; Kornrumpf, T.; Simon, R.; Hanke, B.; Honeck, V.; Langhausen, T.; Keil, A.; Lentz, K.; Lonetz, S.; Halver, R.; Richtarski, C.; Rock, M.; Kolisch, G.; Pyro, P.; Taudien, Y.; Hobus, I.; Schiebold, D.; Charles, T.; Siebeck, J. (2017): *Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbaren Energieerzeugung – arrivee*, Kaiserslautern
- [6] Hubert, C.; Steiniger, B.; Schaum, C.; Kretzschmar, J.; Winkler, M.; Mauky, E.; Athanasiadis, K.; Henker, J.; Einsiedel, S.; Wallacher, J.; Heinrich, M.; Zimmer, L.; Schwarz, L.; Berger, L.; Mergelmeyer, M. (2024): *Flexible und vollenergetische Nutzung biogener Rest- und Abfallstoffe: Faulungen und Biogasanlagen als Energieverbraucher, -speicher und -erzeuger – Abschlussbericht*

- [7] Derksen, C.; Unland, R. (2016): *The EOM: An adaptive energy option, state and assessment model for open hybrid energy systems*, 2016 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Gdansk, Poland, pp. 1507-1515.