

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

31/10/2023

## Projekttitlel:

Kläranlage intelligent: Sektorkopplungspotential  
durch Digitalisierung aktivieren

Projektnummer: 888473

# Energieforschungsprogramm - 7. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

|                                    |                                                                             |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Ausschreibung                      | 7. Ausschreibung Energieforschungsprogramm                                  |
| Projektstart                       | 01/02/2022                                                                  |
| Projektende                        | 31/07/2023                                                                  |
| Gesamtprojektdauer<br>(in Monaten) | 18 Monate                                                                   |
| ProjektnehmerIn<br>(Institution)   | TU Wien – Institut für Thermodynamik und Energietechnik                     |
| AnsprechpartnerIn                  | Dr. Felix Birkelbach                                                        |
| Postadresse                        | Getreidemarkt 9/E302<br>1060 Wien                                           |
| Telefon                            | +43 1 58801 302336                                                          |
| Fax                                | +43 1 58801 30299                                                           |
| E-mail                             | felix.birkelbach@tuwien.ac.at                                               |
| Website                            | <a href="https://www.tuwien.at/mwbw/iet">https://www.tuwien.at/mwbw/iet</a> |

# Kläranlage intelligent: Sektorkopplungspotential durch Digitalisierung aktivieren

**AutorInnen:**

**TU Wien**

Dr. Felix Birkelbach

DI<sup>in</sup> Carlotta Tubeuf

DI Stefan Haider

Prof. René Hofmann

**AEE INTEC**

DI Wolfgang Gruber-Glatzl

DI<sup>in</sup> Jasmin Pfleger

Dr. Wolfgang Weiß

Ekanki Sharma MSc

DI Jürgen Fluch

## Inhaltsverzeichnis

|     |                                                                      |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1   | Einleitung.....                                                      | 5  |
| 2   | Inhaltliche Darstellung .....                                        | 7  |
| 2.1 | Stand der Technik und Interviews mit Kläranlagenbetreiber:innen..... | 7  |
| 2.2 | Das digitale Zwillingskonzept.....                                   | 9  |
| 2.3 | Techno-ökonomische Analyse .....                                     | 11 |
| 3   | Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....                              | 14 |
| 4   | Ausblick und Empfehlungen .....                                      | 15 |
| 5   | Literaturverzeichnis.....                                            | 15 |
| 6   | Kontaktdaten.....                                                    | 16 |

## 1 Einleitung

Laut Schätzungen der Vereinten Nationen [1] werden bis 2050 zusätzlich 2.5 Milliarden Menschen in Städten und Urbanen Regionen leben. Bestehende Kläranlagen wurden vor Jahren gebaut und werden von den demografischen Entwicklungen massiv unter Druck kommen. Das stellt Kläranlagenbetreiber vor eine Reihe von Herausforderungen. In den letzten Jahren ist die Auslegung von Kläranlagen im Hinblick auf die Wasseraufbereitung, sowie Energierückgewinnung stärker in den Fokus gerückt. Ein wesentlicher Treiber hierfür ist der steigende Energiebedarf für den Betrieb von Kläranlagen: Bis 2040 wird er im Vergleich zu 2010 um 50 % ansteigen [2]. Laut mehreren internationalen Studien [3] macht der Energieverbrauch der städtischen Wasserversorgung mehr als 10 % des nationalen Energieverbrauches aus. Von diesen 10 % werden wiederum etwa 10 % (dh. 1 % des nationalen Energieverbrauches) für die Bereitstellung von Leitungswasser und in Kläranlagen für die Aufbereitung von Abwasser aufgewandt. Der Rest wird für Warmwassererwärmung eingesetzt. Diese Zahlen unterstreichen die Synergie zwischen Energie und der Wasserbereitstellung und -aufbereitung im städtischen Wasserzyklus. Die Möglichkeit Wasserbereitstellung und -aufbereitung ressourcenneutral umzusetzen, wird in der Literatur kritisch diskutiert [4], [5]. Auch, wenn vollständige Ressourcenneutralität nicht realistisch ist, kann die Optimierung des Wasser-Energie-Nexus einen substantziellen Beitrag zu erhöhter Ressourceneffizienz leisten.

Kläranlagen könnten viel nachhaltiger betrieben werden, als es aktuell der Fall ist [6]. Die Extraktion von Wertstoffen aus Abwasser und die Wärmerückgewinnung haben beachtliches Wertschöpfungspotential und können zur Senkung der Betriebskosten sowie zur Erhöhung der Wasserqualität beitragen. Stoffe, die aus Abwasser extrahiert werden können, sind u.a. Zellulose, Bioplastik, Phosphate, Biokohle und Biomasse. Neben der Wärmerückgewinnung ist die Extraktion von Wertstoffen ein weiterer zentraler Sektorkopplungsaspekt.

Die zentrale Herausforderung bei der Realisierung dieser Sektorkopplungspotentiale ist das Fehlen eines umfassenden Steuersystems für Kläranlagen, das in der Lage ist, die benötigten Informationen und Randbedingungen zusammenzuführen und zu verarbeiten. Die Entwicklung eines solchen Steuersystems ist eine komplexe Aufgabe, da die Steuerung auf mehreren Ebenen erfolgen muss. Beginnend auf der Komponentenebene über die Systemebene bis zu Sektorebene müssen alle Prozesse aufeinander abgestimmt werden. Das steht im Widerspruch zum reaktiven Ansatz, der aktuell von den meisten Kläranlagenbetreibern angewandt wird. Sensoren werden meist nur zum Überwachen des Prozesses eingesetzt, um im Fall der Fälle in den Prozess eingreifen zu können.

Softwarelösungen, die Sensordaten vernetzen und eine proaktive Prozesssteuerung ermöglichen, sind sehr gefragt, allerdings noch nicht ausgereift. Ein vielversprechender Ansatz, um diese Anforderungen zu erfüllen ist der Ansatz der digitalen Zwillinge. Einige Produkte, die am digitalen Zwilling-Ansatz basieren sind seit kurzem verfügbar. Allerdings konzentrieren sich diese ausschließlich auf die Optimierung der Prozesse in der Kläranlage, ohne dabei das Umfeld der Kläranlage zu berücksichtigen. Durch diese Limitierung sind die erwähnten Produkte für die Realisierung des Sektorkopplungspotentials nicht geeignet.

Das Ziel dieser Sondierung ist es, das Potential von digitalen Zwillingen für Kläranlagen und den für eine Umsetzung benötigten Entwicklungsaufwand realistisch abzuschätzen. Dafür gilt es Fragen auf mehreren Ebenen zu klären:

- Analyse der Prozesse in Kläranlagen

- Identifikation des Sektorkopplungspotentials von Kläranlagen
- Datenanalyse für die Implementierung eines digitalen Zwillings
- Identifizieren von geeigneten Modellierungs- und Optimierungsmethoden
- Technologieanalyse für die Implementierung des digitalen Zwillings
- Techno-ökonomische Analyse

Diese Ziele sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

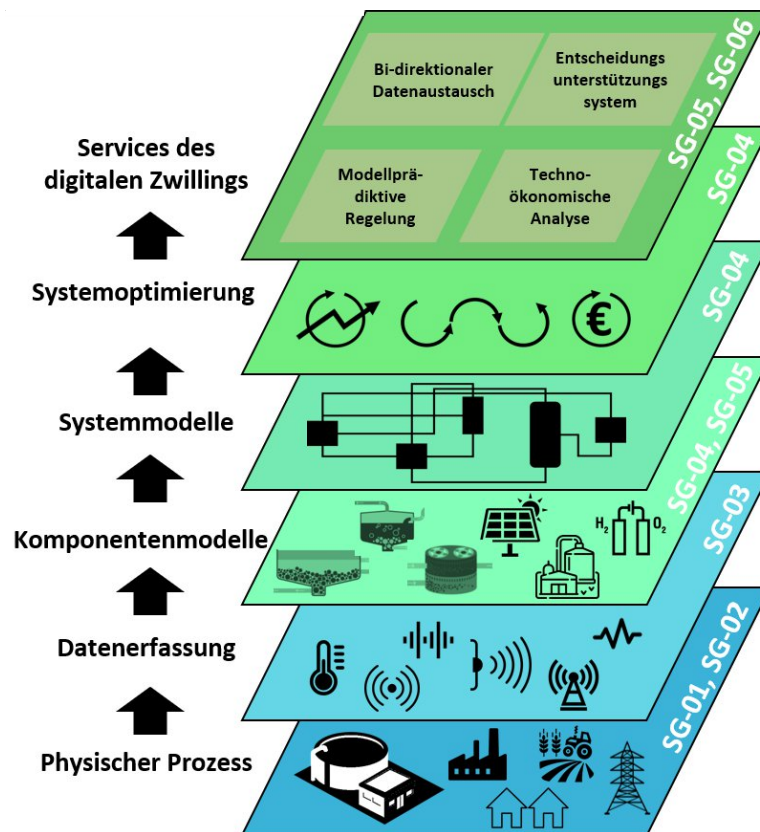


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schichten eines digitalen Zwillings mit den Zielen des gegenständlichen Sondierungsprojektes.

Um diese Ziele des Sondierungsprojektes zu erreichen, wurden verschiedene Methoden eingesetzt. Zum einen wurde eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt, um den Stand der Technik sowohl in Bezug auf Kläranlagentechnologie als auch in Bezug auf digitale-Zwillings-Technologien zu eruieren. Zum Anderen wurden eine Reihe von Interviews mit Kläranlagenbetreiber:innen durchgeführt, um eine realistische Abschätzung der Ausgangslage, Bedürfnisse, Möglichkeiten und Herausforderungen zu erhalten. Basierend auf der Literaturrecherche und den Interviews wurde anschließend ein Konzept für einen digitalen Zwilling einer Kläranlage entworfen, potenzielle Use Cases wurden ebenfalls definiert. Letztendlich wurde eine techno-ökonomische Analyse durchgeführt, um Kosten und Nutzen des Einsatzes von digitalen Zwillingen in Kläranlagen abzuschätzen und gegenüberzustellen.

Das gegenständliche Sondierungsprojekt wurde in der 7. Ausschreibung des Energieforschungsprogramms unter Schwerpunkt 4 „Digitalisierung als Querschnittstechnologie“ und Subthema 4.3 „Künstliche Intelligenz“ eingereicht. Der Betrieb von Kläranlagen birgt großes Optimierungspotential durch Koppelung mit anderen Sektoren. Um dieses Sektorkopplungspotential

nutzen zu können, fehlt es aktuell an einer intelligenten Automatisierungslösung, welche die dafür notwendigen Informationen zusammenführt und verarbeitet. Mit dem digitalen Zwillingsansatz kann diese Lücke geschlossen werden. Das erfolgreiche Schließen dieser Lücke würde einen großen Beitrag zur Energiewende beitragen, da der Energieverbrauch der städtischen Wasserversorgung bis zu 10 % des nationalen Energieverbrauchs ausmacht.

## 2 Inhaltliche Darstellung

Die Entwicklung eines holistischen digitalen-Zwillingskonzeptes, das Abhängigkeiten auch über die Systemgrenzen der konkreten Kläranlage hinaus berücksichtigt und dadurch Sektorkopplungspotentiale offenlegt, ist ein sehr aufwändiges Unterfangen. Auch wenn das Potential von digitalen Zwillingen in Kläranlagen auf den ersten Blick überaus groß ist, ist eine seriöse Abschätzung des realistisch erzielbaren Erfolges unter Berücksichtigung der tatsächlichen Voraussetzungen in Kläranlagen mit dem aktuellen Wissensstand nicht möglich. Im Rahmen dieses Sondierungsprojektes wurde systematisch an der Beantwortung dieser Frage gearbeitet.

### 2.1 Stand der Technik und Interviews mit Kläranlagenbetreiber:innen

Mit verschiedenen Akteur:innen und Kläranlagenbetreiber:innen wurden Interviews von AEE INTEC durchgeführt, welche hauptsächlich im Zeitraum Jänner-August 2022 erfolgten.

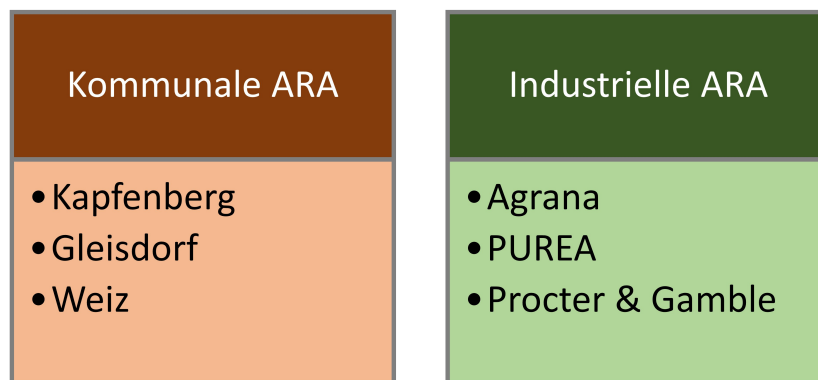


Abbildung 2: Übersicht der interviewten Kläranlagenbetreiber:innen

Hierfür wurde eine Interviewleitfaden entwickelt, welcher verschiedene Aspekte der Digitalisierung und Sektorkopplung abdeckte. Die verschiedenen Teile des Leitfadens werden im Folgenden kurz erläutert und die wichtigsten Aspekte für kommunale und industrielle Kläranlage hervorgehoben:

- **Teil A – Allgemein:**
  - Vor allem die größten Herausforderungen, aber auch Chancen der nächsten 5 bzw. 10 Jahre wurden in diesem Teil besprochen.
  - Kommunale ARA: Bei kommunalen Kläranlagen wurden neue regulatorische Voraussetzungen für Phosphorrückgewinnung thematisiert. Die Chancen einer verstärkten

Sektorkopplung im Wärmebereich (kurzfristig), sowie der Gasbereich (langfristig) mit Strom als lastzuverschiebendes Element wurden ebenfalls behandelt.

- Industrielle ARA: Betreiber industrieller Kläranlagen streben vor allem in Richtung zero-water-discharge. Abwasser-Wärmepumpen sollen zukünftig verstärkt für die interne Wärmeversorgung genutzt werden.

- **Teil B – Technologien:**

- In diesem Punkt wurden essenzielle Technologien und der Forschungsbedarf erhoben.
- Kommunale ARA: Bei kommunalen Kläranlagen sind Technologien zur Phosphor- und Stickstoff-Entfernung bzw. -Rückgewinnung von hohem Interesse. Damit verknüpft sind Themen der Klärschlamm-trocknung und der dazugehörigen Energieversorgung.
- Industrielle ARA: Die Betreiber von industriellen Kläranlagen suchen nach Technologien in der Abwassertechnik, die die Ziele hinsichtlich Energieeffizienz und Wasser-Wiederverwendung unterstützen. Agrana und P&G haben weltweite sehr viele Standorte, hier werden auf Konzernebene Lösungen gesucht, die skalierbar sind.

- **Teil C – Digitalisierung**

- In diesem Teil des Interviews wurden vor allem Potenziale der Digitalisierung besprochen. Wo können fortschrittliche Methoden, wie Digitale Zwillinge, einen Mehrwert zur "einfachen" Automatisierung bieten?
- Kommunale ARA: Mit den Betreibern von kommunalen Kläranlagen werden verschiedene Prozesse herausgearbeitet, für die es im Betrieb viele Erfahrungswerte gibt, exakte Evaluierungen jedoch oft nicht möglich sind. Beispiele sind: die Betriebsweise des Biogas-BHKWs; der Trade-Off Polymer-Qualität vs. Trockensubstanz-Steigerung; die Kostenoptimierung des Lastabwurfs. Ähnliches gilt für Investitionsentscheidungen.
- Industrielle ARA: Digitalisierung hat für alle drei Industriebetriebe einen hohen Stellenwert. Es gibt eigene Abteilungen (P&G), Strategien (Agrana) und Forschungsprojekte (PUREA). Allerdings ist Digitalisierung ein übergeordnetes Thema, das nicht losgelöst für die Kläranlage beantwortet werden kann, sondern den gesamten Betrieb betrifft.

- **Teil D – Datenaufzeichnung**

- Unter diesem Punkt wurden abschließend der Status zur aktuellen Datenaufzeichnungsmethode und mögliche Schnittstellen besprochen.
- Kommunale ARA: Die Kläranlagen in Kapfenberg, Gleisdorf und Weiz haben jeweils Leitsysteme, um den laufenden Betrieb der Kläranlage zu überwachen und zu dokumentieren.
- Industrielle ARA: Die Kläranlagen sind meist in das Leitsystem der Standorte eingebunden. Es gibt die gesetzlich notwendigen Aufzeichnungen auf Tagesbasis, zudem werden Parameter wie Temperaturen und Volumenströme in hoher Zeitaufösung (<1min) aufgezeichnet

## 2.2 Das digitale Zwillingskonzept

Zur Aktivierung des Sektorkopplung-Potentials in Kläranlagen hat sich im Rahmen unserer Recherche die 5D-DigitalTwin Architektur als am besten geeignete Architektur herauskristallisiert. Abbildung 3 zeigt die Zwillingsarchitektur des 5D-DT-Konzeptes nach dem Vorbild von Kasper et al. [7].

Die physische Einheit beschreibt die vorhandenen Komponenten der Anlage in den definierten Systemgrenzen. Dazu zählen auch die Steuerung sowie das Prozessleitsystem. In der virtuellen Einheit befinden sich Modelle, die die Komponenten und deren Prozesse, so genau wie nötig, jedoch aber so einfach wie möglich, beschreiben. Hierbei wird zwischen physischen (white-box), datengetriebenen (black-box) und kombinierten (grey-box) Modellen unterschieden. Die Kommunikationsebene dient zur Verbindung aller Ebenen, um Informationen und Daten auszutauschen. Es gilt darauf hinzuweisen, dass in der gesamten Zwillingsarchitektur ein bidirektionaler Datenaustausch erfolgt. Um einen effizienten Zugriff zu ermöglichen, werden in der Datenebene Sensordaten und Ergebnisdaten aus den Modellen in Datenbanken abgespeichert. Die Serviceebene beinhaltet alle Tasks, die der DT ausführen kann. Darunter fallen beispielsweise Monitoring, Prädikationen, oder auch die Regelungsalgorithmen.

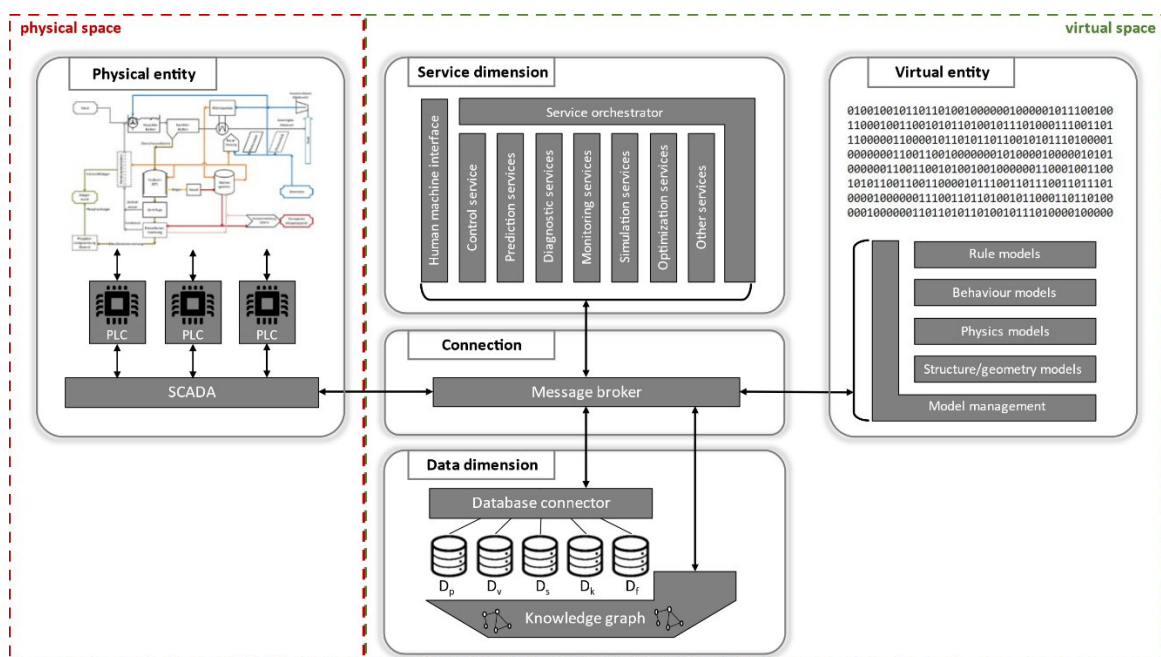


Abbildung 3 Schema der 5D DigiTwin Architektur. CC-BY Kasper et al. [7].

Um das Potential von Sektorkopplung zu realisieren, gilt es alle Energie- und Stoffströme in und um die Kläranlage zu koordinieren. Je nach technischen Gegebenheiten und der geographischen Lage der Kläranlage gilt es zu entscheiden, welche Services am digitalen Zwilling implementiert werden sollen. Schäfer et al. [8] haben die verschiedenen Energie- und Stoffströme in Kläranlagen analysiert und übersichtlich aufbereitet. Diese Übersicht ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Versorgung durch elektrische Energie wird entweder durch erneuerbare Energiequellen oder das Stromnetz gewährleistet. Überschüssiger Strom wird dann entweder in das Stromnetz geleitet, oder für die Erzeugung von Wasserstoff verwendet. Dieser Wasserstoff kommt auf verschiedenste Weisen zum Einsatz. Beispielsweise kann er zwischenzeitlich gespeichert werden und in Phasen eines höheren Strombedarfes

wieder verstromt werden. Die Verwendung im Mobilitätssektor an Tankstellen oder die Einspeisung in ein Wasserstoffnetz sind ebenfalls möglich. Zusätzlich kann Wasserstoff für die Umwandlung von CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub> in CH<sub>4</sub> und H<sub>2</sub>O im Methanisierungs-Prozess verwendet werden. Folgend kann synthetisches Gas hergestellt werden, welches einen Teil des anfallenden Wärme- und Strombedarfes decken kann. Unter Berücksichtigung der bestehenden rechtlichen Rahmenbedingungen, ist die Einspeisung von synthetischem Gas in das Gasnetz ebenfalls möglich. Der bei der Elektrolyse anfallende Sauerstoff kann in den Klärbecken verwendet werden, um die Effizienz der Belüftung zu steigern. Die bei der Elektrolyse, Methanisierung und der Verbrennung von CH<sub>4</sub> entstehende Abwärme kann zur Deckung von Wärmebedarfen verwendet werden, allerdings auch in ein Fern- oder Nahwärmenetz eingespeist werden. Das in der Anlage befindliche Schmutzwasser kann, unter Einhaltung gewisser Grenzen, auch als Speichermedium eingesetzt werden. Zusätzlich können mehrere Kläranlagen gemeinsam am Regelenenergiemarkt teilnehmen und so zur Netzsicherheit beitragen, wobei zusätzliche Einnahmen generiert werden. Um diese hochkomplexe Kopplung ideal zu betreiben, bedarf es neuer Steuerungsansätze, wie dem DigitalTwin-Konzept (DT). Ein weiterer Vorteil, der sich durch die Anwendung des DT einstellt, ist die Emissionsmessung/-berechnung der Kläranlagen, welche in Zukunft durch behördliche Regularien stärker überwacht werden.

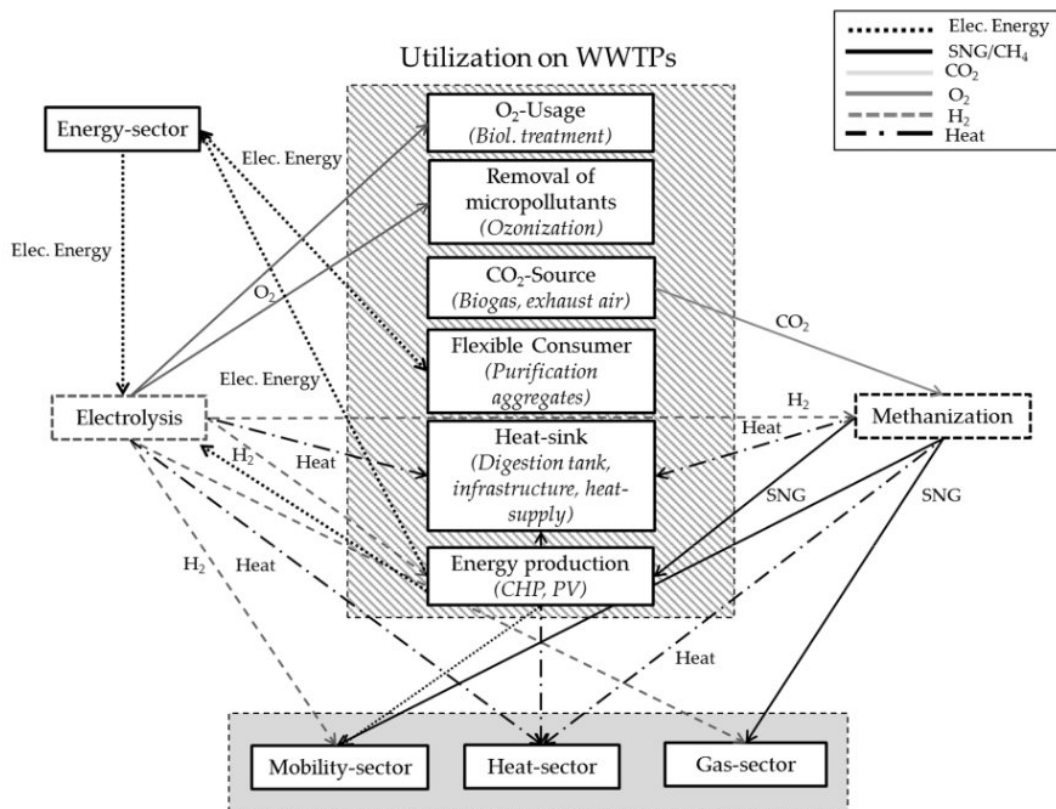


Abbildung 4 Flussschema des Sektorkopplungspotentials einer Kläranlage. CC-BY Schäfer et al.[8].

Aufgrund des geringen Automatisierungs-, und Digitalisierungsgrades in Kläranlagen ist die Implementierung von DT mit hohen Initialkosten verbunden. Bisher gibt es für die spezifischen Komponenten von Kläranlagen außerdem nur wenige bis kaum erprobte Modelle, weshalb viele Neuentwicklungen notwendig sein werden. Aus diesem Grund ist die Umsetzung der virtuellen Einheit mit einem erhöhten Aufwand verbunden. Kläranlagen zählen zur kritischen Infrastruktur, da die

Abwasserbeseitigung unbedingt gewährleistet werden muss. Fehler im Betrieb des DT können zu schwerwiegenden Problemen in der kritischen Infrastruktur führen. Wie bereits angeführt wurde, gibt es auch behördliche Einschränkungen (z.B.: Einspeisung in das Gasnetz), welche im Vorfeld genau geprüft werden müssen. Welche Prozesse im DT berücksichtigt bzw. abgebildet werden, wird anhand der Kopplungsart entschieden. Grundsätzlich wird in thermische, chemische und thermochemische Kopplung unterschieden.

Um die wichtigsten Schlüsselkennzahlen (Key Performance Indicators KPI) für den Betrieb der Kläranlage bestimmen zu können, bedarf es einer Vielzahl an Sensoren. Gewisse Kennzahlen, wie der Energieverbrauch, werden bereits kontinuierlich ermittelt. Für weitere Merkmale ist die kontinuierliche Ermittlung bzw. Messung der benötigten Kennwerte noch nicht möglich. Um bspw. die Abwasserqualität und chemische Zusammensetzung automatisiert zu bestimmen, werden neuartige Sensoren benötigt. Die Entwicklung dieser Sensoren kann, abhängig von Stoßrichtung und Umfang, Teil eines zukünftigen Forschungsprojektes sein. Kurzfristig wird eine Kombination aus marktreifen Sensortechnologien mit spezialisierten Soft-Sensor Services auf der Digitalen Zwillingsplattform erfolgsversprechender sein.

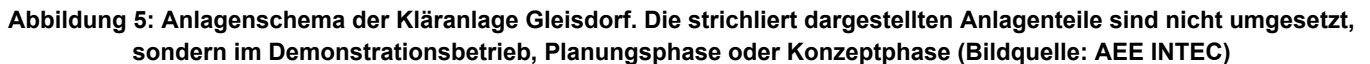
### 2.3 Techno-ökonomische Analyse

Kläranlagen gehören zu den größten Energieverbrauchern in Kommunen und verursachen hohe Betriebskosten. Gleichzeitig produzieren viele Kläranlagen Biogas und haben ein immenses ungenutztes Potenzial für die Integration von Wärmepumpen (WP). Anhand des Fallbeispiels der ARA Gleisdorf sollen aktuelle und innovative Technologien sowie das Potenzial der Sektorkopplung aufgezeigt werden.

Im Vorzeigeregions-Leitprojekt Thermaflex wurde die Umsetzung von zukunftsfähigen Wärmenetzen demonstriert. Die Kläranlage Gleisdorf war hier integraler Bestandteil des Demonstrators in Gleisdorf. Hier wurde eine Sektorkopplung zwischen Fernwärmenetz der Stadtwerke und der Kläranlage erzielt indem in einem langen Stakeholderprozess mögliche Synergien und Vernetzungen evaluiert wurden, was in Abbildung 5 anschaulich dargestellt wird.

Das umgesetzte Konzept umfasst eine 600 kWth Wärmepumpe, die dem Abfluss der Kläranlage (Winter 10 °C, Sommer 20 °C) Wärme entzieht und in einen Wärmespeicher integriert. Ebenso speist ein neuer Biogaskessel ca. 100 kWth Wärme ein. Aus dem Wärmespeicher können ARA-interne Wärmebedarfe gedeckt werden. Vor allem wird über eine 1000m lange Wärmeleitung das Stadtzentrum von Gleisdorf mit Raumwärme versorgt. Gemeinsam mit thermischen Solaranlagen wird dieses System den gesamten Sommerbetrieb übernehmen und als temperaturflexible Bandlast zur Verfügung stehen. Für die Stromversorgung der energieintensiven Kläranlagenprozesse sowie der neuen Wärmepumpen, wurde neben der bestehenden PV-Anlage ein nahes Raab-Kraftwerk revitalisiert und mit Direktstromleitung mit der Kläranlage verbunden. In Planung sind weitere teils innovative und freiflächen-sparende PV-Anlagen.

Dieses Konzept ermöglicht die Bereitstellung von etwa 4.320 MWh thermischer Energie aus Abwasser (als Wärmequelle für eine Wärmepumpe) und zusätzlich etwa 864 MWh aus Biogas, insgesamt ergeben sich daraus etwa 5.200 MWh. Damit wird die vollständige Nutzung des derzeit produzierten, sowie des zukünftig produzierten Biogases gewährleistet. Auf diese Weise wird das Abfackeln von Biogasüberschüssen vermieden und eine jährliche Einsparung von 1.368 Tonnen CO<sub>2</sub> ermöglicht.



Wir betrachten drei Ausbaustufen auf dem Weg zum vollen digitalen Zwilling: Monitoring, Steuerung und Autonomisierung. Zu beachten ist, dass ein Monitoring als erster Schritt zum digitalen Zwilling im Gegensatz zu einem herkömmlichen Monitoring, eine wesentlich höhere Anzahl an Sensoren benötigt, um in Folge genügend Informationen für die Steuerung des Systems zur Verfügung zu haben. Die große Menge an vollumfänglichen Sensoren ist Voraussetzung für Automatisierung, da das Gesamtsystem überwacht werden soll und nicht nur bestimmte Teile, wie in den Vergleichsfällen. Für die zweite Entwicklungsstufe „Steuerung“ erhöhen sich die Personalkosten drastisch, da hier eine Modellierung der einzelnen Anlagenteile notwendig wird, um Vorschläge zum aktuellen Zustand des Systems machen zu können. Da auch spezielle Software benötigt wird, wird hier auch mit höheren Kosten gerechnet. Da die dritte Entwicklungsstufe – der digitale Zwilling – nochmals komplexer ist, ist die Umsetzung im Vergleich nochmals teurer.

Um die Vorteile und Nachteile der verschiedenen Ausbaustufen abzuwägen, wurde eine Kosten-Nutzen-Matrix erstellt (siehe Abbildung 3).

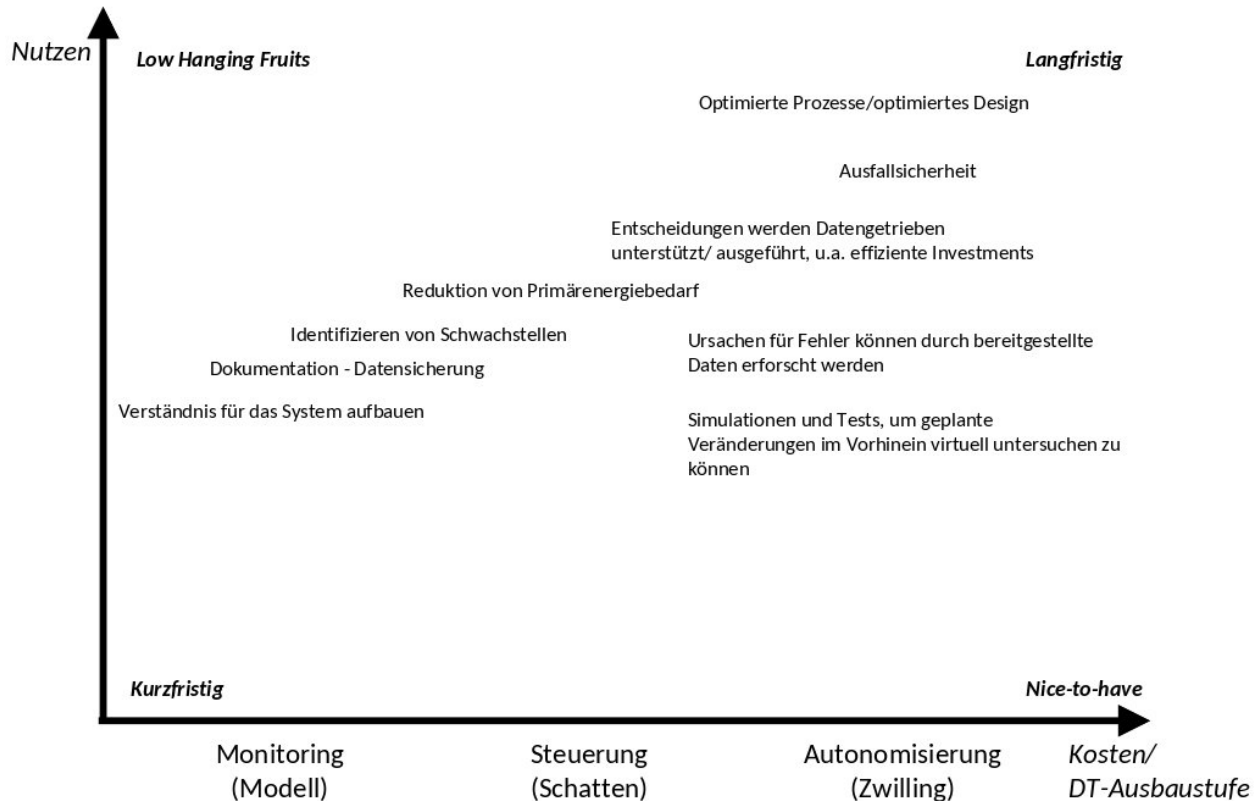


Abbildung 6: Kosten-Nutzen-Matrix der verschiedenen Ausbaustufen eines digitalen Zwillings für Kläranlagen

Wieso die in der Kosten-Nutzen-Matrix gelisteten Nutzen von Vorteil für eine Kläranlage sind, wird im Folgenden erläutert:

- Ein digitaler Zwilling verbessert beispielsweise die *Ausfallsicherheit* von Anlagen durch frühzeitige Erkennung von Anomalien und Simulation von Lösungen. Kontinuierliche Überwachung ermöglicht hier präventive Maßnahmen und effiziente Wartungsplanung, um Ausfallzeiten zu minimieren, was vor allem für Kläranlagen als kritische Infrastruktur eine wichtige Voraussetzung darstellt.
- Die *Dokumentation* im Monitoring führt zu einer Sicherung der Betriebsdaten und diese können z.B. der Erforschung der Ursachen von Fehlern/bestimmten Verhaltens der Anlage dienen.
- In Bezug auf *Energieeffizienz* reduziert der digitale Zwilling den erheblichen Primärenergieaufwand von Kläranlagenprozessen durch Simulation effizienterer Betriebsweisen und kontinuierliche Überwachung zur frühzeitigen Reaktion auf Abweichungen.
- Wie schon bei der Datensicherung erwähnt, wird außerdem das Verständnis komplexer Systeme gefördert, was zu *optimierten Investitionen* führt.
- Durch Hilfe des digitalen Zwillings in Bezug auf Koordination und Automatisierung bei der Umsetzung der *Sektorkopplung* eröffnen sich außerdem *neue Geschäftsfelder* für Kläranlagenbetreiber:innen, sodass über die Kläranlage hinaus eine nachhaltige Nutzung von Energie und Ressourcen möglich wird und sich diese so zu einer Energie- und Ressourcendrehzscheibe entwickeln.

## 3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Unsere Recherche zeigt, dass Kläranlagen viel nachhaltiger betrieben werden könnten, als es aktuell der Fall ist. Die Wärmerückgewinnung und die „Kläranlage als Kraftwerk“ haben beachtliches Wertschöpfungs- und Dekarbonisierungspotential. Energierelevante Verbesserungen betreffen die Maximierung der Biogaserzeugung, die Nutzung der Abwasserenergie durch Wärmepumpen und die Errichtung von Elektrolyse-Anlagen zur Wasserstofferzeugung bei synergetischer Nutzung des Sauerstoffs für die Belüftung. Die Sektorkopplung mit Strom-, Fernwärme- und Gasnetz rückt dadurch unweigerlich in den Fokus.

Die zentrale Herausforderung bei der Realisierung dieser Sektorkopplungspotentiale ist das Fehlen eines umfassenden Steuerungssystems für Kläranlagen, das in der Lage ist, die benötigten Informationen und Randbedingungen zusammenzuführen und zu verarbeiten. Softwarelösungen, die Sensordaten vernetzen und proaktive Prozesssteuerung ermöglichen, wären sehr gefragt, sind aber noch nicht ausgereift. Ein vielversprechender Ansatz, um diese Anforderungen zu erfüllen ist der digitale Zwilling-Ansatz. Einige Produkte, die auf dem digitalen Zwilling-Ansatz basieren, sind seit kurzem verfügbar. Allerdings konzentrieren sich diese ausschließlich auf die Optimierung der Prozesse in der Kläranlage, ohne das Umfeld der Kläranlage zu berücksichtigen. Durch diese Limitierung sind diese Produkte nicht geeignet, das Sektorkopplungspotential von Kläranlagen zu realisieren.

Unser Ansatz ist die ganzheitliche Betrachtung der Kläranlage als Wasser-Energie-Wertstoff Nexus in Kombination mit dem Umfeld der Kläranlage, um Synergieeffekte durch Sektorkopplung zu nutzen (siehe Illustration in Abbildung 7). Dadurch kann die Kläranlage nachhaltiger betrieben werden und zusätzliche Wertschöpfungspotentiale durch Kooperation mit Kommunen und ansässigen Industriebetrieben realisiert werden.

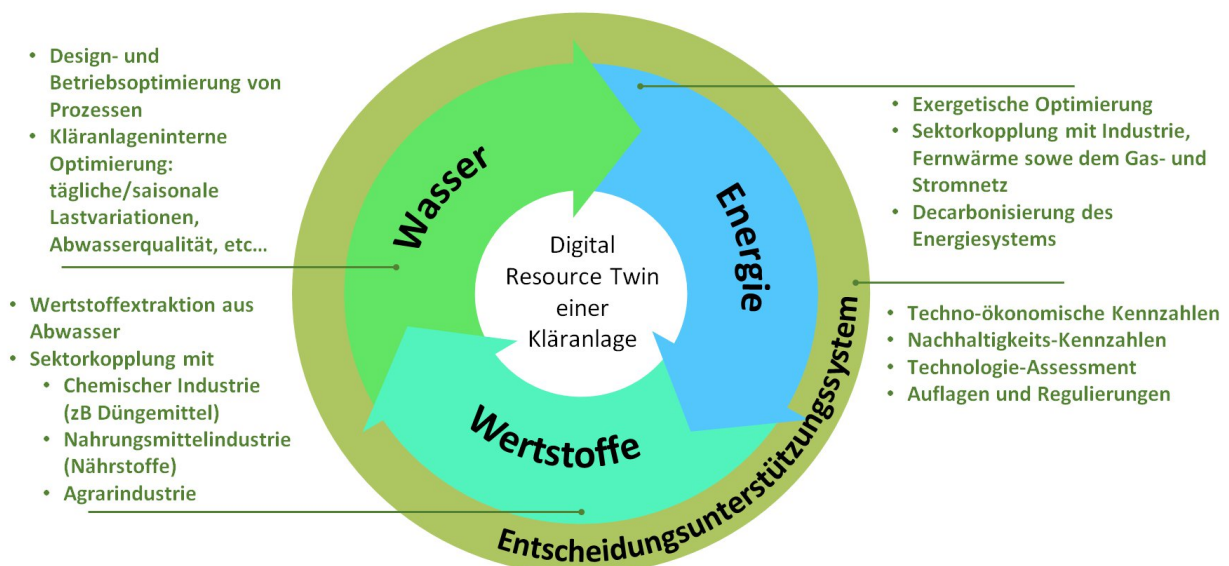


Abbildung 7 Schematische Darstellung des holistischen digitalen Zwillingkonzeptes zur Realisierung des Sektorkopplungspotentials von Kläranlagen

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Aufgrund des großen Energiebedarfs von Kläranlagen und der Tatsache, dass fast jede größere Gemeinde eine eigene Kläranlage betreibt, würde die Entwicklung eines skalierbaren digitalen Zwillingsansatzes für die holistische Optimierung von Kläranlagen zu großen Energie- und Kosteneinsparung führen.

Die interviewten Kläranlagen-Betreiber haben angegeben, vielfältige Herausforderungen im täglichen Betrieb der Kläranlage zu haben. Die Bereiche, in denen ein Digitaler Zwilling helfen kann, wurden in den Interviews identifiziert und passen gut zu den gelisteten Vorteilen eines Digitalen Zwillings.

Das durch die Sektorkopplung und regulatorische Maßnahmen immer komplexer werdende System Abwasserreinigungsanlage, muss in eine Modellierung münden, mit dem Digitalen Zwilling als Endausbaustufe. Damit können Fragestellungen des täglichen Betriebs und von zukunftsweisenden Investitionsentscheidungen sinnvoll beantwortet werden.

Daher wäre es empfehlenswert, ein Forschungsvorhaben anzustreben, dessen Ziel die Entwicklung einer digitalen Zwillingsplattform ist, die geeignet ist, die Kläranlage unter Berücksichtigung ihres Umfelds im Sinne der Sektorkopplung ganzheitlich zu optimieren. Durch den Einsatz des digitalen Zwillings kann die Kläranlage zu einem Energie- und Ressourcendrehzscheibe werden.

Dies setzt voraus, dass auch geeignete Koordinations- und Remunerations-Mechanismen zwischen der Kläranlagenbetreiber:in und den anderen Akteur:innen entwickelt und etabliert werden. Daher sollte ein interdisziplinärer Ansatz angestrebt werden, in dem neben den technologischen Forschungszielen auch ökonomische Forschungsziele eine zentrale Rolle spielen.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] United Nations, *World urbanization prospects: 2018 : highlights*. New York: United Nations, 2019.
- [2] U.S. Energy Information Administration, „International Energy Outlook 2013 with Projections to 2040“. Juli 2013. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf)
- [3] G. Olsson, „Water and Energy: Threats and Opportunities“, *wio*, Bd. 11, Juni 2012, doi: 10.2166/9781780400693.
- [4] H. Gao, Y. D. Scherson, und G. F. Wells, „Towards energy neutral wastewater treatment: methodology and state of the art“, *Environ. Sci.: Processes Impacts*, Bd. 16, Nr. 6, S. 1223–1246, 2014, doi: 10.1039/C4EM00069B.
- [5] P. Kehrein, M. Van Loosdrecht, P. Osseweijer, M. Garfí, J. Dewulf, und J. Posada, „A critical review of resource recovery from municipal wastewater treatment plants – market supply potentials, technologies and bottlenecks“, *Environ. Sci.: Water Res. Technol.*, Bd. 6, Nr. 4, S. 877–910, 2020, doi: 10.1039/C9EW00905A.
- [6] E. Neczaj und A. Grosser, „Circular Economy in Wastewater Treatment Plant–Challenges and Barriers“, in *EWaS3 2018*, MDPI, Juli 2018, S. 614. doi: 10.3390/proceedings2110614.
- [7] L. Kasper, F. Birkelbach, P. Schwarzmayr, G. Steindl, D. Ramsauer, und R. Hofmann, „Toward a Practical Digital Twin Platform Tailored to the Requirements of Industrial Energy Systems“, *Applied Sciences*, Bd. 12, Nr. 14, S. 6981, Juli 2022, doi: 10.3390/app12146981.
- [8] M. Schäfer, O. Gretzschel, und H. Steinmetz, „The Possible Roles of Wastewater Treatment Plants in Sector Coupling“, *Energies*, Bd. 13, Nr. 8, S. 2088, Apr. 2020, doi: 10.3390/en13082088.

## 6 Kontaktdaten

Dr. Felix Birkelbach

TU Wien – Institut für Thermodynamik und Energietechnik

Getreidemarkt 9/E302, 1060 Wien

Tel: +43 1 58801 302336

Fax: +43 1 58801 30299

E-Mail: [felix.birkelbach@tuwien.ac.at](mailto:felix.birkelbach@tuwien.ac.at)

[www.tuwien.ac.at/mwbw/iet](http://www.tuwien.ac.at/mwbw/iet)

DI Wolfgang Gruber Glatzl

AEE - Institute for Sustainable Technologies

Feldgasse 19, 8200 Gleisdorf,

Tel: +43 (0)3112 5886-455

Fax: +43 (0)3112 5886-18

E-Mail: [w.gruber-glatzl@aee.at](mailto:w.gruber-glatzl@aee.at)

<http://www.aee-intec.at>