

# DYNAMISCHE SIMULATION VON REGELENERGIE- UND SPEICHERKONZEPTEN AUF ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN

Inka Hobus, Yannick Taudien, Philipp Pyro, WiWmbH, Wuppertal

Michael Schäfer, Oliver Gretzschel, TU Kaiserslautern, Kaiserslautern

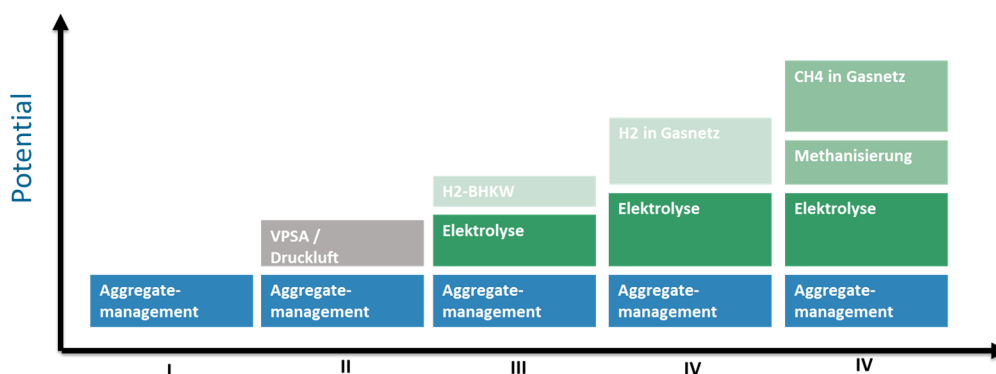
## 1 EINLEITUNG

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung – arrivee“ wurde die Integration der in Deutschland flächendeckend vorhandenen kommunalen Kläranlagen mit Schlammfäulung in ein optimiertes Flexibilitäts- und Speicherkonzept untersucht. Ziel des Konzeptes ist die Nutzung bereits vorhandener Flexibilitätspotentiale bei Stromverbrauch und –eigenerzeugung sowie die weitergehende Umwandlung, Speicherung und Nutzung von Überschüssen aus der Produktion von erneuerbarer Energie. Hierbei wurden neben den verfahrenstechnischen Restriktionen auf der Kläranlage auch die Anforderungen des vorgelagerten Stromnetzes und die Anreize des Strommarktes betrachtet. Im Folgenden wird auf die Abbildung von Regelenergie- und Speicherkonzepten auf Abwasserreinigungsanlagen mit Hilfe der dynamischen Simulation eingegangen. Ein Überblick über die Ergebnisse des Gesamtvorhabens ist zusammenfassend in [1] dargestellt.

## 2 METHODIK UND VORGEHENSWEISE

Flexibilität kann auf Kläranlagen mit Fäulung durch Stromerzeugungsanlagen (KWK-Anlagen) oder Stromverbraucher (z.B. Gebläse, Rücklaufschlamm-pumpen, Zentrifugen) bereitgestellt werden [2]/[3]/[4]. Das Potential von Kläranlagen ist jedoch sehr unterschiedlich und variiert nach Art der Abwasserbehandlung, Anlagengröße und lokalen Randbedingungen. Darüber hinaus sind stündliche, tägliche und saisonale Schwankungen gegeben. Um den Einfluss eines flexibilisierten Kläranlagenbetriebs auf die Reinigungsleistung, Energieproduktion und Fremdbezug über einen längeren Zeitraum zu beurteilen, wurden die Prozesse in einem Simulationsmodell abgebildet.

Neben dem „Status quo“ (Aggregatemanagement vorhandener Stromerzeuger und -verbraucher) wurden auch innovative Anlagenkonzepte zur Bereitstellung von Flexibilität auf Kläranlagen untersucht (**Bild 2.1**). Hierbei wurde ein Schwerpunkt auf die Nutzung der Power-to-Gas-Technologie (PtG) gelegt: Strom aus erneuerbaren Energien (EE) wird über die Verfahrensschritte Wasserelektrolyse und Methanisierung in speicherbare, regenerative Energieträger umgewandelt (Wasserstoff/Methan). Mit dieser Verfahrenstechnik ausgestattete Kläranlagen können sowohl als Kurzzeit- als auch als Langzeitspeicher für EE-Strom agieren.



**Bild 2.1** Untersuchte Regelbausteine und Kombinationen zur Bereitstellung von Flexibilität

Das Flexibilitätspotenzial der Kläranlage kann auf unterschiedliche Weise genutzt werden. In **Bild 2.2** sind einige dieser Einsatzmöglichkeiten dargestellt. Auf Basis historischer Daten wurden zielführende Märkte zur Bereitstellung von Regelenergie identifiziert. Um den unterschiedlichen Flexibilitätsbedarf aufgrund eines fortgeschrittenen EE-Ausbaus zu berücksichtigen, wurden die Jahre 2014 und 2035 als Betrachtungszeitpunkte angesetzt. Die Anforderungen von Markt und Verteilnetz gehen als Eingangssignal in das Kläranlagenmodell ein. Im Modell wird über einen Flexibilitätsbaustein geprüft, ob die Kläranlage ohne eine Verschlechterung der Reinigungsleistung markt- / systemdienlich und /oder netzdienlich agieren kann.



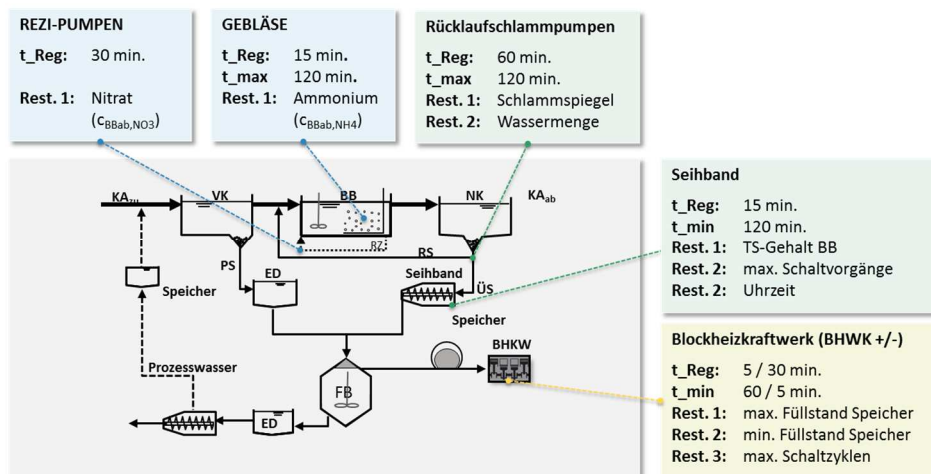
**Bild 2.2** Einsatzmöglichkeiten für Flexibilität angepasst nach [5]

### 3 MODELLAUFBAU UND EINGANGSDATEN

Die Untersuchungen zum flexiblen Kläranlagenbetrieb erfolgten am Beispiel der Kläranlage Radevormwald des Wupperverbandes. Die KA Radevormwald hat eine Anschlussgröße von rund 67.000 Einwohnerwerten. Derzeit werden pro Tag im Mittel ca. 18.000 m<sup>3</sup> Abwasser gereinigt. Die Kläranlage verfügt über zwei BHKW (je P<sub>el</sub> = 80 kW; η<sub>el</sub> = 31 %) mit denen aus 350.000 Nm<sup>3</sup> Klärgas jährlich rund 670.000 kWh/a an elektrischer Energie produziert werden. Die Kläranlage wurde mit der Software SIMBA (Version 6.4) abgebildet. Das Modell umfasst die mechanische Vorreinigung des Abwassers über eine Vorklärung, die biologische Abwasserreinigung mit Belebungsbecken und Nachklärung sowie die Schlammbehandlung bestehend aus Voreindickung, Faulung, Nacheindickung und Entwässerung. Für die Modellierung der Prozesse in den Belebungsbecken wird das Belebtschlammmodell ASM 1 verwendet [6]. Die Nachklärung wird mit einem Modell aus drei Schichten abgebildet. Zur Abbildung der in den

Faulbehältern ablaufenden, anaeroben Prozesse wird das Modell Siegrist eingesetzt [7]. Die auf der Kläranlage Radevormwald bestehende Faulgasverstromung über die BHKW ist, inklusive des Gasspeichers, ebenfalls im Simulationsmodell enthalten.

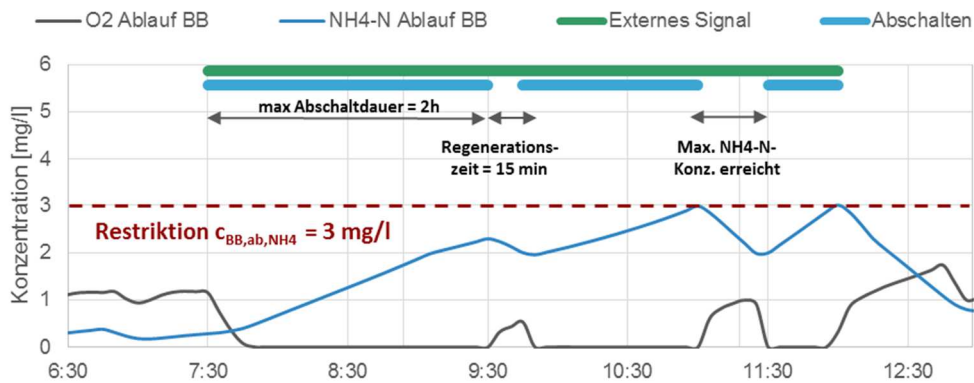
Für die Gebläse, die Rücklaufschlamm- und die Rezirkulationspumpen, die mechanische Überschussschlammeindickung und die BHKW wurden jeweils Flexibilitätsbausteine entwickelt. Diese ermöglichen den Betrieb der Aggregate in Abhängigkeit von externen Anfragen (Ab- oder Anschalten von Aggregaten), unter Einhaltung von vorher festgelegten internen Restriktionen. In dem Flexibilitätsbaustein werden sowohl Bedingungen geprüft, die die Reinigungsleistung der Kläranlage betreffen (z. B.  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen, Mindestlaufzeit nach einer Abschaltung), als auch aggregatespezifische Randbedingungen wie die maximal zulässige Zahl an Schaltzyklen pro Tag (siehe **Bild 3.1**). Die Funktionsweise des Flexibilitätsbausteins für das Abschalten der Gebläse ist beispielhaft in **Bild 3.2** für die Restriktionen „Max  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf des Belebungsbeckens“, „Maximale Abschaltdauer“ und „Regenerationszeit“ dargestellt. Die unterschiedlichen Restriktionen und Regelgrößen sind in [2] detailliert ausgeführt. Darüber hinaus sind die in den weitergehenden Betriebskonzepten vorgesehene Elektrolyse sowie die daran anknüpfenden Verwertungsformen von Wasserstoff und Sauerstoff im Modell abgebildet.



**Bild 3.1** Im Simulationsmodell eingebundenen Aggregate und Restriktionen

Der Strombedarf der im Modell integrierten Aggregate (Gebläse, Rücklaufschlammumpen, etc.) wird über die spezifischen Leistungsdaten in Abhängigkeit des Volumenstroms berechnet. Verbraucher die nicht im Modell abgebildet sind (z.B. Rechen, Grundwasserpumpwerk etc.) werden mit ihrer gemessenen Leistung berücksichtigt. In Kombination mit der Faulgasverstromung ergibt sich ein Gesamtstrombezug oder -einspeisung der Kläranlage. Dieser wird mit einem in dem Modell integriertem Netzkapazitätskorridor abgeglichen. Damit können Überschreitungen der Restriktionen des lokalen Stromnetzes aufgezeigt werden (netzdienliches Verhalten).

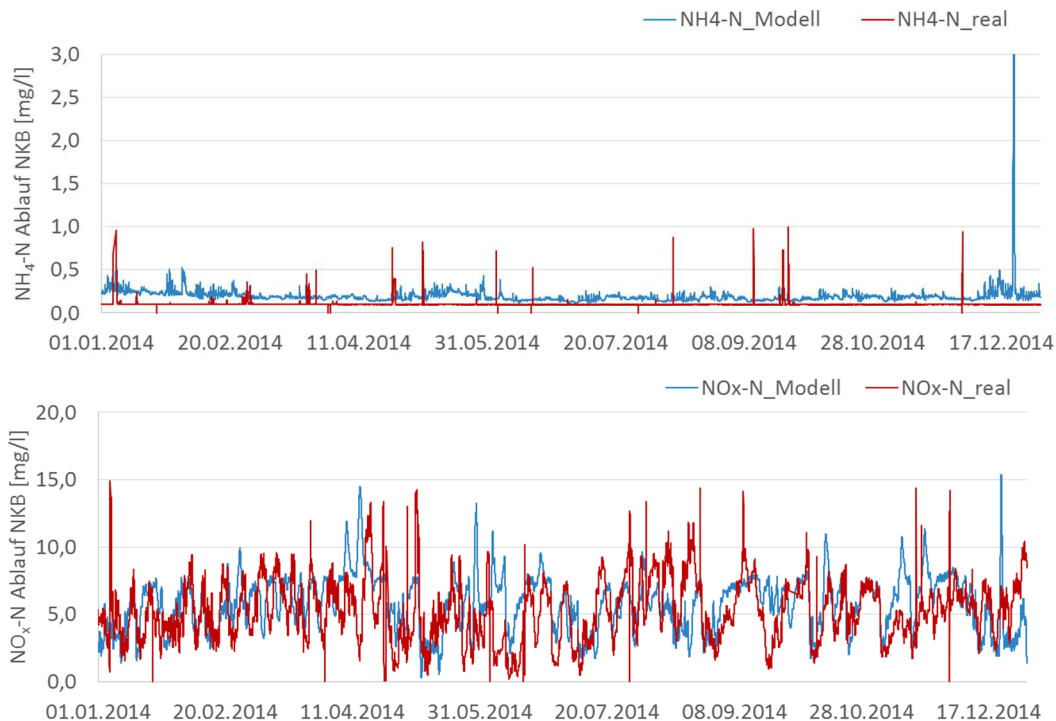
Als Datengrundlagen für das Simulationsmodell dienen die Zulaufdaten der Kläranlage Radevormwald aus dem Jahr 2014. Um die tageszeitlichen Schwankungen der Zulauffracht abzubilden, wird ein normierter Trockenwettertagesgang aus zwei charakteristischen beprobten Trockenwettertagen abgeleitet und für die Dynamisierung der mittleren Tagesfracht angesetzt. Darüber hinaus werden für alle beprobten Tage die gemessenen Tagesfrachten angesetzt. An den nicht beprobten Tagen geht die Tagesfracht im Jahresmittel in die Berechnung ein.



**Bild 3.2 Abschalten der Gebläse aufgrund eines externen Signals**

## 4 MODELLABGLEICH

Die berechnete Reinigungsleistung, die Energieproduktion und der Fremdbezug aus dem Simulationsmodell der Kläranlage Radevormwald werden mit den gemessenen Daten abgeglichen. In **Bild 4.1** ist die simulierte Stickstoffkonzentration im Ablauf der Kläranlage den gemessenen Werten gegenübergestellt. Das Konzentrationsniveau und die Dynamik der Ablaufwerte kann abgebildet werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass für die Mehrzahl der untersuchten Tage keine Messungen der Zulaufbelastung vorlagen und an diesen Tagen eine mittlere Fracht angesetzt wurde. Aus diesem Grund ist die Kläranlagenbelastung des Modells insgesamt gleichmäßiger als die Belastung im realen Betrieb der Kläranlage.



**Bild 4.1 Vergleich der simulierten mit den gemessenen Ablaufkonzentration der Kläranlage Radevormwald für die Parameter NH<sub>4</sub>-N und NO<sub>3</sub>-N**

Die simulierte Klärgasmenge entspricht mit 1.050 Nm<sup>3</sup>/d dem mittleren gemessenen Gasanfall. Durch die Verstromung des Gases wird im Jahresmittel eine elektrische Leistung von 84 kW bereitgestellt (real: 83 kW). Der simulierte Energieverbrauch und die Leistung der einzelnen Verbrauchergruppen zeigt eine gute Überweinstimmung mit der energetischen Bewertung der Kläranlage anhand von Messwerten. Aufgrund der relativ guten Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung kann das Simulationsmodell für die weitergehende Beurteilung der Flexibilitätsbereitstellung mit verschiedenen Anlagenkonzepten eingesetzt werden.

## 5 FLEXIBILITÄTSPOTENTIAL DER KLÄRANLAGE

Unter Verwendung des Simulationsmodells wurde das Flexibilitätspotential der Kläranlage Radevormwald sowie das Zusammenspiel mit dem Markt und dem vorgelagerten Stromnetz untersucht. Dabei wurden in mehreren Varianten unterschiedliche Anlagenkonzepte mit gestaffelten Flexibilitätsbausteinen berücksichtigt (**Bild 2.1**). Im Folgenden werden beispielhaft die Ergebnisse für das Konzept I (Bereitstellung von Regelleistung über vorhandene Stromerzeuger und -verbraucher) und Konzept V dargestellt (Erweiterung der KA um Elektrolyse und Methanisierung).

In dem Konzept I wird der flexible Betrieb der Gebläse, Rücklaufschlammumpen, Rezirkulationspumpen, maschinellen Überschussschlammindickung und BHKW für den Betrachtungszeitraum 2014 und 2035 untersucht. Als Markt-Eingangssignal wird die Minutenregelleistung (MRL) und Sekundärregelleistung (SRL) berücksichtigt. Die Dauer der einzelnen Signale für die MRL liegt in einem Bereich von 15 Minuten bis zu 11,5 Stunden. Bei der SRL liegen die Signale in einen wesentlich kürzeren Bereich von wenigen Sekunden bis 5 Minuten, dafür aber mit deutlich höheren Abrufzahlen. In Tabelle 5.1 ist die Gesamtdauer der prognostizierten Marktsignale für die Jahre 2014 und 2035 zusammengestellt.

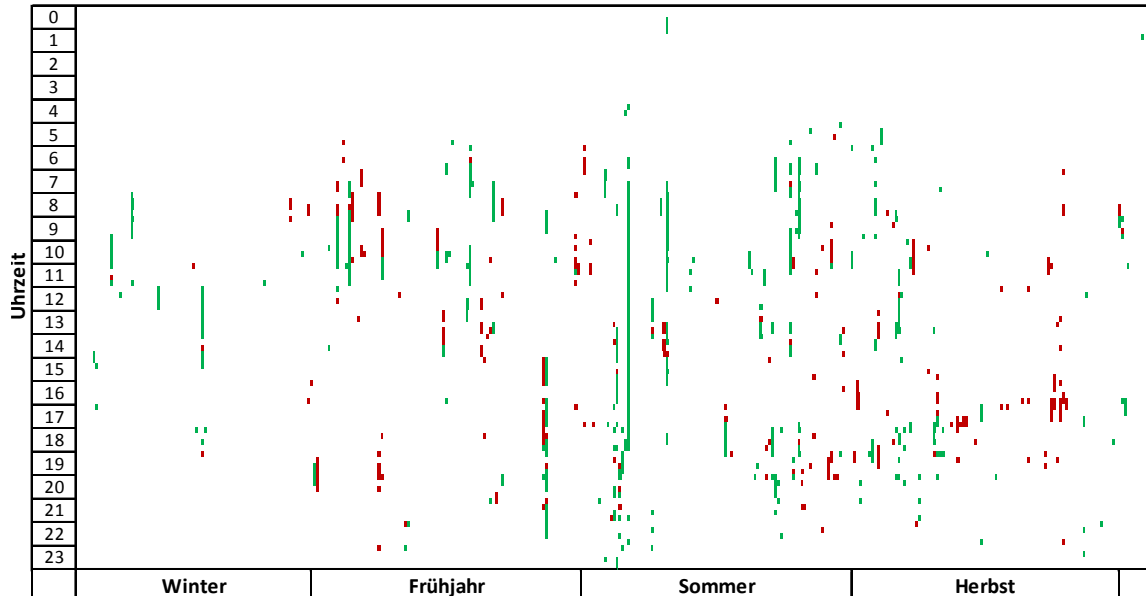
**Tabelle 5.1: Aufsummierte Dauer der Marktsignale**

Jahr	Gesamtdauer Signale Marktanalyse					
	MRL			SRL		
	Positiv	Negativ		Positiv	Negativ	
	BHKW und Aggregate	BHKW	Aggregate	BHKW und Aggregate	BHKW	Aggregate
2014	101 h/a	17 h/a	12 h/a	87 h/a	49 h/a	49 h/a
2035	187 h/a	22 h/a	14 h/a	117 h/a	57 h/a	57 h/a

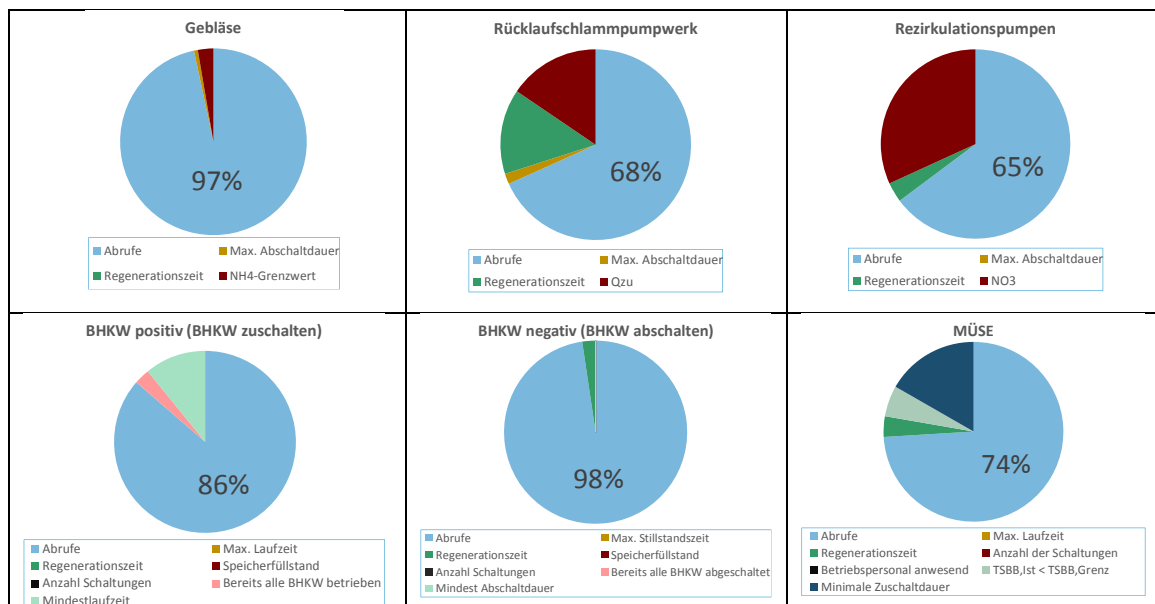
Die Bereitstellung der Marktsignale wird für jedes Aggregat separat ermittelt, da jeweils andere Restriktionen gelten und über die im Modell hinterlegten Flexibilitätsbausteine berücksichtigt werden. Das **Bild 5.1** zeigt beispielhaft für die Rezikulationspumpen die Dauer der bereitgestellten positiven Flexibilität durch Abschalten der Aggregate und die Zeitpunkte in denen Restriktionen ein Abschalten verhindern.

Eine Gesamtübersicht für die untersuchten Aggregate und deren Flexibilität ist in **Bild 5.2** beispielhaft für die MRL im Jahr 2035 dargestellt. Bei der MRL 2035 konnten die Abschaltensignale für die Gebläse unter Einhaltung der festgelegten Restriktionen zu 97 % bedient werden. Bei der SRL 2035 können die Signale durch die Gebläse zu 60 % bedient werden. Die Abschaltung wurde zu 40 % durch die Restriktion „Regeneration“ unterbunden. Die Regenerationszeit von 15 Minuten wurde als minimale Laufzeit nach einem Abschalten der Gebläse eingerichtet, um die Durchmischung der Becken

sicherzustellen und die Schalthäufigkeiten der Gebläse zu begrenzen. Die Flexibilitätsbereitstellung der Rücklaufschlammumpen und Rezirkulationspumpen sind im Vergleich zu den Gebläsen geringer. Die Rücklaufschlammumpen werden hauptsächlich durch die Restriktion „Q<sub>zu</sub>“ begrenzt, um bei großen Wassermengen die Rückführung des TS-Gehaltes aus der Nachklärung in die Belebung zu gewährleisten. Die Flexibilität der Rezirkulationspumpen wird überwiegend über den Nitratgehalt im Ablauf der Belebung begrenzt, um eine ausreichende Denitrifikation sicherzustellen.



**Bild 5.1: Möglichkeit und Dauer der (positiven) Flexibilitätsbereitstellung durch Abschalten der Rezirkulationspumpen über ein simuliertes Jahr für MRL-Signale in Szenario 2035 (grün = Abschalten möglich, rot = Anlagenrestriktion)**



**Bild 5.2 Positive /negative Flexibilitätsbereitstellung der Aggregate und BHKW der Kläranlage Radevormwald für MRL des Jahres 2035**

Das Zuschalten der BHKW (positive Flexibilität) konnte bei MRL 2035 für 86 % der angefragten Signale bedient werden. Das Zuschalten wurde überwiegend durch die Mindestlaufzeit begrenzt. Das Abschalten der BHKW (negative Flexibilität) konnte bei MRL 2035 für 98 % der Anfragen durchgeführt werden. Bei der SRL 2035 ist die Zuschaltquote mit 21 % deutlich niedriger, was auf die Vielzahl von kurzen Signalen, zurückzuführen ist. Die eingerichteten Restriktionen verhindern das häufige Zu- und Abschalten aufgrund von erhöhtem Verschleiß. Der Einsatz der BHKW für die SRL bietet sich daher nur an, wenn im Teillastbetrieb der BHKW die Leistung bereitgestellt werden kann. In **Tabelle 5.2** ist die positive und negative Flexibilitätsbereitstellung zusammenfassend dargestellt.

**Tabelle 5.2: Positive /negative Flexibilitätsbereitstellung der Aggregate und BHKW-Anlagen aufgrund Marktsignalen des Jahres 2014 und 2035**

Jahr		MRL				SRL			
		Positiv		Negativ		Positiv		Negativ	
		BHKW	Aggregate	BHKW	Aggregate	BHKW	Aggregate (Geb.   RLS   RZ)	BHKW	Aggregate
2014	Dauer Signale	101 h	101 h	17 h	12 h	100 h	100 h	59 h	59 h
	Dauer Abruf	89 h	101 h	14 h	10 h	32 h	69h 34h 30h	31 h	12 h
	Mittlere Leistung	79 kW	125 kW	79 kW	12,7 kW	79 kW	96kW 22kW 7 kW	79 kW	12,7 kW
	Arbeit	6.992 kWh	12.587 kWh	1.106 kWh	121 kWh	2.492 kWh	7.598 kWh	2.426 kWh	147 kWh
	Summe Arbeit	19.578 kWh		1.227 kWh		10.090 kWh		2.574 kWh	
2035	Dauer Signale	187 h	187 h	22 h	14 h	208 h	208 h	75 h	75 h
	Dauer Abruf	161 h	187 h	21 h	10 h	44 h	124h 55h 53h	26 h	11 h
	Mittlere Leistung	79 kW	123 kW	79 kW	12,7 kW	79 kW	89kW 22kW 7kW	79 kW	12,7 kW
	Arbeit	12.739 kWh	22.980 kWh	1.659 kWh	127 kWh	3.468 kWh	12.627 kWh	2.076 kWh	141 kWh
	Summe Arbeit	35.718 kWh		1.786 kWh		16.095 kWh		2.217 kWh	

Die Analyse der Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Nachklärung zeigt nur bei einzelnen längeren Abrufsignalen der MRL einen Anstieg in der Simulation. Durch die festgelegten Restriktionen liegen die Ablaufwerte allerdings permanent deutlich unter dem Überwachungswert der Kläranlage Radevormwald von 8 mg/l. Bei den überwiegend nur kurzen Abrufdauern der SRL kommt es dagegen in der Simulation zu keinerlei Erhöhung der Ammonium-Ablaufwerte. Es zeigt sich, dass die Kläranlagen Radevormwald zum jetzigen Zeitpunkt schon markt- und systemdienlich agieren kann, ohne die Reinigungsleistung signifikant zu beeinträchtigen.

Die Kopplung der Kläranlagensimulation mit der Netzsimulation zeigt für MRL und SRL 2014 keine Grenzwertverletzungen im vorgelagerten Verteilnetz der Kläranlage. Mit dem angesetzten Ausbau der erneuerbaren Energien im Netzeinzugsgebiet im Jahr 2035 kommt es zu Grenzwertverletzungen, die durch netzdienliches Verhalten der Kläranlage (Abschalten der BHKW oder Zuschalten von Gebläsen) behoben werden können.

Im Konzept V wird der Baustein der Wasserstoffelektrolyse mit einer Methanisierungseinheit kombiniert. Hierbei werden in einem separaten Reaktor Wasserstoff und Faulgas gemischt, wobei das im Faulgas enthaltene CO<sub>2</sub> mit dem Wasserstoff zu Methan (CH<sub>4</sub>) umgesetzt wird. Das entstehende hochreine Methan kann ins Gasnetz eingespeist werden. Der produzierte Reinsauerstoff kann zur Belüftung der Belebung oder im Rahmen einer Ozonierung (Mikroschadstoffelimination) eingesetzt werden. Die Elektrolyse wird mit überschüssigem EE-Strom betrieben. Der produzierte Wasserstoff wird zwischengespeichert und zusammen mit dem Faulgas im Verhältnis von ca. 1,5:1 (abhängig vom CO<sub>2</sub> Anteil des Faulgases) in den Methanisierungsreaktor gegeben. Die Auslegung des Methanisierungsreaktor erfolgte mit einer Umsatzmenge von 19,7 m<sup>3</sup>/h. Mit dem gewählten Elektrolyseur von 900 kW<sub>N</sub> kann das anfallende CO<sub>2</sub> nahezu vollständig in (CH<sub>4</sub>) umgewandelt werden. Mit dem Betrieb des Elektrolyseurs werden

3.182.987 kWh<sub>el</sub>/a überschüssiger EE-Strom für die Elektrolyse genutzt. Die in das Gasnetz eingespeiste CH<sub>4</sub>-Menge beträgt 1.018 m<sup>3</sup>/d Nm<sup>3</sup>/a.

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Mit den durchgeführten Simulationsrechnungen konnte gezeigt werden, dass ausgewählte Aggregate sowie die KWK-Anlagen ohne nachteilige Beeinflussung der Reinigungsleistung für Regeleinriffe im SRL und MRL Bereich eingesetzt werden können. Kläranlagen sind damit schon heute in der Lage, einen Beitrag zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen zu leisten und können an neuen Geschäftsmodellen und Produkten der Energieversorgung, wie z.B. virtuellen Kraftwerken oder dem Handel an der Strombörse teilhaben. Mit der Einbindung neuer innovativer Konzepte können Kläranlagen sowohl als Kurzzeitspeicher über die Aggregatflexibilität, - als auch als Langzeitspeicher für EE-Strom, durch Power-to-Gas-Technologien, agieren. Die Wirtschaftlichkeit der Flexibilitätsbereitstellung ist im Einzelfall unter Berücksichtigung der Marktbedingungen nachzuweisen. Die Projektergebnisse werden nach Abschluss des Projektes unter [www.erwas-arrivee.de](http://www.erwas-arrivee.de) zur Verfügung gestellt.

## 7 DANKSAGUNG

Das Projekt arrivee wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme NaWaM/ERWAS (FONA) öffentlich gefördert. Projektpartner sind TU Kaiserslautern - Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Wupperverband, Bergische Universität Wuppertal - Lehrstuhl für elektrische Energieversorgungstechnik, ITB gGmbH - Transferstelle Bingen, iGas energy GmbH, Stadtwerke Radevormwald GmbH.

## 8 LITERATUR- UND QUELLENACHWEIS

- [1] Schmitt, T.G.; Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Bidlingmaier, A.; Hanke, B.; Hobus, I.; Honeck, V.; Kornrumpf, T.; Pyro, P.; Salomon, D.; Zdrallek, M. (2017): „Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Stromnetz – Ergebnisse aus dem Verbundprojekt arrivee“, In: Wasserwirtschaft Wassertechnik Nr. 5, S. 08–14.
- [2] Schäfer, M.; Schmitt, T.G.; Hobus, I. (2017): „Energetic flexibility on wastewater treatment plants“; In: Water Science & Technology (zur Veröffentlichung angenommen)
- [3] Müller, E.; Graf, E.; Kobel, B.; Hurni, A.; Wenger, R.; Frei, U.; Christen, C.; Moser, R.; Fritzsche, C.; Mathys, O.; Kernen, M.; Fahrni, J. (2013) „Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung (Potential of swiss infrastructure plants for load shifting)“. Final Report. June Bern, Switzerland 2013.
- [4] Nowak, O.; Enderle, P.; Schloffer, M.; Lang, E.; Pregartbauer, R. (2015) „Loadshift-ARA - Lastverschiebung in der Abwasserreinigung – Kommunale Kläranlagen als Bestandteil smarterer Energiesysteme“. Final Report. Vienna, Austria 2015.
- [5] Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Knerr, H.; Schmitt, T.G. (2015): “Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in



virtual power plants – a potential analysis”, In: Energy Procedia 2015, Vol. 73, Seiten: 87 – 93, DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.

[6] Henze, M.; Grady, C. P. L.; Gujer, W.; Marais, G. v. R.; Matsuo, T. (1987) “Activated Sludge Model No. 1”. IAWPRC Scientific and Technical Reports, No. 1, IAWQ, London, 1987.

[7] Siegrist, H., Vogt, D.; Garcia-Heras, J.; Gujer, W. (2002): “Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion”, In: Environmental Science & Technology 2002 36 (5), 1113-1123, DOI: 10.1021/es010139p