

Kaiserslautern
2017

Schriftenreihe

**Kläranlagen in der Energiewende:
Faulung optimieren & Flexibilität wagen**

Tagungsband

40

**Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Technische Universität Kaiserslautern**

**Kläranlagen in der Energiewende:
Faulung optimieren & Flexibilität wagen**

Fachtagung
Kaiserslautern, 30. November 2017

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. T. G. Schmitt

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber: Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft
Postfach 3049
Technische Universität Kaiserslautern
67653 Kaiserslautern

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

Druck: Technische Universität Kaiserslautern
Hauptabteilung 5
Abteilung 5.6 Foto-Repro-Druck

D-386

© Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Kaiserslautern 2017

Alle Rechte vorbehalten, auch das des auszugsweisen Nachdrucks, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Photographie, Mikroskopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und das der Übersetzung.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 1430-6581
ISBN 978-3-95974-071-5

Vorwort

Mit dem Titel „*Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen*“ greift die diesjährige Fachtagung erneut die Thematik Energiebedarf und Energieeffizienz bei der Abwasserbehandlung auf. Die besondere Bedeutung der Thematik wird unterstrichen durch den Charakter der Fachtagung als gemeinsame Abschlussveranstaltung zweier innovativer Forschungsvorhaben, die das Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft als Koordinator mit Projektpartnern bearbeitet hat. Dabei gehen die in den vorgestellten Forschungsvorhaben arrivee und ZEBRAS behandelten Fragestellungen und Anliegen deutlich über die Zielsetzung einer verbesserten Energiebilanz von Kläranlagen hinaus.

Das Projekt ZEBRAS „*Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz*“ wurde als thematische Fortführung des Vorläuferprojektes NAwaS in schon bewährter Weise im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz (MUEEF) bearbeitet. Das Verbundvorhaben arrivee „*Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung*“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS „*Zukunftsfähige Technologien und Konzepte für eine energieeffiziente und ressourcenschonende Wasserwirtschaft*“ gefördert.

In beiden Vorhaben wird der mögliche Beitrag der Betreiber von Kläranlagen mit anaerober Klärschlammstabilisierung zum Gelingen der Energiewende durch aktives Handeln beleuchtet. Bei ZEBRAS liegt der Fokus auf der Optimierung der Verfahrenskette der Abwasser- und Schlammbehandlung zur Erzeugung und Verwertung von Faulgas als klimaneutraler Energieträger. Das Verbundvorhaben arrivee hat die Bereitstellung von Flexibilitäten auf Faulungsanlagen in der zeitlichen Abfolge von Strombezug und Stromeinspeisung unter Berücksichtigung temporärer Überschüsse und Defizite in übergeordneten Stromnetzen zum vorrangigen Gegenstand.

Die jeweiligen Projektpartner stellen sich und ihre spezifischen Forschungsarbeiten und Ergebnisse in den einzelnen Beiträgen des vorliegenden Tagungsbandes vor. Der Herausgeber bedankt sich bei den Autoren und Referenten sehr herzlich für die Bereitschaft zur Übernahme eines Tagungsbeitrages, bei allen Projektpartnern für die sehr konstruktive und erfolgreiche Zusammenarbeit (das sollte in den Text- und Redebeiträgen deutlich werden) sowie bei den finanzierenden Institutionen für die Ermöglichung der spannenden und zukunftsbedeutsamen Forschungsarbeiten.

Theo G. Schmitt

Inhaltsverzeichnis

Potenziale der Faulung und Faulgasverwertung in Rheinland-Pfalz	1
<i>Henning Knerr, Timo C. Dilly, Michael Schäfer, Theo G. Schmitt</i> <i>TU Kaiserslautern</i>	
Schwerpunkte aus Sicht des Landes Rheinland-Pfalz	23
<i>Staatssekretär Thomas Griese</i> <i>Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz</i>	
Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten	29
<i>Timo C. Dilly, Henning Knerr, Theo G. Schmitt</i> <i>TU Kaiserslautern</i>	
Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammfäulung an Beispielanlagen	51
<i>Sebastian Hien, Joachim Hansen, Timo C. Dilly</i> <i>Universität Luxemburg / TU Kaiserslautern</i>	
Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen	67
<i>Michael Schäfer, Oliver Gretzschel, Theo G. Schmitt, Inka Hobus</i> <i>TU Kaiserslautern / Wuppertalgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH</i>	
Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Mittelspannungsnetz	97
<i>Tobias Kornrumpf, Markus Zdrallek</i> <i>Bergische Universität Wuppertal</i>	
Kläranlagen in den Energiemärkten von heute und morgen	115
<i>Ralf Simon, Babett Hanke, Verena Honeck</i> <i>Transferstelle Bingen - TSB</i>	
Chancen für mehr Kläranlagenflexibilität durch verbesserte politische Rahmenbedingungen zur Energiemarktintegration der Abwasserwirtschaft.....	127
<i>Frank Hüesker</i> <i>TU Kaiserslautern</i>	
Flexibilität im Praxistest	143
<i>Dirk Salomon, Philipp Pyro</i> <i>Wuppertalverband / Wuppertalgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH</i>	

Optimierung der Klärschlammbehandlung und Faulgasverwertung auf der
Kläranlage „Untere Selz“ 159

Thomas Siekmann, Christoph Weisrock
Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH / AVUS Ingelheim

Faulung optimieren! Flexibilität wagen! Wie geht es weiter? 173

Heidrun Steinmetz, Oliver Gretzschel, Michael Schäfer
TU Kaiserslautern

Potenziale der Faulung und Faulgasverwertung in Rheinland-Pfalz

Henning Knerr^{1,2}, Timo C. Dilly^{1,2}, Michael Schäfer², Theo G. Schmitt^{1,2}

¹tectraa – Zentrum für Innovative AbWassertechnologien, TU Kaiserslautern

²Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern

Kurzfassung: Im Projekt ZEBRAS werden mit Blick auf die sich ändernden gesetzlichen und technologischen Rahmenbedingungen sowie die spezielle Ausgangssituation der Abwasserreinigung in Rheinland-Pfalz nachhaltige Konzepte zur Faulung und Faulgasverwertung unter Einbeziehung der Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung entwickelt. Grundlage des Projektes stellt eine detaillierte Bestandserhebung der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen dar. Der Beitrag liefert einen Überblick über die Ergebnisse der Bestandsaufnahme und diskutiert Potenziale zur Steigerung der Faulgasproduktion und -verwertung im Bestand.

Die Analyse des Ist-Zustandes zeigt, dass der überwiegende Teil der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen in verschiedenen Bereichen der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung sowie der Faulgasverwertung ein enormes Optimierungspotenzial aufweist. Die Ergebnisse der darauf aufbauend durchgeführten Untersuchungen lässt ein beachtliches Potenzial zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung und damit der Stromproduktion auf den Faulungsanlagen in RLP erkennen. Das größte Potenzial weist mit rd. 20 GWh_{el}/a die Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten auf, wovon rd. 7,5 GWh_{el}/a erschließbar erscheinen. Insgesamt liegt das ermittelte theoretische Potenzial für die untersuchten Maßnahmen bei rd. 24 GWh_{el}/a.

Key-Words: Faulung, Klärgasverwertung, Potenzialabschätzung

1 Einleitung

Die Klärschlamm Entsorgung in Rheinland-Pfalz (RLP) erfolgt derzeit noch überwiegend über den landwirtschaftlichen Verwertungsweg. Vor dem Hintergrund der rechtlichen Begrenzungen, die sich aus der derzeit gültigen Düngemittelverordnung

und der Novellierung der Klärschlammverordnung ergeben, wird dieser Entsorgungsweg allerdings zunehmend infrage gestellt. Ein Großteil der in RLP entsorgten Klärschlämme stammt aus Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung (sogenannte Faulungsanlagen). Deren Bestand ist überwiegend durch Altanlagen charakterisiert, wodurch mittelfristig mit einer flächendeckenden Sanierung bzw. Erneuerung dieser Anlagen zu rechnen ist. Die verstärkte Umstellung von Kläranlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung auf einen anaeroben Stabilisierungsprozess und die aus der Energiewende resultierenden Handlungsoptionen zur Faulgasnutzung und -verwertung werden zudem den Bau neuer Faulungsanlagen, ggf. ergänzt um neue Technologien, vorantreiben. Mit Blick auf eine zukunftssichere Gestaltung des Prozesses der Klärschlammbehandlung und -verwertung stellt sich also die Frage nach dem Optimierungs- und Verbesserungspotenzial des Bestandes sowie nach sinnvollen Verfahrensabläufen. Der Prozess der Faulung ist dabei von zentraler Bedeutung, da er mit der Reduzierung der organischen Stoffe im Schlamm einen wesentlichen Prozessschritt in der Gesamtkette der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung übernimmt. (Knerr et al., 2017)

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (MUEEF) wurden im Rahmen des Projektes *„Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS“* Ansätze entwickelt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt "Faulung" bei bestehenden Kläranlagen mit anaerober Klärschlammstabilisierung optimiert werden kann, und wie zukünftig bei neu zu errichtenden Faulungsanlagen der Betrieb erfolgen sollte. Die Umsetzbarkeit der entwickelten Konzepte wurde an vier Beispielanlagen modellhaft überprüft und darauf aufbauend die Umsetzungspotenziale in RLP bewertet.

Grundlage des Projektes stellt eine detaillierte Bestandsaufnahme der Basisdaten der Faulungsanlagen in RLP dar (Knerr et al., 2016), anhand derer die erschließbaren Potenziale zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung im Bestand abgeschätzt wurden (Knerr et al., 2017). Die Ergebnisse dieser beiden Arbeitsschritte werden im vorliegenden Beitrag zusammenfassend dargestellt und diskutiert.

2 Ausgangssituation in Rheinland-Pfalz

In RLP sind von derzeit insgesamt 675 kommunalen Kläranlagen 84 Anlagen mit einer anaeroben Schlammbehandlung ausgestattet (Bezugsjahr 2014). Insgesamt werden sechs von derzeit 70 Kläranlagen der Größenklasse (GK) 3, 70 von insgesamt 146 Kläranlagen der GK 4 und alle Kläranlagen der GK 5 als Faulungsanlagen betrieben. Da Anlagen der GK 1 und 2 aufgrund der hohen Investitionskosten nicht wirtschaftlich mit anaerober Schlammstabilisierung zu betreiben sind (DWA, 2015), befinden sich in RLP derzeit keine Faulungsanlagen in diesen Größenklassen. Einen Überblick

über die Anzahl und Ausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen und deren Aufteilung in die jeweiligen GK gibt Abbildung 1.

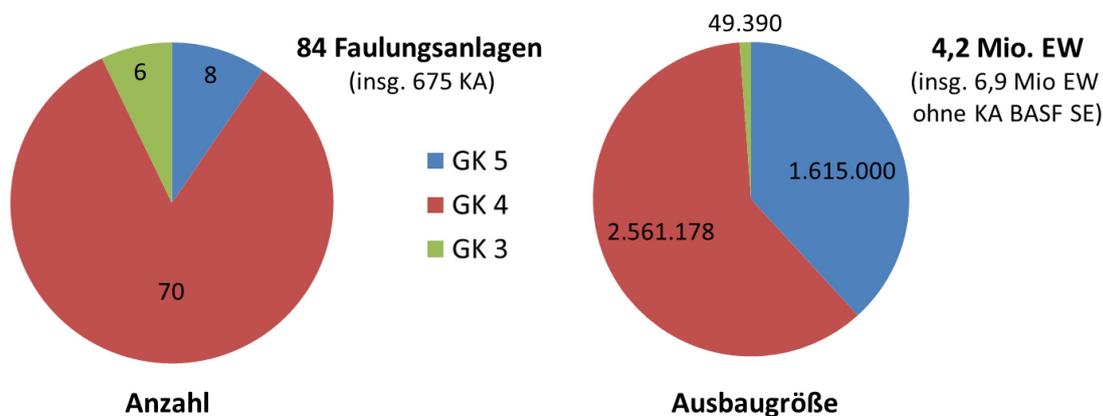


Abbildung 1: Anzahl und Ausbaugröße der Kläranlagen mit Faulung in RLP und deren Aufteilung auf die Größenklassen

Die Ausbaugröße der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen beträgt in Summe 4,2 Mio. Einwohnerwerte (EW). Ohne die EW der Stadt Ludwigshafen und der angrenzenden Gemeinden, die in der Kläranlage der BASF SE behandelt werden, werden insgesamt 6,9 Mio. EW in kommunalen Kläranlagen behandelt. Die Anlagen mit Faulung stellen folglich etwa 60 % der Ausbaugröße der Kläranlagen in RLP.

Eine Übersicht über die räumliche Verteilung der rheinland-pfälzischen Kläranlagen gibt Abbildung 2. Darin gekennzeichnet sind die 84 Kläranlagen mit Faulung (große Punkte). Der überwiegend ländliche Charakter von RLP prägt die Größenklassenverteilung der Kläranlagen. Da vor allem große Kläranlagen mit einer Faulung ausgestattet sind, findet man diese in Ballungszentren und Regionen mit höherer Bevölkerungsdichte wie bspw. in Trier oder Koblenz, insbesondere entlang der Fließgewässer Mosel, Nahe, Glan, Sieg und im Rheingebiet.

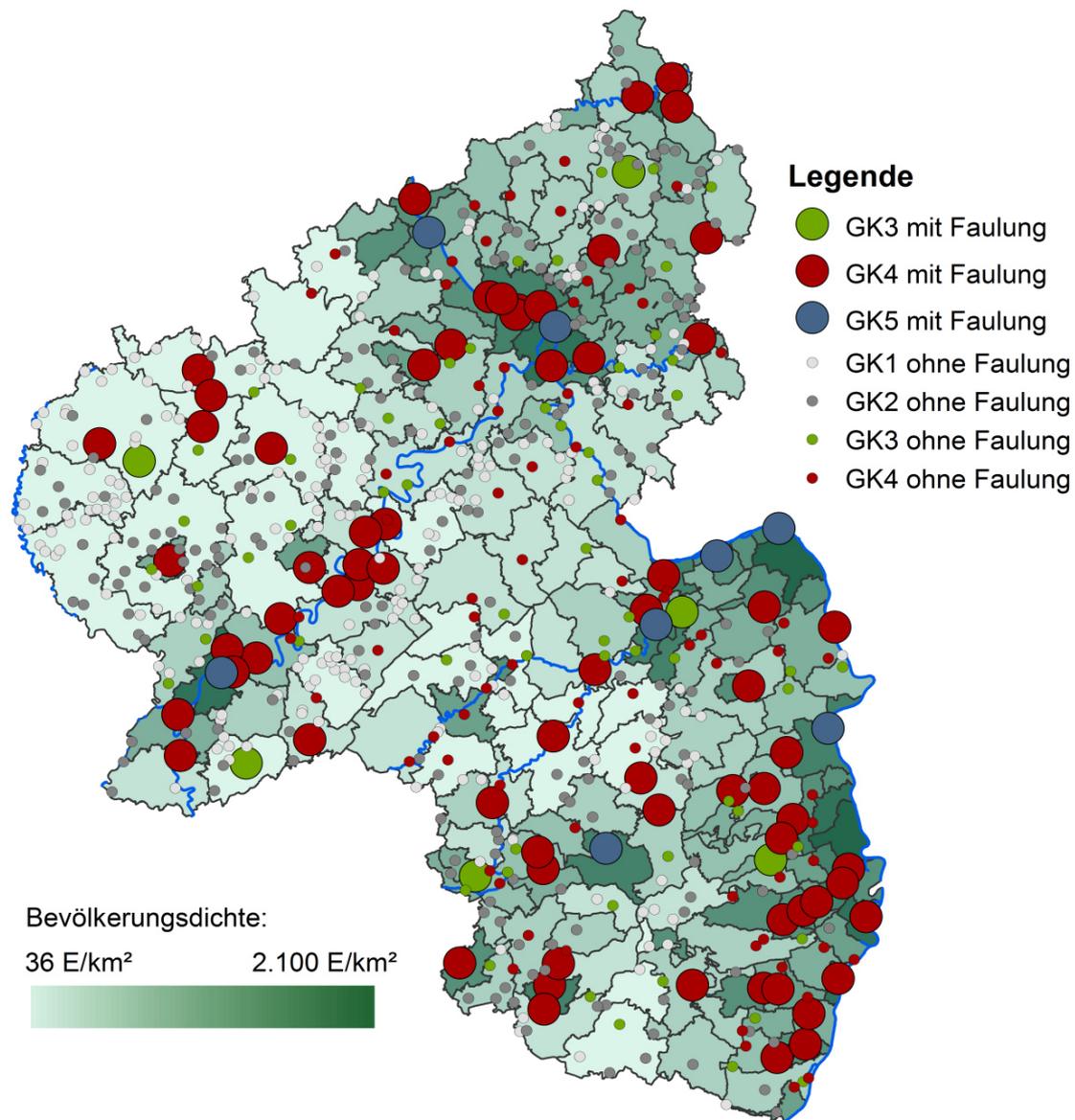


Abbildung 2: Bevölkerungsdichte und räumliche Verteilung der Kläranlagen in RLP

3 Methodik

Zur Erfassung des Ist-Zustandes wurde in Zusammenarbeit mit Kläranlagenbetreibern und Entscheidungsträgern ein Erfassungsbogen entwickelt und auf den 84 Faulungsanlagen angewendet. Der vollständige Erfassungsbogen kann Knerr et al. (2016) entnommen werden. Insgesamt wurden 64 auswertbare Fragebogen zurückgesendet (Abbildung 3). Bezogen auf die Anzahl der Faulungsanlagen wurde damit eine Rücklaufquote von 76 % erreicht, bezogen auf die Gesamtausbaugröße der Faulungsanlagen wurden 88 % der Ausbaupazität erfasst.

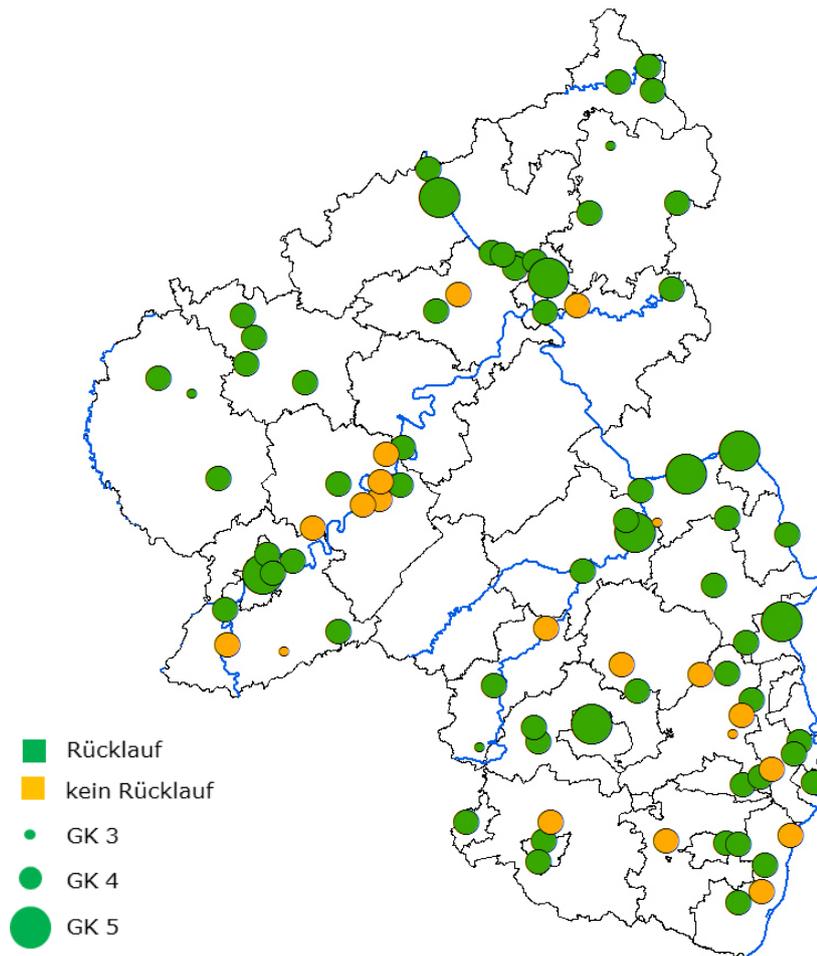


Abbildung 3: Verteilung der Faulungsanlagen mit Datenrücklauf

Für die Auswertung der übergebenen Daten wurden einwohnerspezifische Kennwerte generiert, die einen Vergleich der Anlagen untereinander und mit Literaturwerten erlauben. Um die Kennwerte der einzelnen Anlagen miteinander vergleichen zu können, wurden diese auf die jeweilige Anschlussbelastung bezogen. In Anlehnung an das DWA-Arbeitsblatt A 216 (DWA, 2015a) wurde als Bezugsgröße die mittlere CSB-Zulaufkraft der 24 h-Mischproben gewählt. Die Anschlussbelastung wurde mit einer einwohnerspezifischen CSB-Fracht von 120 g/(E·d) ermittelt.

Für eine Klassifizierung der Anlagen wurde anstelle einer Einteilung in Größenklassen nach Abwasserverordnung eine Einteilung nach mittlerer CSB-Anschlussbelastung (EW_{120}) vorgenommen. Die Einteilung der Anlagen erfolgt in fünf Klassen:

- Klasse I: $EW_{120} \leq 10.000 \text{ E}$
- Klasse II: $10.000 \text{ E} < EW_{120} \leq 20.000 \text{ E}$
- Klasse III: $20.000 \text{ E} < EW_{120} \leq 50.000 \text{ E}$
- Klasse IV: $50.000 \text{ E} < EW_{120} \leq 100.000 \text{ E}$
- Klasse V: $EW_{120} > 100.000 \text{ E}$

Als Grenzen für die Klassifizierung wurde die Größenklassengrenze zwischen GK 3 und GK 4 sowie zwischen GK 4 und GK 5 gewählt. Außerdem wurden weitere Grenzen eingeführt, um die mit 50 von 84 Anlagen stark dominierenden Anlagen der GK 4 in drei Klassen zu unterteilen. Da die Wirtschaftlichkeitsgrenze für eine Verfahrensstellung von simultan aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung bei ca. 20.000 E liegt (Gretschel et al., 2005), wurde diese Grenze eingeführt. Die Grenze von 50.000 E wurde gewählt, um eine gleichmäßigere Verteilung der Anlagen auf die einzelnen Klassen zu erhalten.

Aufbauend auf den Erhebungen des Ist-Zustandes wurde das vorhandene Potenzial der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen zur Steigerung der Stromproduktion anhand einer Potenzialabschätzung ermittelt. Es wurden sieben ausgewählte Maßnahmen betrachtet, für die kläranlagenspezifisch das jeweilige Optimierungspotenzial abgeschätzt wurde. Grundlage der Potenzialabschätzung stellen in MKULNV (2014) abgeleitete Referenzwerte für Maßnahmen zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung für Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung dar.

4 Bestandsanalyse

4.1 Einwohnerspezifischer Primär- und Überschussschlammanfall

Die spezifische Primärschlammfracht liegt im Median bei 46,4 g TM/(E·d). Unter Berücksichtigung der meist hohen Durchflusszeiten in der Vorklärung wird der Primärschlammanfall nach ATV-DVWK Arbeitsblatt A 131 (ATV-DVWK, 2000) von 45 g TS/(E·d) für Durchflusszeiten von 1,5 bis 2,0 h bestätigt. Allerdings kann keine Steigerung des Primärschlammanfalls mit zunehmender Aufenthaltszeit in der Vorklärung festgestellt werden (Abbildung 4, links). Zudem ist der ermittelte Wert deutlich höher als das im DWA-Merkblatt M 368 (DWA, 2014) für eine Durchflusszeit von 2 h angegebene 50-Perzentil von 32 g TM/(E·d).

Die im DWA-Merkblatt M 368 (DWA, 2014) angegebenen spezifischen Trockenmasse(TM)-Frachten im Überschussschlamm sind abhängig von der Aufenthaltszeit in der Vorklärung sowie der Temperatur und dem Schlammalter in der Belebung und werden als 50-Perzentil im Bereich von 27,4 g TM/(E·d) bis 42,5 g TM/(E·d) angegeben. Dieser Bereich wird durch die ermittelten spezifischen Überschussschlammfrachten gut wiedergegeben, was der Median über alle Anlagen von 36,5 g TM/(E·d) widerspiegelt. Es zeigt sich die zu erwartende Abnahme des spezifischen Überschussschlammanfalls mit steigendem Schlammalter (Abbildung 4, rechts). Allerdings fällt auf, dass bei einer Vielzahl der Faulungsanlagen die Belebungsstufe mit einem Schlammalter betrieben wird, welches z. T. deutlich über dem rechnerisch erforderlichen Wert zur Sicherstellung einer ausreichenden Stickstoffelimination liegt, teilweise sogar im Bereich der simultan aeroben Schlammstabilisierung. Der organi-

sche Anteil im Überschussschlamm und eine weitere Umsetzung in der anaeroben Stufe werden damit reduziert.

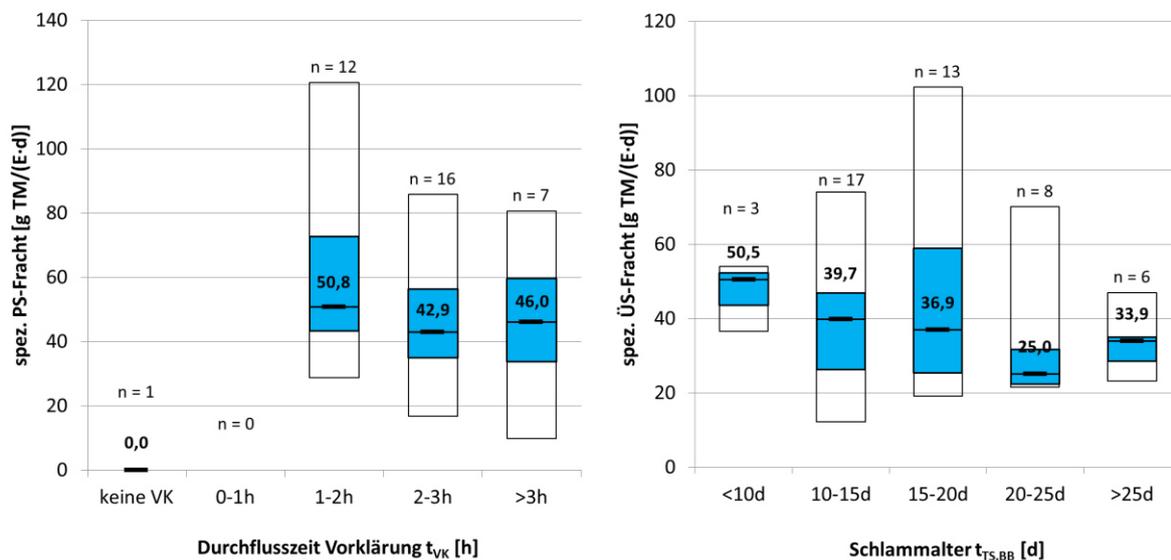


Abbildung 4: Spezifische Primärschlammfracht in Abhängigkeit von der Durchflusszeit der Vorklärung bei mittlerem Trockenwetterzufluss und spezifische Überschussschlammfracht in Abhängigkeit vom Schlammalter in der Belebung

4.2 Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags

Die ermittelten einwohnerspezifischen Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags sind in Abhängigkeit von der Anschlussbelastung in Tabelle 1 zusammengestellt. Aus den erhobenen Daten können im Median Rohschlammfrachten zwischen 64 und 84,6 g TM/(E·d) abgeleitet werden. Die niedrigsten Kennwerte ergeben sich für die Anlagen der Klasse V. Die Rohschlammfrachten der Anlagen der Klassen I - IV liegen in einer vergleichbaren Größenordnung. Der Medianwert über alle Klassen von 76,8 g TM/(E·d) deckt sich gut mit dem nach Möller (1994) oder Imhoff und Imhoff (2007) häufig zitierten Wert von 80 g TS/(E·d).

Die resultierenden Faulschlammfrachten liegen zwischen 44,5 und 57,1 g TM/(E·d). Die größeren Kläranlagen weisen dabei deutlich geringere Trockenmassegehalte gegenüber den kleineren Anlagen auf. Der Glühverlust des Faulschlammes liegt unabhängig von der Anschlussbelastung im Median bei 55 %. Mit 48,5 g TM/(E·d) liegt die spezifische Faulschlammfracht aller Anlagen unter dem nach Imhoff und Imhoff (2007) häufig veranschlagten Wert von 60 g TR/(E·d) für Belebungsanlagen mit Simultanfällung, der jedoch auf 85-Perzentil-Ansätzen für die Rohabwasserzusammensetzung beruht (DWA, 2015c).

Tabelle 1: Kenngrößen der Faulung und des Gasertrags (Medianwerte), Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen

Kennwert	Einheit	Kläranlagenklasse					
		I	II	III	IV	V	Alle
Rohschlammfracht	[g TM/(E·d)]	83,0 (3)	75,5 (11)	78,1 (7)	84,6 (7)	64,0 (3)	76,8 (31)
Faulschlammfracht	[g TM/(E·d)]	57,1 (5)	49,8 (16)	52 (14)	45,6 (10)	44,5 (4)	48,5 (49)
Faulzeit	[d]	30 (9)	30 (19)	27 (19)	36 (12)	29,5 (4)	30,0 (63)
Faulraumvolumen (inkl. Fremdschl.)	[l/E]	135 (8)	70,1 (18)	58,3 (17)	54,6 (12)	47,9 (4)	64,0 (59)
Faulraumvolumen (ohne Fremdschl.)	[l/E]	117,4 (8)	70,1 (18)	52,2 (17)	54,1 (12)	47,4 (4)	63,0 (59)
Raumbelastung	[kg oTR /(m ³ ·d)]	1,0 (5)	1,15 (12)	1,1 (12)	1,17 (9)	3,0 (1)	1,14 (39)
oTM-Abbau	[%]	37,1 (2)	60,9 (9)	57,7 (6)	64,5 (4)	58,3 (2)	60,6 (23)
Klärgasanfall (inkl. Fremdschl.)	[l/(E·d)]	29,9 (7)	29,2 (18)	24,5 (17)	26,5 (12)	25,9 (4)	27,5 (56)
Klärgasanfall (ohne Fremdschl.)	[l/(E·d)]	29,9 (7)	29,2 (18)	22,3 (17)	26,5 (12)	24,9 (4)	27,4 (56)
Gasertrag (bez. oTM _{zu})	[l/kg oTM- zu]	800 (3)	502 (14)	414 (9)	449 (7)	520 (1)	495 (34)
Gasertrag (bez. oTM _{abb})	[l/kg oTM]	1.464 (3)	705 (11)	711 (6)	669 (4)	781 (3)	744 (27)

Die resultierenden Faulzeiten betragen, unabhängig von der Anschlussbelastung, im Median zwischen 27 und 36 Tagen. In Einzelfällen werden jedoch, insbesondere bei den kleineren Anlagen, Aufenthaltszeiten von bis zu 90 Tagen erreicht (Knerr et al., 2016). Das einwohnerspezifische Faulraumvolumen aller in die Auswertung eingeflossenen Anlagen liegt im Median bei 64 l/E. Nach Bischofsberger et al. (2005) wird ein Faulraumvolumen zwischen 20 und 50 l/E zur Bemessung vorgeschlagen. Bei den größeren Anlagen in RLP wird dieses nahezu eingehalten. Die meisten der Faulungsanlagen weisen jedoch deutlich höhere spezifische Faulraumvolumina auf. Dies trifft vor allem auf die kleineren Anlagen zu, was sich in den Medianwerten von 70 l/E für die Anlagen der Klasse II und 135 l/E für die Anlagen der Klasse I zeigt.

Analog zu den hohen Faulzeiten ergeben sich niedrige Raumbelastungen. Die Medianwerte der Anlagen der Klassen I - IV liegen bei ca. 1,1 kg oTR/(m³·d). In der Litera-

tur (DWA, 2009; DWA, 2014) wird die Raumbelastung in Abhängigkeit von der Anlagengröße im Bereich zwischen 1,0 (< 50.000 EW) bis 4,5 kg oTR/(m³·d) (> 100.000 EW) angegeben, was die enormen freien Kapazitäten der überwiegenden Anzahl der Anlagen dokumentiert.

Für die in die Auswertung eingeflossenen Anlagen ergibt sich ein spezifischer Klärgasanfall von im Median 27,5 l/(E·d). Bei einigen Anlagen führen externe Schlämme und Co-Substrate zu einem erhöhten Klärgasanfall. Um diese zusätzliche Gaserzeugung herauszurechnen, wurden für die Co-Substrate und Fremdschlämme ein Zuschlag auf die Einwohnerwerte berücksichtigt (in Anlehnung an Möller (1994) und Imhoff und Imhoff (2007) 1 EW = 80 g TM/d), woraus im Median ein korrigierter Klärgasanfall von 27,4 l/(E·d) resultiert. Dieser Wert ist deutlich höher als der nach DWA-Merkblatt M 363 (DWA, 2010) im Mittel zu erwartende spezifische Gasanfall von 18,3 l/(E·d) bis 20,7 l/(E·d) und kann im Wesentlichen auf die langen Faulzeiten zurückgeführt werden.

Der Gasertrag von Rohschlamm wird im DWA-Merkblatt M 368 (DWA, 2014) mit ca. 440 l je kg zugeführtem oTM_{zu} angegeben. Vor allem bei den Anlagen der Klasse I ist mit einem resultierenden Wert von ca. 800 l/kg oTM_{zu} eine enorme Abweichung zu dem genannten Literaturwert zu erkennen. Dieser Wert wird als nicht plausibel eingestuft. Für die Anlagen > 10.000 E resultiert ein spezifischer Gasertrag zwischen 414 und 520 l/kg oTM_{zu}, der damit in der Größenordnung des im DWA-Merkblatt M 368 (DWA, 2014) angegebenen Wertes liegt.

Die meisten Faulbehälter werden im mesophilen Temperaturbereich betrieben. Lediglich vier der in die Auswertung eingeflossenen Anlagen verfügen derzeit über eine Klärschlamm-Desintegration.

4.3 Klärgasverwertung

In Summe weisen die 64 ausgewerteten Anlagen eine jährliche Gasproduktion von 25,4 Mio. m³/a aus. Mit rd. 20,5 Mio. m³/a werden ca. 81 % des erzeugten Klärgases zur Eigenstromerzeugung verwendet. Dieser Wert ist mit dem bundesweiten Durchschnitt von ca. 80 % vergleichbar (Statistisches Bundesamt, 2015). Nur ein sehr geringer Anteil wird für eine Wärmeerzeugung (3,6 Mio. m³/a) oder für Direktantriebe (0,1 Mio. m³/a) verwendet. Mit 1,3 Mio. m³/a werden etwa 5 % des anfallenden Klärgases über eine Fackel verbrannt (Abbildung 5).

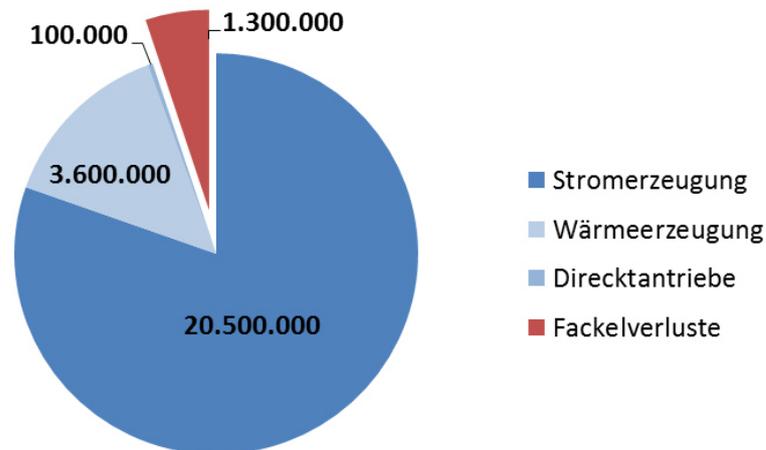


Abbildung 5: Jährliche Gasproduktion der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen in m³/a (n = 64)

Der Anteil der Gasmenge, die zur Strom- bzw. Wärmeerzeugung verwendet wird variiert von Anlage zu Anlage sehr stark (Abbildung 6). 58 der in die Auswertung eingeflossenen 64 Anlagen (91 %) verfügen über eine Kraft-Wärme-Kopplungsanlage (KWK-Anlage), überwiegend in Form eines Blockheizkraftwerkes (BHKW). Sechs Anlagen betreiben keine KWK-Anlage. Bei diesen Anlagen wird das produzierte Klärgas zur Wärmeerzeugung verwendet bzw. abgefackelt. Umgekehrt gibt es einige Anlagen, die das produzierte Klärgas ausschließlich zur Stromerzeugung verwenden. Der Großteil der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen verwertet die überwiegende Gasmenge zur Stromerzeugung.

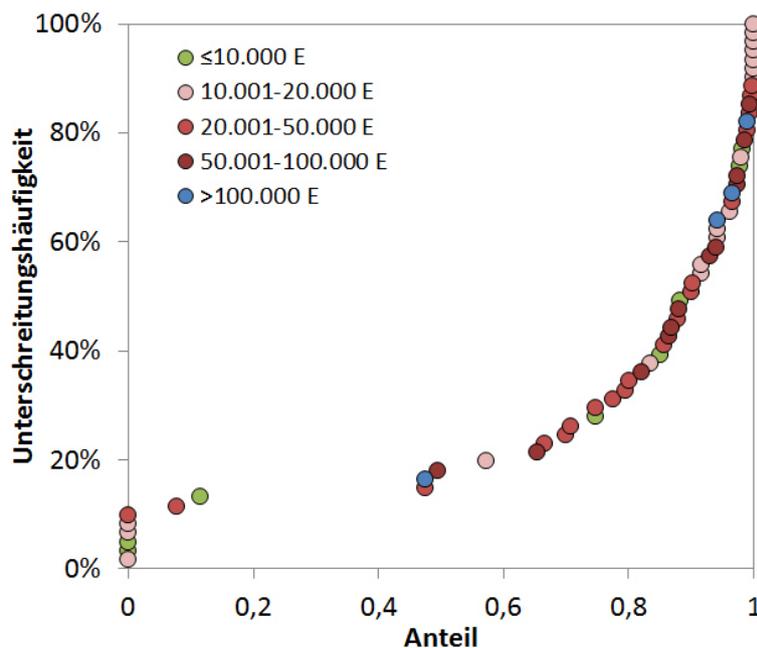


Abbildung 6: Anteil der zur Stromerzeugung verwerteten Klärgasmenge (n = 61)

4.4 Energetische Kenngrößen

In Tabelle 2 sind die für den Ist-Zustand ermittelten energetischen Kenngrößen der in die Auswertung eingeflossenen Faulungsanlagen zusammengefasst.

Tabelle 2: Energetische Kenngrößen (Medianwerte) des Ist-Zustandes, Werte in Klammer: Anzahl der in die Auswertung eingeflossenen Kläranlagen

Kennwert	Einheit	Kläranlagenklasse					
		I	II	III	IV	V	Alle
Eigenstromerzeugung	[kWh/(E·a)]	20,5 (8)	12,5 (18)	13,2 (17)	18,6 (12)	16,0 (4)	14,6 (59)
Fremdstrombezug	[kWh/(E·a)]	30,0 (8)	23,9 (17)	24,7 (17)	17,5 (12)	10,1 (4)	23,8 (58)
Gesamtstromverbrauch	[kWh/(E·a)]	50,6 (8)	37,5 (16)	36,1 (17)	36,1 (12)	29,5 (4)	37,5 (57)
Eigenversorgungsgrad	[%]	30,0 (8)	31,0 (17)	34,0 (17)	45,0 (12)	60,0 (4)	39,1 (58)

Gegenüber den Kennzahlen des DWA-Arbeitsblatt A 216 (DWA, 2015a) ergibt sich im Median über alle Anlagen mit 37,4 kWh/(E·a) ein zum Bundesdurchschnitt vergleichbarer, aber durchweg höherer Gesamtstromverbrauch (Abbildung 7), der mit zunehmender Anschlussbelastung abnimmt. So resultiert mit 50,6 kWh/(E·a) für die Anlagen der Klasse I ein 1,7-fach höherer einwohnerspezifischer Wert als für die Anlagen der Klasse V, wo 29,5 kWh/(E·a) ermittelt wurden.

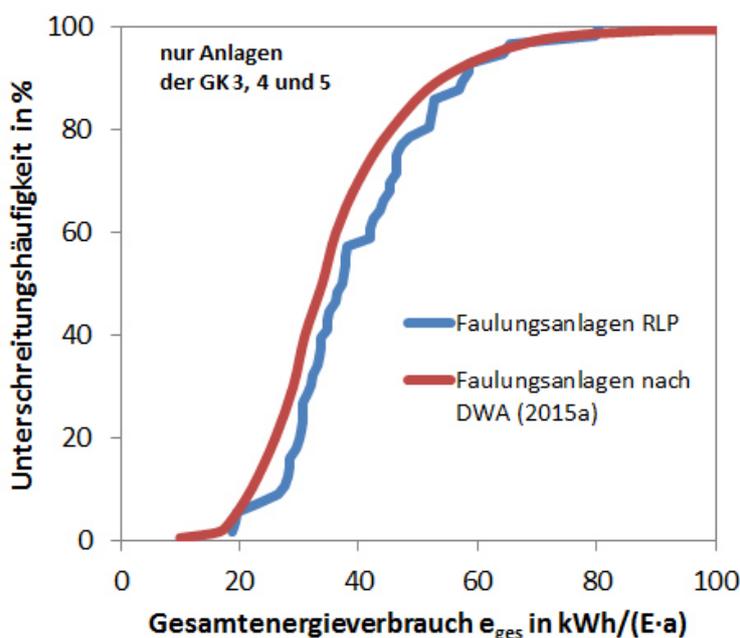


Abbildung 7: Einwohnerspezifischer Gesamtstromverbrauch der Faulungsanlagen in RLP im Vergleich zu den Kennwerten des DWA-Arbeitsblatt A 216 (2015a)

Der Eigenversorgungsgrad nimmt bei höherer Anschlussbelastung und daher auch mit der Größe der Anlagen zu. Dies kann u. a. auf den deutlich geringeren spezifischen Gesamtstromverbrauch bei den größeren Anlagen zurückgeführt werden. Im Median beträgt der Eigenversorgungsgrad der kleinen Anlagen (< 10.000 E) 30 %. Die großen Anlagen (> 100.000 E) weisen dagegen mit 60 % einen doppelt so hohen Eigenversorgungsgrad auf.

5 Potenzialabschätzung

Die resultierenden Kennwerte der Raumbelastungen, der Faulzeiten und Faulraumvolumina zeigen, dass der überwiegende Teil der Faulungsanlagen in RLP freie Faulraumkapazitäten aufweist. Zudem zeigt die Analyse des Ist-Zustandes, dass in verschiedenen Bereichen der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung sowie der Faulgasverwertung ein enormes Optimierungspotenzial vorhanden ist. Das daraus erschließbare Potenzial zur Steigerung der Stromproduktion im Bestand wurde im Rahmen einer Potenzialabschätzung ermittelt. Dabei wurden ausgewählte Maßnahmen im Vergleich zum Ist-Zustand untersucht, die Einfluss auf die Bereiche der Faulgaserzeugung und -verwertung haben.

5.1 Ausnutzung von Kapazitätsreserven der Faulung

In den vorhandenen Faulräumen sind über alle Klassen und insbesondere auf kleinen Anlagen freie Kapazitäten zur Mitbehandlung externer Klärschlämme vorhanden. Diese könnten durch Schlammverbundkonzepte sinnvoll genutzt werden, indem räumlich nahe zueinander liegende Stabilisierungs- und Faulungsanlagen gemeinsam und übergreifend betrieben werden. Die Stabilisierungsanlagen werden dann mit einem geringeren Schlammalter mit der alleinigen Aufgabe der Abwasserbehandlung betrieben (Gretzschel et al., 2012). Der nicht stabilisierte Überschusschlamm dieser Anlagen wird einer nahegelegenen Faulungsanlage mit entsprechenden Kapazitätsreserven zugeführt. Der in diesen Anlagen mit ausgefaulte Schlamm kann zur Energieproduktion genutzt werden und verringert auf den (ehemaligen) Stabilisierungsanlagen den Strombedarf.

In ATV-DVWK (2003) wird bei der mesophilen Faulung eine Aufenthaltszeit im Faulbehälter von 20 Tagen empfohlen. Die im Rahmen der Bestandserhebung ermittelten durchschnittlichen Verweilzeiten liegen teilweise deutlich darüber (vgl. Tabelle 1). Wird gleichzeitig mit der Umsetzung von Schlammverbundkonzepten die hydraulische Verweilzeit der in Frage kommenden Faulbehälter optimiert, ergeben sich weitere Reserven. Um Belastungsspitzen ausreichend abpuffern zu können wird im Rahmen der Potenzialabschätzung eine durchschnittliche Aufenthaltszeit in der Faulung von 25 d angesetzt, womit bereits ein Gasertrag von 440 l/kg oTR_{zu} erreichbar ist (DWA, 2104).

Die in die Auswertung eingeflossenen Faulbehälter weisen nach der Potenzialabschätzung an insgesamt 43 Standorten freie Kapazitäten für die Mitfaulung von rd. 40.000 m³ Fremdschlämmen auf (Abbildung 8). Mit rd. 28.000 m³ besteht das größte Potenzial auf Anlagen der Klasse IV. Dagegen resultiert bei den Anlagen der Klasse V mit etwa 500 m³ Reserven ein nur geringes Potenzial.

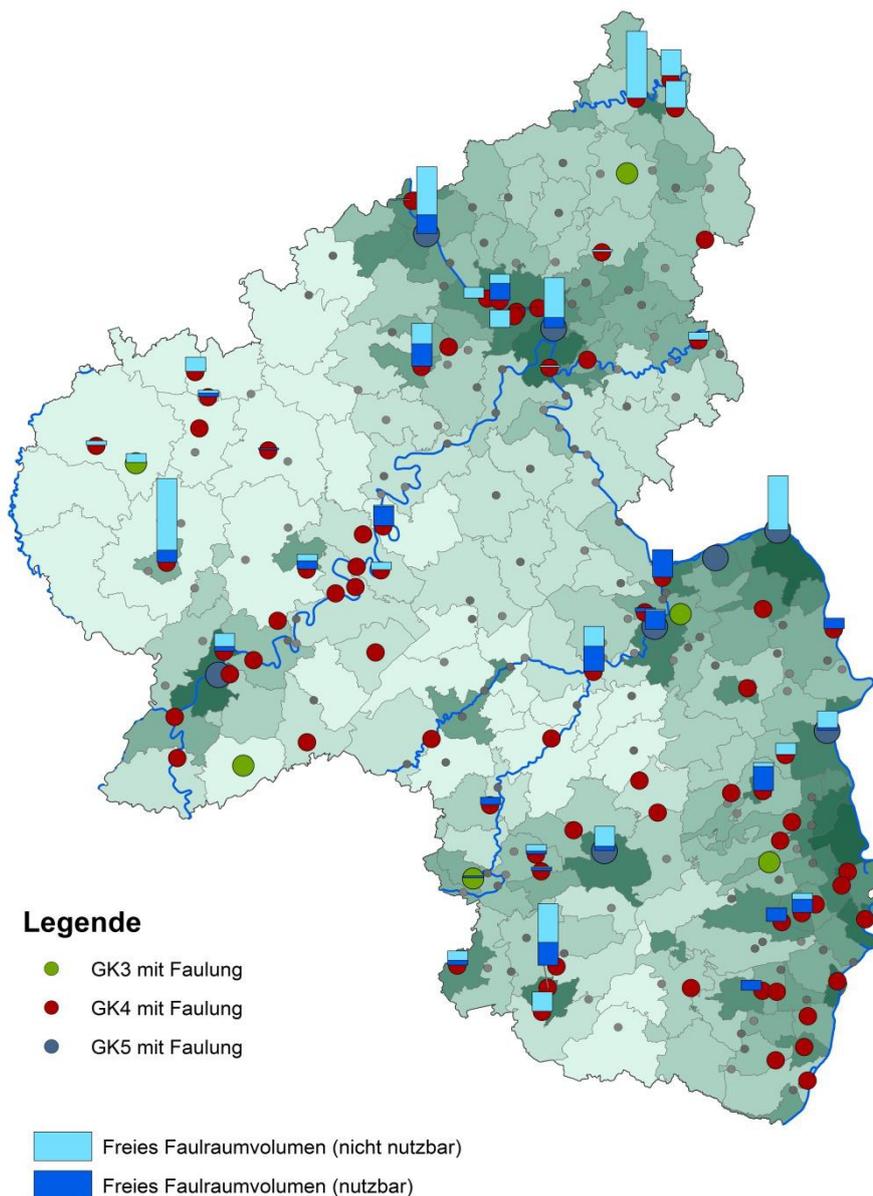


Abbildung 8: Kapazitätsreserven der Faulung zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen
Würde das Gesamtpotenzial vollständig ausgenutzt, könnten durch die Mitbehandlung nicht stabilisierten Überschussschlammes, bei gleichzeitiger Reduzierung der Faulzeit, ca. 9 Mio. m³/a Klärgas und daraus resultierend ca. 20 GWh_{el}/a Strom produziert werden. Nach einer durchgeführten Raumanalyse konnten dagegen lediglich 25 Standorte identifiziert werden, bei denen Stabilisierungsanlagen in einer wirt-

schaftlich vertretbaren Transportentfernung von 15 bis 30 km gelegen sind. Das tatsächlich realisierbare Potenzial fällt somit deutlich geringer aus und reduziert sich um etwa 57 % auf rd. 8,6 GWh_{el}/a.

5.2 Steigerung der Primärschlammmentnahme

Eine Steigerung des Gasertrages in der Faulung kann u. a. auch durch eine Erhöhung des Massenstroms an zugeführtem Primärschlamm erreicht werden. Hierfür bietet sich im Bestand die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln in die Vorklärung (Vorfällung) an, wodurch neben der Phosphorelimination auch die Abscheideleistung in Bezug auf partikuläre organische Abwasserinhaltsstoffe verbessert wird. Hierbei wird angestrebt, so viel energiereichen Primärschlamm wie möglich aus der Vorklärung zu entnehmen und nur so wenig Kohlenstoff (bzw. Phosphor), wie für die Denitrifikation (bzw. für das Biomassenwachstum) benötigt wird, in die biologische Stufe einzuleiten. Als Nebeneffekt wird die biologische Stufe entlastet, was zu Einsparungen bei der Sauerstoffversorgung und damit der erforderlichen Belüftungsenergie führt.

In der Literatur wird durch Vorfällung eine um 30 - 40 % erhöhte Primärschlammmenge angegeben, die in Abhängigkeit von der Durchflusszeit in der Vorklärung zu einer um 30 – 50 % erhöhten Entnahme der organischen Substanz führt (MKULNV, 2014). Aufgrund der meist hohen Durchflusszeiten im Bestand (vgl. Abbildung 4), wird für die Abschätzung des rechnerisch erreichbaren Gasertrags bei Vorfällung der Vergleich zu den Erträgen bei Sedimentation mit einer Durchflusszeit in der Vorklärung von 2 h herangezogen und gemäß MKULNV (2014) mit einer Steigerung um 12 % berechnet.

Über alle betrachteten Kläranlagen (n = 41) kann durch die erhöhte Primärschlammmentnahme mittels Vorfällung die Stromproduktion theoretisch um rund 4,4 GWh_{el}/a gesteigert werden und damit der Stromfremdbezug um das gleiche Maß gesenkt werden.

Eine Reaktivierung stillgelegter Vorklärkapazitäten oder eine Erhöhung der Verweilzeiten durch Neubau von Vorklärbecken wurde im Rahmen der vorliegenden Potenzialabschätzung nicht betrachtet. Die Ersparnisse bei der Belüftungsenergie durch Entlastung der biologischen Stufe wurden ebenso nicht berücksichtigt.

5.3 Senkung des Schlammalters in der Belebung

Die Bestandanalyse hat ergeben, dass trotz getrennter anaerober Schlammstabilisierung häufig zu hohe Schlammalter in der Biologie vorgehalten werden. Die Folge ist, dass leicht abbaubare Organikanteile (oTR) bereits im Belebungsbecken mineralisiert werden und eine weitere Umsetzung des Überschussschlammes in der anaeroben Stufe erschwert wird. Durch ein Herabsetzen des Schlammalters auf das für die Stickstoffelimination erforderliche Maß wird der oTR-Anteil im Überschussschlamm er-

höht, was zu einem potenziell energiereicheren Überschussschlamm führt. Zudem wird der Baustoffwechsel der am Abwasserreinigungsprozess beteiligten Mikroorganismen gesteigert, wodurch zusätzlich die dem Faulbehälter zugeführte Überschussschlammmenge erhöht wird.

Das erforderliche Schlammalter ist neben der Abwassertemperatur vom Reinigungsziel, der Größe der Kläranlage und dem Verhältnis des Denitrifikationsvolumens zum Gesamtbelebungsvolumen abhängig. Es liegt nach ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131 (ATV-DVWK, 2000) für Anlagen mit Stickstoffelimination bei einer Abwassertemperatur von 12 °C bei etwa 8 bis 16 d und ist damit deutlich niedriger, als die im Rahmen der Bestandserfassung für eine Vielzahl von Faulungsanlagen im Jahresdurchschnitt erhobenen Schlammalter (vgl. Abbildung 3).

Die Auswirkungen einer Reduktion des Schlammalters in der Biologie (auf durchschnittlich 17 d) auf den Gasertrag werden überschläglich nach MKULNV (2014) mit einer Steigerung des einwohnerspezifischen Gasanfalls um 3,5 % berechnet. Durch diese Maßnahme könnten auf den 14 im Rahmen der Potenzialanalyse betrachteten Faulungsanlagen insgesamt 0,5 GWh_{el}/a erschlossen werden. Nicht weiter berücksichtigt ist dabei der zusätzliche positive Effekt durch Reduktion des Sauerstoffbedarfs in der biologischen Stufe, was zu weiteren (Energie-)Einsparungen führt.

5.4 Nachrüstung mit effizienten KWK-Anlagen

Die Datenauswertung des Bestandes hat gezeigt, dass auf sechs der 64 Faulungsanlagen keine KWK-Anlagen vorhanden sind. Eine Anlage verstromt das anfallende Gas extern. Die konsequente Nachrüstung der verbleibenden fünf Faulungsanlagen mit effizienten KWK-Anlagen bietet daher ein zusätzliches Stromerzeugungspotenzial.

Nach Schäfer et al. (2015) können für neue KWK-Aggregate elektrische Wirkungsgrade von 32 bis 40 % angesetzt werden. Die sich aus der Nachrüstung von KWK-Aggregaten ergebende zusätzliche Stromproduktion wurde unter Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades von 35 % bei einem mittleren Methangehalt im anfallenden Klärgas von 65 % berechnet.

Durch die Ausrüstung aller 64 Faulungsanlagen mit KWK-Aggregaten, könnte die Stromerzeugung um rd. 1,4 GWh_{el}/a gesteigert werden und der Energiefremdbezug entsprechend gesenkt werden. Örtliche Gegebenheiten, infolgedessen eine Faulgasverstromung nicht umgesetzt werden könnte (z. B. Schlamm-trocknung), wurden nicht berücksichtigt.

5.5 Repowering vorhandener KWK-Anlagen

Der überwiegende Teil der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen verwertet das anfallende Faulgas zur Stromproduktion (Abbildung 6). Der elektrische Wirkungs-

grad der eingesetzten KWK-Aggregate beträgt im Median rd. 29 %, was mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den zeitweisen Betrieb der Aggregate in einem energetisch ungünstigen Teillastbereich sowie auf Verschleiß der Maschinen infolge Alterung zurückgeführt werden kann. Eine einfache Option zur Erhöhung der Stromausbeute bietet daher der Austausch vorhandener ineffizienter, ggf. veralteter KWK-Aggregate gegen modernere und damit effizientere Aggregate.

Für die Berechnung der Potenziale dieser Maßnahme wurde vereinfacht angenommen, dass alle KWK-Anlagen mit einem elektrischen Wirkungsgrad $< 35\%$ modernisiert werden, wodurch bei gleicher Faulgasmenge eine größere Strommenge erzeugt werden kann. Der Methangehalt im Faulgas wurde, entsprechend den Ergebnissen der Datenauswertung des Bestandes, mit 65 % angenommen. Der elektrische Wirkungsgrad der modernisierten KWK-Anlagen wurde analog zur Nachrüstung von KWK-Anlagen mit 35 % angesetzt.

Ebenso wie bei der Nachrüstung von KWK-Anlagen hat die Modernisierung der vorhandenen Aggregate nur Auswirkungen auf die Stromproduktion und den Stromfremdbezug. Die Stromproduktion kann durch diese Maßnahme um insgesamt rd. 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden, respektive der Stromfremdbezug um das gleiche Maß gesenkt werden. Insgesamt kommen nach Datenauswertung 41 der 64 im Rahmen der Bestandserhebung analysierten Faulungsanlagen für ein Repowering in Betracht.

5.6 Desintegration

Abbaugeschwindigkeit und Abbaugrad der Faulung lassen sich weiterhin durch Vorschaltung einer Desintegration steigern. Hierdurch wird in der Faulung die Hydrolyse der organischen Substanz beschleunigt, indem der enzymatische Zellaufschluss durch extern eingebrachte Energie unterstützt wird. Als Folge wird die zu entsorgende Klärschlammmenge reduziert und die Faulgasproduktion gesteigert.

Aufgrund der erforderlichen Investition für die Desintegrationsanlage und des zusätzlichen Betriebspunktes wird das Verfahren in der Regel erst bei Faulungsanlagen ab etwa 50.000 EW wirtschaftlich einsetzbar (MKULNV 2014). In Anlehnung an Müller et al. (2008) wird für diese Anlagen im Rahmen der Potenzialabschätzung eine Steigerung der Klärgasproduktion um 30 % angenommen.

Der erhöhte Zellaufschluss durch Ausstattung aller Anlagen der Klassen IV und V mit einer Klärschlamm-desintegration weist ein theoretisches Potenzial von rd. 3,1 GWh_{el}/a auf. Allerdings wird der Energieverbrauch der Kläranlagen durch den Einsatz der Desintegration erhöht, welcher ebenso wie der erhöhte Sauerstoffbedarf in der biologischen Stufe infolge erhöhter Stickstoff-Rückbelastung nicht berücksichtigt wurde.

5.7 Mehrstufiger Betrieb

Die Mehrzahl der rheinland-pfälzischen Faulungsanlagen betreibt 1-stufige Faulungsanlagen (92 %). Eine mehrstufige Faulung besitzt dagegen reaktionskinetische Vorteile und trägt zur verbesserten Entwässerungseigenschaft des Faulschlammes bei. Die 2-stufige Betriebsweise führt im Vergleich zur 1-stufigen bei der gleichen hydraulischen Verweilzeit im Faulbehälter zu einem um etwa 10 % besseren oTM-Abbau (Rödiger und Kapp, 1990). Alternativ wird derselbe Abbaugrad in einem um ca. 40 % kleineren Gesamtvolumen erreicht. Durch die Umstellung der fünf Anlagen mit mindestens zwei Faulbehältern auf mehrstufigen Faulungsbetrieb, könnte eine Steigerung der Klärgasproduktion um 11 % erzielt werden (MKULNV 2014), wodurch theoretisch jährlich eine zusätzliche Stromproduktion von etwa 1,1 GWh_{el}/a (13 %) generiert werden könnte.

5.8 Maßnahmenvergleich

Die Ergebnisse der Untersuchungen lassen ein beachtliches Potenzial zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung und damit der Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen in RLP erkennen. Bezogen auf die 64 in die Potenzialabschätzung eingeflossenen Faulungsanlagen liegt das ermittelte Gesamtpotenzial für die untersuchten Maßnahmen bei rd. 24 GWh_{el}/a, was einer Erhöhung um den Faktor 1,7 entspricht. Je nach Maßnahme fallen die ermittelten Potenziale unterschiedlich hoch aus (Abbildung 9).

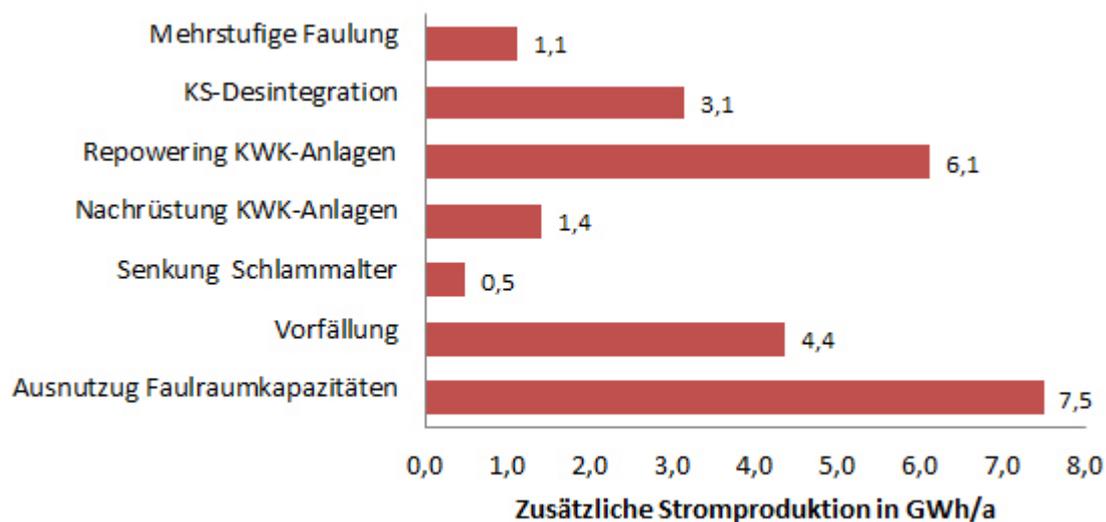


Abbildung 9: Vergleich der verschiedenen Maßnahmen

Das größte Potenzial weist mit rd. 20 GWh_{el}/a die Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten auf. Dieses ist jedoch durch Schlammverbundprojekte alleine, u. a. aufgrund unwirtschaftlicher Transportwege, nur zu etwa einem Drittel erschließbar. Durch eine Nachrüstung von KWK-Anlagen bei Kläranlagen ohne Eigenstromerzeu-

gung und einer Modernisierung der ineffizienten KWK-Anlagen, könnte die Stromerzeugung jährlich um weitere 1,4 bzw. 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden. Durch Erhöhung der Primärschlammabscheideleistung in der Vorklärung durch Vorfällung kann die Stromproduktion um etwa 4,4 GWh_{el}/a (14 %) erhöht werden, wohingegen die Absenkung des Schlammalters in der biologischen Stufe lediglich ein Potenzial in der Höhe von 0,5 GWh_{el}/a (4 %) aufweist.

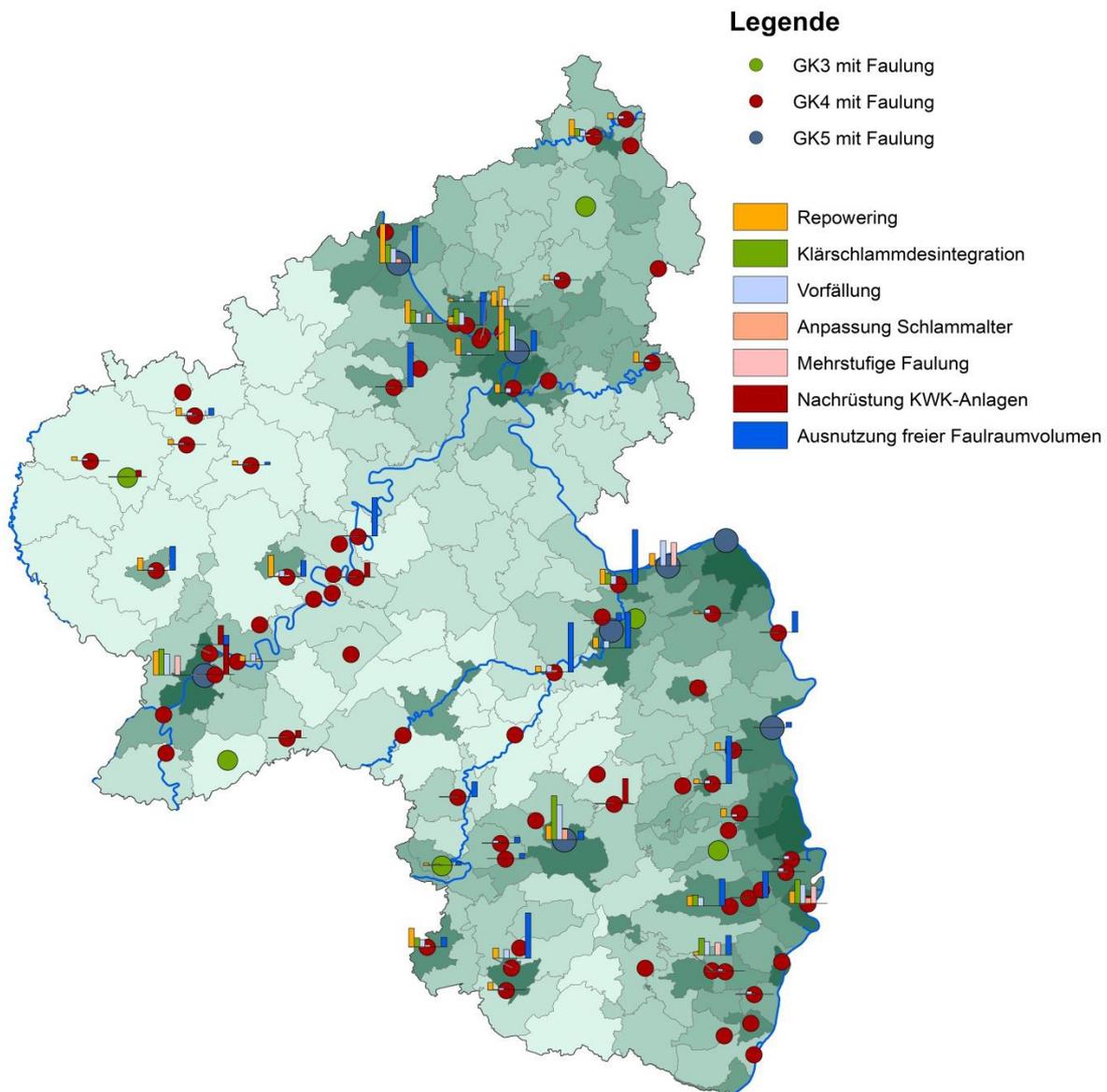


Abbildung 10: Potenziale der untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Stromproduktion der Faulungsanlagen in RLP

Ein kumulatives Gesamtpotenzial, durch Addition aller Einzelmaßnahmen, kann allerdings nicht abgeleitet werden, da sich die Effekte teilweise gegenseitig beeinflussen. So haben beispielsweise Desintegrationsverfahren eine erhöhte Stickstoffrückbelastung aus dem Prozesswasser zur Folge, weswegen im Hinblick auf die Denitrifika-

tion eine Vorfällung häufig nicht mit maximalem Wirkungsgrad realisiert werden kann. Die Eignung der Kombination von Einzelmaßnahmen ist daher im Einzelfall zu untersuchen.

Die Verteilung der Potenziale auf die in die Auswertung eingeflossen Anlagen ist in Abbildung 10 qualitativ dargestellt.

6 Zusammenfassung

Die durchgeführte Betreiberumfrage erlaubt eine umfassende Beschreibung der Ist-Situation rheinland-pfälzischer Faulungsanlagen. Die ermittelten Schlammfrachten liegen im Bereich der bekannten Literaturwerte. Die teilweise hohen Schlammalter in der Belebung lassen Optimierungspotenziale für einen energieeffizienteren Betrieb der Belebungsbecken erkennen. Ebenso weisen die großen einwohnerspezifischen Faulbehältervolumen und die hohen Faulzeiten in Verbindung mit den geringen Raumbelastungen auf Reserven beim Faulraumvolumen hin. Bei der Ermittlung und Bewertung aller die Faulung betreffenden Kennwerte ist im Einzelfall die Zugabe von Fremdschlämmen und Co-Substraten zu beachten. Dies gilt auch für die Kennwerte Abbaugrad, Gasanfall und den Gasertrag.

Betrachtet man die energetischen Kennwerte, zeigt sich erwartungsgemäß, dass größere Faulungsanlagen einen deutlich höheren Eigenstromversorgungsgrad erreichen. Der Gesamtstromverbrauch zeigt demzufolge eine gegenläufige Tendenz mit geringeren spezifischen Verbräuchen der großen gegenüber den kleinen Anlagen.

Die ermittelten Potenziale zur Steigerung der Faulgasproduktion und -verwertung und damit der Stromproduktion im Bestand sind enorm und lassen sich vielfach zeitnah realisieren. Das größte theoretische Potenzial weist mit rd. 20 GWh_{el}/a die Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten auf, wovon rd. 7,5 GWh_{el}/a erschließbar scheinen. Das geringste theoretische Potenzial, welches in höherem Maße erschließbar scheint, liegt dagegen in der Absenkung des Schlammalters in der Belebung (0,5 GWh_{el}/a). Insgesamt liegt das theoretisch ermittelte Potenzial für die untersuchten sieben Maßnahmen bei etwa 24 GWh_{el}/a.

Basierend auf der Bestandsaufnahme und -analyse sowie der Potenzialabschätzung wurden im nächsten Arbeitsschritt anhand von „Checklisten“ unterschiedliche Optimierungsstrategien ausgearbeitet, die zum einen die Abhängigkeiten zwischen der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung und zum andern die einzelnen Anlagenkomponenten berücksichtigen (Dilly et al., 2017). Parallel zu dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise wird anhand von Beispielanlagen die Umsetzbarkeit dieser Strategien betrachtet und detaillierte Konzepte zur Optimierung von Faulungsanlagen erarbeitet (Hien et al., 2017). Darauf aufbauend wurden die Umsetzungsmöglichkeiten für die bestehenden Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz

bewertet. Die beiden letztgenannten Quellen finden sich ebenfalls in diesem Tagungsband.

7 Literatur

- ATV-DVWK (2000): ATV-DVWK-Arbeitsblatt A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef
- ATV-DVWK (2003): ATV-DVWK-Merkblatt M 368, Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V., Hennef
- Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; Seyfried, C. F.; Böhnke, B. (2005): Anaerobtechnik, 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin
- Dilly, T. C., Knerr, H.; Schmitt, T.G. (2017): Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten. Tagungsband Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen, Schriftenreihe des Fachbereichs Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern, Bd. 40 (diese Ausgabe, S.29-50)
- DWA (2009): DWA-Merkblatt M 380, Co-Vergärung in kommunalen Klärschlammfaulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2010): DWA-Merkblatt M 363, Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2014): DWA-Merkblatt M 368, Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2015a): DWA-Arbeitsblatt A 216, Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2015b): DWA-Themenband, Schlammfaulung oder gemeinsame aerobe Stabilisierung bei Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe, T1/2015, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Hennef
- DWA (2015c): Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 „Statistik“: Abwasser und Klärschlamm in Deutschland - statistische Erhebungen, Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 62(1), 46-53

- Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Siekmann, K.; Jakob, J. (2012): Schlammfaulung statt aerober Stabilisierung? Studie zur Wirtschaftlichkeit: Macht sich die Umstellung von aeroben Stabilisierungsanlagen auf Faulungsbetrieb bezahlt? *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik* 2012(3), 27–33.
- Hien S., Hansen J. (2017): Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammfaulung an Beispielanlagen. Tagungsband Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen, Schriftenreihe des Fachbereichs Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern, Bd. 40 (diese Ausgabe, S.51-66)
- Imhoff, K.; Imhoff, K. R. (2007): Taschenbuch der Stadtentwässerung, 30. Aufl., Oldenbourg Industrieverlag, München
- Knerr, H.; Dilly, T.C.; Schmitt, T.G.; Schäfer, M.; Hansen, J.; Siekmann, T. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. *Wasser und Abfall*, (19) Nr. 1-2 , 40-45.
- Knerr, H.; Dilly, T.; Schmitt, T.G.; Hansen, J.; Hien, S. (2016): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz, Deutschland, Sachstandsbericht, Mai 2016
- MKULNV (2014): Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz, Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen, gerichtet an das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, April 2014
- Möller, U. (1994): Schlammengen und -Beschaffenheit. In: H. H. Hahn und R. Trauth (Hg.): Klärschlamm - Ressource oder kostenintensiver Abfall? Karlsruhe (Schriftenreihe des ISWW, Bd. 71), 47–83.
- Müller, E.A.; Kobel, B.; Schmid, F. et al (2008): Handbuch Energie in ARA, Bezug: Verband Schweizerischer Abwasser und Gewässerschutzleute VSA, Zürich.
- 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 Potenzial analysis Vol. 73, S. 87–93. Online verfügbar unter Elsevier-Verlag: DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Statistisches Bundesamt (2015): Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland. Datensatz. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de>, zuletzt geprüft am 02.02.2015

Korrespondenz an:

Dr.-Ing. Henning Knerr
tectraa - Zentrum für Innovative AbWassertechnologien
an der Technischen Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Str. 14
D-67663 Kaiserslautern
Tel.: +49 631 205 3947
Fax: +49 631 205 3905
E-Mail: henning.knerr@bauing.uni-kl.de

Schwerpunkte aus Sicht des Landes Rheinland-Pfalz

Staatssekretär Thomas Griese

Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz

Kurzfassung: Kläranlagen gehören häufig zu den größten Energieverbrauchern der Kommunen. Die Steigerung der Energieeffizienz abwassertechnischer Anlagen mit Energieeinsparmaßnahmen und Energiegewinnung aus Klärschlamm durch Biogasproduktion ist daher einer der Schwerpunkte der rheinland-pfälzischen Landesregierung. Die vielfältigen Initiativen haben bereits zu beachtlichen Erfolgen geführt: Der Stromverbrauch der Kläranlagen wurde merklich reduziert und die Biogasmenge signifikant gesteigert. Es geht nun darum, diese sehr positive Entwicklung voranzutreiben und wo möglich weiter zu intensivieren. Die neuen Vorgaben des Bundes zum Umgang mit Klärschlamm sind für Rheinland-Pfalz eine Chance. Klärschlamm soll als sicherer Rohstoff für Energie und Phosphor genutzt werden. Damit sollen weniger Schadstoffe auf dem Acker und zugleich stabile Gebühren für Bürgerinnen und Bürger sichergestellt werden. Mit dem Projekt ZEBRAS stellt das Land Rheinland-Pfalz nach dem Projekt NAwaS den kommunalen Maßnahmenträgern eine zweite wichtige fachliche Grundlage für die Ausnutzung der bei der Klärschlammbehandlung vorhandenen Optimierungspotenziale zur Verfügung.

Key-Words: Klärschlammverwertung, Energieeffizienz, Optimierung, Energieeinsparung, Gasproduktion

1 Initiativen der Landesregierung zur Energieoptimierung von Kläranlagen

Die Energieeffizienz sowie die Neuausrichtung der Energieversorgung sind zentrale Zukunftsthemen. Kläranlagen gehören dabei häufig zu den größten Energieverbrauchern der Kommunen. Die Steigerung der Energieeffizienz abwassertechnischer Anlagen mit Energieeinsparmaßnahmen und Energiegewinnung aus Klärschlamm durch Biogasproduktion ist daher einer ihrer Schwerpunkte.

Die Landesregierung Rheinland-Pfalz hat bei diesem wichtigen Thema frühzeitig die Initiative ergriffen. Durch die im Juli 2013 veröffentlichten Förderrichtlinien der Wasserwirtschaftsverwaltung hat sie ihre bisherigen Initiativen in diesem Bereich

intensiviert. So können die für die Abwasserentsorgung zuständigen kommunalen Gebietskörperschaften für Energieanalysen, die erforderlichen Maßnahmen und den Einsatz effizienterer, innovativer Techniken noch besser als zuvor durch das Land finanziell unterstützt werden. Mit Rundschreiben vom 04.07.2017 hat das rheinland-pfälzische Umweltministerium die Förderung von Maßnahmen zur Energieoptimierung weiter verbessert. Der sogenannte Energie-Bonus, der zusätzlich zur Regelförderung als Zuschuss gezahlt wird, wurde im Vorgriff auf die für 2018 vorgesehene Modernisierung der Förderrichtlinien von 10% auf 20% erhöht.

Die Landesregierung unterstützt die Kommunen neben der Förderung mit einer Vielzahl von Initiativen. Beispielhaft sind das Benchmarking der Wasserwirtschaft und das Projekt „Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfaulung“ zu nennen. Die zur Umstellung auf Faulungstechnik zur Klärschlammvergärung gehörige Studie (NAwaS) wurde im Auftrag des Landes Rheinland-Pfalz von der TU Kaiserslautern und der Universität Luxemburg bearbeitet. Die Ergebnisse wurden im November 2011 im Rahmen einer Fachtagung an der TU Kaiserslautern präsentiert. Vorhandene Potenziale und vorbildlich umgesetzte Projekte sind in einer Broschüre aus dem Jahr 2014 dokumentiert.

Vor dem Hintergrund der neuen Vorgaben zum Umgang mit Klärschlamm ist herauszustellen, dass die Verfahrensweise der Vergärung auch in Kombination mit einer thermischen Verwertung des Klärschlammes sinnvoll sein kann, denn für diesen Prozess bleibt genügend Biomasse im Klärschlamm enthalten. Von Vorteil ist zudem die Verbesserung der Entwässerbarkeit des Klärschlammes durch die Vergärung. Das ist eine wichtige Grundlage für die weitere Behandlung des Klärschlammes und die Reduktion des Transportaufwandes zu Behandlungs- und verwertungsanlagen für Klärschlamm.

2 Erfolge und weitere Zielsetzungen der Energieoptimierung von Kläranlagen

Die Initiativen der Landesregierung zur Optimierung der Abwasseranlagen zeigen bereits eine deutliche Wirkung. So konnte der Energieverbrauch der Kläranlagen seit 2007 von 260.000 MWh auf 185.000 MWh pro Jahr reduziert werden. Dies wurde durch maschinentechnische und verfahrenstechnische Optimierungen von Anlagen erreicht. Und auch im Bereich der Energieerzeugung hat sich in den letzten Jahren viel getan. So wurden weitere Kläranlagen auf die Schlamm-Vergärungstechnik mit Gasverwertung umgestellt. Beispielhaft sind hier die Kläranlagen Linz-Unkel, Westenburg, Selters, Saulheim, Nothbachtal, Edenkoben und Weilerbach zu nennen. Weitere Projekte ähnlicher Art sind in der Planung bzw. schon in Bau.

Die Umstellungen und die Optimierung vorhandener Faulungsanlagen haben dazu beigetragen, dass in Rheinland-Pfalz derzeit so viel Biogas auf Kläranlagen produziert wird wie noch nie. Die aus Biogas erzeugte Strommenge in Höhe von 48.000

MWh im Jahr würde ausreichen, 16.000 Haushalte mit Strom zu versorgen. Er wird aufgrund des hohen Strombedarfs der Kläranlagen zumeist direkt dezentral vor Ort verbraucht. Die Dinge sind soweit gediehen, dass wir inzwischen in Rheinland-Pfalz die ersten Kläranlagen haben, die nicht nur ihre eigene Energie damit erzeugen, sondern die mit dem Überschuss als Regel- und Speicherenergielieferant zur Verfügung stehen. Die Kläranlage Kaiserslautern nimmt als erste Kläranlage am Regelenergiemarkt teil. Die Kläranlagen Kaiserslautern und Trier haben in 2016 die Energieneutralität erreicht. Mittlerweile sind sie über das Jahr betrachtet sogar energiepositiv.

Es geht nun darum, diese sehr positive Entwicklung voranzutreiben und wo möglich weiter zu intensivieren. Konkretes Ziel ist es, durch weitere Optimierungs- und Umstellungsmaßnahmen den landesweiten Stromverbrauch von Kläranlagen auf 150.000 MWh zu reduzieren und die Stromerzeugung auf 70.000 MWh/a zu steigern. Die in Faultürmen für die Gaserzeugung genutzte Klärschlammmenge soll durch die Umstellung von weiteren Kläranlagen auf diese Technik und die Bildung von sogenannten semizentralen Schlammbehandlungszentren von derzeit 60% auf 90 % gesteigert werden. Es geht darum, für alle 670 Kläranlagen in Rheinland-Pfalz eine hohe Energieeffizienz zu erreichen.

3 Herausforderung einer zukunftsgerechten Klärschlammverwertung, Projekt ZEBRAS

Zur Erreichung dieser ehrgeizigen Ziele hat die Landesregierung mit dem Kooperationsprojekt „Regionale Klärschlammstrategien“ und dem Projekt ZEBRAS (Zukunftorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz) weitere bedeutende Initiativen gestartet. Das Kooperationsprojekt mit den kommunalen Spitzenverbänden des Landes Rheinland-Pfalz und dem Landesverband der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall unterstützt die Kommunen dabei, die Herausforderungen, die sich aus den neuen Vorgaben im Umgang mit Klärschlamm ergeben, positiv zu gestalten. Wesentliche Inhalte der Kooperation sind die Bereitstellung von aktuellen Informationen und Daten sowie die Unterstützung der kommunalen Zusammenarbeit. Die neuen Vorgaben des Bundes zum Umgang mit Klärschlamm sind für Rheinland-Pfalz eine Chance. Klärschlamm soll als sicherer Rohstoff für Energie und Phosphor genutzt werden. Damit sollen weniger Schadstoffe auf dem Acker und zugleich stabile Gebühren für Bürgerinnen und Bürger sichergestellt werden.

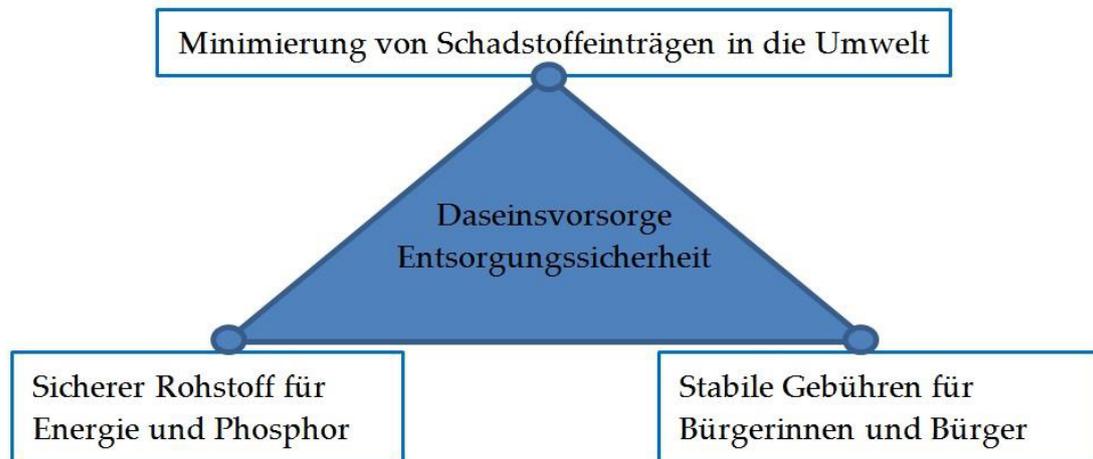


Abbildung 1: Strategie zum Umgang mit Klärschlamm in Rheinland-Pfalz

Informationen zu der Kooperation sind im Internet abrufbar unter:

http://www.klaerschlammkoooperation-rlp.de/klaerschlammkoooperation_rlp/

Mit dem Projekt ZEBRAS stellt das Land Rheinland-Pfalz nach dem Projekt NAwaS den kommunalen Maßnahmenträgern eine zweite wichtige fachliche Grundlage für die Ausnutzung der bei der Klärschlammbehandlung vorhandenen Optimierungspotenziale zur Verfügung. In dem Projekt wurde im Auftrag des Umweltministeriums von der Technischen Universität Kaiserslautern und der Universität Luxemburg mit weiteren Partnern die gesamte Verfahrenskette des Schlammweges von der Abwasserreinigung über die Vergärung in den Faultürmen bis hin zur Gasverwertung zur Erzeugung von Strom und Wärme hinsichtlich vorhandener Optimierungspotenziale betrachtet. Grundlage war eine detaillierte Bestandsaufnahme der rheinland-pfälzischen Kläranlagen mit Faulungstechnik. Mit ZEBRAS verbindet das rheinland-pfälzische Umweltministerium zur Unterstützung der kommunalen Gebietskörperschaften folgende konkreten Ziele:

- Nutzung der vielfältigen Erfahrungen von Kläranlagen mit vorhandener Faulungstechnik für Optimierungsmaßnahmen und Neuanlagen. Dadurch soll die Abwasserreinigung auf einem hohen Niveau sichergestellt und gleichzeitig der Energieverbrauch minimiert und die Energieerzeugung maximiert werden.
- Das aufbereitete Expertenwissen soll die Kommunen dabei unterstützen, die Anpassungen, die aufgrund der neuen Vorgaben zum Umgang mit Klärschlamm erforderlich werden, umweltverträglich und kosteneffizient zu gestalten.

- Darstellung und Nutzung des gesamten Optimierungspotenzials für Kläranlagen mit Faulungstechnik.
- Ableitung einer Methodik für Planer und Betreiber zur Bestimmung optimierter Randbedingungen eines Faulungsbetriebs zur Klärschlammvergärung in Abhängigkeit von Gasverwertung und nachgeschalteter Klärschlammbehandlung bzw. Klärschlammverwertung.

Die Ergebnisse des Projektes sind somit wichtige Grundlage für die Umsetzung von konkreten Maßnahmen im Bereich der Klärschlammbehandlung, auch als Vorbereitung auf eine thermische Behandlung und die Rückgewinnung des Nährstoffs Phosphor. Die fachlichen Inhalte werden in den Vorträgen zu dem Projekt näher erläutert.

Korrespondenz an:

Dipl.-Ing. Thomas Jung
Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich Straße 1
55116 Mainz
Tel.: 06131/16-4956
Fax: 06131/16-174956
E-Mail: Thomas.Jung@mueef.rlp.de

Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten

Timo C. Dilly^{1,2}, Henning Knerr^{1,2}, Theo G. Schmitt^{1,2}

¹tectraa – Zentrum für Innovative AbWassertechnologien, TU Kaiserslautern

²Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern

Kurzfassung: Im Projekt ZEBRAS werden nachhaltige Konzepte zur Faulung und Faulgasverwertung unter Einbeziehung der Verfahrenskette Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung entwickelt. Der Beitrag liefert einen Überblick über die im Projekt entwickelten Checklisten zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen bei Faulungsanlagen. Die Checklisten ermöglichen eine Betrachtung von Optimierungsansätzen in den Bereichen Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Gasverwertung. Der Aufbau der Checklisten wird im Detail erläutert. Des Weiteren werden die Grundlagen zur Checkliste Verbesserung der Abscheideleistung in der Vorklärung vorgestellt.

Key-Words: Faulungsanlagen, Optimierungsstrategien, Checklisten, Gasproduktion, Vorklärung

1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien im Themenfeld der Klärschlammfaulung sowie der Entsorgung des ausgefaulten Schlammes veröffentlicht. So werden von Horn et al. (2009) im Forschungsvorhaben „Kläranlage der Zukunft“ Möglichkeiten zur Erhöhung der Faulgasproduktion beschrieben und unterschiedliche anaerobe Verfahrenskonzepte vorgestellt. Die Studien von MULEWF RLP (2012), MKULNV NRW (2014) und MUKW BW (2015) beschreiben generelle Maßnahmen zur Energieeinsparung auf Kläranlagen und Optimierungsansätze für Kläranlagen mit Faulung. In diesem Zusammenhang wird bereits explizit auf Möglichkeiten zur Erhöhung der Eigenstromerzeugung bei Faulungsanlagen eingegangen (MKULNV NRW 2014). Von Hansen et al. (2009) werden Faulungsanlagen als Zentren von Klärschlammverbundkonzepten beschrieben. Dieser Ansatz ist auch vom MLUV MP (2013) in der Studie zur zukünftigen Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm mit aufgenommen. In Rheinland-Pfalz wurde die Idee, mehrere Kläranlagen in einem Verbund zusammenzuschließen, um die Entsorgung des Klärschlammes zentral

sicherzustellen, ebenfalls weiterverfolgt. Die Projekte Klärschlammkonzept für den Rhein-Hunsrück-Kreis (Siekmann et al. 2016) und für die Region Trier (Guggenmos und Taudien 2016, Taudien und Kolisch 2017) unterstreichen dabei die zentrale Rolle der Faulungsanlagen als Schlammbehandlungszentrum. Des Weiteren wurden aktuell in den vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS geförderten Verbundprojekten - „Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende“ (E-Klär) und „Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft: Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und -verbrauch“ (ESiTI) Maßnahmen zur Optimierung der Verfahrenskette von Kläranlagen mit Faulung untersucht. Im Projekt E-Klär wurden innovative Verfahren zur Ausschleusung von chemisch gebundener Energie aus dem Abwasserstrom (Rechengutpresse, Vorfällung, Feinsiebung anstatt Vorklärung) und die Desintegration von Überschussschlamm mit einer Thermodruckhydrolyse erprobt. Im Projekt ESiTI wurde eine Faulung mit Biomasseanreicherung (Hochlastfaulung) und ebenfalls eine Thermodruckhydrolyse betrieben. Außerdem wurde in diesem Projekt die bedarfsorientierte Zugabe von Co-Substraten zur Erhöhung der Gasproduktion untersucht.

Die im Projekt ZEBRAS erfolgte Bestandsanalyse und die Potenzialabschätzungen zeigen deutlich, dass bei Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz erhebliche Optimierungspotenziale vorhanden sind. Wie von Knerr et al. (2017) im Beitrag „Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz“ beschrieben, wurden bei der Potenzialabschätzung die Maßnahmen Vorfällung, Reduzierung des Schlammalters in der Belebung, Klärschlamm-desintegration, mehrstufige Faulung, Ausnutzung von freien Faulraumkapazitäten, Repowering und Nachrüstung von KWK-Einheiten betrachtet und die theoretischen Energiegewinne ermittelt.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass eine Vielzahl von Optimierungsmaßnahmen der Faulung bereits bekannt ist und die theoretisch ermittelten Potenziale für eine Umsetzung der jeweiligen Maßnahmen sprechen. Da jedoch die komplexe Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -entsorgung empfindlich auf Verfahrensumstellungen reagiert und anlagenspezifische Randbedingungen es erschweren, die vorgegebenen Optimierungsziele zu erreichen, werden in der Praxis die betrachteten Optimierungsmaßnahmen nur zögerlich umgesetzt. Daher ist die Entwicklung von ganzheitlichen Optimierungsstrategien ein wichtiger Baustein dafür, dass erfolgreich erprobte Verfahrenskonzepte und hinreichend bekannte Optimierungsmaßnahmen in der Praxis Fuß fassen können.

2 Entwicklung von allgemeingültigen Checklisten

Bei der Entwicklung von Optimierungsstrategien für Faulungsanlagen ist es wichtig, die Auswirkungen von Umstellungen bei der Abwasserreinigung, Schlammbehand-

lung und -verwertung zu berücksichtigen und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Verfahrensstufen bei der Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen zu beachten. Die einzelnen Optimierungsansätze dürfen daher nicht losgelöst voneinander betrachtet werden. Generell können Optimierungsansätze in drei Bereichen unterschieden werden (Abbildung 2.1). Zum einen kann sich eine Anpassung der Abwasserreinigung positiv auf die Faulung auswirken, zum andern sind Ansätze direkt bei der Schlammbehandlung zu finden. Diese beiden Ansätze beeinflussen sich immer gegenseitig, da Prozesswässer der Schlammbehandlung der Abwasserreinigung zugeführt werden und somit ein Kreislauf in der Verfahrenskette entsteht. Die Gasverwertung kann unabhängig davon verbessert werden, muss jedoch an Änderungen bei der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung angepasst werden.

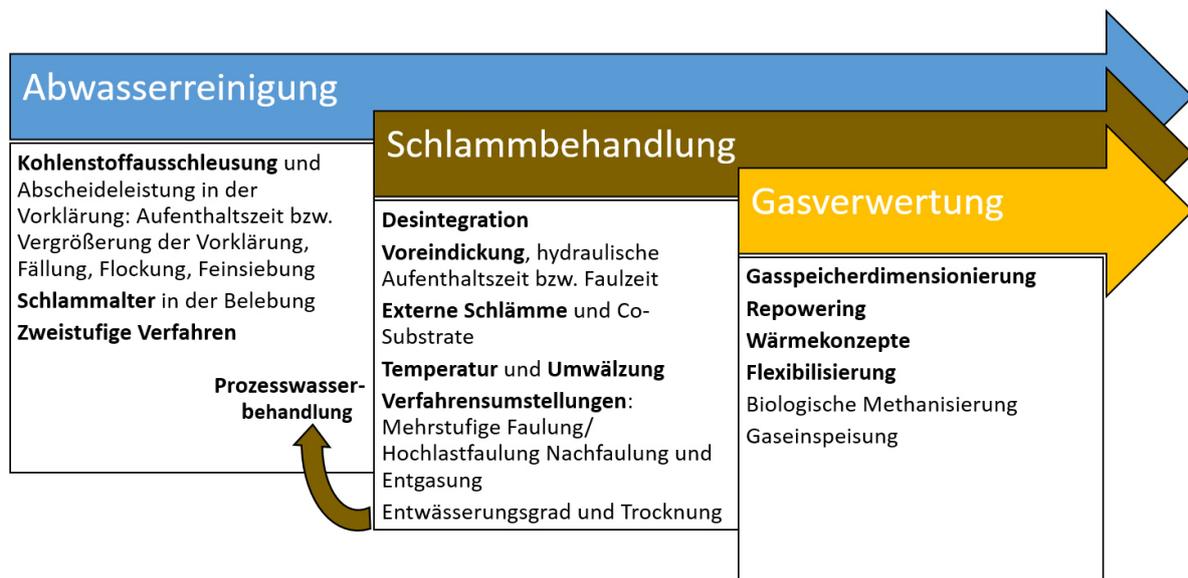


Abbildung 2.1: Optimierungsansätze in der Verfahrenskette von Faulungsanlagen

Ansätze zur Optimierung der **Abwasserreinigung** in Hinblick auf eine Optimierung der Faulung zur Erhöhung der Gasausbeute werden vor allem durch eine Verbesserung der Abscheideleistung in der Vorklärung erreicht. Primärschlamm erzielt einen deutlich höheren Gasertrag als Überschussschlamm. Ein vermehrter Abzug von energiereichem Primärschlamm führt daher zu einer erhöhten Gasproduktion und einer Entlastung der Belebungsstufe. Die Primärschlammmenge kann durch eine Fällung oder die Kombination von Fällung, Flockung und Mikrosiebung weiter erhöht werden. Da sich die Abscheideleistungen von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor jedoch stark unterscheiden, müssen immer die für die biologische Abwasserreinigung notwendigen Nährstoffverhältnisse berücksichtigt werden. Ein weiterer Optimierungsansatz in der Abwasserreinigung ist die Absenkung des Schlammalters in der Belebung. Mit steigendem Schlammalter nimmt der Organikanteil im Schlamm deutlich ab und durch den höheren Abbaugrad fällt etwas weniger Überschussschlamm an. Die Einstellung eines niedrigeren Schlammalters führt somit

nicht nur zur Einsparung von Belüftungsenergie, sondern auch zur Erhöhung der Faulgasproduktion.

Die **Schlammbehandlung** kann man bei Faulungsanlagen in die Schlammvorbehandlung, die Faulung und die Schlammnachbehandlung unterteilen. In Abhängigkeit vom Schlammverwertungskonzept ist der Übergang zur Schlammverwertung fließend. Bei der Schlammvorbehandlung ist vor allem die Installation einer Klärschlamm-Desintegration von Bedeutung. Vier der 64 Kläranlagen in Rheinland-Pfalz, die bei der ZEBRAS-Befragung erfasst wurden, haben bereits Erfahrungen mit dieser Technologie gesammelt. Bei der Voreindickung kann durch eine Erhöhung des TR-Gehalts die hydraulische Aufenthaltszeit im Faulbehälter (= Faulzeit) erhöht werden. Dies wirkt sich positiv auf hydraulisch überlastete Faulbehälter aus, da bei längeren Aufenthaltszeiten auch der Abbaugrad höher ist. Außerdem können auch zusätzliche freie Faulraumvolumina generiert werden. Die Ausnutzung von freiem Faulraumvolumen durch die Mitbehandlung von Fremdschlämmen oder Co-Substraten führt in der Regel in Abhängigkeit von der zugegebenen Substratmenge zu einer signifikanten Steigerung der Gasproduktion. Die Auswertung der ZEBRAS-Befragung hat ergeben, dass 11 der 64 ausgewerteten Kläranlagen in Rheinland-Pfalz bereits Co-Substrate annehmen und 15 der 64 Anlagen Fremdschlämme von anderen Anlagen angeliefert bekommen. Werden diese Schlämme direkt der Faulung zugeführt, ist eine deutliche Steigerung der Gasproduktion möglich. Dieses Konzept wird z.B. auf der Kläranlage Selters umgesetzt (Jakob et al. 2013). Neben einer Anpassung der Faulzeit sind die weiteren Ansätze zur Optimierung der Faulung die Verbesserung der Durchmischung und die Anpassung der Temperatur. Vor allem beim Neubau von Faulungsanlagen ist auch die Wahl des Verfahrens entscheidend. So können mehrstufige Faulungsanlagen, hochbelastete Faulungsanlagen oder Faulungsanlagen mit getrennter Schlammanreicherung (Hochlastfaulungen) mit deutlich geringeren Faulzeiten betrieben werden, wodurch Faulraumvolumen eingespart werden kann. Diese Prinzipien werden in Rheinland-Pfalz z.B. bei der Kompaktfaulung auf der Kläranlage Linz-Unkel (Jakob und Siekmann 2012) oder der hochbelasteten Faulung mit Nachvergärung in Weilerbach (Krieger et al. 2012; Schmitt et al. 2017) und der Hochlastfaulung auf der Kläranlage in Edenkoben (Sternad und Waelkens 2017) ausgenutzt. Eine Umstellung von parallel auf reihenbetrieb erscheint daher ebenfalls sinnvoll, da eine günstigere Verweilzeitverteilung in den Reaktoren dazu führt, dass ein besserer Abbau bei gleichem Gesamtvolumen erreicht wird bzw. bei gleichem Abbaugrad ein geringeres Volumen erforderlich ist. Wie bereits beschrieben, fallen in der Schlammbehandlung stickstoffreiche Prozesswässer an. Werden diese dem Kläranlagenzulauf zugeführt, wird in der Regel das C:N-Verhältnis in der Belebungsstufe verringert. Dadurch kommt es zu einer Reduktion der Denitrifikationskapazität. Bei einer Trocknung des Klärschlammes am Standort oder einer Mitbehandlung von Fremdschlämmen ist die Belastung durch Prozesswasser besonders zu berücksichtigen. Dabei wird es in einigen Fällen notwendig sein, eine getrennte Prozesswasser-

behandlung auf der Kläranlage zu implementieren. In Rheinland-Pfalz ist dieses Konzept auf der Kläranlage Betzdorf in Wallmenroth/Muhlau mit einer Deammonifikation des Prozesswassers umgesetzt (Zimmerhackel 2016).

Offensichtliche Optimierungen bei der **Gasverwertung** sind Ansätze zur Optimierung des Gasspeichers oder zur Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung. Das sogenannte Repowering bzw. die Erneuerung alter KWK-Anlagen ist dabei meist die erste Option, die zu einer deutlichen Steigerung der Stromerzeugung führt. Weniger bekannt sind hingegen das Umsetzen von Wärmekonzepten oder die Flexibilisierung der Strom- oder auch der Gaserzeugung. Die bedarfsorientierte Stromerzeugung und die Einbindung von Speicherkonzepten sind notwendig, um eine autarke Energieversorgung der Kläranlage zu erreichen. So betreibt die Kläranlage Kaiserslautern unter anderem eine Redox-Flow Batterie, um die Schwankungen im Energiedargebot auszugleichen (Grüner 2016). Ferner werden im Projekt arrivee (Schmitt et al. 2017) weitere Zukunftskonzepte, wie die Integration von Power-to-Gas auf Kläranlagen, die Aufbereitung des Faulgases durch biologische Methanisierung und die Einspeisung des aufbereiteten Gases ins Erdgasnetz, dargestellt. Des Weiteren ist in den Tagungsbeiträgen von Schäfer et al. (2017) sowie von Salomon und Pyro (2017) eine mögliche Integration von Kläranlagen in Flexibilitäts- und Speicherkonzepte sowie eine Teilnahme am Regelenergiemarkt näher beschrieben.

Die genannten Ansätze der Optimierung sind somit weitgehend bekannt und deren Auswirkung in der Literatur hinreichend beschrieben. Ziel der Optimierungsstrategien ist es nun, den handelnden Personen (z.B. Kläranlagenbetreibern, Planern und Entscheidungsträgern) die Optimierungspotenziale der eigenen Anlage aufzuzeigen und eine Vorgehensweise zur Identifizierung der Potenziale an die Hand zu geben. Die Schwierigkeit besteht darin, dass im Regelfall bei unterschiedlichen Kläranlagen auch von unterschiedlichen Voraussetzungen auszugehen ist. So unterscheiden sich je nach Anlage die betriebenen Aggregate, die verfahrenstechnische Umsetzung, die baulichen Gegebenheiten und die anlagenspezifischen Rahmenbedingungen. Eine anlagenbezogene Betrachtungsweise ist daher unabdingbar, um die richtigen Schlussfolgerungen treffen zu können. Für die Entwicklung von übertragbaren und trotzdem konkreten Optimierungsstrategien ist es notwendig, die Zusammenhänge allgemeingültig darzustellen.

Im Folgenden werden daher Checklisten vorgestellt, die die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Optimierungspotenzialen beschreiben und dem Anwender ermöglichen, die anlagenspezifischen Eigenheiten der jeweiligen Kläranlage zu berücksichtigen. Es erfolgt demnach keine konkrete Auslegung von Verfahrensstufen, sondern der Anwender kann die Checklisten in einem ersten Schritt zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen verwenden. Im nächsten Schritt werden die Maßnahmen zur Erschließung des Potenzials dargestellt und darauf aufbauend die möglichen Auswirkungen in der Verfahrenskette beschrieben. Die Checklisten wurden gemein-

sam mit den Projektpartnern erstellt und in Rücksprache mit ausgewählten, am Projekt beteiligten Kläranlagenpersonal evaluiert. Grundlage zur Erstellung der Checklisten bilden eine umfangreiche Literaturrecherche, die Analyse des IST-Zustandes der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz sowie die Betriebsdatenauswertung und Detailbetrachtung von vier Beispielanlagen.

Bereits existierende Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, wie der Energiecheck und die Energieanalyse nach DWA A-216 (DWA 2015), werden mit den hier entwickelten Checklisten um einen weiteren Schritt ergänzt. Im Rahmen der Energieanalyse wird ermöglicht, die Kläranlage im Vergleich zu anderen Anlagen einzuordnen, die Energiekenndaten mit anlagenspezifischen Idealwerten abzugleichen und ein generelles Optimierungspotenzial zu erkennen. Darauf aufbauend und deutlich darüberhinausgehend zeigen die entwickelten Checklisten direkte Ansatzpunkte zur Optimierung der Faulung und Faulgasverwertung auf. Sie können angewendet werden, wenn eine Optimierung der Anlage bereits vorgesehen ist. Für Faulungsanlagen, die beim Energiecheck und der Energieanalyse sehr gut abschneiden, bieten die Checklisten dennoch die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen und zu heben, da auch eine Verfahrensumstellung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden.

3 Checklisten zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen

Insgesamt wurden 16 Ansätze zur Optimierung betrachtet und 13 Checklisten zur Identifizierung des Optimierungspotenzials erstellt. Jede Checkliste kann zwar Ausgangspunkt einer Optimierungsmaßnahme sein, sie ist jedoch immer im Kontext der gesamten Verfahrenskette mit anderen Checklisten verknüpft. Dadurch wird sichergestellt, dass die Auswirkungen der Maßnahme auch bei nachfolgenden Verfahrensstufen berücksichtigt werden. In Abbildung 3.1 sind die erstellten Checklisten als grüne Kreise dargestellt. Die Pfeile verdeutlichen die Verknüpfungen zwischen den einzelnen Checklisten. Grau sind Ansätze der Optimierung dargestellt, für die keine Checklisten erstellt wurden.

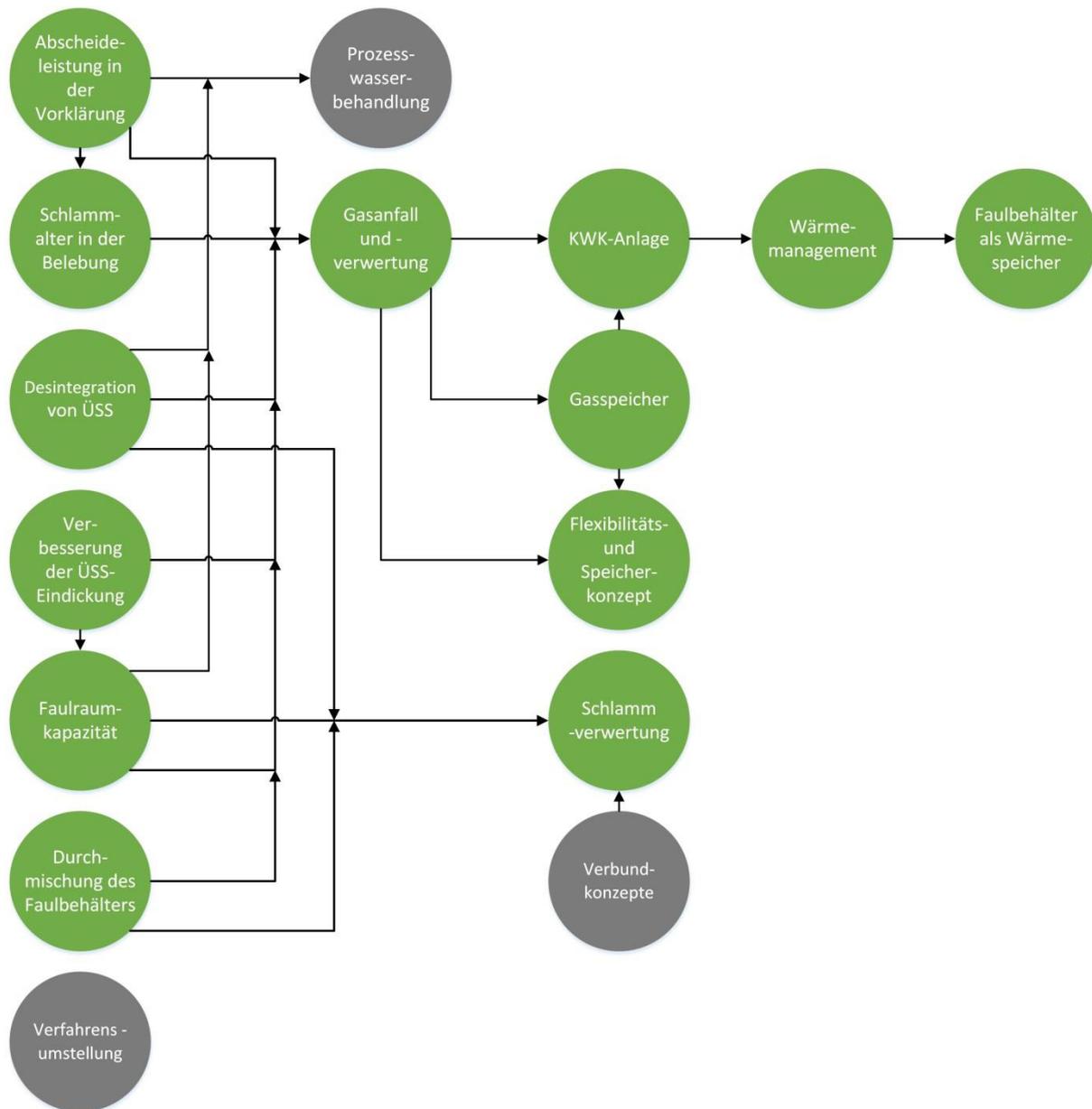


Abbildung 3.1: Übersicht und Verknüpfung der Checklisten

Beginnt man, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, beispielsweise mit der Checkliste zur Optimierung der Abscheideleistung in der Vorklärung (I), muss man abgesehen von den Ansätzen zur Prozesswasserbehandlung (II) auch die Checklisten Schlammalter in der Belebung (II) und die Checkliste Gasfall und -verwertung (II) berücksichtigen. Die Checkliste Gasfall und -verwertung (II) verweist wiederum auf die Checklisten KWK-Anlagen, Gasspeicher und Flexibilitäts- und Speicherkonzept (III). Von der Checkliste KWK-Anlage (III) besteht eine Verknüpfung zum Wärmemanagement (IV) und der Ausnutzung des Faulbehälters als Wärmespeicher (V).

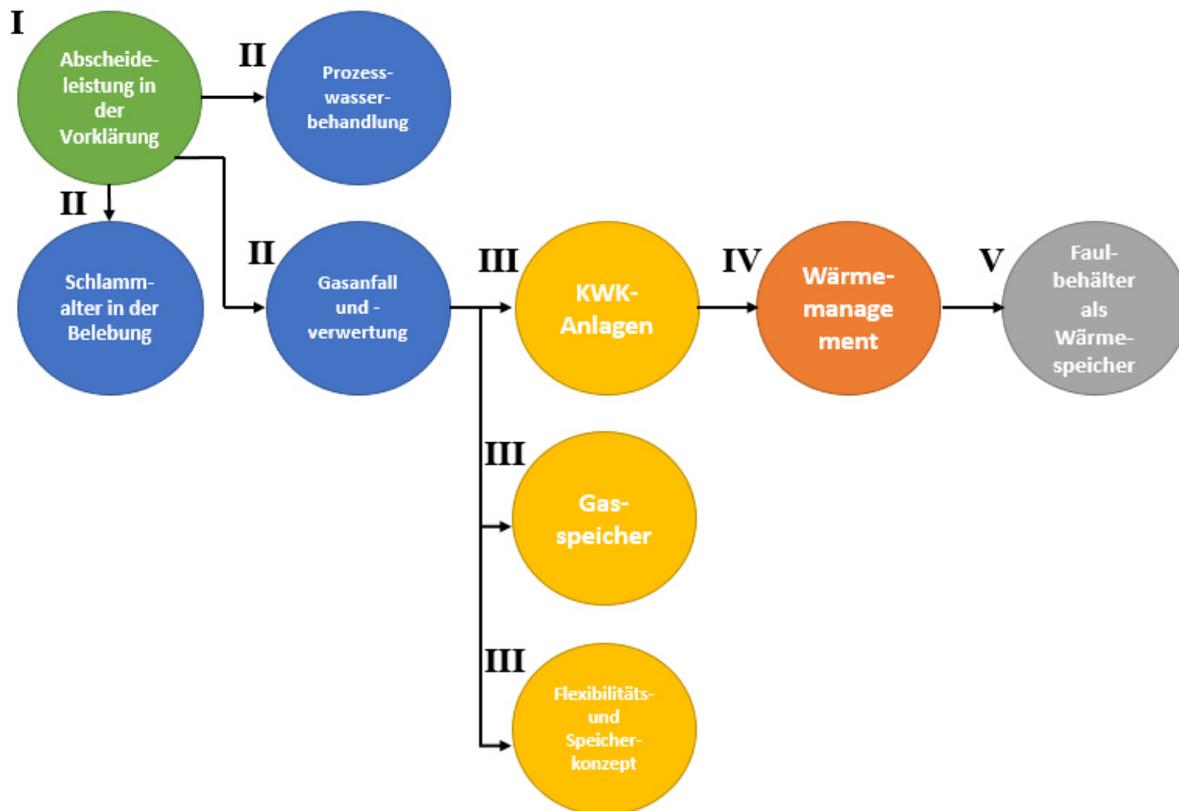


Abbildung 3.2: Checkliste Abscheideleistung in der Vorklärung und deren Verknüpfungen

3.1 Aufbau der Checklisten

Die Checklisten sind als Flussdiagramme hierarchisch aufgebaut. Die Vorgehensweise kann in fünf Punkten beschrieben werden:

1. Einheitliche Ermittlung der Eingangsdaten
2. Erkennen des Optimierungspotenzials
3. Aufzeigen von Maßnahmen zur Optimierung
4. Darstellung von Auswirkungen auf die Verfahrenskette
5. Umsetzung der Optimierungsstrategie

Im Folgenden werden die einzelnen Punkte sowie die Symbole in den Diagrammen anhand eines Beispiels erläutert.

3.1.1 Einheitliche Ermittlung der Eingangsdaten

Um zu gewährleisten, dass die Eingangsdaten für die Checklisten einheitlich ermittelt werden, wurde ein Datenkatalog erstellt, in dem die einzelnen Rechenschritte genau beschrieben sind. Um die Checklisten nicht zu überfrachten wurde dieser ausgelagert. Der Verweis auf den Katalog erfolgt in den Checklisten mit blauen Parallelogrammen (siehe Abbildung 3.3).

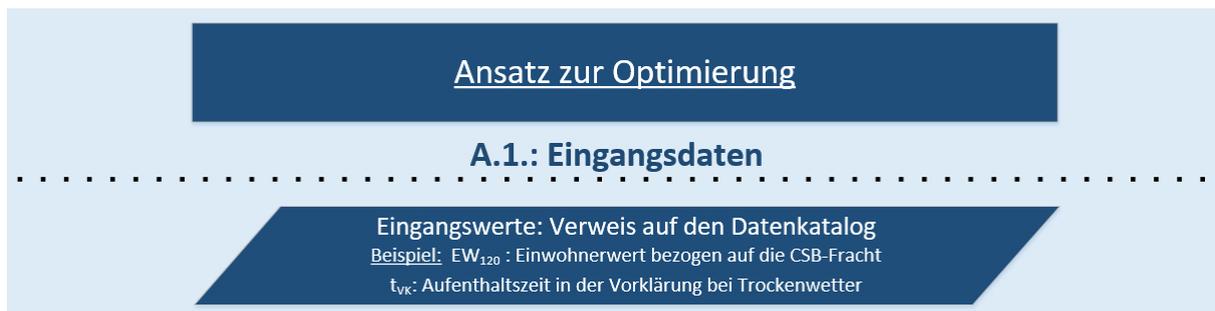


Abbildung 3.3: Ermittlung der Eingangsdaten - Checklistenbeispiel

3.1.2 Erkennen des Optimierungspotenzials

Unter Verwendung der zuvor erhobenen Eingangsdaten kann der Anwender entscheiden, ob bei dem vorliegenden Ansatz ein Potenzial für die betrachtete Anlage vorhanden ist. Diese Entscheidung wird mit einer Ja-Nein-Abfrage durchgeführt, für die im Projekt Orientierungswerte festgelegt wurden. Dabei durchläuft der Anwender die Checkliste bzw. das Flussdiagramm von oben nach unten, wobei jeweils die obere linke Ecke als Startpunkt definiert wurde. Die Ja-Nein-Entscheidungen werden mit blauen Rauten abgefragt und das Vorhandensein eines Optimierungspotenzials wird mit Smiley-Symbol dargestellt (siehe Abbildung 3.4).

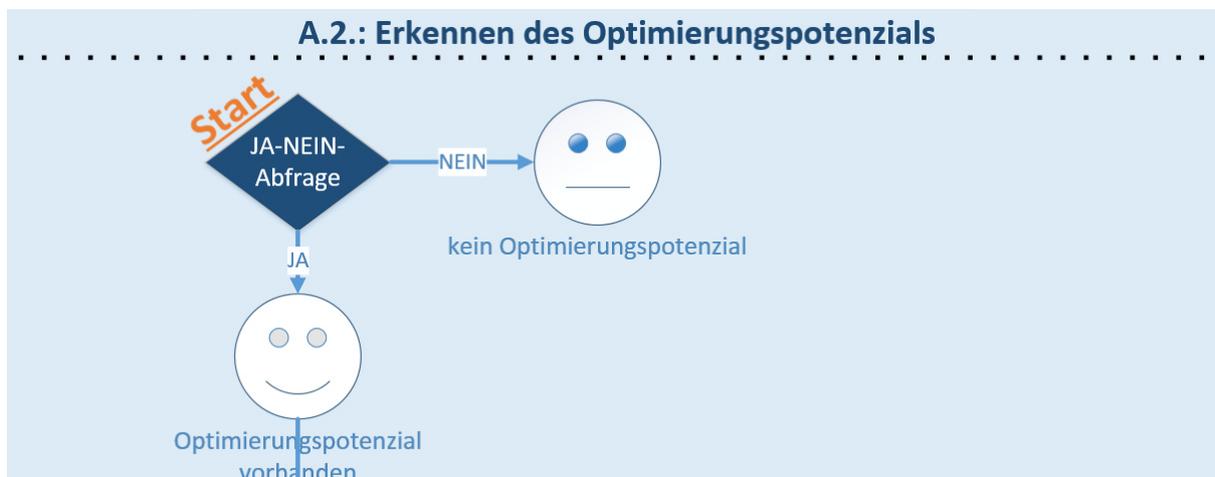


Abbildung 3.4: Erkennen des Optimierungspotenzials - Checklistenbeispiel

3.1.3 Aufzeigen von Maßnahmen zur Optimierung

Ist ein Optimierungspotenzial vorhanden, werden dem Anwender Maßnahmen zur Optimierung vorgeschlagen. Um die passende Maßnahme auszuwählen, werden unter Umständen weitere anlagenspezifische Gegebenheiten abgefragt. Dies erfolgt ebenfalls unter Verwendung von Ja-Nein-Entscheidungen. Eine von anlagenspezifischen Gegebenheiten unabhängige Auswahl eines Verfahrens wird mit einem Dreieck dargestellt (siehe Abbildung 3.5).

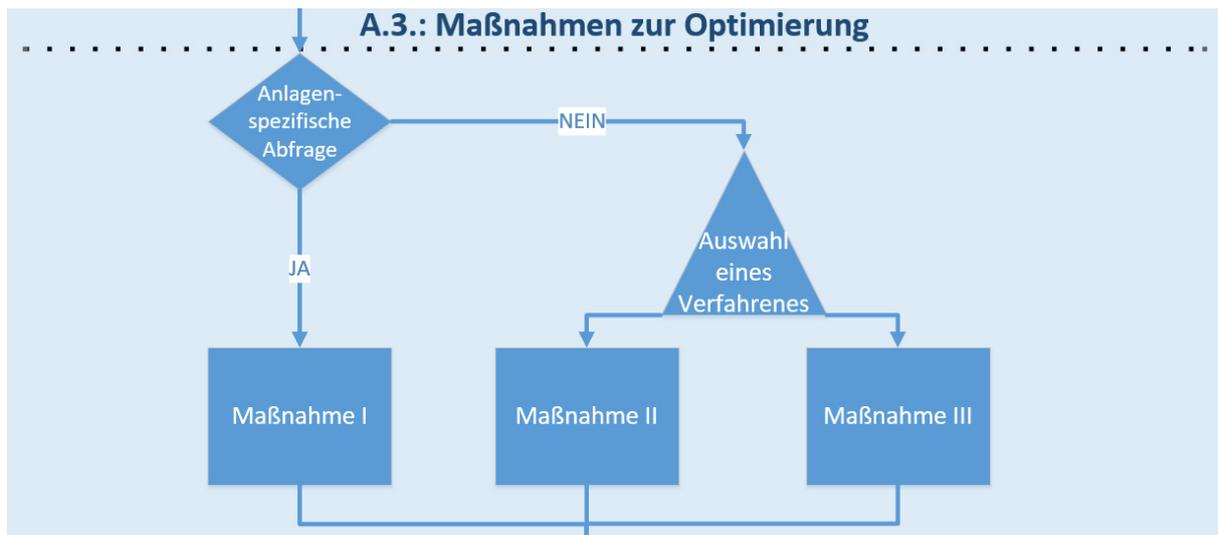


Abbildung 3.5: Maßnahmen zur Optimierung - Checklistenbeispiel

3.1.4 Darstellung von Auswirkungen auf die Verfahrenskette

Dieser Punkt dient dazu, die Auswirkungen einer Maßnahmenumsetzung auf die Verfahrenskette abzuschätzen. In der Regel hat eine Maßnahmenumsetzung Auswirkungen auf die nachfolgenden Glieder der Verfahrenskette. Daher ist es in vielen Fällen notwendig, auch die übrigen Optimierungsansätze der nachfolgenden Verfahrensstufen zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 3.2). Der dargestellte Hauptpfad verdeutlicht, welche Auswirkungen in einer Bilanz berücksichtigt werden müssen. Als Bilanzierungsraum für die Bewertung wurde dabei die betrachtete Kläranlage festgelegt. Finanzielle Auswirkungen werden zu diesem Zeitpunkt nicht berücksichtigt. Unter Umständen kann eine Bewertung der Auswirkungen dazu führen, dass die Maßnahme doch nicht umzusetzen ist. Die Auswirkungen auf die Verfahrenskette können unter Umständen sehr komplex sein. Eine vollständige Integration aller Informationen wird als nicht zielführend angesehen, da sonst die Übersichtlichkeit der Checklisten nicht mehr gewährleistet werden kann. Bei der Bewertung der Auswirkungen von Maßnahmen ist es daher notwendig, Berechnungen außerhalb des Diagramms durchzuführen. Zum Beispiel kann es notwendig sein, die Belebungsstufe nach DWA-A 131 (DWA 2016) zu überprüfen. Der Vorteil der Checkliste ist, dass sie dem Anwender Hinweise gibt, welche Schritte bei der Bewertung der Auswirkungen zu vollziehen sind.

Die Maßnahmen und deren Auswirkungen auf die Verfahrenskette werden in Kästen beschrieben, wobei positive Auswirkungen grün und negative Auswirkungen rot umrandet sind. Tabellenwerte, Literaturhinweise und Verweise auf bestehende Regelwerke oder Gesetze sind in orangen Hinweiskästen hinterlegt. Mit grünen bzw. grauen Kreissymbolen wird der Verweis zu den anderen Checklisten bzw. Ansätzen der Optimierung hergestellt. Diese Übergänge sollen gewährleisten, dass die Aus-

wirkungen auf andere Verfahrensstufen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 3.6).

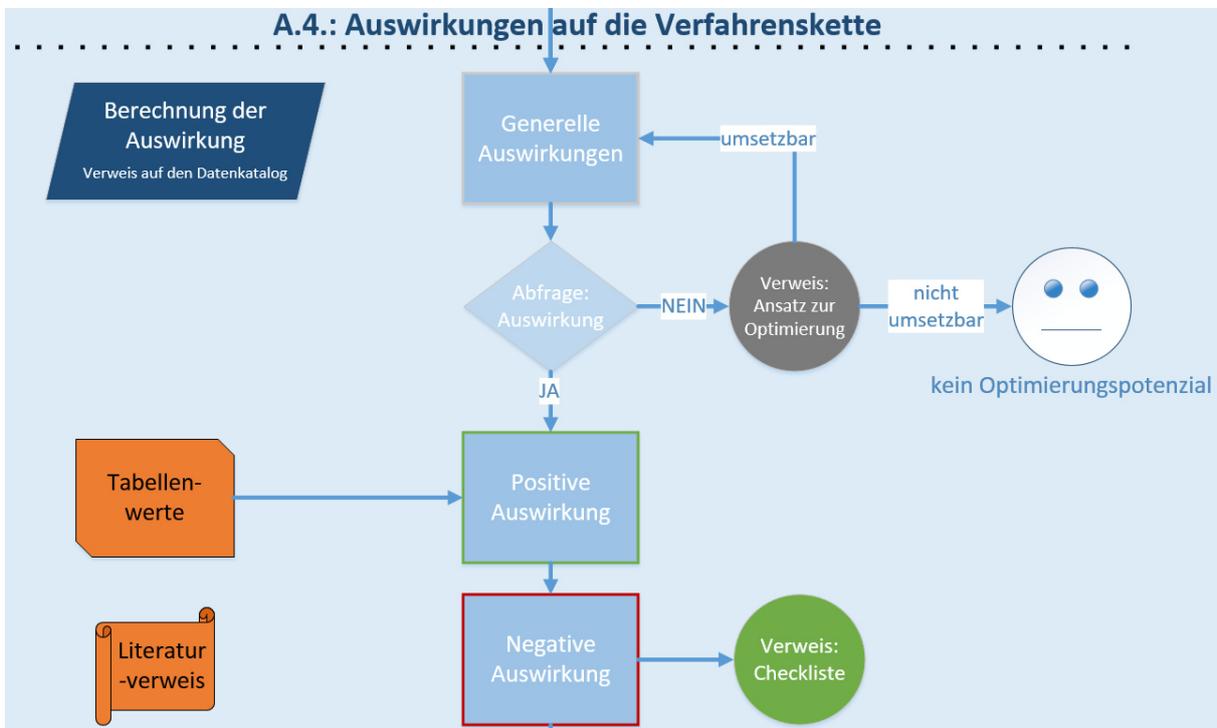


Abbildung 3.6: Auswirkungen auf die Verfahrenskette - Checklistenbeispiel

3.1.5 Umsetzung der Optimierungsstrategie

An dieser Stelle sind die wesentlichen Schritte, nämlich die Identifizierung des Optimierungspotenzials und die Auswahl der Maßnahme zur Erschließung des Potenzials bereits abgeschlossen. Nachdem auch die Auswirkungen auf die Verfahrenskette bekannt sind, ist nun eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen. Des Weiteren ist die Umsetzung der Maßnahme im Detail zu planen. In beiden Fällen sollte eine Detailplanung ggf. unter Einbeziehung eines Ingenieurbüros durchgeführt werden.

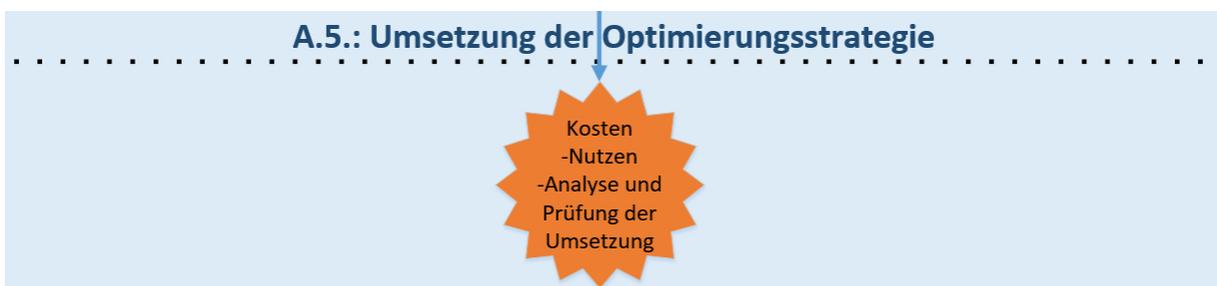


Abbildung 3.7: Umsetzung der Optimierungsstrategie – Checklistenbeispiel

4 Grundlagen zur Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“

Um den Aufbau der Checklisten und die Anwendung eines Diagramms zu verdeutlichen, wird nachfolgend ein Beispiel dargestellt. Im Beitrag von Hien et al. (2017) wird die Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ exemplarisch angewendet. In diesem Kapitel werden die entsprechenden Grundlagen zur Checkliste vorgestellt und erläutert. Um den Gasanfall zu steigern, wird das Ziel verfolgt, den Primärschlammanfall zu erhöhen, ohne die Belebungsstufe nachteilig zu beeinflussen. Daher werden in dieser Checkliste unterschiedliche Maßnahmen aufgezeigt, die zu einer Verbesserung der Abscheideleistung in der Vorklärung führen. Es handelt sich dabei um die Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung, die Unterstützung der Vorklärung durch eine chemische Fällung und den Bau einer Mikrosiebung in Kombination mit Fällung und Flockung.

4.1 Eingangsdaten

Zur Beurteilung des Primärschlammanfalls wird empfohlen, als Vergleichswert die mittlere einwohnerspezifische Trockenmasse im Primärschlamm zu ermitteln. Dazu sind in einem ersten Schritt die angeschlossenen Einwohnerwerte zu berechnen. Im Einklang mit dem DWA Arbeitsblatt 216 (DWA 2015) wird die mittlere tägliche CSB-Schmutzfracht im Zulauf der Kläranlage, bezogen auf die spezifische CSB-Fracht von 120 g/(E·d), bestimmt. Die maßgebende mittlere Fracht ist gemäß den Empfehlungen des Merkblattes ATV-DVWK-M 260 (DWA 2001) auf der Basis der erhobenen CSB-Konzentration aus durchflussproportionalen 24h-Mischproben zu ermitteln. Dafür liegen bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von 5.001 E bis 50.000 E mindestens 24 Messwerte und bei Kläranlagen mit einer Ausbaugröße größer 50.000 E mindestens 52 Messwerte für das Bezugsjahr vor. Bei dieser Berechnungsmethode wird der Mittelwert der tagesspezifischen Fracht gebildet.

$$EW_{120} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=0}^n C_{CSB,24h,Z,n} \cdot Q_{d,Z,n}}{0,12} [E]$$

Es ist zu beachten, dass keine direkte Vergleichbarkeit mit Datenquellen des DWA-Leistungsvergleichs möglich ist, da die mittleren CSB-Belastungen bei den Leistungsvergleichen aus den Jahresmittelwerten der CSB-Konzentration und der Jahresabwassermenge berechnet werden. Dadurch ergeben sich in der Regel höhere Einwohnerwerte.

Aus der Schlammeindickung und Schlamm Trocknung kann über Prozesswässer eine erhebliche Menge an CSB in den Zulauf eintragen werden. Die Messstelle zur Bestimmung der CSB-Zulaufkonzentration sollte daher vor der Zugabe vom Prozesswasser liegen. Ist die CSB-Rückbelastung bei der CSB-Bestimmung im Zulauf enthal-

ten, wird empfohlen, diese vor der Bestimmung der Einwohnerwerte abzuziehen. Dabei kann die Rückbelastung mit ca. 10% der CSB-Zulaufkraft abgeschätzt werden (Neis et al. 1994; Cornel 1997). Dies soll jedoch nur dann erfolgen, wenn das Prozesswasser bei den 24-h Mischproben der CSB-Zulaufkonzentration enthalten ist.

Zur Berechnung der durchschnittlichen täglichen Primärschlamm-trockenmasse soll der mittlere Trockenrückstand (TR) des Primärschlammes aus dem Bezugsjahr herangezogen werden. Es wird empfohlen, die TR-Bestimmung im Primärschlamm regelmäßig durchzuführen und dabei auch unterschiedliche Wochentage abzudecken. Als Richtwert können die Mindesthäufigkeiten zur Durchführung der 24h-Mischproben, entsprechend ATV-DVWK (2001), dienen. Demnach sollte zur Erstellung einer Massebilanz der Schlammbehandlung mindestens zweimal pro Monat der Trockenrückstand und der Glühverlust der Schlammströme ermittelt werden.

Die Dichte des Primärschlammes kann mit 1 kg/l angenommen werden. Die mittlere tägliche Primärschlammfracht ist daher über den Mittelwert des Trockenrückstands und der jährlichen Primärschlammmenge in m³ wie folgt zu ermitteln:

$$B_{TM,PS,d} = \frac{Q_{PS,d} \cdot \overline{TR}}{365} \text{ [kg/d]}$$

Die einwohnerspezifische Primärschlammfracht ergibt sich somit zu:

$$b_{TM,E,PS,d} = \frac{B_{TM,PS,d}}{EW_{120}} \text{ [g/(E·d)]}$$

Zur Berechnung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung wird der abgefragte mittlere Trockenwetterzufluss ($Q_{T,d,aM}$) und das aktivierte Volumen der Vorklärbecken (V_{VK}) herangezogen.

4.2 Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung

In Rheinland-Pfalz liegt der Median der spezifischen PS-Fracht bei 46,4 g TM/(E·d). Laut DWA (2014) ist bei geringen Aufenthaltszeiten von 0,5 h ein Schlammanfall von 30 g TM/(E·d) (85-Perzentil) bzw. 24 g TM/(E·d) (50-Perzentil) zu erwarten. Eine Überprüfung, ob die Aufenthaltszeit in der Vorklärung erhöht werden kann, wird empfohlen, wenn eine spezifische PS-Fracht < 24 g/(E·d) und eine Aufenthaltszeit in der Vorklärung bei mittlerem Trockenwetterzufluss von < 0,5 h vorliegt. Dabei soll ausgeschlossen sein, dass die Vorklärung im Bypass umfahren wird. In einem ersten Schritt soll überprüft werden, ob derzeit nicht genutzte Vorklärbeckenvolumen vorhanden sind. Sollte dies nicht der Fall sein, sollte ebenso wie der Einsatz einer Vorfällung oder einer Feinsiebung auch der Neubau einer Vorklärung in Betracht gezogen werden. Bei einem geringen spezifischen Primärschlammfall und einer Aufent-

haltszeit in der Vorklärung zwischen 0,5 und 2 h kann zwar die Ausnutzung von freiem Vorklärbeckenvolumen eine Steigerung des Primärschlammanfalls bewirken, es wird jedoch kein Neubau der Vorklärung empfohlen. Sollten in diesem Fall keine freien Beckenvolumina vorhanden sein, ist die anfallende spezifische Primärschlammfracht bereits $> 45 \text{ g}/(\text{E} \cdot \text{d})$ oder liegt die Aufenthaltszeit bereits über 2 h, kann vermutlich lediglich durch die Anwendung eines alternativen Verfahrens eine Steigerung des Primärschlammanfalls erreicht werden. Daher sollte eine Fällung oder die Kombination aus Feinsiebung und Flockung in Betracht gezogen werden. Bei dieser Betrachtung ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den angebenen Werten um Orientierungswerte handelt. Sie sollen nicht als scharfe Grenzwerte verstanden werden.

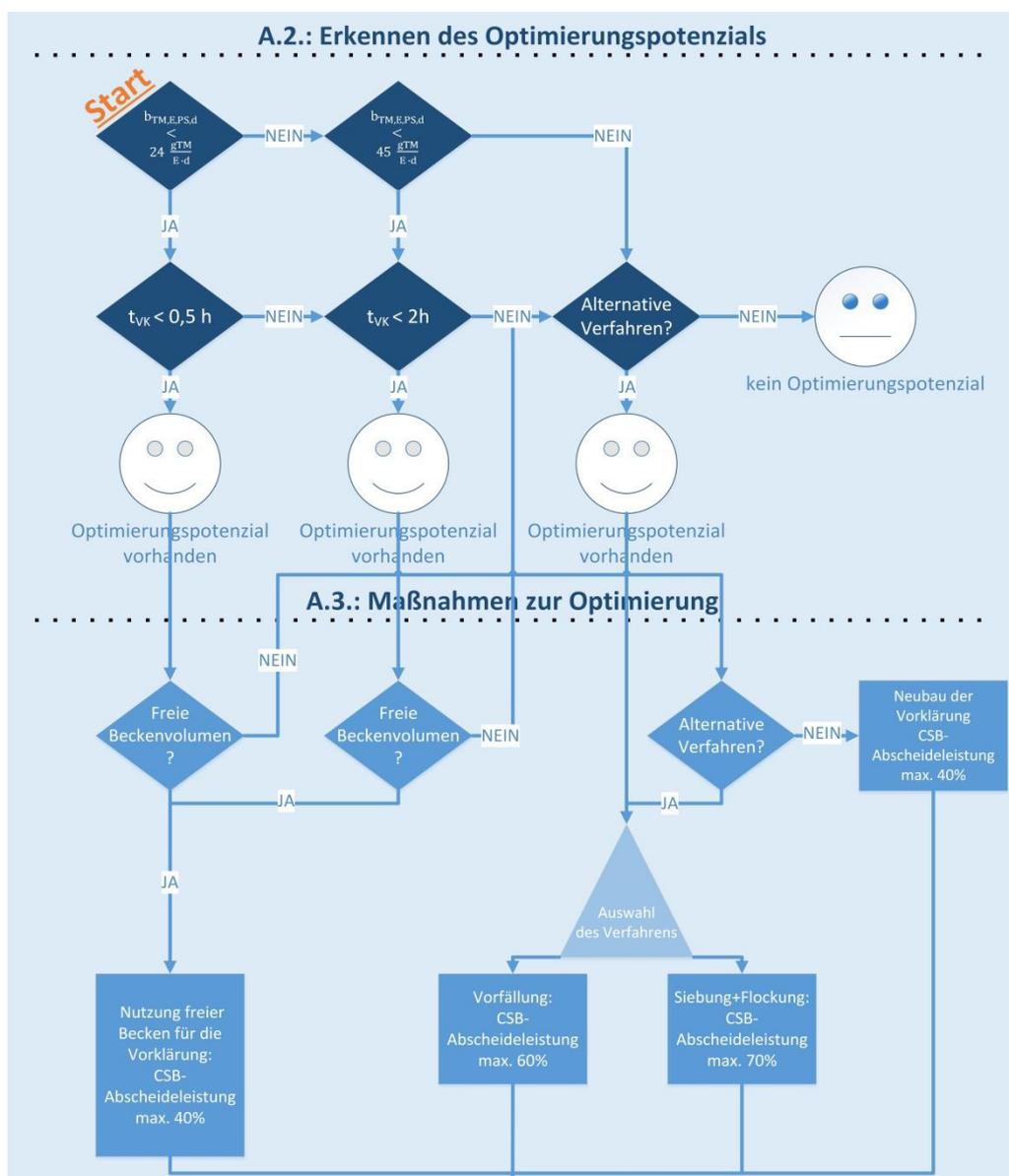


Abbildung 4.1: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Erkennen des Optimierungspotenzials und Maßnahmen zur Optimierung

4.3 Auswirkungen auf die Verfahrenskette

Das Ausnutzen freier Vorklärbekkenvolumen führt zu einer Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung. Für die Abscheideleistungen bei konventionellen Vorklärungen werden von der DWA Richtwerte in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit angegeben (ATV-DVWK 2000; DWA 2016; Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997).

Die chemische Fällung in der Vorklärung wird bei der Abwasserreinigung vorwiegend zur Phosphorelimination eingesetzt. Bei der Vorfällung werden jedoch abgesehen vom Phosphor generell gelöste organische Abwasserinhaltsstoffe an die Fällmittel gebunden und der Vorkläreffekt wird erhöht. Die zusätzlich zu den absetzbaren Stoffen in der Vorklärung abgeschiedenen Fällprodukte und ausgeflockten organischen Substanzen führen somit zu einer erheblichen Entlastung der biologischen Stufe und einem deutlich gesteigerten Primärschlammanfall (Bischofsberger 1978). Im Jahr 1983 wurde in einer Studie von Klute et al. (1984) eine Befragung von Kläranlagenbetreibern zur Verwendung von Fäll- und Flockungsmitteln durchgeführt. Die Studie zeigt, dass Fällungs- und Flockungsverfahren in 47,6% der Fälle mit dem Ziel der Phosphorelimination durchgeführt wurden, 7,6 % der Befragten als Ziel die Erhöhung der Reinigungsleistung hatten und 20% der Befragten als Ziel die Entlastung der biologischen Stufe der Kläranlage verfolgten. Dies verdeutlicht, dass die Ausschleusung von Kohlenstoff in der Vorklärung zu diesem Zeitpunkt bei einem Viertel der Befragten ausschlaggebend für die Verwendung von Fällungs- und Flockungsmitteln war.

Laut Bischofsberger (1978) ist in Abhängigkeit vom Fällmitteleinsatz eine BSB₅-Elimination von über 85% möglich. Von Zerres (1979) wurden bei Vorfällungsversuchen auf der Kläranlage Stuttgart-Büsnau Eliminationsraten in der Vorklärung bei einer phosphatfrachtproportionalen Fällmitteldosierung von 57% bezogen auf CSB und 51 % bezogen auf den BSB₅ erreicht. Typische Abscheideleistungen in der chemisch unterstützten Vorklärung werden in der englischsprachigen Literatur für TSS mit 70-90 %, für BOD mit 55-80%, für P mit 65-95% und für N mit 35-40% angegeben (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999). Die Abscheideleistungen sind dabei sehr stark von der Kontaktzeit, der Durchmischung und der Auswahl des Fällungsmittels abhängig. Feo et al. (2008) beschreiben eine Ausschleusung von CSB in der chemisch unterstützten Vorklärung von üblicherweise 30 bis 70 %. Bei dem Fällmittel Eisenchlorid₅₀ können sie jedoch eine CSB-Ausschleusung von 85,4 % nachweisen. Im ERWAS-Verbundprojekt E-Klär wurde ebenfalls der Chemikalieneinsatz in Hinblick auf eine verbesserte Ausschleusung von Kohlenstoff untersucht. Dort wurde das Ziel verfolgt, die im Primärschlamm gebundene Energie anschließend in der Faulung auszunutzen. Laut (Pinnekamp 2017b) wurde in Fällungsversuchen im Labor eine CSB-Ausschleusung von 60% erreicht.

Eine Ausschleusung von CSB kann anstatt mit einer Vorklärung auch mit einer Feinsiebung erreicht werden. Pinnekamp (2017b) gibt als Ergebnis großtechnischer Versuche mit Feinsieben Ausschleusungsraten von 50% CSB bzw. 60% AFS an. Die maximal möglichen Ausschleusungen können jedoch deutlich höher liegen und werden von Pinnekamp (2017a) mit max. 75 % für CSB und max. für 95% AFS angegeben. Horn et al. (2009) geben für ein Feinsieb mit 0,2 mm Maschenweite eine Abscheideleistung von 31,3 % bezogen auf die CSB-Fracht an. Kink (2016) beschreibt eine Abscheideleistung der Feinsiebung für BSB₅ von 34-41%, für CSB von 34-41 %, für TS 53-60%, für TKN von 15-17 % und für P von 12-14%.

Durch eine zusätzliche Fällmittelzugabe ist es möglich, die Abscheideleistung von Feinsieben deutlich zu erhöhen. So wird in Abhängigkeit vom gelösten zum ungelösten CSB eine Abscheideleistung von 20% bis zu 70% des gesamten CSB erreicht, wobei bei einem hohen ungelösten CSB-Anteil die CSB-Reduktion verbessert wird (Horn et al. 2009, nach Huber et al. 2005). Laut Horn et al. (2009) nach Köppl und Frommann (2004) werden bei der Kombination aus Feinsiebung, Fällungs- und Flockungsmittel eine Reduktion von 95% der AFS, 65 % des BSB₅, 65% des CSB und 90% des P_{ges} bei Rohabwasser erreicht. Im CARISMO-Projekt des Kompetenzzentrums Wasser Berlin gGmbH wurde die Kombination einer Mikrosiebung (Maschenweite 100µm) unter Zugabe von Fällungsmittel in einem halbtechnischen Pilotversuch erprobt. Remy et al. (2014) erreichen dadurch eine Entfernung des CSB zwischen 70-85%, des Gesamt-Phosphors zwischen 70-90% und des Gesamt-Stickstoffs von etwa 20%.

Die im vorliegenden Projekt verwendeten Reduktionsraten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in %

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 h – 1h	1,5 h – 2h	>2,5 h		
BSB ₅	25 ^A	35 ^A	40 ^B	70 ^D	75 ^H
CSB	30 ^C	35 ^C	40 ^C	60 ^E	70 ^F
TS	50 ^C	60 ^C	65 ^C	80 ^D	95 ^F
N	10 ^C	10 ^C	10 ^C	38 ^D	20 ^G
P	10 ^C	10 ^C	10 ^C	80 ^D	80 ^G

A (ATV-DVWK 2000), B (Abwassertechnische Vereinigung e.V. 1997), C (DWA 2016), D (Teleman et al. 2004; Poon und Chu 1999) Mittelwerte, E (Pinnekamp 2017b), F (Horn et al. 2009), G (Remy et al. 2014) Mittelwert, H Annahme

Mit Hilfe dieser Informationen können die zukünftigen Nährstoffverhältnisse in der Biologie abgeschätzt werden. Abgesehen vom C:N-Verhältnis ist auch das C:P-Verhältnis zu beachten.

Das C:N-Verhältnis wird durch die Umsetzung der Maßnahmen abgesenkt und eine Denitrifikation findet nur dann statt, wenn den Mikroorganismen genug verwertbarer Kohlenstoff zur Verfügung steht. Wird das benötigte Verhältnis nicht eingehalten, wird daher empfohlen zu überprüfen, ob eine Prozesswasserbehandlung das C:N-Verhältnis verbessern würde. Ist dies der Fall und die Prozesswasserbehandlung wirtschaftlich darstellbar, sollte diese umgesetzt werden.

Die Erhöhung des Primärschlammanfalls hat zur Folge, dass auch der Schlammweg überprüft werden muss. So könnte eine Anpassung z.B. der Pumpen notwendig werden. Die höhere Abscheideleistung führt zudem zu einer Erhöhung der Faulgasproduktion und zu einer Entlastung der biologischen Stufe. Hinweise zur Erhöhung der Faulgasproduktion können dem DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) entnommen werden und die Auswirkungen der Entlastung lassen sich mit dem DWA Arbeitsblatt 131 (ATV-DVWK 2000; DWA 2016) berechnen. Es ist zu erwarten, dass der Sauerstoffbedarf im Belebungsbecken sinkt. An dieser Stelle sollte auch eine Optimierung der Belebungsstufe in Betracht gezogen werden, weshalb die Checkliste Schlammalter in der Belebung anzuwenden ist. Aus der geringeren Belastung der Belebung folgt in jedem Fall eine Verringerung der Überschussschlammproduktion und dadurch auch eine Abnahme der Faulgasproduktion bezogen auf den Überschussschlamm (DWA 2014). Somit muss der Gasanfall neu berechnet werden, wozu die Checkliste Gasanfall und -verwertung herangezogen werden kann.

Nachdem die Auswirkungen auf die Verfahrenskette bekannt sind, ist eine Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen und die Umsetzung der Maßnahme im Detail zu planen.

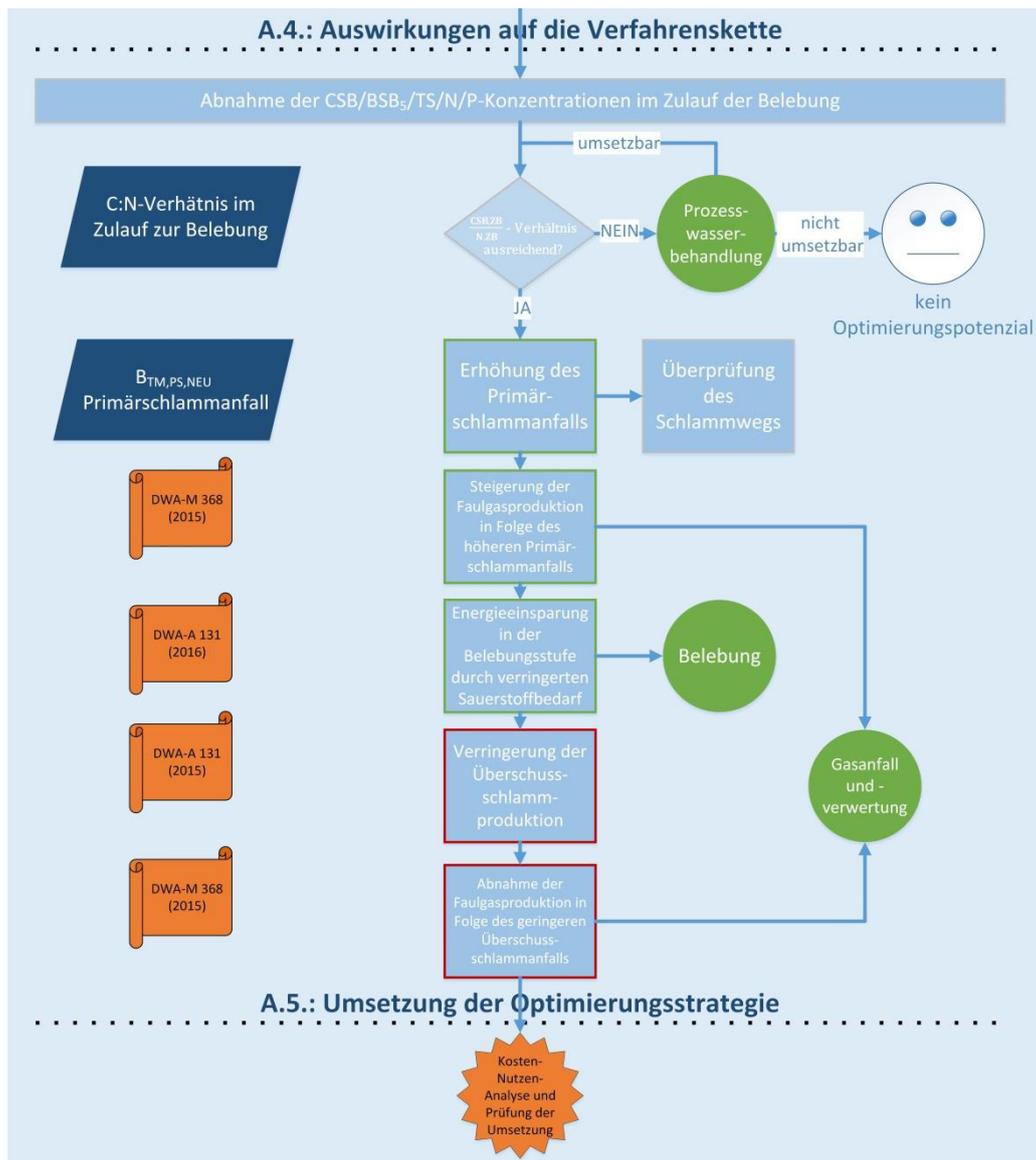


Abbildung 4.2: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette und Umsetzung der Optimierungsstrategie

5 Zusammenfassung

Mit Hilfe der erzeugten Checklisten können insgesamt 13 Ansätze zur Optimierung systematisch überprüft werden, die sich positiv auf die Faulung, die Gaserzeugung und die Energieproduktion auswirken. Die Ansätze kommen aus dem Bereich der Abwasserreinigung, der Schlammfaulung und der Gasverwertung. Die Checklisten sind logisch miteinander in Verbindung gesetzt. Somit werden nicht nur die direkten Auswirkungen auf die Verfahrenskette berücksichtigt, sondern mögliche Änderungen können wiederum Ausgangspunkt für Anpassungen, aber auch Optimierungsmöglichkeiten von nachfolgenden Verfahrensstufen sein. Die Anwendung der Checklisten wird im Folgenden von Hien et al. (2017) für zwei Beispielanlagen durchgeführt.

6 Literatur

- Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hg.) (1997): ATV Handbuch: Mechanische Abwasserreinigung. Berlin: Ernst & Sohn.
- ATV-DVWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.
- Bischofsberger, W. (1978): Bemessung, Ausrüstung und Kosten für chemische Fällverfahren in Verbindung mit der biologischen Abwasserreinigung. In: Bayerischen Landesamt für Wasserforschung (Hg.): Moderne Abwasserreinigungsverfahren. München: R. Oldenbourg Verlage München Wien (Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flußbiologie, 29).
- DWA (2001): ATV-DVWK-M 260. Erfassen, Darstellen, Auswerten und Dokumentieren der Betriebsdaten von Abwasserbehandlungsanlagen mit Hilfe der Prozessdatenverarbeitung.
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen.
- Feo, G. de; Gisi, S. de; Galasso, M. (2008): Definition of a practical multi-criteria procedure for selecting the best coagulant in a chemically assisted primary sedimentation process for the treatment of urban wastewater. In: *Desalination*, S. 229–238. Online verfügbar unter www.sciencedirect.com.
- Grüner, T. (2016): Die Entwicklung von der Abwasserbehandlungsanlage über die Energieneutralität zur Regelenergiebereitstellung am Beispiel der Kläranlage Kaiserslautern. 1. arrivee-Expertenworkshop. Mainz, 12.04.2016.
- Guggenmos, H.; Taudien, Y. (2016): Klärschlammkonzept Region Trier. Zukünftige Behandlung und Verwertung der Klärschlämme aus den kommunalen Kläranlagen der Region. Fachtagung "Agenda 2019" Zukunft gemeinsam gestalten. DWA. Emmelshausen, 05.10.2016.
- Hansen, J.; Wu, K.; Schirmer, G.; Hobus, I.; Kolisch, G. (2009): Energie- und Kostenoptimierung durch Schaffung von semizentralen Schlammbehandlungszentren. Abschlussbericht. FG Siedlungswasserwirtschaft / tectraa -Zentrum für

innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern; Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH.

- Hien, S.; Hansen, J.; Dilly, T. C. (2017): Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammfäulung an Beispieldanlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Horn, H.; Rapp-Fiegle, S.; Günthert, W.; Holtorff, M. S.; Bischof, F.; Chwistek, M. (2009): Forschungsvorhaben "Kläranlage der Zukunft" - Themenbereiche Faulgasproduktion, Anaerobtechnik und Deammonifikation. Schlussbericht. Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft, TU München; Universität der Bundeswehr München; Fakultät Maschinenbau/ Umwelttechnik, Hochschule Amberg-Weiden.
- Jakob, J.; Linder, A.; Siekmann, K. (2013): Zentralisierte Lösung mit zweistufiger Kompaktfäulung. In: *Umwelt Magazin* Sonderdruck (12).
- Jakob, J.; Siekmann, K. (2012): Energieoptimierte Klärschlammbehandlung durch Umstellung der Verfahrensführung auf der Kläranlage Linz-Unkel mittels 2-stufiger Kompaktfäulung. Thür. Online verfügbar unter <http://www.siekmann-ingenieure.de>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.
- Kink, M. (2016): Feinstsiegung - die intelligenter Vorklämung. In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik Special Klärschlamm* (10), S. 13–19.
- Klute, R.; Mertsch, V.; Hahn, H. H. (1984): Studie zum Einsatz der weitergehenden Abwasserreinigung durch Fällung/Flockung in der Bundesrepublik Deutschland. Stand 31.12.1983. In: *KA- Korrespondenz Abwasser* 31 (808-815).
- Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Potenziale der Fäulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Krieger, S.; Blank, A.; Sterr, Y. (2012): Energieautarke GKA Weilerbach. Umstellung einer aeroben Stabilisierungsanlage auf eine Hochlastfäulung. In: E. Hoffmann und J. Homa (Hg.): *Zukunftsfähige Abwasser- und Schlammbehandlung. Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale.* Tagungsband der 26. Karlsruher Flockungstage 2012. Karlsruhe (Bd. 143), S. 109–122.
- MKULNV NRW (2014): Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen. Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene

- Verbundstrategie. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von M. Mergelmeyer, G. Kolisch, U. Menninger, H. Steinmetz, C. Locher, J. Helmich und J. Brüggemann. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- MLUV MP (2013): Zukunftsfähige Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm in Mecklenburg-Vorpommern. Unter Mitarbeit von M. Friedrich, G. Kolisch und T. Osthoff. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern. Ingenieurbüro Friedrich; Wuppertalverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH.
- MUKW BW (2015): Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima, und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- MULEWF RLP (2012): Energiesituation der kommunalen Kläranlagen in Rheinland-Pfalz. Unter Mitarbeit von F. Angerbauer, R. Kunz und G. Kolisch. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz.
- Pinnekamp, J. (2017a): Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. 7. ERWAS-Lenkungskreissitzung, 07.02.2017.
- Pinnekamp, J. (2017b): E-Klär: Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. ERWAS-Abschlusskonferenz. Berlin, 16.05.2017.
- Poon, C. S.; Chu, C. W. (1999): The use of ferric chloride and anionic polymer in the chemically assisted primary sedimentation process. In: *Chemosphere* 39 (10), S. 1573–1582.
- Remy, C.; Boulestreau, M.; Lesjean, B. (2014): Technischer Nachweis eines innovativen Konzepts für ein energie-positives Klärwerk. In: J. Pinnekamp (Hg.): 47. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft. "Ist unsere Wasserwirtschaft zukunftsfähig". Aachen (Gewässerschutz-Wasser-Abwasser, Bd. 234), S. 23.
- Salomon, D.; Pyro, P. (2017): Flexibilität im Praxistest. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Schäfer, M.; Gretschel, O.; Schmitt, T. G.; Hobus, I. (2017): Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

- Schmitt, T. G.; Valerius, B.; Knerr, H. (2017): Wissenschaftliche Begleitung der Hochlastfaulung mit Nachvergärung der Kläranlage Weilerbach. Schlussbericht. im Auftrag der Verbandsgemeinde Weilerbach. tectraa- Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern. Online verfügbar unter https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/weilerbach_schlussber_2017_02_15_m.pdf.
- Siekmann, T.; Miethig, S.; Schneider, J.; Jakob, J. (2016): Klärschlammverwertungskonzept für ländliche Regionen - am Beispiel des Rhein-Hunsrück-Kreises. In: *KA- Korrespondenz Abwasser* 63 (12), 1068 f.
- Sternad, W.; Waelkens, B. (2017): Planung, Konzeptionierung und wissenschaftliche Begleitung des Betriebs der Hochlastfaulung auf der Kläranlage Edenkoben. Schlammfaulung auf Kläranlagen. Fraunhofer IGB. DWA; BWK. Neustadt an der Weinstraße, 28.06.2017.
- Taudien, Y.; Kolisch, G. (2017): Perspektiven einer zukünftigen Klärschlamm Entsorgung aufgezeigt am Beispiel der Region Trier. Bauingenieur-Kolloquium der TU Kaiserslautern. Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH. TU Kaiserslautern alumni Bauingenieurwesen. Kaiserslautern, 18.05.2017.
- Teleman, D.; Wilderer, P. A.; Teodosiu, C.; Kötze, T. (2004): Evaluation of physical-chemical treatment alternatives to increase removal efficiency of primary wastewater treatment. In: *Environmental Engineering and Management Journal* 3 (3), S. 265–274.
- Zerres, P. H. (1979): Beitrag zur Verfahrenstechnik der Phosphorelimination durch Vorfällung mit gesteuerter Fällmitteldosierung: R. Oldenbourg Verlage München.
- Zimmerhackel (2016): Kläranlage Wallmenroth/Muhlau. Schlammwasserbehandlung mit Deammonifikation. Planungsbüro Heinrich Heinen. Abwasserzweckverband Betzdorf-Kirchen-Daaden, 04.10.2016.

Korrespondenz an:

Dipl.-Ing. Timo C. Dilly
tectraa - Zentrum für Innovative AbWassertechnologien
an der Technischen Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Str.14
D-67663 Kaiserslautern
Tel.: +49 631 205 4643
Fax: +49 631 205 3905
E-Mail: timo.dilly@bauing.uni-kl.de

Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammfaulung an Beispielanlagen

Sebastian Hien¹, Joachim Hansen¹, Timo C. Dilly²

¹ Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau, Universität Luxemburg

² Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern

Kurzfassung: Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wird die grundsätzliche Anwendung des im Rahmen des ZEBRAS-Projektes erarbeiteten Flussdiagramms „Vorklärung“ demonstriert. Hierzu werden zwei Beispielanlagen untersucht: zum einen eine der im Rahmen von ZEBRAS ausgewählten Musteranlagen, zum anderen eine Anlage mit typischen Zulaufkonzentrationen nach DWA/ATV-Regelwerk. Die ermittelten Ergebnisse belegen, dass die Untersuchungen unterschiedliche Optimierungspotenziale ergeben. Durch die Flussdiagramme wird den Betreibern von Kläranlagen eine schnell anzuwendende und strukturierte Methodik an die Hand gegeben, das Optimierungspotenzial „seiner“ Anlage abzuschätzen.

Key-Words: Vorklärung, Abscheideleistung, Optimierungsstrategien, Aufenthaltszeit

1 Einführung

Ziel dieses Beitrags ist die grundsätzliche Anwendung eines der erarbeiteten Flussdiagramme an zwei Beispielanlagen zu demonstrieren. Mit Hilfe der während des ZEBRAS-Projekts erarbeiteten Checklisten in Form von Flussdiagrammen soll dem Anlagenbetreiber eine schnelle und strukturierte Möglichkeit an die Hand gegeben werden, um spezifische Optimierungspotenziale und -strategien im Bereich der Faulung zu erkennen. Anschließend kann der Betreiber zur detaillierten Prüfung mit diesem fundierten Vorwissen in die Diskussion mit einem Planungs- / Ingenieurbüro einsteigen.

Als Grundlage der Anwendung der nachfolgend beschriebenen Optimierungsstrategien dient hier beispielhaft das Flussdiagramm „Abscheideleistung in der Vorklärung“. Dieses Diagramm zielt durch Erhöhung des Primärschlammanfalls auf eine

Erhöhung des Gasanfalls bei gleichzeitiger Reduzierung des Sauerstoffbedarfs in der Belebung durch Reduzierung der organischen Belastung. Für eine detaillierte Beschreibung des Flussdiagramms sei auf den Beitrag „Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten“ (Dilly et al. 2017) verwiesen.

In diesem Zusammenhang wird in diesem Beitrag in Besonderen auf die Auswirkungen durch eine die Optimierung eingegangen. Diese werden in der Checkliste unter dem Punkt „A.4.: Auswirkungen auf die Verfahrenskette“ beschrieben (Abbildung 1).

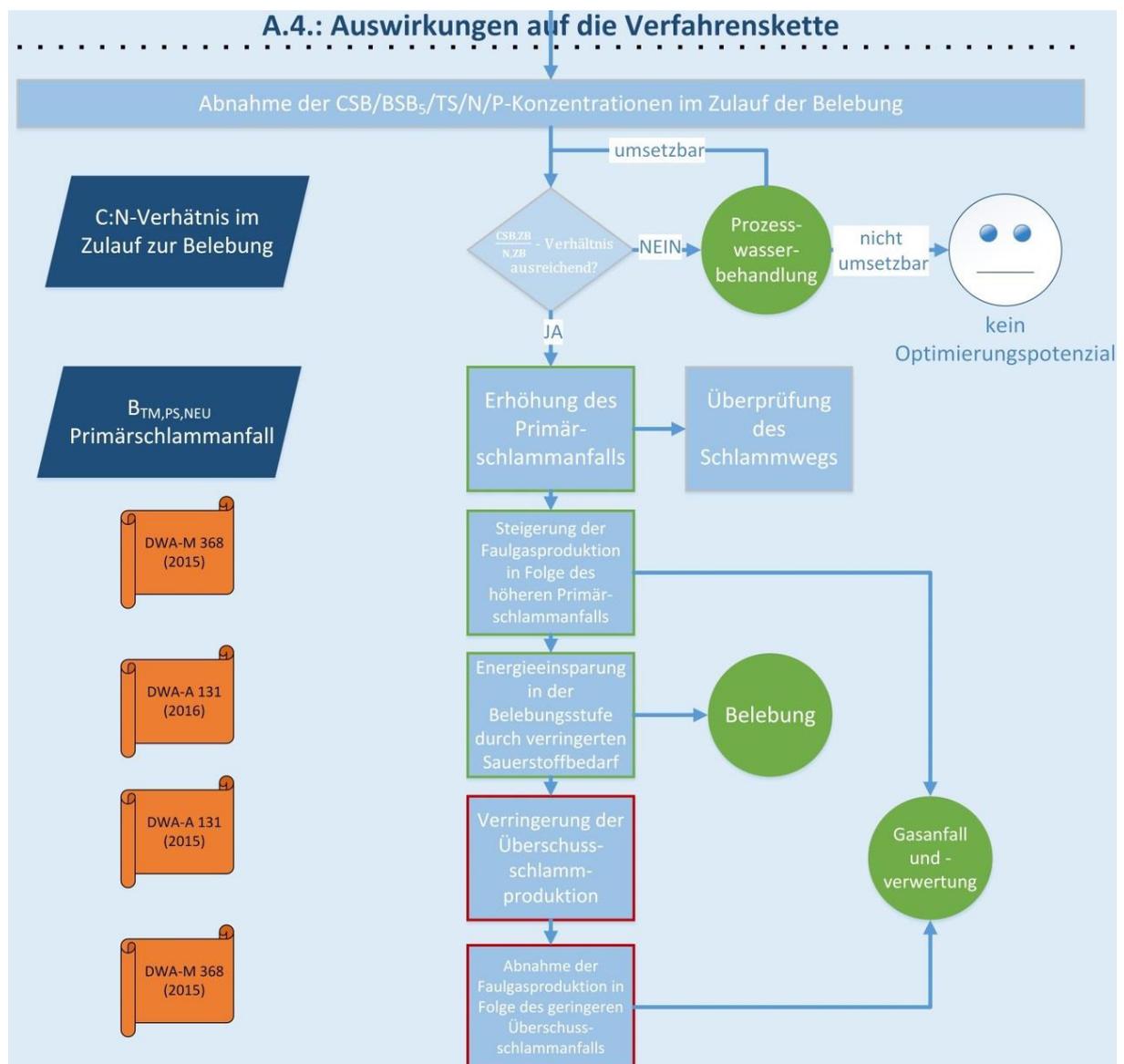


Abbildung 1: Ausschnitt A.4.: Auswirkungen auf die Verfahrenskette aus dem Flussdiagramm „Abscheideleistung in der Vorklärung“.

Wie Abbildung 1 zu entnehmen ist, werden in dem Abschnitt die Auswirkungen von Optimierungsstrategien im Bereich der Vorklärung beleuchtet. Diese werden hierbei bilanziell betrachtet und dabei je nach Auswirkung grün (bilanziell positiv) bzw. rot (bilanziell negativ) gefärbt. Im Folgendem werden in diesen Beitrag Optimierungsstrategien inklusive ihrer Auswirkungen für verschiedene Szenarien berechnet und dabei die Punkte

- Erhöhung des Primärschlamm-anfalls
- Steigerung der Faulgasproduktion in Folge des höheren Primärschlamm-anfalls
- Energieeinsparung in der Belebung durch verringerten Sauerstoffbedarf
- Verringerung der Überschussschlammproduktion
- Abnahme der Faulgasproduktion in Folge des geringen Überschussschlamm-anfalls

aus Abbildung 1 für die aufgezeigten Optimierungsmöglichkeiten beurteilt. Diese Berechnungen werden hierbei für zwei Anlagen beispielhaft durchgeführt. Im ersten Teil wird eine konkrete Anlage aus dem ZEBRAS-Kläranlagenpool betrachtet. Im zweiten Teil wird zur weiteren Verdeutlichung eine hypothetische, strikt nach DWA-A 131 (DWA 2016), bemessene Anlage untersucht. Dabei wurden die Zulaufkonzentrationen nach ATV-DVWK-A 198 (2003) verwendet. Bei der Auswertung wird hierbei nicht mehr die gesamte Anwendung des Flussdiagramms gezeigt, sondern sich auf die Darstellung der Resultate konzentriert.

2 Betrachtete Anlagen

2.1 Beispielanlage aus ZEBRAS-Pool

Die betrachtete Kläranlage ist auf 18 000 Einwohnerwerte (EW) ausgelegt und derzeit mit etwa 11 000 – 12 000 EW belastet. Die Kläranlage ist eine mechanisch biologische Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung. Die Beispielanlage verwertet Fremdschlämme und hat eine Faulgasproduktion von circa 21 L/(E*d). Die Kläranlage läuft stabil, allerdings weist die Anlage ein sehr hohes Schlammalter in der Belebung von über 25 d auf. Auf diesen Punkt wird im Verlauf der Evaluierung der Checkliste hingewiesen werden.

Das Fließschema der Anlage ist Abbildung 2 zu entnehmen.

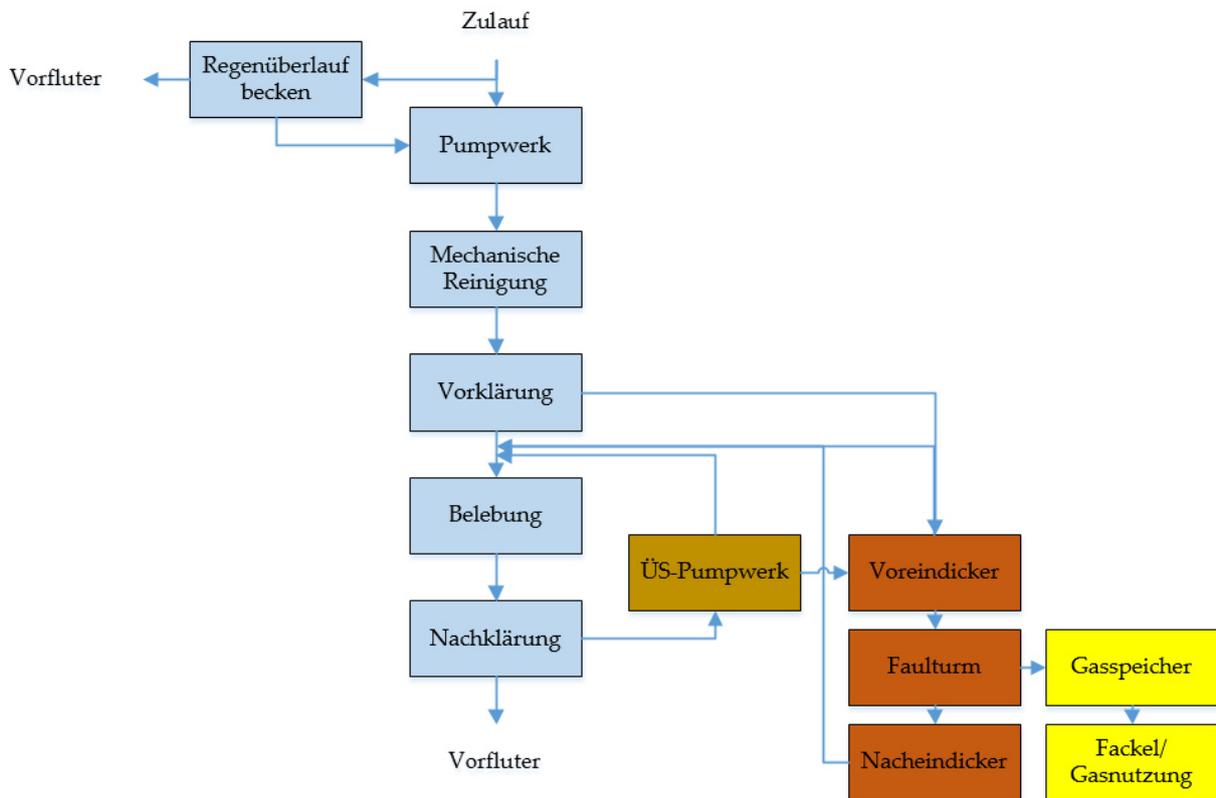


Abbildung 2: Blockschema Beispielskläranlage.

2.2 Anlage nach DWA-A 131

Bei der zweiten hypothetischen Anlage handelt es sich ebenfalls um eine mechanisch biologische Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung. Die hierbei betrachtete Abwasserbehandlungsanlage gehört mit circa 60 000 EW zur Größenklasse 4. Die Zulaufkonzentrationen entsprechen hierbei den klassischen Annahmen (ATV-DVWK 2003) wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Einwohnerspezifische Frachten, die an 85% der Tage unterschritten werden (ATV-DVWK 2003).

Parameter	CSB	BSB	TKN	P	TS
Wert [g/(E*d)]	120	60	11	1,8	70

3 Umsetzung des Flussdiagramms

3.1 Vorklärung

Die Vorklärung stellt den letzten Schritt der mechanischen Reinigung dar. Hierbei wird durch Sedimentation die organische Feststofffracht im Abwasser reduziert. Diese sammelt sich an der Beckensohle und wird als Primärschlamm abgezogen. Anschließend wird der Schlamm eventuell weiter eingedickt und dem Faulbehälter zugeführt.

Die Abscheideleistung der Vorklärung ist hierbei eine Funktion über die Zeit. Durch die Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung kann der sedimentierte Anteil erhöht werden (Abbildung 3). Hierbei ist allerdings – wie im Flussdiagramm erläutert – darauf zu achten, dass der benötigte Kohlenstoffanteil im Verhältnis zum Stickstoff nicht zu weit abgesenkt wird.

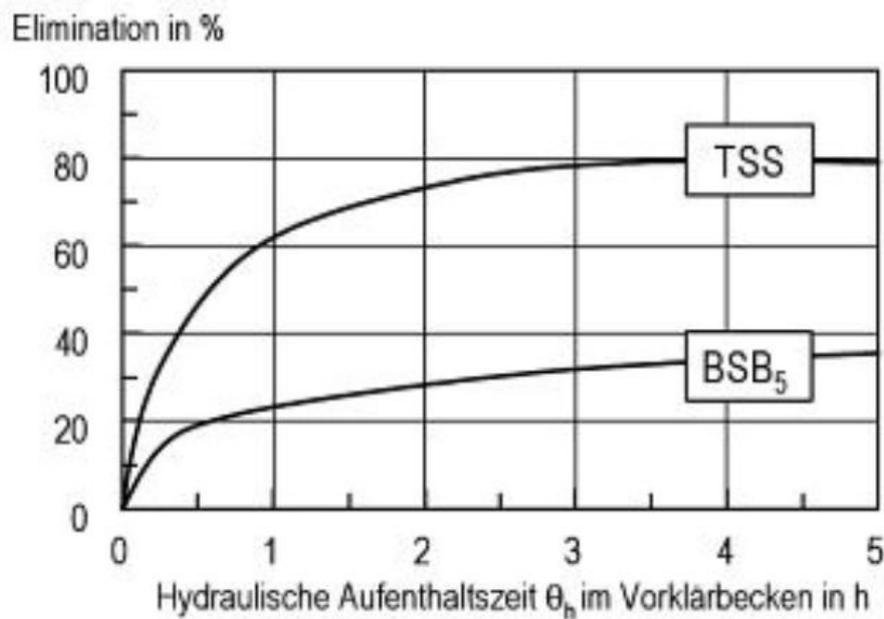


Abbildung 3: Abscheideleistung in der Vorklärung bezogen auf die Aufenthaltszeit nach Sierp (Imhoff 1999).

3.2 Zusammenstellung der Grunddaten für die Beispielanlage

Für die Durchführung der in Abbildung 1 dargestellten Vorgehensweise werden folgende Daten benötigt:

- $b_{TM,E,PS,d}$: Einwohnerspezifischer Primärschlammanfall
- tv_k : Aufenthaltszeit in der Vorklärung

Die Beispielkläranlage zeigt mit ca. $16 \text{ g}_{TM} / (E \cdot d)$ einen sehr geringen einwohnerspezifischen Primärschlammanfall bei einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit in der Vorklärung von circa 1,2 h. Hierbei ist aber zu beachten, dass bis zu 1/3 des Zulaufs über einen Bypass direkt in die Belebung geleitet wird. Zur Ableitung von Grunddaten für die anschließenden Berechnungen in BelebungsExpert wurden die Betriebsstagebücher der Kläranlage ausgewertet.

Für die fiktive Anlage nach A 131 ergeben sich Ausgangswerte von $35 \text{ g}_{TM} / (E \cdot d)$ Primärschlammanfall bei einer durchschnittlichen Aufenthaltszeit in der Vorklärung von circa 1 h.

3.3 Erkennen des Optimierungspotenzials

Werden die in Abschnitt 3.2 ermittelten Werte für die Beispielkläranlage auf das Flussdiagramm angewendet, so ergibt sich in Abschnitt „A.2.: Erkennen des Optimierungspotenzials“ ein vorhandenes Optimierungspotenzial (Abbildung 4, schwarzer Pfeil).

Da auf der Beispielanlage im Moment nur eine von zwei Vorklärungen genutzt wird, steht hier zusätzliches Beckenvolumen zur Verfügung. Durch die Nutzung dieses Volumens kann die Aufenthaltszeit und damit die Abscheideleistung, durch zusätzliche Nutzung dieser Volumina als Vorklärung, erhöht werden (Abbildung 4, gestrichelter Pfeil).

Für den Fall, dass keine freien Volumina zur Verfügung stehen würden, kann zur Optimierung auf alternative Verfahren wie einer Vorfällung oder Mikrosiebung zurückgegriffen werden (Abbildung 4, gepunkteter Pfeil). Dieser Fall wird an der fiktiven Anlage zusätzlich zu der Verlängerung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung dargestellt.

Basierend auf Abbildung 4 sind somit verschiedene Szenarien möglich. Für den Weg des gestrichelten Pfeils werden im Folgenden die Auswirkungen einer Verlängerung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung an der Beispielanlage evaluiert. Für den Weg des gepunkteten Pfeils werden alternative Verfahren an der fiktiven Anlage untersucht.

4 Optimierungsszenarien

Zur Berechnung der jeweiligen Szenarien und deren Auswirkungen wurde wie folgt vorgegangen: Im ersten Schritt wurden die Zulaufkonzentrationen mittels der in Tabelle 2 dargestellten Abscheideleistungen abgemindert, um den Primärschlammanfall und die Zulaufkonzentrationen in die Belebung abzuschätzen.

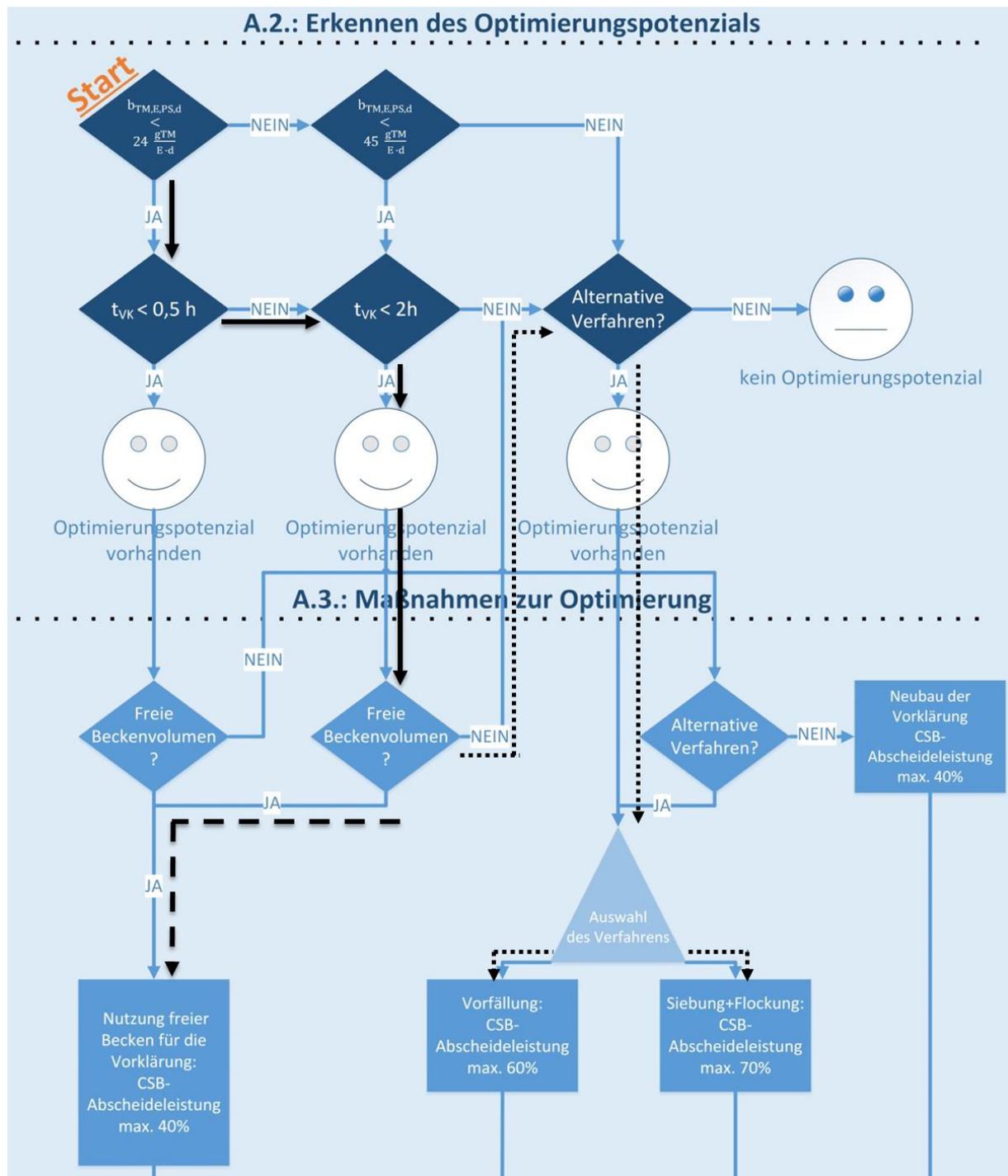


Abbildung 4: Darstellung der Wege zu den Optimierungsstrategien für die Beispielkläranlage (gestrichelter Pfeil) und fiktive Kläranlage (gepunkteter Pfeil).

Tabelle 2: Abscheideleistungen in der Vorklärung in Abhängigkeit von der Aufenthaltszeit bezogen auf den mittleren Tagesdurchfluss bei Trockenwetter und Reduktionsgrade in Abhängigkeit vom gewählten Verfahren in % (Dilly et al. 2017).

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung/Flockung
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h	> 2,5 h		
BSB ₅	25	35	40	70	75
CSB	30	35	40	60	70
TS	50	60	65	80	95
N	10	10	10	38	20
P	10	10	10	80	80

Hieraus ergeben sich für die Beispielanlage folgende Zulaufkonzentrationen zum Belebungsreaktor:

Tabelle 3: Zulaufkonzentrationen zum Belebungsreaktor basierend auf Tabelle 1.

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)		
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h	> 2,5 h
C _{CSB,ZB} [mg/L]	222	206	190
S _{CSB,ZB} [mg/L]	104	111	107
S _{B5B,ZB} [mg/L]	92	80	74
X _{TS,ZB} [mg/L]	92	74	65
C _{TKN,ZB} [mg/L]	20	20	20
S _{NH4,ZB} [mg/L]	15	15	15
S _{NO3,ZB} [mg/L]	0	0	0
C _{P,ZB} [mg/L]	3.2	3.2	3.2

C_{CSB,ZB}: Chemischer Sauerstoffbedarf; S_{CSB,ZB}: Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf; S_{B5B,ZB}: Bichemischer Sauerstoffbedarf; X_{TS,ZB}: Abfiltrierbare Stoffe (0,45µm); C_{TKN,ZB}: Kjeldahl-Stickstoff; S_{NH4,ZB}: Ammoniumstickstoff; S_{NO3,ZB}: Nitratstickstoff; C_{P,ZB}: Gesamt-Phosphor

Die so ermittelten Zulaufkonzentrationen in die Belebung wurden anschließend mit BelebungsExpert 2.0 ausgewertet, um die Überschussschlammproduktion als auch den Sauerstoffbedarf in der Belebung zu ermitteln. Aus den ermittelten Daten wird angelehnt an das DWA Merkblatt 368 (DWA 2014) mit Tabelle 4 die zu erwartende Faulgasproduktion bestimmt.

Tabelle 4: Gasertrag der Schlämme im Jahresmittel bei einem technischen Abbaugrad der leicht abbaubaren organischen Trockenmasse von $\eta_{\text{abb}} = 85\%$ (nach DWA 2014).

Schlammart	Gasertrag(m ³ i. N./kgoTM _{zu})
Primärschlamm (PS)	0,57
Überschussschlamm (ÜS)	0,33
Rohschlamm (RS)	0,44

oTM_{zu}: zugeführte organische Trockenmasse

Für die Auswertung der Szenarien werden anschließend die einwohnerspezifische Primärschlammproduktion ($b_{\text{TM,E,PS,d}}$), die einwohnerspezifische Überschlammproduktion ($b_{\text{TM,E,ÜS,d}}$), als Anhaltspunkt für den erforderlichen Energiebedarf in der Belebung der Sauerstoffbedarf (OV_d) und – zur Beurteilung der möglichen Energieeigenproduktion – der einwohnerspezifische Faulgasanfall (e_{FG}) herangezogen und gegenübergestellt.

4.1 Szenario 1: Ausgangsszenario 0,75 – 1 h Aufenthaltszeit

Im ersten Schritt der Optimierung wird der Bypass um die Vorklärung stillgelegt. Hierdurch ergibt sich bereits eine Erhöhung der spezifischen Primärschlammproduktion ($b_{\text{TM,E,PS,d}}$) auf 22 g_{TM}/(E*d) bei verminderter Aufenthaltszeit. Die Überschussschlammproduktion ($b_{\text{TM,E,ÜS,d}}$) beträgt dann 22 g_{TM}/(E*d), der Sauerstoffbedarf (OV_d) 427 kg/d und die spezifische Faulgasproduktion (e_{FG}) 15 L/(E*d).

Dieses Szenario 1 wird als Ausgangsszenario für Vergleiche mit den folgenden Szenarien betrachtet.

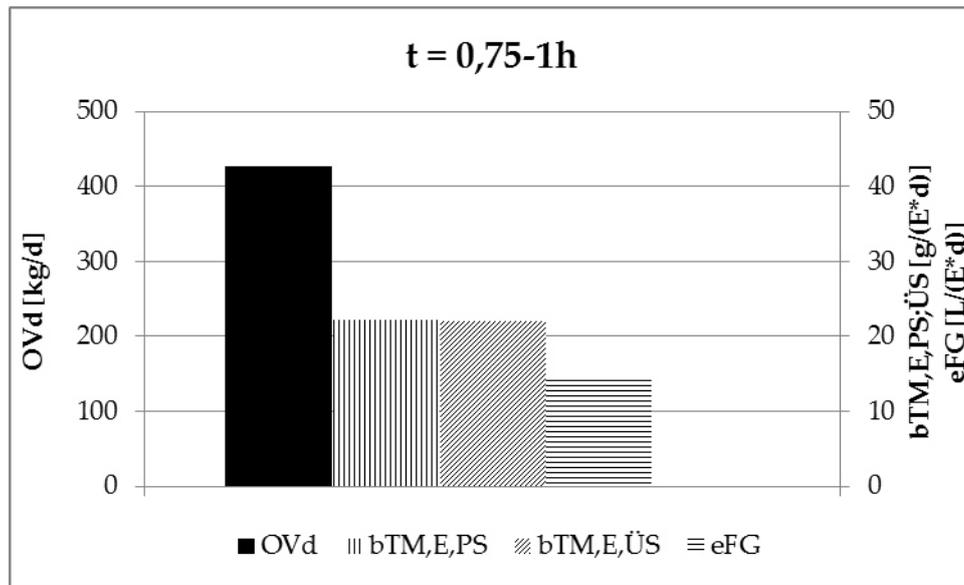


Abbildung 5: Ausgangsszenario mit einer Aufenthaltszeit von 0,75 - 1h.

4.2 Szenario 2: Aufenthaltszeit auf 1,5 – 2 h erhöhen

Bei einer Erhöhung der Aufenthaltszeit, durch Verwendung von freien Beckenvolumina als zusätzliches Vorklärbecken, auf 1,5 – 2 h kann eine Erhöhung des Primärschlammanfalls auf 27 $g_{TM}/(E^*d)$ und damit, wie in Abbildung 6 dargestellt, auch eine leichte Erhöhung der spezifische Faulgasproduktion (e_{FG}) auf 16 $L/(E^*d)$ erreicht werden. Weiterhin sinkt die Überschussschlammproduktion ($b_{TM,E,ÜS,d}$) auf 19 $g_{TM}/(E^*d)$ und dem zufolge auch der Sauerstoffbedarf (OV_d) auf 426 kg/d .

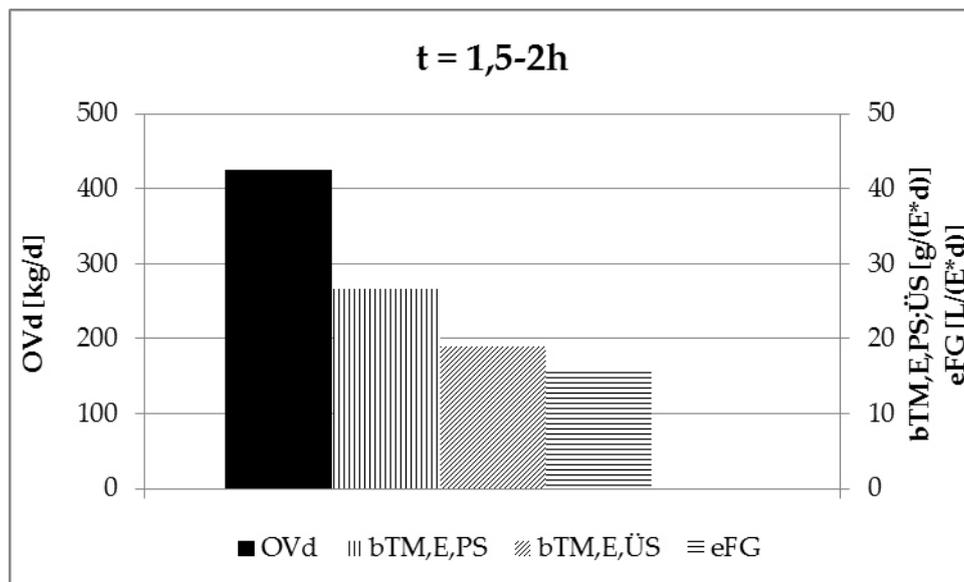


Abbildung 6: Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf 1,5 - 2h.

4.3 Szenario 3: Aufenthaltszeit auf über 2,5 h erhöhen

Um die maximale Ausbeute an Primärschlamm durch reine Sedimentation in der Vorklärung zu erreichen, kann die Aufenthaltszeit auf über 2,5 h verlängert werden (siehe auch Abbildung 3). Abbildung 7 zeigt die Berechnungen für dieses Szenario mit einer spezifischen Primärschlamm- und Faulgasproduktion von $29 \text{ g}_{\text{TM}}/(\text{E}^*\text{d})$ bzw. $16,4 \text{ L}/(\text{E}^*\text{d})$. Die Überschussschlammproduktion sinkt auf $17 \text{ g}_{\text{TM}}/(\text{E}^*\text{d})$ und der Sauerstoffbedarf auf $416 \text{ kg}/\text{d}$.

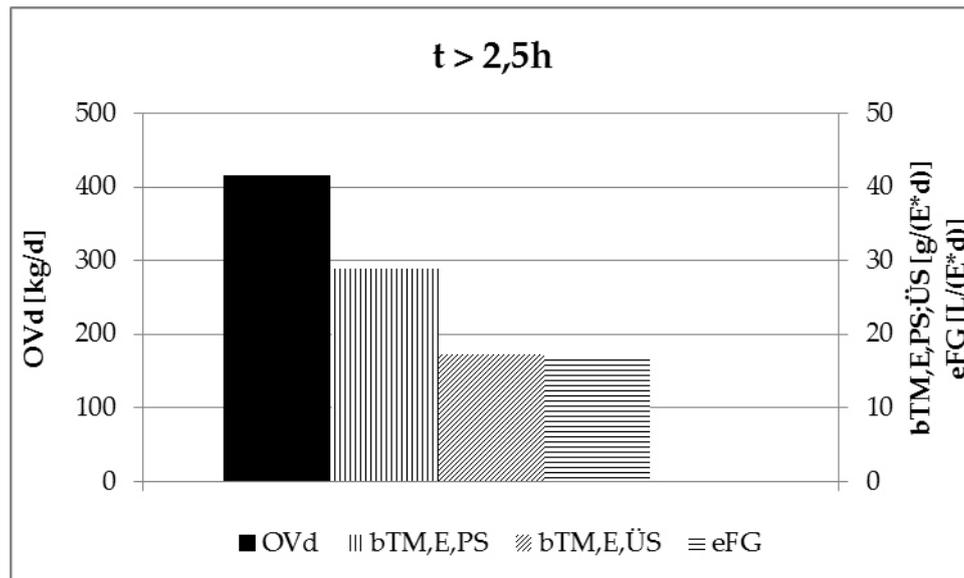


Abbildung 7: Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung auf über 2,5h.

4.4 Vergleich der Szenarien

Der Methananteil bei der anaeroben Fäulung von kommunalem Mischschlamm wird im Allgemeinen mit 65 % (DWA 2014) angenommen. Bei einem Energiegehalt von reinem Methan von circa $10 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (KTBL 2013) entspricht der Energiegehalt von Faulgas etwa $6,5 \text{ kWh}/\text{m}^3$. Bei einem angenommenen elektrischen Wirkungsgrad von 33 % bei der Verwertung mittels einer Blockheizkraftwerks entstehen somit pro Kubikmeter Biogas $2,1 \text{ kWh}$ elektrischer Energie.

Übertragen auf die verschiedenen Szenarien ergibt sich folgendes Bild (Angaben jeweils pro Tag):

- Szenario 1: $170 \text{ m}^3 * 2,1 \text{ kWh}/\text{m}^3 = 358 \text{ kWh}_{\text{el}}$
- Szenario 2: $184 \text{ m}^3 * 2,1 \text{ kWh}/\text{m}^3 = 386 \text{ kWh}_{\text{el}}$
- Szenario 3: $190 \text{ m}^3 * 2,1 \text{ kWh}/\text{m}^3 = 399 \text{ kWh}_{\text{el}}$

Insgesamt können die in Tabelle 5 dargestellten Erhöhungen bzw. Verringerungen der Szenarien 2 und 3 im Vergleich zum Ausgangs-Szenario 1 beobachtet werden.

Tabelle 5: Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlamm-, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zum Ausgangsszenario für die Beispielkläranlage.

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)	
	1,5 – 2h Szenario 2	> 2,5 h Szenario 3
$b_{TM,E,PS,d}$	+20,0 %	+30,0 %
$b_{TM,E,ÜS,d}$	-13,8 %	-22,0 %
e_{FG}	+8,03 %	+11,6 %
OV_d	-0,23 %	-2,58 %

Aus den gezeigten Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die untersuchten Maßnahmen zur Erhöhung des Primärschlammaustrags in diesem Fall eine Steigerung des Faulgasanfalls um über 10 % erzielt werden kann. Jedoch muss hierbei beachtet werden, dass unter anderem durch den geringeren Eintrag von Feststoffen sowie die Reduzierung der organischen Frachten der TS-Gehalt im Belebungsbecken sinkt. Da ein Mindestwert von 2 g/L nicht unterschritten werden sollte, erhöht sich das Schlammalter in der Belebung von Szenario 1 – 4 von 24 d auf 27 d. Dies bedeutet, dass hier für den Betreiber eine Anpassung des Belebungsbeckenvolumens angezeigt ist. Im Flussdiagramm wird dies durch den grünen Punkt „Belebung“ signalisiert. Hierdurch erhält der Betreiber aus der Anwendung des Flussdiagrammes die für ihn wichtige Information vor einer Optimierung der Vorklärung erst über Maßnahmen in der Belebung nachzudenken.

Im Gegensatz dazu wird im nächsten Abschnitt eine „Durchschnittsanlage“ nach DWA mit einem Schlammalter im Ausgangsszenario von 12,6 d betrachtet. Hier sollen die Auswirkungen der Optimierungsmaßnahmen bei einer typischen Anlage untersucht werden.

5 Betrachtung einer Anlage mit Zulaufbedingungen nach DWA

Wie bereits erwähnt, wird in diesem Abschnitt nicht mehr das gesamte Procedere dargestellt, sondern hauptsächlich die Ergebnisse beleuchtet.

Tabelle 6 zeigt die berechneten Eingangswerte in BelebungsExpert 3.0 für die angenommene Kläranlage mit typischen Zulaufkonzentrationen (s.a. Tabelle 1).

Tabelle 6: Zulaufkonzentrationen zum Belebungsreaktor basierend auf Tabelle 1.

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)			Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h	> 2,5 h		
$C_{CSB,ZB}$ [mg/L]	467	433	400	267	200
$S_{CSB,ZB}$ [mg/L]	218	234	226	167	175
$X_{TS,ZB}$ [mg/L]	194	156	136	78	19
$C_{TKN,ZB}$ [mg/L]	55	55	55	38	49
$S_{NH_4,ZB}$ [mg/L]	41	41	41	28	37
$S_{NO_3,ZB}$ [mg/L]	0	0	0	0	0
$C_{P,ZB}$ [mg/L]	9	9	9	2	2

$C_{CSB,ZB}$: Chemischer Sauerstoffbedarf; $S_{CSB,ZB}$: Gelöster chemischer Sauerstoffbedarf; $X_{TS,ZB}$: Abfiltrierbare Stoffe (0,45 μ m); $C_{TKN,ZB}$: Kjeldahl-Stickstoff; $S_{NH_4,ZB}$: Ammoniumstickstoff; $S_{NO_3,ZB}$: Nitratstickstoff; $C_{P,ZB}$: Gesamt-Phosphor

Nach Abbildung 4 würde man für diese Anlage grundsätzlich bei denselben Optimierungsoptionen wie für die Beispielkläranlage landen. Zusätzlich zu den bereits gezeigten Optionen werden allerdings die alternativen Verfahren Vorklärung mit Vorfällung und Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung gezeigt für den Fall, dass keine ungenutzten Beckenvolumina zur Verfügung stehen.

5.1 Auswertung der Szenarien

Abbildung 8 sind die Werte für die verschiedenen Szenarien zu entnehmen. Für das Ausgangsszenario ($t=0,75-1h$) ergeben sich eine einwohnerspezifische Primärschlammproduktion von 35 $g_{TM}/(E^*d)$, eine einwohnerspezifische Überschlammproduktion von 39 $g_{TM}/(E^*d)$, ein Faulgasanfall von 24 L/(E^*d) und ein Sauerstoffbedarf von 3 873 kg/d.

Wie zu erkennen ist, steigt die Primärschlammproduktion wie erwartet in Szenario 2 ($t=1,5-2h$) auf 42 $g_{TM}/(E^*d)$, in Szenario 3 ($t>2,5h$) auf 46 $g_{TM}/(E^*d)$, in Szenario 4 (Vorfällung) auf 56 $g_{TM}/(E^*d)$ und in Szenario 5 (Mikrosiebung) auf 67 $g_{TM}/(E^*d)$. Ebenfalls steigt der einwohnerspezifische Faulgasanfall auf 26 L/(E^*d) in Szenario 2, auf 27 L/(E^*d) in Szenario 3, auf 29 L/(E^*d) in Szenario 4 und auf 32 L/(E^*d) in Szenario 5.

Demgegenüber sinkt die Überschussschlammproduktion im Vergleich zum Ausgangspunkt (39 $g_{TM}/(E^*d)$) in Szenario 2 (34 $g_{TM}/(E^*d)$) über Szenario 3 (31 $g_{TM}/(E^*d)$) und Szenario 4 (22 $g_{TM}/(E^*d)$) bis Szenario 5 (16 $g_{TM}/(E^*d)$). Dementsprechend sinkt ebenfalls der Sauerstoffbedarf von 3 873 kg/d auf 3 860 kg/d in Szenario 2, auf

3 799 kg/d in Szenario 3, 2 664 kg/d in Szenario 4 steigt allerdings in Szenario 5 auf 3 066 kg/d an, da hier weniger Stickstoff in der Vorklärung abgeschieden wird als bei der Vorfällung.

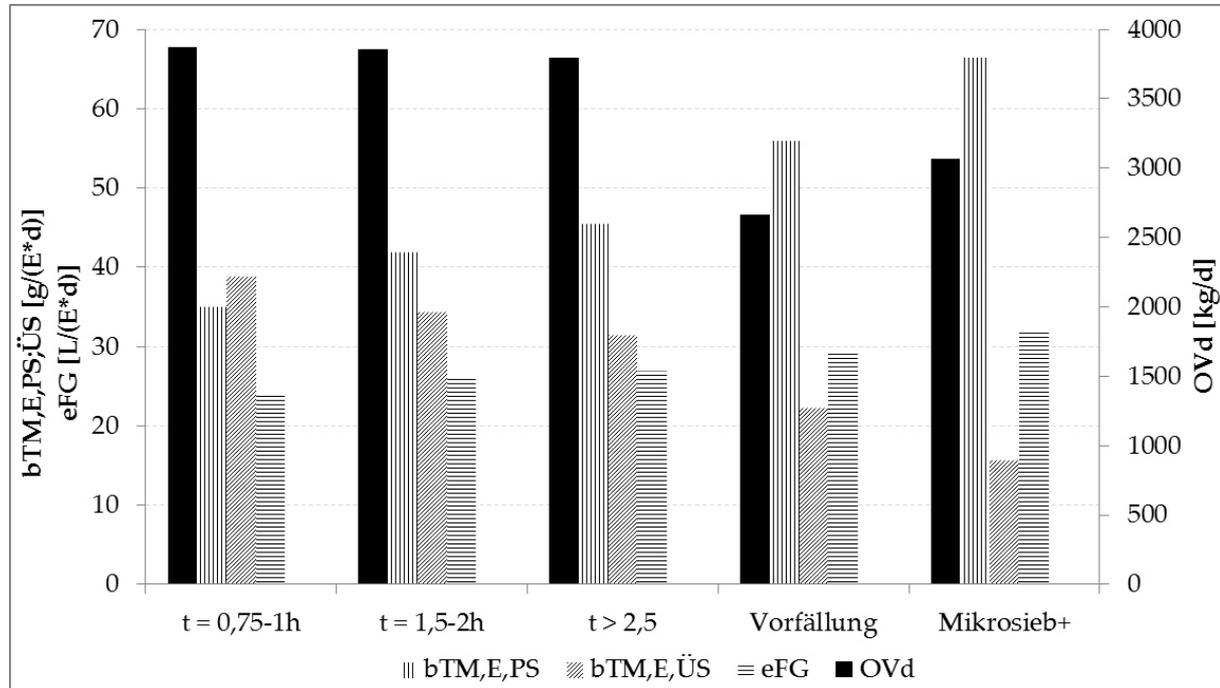


Abbildung 8: Ergebnisse der Anwendung des Flussdiagramms für eine 60 000 EW Abwasserreinigungsanlage nach DWA-A 131.

Zu den im oberen Abschnitt erläuterten Werten stellt Tabelle 7 die prozentualen Abweichungen im Vergleich zum Ausgangsszenario dar.

Tabelle 7: Erhöhung bzw. Verringerung von Primärschlamm-, Überschussschlammproduktion, Faulgasproduktion und Sauerstoffbedarf im prozentualen Vergleich zum Ausgangsszenario.

	Vorklärung (Durchflusszeit ist bezogen auf den mittleren Trockenwetterzufluss)		Vorklärung mit Vorfällung	Mikrosiebung in Kombination mit Fällung /Flockung
	0,75 – 1 h	1,5 – 2 h		
b _{TM,E,PS,d}	+20,0	+30,0	+60,0	+90,0
b _{TM,E,ÜS,d}	-11,6	-19,1	-42,6	-59,6
e _{FG}	+7,93	+11,2	+20,8	+32,9
O _{Vd}	-0,34	-1,91	-31,2	-20,8

Im Gegensatz zu den Berechnungen der Beispielanlage wurden hier auch die alternativen Verfahren Vorfällung und Mikrosiebung (in Kombination mit Fällung und Flo-

ckung) betrachtet, da in den Szenarien mit erhöhter Aufenthaltszeit das Schlammalter nur bis auf 15 d ansteigt. Bezogen auf den Faulgasanfall sind hier Zunahmen bis zu ca. 8 – 32 % möglich. Hierbei ist zu beachten, dass das Schlammalter für Szenario 4 mit 22 d bereits relativ hoch und bei Mikrosiebung auf 31 d ansteigt. Abgesehen davon, dass in diesem Fall die biologische Stufe optimiert werden kann, gewinnt der Betreiber in einem solchen Fall die Information, dass weiteres Optimierungspotenzial auf seiner Anlage vorhanden ist, welches erschlossen werden kann.

6 Fazit

Wie die Ausführungen für die beiden unterschiedlichen Anlagen darlegen wird dem Betreiber mit den vorgestellten Checklisten eine schnelle und strukturierte Möglichkeit an die Hand gegeben, um eine Einschätzung zu „seiner“ Anlage und den unterschiedlichen Optimierungsmöglichkeiten zu bekommen. Der Kontakt zu einem Ingenieurbüro ist jedoch weiterhin unumgänglich, wenn es um die konkrete Planung von Maßnahmenumsetzungen geht. Hierbei sind dann auch aggregatspezifische Besonderheiten der Anlagen zu berücksichtigen.

Literatur

- ATV-DVWK (2003): ATV-DVWK-A 198, Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. Arbeitsblatt
- Dilly, T.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2017): „Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten“ – Fachtagung: Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen. Kaiserslautern, 30.11.2017.
- DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- DWA (2016): Arbeitsblatt DWA-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- Imhoff, K.; Imhoff, K. R. (1999): Taschenbuch der Stadtentwässerung, Oldenburg Wissenschaftsverlag, München. ISBN: 978-3-486263-33-6.
- KTBL (2013). *Faustzahlen Biogas*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. ISBN: 978-3-941583-85-6.

Korrespondenz an:

Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen
Universität Luxemburg – Campus Kirchberg
Lehrstuhl für Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau
6, rue Richard Coudenhove-Kalergi, L-1359 Luxembourg
Tel.: (+352) 46 66 44 5283
Fax: (+352) 46 66 44 5200
E-Mail: joachim.hansen@uni.lu

Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen

Michael Schäfer¹, Oliver Gretzschel¹, Theo G. Schmitt¹, Inka Hobus²

¹FG Siedlungswasserwirtschaft – TU Kaiserslautern, 67663 Kaiserslautern

² WiW-Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH, 42289 Wuppertal

Kurzfassung: Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung bieten schon jetzt ein großes Potenzial, um einen Beitrag zum Ausgleich schwankender Energiemengen durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) zu leisten. Neben der Nutzung der vorhandenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) kann durch die Einbindung eines Aggregatemanagements Flexibilität auf der Kläranlage bereitgestellt werden. Mit dem Einsatz von Power-to-Gas Konzepten kann EE-Überschussstrom in langfristig speicherbare Energie umgewandelt werden. Der bei Power-to-Gas anfallende Reinsauerstoff kann direkt auf der Kläranlage in der biologischen Stufe oder zur Ozonherstellung für eine Spurenstoffelimination eingesetzt werden.

Key-Words: Flexibilität, Kläranlage, Potenziale, Energiemanagement, Power-to-Gas

1 Hintergrund

Der steigende Bedarf des Ausgleichs schwankender Energiemengen ist ein Nebeneffekt des stetigen Ausbaus der Erneuerbaren Energien (EE) im Rahmen der Energiewende. Wurde früher ein Großteil der Grundlast über Atomkraft und fossile Energieträger erbracht, muss diese mengenmäßige Lücke zukünftig nicht nur geschlossen werden, sondern auch die mangelnde Flexibilität dieser Kraftwerke ausgeglichen werden. Dies stellt die Energiewirtschaft vor neue Herausforderungen. Energie aus Sonne und Wind schwankt entsprechend ihrem natürlichen Aufkommen und kann zeitweise zu Energieüberschüssen führen, welche nicht ins Stromnetz eingespeist werden können. Umgekehrt kann es zu Versorgungsengpässen kommen, die von flexiblen Stromerzeugern erneuerbarer Energien ausgeglichen werden müssen. Mit steigendem Anteil dieser volatileren Energiequellen an der Gesamtenergieproduktion wird der Bedarf an Netz- und Systemdienstleistungen, z. B. in Verbindung mit Energiespeichern steigen, um die Stabilität und Funktionsfähigkeit der Stromnetze

weiterhin effektiv zu gewährleisten. Das Faulgas, das auf Kläranlagen mit anaerober Schlammfäulung anfällt, wird bislang mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen), i. d. R. Blockheizkraftwerke (BHKW), nach Erfordernissen des Kläranlagenbetriebs zur Eigenversorgung verstromt. Kläranlagen mit Schlammfäulung bieten mit ihren vorhandenen KWK-Anlagen und den zugehörigen Gasspeichern sowie den vorhandenen Aggregaten auf den Anlagen bereits heute hervorragende technische Voraussetzungen, um System- und Netzdienstleistungen für Verteil- und Übertragungsnetze zur Verfügung zu stellen.

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit erneuerbarer Energieerzeugung – *arrivee*“ wurde die Integration der in Deutschland flächendeckend vorhandenen Kläranlagen mit Schlammfäulung in ein optimiertes Flexibilitäts- und Speicherkonzept untersucht, um damit einen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Dies wurde anhand der Pilotkläranlage Radevormwald näher betrachtet. Des Weiteren wurden unterschiedliche Konzepte zur Bereitstellung von Flexibilität entwickelt. Im Folgenden werden die Potenziale und Möglichkeiten von Kläranlagen zur Bereitstellung von Flexibilität im Bereich des Last- und Speichermanagements aufgezeigt.

2 Flexibilitätsbereitstellung durch Kläranlagen

2.1 Flexibilität – Was ist das?

Der Begriff Flexibilität wird fachübergreifend unterschiedlich verwendet und ist nicht eindeutig definiert. Im Weiteren wird als Flexibilität die Fähigkeit einer technischen Anlage verstanden, ihre elektrische Leistungsaufnahme oder -abgabe auf Grund eines externen Signals kurzfristig für einen begrenzten Zeitraum anzupassen. Je nach Typ der technischen Anlage lassen sich drei Aktionsfelder identifizieren, die unter dem Begriff „Flexibilität“ zusammengefasst werden können (vgl. Abbildung 2.1). Diese sind das Einspeisemanagement, das Lastmanagement und das Speichermanagement (siehe auch Schmitt et al. 2017b).

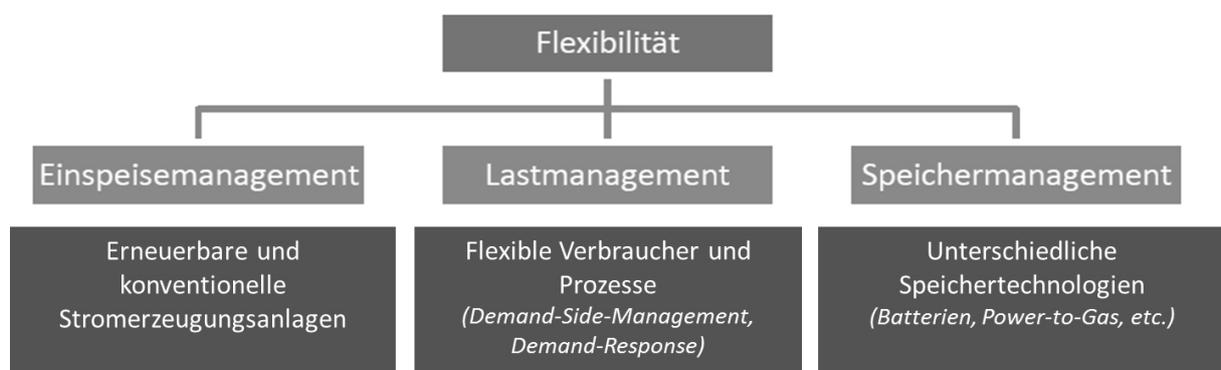


Abbildung 2.1: Flexibilitätsbegriff (nach DENA 2017)

Das elektrische Energieversorgungssystem befindet sich in einem umfassenden Transformationsprozess. Die Steigerung der Flexibilität im Gesamtsystem ist ein zentraler Faktor für eine erfolgreiche, kosteneffiziente Transformation des Energiesystems. Kläranlagen verfügen über Flexibilitätspotenziale in allen drei Aktionsfeldern und sind somit interessante Standorte für weiterführende Untersuchungen hinsichtlich der Bereitstellung von Flexibilität.

2.2 Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität

Für Flexibilität bestehen vielfältige Märkte und Einsatzmöglichkeiten. Sie lassen sich in die Kategorien systemdienlich, marktdienlich und netzdienlich unterteilen (vgl. Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2: Kategorien des Flexibilitätseinsatzes (in Anlehnung an Gretzschel et al. 2016)

Im Folgenden wird auf die verschiedenen Kategorien kurz eingegangen:

- Der systemdienliche Einsatz umfasst die Bereitstellung von Regelleistung als Systemdienstleistung zur Frequenzhaltung im Verbundnetz. Im elektrischen Energieversorgungsnetz muss die Bilanz zwischen Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein. Eine Differenz zwischen eingespeister und abgenommener Leistung führt zu einer Abweichung von der Nennfrequenz (50 Hz). Es ist die Aufgabe der Übertragungsnetzbetreiber, die Abweichung zwischen Last und Erzeugung in ihrer Regelzone auszugleichen. Der Einsatz von Regelleistung wird durch die Ausschreibung von drei verschiedenen Regelleistungsprodukten (Minuten-, Sekundär-, und Primärreserve) auf dem Regelleistungsmarkt organisiert. Die technischen Anforderungen werden über Präqualifikationsbedingungen definiert (VDN, 2007). Unter den heutigen Rahmenbedingungen kann die Partizipation von Flexibilitäten mittlerer und kleiner Leistungsklassen auf dem Regelleistungsmarkt vornehmlich über die Aggregation in einem virtuellen Kraftwerk erfolgen

(Neusel-Lange und Zdrallek 2015). Durch eine weitere Anpassung der technischen Mindestanforderungen können kleine und mittlere Leistungsklassen zukünftig auch ohne Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk am Regelleistungsmarkt teilnehmen. Die Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk bietet allerdings wirtschaftliche und organisatorische Vorteile (Neusel-Lange und Zdrallek 2015).

- Der marktdienliche Einsatz umfasst die Nutzung der Flexibilität zur Bilanzkreisoptimierung. Jeder Verbraucher und jeder Erzeuger ist einem Bilanzkreis (Energienmengenkonto) zugeordnet. Der Bilanzkreisverantwortliche muss auf Prognosen basierende Fahrpläne für die Entnahme bzw. Einspeisung von elektrischer Energie beim Übertragungsnetzbetreiber anmelden. Durch die Einbindung von flexiblen Aggregaten kann zum einen der Fahrplan so angepasst werden, dass der Bilanzkreis ausgeglichen ist bzw. durch den Einkauf/Verkauf von Energie höhere Erlöse bzw. geringere Kosten erreicht werden. Darüber hinaus werden auf Basis der Preisunterschiede an den Kurzfristmärkten für elektrische Energie (Spotmarkt) in verschiedenen Forschungs- und Pilotprojekten zurzeit dynamische Tarifmodelle entwickelt, die die Vorteile von Preisunterschieden an den Strombörsen auch mittleren und kleineren Verbrauchergruppen zugänglich machen (Meese et al. 2015). Des Weiteren kann es durch Ungenauigkeiten der Prognoseverfahren oder durch nicht vorhersehbare Ereignisse zu Abweichungen vom Fahrplan kommen, wodurch Kosten für Ausgleichsenergie entstehen. Prognoseabweichungen lassen sich ebenfalls durch den Einsatz von Flexibilität kurzfristig ausgleichen.
- Der netzdienliche Einsatz umfasst die Leistungsanpassung zur Behebung von lokalen Grenzwertverletzungen im Verteilungsnetz. Es handelt sich dabei um Verletzungen des zulässigen Spannungsbandes und thermische Überlastung der Betriebsmittel, die beispielsweise durch den zunehmenden Ausbau der Erneuerbaren Energien hervorgerufen werden können. Durch die gezielte Leistungsanpassung der Flexibilität können die Grenzwertverletzungen im Anschlussstrang behoben und somit ein möglicherweise erforderlicher Netzausbau vermieden oder verzögert werden. Der Ansatz wird im Rahmen des Einspeisemanagements bereits praktiziert. Der Einsatz gezielter Last- und Speichersteuerung für netzdienliche Zwecke ist zurzeit noch keine gängige Praxis, sondern Gegenstand der aktuellen Forschung im Bereich der Verteilungsnetze. Die Überwachung des Netzzustandes mit einem entsprechenden Smart-Grid-System und die Einbindung der Flexibilitätsoptionen in das Regelungskonzept ist eine Grundvoraussetzung für den dynamischen netzdienlichen Einsatz von Flexibilität (DENA 2017).

2.3 Flexibilität erkennen & nutzen

Kläranlagen können bereits heute mit den vorhandenen Aggregaten und KWK-Anlagen Flexibilität auf unterschiedlichen Märkten anbieten. Das gezielte Nutzen der Kläranlagenaggregate zur Bereitstellung von Flexibilität unter Einbeziehung der kläranlagenspezifischen Randbedingungen wird im Folgenden als Aggregatmanagement bezeichnet. Hierbei wurde unter Einhaltung der primären Aufgabe, der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung, und einem vorausgesetzten energieeffizienten Betrieb der Anlagenteile ein methodisches Vorgehen entwickelt, um freie Kapazitäten für einen flexiblen Betrieb kurzzeitig zu nutzen (siehe Schäfer et al. 2017b). In Abbildung 2.3 ist die Identifizierung von Aggregaten, die für einen flexiblen Betrieb geeignet sind, beispielhaft für die Kläranlage Radevormwald dargestellt. Mit Hilfe des entwickelten Vorgehens, den entsprechenden Kennzahlen und Kontrollparametern sowie deren Überprüfung kann diese Managementstrategie als Hilfestellung zur Erfassung und Hebung von Flexibilitätspotenzialen auf Kläranlagen dienen.

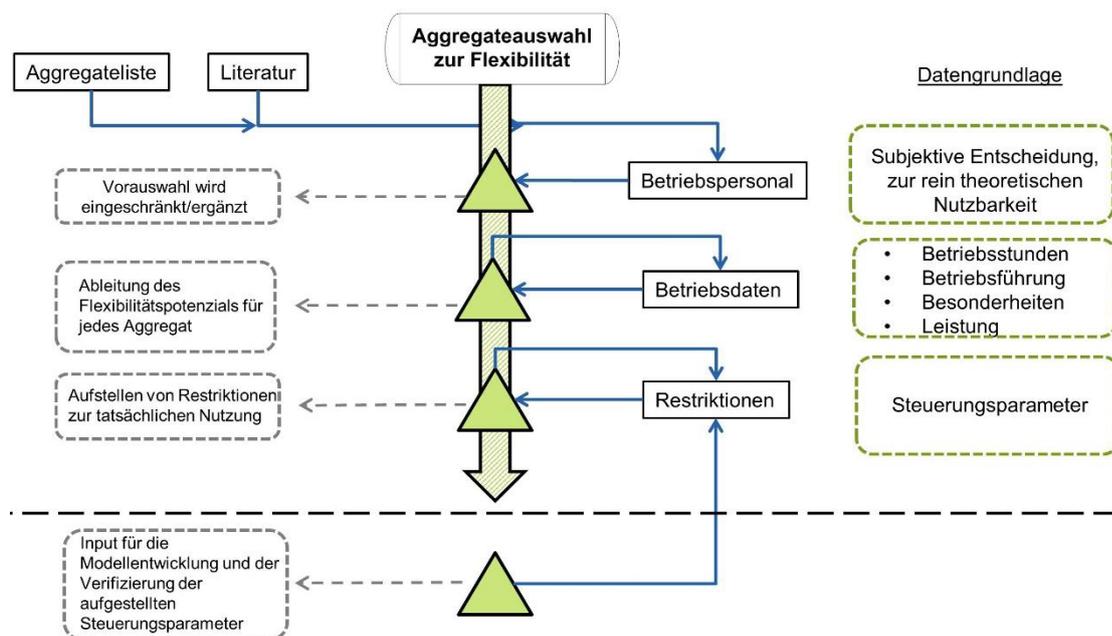


Abbildung 2.3: Ablaufschema der Aggregateauswahl auf der Pilotanlage Radevormwald

Insgesamt wurden für die Kläranlage Radevormwald 10 Aggregate bzw. Aggregatgruppen, ergänzend zu den BHKW und Netzersatzanlagen (NEA), identifiziert und ausführlich hinsichtlich ihres Flexibilitätspotenzials untersucht. Die betrachteten Aggregate sind nachfolgend aufgeführt:

- Sandfanggebläse
- Belüftung (Biologische Stufe)
- Rührwerke (Biologische Stufe)
- Rezirkulationspumpen
- Rücklaufschlammumpen
- Rührwerke (Faulturm)
- Heizschlammpumpe (Faulturm)
- Rohschlammpumpe (Faulturm)
- Kammerfilterpresse
- Maschinelle Überschussschlammeindickung

Für die Beurteilung der Flexibilität der Aggregate wurden im Anschluss an die Identifizierung zielführender Aggregate Abschaltversuche durchgeführt. Mit den Abschaltversuchen der Gebläse der biologischen Stufe konnte gezeigt werden, dass das Abschalten der kompletten Belüftung für 60 min zu keiner signifikanten Verschlechterung der Reinigungsleistung der Kläranlage Radevormwald führt. Das Abschalten der Rücklaufschlamm-Pumpen (RS) für 120 min bei Trockenwetter führte ebenfalls zu keiner signifikanten Verschlechterung der Reinigungsleistung der Kläranlage. Somit konnte gezeigt werden, dass die RS-Pumpen genauso wie die Gebläse für die Flexibilitätsdienstleistung angeboten werden können (siehe dazu auch: (Salomon und Pyro 2017)). Zusätzlich wurden auf zwei weiteren Anlagen des Wupperverbandes Abschaltversuche durchgeführt, die ebenfalls positiv verlaufen sind.

Auf Grundlage einer umfassenden Literaturlauswertung, umfangreichen eigenen Untersuchungen und den Erfahrungen bei der Umsetzung auf der Pilotanlage Radevormwald sind in Tabelle 2.1 Kennwerte zur Bereitstellung von Flexibilität zusammengestellt. Hierbei wurden Restriktionen und Kontrollparameter für die einzelnen Aggregate entwickelt und über die Abschaltversuche und mathematische Modellierung überprüft, um negative Auswirkungen auf den Reinigungsbetrieb auszuschließen bzw. zu minimieren. Die aufgestellten Kennwerte sind als erste allgemeine Anhaltswerte zur Flexibilisierung der Aggregate zu verstehen. Diese können nicht uneingeschränkt übertragen werden, vielmehr sind die individuellen Randbedingungen der jeweiligen Kläranlage zu berücksichtigen.

Vorschläge und weiterführende Beschreibungen zu den aufgestellten Kennwerten, Restriktionen und Kontrollparameter für jede untersuchte Aggregategruppe sind im Projektbericht sowie zusätzlich in „Anhang 6 Aggregatemanagement – Datenblätter“ des Schlussberichtes näher beschrieben. Dieser Anhang kann über www.erwas-arrivee.de angefragt werden.

Tabelle 2.1: Übersicht der untersuchten Aggregate inkl. Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der Kläranlage Radevormwald, (verändert nach Schäfer et al. 2017b)

Aggregatgruppe	Kontrollparameter	Ab-schalt-dauer (min./max.)	Zu-schalt-dauer (min./max.)	Rege-nera-tions-zeit	An-fahr-zeit	Ab-fahr-zeit
		[min]	[min]	[min]	[s]	[s]
Sandfang (<i>intermittierende Belüftung</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Zulaufwassermenge Mindestbelüftungszeit 	5 - 60	5 - 60	30	60	60
Belebungsbecken 1+2 (<i>intermittierende Belüftung</i>)	<ul style="list-style-type: none"> NH₄-Konzentration (biologische Stufe & Ablauf Nachklärung) Zulaufkraft (NH₄-/ CSB) 	5 - 120	-	15	10	5
Belebungsbecken 1 (<i>Rührwerk, intermittierend</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Mindestlaufzeit Schaltzyklen 	15 - 30	15 - 40	30	60	60
Rücklaufschlamm-pumpen	<ul style="list-style-type: none"> Zulaufwassermenge Schlamm Spiegel 	5 - 120	-	60	60	5
Rezirkulationspumpen	<ul style="list-style-type: none"> NO₃-Konzentration (Ablauf Belebungsbecken) 	5 - 1.440	-	30	60	60
Heizschlammpumpe (Faulturm 1+2)	<ul style="list-style-type: none"> Temperatur (<i>min/max</i>) 	15 - 1.440	15 - 1.440	60	10	5
Rohschlammpumpe (Faulturm 1+2)	<ul style="list-style-type: none"> Füllstand Voreindicker/ Vorlagebehälter (<i>min/max</i>) 	15 - 360	-	60	120	60
Rührwerke (Faulturm 1+2)	<ul style="list-style-type: none"> Mindestlaufzeit, Schaumbildung 	15 - 30	-	15	180	60
Seihbandanlage/ ÜSS-Pumpen	<ul style="list-style-type: none"> Trockensubstanzgehalt² (Belebungsbecken) bzw. ÜS-Entnahme Anlagenbesetzung 	-	120 - 1.440	15	60	900
Kammerfilterpresse 1+2	<ul style="list-style-type: none"> Füllstand Nacheindicker (<i>min/max</i>) Anlagenbesetzung (Personal) 	-	120	60	120	120
BHKW 1+2	<ul style="list-style-type: none"> Füllstand Gasspeicher (<i>min/max</i>) max. Schaltvorgänge 	5 - 1.440	5 - 1.440	5/30*	180	300
NEA	<ul style="list-style-type: none"> Füllstand Treibstoffspeicher (<i>min/max</i>) Max. Nutzungsstunden 	-	15 - 240	2.5	60	30

* negative Flexibilität/positive Flexibilität

3 Potenziale der bundesweiten Kläranlagen

Um zu beurteilen, ob Kläranlagen mit ihrer flächendeckenden Verfügbarkeit einen signifikanten Beitrag zur Bereitstellung von markt- oder systemdienlicher Flexibilität leisten können, wurde das vorhandene Potenzial kommunaler Kläranlagen in Deutschland ermittelt. Hierfür wurde die bundesweit installierte Stromerzeugungslleistung auf Kläranlagen erhoben sowie die mögliche Anlagenflexibilität durch Bewirtschaftung der vorhandenen Aggregate untersucht. Dabei ist zu beachten, dass sowohl die zur Verfügung stehende Leistung als auch die Dauer der Leistungserbringung von großer Bedeutung sind. Damit besteht die Einheit zur Energieerzeugung nicht nur aus der KWK-Anlage, sondern ist eng gekoppelt mit dem Betrieb des entsprechenden Gasspeichers. Neben den KWK-Anlagen sind auf Kläranlagen NEA sowie die vorhandenen Aggregate zur Bereitstellung von Flexibilität nutzbar.

3.1 Potenziale der KWK-Anlagen auf Kläranlagen

3.1.1 Stromerzeugungspotenziale

Zur Analyse des Potenzials der Stromerzeugung auf Abwasserreinigungsanlagen ist eine nähere Betrachtung der Produktion von Faulgas im Status Quo notwendig. Faulgas wird nur auf Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung in einem Faulturn produziert. Im Jahr 2012 wurde in Deutschland in 1.232 Anlagen im Rahmen der Klärschlammfaulung Faulgas gewonnen. Der Primärenergiegehalt dieses Faulgases entspricht laut Statistischem Bundesamt etwa 5,68 TWh/a. In 80 % der Anlagen wird der überwiegende Teil des Klärschlammes zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Dabei wurden 1,25 TWh_{el}/a Strom (Stand: 2013) aus Faulgas erzeugt (DESTATIS 2013a), welches sich auf 1,45 TWh_{el}/a (Stand: 2016) erhöht hat (DESTATIS 2017).

Eine weitere Steigerung der Faulgas- und Stromproduktion kann durch folgende Optimierungsmaßnahmen erreicht werden:

- Steigerung der Energieausbeute (Ausreizung innerbetrieblicher Optimierung Schlamm/Faulung, Desintegration des Klärschlammes, Hochlastfaulung)
- Ausnutzung von Kapazitätsreserven
- Ausrüstung der aktuell vorhandenen Kläranlagen mit Schlammfaulung mit KWK-Anlagen
- Umrüstung aller in Frage kommender Belebungsanlagen auf Schlammfaulung mit entsprechenden KWK-Aggregaten

Es zeigt sich, dass mit den o. g. Maßnahmen die Stromproduktion deutlich erhöht werden kann. Dem Gesamtpotenzial nicht hinzugerechnet wurde der Anteil, der durch eine Mitvergärung von Co-Substraten erreicht werden könnte. Eine Zusammenfassung der untersuchten Optimierungspotenziale ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

Abbildung 3.1 zeigt den Verlauf der Stromproduktion auf Kläranlagen seit 1990. Zu erkennen ist, dass sich die Stromproduktion bis 2012 um den Faktor 1,5 erhöht hat. Die vorstehenden Ausführungen zeigen allerdings auch, dass noch große Potenziale auf Kläranlagen zu erschließen sind. Erst in den letzten Jahren ist der Fokus der energetischen Optimierung auf Kläranlagen wieder in das Bewusstsein der Betreiber gelangt und es ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren sowohl Energie eingespart als auch mehr Energie durch optimierte Faulgasproduktion erzeugt wird (DWA 2013). Hierbei sind insbesondere die ökonomischen Randbedingungen näher zu prüfen und stellen oftmals die größten Hemmnisse bei der Bergung der Potenziale dar. Das bundesweite Potenzial zur Stromproduktion auf Kläranlagen wird insgesamt auf 2,11 bis 2,61 TWh_{el}/a abgeschätzt, was (für den oberen Wert) einer Erhöhung der Stromproduktion um den Faktor 2,1 gegenüber dem Stand von 2012 entspricht. Dies entspricht einer mittleren elektrischen Leistung von 240 bis 300 MW_{el} (Schäfer et al. 2015).

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der untersuchten Potenziale (Schäfer et al. 2015)

Potenzialbereich	Faulgas [Mio. m ³]	Jahresprimär- energiemenge ¹⁾ [TWh/a]	Strom- produktion ²⁾ [TWh _{el} /a]	Mittlere Leistung ³⁾ [MW _{el}]
Ist-Zustand (2012)	644,537	4,490	1,250	142,7
Ausrüstung aller Anlagen mit KWK-Aggregaten	86,744	0,613	0,196 – 0,245	22,4 – 28,0
Steigerung der Energieaus- beute	100,982	0,656	0,210 – 0,263	24,0 – 30,0
Umstellung auf Faulung	172,510 – 258,765	1,12 – 1,68	0,359 – 0,673	41,0 – 76,8
Kapazitätsreserven - A Schlammbehandlungszentren	46,745 – 70,118	0,30 – 0,46	0,097 – 0,182	11,1 – 20,8
(Kapazitätsreserven - B Co-Substrate)	(266,672 – 488,90)	(1,733 – 3,178)	(0,555 – 1,271)	(63,3 – 145,1)
Gesamtpotenzial		7,19 – 7,90	2,11 – 2,61	241,1 – 298,2
¹⁾ Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/m ³ ²⁾ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4 ³⁾ berechnet mit 8760 h/a Vollbenutzungsstunden der KWK-Anlagen				

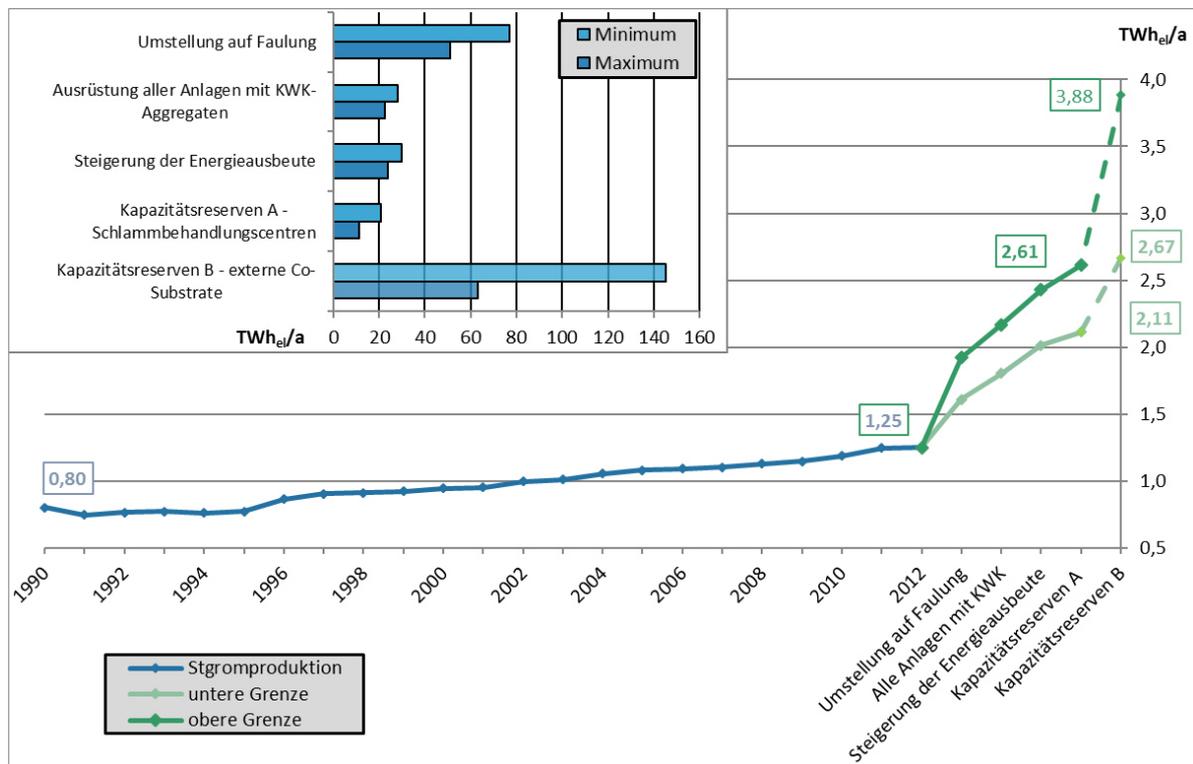


Abbildung 3.1: Entwicklung der Stromproduktion auf Kläranlagen mit den untersuchten Potenzialen in TWh/a (nach Schäfer et al. 2015).

3.1.2 Flexibilitätspotenziale

Zur Abschätzung der bundesweiten Flexibilitätspotenziale der Faulungsanlagen (im Status Quo) sind neben den Daten zur Energieerzeugung detaillierte Werte über den Gasanfall, das Speichervolumen und die Größe der KWK-Anlagen erforderlich. Das Vorgehen sowie die verwendeten Daten zur Berechnung sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

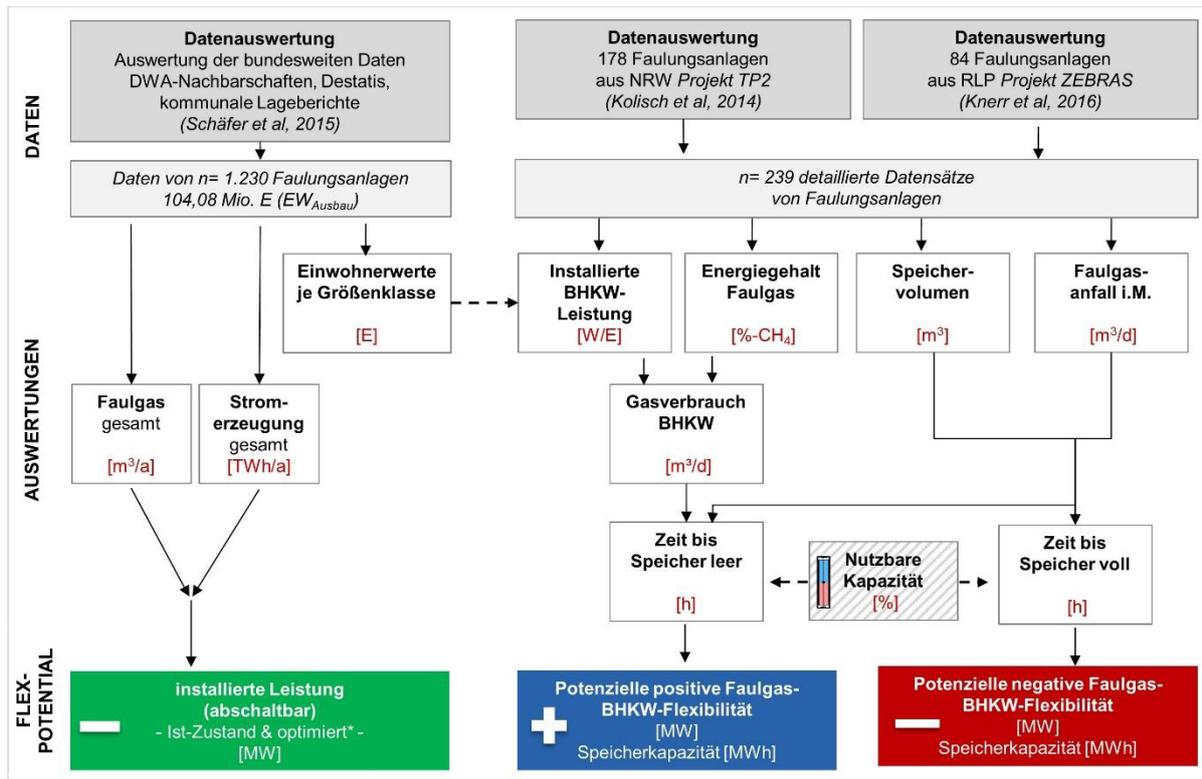


Abbildung 3.2: Vorgehen zur Ermittlung der KWK-Flexibilitäten (Schäfer et al. 2017a)

Auf Basis der angeschlossenen Einwohnerwerte (E) je Größenklasse und der installierten Leistung je E (Median) kann in Summe eine bundesweit installierte KWK-Leistung auf kommunalen Kläranlagen von derzeit rund 215 MW_{el} abgeschätzt werden (vgl. Tabelle 3.2). Die theoretisch verschiebbare Energiemenge liegt hierbei zwischen +1,69 GWh und -2,15 GWh. In einem zukünftig optimierten Zustand (ohne Ausnutzung von Kapazitätsreserven durch Co-Vergärung) könnte die mittlere installierte KWK-Leistung zukünftig auf über 300 MW_{el} ansteigen (Schäfer et al. 2015).

Tabelle 3.2: Potenziale der installierten Leistung sowie der theoretischen zu- und abschaltbaren Energiemengen (unter voller Ausnutzung des Gasspeichers) (Schäfer et al. 2017a)

Größenklasse	Angeschlossene EW _{Ausbau}	Leistung	Zuschaltbare Energiemenge	Abschaltbare Energiemenge
	[E]	[MW _{el}]	[MWh/d]	[MWh/d]
GK 1-3	533.135	2,17	13,94	17,86
GK 4	39.402.713	84,54	694,52	992,61
GK 5	64.139.584	128,28	977,13	1.135,88
	∑ 104.075.432	∑ 214,98	∑ 1.685,59	∑ 2.146,35

Die potenzielle, tatsächlich nutzbare, Flexibilität des Betriebs der KWK-Anlagen ergibt sich insbesondere aus der Kapazität der Gasspeicher und deren Bewirtschaf-

tung unter Berücksichtigung des Gasanfalls sowie der Gasnutzung. Erst die Entkopplung des kontinuierlichen Gasanfalls von dem Betrieb der KWK-Anlage durch eine Speichereinheit ermöglicht eine flexible Nutzung. Die Dauer der möglichen Leistungserbringung wird dabei maßgebend von der Speichergröße bestimmt.

Je nach Speicherbewirtschaftung ändert sich die verschiebbare Energiemenge, bei einem nutzbaren Speicherinhalt von 40% ergeben sich beispielsweise +0,59 GWh bis -1,18 GWh die potenziell zur Verfügung stehen.

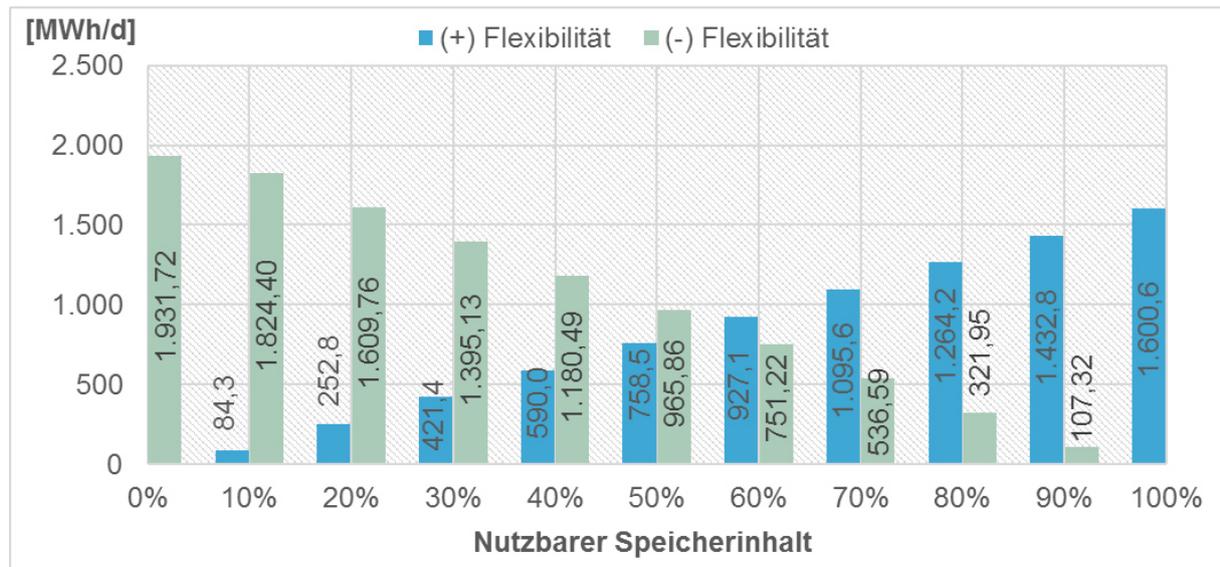


Abbildung 3.3: Potenzielle verschiebbarer Energiemengen in MWh/d in Abhängigkeit des nutzbaren Speicherinhaltes bei einer max. Gasspeicherausnutzung von 90% nach (Schäfer et al. 2017a)

3.2 Flexibilitätspotenziale der Netzersatzanlagen (NEA)

Als Notstromaggregate bzw. Netzersatzanlagen (NEA) werden Stromerzeugungsanlagen bezeichnet, die temporär die benötigte elektrische Energie für sensible Einrichtungen bereitstellen können, um Ausfälle der öffentlichen Stromversorgung auszugleichen. NEA sind vergleichsweise einfach in den Energiemarkt einzubinden. Durch ihre meist großen Nennleistungen sind sie bereits heute für Poolbetreiber interessante Bausteine im Verbund. Einheitliche rechtliche Regelungen zu der auf Kläranlagen vorzuhaltenden Leistung und der zu überbrückenden Zeitspanne existieren nicht. Entsprechend gering ist die allgemeine Datenverfügbarkeit bzgl. des Vorhandenseins sowie der installierten Leistung von NEA. Die Datengrundlage des Potenzials der NEA bilden Datensätze aus Rheinland-Pfalz.

NEA bieten gemäß den vorliegenden Daten ein großes Potenzial für positive Flexibilität ohne größeren technischen und organisatorischen Aufwand. So könnte zukünftig unter günstigen Randbedingungen die angebotene Leistung von 98 MW_{el} auf 194 MW_{el} nahezu verdoppelt werden. Bei einer maximalen Laufzeit von 180 h/a nach

StromGKV (BMWI, BMELV, Bundesrat 2006) könnte theoretisch eine verschiebbare Energiemenge von ca. 35.000 MWh pro Jahr zur Verfügung stehen (vgl. Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Potenzial positiver Flexibilität durch NEA (nach Schäfer et al. 2017a)

	Angeschlossene EW _{Ausbau} [E]	Nennleistung [kVA]		Leistung [MW _{el}]		Verschiebbare Energiemenge [MWh/d]	
		Ist-Zustand	2035/2050	Ist-Zustand	2035/2050	Ist-Zustand	2035/2050
GK4	39.402.713	84.199,1	158.492,5	67,4	126,8	33,2	62,5
GK5	64.139.584	38.333,4	84.183,2	30,7	67,4	15,1	33,2
Σ	103.542.297	122.532,6	242.675,7	98,0	194,1	48,3	95,7

Mangels ausreichender Datengrundlage wurden die Anlagen der GK 1-3 nicht in der Potenzialermittlung berücksichtigt.

3.3 Flexibilitätspotenziale der Kläranlagenaggregate im Status Quo

Neben den Stromerzeugungsanlagen können auf Kläranlagen ebenfalls die Aggregate zur Reinigung des Abwassers sowie der Schlammbehandlung für die Flexibilitätsbereitstellung genutzt werden. Diese lassen sich in die Gruppen der kontinuierlichen Prozesse und der diskontinuierlichen Prozesse sowie in verschiedene Baugruppen unterteilen. Um das Flexibilitätspotenzial der einzelnen Verbrauchergruppen einer Kläranlage abzuschätzen, wird im ersten Schritt aus dem Jahresverbrauch und den Betriebsstunden (Bh) die aggregatespezifische Leistung (P_w) berechnet: $P_{w,i} = W_i/Bh_i$. Da sich der Stromverbrauch der Aggregategruppen jedoch auf mehrere Einzelaggregate verteilt und diese im Regelfall unterschiedlich betrieben werden, werden die Jahresbetriebsstunden hauptsächlich über den Hauptverbraucher in jeder Aggregategruppe abgeschätzt. Auf Basis dieser Annahmen wurde der mittlere Stromverbrauch getrennt für die Kläranlagengrößen GK 1-3, GK 4 und GK 5 in eine aggregatespezifische mittlere Leistung umgerechnet. Im Rahmen des Aggregatemanagements wurden Zeitfenster ermittelt, in denen bestimmte Aggregate zu- bzw. abgeschaltet werden können (vgl. Schäfer et al. 2017b). Daraus lassen sich die verschiebbaren Energiemengen in positiver bzw. negativer Richtung berechnen.

Tabelle 3.4: Zusammengefasste Ergebnisse der ab- und zuschaltbaren Leistungen sowie Energiemengen der Aggregate aller deutschen Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren

Größenklasse	Angeschlossene EW _{Ausbau} [E]	Zuschaltbare Leistung [MW _{el}]	Abschaltbare Leistung [MW _{el}]	Zuschaltbare Energiemenge [MWh/d]	Abschaltbare Energiemenge [MWh/d]
GK 1-3	2.387.288	4,55	12,41	1,39 – 11,47	5,38 – 7,14
GK 4	45.565.387	50,38	143,09	14,84 – 135,40	70,14 – 94,24
GK 5	71.636.584	67,97	182,32	17,78 – 176,39	108,73 – 143,54
Σ	119.589.259	122,90	337,82	34,01 – 323,25	184,25 – 244,91

Anzumerken ist, dass hierbei nicht alle Bau-/Aggregatgruppen berücksichtigt wurden. Beispielsweise wird bei den Gruppen Rechen, Vorklärung, Filtration sowie der Infrastruktur/Betriebsgebäude auf der Anlage nur ein bedingt zu hebendes Potenzial gesehen und somit in der Potenzialabschätzung nicht berücksichtigt.

In Summe ergibt sich bundesweit eine abschaltbare Leistung von rund 338 MW_{el} und eine zuschaltbare Leistung von 123 MW_{el}. Die verschiebbaren Energiemengen belaufen sich (bei einmaliger Nutzung pro Tag) auf 34 – 323 MWh positiver und 184 - 245 MWh negativer Flexibilität pro Tag (vgl. Tabelle 3.4).

Die Ergebnisse zeigen, dass Kläranlagen mit ihren vorhandenen Aggregaten beachtliche Potenziale, insbesondere bei der negativen Flexibilität, aufweisen können. Die pauschale Abschätzung der zu- und abschaltbaren Energiemengen ist mit einem Abruf pro Tag sehr konservativ. Eine ausführliche Darstellung zur Berechnung der Flexibilitäten jedes Aggregates ist dem Schlussbericht (Schmitt et al. 2017b) zu entnehmen.

3.4 Zwischenfazit: Potenzialzusammenfassung

Die bundesweite Analyse zeigt, dass Kläranlagen bereits heute ausreichend Potenziale aufweisen, um die elektrischen Versorgungsnetze mit unterschiedlichen Dienstleistungen zu unterstützen und somit gestaltend Einfluss zu nehmen. Durch die Hebung anlagenspezifischer Potenziale lässt sich dieser Einfluss deutlich steigern. Volkswirtschaftlich kann hierbei ohne große Investitionen ein nennenswerter Beitrag durch kommunale Infrastruktur geleistet werden. Sowohl mit ihren Stromerzeugungsanlagen (KWK-Anlagen, NEA) als auch mit vorhandenen Kläranlagenaggregaten kann in nennenswertem Umfang Flexibilität bereitgestellt werden.

In Tabelle 3.5 ist das theoretische Flexibilitätspotenzial der bundesweiten Kläranlagen für den Status Quo zusammengefasst. Das maximale Flexibilitätspotenzial der KWK-Anlagen, KA-Aggregate und NEA kann auf 650 MWh_{el} (positiv) und -338 MW_{el} (negativ) abgeschätzt werden. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Kläranlagen ein nicht unerhebliches Potenzial besitzen, sowohl um ihre Stromproduktion weiter zu steigern als auch Flexibilität in größerem Umfang bereit zu stellen. Insbesondere die KWK-Anlagen und die Nutzung der Aggregate auf den Anlagen bieten ein erhebliches Flexibilitätspotenzial.

Tabelle 3.5: Zusammenfassung der Flexibilitätspotenziale der bundesweiten Kläranlagen (erweitert nach (Schäfer et al. 2017a))

	Leistung P		Zuschaltbare Energiemenge	Abschaltbare Energiemenge
	[MW _{el}]		[MWh/d]	[MWh/d]
NEA	(+) 98,0	-	48,3	-
KWK-Anlagen	(+) / (-) 214,98		1.685,59	2.146,35
KA-Aggregate	(+) 337,8	(-) 122,90	∑ 34,01 – 323,25	∑ 184,25 – 244,91
∑	(+) 650,78	(-) 337,88	1.767,90 – 2.057,14	2.330,60 – 2.391,26

4 Die Kläranlage als Langzeitspeicher: Implementierung von Power-to-Gas

4.1 Hintergrund und Anlagenkonzepte

Neben der Bereitstellung von Flexibilität ist bereits mittelfristig auch der Ausbau der Speicherkapazität mittels Power-to-Gas-Technologie (PtG) erforderlich. In (Götz et al. 2016) wird ein solcher Speicherbedarf für überschüssigen Strom aus Wind- und Solarkraftanlagen ab einem EE-Anteil von 74 % (ca. im Jahr 2035) postuliert. Dies setzt ausreichend sogenannte 48-h-Kurzzeit-FlexOptionen voraus, zu denen auch die oben dargestellten Flexibilitäten auf der Kläranlage gehören. Stehen diese nicht (ausreichend) zur Verfügung, werden entsprechende Speicher bereits bei einem deutlich geringeren Ausbaugrad (> 47%) benötigt, um eine unterbrechungsfreie Stromversorgung sicherzustellen.

Das Prinzip von PtG beruht darauf, überschüssigen EE-Strom mittels Elektrolyse in Wasserstoff und Sauerstoff aufzuspalten. Neben diesen gasförmigen Produkten entsteht auch nutzbare Prozesswärme. Ein Großteil des elektrischen Stroms wird somit chemisch in Form von Wasserstoff gespeichert und kann zu einem gewissen Anteil in die bestehende Erdgasinfrastruktur eingespeist und über Monate hinweg gespeichert werden. Der Wasserstoff kann jedoch auch zusammen mit CO₂ in Methan überführt werden (Methanisierung). Auf der Kläranlage bietet sich dazu die biologische Methanisierung als Verfahren an, da dort das Klärgas, bestehend aus CH₄ und CO₂, weiter aufbereitet werden kann. Sie bietet gegenüber der katalytischen Methanisierung mehrere Vorteile, vgl. (Graf et al. 2014).

Das Prinzip der biologischen Methanisierung ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

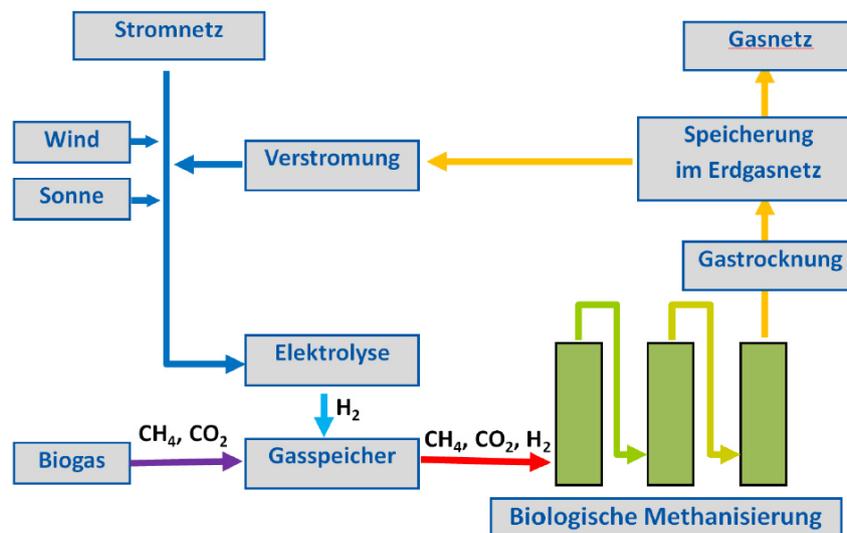


Abbildung 4.1: Prinzip von Power-to-gas mit biologischer Methanisierung unter Einbeziehung von Biogas als CO_2 -Quelle (Dröge und Pacan 2017) als wichtiger Baustein der Sektorkopplung (Stromnetz-Gasnetz).

Der Standort Kläranlage ist für Elektrolysekonzepte insbesondere deshalb von großer Bedeutung, da dort die Stoff- und Energiekreisläufe geschlossen und Synergien geschaffen werden können. Dies ist bei Elektrolysestandorten auf der „grünen Wiese“ in der Regel deutlich schwieriger und aufwendiger. Die Kläranlage kann den bei der Elektrolyse anfallenden Sauerstoff nutzen (in der Belüftung oder als Grundlage für eine Ozonierung, vgl. nachfolgende Kapitel) und kann darüber hinaus auch die Abwärme sinnvoll integrieren, i. B. dann, wenn das BHKW zunehmend als positiver Flexibilitätslieferant genutzt wird (Konzept IV), die BHKW zunehmend stromeffizienter werden oder aber ggf. in Zukunft kein BHKW mehr auf der Kläranlage betrieben wird (Konzept V). Der für eine Methanisierung erforderliche Rohstoff CO_2 ist im Faulgas ausreichend vorhanden. Dieses kann im Rahmen der biologischen Methanisierung einspeisefähig aufbereitet werden (Dröge und Pacan 2017). Damit sind Kläranlagen hervorragend geeignete Standorte zur ressourceneffizienten Umsetzung der PtG-Technologie und ein potenzieller Baustein für eine Langzeitspeicherstrategie auf Bundesebene.

Die Implementierung einer solchen Speichertechnologie auf Kläranlagen wurde in drei unterschiedlichen Anlagenkonzepten (III, IV und V) im Rahmen von *arrivee* betrachtet. Eine Übersicht zu diesen Konzepten kann Tabelle 4.1 entnommen werden.

Nachfolgend werden die aus Sicht der Autoren zukunftsweisenden Konzepte IV und V, die eine Langzeitspeicherung ermöglichen, näher betrachtet.

Tabelle 4.1: Übersicht zu den arrivee-Anlagenkonzepten mit Wasserstofferzeugung mittels Elektrolyse, nach (Schmitt et al. 2017b)

Arrivee Anlagenkonzept	Beschreibung
- III - H ₂ -Nutzung	Dieses Konzept ergänzt den Anlagenbestand um den Baustein der Wasserelektrolyse zur Umwandlung von überschüssigem EE-Strom in speicherfähigen Wasserstoff. H ₂ wird direkt auf der Anlage verwertet. Es bestehen folgende Optionen: H ₂ zu einem Anteil von 10% zum Klärgas beimischen (IIIb) oder Betrieb eines H ₂ -BHKW (IIIb) in Kombination mit einem H ₂ -Speicher. Darüber hinaus kann der Sauerstoff einer weiteren Verwendung zugeführt werden. Verwertungspfade sind: Belüftung oder die Verwertung im Rahmen einer Ozonierung zur Spurenstoffelimination.
- IV - H ₂ -Einspeisung	Bei diesem Konzept wird die Kläranlage zum Langzeitspeicher, indem sie Überschussstrom in einen chemischen Energieträger (H ₂) umwandelt und ins Gasnetz einspeist. Der Sauerstoff kann auch hier wie in Konzept III auf der Kläranlage genutzt werden. Die H ₂ -Einspeisung wird beschränkt durch die Vorgaben des Gasnetzbetreibers.
- V - Methanisierung	Dieses Konzept kombiniert den Baustein der Wasserelektrolyse mit dem Prozess der Methanisierung des anfallenden Klärgases in einem separaten Reaktor. In diesem erfolgt der Prozess der biologischen Methanisierung. Das entstehende hochreine Methan kann ins Gasnetz eingespeist werden. Im Gegensatz zur Wasserstoffeinspeisung bestehen für die Methaneinspeisung keine Einschränkungen.

Die beiden Konzepte sind in Abbildung 4.2 grafisch dargestellt. Anlagenkonzept IV erweitert den konventionellen Kläranlagenbestand in einem ersten Schritt um die Komponente der Elektrolyse. Prozesswärme und Sauerstoff können auf der Kläranlage genutzt werden (vgl. Kapitel 4.3). Dadurch übernimmt der aus überschüssigem EE-Strom erzeugte Wasserstoff die Funktion zur Langzeitspeicherung im Erdgasnetz. In dieses kann er – je nach Einspeisepunkt – zu gewissen Anteilen dem Erdgas beigemischt werden. Zur Erhöhung der Langzeitspeicherpotenziale bzw. zur Einspeisung ohne Wasserstoffbegrenzung kann die Stufe der biologischen Methanisierung implementiert werden. Damit kann sowohl das Methan im Klärgasanteil als auch das aus Wasserstoff und (im Klärgas vorhandene) CO₂ erzeugte Methan (aufbereitetes Klärgas), das nun einen Methangehalt > 95% aufweist, ins Erdgas eingespeist werden (siehe auch Kapitel 4.2.3).

Elektrolysekonzepte ergebenden Potenziale aufgezeigt sowie auf die Möglichkeiten zur Langzeitspeicherung sowie die Energiebilanz dieser Konzepte eingegangen.

4.2.1 Flexibilitätspotenziale

Wie aus Abbildung 4.3 hervorgeht, steigt durch die Elektrolysekonzepte die durch Kläranlagen bereitstellbare (negative) Flexibilität deutlich. Diese ist durch eine Umsetzung der Konzepte IV und V im Bestand um den Faktor 3,7 bzw. 4,6 steigerbar. Unter der Voraussetzung einer Steigerung der Faulgaserträge (vgl. Kapitel 3) sowie in Zukunft höheren Elektrolysewirkungsgraden kann das Flexibilitätspotenzial um den Faktor 5,8 erhöht werden.

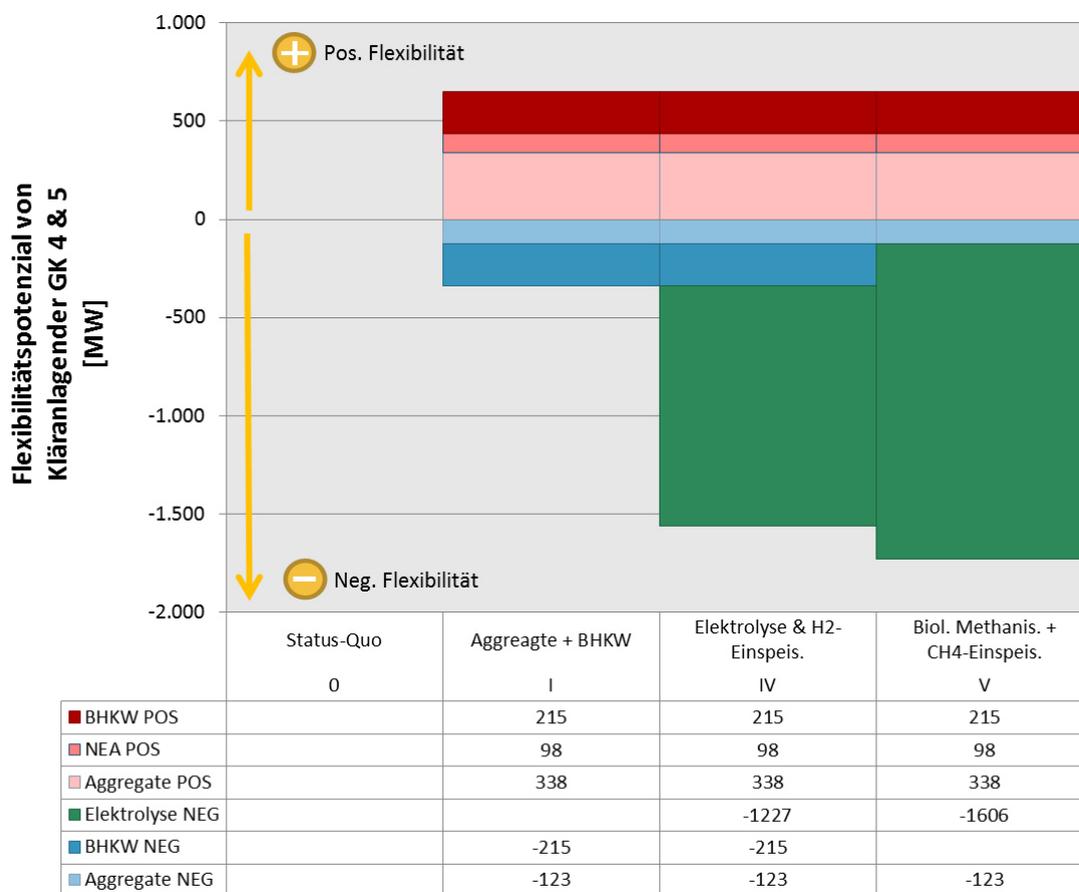


Abbildung 4.3: Steigerung der Flexibilitätspotenziale durch Implementierung innovativer Anlagentechnik.

4.2.2 Speicherpotenziale

Die eingespeisten Wasserstoff- und Methanmengen aus PtG-Anlagen leisten einen wichtigen Beitrag zur Langzeitspeicherung. Mit der Koppelung von Elektrolyse und Methanisierung (Konzept V) kann speicherfähiges Methan – bei Umsetzung auf Kläranlagen der GK 4 und 5 - mit einem Energiegehalt von 9,55 TWh/a erzeugt werden. Unter der Annahme der oben aufgezeigten Optimierungspotenziale zur Klärgaserzeugung kann das Langzeitspeicherpotenzial in Konzept V um weitere

3,65 TWh/a gesteigert werden. Damit könnten Kläranlagen in Zukunft ein theoretisches Langzeitspeicherpotenzial von insgesamt ca. 13,2 TWh/a zur Verfügung stellen. Im Gegensatz zu auf der Kläranlage vorhandenen Kurzzeitspeichern (Zwischenspeicherung des Faulgases im Gasspeicher) ist im Gasnetz eine Speicherung über mehrere Monate möglich. Anlagenkonzept V ermöglicht die ressourceneffiziente Erschließung dieser (Langzeit-)Speicherpotenziale.

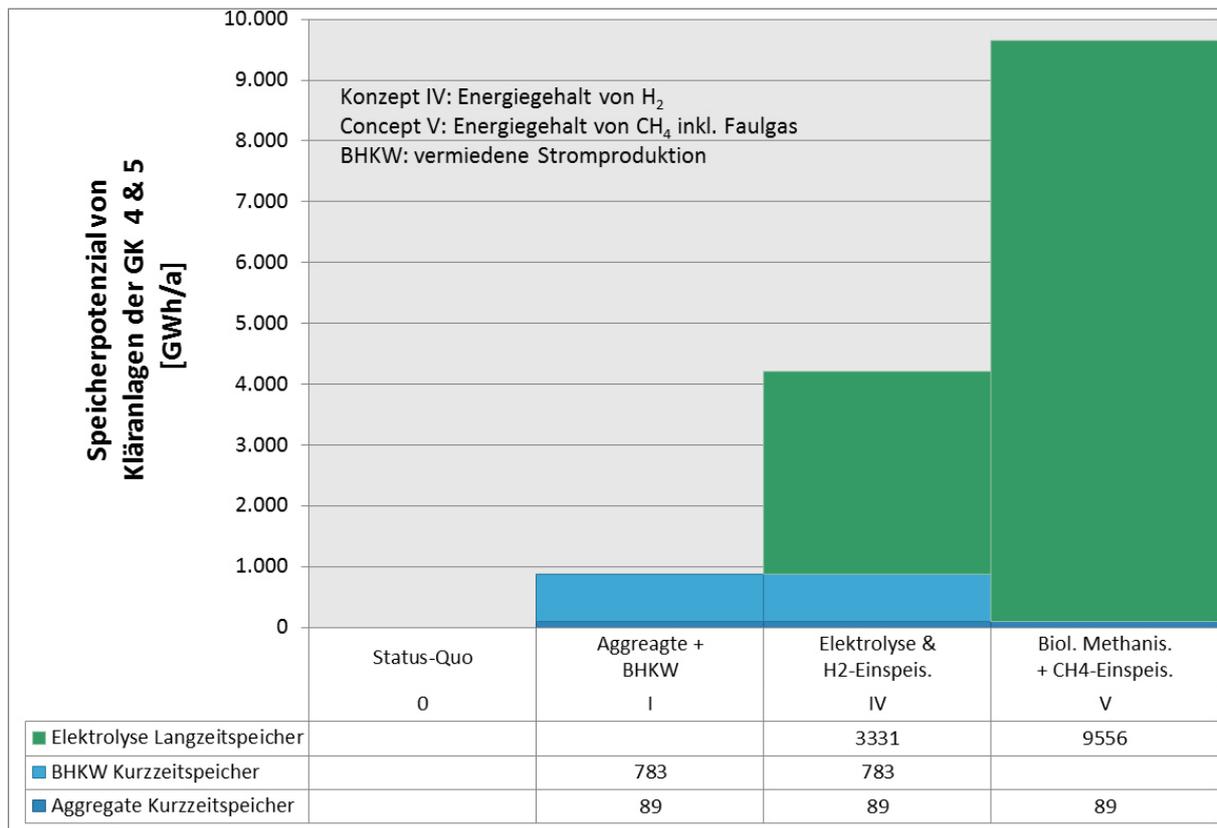


Abbildung 4.4: Beitrag der Kläranlagen zur Langzeitspeicherung durch Implementierung innovativer Anlagentechnik.

4.2.3 Energiebilanzierung

Um ein Langzeitspeicherpotenzial durch Kläranlagen mittels Methanisierung aufzuzeigen, wurde angenommen, dass die Kläranlagen zu diesem Zweck nicht mehr über KWK-Technik zur Eigenstromerzeugung verfügen, sondern unter ganzheitlichem Gesichtspunkt das erzeugte Gas ins Erdgasnetz einspeisen. Die Rückverstromung des erzeugten Speichergases erfolgt in diesem Konzept über hocheffiziente Gas- und Dampfkraftwerke (GuD) mit einem elektr. Wirkungsgrad von 60 %, die positive Flexibilität bereitstellen. Die Kläranlage bezieht ihren gesamten Strom damit aus dem Netz. Hiervon sind 4.000 h Überschussstrom aus EE, in den übrigen 4.760 h eines Jahres wird davon ausgegangen, dass Anteile des im GuD erzeugten Stroms bezogen werden. Die erforderliche Wärme für die Faulung wird von der Elektrolyse und der

Methanisierungsstufe zur Verfügung gestellt. Ggf. vorhandene Defizite können mittels Wärmepumpe und Wärmespeicher ausgeglichen werden.

Mit diesem innovativen Ansatz kann die Kläranlage in Zukunft eine Nettolangzeitspeicherkapazität von ca. 46,5 kWh/E/a zur Verfügung stellen (vgl. Abbildung 4.5). Mit der Nutzung von Überschussstrom für den Betrieb der KA und der Elektrolyse kann eine Bruttospeicherkapazität von 71 kWh/E/a erreicht werden. Der produzierte Sauerstoff kann bspw. zur Ozonbereitstellung für eine Spurenstoffelimination eingesetzt werden.

Dieses Anlagenkonzept stellt das derzeit von Betreibern formulierte Ziel der „bilanziellen Energieneutralität“ nicht in Frage. Vielmehr zeigt es auf, dass Kläranlagen zu mehr in der Lage sind, als weitgehend losgelöst vom Energiemarkt und den sich dort abzeichnenden Änderungen nur auf Eigenstromproduktion zu setzen. Eine solche Konzeption erlaubt es, die Langzeitspeicherpotenziale des Speichergases „Klärgas“ vollständig zu erschließen und volkswirtschaftlich am effektivsten bereit zu stellen.

Die theoretische Umsetzung eines Elektrolysekonzeptes am Standort Kläranlage wurde an einem realen Fallstudiengebiet in (Schäfer et al. 2016) untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Kläranlagen als Langzeitspeicher fungieren und sinnvolle Synergien im Umfeld der Anlage schaffen können. Deutlich wurde, dass durch positive lokale Rahmenbedingungen, wie z.B. zusätzliche industrielle Abnehmer von H₂, Wasserstoffmobilität und hohe Einspeisekapazitäten des lokalen Gasnetzes, die Wirtschaftlichkeit als auch das ganzheitliche Konzept erheblich verbessert wird.

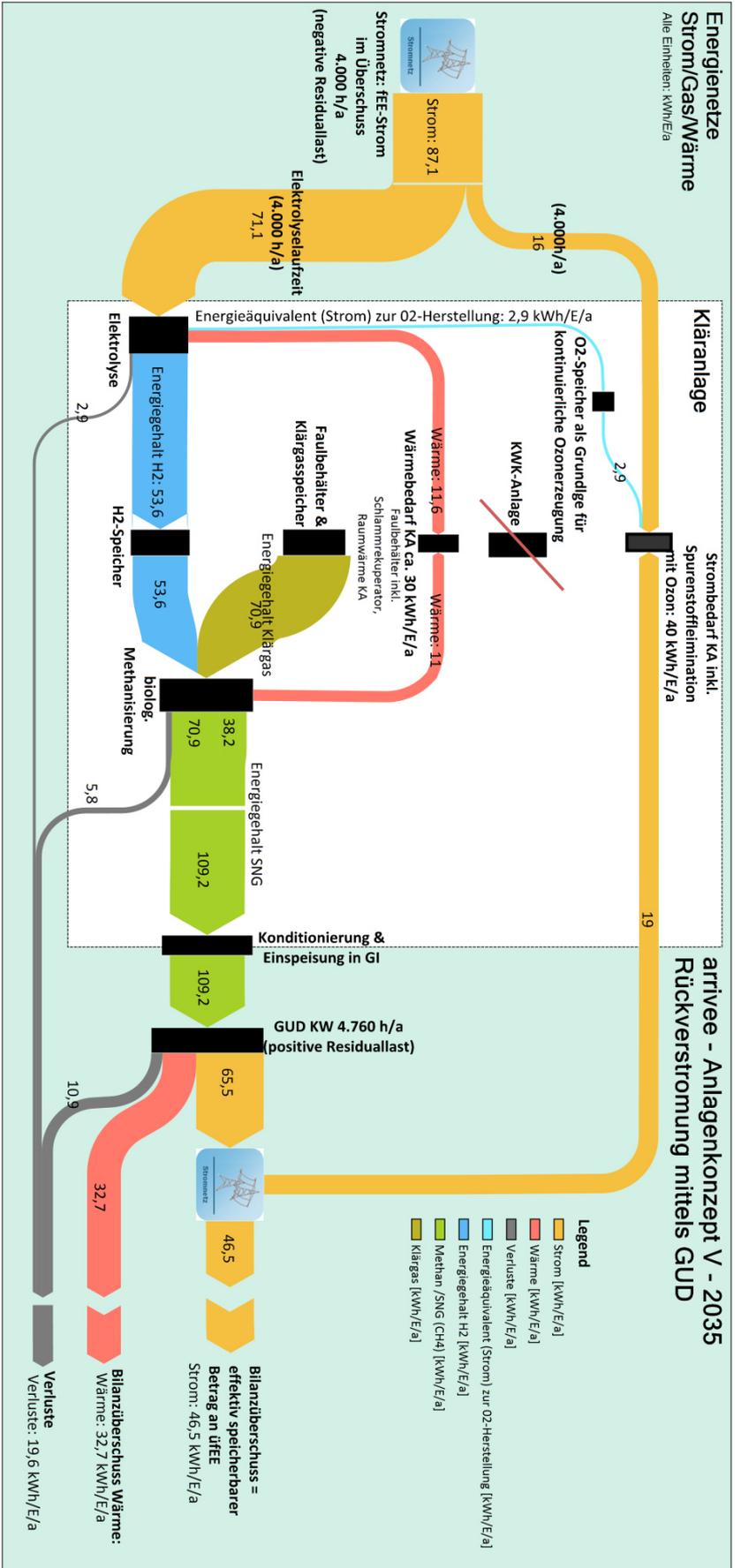


Abbildung 4.5: Statische Energiebilanz mit spezifischen Energiekennwerten in [kWh/E/a] basierend auf den Kennwerten der Kläranlagen der GK 5 für das Bezugsjahr 2035 unter optimierten Bedingungen für Klärgaserzeugung und Stromverbrauch (unten)

4.3 Weitere Synergieeffekte auf der Kläranlage durch Power-to-Gas

Bei der Implementierung von Power-to-Gas auf der Kläranlage entsteht als Nebenprodukt Sauerstoff, der nach einer Aufbereitung und Verdichtung alternativ zur Unterstützung der Belüftung im Belebungsbecken oder für die Ozonierung verwendet werden kann.

4.3.1 Reinsauerstoffbeimischung in der biologischen Stufe

Der produzierte Reinsauerstoff kann in der biologischen Stufe zur Deckung des erforderlichen Sauerstoffbedarfs eingesetzt werden (siehe Abbildung 4.6). Bei der Zugabe von Reinsauerstoff in ein bestehendes Druckbelüftungssystem reduziert sich aufgrund des besseren Sauerstoffübergangskoeffizienten des Reinsauerstoffs die erforderliche Fördermenge. Die maximal mögliche Druckluftsubstitution ist jedoch abhängig von der Mindestbeaufschlagung der Belüfterelemente und der Mindestfördermenge der eingesetzten Verdichter.

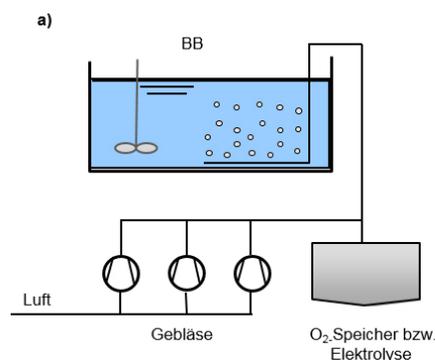


Abbildung 4.6: Reinsauerstoffzugabe in ein bestehendes Druckbelüftungssystem

Im Rahmen von arrivee wurde am Beispiel der Pilotkläranlage Radevormwald die nutzbare Reinsauerstoffmenge in der biologischen Stufe berechnet. Im Mittel ist eine Beimischung von rund 30 % bezogen auf den Volumenstrom aus Reinsauerstoff und Druckluft möglich. In Abbildung 4.7 ist qualitativ der mögliche beizumischende Reinsauerstoff in Abhängigkeit der vorhandenen Restriktionen (minimale Fördermenge der Gebläse, Mindestbeaufschlagung der Belüfter) für die Kläranlage Radevormwald für ein Jahr dargestellt. Es zeigt sich, dass eine vollständige Substitution der Druckluft durch Reinsauerstoff aufgrund der erforderlichen Mindestbeaufschlagung nur bei maximalem Sauerstoffbedarf möglich ist.

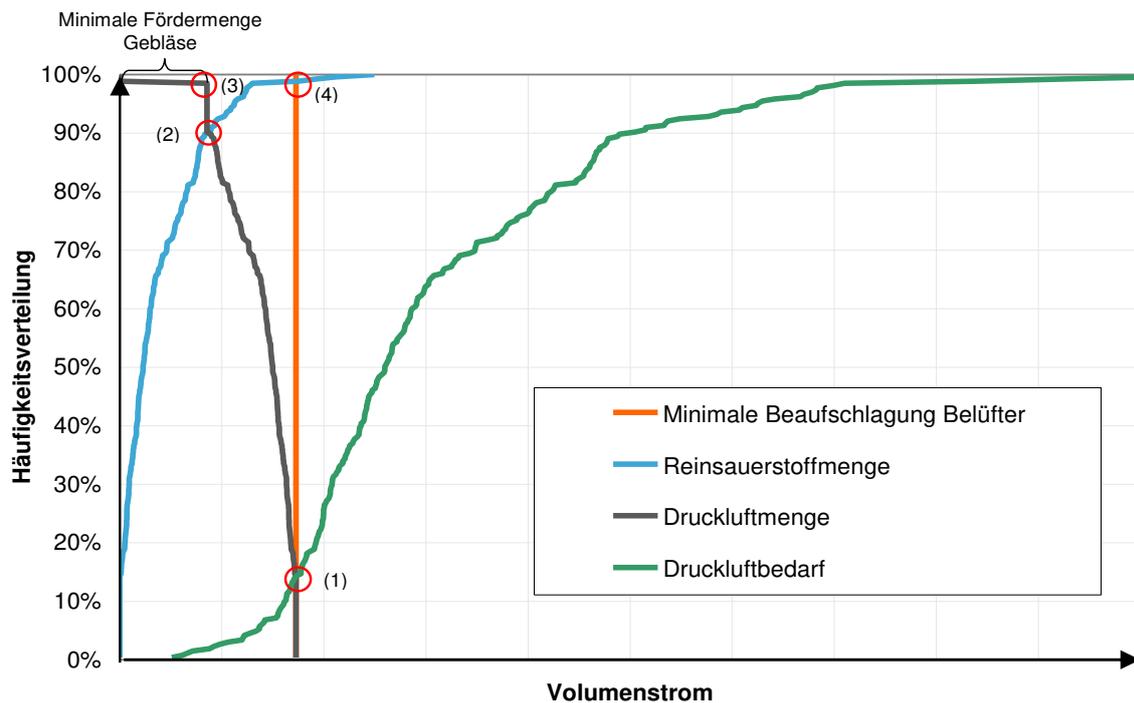


Abbildung 4.7: Verteilung des Sauerstoffbedarfs und berechnetes Potenzial zur anteiligen Reinsauerstoffbeimischung im Belebungsbecken. Berechnet für die KA Radvormwald auf Basis der Daten für das Jahr 2014

4.3.2 Reinsauerstoffnutzung für die Spurenstoffelimination

Der Reinsauerstoff kann ebenfalls als Ausgangsstoff für die Erzeugung von Ozon (O_3) im Rahmen einer 4. Reinigungsstufe eingesetzt werden (Abbildung 4.8). Ozon ist sehr instabil und muss daher direkt am Einsatzort erzeugt werden. Als Ausgangsstoff (Trägergas) dient Sauerstoff, entweder als Flüssigsauerstoff oder in Form von vorgetrockneter Luft. Der erforderliche Ozonbedarf ist abhängig von der zu behandelnden Wassermenge und der jeweiligen Abwassermatrix. Die Ozondosis schwankt bei kommunalen Kläranlagen in Abhängigkeit von der organischen Hintergrundbelastung zwischen $2,5 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ bis $15,0 \text{ gO}_3/\text{m}^3$ (Pinnekamp et al. 2011; Pinnekamp et al. 2015). Mit der Nutzung des Reinsauerstoffs aus dem Betrieb der Elektrolyse kann $0,04 \text{ kWh}_{\text{el}}$ pro m^3 behandeltem Abwasser für die Herstellung und den Transport des Flüssigsauerstoffs vermieden werden (Pinnekamp et al. 2015). In Tabelle 4.2 ist der erforderliche Reinsauerstoffbedarf für die Ozonherstellung in Abhängigkeit von der organischen Hintergrundbelastung und der Anlagengröße dargestellt. Bei einer Anlagengröße von 58.000 E ergibt sich für die Ozonierung ein Sauerstoffbedarf von $22,87 \text{ m}^3 \text{ O}_2/\text{h}$.

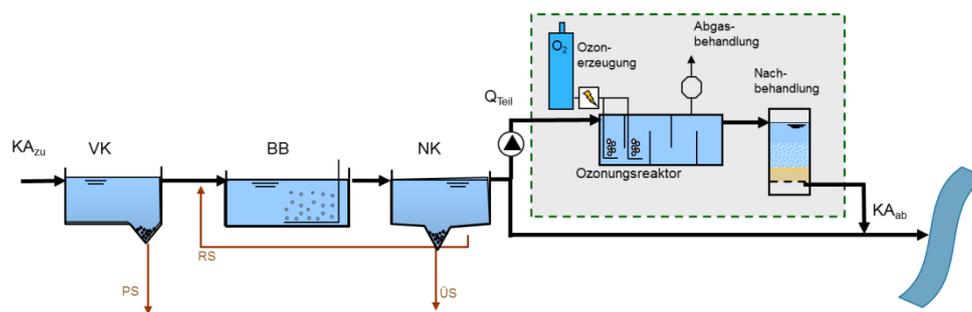


Abbildung 4.8: Konzept zur Reinsauerstoffnutzung zur Ozonherstellung für die 4. Reinigungsstufe

Tabelle 4.2: Erforderlicher Reinsauerstoffbedarf für die Ozonherstellung bei einer Hintergrundbelastung von 10 mg DOC/l in Abhängigkeit von der Anlagengröße

Ozondosierung (in Abhängigkeit cDOC,NKab) [mgO ₃ /l bzw. mg DOC/l]	Anlagengröße EW _{Ausbau} [E]	Sauerstoffbedarf		
		min [m ³ O ₂ /h]	mittel [m ³ O ₂ /h]	max [m ³ O ₂ /h]
7 mg O ₃ /l / 10 mg DOC/l	20.000	3,29	7,89	12,82
	50.000	8,22	19,72	30,19
	58.000	9,53	22,87	34,70
	150.000	24,65	59,15	86,27

5 Fazit

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Kläranlagen in die Lage versetzt werden können, einen Beitrag zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen zu leisten und dazu über ein signifikantes Potenzial verfügen. Die bundesweite Analyse zeigt, dass Kläranlagen mit ihren Stromerzeugungsanlagen (KWK-Anlagen, NEA) als auch mit vorhandenen Kläranlagenaggregaten ein theoretisches Flexibilitätspotenzial von 650 MWh_{el} (positiv) und -338 MWh_{el} (negativ) aufweisen. Eine Vorgehensweise zur Identifizierung dieser Potenziale wurde aufgezeigt und relevante Kennwerte und Restriktionen wurden entwickelt und getestet. Damit können Kläranlagen an neuen Geschäftsmodellen und Produkten der Energieversorgung mit ihren vorhandenen Flexibilitäten teilhaben und davon profitieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass Kläranlagen technisch in der Lage sind, ihre Betriebsweise temporär aufgrund externer (Strommärkte, Verteilnetze) sowie interner (Lastmanagement) Anforderungen anzupassen, ohne den Klärprozess negativ zu beeinflussen (Schäfer et al. 2017b). Damit wäre es möglich, ohne große Zusatzinvestitionen, durch vorhandene (kommunale) Infrastruktur, ein wesentlicher Beitrag zur Energiewende zu leisten, welcher unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten obligatorisch erscheint. Auf diese Weise tragen sie zur Kopplung von Sektoren der Ver- und Entsorgung (Wasser/Abwasser – Energie/Strom/Gas) bei (u.a Schäfer et al. 2016).

Die in 2015 am Markt nachgefragte negative Minutenreserveleistung betrug 2.000 MW. Diese könnte theoretisch durch eine Kombination von Aggregatemanagement (Konzept 1) und Einbindung von PtG inklusive biologische Methanisierung (Konzept V) auf Kläranlagen erbracht werden.

Insbesondere die Elektrolysekonzepte könnten zu einer beachtlichen Steigerung der negativen Flexibilität beitragen und hier neue Märkte erschließen. Mit einem Elektrolysepotenzial von ca. 2 GW könnten Kläranlagen in 2035 einen Teil des ab dann zunehmend erwarteten Bedarfs an Elektrolyseleistung decken (Schmitt et al. 2017a).

Diese vielversprechenden Ergebnisse gilt es nun in die Praxis zu überführen. Kläranlagenbetreiber sollten sich mit den vorhandenen Flexibilitätsoptionen auf der Kläranlage beschäftigen und aktiv an den entsprechenden Märkten teilnehmen. Die dabei zum Teil noch bestehenden Hemmnisse wurden im Rahmen des Projektes identifiziert und Möglichkeiten zu deren Überwindung und zur Entwicklung förderlicher politischer Rahmenbedingungen aufgezeigt, vgl. (Hüesker 2017; Salomon D. et al. 2017).

Die gesamten Projektergebnisse in Form des Schlussberichtes sowie alle relevanten Projektveröffentlichungen stehen unter www.erwas-arrivee.de im Volltext als Download zur Verfügung.

6 Literaturverzeichnis

BMWI, BMELV, Bundesrat (2006): Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Grundversorgung von Haushaltskunden und die Ersatzversorgung mit Elektrizität aus dem Niederspannungsnetz (Stromgrundversorgungsverordnung - StromGKV). StromGKV.

DENA (Hg.) (2017): dena-Netzflexstudie. Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.

DESTATIS (2013a): Erhebung über die Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas 2012. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.

DESTATIS (2017): Erhebung über die Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas 2016. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Qualitaetsberichte/Energie/GewinnungVerwendungAbgabeKlaergas073.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.10.2017.

Dröge, S.; Pacan, B. (2017): Erfahrungen mit der Power-to-Gas Pilotanlage im Energiepark Pirmasens-Winzeln. Fachgespräch „Biologische Methanisierung“. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), BMEL. Berlin, 25.04.2017.

- DWA (2013): Positionen zu Energie- und Wasserwirtschaft. DWA Positionen.
- Götz, Philipp; Huneke, Fabian; Lenck, Thorsten; Perez Linkenheil, Carlos (2016): Minimaler Bedarf an langfristiger Flexibilität im Stromsystem bis 2050. Studierweiterung. Energy Brainpool. Berlin. Online verfügbar unter http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/fin2016-02-24_EnergyBrainpool_Minimaler_Windgasbedarf_GreenpeaceEnergy.pdf, zuletzt geprüft am 06.09.2016.
- Graf, Frank; Krajete, Alexander; Schmack, Ulrich (2014): Techno- ökonomische Studie zur biologischen Methanisierung bei Power- to- Gas- Konzepten. Abschlussbericht. Hg. v. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Honeck, Verena; Dornburg, Arthur (2016): Wasserwirtschaftliche Anlage als Flexibilitätsdienstleister im Stromnetz. Zwischenergebnisse aus Projekten der BMBF-Fördermaßnahme ERWAS. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 63 (8), S. 670–678.
- Hüesker, Frank (2017): Ergebnisbericht zu den arrivee Experten-Workshops 2016 – Sozialwissenschaftliche Szenarien zu politischen Rahmenbedingungen 2027 für die Integration von Kläranlagen ins Strom-netz. TU Kaiserslautern.
- Meese, J.; Dorsemagen, F.; Neusel-Lange, N.; Zdrallek, M.; Stiebel, J.; Stratmann, P. (2015): Happy Power Hour. Demand Response mit dynamischen Strompreisen für die mittelständische Industrie. In: *Zukünftige Stromnetze für erneuerbare Energien*. 2. OTTI Konferenz ; Hilton Hotel, Berlin, 27./28. Januar 2015. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut (OTTI). Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- Neusel-Lange, Nils; Zdrallek, Markus (2015): Konzept zur Realisierung eines "Virtuellen Kraftwerks" in Nordrhein-Westfalen. Bergische Universität Wuppertal. Wuppertal, zuletzt geprüft am 23.10.2015.
- Pinnekamp, J.; Mousel, D.; Krebber, K.; Palmowski, L.; Bolle, F.-W.; Gredigk-Hoffmann, S. et al. (2015): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. Phase II. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfale. Online verfügbar unter http://www.pia.rwth-aachen.de/acwa/acwa_aktuell_06.pdf.
- Pinnekamp, J.; Mousel, D.; Veltmann, K.; Palmowski, L.; Bolle, F.-W.; Gredigk-Hoffmann, S. et al. (2011): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen. Phase I. Abschlussbericht zum gleichnamigen Forschungsprojekt. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

- Salomon, Dirk; Pyro, Philipp (2017): Flexibilität im Praxistest. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren Flexibilität wagen, Bd. 40. Kaiserslautern (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Salomon D.; Schäfer M.; Hüesker F. (2017): Kläranlagen als Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen. Was ist technisch machbar, ökonomisch sinnvoll und politisch zu steuern? Poster. OTTI-Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning (2015): Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potenzial Analysis. In: *Energy Procedia* 73, S. 87–93. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Taudien, Yannick (2017a): Flexibilitätspotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt. In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik* (3), S. 8–12.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schütz, Stefan; Schuhmann, Enrico; Raabe, Toni. (2016): The natural gas grid infrastructure as a suitable storage for renewable energy produced by wastewater treatment plants. Proceedings zur 10th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), 15.-16. März 2016, Düsseldorf.
- Schäfer, Michael; Hobus, Inka; Schmitt, Theo G. (2017b): Energetic flexibility on wastewater treatment plants. In: *Water Sci Technol*, wst2017308. DOI: 10.2166/wst.2017.308.
- Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Hüesker, Frank; Salomon, Dirk; Bidlingmaier, Artur et al. (2017a): Abwassereinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://erwas-arrivee.de/veroeffentlichungen/schlussbericht-arrivee/#c655176>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.
- Schmitt, Theo G.; Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Bidlingmaier, Artur; Hanke, Babett; Hobus, Inka et al. (2017b): Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Stromnetz. Ergebnisse aus dem Verbundprojekt arrivee: Welchen Beitrag leisten Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung im Rahmen der Energiewende? In: *wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik* (5), S. 8–14. Online verfügbar unter <http://www.wwt-online.de/klaeranlagen-als-flexibilitaetsoption-im-stromnetz-0>, zuletzt geprüft am 11.07.2017.

Korrespondenz an:

Dipl.-Ing. Michael Schäfer
Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel
FG Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
Tel.: 0631/205-4643
Fax: 0631/205-3905
E-Mail: michael.schaefer@bauing.uni-kl.de

Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Mittelspannungsnetz¹

Tobias Kornrumpf, Markus Zdrallek

Bergische Universität Wuppertal

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik

Rainer-Gruenter-Str. 21, 42119 Wuppertal

Kurzfassung: Der Einsatz von Flexibilitätsoptionen zur Vermeidung von Netzausbau im Verteilnetz gewinnt vor dem Hintergrund des Transformationsprozesses in der Energieversorgung zunehmend an Bedeutung. Kläranlagen verfügen über vielfältige Flexibilitätsoptionen und können einen Beitrag leisten, um mehr Erneuerbare Energien kostengünstig in das System zu integrieren. Im Rahmen des Forschungsprojektes *arrivee* wurde u.a. das Zusammenspiel von Mittelspannungsnetz und Kläranlage anhand der Modellregion Radevormwald analysiert. Die Methodik und die wesentlichen Ergebnisse aus dem Abschlussbericht werden in nachfolgendem Beitrag in gekürzter Form vorgestellt.

Key-Words: Netzplanung, Netzbetrieb, Flexibilitätsoptionen, Optimal-Power-Flow, Smart-Grid

1 Einleitung

Der deutschlandweite Investitionsbedarf für Verteilnetze wird bei der Anwendung konventioneller Ausbaumaßnahmen je nach Szenario für die Entwicklung der Last- und Einspeisesituation für den Zeitraum 2010-2035 mit 27,5-42,5 Mrd. € beziffert (DENA 2012). Die Studie „Moderne Verteilernetze für Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie kommt je nach Szenario mit einem kumulierten Investitionsbedarf bis 2032 zwischen 23,3-48,9 Mrd. € auf eine vergleichbare Größenordnung (BMW 2014). Der insgesamt als hoch zu bewertende Investitionsbedarf lässt sich durch neue Technologien und Betriebsmittel sowie durch neue Planungs- und Betriebskonzepte beeinflussen und ggf. reduzieren.

¹ Der Beitrag ist eine gekürzte Zusammenstellung von Ergebnissen aus dem *arrivee*-Abschlussbericht. Die Textpassagen wurden weitestgehend wörtlich übernommen. Der vollständige Bericht kann unter <http://erwas-arrivee.de/> heruntergeladen werden.

Insbesondere die Zustandsüberwachung von Mittel- und Niederspannungsnetzen und darauf aufbauende neuartige Betriebskonzepte weisen große Einsparpotenziale auf. Hierfür ist allerdings die Ausstattung der Netze mit zusätzlicher Sensorik und Aktorik erforderlich, da in heutigen Mittel- und Niederspannungsnetzen eine Überwachung des Netzzustandes (Live-Überwachung) nicht üblich ist. Es wird eine Erüchtigung zum sogenannten „Smart-Grid“ erforderlich. Bisherige Regelungskonzepte auf Basis der Netzzustandsüberwachung sehen überwiegend die Einbindung und Abregelung von Erzeugungsanlagen, Elektrofahrzeugen und Batteriespeichern vor (Oerter 2014). Hinsichtlich der netzseitigen Fragestellungen setzt das Projekt an dieser Stelle an und untersucht, inwiefern sich auch Prozesse und Anlagen auf Kläranlagen in ein solches Konzept integrieren lassen und wie sich durch ein flexibles, netzdienliches Verhalten der Netzausbau oder zumindest der Anteil an abgegebener Energie aus Erneuerbaren Energiequellen reduzieren lässt.

2 Flexibilität zur Vermeidung von Netzausbau

Der Begriff Flexibilität wird im Kontext der Energieversorgung unterschiedlich verwendet und ist nicht eindeutig definiert. Im Rahmen dieses Projektes wird als Flexibilität die Fähigkeit einer technischen Anlage verstanden, ihre elektrische Leistungsaufnahme oder -abgabe auf Grund eines externen Signals kurzfristig für einen begrenzten Zeitraum anzupassen. Flexibilität kann somit von unterschiedlichen Technologien aus der Gruppe der Erzeugungsanlagen, der Verbraucher und der Speicher erbracht werden.

Als netzdienlicher Einsatz von Flexibilität wird die Leistungsanpassung zur Behebung von lokalen Grenzwertverletzungen im Verteilungsnetz bezeichnet. Es handelt sich dabei um Verletzungen des zulässigen Spannungsbandes und thermische Überlastung der Leitungen, die beispielsweise durch den zunehmenden Ausbau der Erneuerbaren Energien hervorgerufen werden. Durch die gezielte Leistungsanpassung der Flexibilität können die Grenzwertverletzungen im Anschlussstrang behoben und somit ein möglicherweise erforderlicher Netzausbau vermieden oder verzögert werden. Der Ansatz wird im Rahmen des Einspeisemanagements bereits praktiziert. Der Einsatz von gezielter Last- und Speichersteuerung für netzdienliche Zwecke ist zurzeit noch keine gängige Praxis, sondern Gegenstand der aktuellen Forschung im Bereich der Verteilungsnetze.

Der Netzanschlusspunkt von Kläranlagen der mittleren und oberen Größenklassen liegt überwiegend am Mittelspannungsnetz. Um die Versorgung der Anschlussnehmer mit elektrischer Energie in entsprechender Versorgungsqualität und Zuverlässigkeit zu garantieren, erfolgt die Auslegung der Netze unter Berücksichtigung bestimmter Grenzwerte, die im technischen Regelwerk definiert sind. Zentrale Aspekte sind hierbei die Spannungshaltung, die Betriebsmittelauslastung und die Sicherstellung einer hohen Versorgungszuverlässigkeit durch geeignete Umschalt-

möglichkeiten und Ersatzversorgungen im Fehlerfall (Harnisch et al. 2016; DENA 2012; BMWI 2014).

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die gewollte oder ungewollte Beeinflussung der Betriebsmittelauslastung und der Knotenspannungen durch eine neuartige Betriebsweise der Kläranlage (KA) auf den jeweiligen Anschlussstrang und den Transformator im Umspannwerk (UW) begrenzt ist. Die Sammelschienenspannung im UW kann durch die Stufenregelung des Transformators und die hohe Kurzschlussleistung des überlagerten Hochspannungsnetzes als starr (konstant) angenommen werden.

Im Falle einer Grenzwertverletzung können einzelne oder mehrere Anlagen in ihrer Leistungsaufnahme oder -abgabe beeinflusst werden und somit die Spannungsbandsverletzung oder die Betriebsmittelüberlastung aufheben. Damit diese betriebliche Maßnahme auch in der Netzplanung berücksichtigt werden kann, müssen mehrere Voraussetzungen erfüllt sein:

- Zustandsüberwachung des Netzabschnittes: Die technische Grundvoraussetzung für den netzdienlichen Einsatz von Flexibilitätsoptionen ist die dauerhafte Überwachung des Netzzustandes. In Mittel- und Niederspannungsnetzen ist dies in der Regel nicht der Fall. Hierfür müssen zusätzliche Sensoren, Aktoren und eine geeignete Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) im Netz installiert und entweder in ein bestehendes Leitsystem oder in ein dezentrales Netzautomatisierungssystem eingebunden werden. Auf Basis des Netzzustandes werden erforderliche Regelungseingriffe berechnet und an geeignete Aktoren (wie z. B. DEA, flexible Lasten oder Speicher) übertragen. Solche sogenannten Smart-Grid-Systeme für die Verteilnetzebene wurden in den letzten Jahren entwickelt und werden inzwischen kommerziell vermarktet (SAG Deutschland 07.09.2016)
- Kostenvorteil: Der Netzbetreiber muss durch den Einsatz eines Smart-Grid-Systems einen dauerhaften Kostenvorteil gegenüber den Handlungsalternativen erzielen. Da für den Abruf von Flexibilitätsoptionen Kompensationszahlungen anfallen (z. B. für abgeregelte Energie), lohnt sich der Einsatz besonders dann, wenn die tatsächliche Notwendigkeit für Regelungseingriffe sehr selten ist und der 'smarten' Netzertüchtigung ein hoher konventioneller Ausbaubedarf gegenüber steht. Neben den Investitionskosten sind auch die laufenden Betriebskosten für einen Vergleich relevant sowie deren Ansetzbarkeit im Rahmen der Anreizregulierung.
- Verlässlichkeit für den Netzbetreiber: Damit sich der Netzbetreiber grundsätzlich auf eine solche Lösungsvariante einlassen kann, muss im Falle einer Grenzwertverletzung der Zugriff auf einzelne Anlagen technisch und rechtlich verlässlich sein. Die technische Verlässlichkeit kann im Zweifel über die Einbindung mehrerer Flexibilitätsoptionen sichergestellt werden (falls die

Kommunikation zur Kläranlage ausfällt, wird z. B. die Windenergieanlage abgeregelt). Anspruchsvoll ist allerdings auch die rechtliche Ausgestaltung. Im Rahmen des Einspeisemanagements für Erneuerbare Energien wurde dieses verlässliche Zugriffsrecht geregelt. Das Zugriffsrecht bzw. der Aufbau eines Anreizsystems für netzdienliches Verhalten von Verbrauchern und Lasten ist aber weiterhin nicht klar im rechtlich-regulatorischen Rahmen verankert.

Ein großer Vorteil des Einsatzes einer Zustandsüberwachung liegt unter anderem darin, dass für die Auslegung des Netzes nicht mehr die theoretischen Worst-Case Betriebspunkte verwendet werden, sondern dass die tatsächliche Netzauslastung überwacht wird. Es werden somit allein durch den Einsatz eines Smart-Grid-Systems zusätzliche Netzkapazitäten aus der Betriebsreserve freigegeben, da im Falle einer Grenzwertüberschreitung im Gegensatz zum unbeobachteten Netz noch eingegriffen werden kann. Des Weiteren können Fehlinvestitionen auf Grund von unsicheren Entwicklungen der Versorgungsaufgabe vermieden werden.

3 Analyse

3.1 Übersicht zur Methodik

Die Gesamtmethodik zur Analyse des Netzausbau- bzw. Flexibilitätsbedarfs in der Modellregion Radevormwald wird in Abbildung 1 dargestellt und anschließend beschrieben.



Abbildung 1: Gesamtmethodik

Es werden Ausbauszenarien für alle Erzeugungstechnologien für die Stützjahre 2025 und 2035 entwickelt und eine Analyse zur Entwicklung der Lastsituation im Netzgebiet Radevormwald durchgeführt. Um einen breiten Entwicklungskorridor abzudecken, werden je Erzeugungstechnologie drei Szenarien festgelegt (Trendszenario sowie oberes und unteres Grenzszenario). Die entwickelten Szenarien fließen in die weiteren Konzeptuntersuchungen ein und bilden die Grundlage für die Festlegung der zukünftigen Versorgungsaufgabe bei der Zielnetzplanung.

Die Modellierung und die Analyse des Mittelspannungsnetzes erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren. Zunächst wird das gesamte Mittelspannungsnetz des Versorgungsgebietes Radevormwald in einem klassischen Netzmodell mit Hilfe einer

kommerziellen Netzberechnungssoftware abgebildet. Das Modell umfasst alle relevanten Betriebsmitteldaten sowie die entsprechenden Entnahme- und Einspeiseknoten für eine vollständige Leistungsfluss- und Kurzschlussberechnung.

Im Rahmen einer konventionellen Netzanalyse und Überplanung werden zunächst die Worst-Case Betriebspunkte (Starklastfall und Starkeinspeisefall) für den Status quo und die jeweiligen Szenarien hinsichtlich der Spannungshaltung und Betriebsmittelauslastung überprüft und Problemstellen im Netzgebiet identifiziert. Die planerischen Annahmen für die beiden Worst-Case-Betriebspunkte werden auf Basis von umfangreichen Messdatenauswertungen, Literaturangaben und Erfahrungswerten ermittelt und im Projektbericht aufgeführt.

Im Anschluss an die Problemstellenidentifikation erfolgt eine zeitreihenbasierte Detailanalyse von Problembezirken in Form einer Jahresberechnung in viertelstündiger Auflösung. Die Berechnungsergebnisse der zeitreihenbasierten Berechnung werden zur gekoppelten Simulation mit der Kläranlage verwendet. Das Simulationsmodell der Kläranlage wird im Projektbericht detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse der verschiedenen Netzausbauvarianten werden abschließend wirtschaftlich bewertet. Hierfür werden die Investitionen in zusätzliche Primärtechnik, Sekundärtechnik und Kommunikationssysteme anhand der Nettobarwerte verglichen. Die Methodik zur Ermittlung der Kosten basiert auf dem Planungsleitfaden (Harnisch et al. 2016). Sie wird für die Rahmenbedingungen des Projektes entsprechend modifiziert und im Projektbericht detailliert beschrieben.

3.2 Problemstellenidentifikation

Im Rahmen dieser Modelluntersuchung wird der Zubau der einzelnen EE-Anlage für jedes Stützjahr anhand der Szenarien der Versorgungsaufgabe und der konkreten Potenzialflächen für Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft und Biomasse ermittelt. Die Anlagen werden anschließend an räumlich geeignete Stellen ins Mittelspannungsnetz eingebunden und die Auswirkungen auf die Betriebsmittelauslastung und die Spannungshaltung mittels Leistungsflussberechnung untersucht.

Aufgrund der Spannungsbandaufteilung auf Mittel- und Niederspannungsebene liegt der zulässige Spannungsbereich für die Mittelspannungsplanung zwischen $97 \% \leq U/U_n \leq 105 \%$. Der Sollwert der Sammelschienenspannung in den Umspannwerken liegt bei 103 %. Die maximale thermische Betriebsmittelauslastung muss im Normalbetrieb unter $I/I_{th} \leq 100 \%$ liegen. Darüber hinaus muss im (n-1)-Starklastfall durch geeignete Umschaltmaßnahmen eine maximale Auslastung von $I/I_{th} \leq 120 \%$ sichergestellt werden. Die Anwendung einer (n-1)-sicheren Netzauslegung für EE-Anlagen (Einspeisefall) ist nicht erforderlich. (Harnisch et al. 2016)

Abbildung 2 zeigt exemplarisch die identifizierten Problemgebiete im Jahr 2035 und in welchen Szenarien sie auftreten. Die auftretenden Grenzwertverletzungen in den

Problemgebieten West, Nord und Ost sind ausschließlich auf Spannungsbandverletzungen zurückzuführen. Im Problemgebiet West (PG-West) treten die Grenzwertverletzungen in allen drei Szenarien auf, im PG Nord nur in den Szenarien Trend und OG und im PG Ost nur im Szenario OG. Das Problemgebiet Süd stellt durch den Zubau eines Windparks mit 7,5 MW einen Sonderfall dar, da hier die Anbindung des Windparks durch ein singular genutztes Kabel mit der Direktanbindung zum Umspannwerk die einfachste Lösung darstellt und eine Integration in die bestehende Kabelinfrastruktur nur eine theoretische Option wäre. Das Problemgebiet Süd wird daher in den folgenden Ausführungen nicht weiter betrachtet. Zur Integration der EE-Anlagen ist in den übrigen gezeigten Gebieten ein Netzausbau bzw. eine Netzertüchtigung erforderlich.

Das Problemgebiet West ist für die untersuchte Fragestellung besonders interessant, da es im Einflussbereich der Kläranlage liegt und in allen Szenarien kritische Werte in der Worst-Case-Betrachtung ausweist. Die zeitreihenbasierte Detailanalyse wird nachfolgend daher anhand des PG West erläutert.

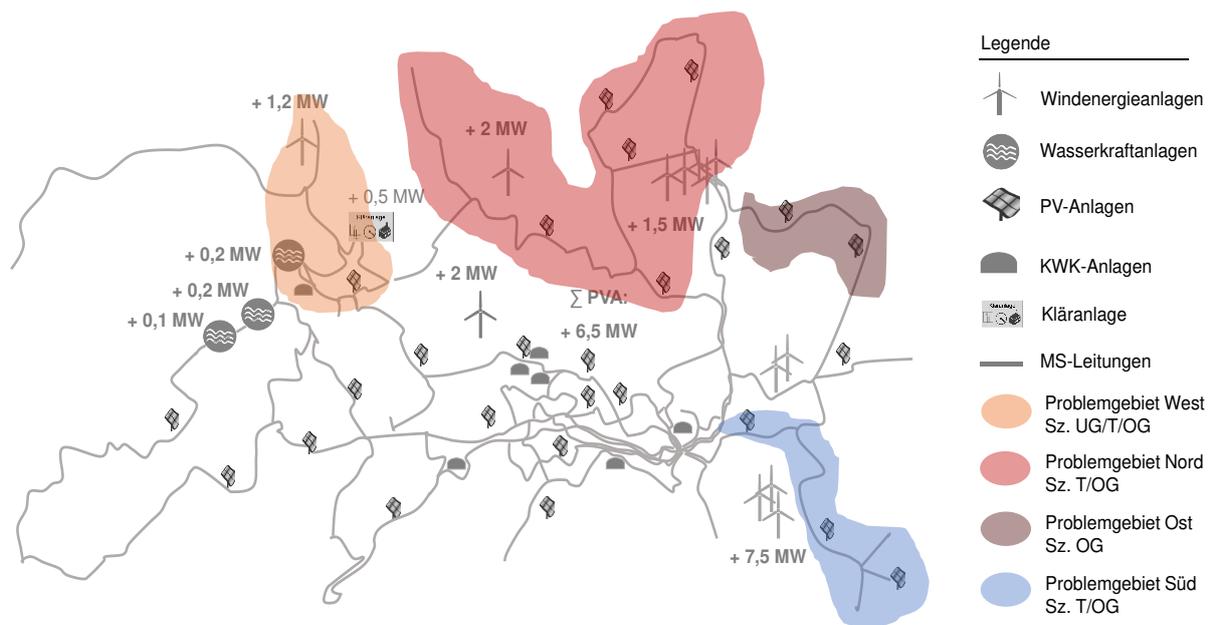


Abbildung 2: EE-Zubau und Problemgebiete für die unterschiedlichen Szenarien im Jahr 2035

3.3 Konventionelle Netzüberplanung

Im Rahmen der Netzplanung müssen identifizierte Engpässe und Schwachstellen durch geeignete Netzaus- und Umbaumaßnahmen behoben werden. Hierfür stehen dem Netzbetreiber in der Regel mehrere konventionelle und innovative Handlungs- und Technologieoptionen zur Verfügung. Diese müssen in der Netzplanung entsprechend modelliert und unter technischen wie wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden. Im Rahmen dieses Projektes wurden mehrere Planungsvarianten ausgearbeitet, die jeweils den bevorzugten Einsatz einer bestimmten Technologie

beinhalten. Sie dienen anschließend als Vergleichsvarianten für die Netzauslegung unter Berücksichtigung der Kläranlagenflexibilität.

Es wurden der konventionelle Kabelausbau sowie der Einsatz regelbarer Ortsnetztransformatoren (rONT) und Einzelstrangregler (ESR) als alternative Handlungsoptionen überprüft. Ausführliche Beschreibungen können dem Planungsfaden der Bergischen Universität entnommen werden (Harnisch et al. 2016).

3.4 Zeitreihenbasierte Detailanalyse

Die Flexibilität der Kläranlage kann durch eine zeitliche Verschiebung der Entnahme bzw. der Einspeisung erfolgen. Neben der Frage, ob die Flexibilität zum Zeitpunkt des Bedarfs ausreichend ist, muss daher auch sichergestellt werden, dass eine zeitliche Verschiebung nicht zu einer neuen Grenzwertverletzung zu einem anderen Zeitpunkt führt. Das heißt, es muss auch die noch zur Verfügung stehende Netzkapazität zu Zeitpunkten ohne Grenzwertverletzung bestimmt werden. Hierfür wurde der Ansatz des Netzkapazitätskorridors entwickelt, welcher nachfolgend vorgestellt wird.

Bei der Bestimmung des Netzkapazitätskorridors wird das Betriebsverhalten der Kläranlage zunächst aus der Leistungsflussberechnung extrahiert. Darauf aufbauend werden zu jedem Zeitpunkt die maximal zulässige Einspeisung und die maximal zulässige Entnahme (die Grenzen der Netzkapazität) für den Anschlusspunkt der Anlage berechnet. Hierbei werden alle Spannungswerte und alle Betriebsmittelauslastungen als grenzwertbestimmende Parameter in die Rechnung mit einbezogen. Durch die sequentielle Berechnung erhält man dann den sogenannten Netzkapazitätskorridor, welcher prinzipiell in Abbildung 3 dargestellt ist.

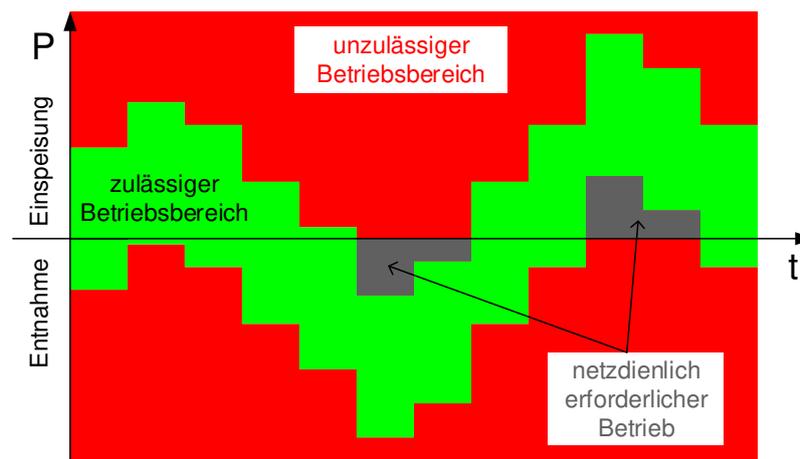


Abbildung 3: Netzkapazitätskorridor (Prinzipgraphik in Anlehnung an (Kornrumpf et al. 2017; DENA 2017))

Der grüne Bereich beschreibt den zulässigen Arbeitsbereich der Anlage, der rote Bereich den unzulässigen Bereich und in Grau ist der netzdienliche Flexibilitätsbedarf dargestellt. Wenn der resultierende Lastgang der Kläranlage vollständig innerhalb

des grünen Korridors liegt, kommt es zu keiner Grenzwertverletzung im Netz. Die Grenzen der Netzkapazität können somit als Restriktionen in die Simulation der Kläranlage eingebunden werden. Es lassen sich durch mehrere Simulationsläufe mit und ohne Berücksichtigung der Netzrestriktionen und mit unterschiedlichen Betriebs- und Vermarktungsstrategien die Auswirkungen auf Netz und Anlagenbetrieb ohne erneute Netzberechnung erfassen. Das Modell zur Simulation der Kläranlage wird im Projektbericht beschrieben.

Zur Berechnung des Netzkapazitätskorridors wird ein Optimal-Power-Flow Ansatz verwendet. Durch die Formulierung als Optimierungsproblem, lassen sich sowohl die Knotenspannungen als auch die Betriebsmittelauslastung gleichzeitig berücksichtigen und die Grenzen für zusätzliche Einspeisung bzw. Entnahme bestimmen. Die mathematische Formulierung des Optimierungsproblems und tiefergehende Beschreibungen des Verfahrens wurden in (Kornrumpf et al. 2017) veröffentlicht.

3.5 Kostenbewertung

Die Ergebnisse der verschiedenen Netzausbauvarianten werden wirtschaftlich bewertet. Hierfür werden die Investitionen in zusätzliche Primärtechnik, Sekundärtechnik und Kommunikationssysteme anhand der Nettobarwerte verglichen. Die Methodik zur Ermittlung der Kosten basiert auf dem Planungsleitfaden (Harnisch et al. 2016). Sie wird für die Rahmenbedingungen des Projektes entsprechend modifiziert und nachfolgend zusammenfassend vorgestellt.

In die wirtschaftliche Bewertung fließen alle Maßnahmen ein, die auf Grund der Szenarien der Versorgungsaufgabe (insbesondere den Ausbau der Erneuerbaren Energien) erforderlich werden. In den Planungsvarianten erfolgt der Ausbau für die Stützjahre 2025 und 2035. Auf Grund der erforderlichen Vorlaufzeit für Planung, Projektierung und Umsetzung der Maßnahmen werden die Investitionsjahre jeweils fünf Jahre früher angesetzt. Der Betrachtungszeitraum reicht bis 2050. Es wird eine zyklische Erneuerung entsprechend der typischen Lebensdauern von bestimmten Betriebsmitteln angenommen. Ebenso werden die jährlich anfallenden Betriebskosten und Kompensationszahlen (z. B. für dynamisches Einspeisemanagement) bis 2050 betrachtet. Die Restwerte der Investitionen im Jahr 2050 fließen als Gutschrift in den Barwert für 2015 ein. Kosten für die zyklische Erneuerung des Bestandsnetzes werden in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht berücksichtigt, da dieser Aspekt unabhängig von den Ausbauszenarien der EE anfällt.

Die Preisentwicklungen der unterschiedlichen Betriebsmittel wurden unter Berücksichtigung von Herstellerangaben und Literaturwerten bestimmt. Darüber hinaus wurden insbesondere für neue Technologien (dezentrale Netzautomatisierung (DNA), ESR und rONT) individuelle techno-ökonomische Modelle verwendet, die sowohl Technologiesprünge und sinkende Herstellungskosten durch höhere Stückzahlen berücksichtigen (Harnisch et al. 2016). Die Preisannahmen wurden durch

Praxiserfahrungen und Einschätzungen mehrerer Netzbetreiber validiert. Die allgemeine Inflation wurde aus allen Eingangsdaten herausgerechnet, so dass eine unabhängige Betrachtung möglich ist. Die Investitionskosten für die unterschiedlichen Technologien sowie die Lebensdauern, Betriebskosten und Preisentwicklungen werden im Projektbericht aufgeführt.

Der Kalkulationszinssatz wird auf Basis der Vorgaben aus der Anreizregulierungsverordnung (Bundesnetzagentur 2016, 2016), in der auch eine Aufteilung nach Eigen- und Fremdkapital berücksichtigt wird, auf 6 % festgelegt. Durch die Diskontierung auf das Jahr 2015 werden die unterschiedlichen Investitionsjahre in den Planungsvarianten vergleichbar anhand der Nettobarwerte. Die Methodik zur Kostenbewertung wird in Abbildung 4 zusammenfassend dargestellt.

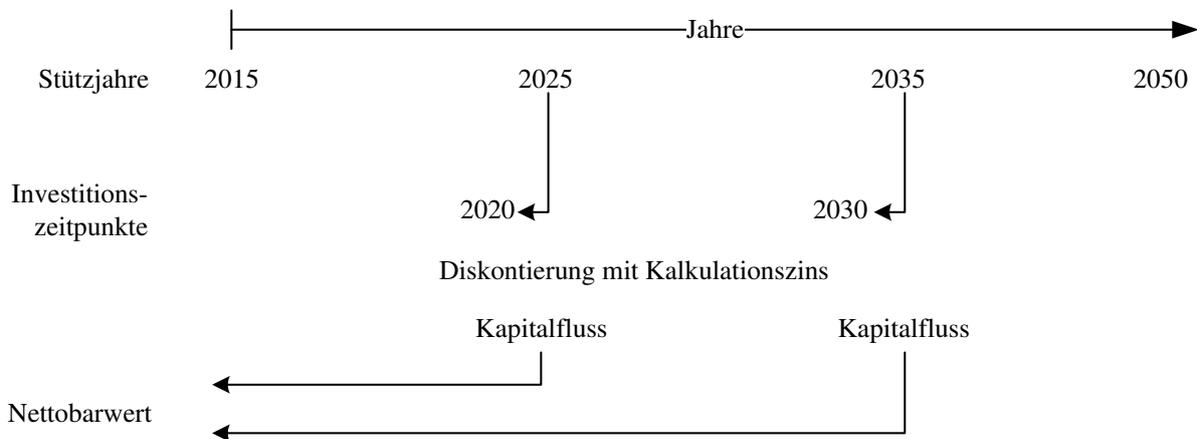


Abbildung 4: Kostenbewertung für Netzinvestitionen

4 Ergebnisse für das Mittelspannungsnetz Radevormwald

4.1 Flexibilitätsbedarf

Die Berechnung des Netzkapazitätskorridors wurde für alle Szenarien für das Stützjahr 2035 durchgeführt. Abbildung 5 zeigt die Berechnungsergebnisse der Jahressimulation für die Basisauslastung im Status quo sowie für jedes Szenario im Betrachtungsjahr 2035. Es handelt sich um eine aggregierte Darstellung der 35.040 berechneten Viertelstunden eines Jahres. Der grüne Bereich gibt dabei den dauerhaft zulässigen Bereich für zusätzliche Einspeisung (positiv) und zusätzliche Entnahme (negativ) am Anschlusspunkt der Kläranlage an. Der rote Bereich gibt den dauerhaft unzulässigen Bereich an, d. h. bei zusätzlichen Einspeisungen/Entnahmen, die im roten Wertebereich liegen, würde es in jeder Viertelstunde des Jahres zu einer Grenzwertverletzung (Spannungsbandverletzung oder thermische Überlastung) im Netzabschnitt kommen. In Gelb sind die Wertebereiche dargestellt, in denen die Grenzen der Netzkapazität (Einspeise- und Entnahmegrenzen) während der Jahressimulation schwanken. Diese Schwankungen beruhen auf tageszeitlichen und saisonalen Unterschieden in der Netzauslastung. Zur besseren Einordnung der Häufigkeit

sind für die gelben Bereiche auch noch ausgewählte Perzentile dargestellt. Die Darstellung der Perzentile zwischen Jahresminimum und Jahresmaximum bezieht sich jeweils auf den oberen und unteren gelben Bereich. Eine Grenzwertverletzung liegt dann vor, wenn die Grenzen der Netzkapazität die Abszisse schneiden, d. h. wenn die Werte für die Einspeisegrenze negativ werden bzw. die Werte der Entnahmegrenzen positiv. Der jeweilige Leistungswert entspricht dann der erforderlichen Leistungsänderung am Anschlusspunkt der Kläranlage (= netzdienlicher Flexibilitätsbedarf). Werte, die in diesem Bereich liegen, sind in der Darstellung der Netzkapazität jeweils grau markiert.

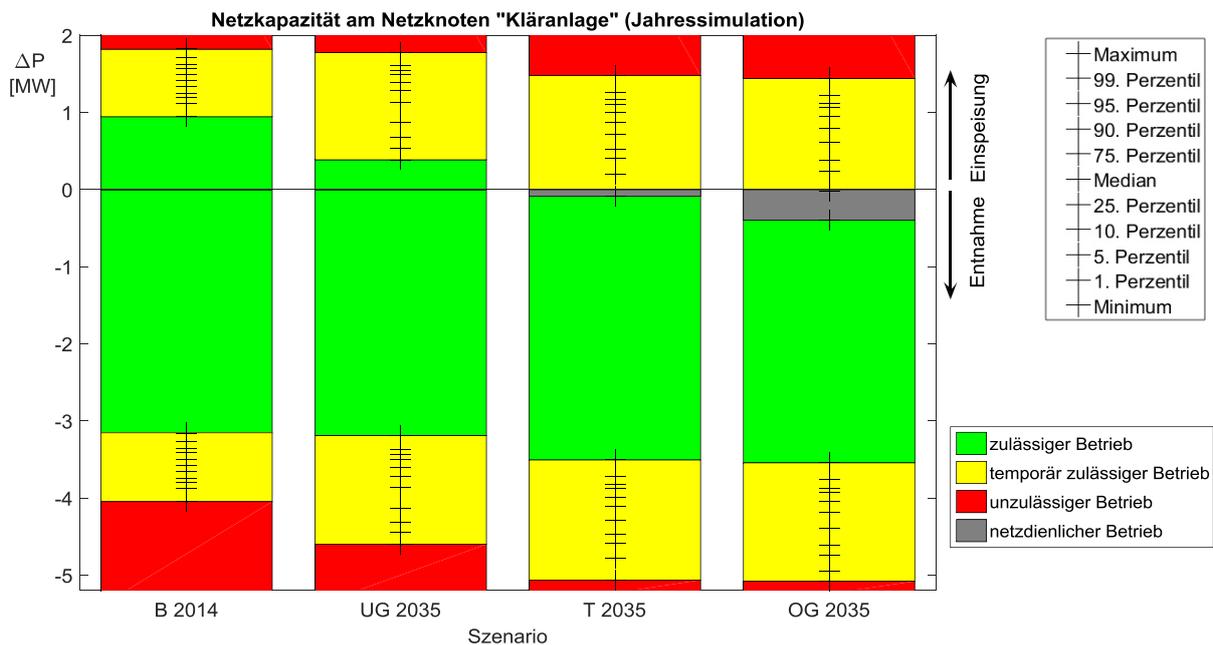


Abbildung 5: Netzkapazität am Anschlusspunkt der Kläranlage (aggregierte Darstellung der Jahresberechnung je Szenario 2035)

Der Vergleich der unterschiedlichen Szenarien zeigt die Verschiebung des dauerhaft zulässigen Wertebereichs in den Bereich der zusätzlichen Entnahme aufgrund der sukzessiv steigenden installierten Leistung der DEA. Weiterhin ist ersichtlich, dass die Schwankungsbreite der Netzkapazitätsgrenzen weiter steigt. Dies ist ebenfalls durch die stärkere Fluktuation der Einspeisung durch die Windenergieanlage begründet.

Im Basisjahr sowie in UG-Szenarien 2035 wird die Abszisse nicht geschnitten, d. h. es tritt keine Grenzwertverletzung auf. Erst im T-Szenario und dann deutlicher im OG-Szenario wächst der graue Bereich, so dass es an vereinzelten Zeitpunkten im Jahr zu einer Grenzwertverletzung kommt. Im betrachteten Netzabschnitt handelt es sich hierbei stets um Verletzungen der oberen Spannungsgrenze ($U/U_n > 105\%$). Die erforderliche Leistungsaufnahme durch die Kläranlage für netzdienliches Verhalten steigt dementsprechend an. Die Betrachtung der Perzentile zeigt allerdings auch bereits, dass diese Zeitpunkte äußerst selten eintreten. Noch deutlicher wird dies in Abbil-

Abbildung 6 zeigt die Zeitpunkte mit Grenzwertverletzung im Szenario OG-2035. In der Darstellung werden alle berechneten Zeitschritte über den Tagesverlauf (Abszisse) und den Jahresverlauf (Ordinate) dargestellt. Zeitpunkte, in denen es im Szenario OG-2035 zu einer Grenzwertverletzung kommt, sind durch rote Striche markiert, Zeitpunkte ohne Grenzwertverletzung sind weiß. Aus der Darstellung geht hervor, dass Zeiträume mit netzdienlichem Flexibilitätsbedarf nur sehr selten auftreten. Weiterhin ist ersichtlich, dass es keine eindeutige Tages- und Jahreszeitcharakteristik für die untersuchte Netzkonstellation gibt. Im Jahresverlauf kann es zu allen Uhrzeiten und Jahreszeiten zu kurzen einspeisebedingten Grenzwertverletzungen kommen. Vermehrt geschieht dies allerdings in den Herbst und Wintermonaten. Dieses Muster ergibt sich durch die Einspeisecharakteristik der Windenergieanlage, die in diesem Fall der Problemtreiber ist. Im Rahmen der Veröffentlichung (Kornrumpf et al. 2017) wurde im Rahmen einer Variante die Windenergieanlage durch eine Freiflächen-PV-Anlage ersetzt. Das dort gezeigte Muster zeigt im Vergleich zu Abbildung 6 eine deutlich ausgeprägte Tages- und Jahreszeitcharakteristik, bei der Grenzwertverletzungen nur zwischen Frühjahr und Herbst und zwischen 10-16 Uhr auftreten.

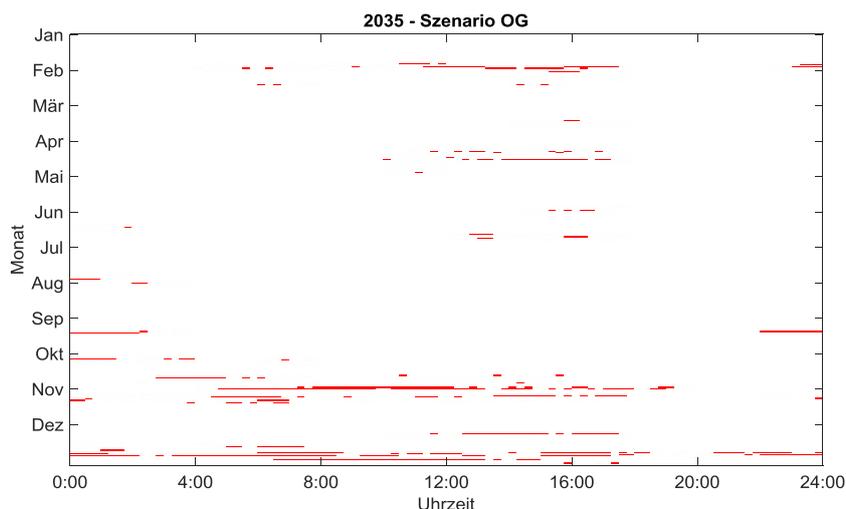


Abbildung 6: Zeitpunkte mit Grenzwertverletzung im Szenario OG-2035

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es im untersuchten Netz erst in oberen Szenarien und den späten Stützjahren (2035) zu einer Verletzung des Spannungsbands kommt. Diese treten sehr selten und überwiegend auch nur sehr kurz auf, unterliegen auf Grund der Einspeisung der WEA aber keiner klaren zeitlichen Charakteristik. Das Szenario OG im Berechnungsjahr 2035 stellt das interessanteste Ergebnis für die weiterführende Betrachtung dar.

4.2 Einsatz netzdienlicher Flexibilitätsoptionen

Die zeitreihenbasierte Analyse der Netzauslastung mit Hilfe des Netzkapazitätskorridors liefert Aussagen zur Dauer, Häufigkeit und Höhe des netzdienlichen Flexibilitätsbedarfs. Der Netzkapazitätskorridor kann nun als Eingangsgröße bzw.

Betriebsrestriktion in das Kläranlagenmodell integriert werden. Durch diese Koppelung kann überprüft werden, welche netzdienlichen Abrufe durch die verschiedenen Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen bedient werden können und wie die Auswirkungen auf die Reinigungsleistung der Kläranlage sind.

Um die Netzprobleme zu beheben bzw. zu reduzieren, muss die Kläranlage zu den Zeitpunkten der Grenzwertverletzungen ihre Leistungsaufnahme erhöhen. Falls dies nicht oder nicht ausreichend möglich ist, müssen weitere im Netzgebiet vorhandene Flexibilitätsoptionen aktiviert werden. Falls keine weiteren Flexibilitätsoptionen vorhanden sind, wird die Spannungsbandverletzung durch das dynamische Einspeisemanagement der Windenergieanlage (WEA) behoben.

In der Jahressimulation kommt es insgesamt zu 52 netzdienlichen Flexibilitätssabrufen mit einer Dauer zwischen 15 min und 4 Stunden. Um den Bedarf zu bedienen, muss die Flexibilität in der Lage sein, sowohl den maximalen Leistungswert zu erreichen als auch die vollständige Energie des Abrufs aufzunehmen. Diese zwei charakteristischen Größen des Flexibilitätsbedarfs sind in Abbildung 7 aufgetragen. Die negativen Vorzeichen ergeben sich durch die Definition und zeigen, dass es sich bei dem Bedarf um eine erforderliche Lasterhöhung handelt. Die Deckung des Flexibilitätsbedarfs erfolgt in einem gestuften Verfahren. Zunächst wird versucht, das Problem durch die Abschaltung des Klärgas-BHKW zu beheben. Falls diese Leistungsänderung nicht ausreicht, werden zusätzliche Belüftungsaggregate zugeschaltet. Sollte dies immer noch nicht reichen, wird die verbleibende erforderliche Leistungsänderung durch die Abregelung der WEA erbracht. Welche Abrufe durch welche Stufen bedient werden, ist durch die unterschiedlichen Marker in Abbildung 7 hervorgehoben.

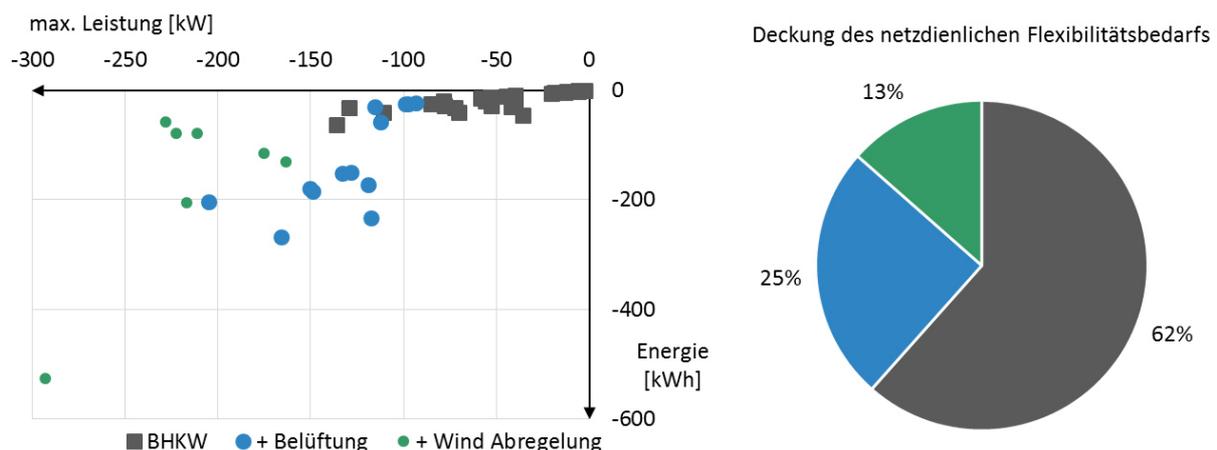


Abbildung 7: Leistungs-Energie-Diagramm des netzdienlichen Flexibilitätsbedarfs und Deckung durch Flexibilitätsoptionen im OG-2035

Der überwiegende Anteil des Flexibilitätsbedarfs (62 %) kann durch die kurzzeitige Abschaltung des Klärgas-BHKW gedeckt werden. Für weitere 25 % der Fälle ist die

Zuschaltung weiterer Belüftungsaggregate erforderlich und als Ultima Ratio wird in 13 % der Fälle noch die Windenergieanlage teilweise abgeregelt. Ohne die Flexibilität der Kläranlage wäre dies sonst in allen Fällen erforderlich (ca. 3,4 MWh/a). Der Anteil der ansonsten abgeregelt Energie kann durch die Flexibilität der Kläranlage um 92 % reduziert werden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Einsatz der Kläranlagenflexibilität grundsätzlich möglich ist und eine sinnvolle Option zur Reduzierung der abgeregelt Energie darstellt. Neben der Kläranlage können weitere Flexibilitätsoptionen im kritischen Netzabschnitt vorhanden sein. Die Sensitivität (Hebelwirkung) einer netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung ist abhängig vom Anschlusspunkt im Netzgebiet, d. h. um beispielsweise eine Spannungsbandverletzung zu beheben, sind je nach Anschlusspunkt unterschiedlich hohe Leistungsänderungen erforderlich. Darüber hinaus ist es für den Netzbetreiber erstrebenswert, die Flexibilitätsoption einzusetzen, die für ihn die geringsten Kosten verursacht.

4.3 Kostenvergleich

In allen drei Szenarien werden im Problemgebiet West Netzausbaumaßnahmen zur weiteren Integration der Erneuerbaren Energien erforderlich. Der konventionelle Kabelausbau stellt mit ca. 400.000 € jeweils die teuerste Variante dar. Durch die Verlegung einer (relativ langen) partiellen Parallelleitung kann die Aufnahmekapazität des Netzes deutlich erhöht werden, so dass der Umfang des konventionellen Ausbaus für alle drei Szenarien gleich groß ist. Es wird jedoch deutlich, dass der konventionelle Ausbau deutlich teurer ist als alle innovativen Alternativen (ESR, rONT und DNA).

Im unteren Grenzszenario (geringer EE-Ausbau) lassen sich die Spannungsbandprobleme durch den Austausch weniger Ortsnetztransformatoren durch rONT kostengünstig lösen. Mit steigendem EE-Ausbau müssen jedoch zunehmend ONT ausgetauscht werden, so dass diese Technologievariante im mittleren und hohen Szenario kostenmäßig der dezentralen Netzautomatisierung unter Einbindung von Flexibilitätsoptionen unterlegen ist. Die Investitionskosten in die DNA sind in allen Szenarien gleich, lediglich die Kosten für die Kompensationszahlungen (Abregelung der WEA als Referenzwert) sind abhängig von der Häufigkeit und Höhe der tatsächlich auftretenden Grenzwertverletzungen. Diese treten allerdings erst im Szenario OG und dort sehr selten auf, so dass sie im Kostenvergleich nur einen sehr geringen – in Abbildung 8 nicht sichtbaren – Anteil haben.

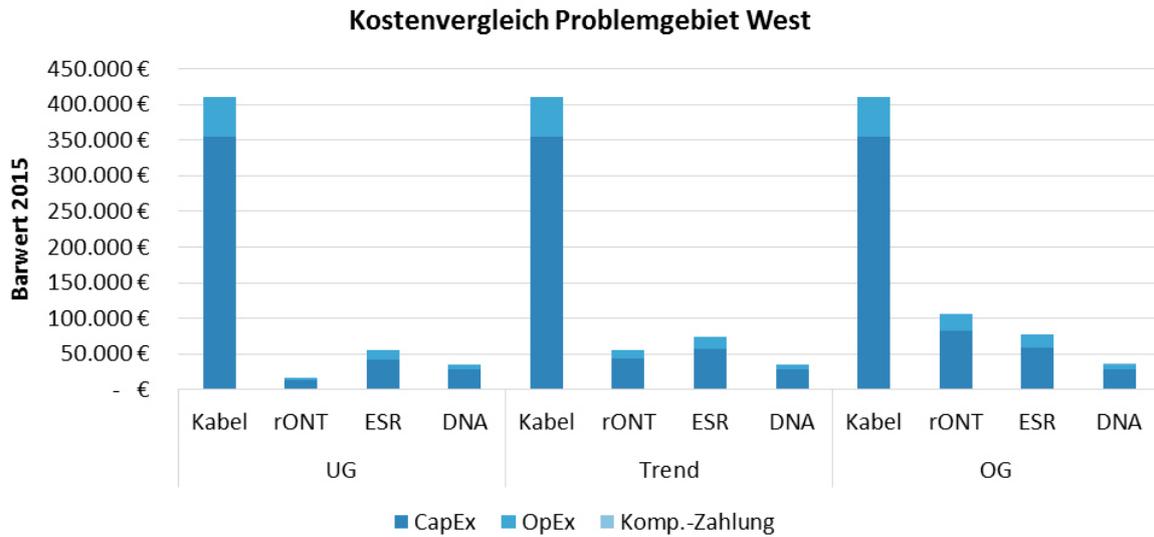


Abbildung 8: Kostenvergleich der Netzausbauvarianten je Szenario (Barwert 2015) im Problemgebiet West

Der aggregierte Kostenvergleich für das gesamte Netzgebiet wird in Abbildung 9 dargestellt. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mindestens eine der innovativen Ausbauoptionen (rONT, ESR, DNA) stets deutlich günstiger sind als der konventionelle Netzausbau. In Netzbereichen, in denen nur eine geringe Anzahl von Ortsnetzstationen zum rONT umgerüstet werden muss, kann dies eine sinnvolle Variante sein. Ansonsten ist die dezentrale Netzautomatisierung unter Einbeziehung von Flexibilitäten die kostengünstigste Lösungsoption. Bereits der Einbau der Zustandsüberwachung und die Schaffung von Eingriffsmöglichkeiten erlaubt eine effizientere Ausnutzung der Netzkapazität, da hierfür andere Planungsansätze verwendet werden können.

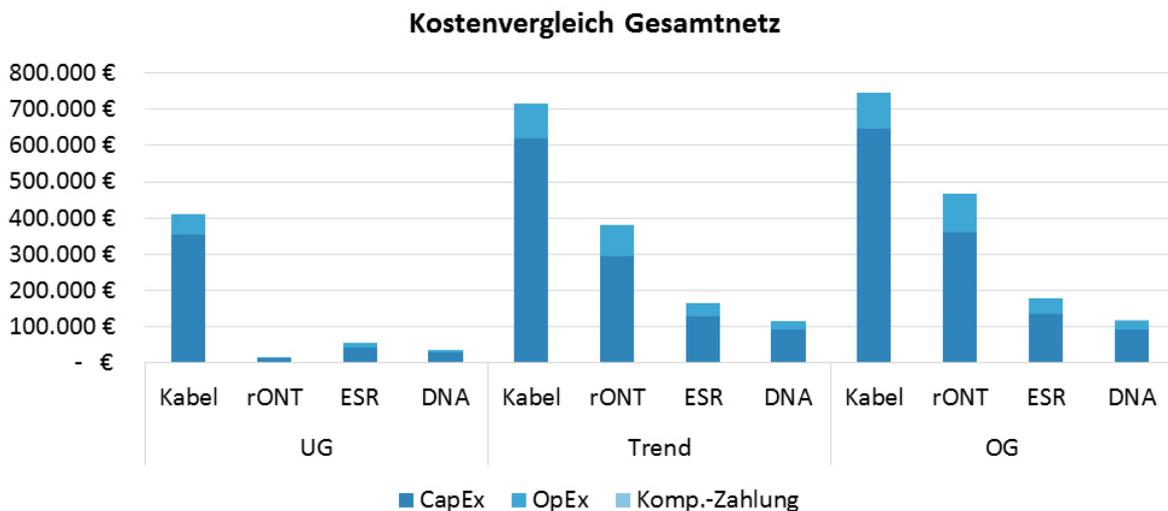


Abbildung 9: Kostenvergleich der Netzausbauvarianten je Szenario (Barwert 2015) im gesamten Netzgebiet

5 Zusammenfassung

Im betrachteten Netzgebiet kommt es im Rahmen der untersuchten Szenarien zu Spannungsbandverletzungen, die durch den Ausbau der Erneuerbaren Energien bedingt sind. Diese treten zeitlich sehr selten und sehr kurz auf und unterliegen keiner klaren Tages- oder Jahreszeitcharakteristik.

Der im Netzmodell berechnete Netzkapazitätskorridor dient als Eingangsgröße für das Kläranlagenmodell und die dynamische Simulation. Mit diesem Ansatz lässt sich analysieren, ob der Flexibilitätsbedarf durch die Kläranlage gedeckt werden kann und welche Auswirkungen eine netzdienliche Fahrweise auf den Betrieb der Kläranlage hat. Durch mehrere Simulationsläufe mit und ohne Berücksichtigung der Netzrestriktionen und mit unterschiedlichen Betriebs- und Vermarktungsstrategien lassen sich die Auswirkungen auf Netz- und Anlagenbetrieb ohne erneute Netzberechnung erfassen.

Der überwiegende Anteil des Flexibilitätsbedarfs (62 %) kann im Fallbeispiel durch die kurzzeitige Abschaltung des Klärgas-BHKW gedeckt werden. Für weitere 25 % der Fälle ist die Zuschaltung weiterer Belüftungsaggregate erforderlich und als Ultima Ratio wird in 13 % der Fälle noch die Windenergieanlage teilweise abgeregelt. Ohne die Flexibilität der Kläranlage wäre dies sonst in allen Fällen erforderlich (ca. 3,4 MWh/a). Der Anteil der abgeregelten Energie kann durch die Flexibilität der Kläranlage um 92 % reduziert werden. Da es im Netzgebiet lediglich zu einspeisebedingten Netzengpässen kommt, ist eine gezielte Zuschaltung von Erzeugungsanlagen bzw. Abschaltung von Verbrauchern aus netzdienlicher Sicht nicht erforderlich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Einsatz der Kläranlagenflexibilität grundsätzlich möglich ist und eine sinnvolle Option zur Reduzierung der abgeregelten Energie darstellt. Neben der Kläranlage können aber auch noch weitere Flexibilitätsoptionen im kritischen Netzabschnitt vorhanden sein. Die Sensitivität (Hebelwirkung) einer netzdienlichen Flexibilitätsbereitstellung ist abhängig vom Anschlusspunkt im Netzgebiet. D. h. um beispielsweise eine Spannungsbandverletzung zu beheben, sind je nach Anschlusspunkt unterschiedlich hohe Leistungsänderungen erforderlich. Darüber hinaus ist es für den Netzbetreiber erstrebenswert, die Flexibilitätsoption einzusetzen, die für ihn die geringsten Kosten verursacht.

Aus dem Vergleich der unterschiedlichen Handlungsalternativen des Netzbetreibers geht ein grundsätzlicher Vorteil der Netzzustandsüberwachung hervor. Im Rahmen der konventionellen Planungsvariante ist in allen Szenarien ein Kabelausbau erforderlich, obwohl es in der Zeitreihenbetrachtung noch zu keiner Grenzwertverletzung kommt. Dies ist dadurch begründet, dass bei der Festlegung der Worst-Case-Betriebspunkte in der konventionellen Planung strukturell mehr Sicherheitsreserve eingeplant werden muss, da im Zweifel keine nachträgliche Eingriffsmöglichkeit mehr besteht. In der Zeitreihenbetrachtung tritt dieser Worst-Case-Betriebspunkt dann oftmals nicht auf. Bei der Zustandsüberwachung kann die vorhandene Netz-

kapazität per se besser ausgenutzt werden, da im Falle einer Grenzwertverletzung diese identifiziert wird und betriebliche Maßnahmen (Flexibilitätseinsatz) ergriffen werden können.

Die innovativen Handlungsoptionen: regelbare Ortsnetztransformatoren (rONT), Einzelstrangregler (ESR) und die dezentrale Netzautomatisierung zur Nutzung von Flexibilität (DNA) sind oftmals deutlich günstiger als der konventionelle Netzausbau. Durch den Einbau einer DNA kann die vorhandene Netzkapazität besser ausgenutzt werden, da im Falle einer Grenzwertverletzung noch betrieblich auf die vorhandenen Flexibilitäten zurückgegriffen werden kann.

6 Literaturverzeichnis

- BMWI (Hg.) (2014): Moderne Verteilernetze für Deutschland. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- Bundesnetzagentur (2016): Verordnung über die Anreizregulierung der Energieversorgungsnetze. ARegV.
- DENA (Hg.) (2012): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilstetze in Deutschland bis 2030. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2017): dena-Netzflexstudie. Optimierter Einsatz von Speichern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- Harnisch, S.; Steffens, P.; Thies, H.; Monscheidt, J.; Münch, L.; Böse, C. et al. (2016): Planungs- und Betriebsgrundsätze für ländliche Verteilungsnetze. Leitfaden zur Ausrichtung der Netze an ihren zukünftigen Anforderungen. 1. Aufl. 11 Bände (Neue Energie aus Wuppertal, 8).
- Kornrumpf, Tobias; Zdrallek, Markus; Roch, Marvin; Hobus, Inka; Pyro, Philipp; Salomon, Dirk (2017): Flexibility Options for Medium Voltage Grid Planning. In: Cired (Hg.): 24th International Conference and Exhibition on ELECTRICITY DISTRIBUTION. CIRED. Glasgow, 12-15. June.
- Oerter, Christian (2014): Autarke, koordinierte Spannungs- und Leistungsregelung in Niederspannungsnetzen. 1. Aufl. Berlin: epubli GmbH (Neue Energie aus Wuppertal, 4).
- SAG Deutschland (07.09.2016): iNES® Mittelspannung im E-Werk Schweiger in Oberding. Fachkonferenz und Einweihung. Langen. Online verfügbar unter <https://www.pressebox.de/pressemitteilung/sag-gmbh/iNES-Mittelspannung-im-E-Werk-Schweiger-in-Oberding/boxid/813374>.

Korrespondenz an:

Tobias Kornrumpf, M. Sc.
Bergische Universität Wuppertal
Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik
Rainer-Gruenter-Str. 21
Tel.: +49 (0)202 439 1939
E-Mail: kornrumpf@uni-wuppertal.de

Kläranlagen in den Energiemärkten von heute und morgen

Ralf Simon, Babett Hanke, Verena Honeck
Transferstelle Bingen in der ITB gGmbH
Berlinstr. 107a, 55411 Bingen am Rhein

Kurzfassung: Können Kläranlagen mit ihren Erzeugern und Verbrauchsgruppen, sowie Langzeitspeichern als Dienstleister für das Stromsystem und den Energiemarkt unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten auftreten? Derzeit ist die Regelernergieerbringung nur in der positiven Richtung und bei hohen Abrufhäufigkeiten wirtschaftlich sinnvoll, welches das BHKW und die Verbrauchsgruppen Gebläse und Pumpen gut darstellen können. In den nächsten Jahren wird sich die Situation aufgrund der Anbieterentwicklung, den regulatorischen Entwicklungen, Kraftwerkseinsatz/EE-Entwicklung und Lastentwicklung/Verlauf verstärken. Es werden mehr Abrufstunden und ein Mehrbedarf an positiver Regelleistung erwartet.

Im Jahre 2035, wird der Strompreis an der Börse bei den kurzfristigen Stromprodukten deutlich höhere Ausschläge erzielen und es werden vermehrt negative Preisausschläge zu erwarten sein. In diesen Phasen können künftig die Verbrauchergruppen auf der Kläranlage sowie die Langzeitspeicher die negativen Preisespitzen wirtschaftlich nutzen. Aber auch in den Phasen mit positiven Preisausschlägen, bei denen die EE-Produktion nur eingeschränkt möglich ist, können derzeit kostengünstige Stromerzeuger wie BHKW's wirken und ebenfalls Wertschöpfung durch optimierten Stromverkauf erzielen.

Key-Words: Kläranlage, BHKW, Stromverbraucher, virtuelle Kraftwerke, Strommärkte, Systemdienstleistungen

1 Märkte für heutige Kläranlagen

Die temporär auftretenden Diskrepanzen zwischen Stromerzeugung und Strombedarf erfordern den Einsatz von Flexibilität über unterschiedliche Zeitskalen und Märkte. Vorhersehbare Schwankungen des Leistungsbedarfs werden über die Strombörse geregelt. Für unvorhersehbare Schwankungen benötigt der Übertragungsnetzbetreiber Regelenenergie. Derzeitig sind die Vermarktungen in der Regelenenergie und am Spot-Markt der Strombörse im Verbund (Pooling/Virtuelles Kraftwerk) auch für kleine Flexibilitäten möglich.

1.1 Systemdienlicher Einsatz: Markt der Regelenenergie

Die Regelenenergie zur Frequenzhaltung der Normfrequenz von 50 Hertz auf Übertragungsebene besteht aus drei in zeitlicher Abfolge nacheinander eintretenden Arten: der Primärregelleistung (PRL), der Sekundärregelleistung (SRL) und der Minutenreserveleistung (MRL). Bei der Regelenenergie handelt es sich um die physikalische Bereitstellung von elektrischer Leistung und Arbeit. Dabei wird zwischen positiver (Strommangel) und negativer (Stromüberschuss) Regelenenergie unterschieden. Die Bundesnetzagentur legt die Marktregeln und Zugangsbedingungen für die einzelnen Regelenenergiequalitäten nach Konsultation mit den ÜNB und Anbietern fest. (Details siehe Tabelle 1)

Tabelle 1: Merkmale der aktuell in Deutschland ausgeschriebenene Regelenenergiequalitäten (VDN, 2007; Consentec, 2014)

	Primärregelleistung (PRL)	Sekundärregelleistung (SRL)	Minutenreserveleistung
Aktivierung	Bis 30 Sekunden	Bis 5 Minuten	Bis 15 Minuten
Ausschreibungszeitraum	Wöchentlich	Wöchentlich	täglich
Ausschreibungszeitpunkt	i.d.R. dienstags	i.d.R. mittwochs	i.d.R. Mo-Fr
Produktzeitscheiben	Keine (gesamte Woche)	HT: Mo-Fr, 8-20 h; NT: restl. Zeitraum	6 x 4-Stundenblöcke am Tag
Produktdifferenzierung	Keine (symmetrisches Produkt)	Positive / negative SRL	Positive / negative MRL
Mindestgebotsgröße	1 MW	5 MW	5 MW
Angebotsinkrement	1 MW	1 MW	1 MW
Dauer	30 Sek. bis 15 Min.	5 Min bis 4 Std.	15 Min bis 4 Std.
Änderungsgeschwindigkeit	automatische Aktivierung nach Frequenzabweichung von 200 mHz	mind. 2 % pro Minute der Nennleistung	Mind. 2 % pro Minute der Nennleistung
Vergabe	Leistungspreis-Merit-Order	Leistungspreis-Merit-Order	Leistungspreis-Merit-Order
Vergütung	Pay-as-bid (Leistungspreis - LP)	Pay-as-bid (LP und Arbeitspreis)	Pay-as-bid (LP und Arbeitspreis)

Die Bundesnetzagentur hat zudem zum 13.06.2017 eine neue Regelung zur Erbringung der Regelleistungsmärkte für Sekundärregelleistung und Minutenreserve ab dem 12.07.2018 beschlossen. Wichtigste Änderung: Die Ausschreibung des gesamten Bedarfs an Sekundärregelleistung hat kalendertäglich zu erfolgen und ist für jeden Kalendertag in sechs Produktzeitscheiben vorzunehmen. (BNetzA, 2017).

Insgesamt sind durch vermehrte Marktteilnehmer, geringere Leistungspreise v.a. in der negativen Richtung (siehe Abbildung 1) und weniger Abrufe über die letzten 6 Jahre die Einnahmen insgesamt und v. a. in negativer Richtung gesunken. Die positive Richtung in der Sekundärregelleistung ist aus heutiger Sicht noch am wirtschaftlichsten zu bewerten.

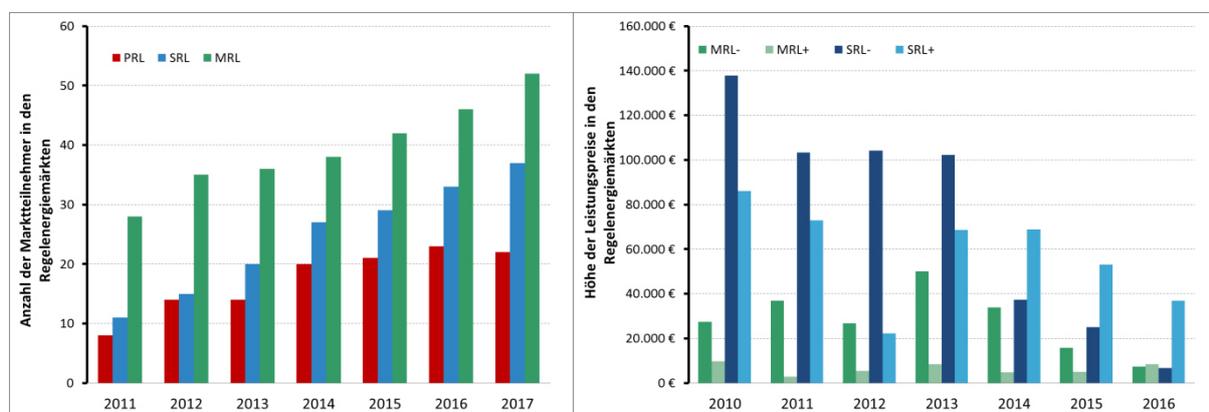


Abbildung 1: Marktteilnehmer Regellenergie von 2011 bis 2017, Entwicklung der Leistungspreise 2010 bis 2016

1.2 Marktdienlicher Einsatz: Die Strombörse

Die Energiebörsen EEX (Termingeschäfte) und die EPEX (Kurzfristgeschäfte), sind der größte Marktplatz für Strom in Deutschland und Europa. Prinzipiell steht es jedem Anlagenbetreiber offen, sein Produkt direkt oder über einen Händler an der EEX/EPEX zu vermarkten. In jedem Fall ist es notwendig, dass der jeweilige Handelspartner einen Zulassungsprozess durchläuft, bevor er am Handel teilnehmen kann. Das definierte Ziel jeden Großhandelsplatzes ist es, Angebot und Nachfrage des Produktes Strom, aber auch anderer Energien zu decken. (EEX, 2014) Ebenso wie der Verkauf findet auch der Ankauf von Strommengen an der Börse statt. Die Tabelle 2 zeigt die Unterschiede zwischen dem Spothandel und dem Terminhandel an der Börse auf. Hierbei sind verschiedene Produkte vorhanden, welche sich nach zeitlicher Verfügung unterscheiden.

Tabelle 2: Unterschiede Spot- und Terminbörsen (vgl. (Riedel M., Zander, W., 2012))

	Börslicher Spothandel	Börslicher Terminhandel
Fristigkeit	kurz (Day-Ahead, Intra-Day)	lang (Week-, Month-, Quarter-, Year-Ahead)
Produkte	Tage, Stunden (15 Minuten, Einzelstunden, Blöcke)	Wochen, Monate, Quartale, Saison, Jahre
Motivati- on/Zweck	Absicherung gegen Mengenrisiken. Physische Erfüllung.	Absicherung gegen Preisrisiken (HEDGING). Spekulative Gewinne. Finanzielle Absicherung.
Vertragserfüllung	physische Lieferung der Ware	finanzieller Ausgleich
Preisbildung	fortlaufender Handel beidseitiges Auktionsmodell	fortlaufender Handel mit Anfangs- und Schlussauktion

Voraussetzung für die Teilnahme am Spotmarkt ist, dass das derzeitige Tarifmodell überhaupt die Möglichkeit berücksichtigt, zumindest einen Teil des Energiebedarfs am Spotmarkt zu beziehen. Außerdem ist die Prognose des Verbrauchs und des Marktpreises notwendig (Erstellen eines Fahrplans), um Niedrig- und Hochpreisphasen vorherzusehen und dann die verfügbare Flexibilität einzusetzen, um den Verbrauch entsprechend den Niedrigpreisphasen zu erhöhen und in den Hochpreisphasen zu reduzieren. Die Mindestleistung zum Markteintritt am Spotmarkt beträgt 0,1 MW. Die Markteintrittsgrenzen können bei kleineren Anlagen über ein virtuelles Kraftwerk erreicht werden.

In der folgenden Abbildung 2 sind beispielhaft die Day-Ahead-Preise aus dem Bezugsjahr 2014 in Form einer Matrix dargestellt, welche den Jahresverlauf über das gesamte Jahr in Bezug auf die Stunden wiedergeben.

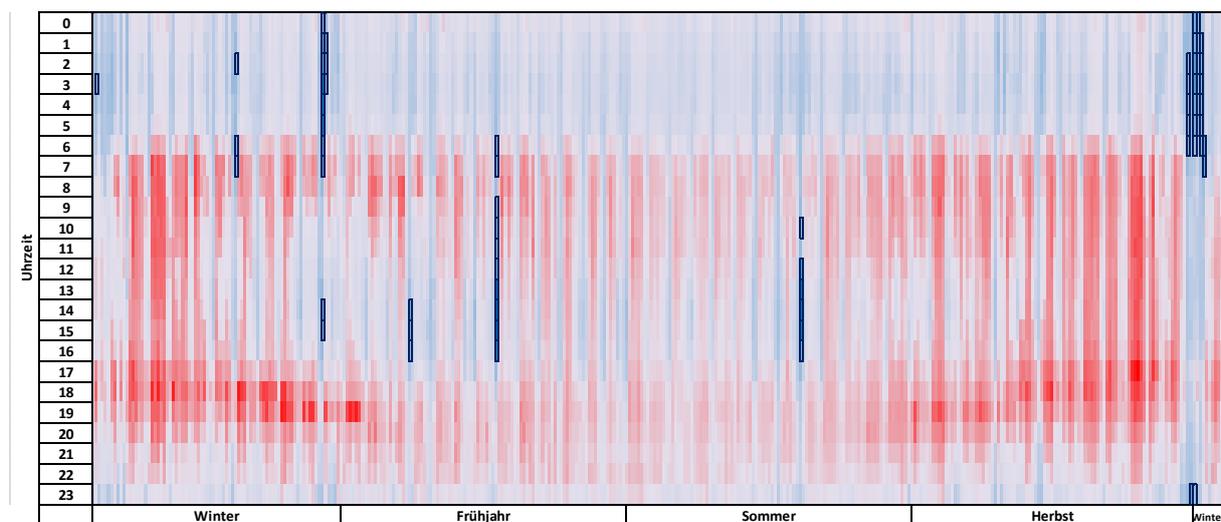


Abbildung 2: Verlauf der Preise am Day-Ahead Markt der Strombörse EPEX Spot SE im Bezugsjahr 2014 (Berechnungen TSB)

Blau steht dabei für niedrige Preise, in blau umrandet sind Preise unter 0€/MWh. Rot hervorgehoben sind hohe Preise. Preise über 100€/MWh wären rot umrandet, dies kommt aber in 2014 nicht vor.

2 Märkte für Kläranlagen der Zukunft

Das Nutzungspotenzial von Kläranlagen zur Unterstützung im Energiesektor wird zukünftig vielseitiger werden. Dies ist bedingt durch die Energiewende und den damit zusammenhängenden Ausbau der Erneuerbaren, vor allem der fluktuierenden Erneuerbaren. Das Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes und zur Digitalisierung der Energiewende (Bundesregierung 2016a, 2016b) sowie die dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 (DENA, 2014) zeigen auf, dass Flexibilitäten in Zukunft eine wichtige Möglichkeit für eine stabile Stromversorgung darstellen werden. Um die zukünftige Stromversorgung also stabil zu gestalten, sind Flexibilitätsoptionen umso mehr nötig. In Zukunft werden sich daher auf Verteilnetzebene noch neue „Regionale Märkte“ zur Netzstabilisierung bzw. zur Ausgleichsenergieerduzierung als netzdienliches Einsatzfeld entwickeln. (Geib, 2014)

2.1 Systemdienlicher Einsatz: Markt der Regelernergie

Durch den Umstand der Residuallasterbringung mithilfe einer Vielzahl von Flexibilitätsoptionen wird der Regel- und Ausgleichsenergiemarkt in den kommenden Jahrzehnten eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Daher ist es sinnvoll, den Regel- und Ausgleichsenergiemarkt intensiver auf das europäische Verbundnetz auszuweiten. Dies könnte bis hin zu einem vollständigen Netzregelverbund für ganz Europa, mit Anpassung der sehr unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Regelerenergimärkte geschehen. (AIT, 2014).

Um die Entwicklung der Regelernergiepreise und der Regelernergieabrufe in 2035 abzuschätzen, wurde die Breitband-Delphi-Methode verwendet. Ausgangsjahr war das Jahr 2014. Die Delphi-Methode ist für strategische Langfristprognosen besonders geeignet.

So ist von einem gesteigerten zukünftigen Bedarf an positiver Minutenreserve (Ø 70%) und einem Mehrbedarf an negativer Minutenreserve (Ø 45%) auszugehen. Es wird sich zudem eine leichte Steigerung des Bedarfes an Sekundärreserve (Ø 15%) einstellen. Vergleichende Aussagen sind zu finden bei (DENA, 2014) resultierend aus

- erhöhter Artenvariabilität bei den Anbietern
- geändertem Kraftwerkseinsatz
- starker EE-Entwicklung
- verbesserter Prognosegenauigkeit und tagesgenauem Börsenausgleich
- stark wechselnder Lastflusssituationen

In Bezug auf die Preise sind leicht sinkende Preise in negativer Richtung bei der SRL und MRL anzunehmen, stagnierende Preise bei der positiven Minutenreserve sowie steigende Preise bei positiver Sekundärreserve resultierend aus

- starker Anpassungen in den Regularien bei SRL und PRL
- Anpassung der Anzahl der Anbieter
- geändertem Kraftwerkseinsatz mit EE-Teilnahme
- stärkeren kurzfristigeren Intraday-Handel
- erhöhten Windradabschaltungen

In den nächsten Jahren wird sich die beschriebene Situation aufgrund der aufgezeigten Entwicklungen verstärken. Es werden mehr Abrufstunden und ein Mehrbedarf an Regelleistung erwartet. Die starke Erhöhung der maximalen Abrufpreise wird weiter bestehen bleiben, da die Gebote geprägt sind durch Spekulationen und geringe Abrufhäufigkeiten. Vergleichbare Aussagen sind ebenso bei (Prognos, 2013) zu finden.

2.2 Marktdienlicher Einsatz: Die Strombörse

Die Stromüberschüsse sind deutlicher an den Preisen der Strombörse abzulesen als an den Regelleistungsabrufen. Die Regelleistung gleicht Ungleichgewichte zwischen Stromerzeugung und Verbrauch aus. An der Strombörse werden Strommengen gehandelt und somit wird eben auch ein Überschuss angeboten, was zu sinkenden oder sogar negativen Preisen führt (Merit-Order-Effekt).

In Zukunft, bedingt durch den weiteren Zubau der fluktuierenden Erneuerbaren Erzeuger und der nicht genauen Prognostizierbarkeit der Einspeisung durch die fluktuierenden Stromerzeuger, werden die Stromüberschüsse ansteigen und für extreme negative und positive Preisspitzen an der Strombörse sorgen. Dies ist mit der Residuallast zu begründen: diese kann negativ werden, wenn die Erneuerbaren mehr einspeisen als verbraucht wird (Überangebot: niedrige, negative Preise). Oder die Preise können steigen, wenn die Erneuerbaren Energien relativ wenig erzeugen und konventionelle Kraftwerke den Strombedarf abdecken müssen (Minderangebot: hohe, positive Preise).

Nach eigenen Berechnungen und den Studien von (Krzikalla et al., 2013; Fraunhofer ISE, 2013) sind ab 2035 nennenswerte Überschussstrommengen im deutschen Stromnetz zu verzeichnen. Diese vermehrten Mengen und Zeiten zu Preisen nahe Null bzw. zu negativen Preisen würden ein großes und wirtschaftliches Potenzial für flexible Erzeuger und Verbraucher darstellen.

Im Jahre 2035 wird der Strompreis an der Börse bei den kurzfristigen Stromprodukten zudem deutlich höhere Fluktuationen aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Phasen, bei denen die Wind- bzw. Solarstromproduktion nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Diese Entwicklungen sind ebenfalls in den nachfolgenden Dar-

stellungen der Extrempreise und der Häufigkeit in Abhängigkeit von den Preisklassen für den Intraday-Markt in 2035 in Abbildung 3 abzulesen.

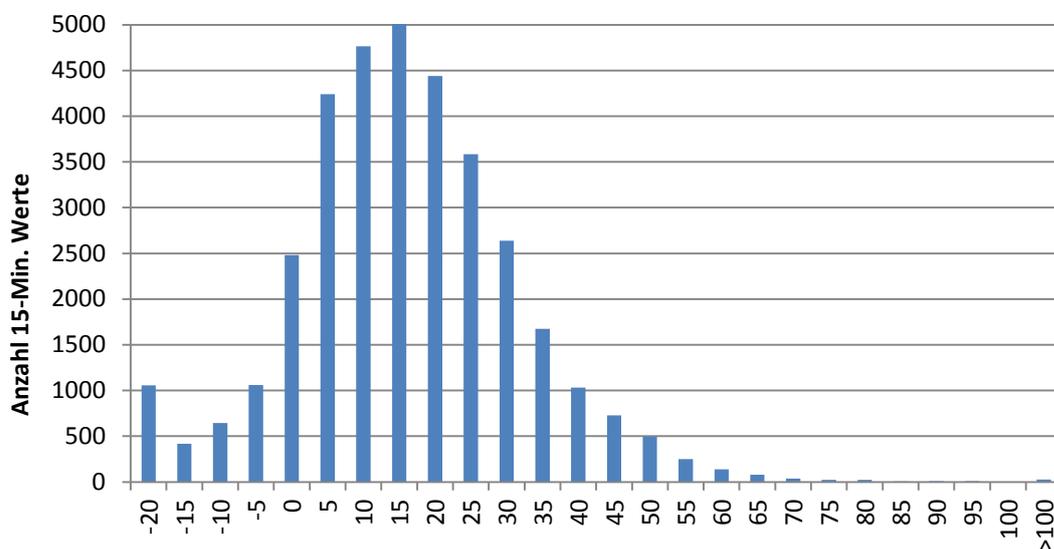


Abbildung 3: Häufigkeit in Abhängigkeit von den Preisklassen für den Intraday-Markt in 2035 (Berechnungen TSB)

Fazit: Der Einstiegsmarkt Regelenergie schafft erste Erfahrungen zur Durchführbarkeit und startet Bewertungsprozesse. Zunehmend wird es Phasen mit Stromüberschüssen bzw. Strommangel im Netz geben. Die Strommärkte werden sich weiterentwickeln und weniger planbar sein. Auch der Ausbau der Erneuerbaren wird weiter stattfinden. So wird es in Zukunft bedeutend sein, Erfahrungen im Bereich des „flexiblen“ Betriebes von Anlagentechnik gesammelt zu haben, auch um zukünftige Strommärkte und Netz- und Systemdienstleitungen bedienen zu können.

Derzeit erfolgen die meisten Abrufe in der SRL. Dies wird sich in Zukunft noch verstärken und es werden mehr Abrufstunden und ein Mehrbedarf an positiver Regelleistung vor allem bei der SRL erwartet. Im Jahre 2035 kann der Strompreis an der Börse bei den kurzfristigen Stromprodukten deutlich höhere Fluktuationen und vermehrte Preisausschläge aufweisen.

3 Wirtschaftliche Bewertung des Flexibilitätspotenzials der unterschiedlichen Anlagenkonzepte

In einer wirtschaftlichen Bewertung wurde der Einsatz der verschiedenen Energieversorgungskonzepte am Beispiel einer Modellkläranlage Radevormwald (58.000 E) unter heutigen Bedingungen für das Bezugsjahr 2014 und für das Jahr 2035 untersucht. Zu den wirtschaftlichen Einflussfaktoren zählten unter anderem die Investitionskosten, die Energiepreise und die Gesetzgebung, insbesondere KWKG oder EEG. Da auch die zukünftige Energieversorgung der Kläranlagen im Jahr 2035 zu betrach-

ten war, spielte die zeitliche Entwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen und damit einhergehend die Strompreisentwicklung, vor allem der Zeitpunkt der Inbetriebnahme einer Energieversorgungsanlage eine wesentliche Rolle. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 (VDI 2012). Nach der Annuitätenmethode wurden aus abgeschätzten Investitionskosten für die Maschinen- und Bautechnik sowie für Gasspeicher und Kommunikationstechnik die zugehörigen Kapitalkosten bestimmt. In den Verbrauchskosten wurden die Kosten für den Strombezug aus dem Netz der allgemeinen Versorgung, und die Stromkosten der Hilfsenergie für die Energieerzeugungsanlagen berücksichtigt. Die Betriebskosten setzten sich u. a. aus Wartungs-, und Instandsetzungskosten sowie sonstigen Kosten wie Steuern, Versicherung, Planung und Unvorhergesehenes zusammen.

Aufgrund der Preisentwicklungen an den betrachteten Strommärkten bis 2035, könnten künftig die Verbrauchergruppen auf der Kläranlage sowie die Langzeitspeicher (PtG) die negativen Preisspitzen sowie den Mehrbedarf bei der positiven SRL vermehrt nutzen. Aufgrund dessen wurde die Summe der obengenannten Kostenarten den Erlösen aus der Stromvergütung sowie den Einnahmen aus dem Verkauf von erzeugten Gasen wie z. B. Methan, Einnahmen für die vermiedenen Kosten für den Bezug für reinen Sauerstoff und Einnahmen aus der Stromvermarktung am Regelenergiemarkt und an der Strombörse gegenübergestellt.

Für die Kläranlage Radevormwald (58.000 E) ist die Teilnahme am Regelenergiemarkt MRL und SRL für die BHKW's und Verbrauchsanlagen in beiden Betrachtungsjahren wirtschaftlich darstellbar gewesen.

Vergleicht man den Status Quo mit den Konzepten I für die MRL und SRL (Flex-Varianten), so sind in beiden Betrachtungszeiträumen die Varianten mit der Regelenergievermarktung bezüglich der Jahreskosten geringer als der Status-Quo. Beide Flex-Varianten können demnach Mehrkosten einsparen, das bedeutet im Jahr 2014 Konzept I MRL spart im Vergleich zum Status-Quo 3.600 €/a und Konzept 1 SRL 16.600 €/a an Jahreskosten ein (siehe Abbildung 4). Im Jahr 2035 sind durch die Flex-Varianten noch höhere Einsparungen in Höhe von 5.800 €/a und 20.700 €/a zu erwarten. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die Einnahmen durch die Regelenergiemarktteilnahme für beide Betrachtungszeiträume kurz aufgezeigt worden.

Tabelle 3: Einnahmen der Regelenergie für 2014/2035 am Beispiel der KA Radevormwald

Radevormwald, 58.000 E	2014	MRL	SRL
jährliche Einnahmen BHKW	€/a	2.826	9.053
jährliche Einnahmen Aggregate	€/a	2.665	9.140
jährliche Einnahmen RE	€/a	5.491	18.193
Radevormwald, 58.000 E	2035	MRL	SRL
jährliche Einnahmen BHKW	€/a	1.841	9.627
jährliche Einnahmen Aggregate	€/a	4.622	11.597
jährliche Einnahmen RE	€/a	6.463	21.224

Unter den jetzigen Annahmen würden sich die Flex-Varianten Konzept I MRL und SRL in beiden Betrachtungszeiten 2014/2035 innerhalb von weniger als 2 Jahren amortisieren. Das liegt vor allem daran, dass in beiden Konzepten I MRL und SRL nur geringe Mehrinvestitionen für die Anschaffung der Kommunikationsbox getätigt werden müssen. Weiterhin werden durch die flexible Fahrweise der schon vorhandenen Anlagentechniken auf der Kläranlage Jahreserträge durch die Regelenergieeinnahmen und im Jahr 2035 durch die vermiedenen Netznutzungskosten generiert, welche die laufenden Kosten decken können.

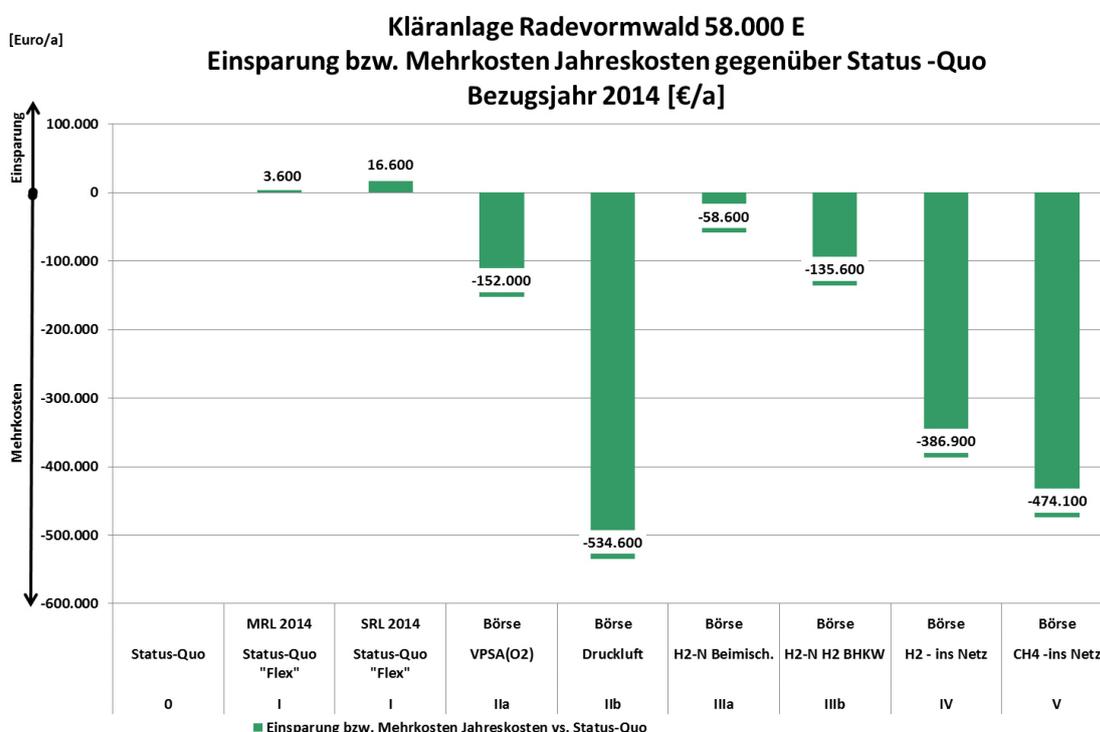


Abbildung 4: Vergleich Einsparung/Mehrkosten Jahreskosten gegenüber Status-Quo 2014, Kläranlage Radevormwald 58.000 E

Von den Konzepten IIIa (Elektrolyseur mit H₂ Beimischung im BHKW), IIIb (Elektrolyseur mit H₂ im BHKW), IV (Elektrolyseur mit H₂ Beimischung im Erdgasnetz) und V (biologische Methanisierung mit CH₄ ins Erdgasnetz) lässt sich in beiden Betrachtungsjahren keine Wirtschaftlichkeit über eine Börsenteilnahme darstellen (siehe Abbildung 4). Dort müssen noch weitere bzw. höhere Einnahmen generiert werden oder die Investitionskosten der Technologien wie PEM-Elektrolyseur oder Methanisierungsreaktoren müssen sich zukünftig stärker verringern.

Die Musterkläranlagen stellen sich in ähnlicher Form dar. In der Musterkläranlage 20.000 E kann neben den Konzepten I MRL und I SRL auch das Konzept IIa (VPSA mit O₂ Nutzung) in beiden Jahren wirtschaftlich dargestellt werden. Im Jahr 2014 amortisiert sich das Konzept in 44 Jahren und im Betrachtungsjahr 2035 bereits nach 36 Jahren.

Die Sensitivitätsanalyse und die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unter veränderte Strompreisbestandteile für das Betrachtungsjahr 2035 haben gezeigt, dass sich die gesetzlichen Regelungen bezüglich der Vermarktung von Strom aus erneuerbaren Energien noch deutlich verändern müssen. Erst durch den Wegfall der Strompreisbestandteile der am Netz gekoppelten Umlagen, Netznutzungsentgelte, Konzessionsabgabe und der Stromsteuer konnte eine Wirtschaftlichkeit in der Zukunft für die Konzepte IV und V exemplarisch für Radevormwald dargestellt werden. Im Jahr 2035 wäre mit veränderten Strompreisbestandteilen das Konzept IV in weniger als 8 Jahren amortisiert und auch Konzept V wäre in fast 15 Jahren wirtschaftlich durchführbar.

Die Verringerung der Investitionskosten für die innovativen Technologien wie der PEM-Elektrolyse oder des Methanisierungsreaktors im Jahr 2035 hat voraussichtlich nicht allein die Kraft die Umsetzung wirtschaftlich darzustellen. Einen größeren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hat die Verringerung der Strompreisbestandteile. Bisher ist die Befreiung bestimmter Strompreisbestandteile nur bei Eigenstromversorgung und Direktlieferung ohne das Durchleiten durch das Netz der allgemeinen Versorgung möglich, sowie im Rahmen der Privilegierung von Elektrolyseuren nach § 118 Abs. 6 EnWG (Befreiung von Netzentgelten).

Die Reduzierung der Stromnebenkosten (EEG-Umlage, Netznutzungsentgelt, netzentgeltbedingte Abgaben, Konzessionsabgabe, Stromsteuer) würde einen wesentlichen Beitrag zur Wirtschaftlichkeit der untersuchten Anlagenkonzepte leisten. Zur Förderung von flexiblen Verbrauchern, hier der Kläranlage, bzw. zukünftig erforderlichen Langzeitspeichern (Power-to-Gas-Anlagen), ist eine temporäre (dynamische) Reduzierung oder Befreiung von einzelnen Strompreisbestandteilen denkbar. Insbesondere netzdienliche oder systemdienliche Einsatzzwecke sollten nicht durch den Ordnungsrahmen gehemmt werden. Neben der Entfaltung von Anreizen für Flexibilitäten sind Änderungen im Ordnungsrahmen aber auch stets hinsichtlich weiterer

Kriterien, wie z.B. Diskriminierungsfreiheit, Transparenz, Verteilungswirkungen, Finanzierung von Infrastruktur und Gesetzeszielen etc., zu prüfen.

Literatur

- AIT (2014): eBADGE, Integration des Regellenergiemarktes am Beispiel von AT, IT und SI. www.portal.tugraz.at, zuletzt aktualisiert am 01.01.2014, zuletzt geprüft am 28.03.2014.
- BNetzA (2017): Beschlusskammer 6, Beschluss Az: BK6-15-158, BK6-15-159. Festlegungsverfahren zu den Ausschreibungsbedingungen und Veröffentlichungspflichten von Sekundärregelung und Minutenreserve. Hg. v. Bundesnetzagentur, Beschluss vom 13.06.2017.
- Bundesregierung (2016a): Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, vom Gesetz vom 29.08.2016 - Bundesgesetzblatt Teil I 2016 Nr. 43 01.09.2016 S. 2034.
- Bundesregierung (2016b): Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes. Strommarktgesetz, vom Gesetz vom 26.07.2016 - Bundesgesetzblatt Teil I 2016 Nr. 37 29.07.2016 S. 1786.
- Consentec (2014): Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt. Consentec GmbH. Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ext/download/marktbeschreibung>, zuletzt aktualisiert am 2014, zuletzt geprüft am 12.07.2017.
- DENA (Hg.) (2014): Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- EEX (2014): Im Zentrum des europäischen Energiehandels. www.eex.com. Hg. v. EEX European Energy Exchange AG. Online verfügbar unter <http://www.eex.com/blob/68252/dbf2a6e6ed1533dcde589cbb563569f3/d-eex-unternehmenfebruar-2014-pdf-data.pdf>, zuletzt aktualisiert am 2014, zuletzt geprüft am 09.02.2014.
- Fraunhofer ISE (2013): Energiesystem Deutschland 2050. Studie von Hans-Martin Henning, Andreas Palzer, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, November 2013
- Geib, Daniel (2014): Masterarbeit. "Untersuchung virtueller Energiespeicher im Umfeld der Strommärkte", TH Bingen, Bingen Juni 2014.
- Krzikalla, Norbert; Achner, Siggi; Brüh, Stefan (2013): Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus erneuerbaren Energien. Studie

im Auftrag des Bundesverbandes Erneuerbare Energien. Hg. v. Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. BET.

Prognos (2013): Wind, Sonne und Regelleistung. In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 63, 2013 (Heft 10).

Riedel M., Zander, W. (Hg.) (2012): Funktionen und wesentliche Elemente einer Börse in: Praxishandbuch Energiebeschaffung, Wirtschaftlicher Strom- und Gaseinkauf - Strategien. Konzepte. Lösungen., Band 2, Teil 2 Strombeschaffung, Kapitel 4.1, Loseblattsammlung. Unter Mitarbeit von Dudenhausen, Ellwanger, Grude, Schwerm.

VDI (Hg.) (2012): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung, VDI 2067 Blatt 1. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI 2067).

VDN (Hg.) (2007): TransmissionCode 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Anhang D – Präqualifikationsbedingungen. Unter Mitarbeit von Holger Berndt, Mike Hermann, Horst D. Kreye, Rüdiger Reinisch und Schere, Ulrich, Vanzetta, Joachim. Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/.../\\$file/TransmissionCode2007.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/.../$file/TransmissionCode2007.pdf), zuletzt geprüft am 13.07.2017.

Korrespondenz an:

Babett Hanke, M. Sc., Dipl. Ing. (FH)
Transferstelle Bingen - TSB
Berlinstr. 107a
55411 Bingen am Rhein
Tel.: 06721 / 98 424 – 274
E-Mail: Hanke@tsb-energie.de

Verena Honeck, M. Sc.
Transferstelle Bingen - TSB
Berlinstr. 107a
55411 Bingen am Rhein
Tel.: 06721 / 98 424 – 282
E-Mail: Honeck@tsb-energie.de

Chancen für mehr Kläranlagenflexibilität durch verbesserte politische Rahmenbedingungen zur Energiemarktintegration der Abwasserwirtschaft

Frank Hüesker

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, TU Kaiserslautern

Kurzfassung: Dieser Sammelband zur arrivee-Abschlusskonferenz bietet die Gelegenheit, die in arrivee entwickelten sozialwissenschaftlichen Szenarien zu den politischen Rahmenbedingungen einem breiteren Publikum zu präsentieren. Bei diesen Szenarien handelt es sich um ein zentrales Ergebnis der Projektarbeit zur Erforschung der vorhandenen und möglicher politisch-rechtlicher Rahmenbedingungen. Zur Methodik der sozialwissenschaftlichen Szenarienerstellung, zur Herleitung der Schlüsselfaktoren sowie zur Konzeption und Durchführung der 25 Forschungsinterviews sei auf das Kapitel 6 im Projektbericht von *arrivee* verwiesen (www.erwas-arrivee.de). Insgesamt ist festzuhalten, dass die politischen Rahmenbedingungen für die Energiemarktintegration der Kommunalwirtschaft vielfältig zu verändern sind, um die vorhandenen Potenziale wie die der Kläranlagen zu heben.

Key-Words: Energiepolitik, Kommunalpolitik, Abwasserpolitik, Szenarien, Energiewende, zukünftige Rahmenbedingungen

1 Einleitung: Chancen der Energiemarktintegration der Abwasserwirtschaft (Stand Herbst 2017)

Einleitend vorangestellt werden aktualisierte Erkenntnisse aus der Auswertung der 25 Forschungsinterviews (u.a. mit dem Umweltbundesamt, dem VKU, der DWA, dem Bayerischen Gemeindetag sowie der EU-Kommission) in *arrivee* zu den Chancen für verbesserte politisch-rechtliche Rahmenbedingungen für eine Energiemarktintegration von Kläranlagen, die „eben mit der Speicherfunktion, mit der Grundlastfähigkeit, mit der Faulgasproduktion eine wichtige, stabilisierende Komponente für so ein umgebautes Energiesystem sein“ können (Interview Bundesumweltamt).

Für das Gesamtsystem der sich transformierenden Energieinfrastrukturen haben Kläranlagen kein relevantes Potenzial, aber für die einzelne Kommune und im Kontext der energetischen Nutzung vorhandener Ressourcen durch kommunalwirtschaftliche Unternehmen schon. Es brauche demnach noch einmal ein starkes Commitment durch die Bundesregierung mit Klimaschutzplänen, die auch ambitioniert umgesetzt werden müssen, denn wenn so etwas wie das Stromsteuergesetz eine dezentrale Lösung behindert, dann können auch die Kommunen und Stadtwerke bei allem guten Willen nur in einem sehr eingeschränkten Korridor agieren (Interview Umweltbundesamt).

Eine demokratische Gesellschaft sollte normativ betrachtet aktiv politisch gestalten wollen, welche Akteure sie im Energiemarkt der Zukunft haben will und welche nicht, und dies nicht nur einem vorgeblichen Energiemarkt überlassen. Wenn einseitig in dezentrale oder zentrale Akteure investiert wird, dann fehlt der Blick auf das Gesamtsystem und es drohen Doppelinvestitionen und -infrastrukturen. Im vorhandenen Energiesystem werden sich also auch nicht von selber regionale Netze oder Märkte entwickeln. Denn es ist technisch und physikalisch eine gewachsene vielstufige Infrastruktur mit machtvollen Akteuren sowie Prozessen. Die Unterscheidung zentral – dezentral-regional-grün ist in diesem Sinne eher politisch-normativ als praktikabel (Interview Umweltbundesamt).

Für kleinere kommunalwirtschaftliche Akteure wie Kläranlagen im Energiemarkt der Zukunft ist der Abschied vom Mythos der Technologieneutralität zentral, weil dieser die alteingesessenen Akteure bevorteilt. Neue Akteure brauchen Zugangsfreiheit mit niedrigen Transaktionskosten, Deminimis-Regelungen sowie fairen Marktzugang (dies beinhaltet auch gezielte Förderung der Power-to-x- und anderer Technologien, die noch nicht marktreif oder erprobt sind). In der 2017 ausgelaufenen Legislaturperiode wurden neue oder dezentrale Technologien aber immer mehr durch komplizierte Detailregelungen benachteiligt: „Theoretisch gesehen gibt es viele Dinge, die besser wären, praktisch gesehen ist es aufgrund von Gesetzeslage, von Subventionen, von historischen Subventionen und von Traditions-Wahrnehmung und ähnliches, entstehen dann einfach Dinge, wo der eine in den Markt halt einfach nicht reinkommt, weil der andere schon drin ist.“ (Interview Umweltbundesamt)

Auch große Potenziale der „Abwärme-Energie-Nutzung“ scheitern in der Praxis, weil kleine energierechtliche Unsicherheiten nicht geklärt sind und dezentralen Akteuren das Leben schwer gemacht wird. Es fehlen flankierende Maßnahmen wie gewisse Abnahme- oder Annahmepflichten und „es ist wirklich keine klare Linie und kein klares Commitment für dezentrale Lösungen im Moment erkennbar auf politischer Ebene“ (Interview Umweltbundesamt).

Die Kläranlage im Energiemarkt der Zukunft wird konkurrieren mit anderen KWK- und Biogasanlagen. In der Kohlenstoffkaskade (klimaschutzrelevant) hat die Abwas-

serwirtschaft jedoch ihren Wert in der energetischen Nutzung flüssiger Reststoffe, ist weit umweltfreundlicher als die energetische Ausnutzung nachwachsender Energietoffe. Diesbezüglich muss progressives Handeln der Kommunalwirtschaft für eine gemeinwohlorientierte Energiewende und Klimaschutz (ob durch Sektorkopplung, durch Co-Vergärung, durch Energieeffizienz der 4. Reinigungsstufe durch Elektrolyse u.v.m.) explizit politisch und gesetzlich gefordert, erlaubt und gefördert werden. Aufgrund der dynamischen EU-Rechtsentwicklung in den Politikfeldern Umwelt und Abfall muss das bundesdeutsche Abwasserrecht ohnehin regelmäßig novelliert werden, hierbei könnte beispielsweise der vorhandene, appelative Passus zur Energieeffizienz der Bundesabwasserverordnung problemlos konkretisiert und mit Maßnahmen unterfüttert werden (Interviews Bayrischer Gemeindetag, Umweltbundesamt, EU-Kommission).

Interviewpartner sprechen von einem grün-konservativen Politikmodell bezüglich einer kommunalwirtschaftlichen Energiewende. Kommunale Unternehmen wollen demnach wieder zunehmend Infrastrukturen wie Netze besitzen, u.a. um sich eigenständig gegen Fluktuationen der erneuerbaren Energiewelt abzusichern. Diese Kommunen wollen mit eigenen Anlagen die Energiewende unterstützen und selbst gestalten, um sie nicht Großunternehmen zu überlassen. Diese zukünftige Kommunalwirtschaft würde ihre Bürger gegenüber technologischem Wandel absichern und Marktversagen und regionale Disparitäten (wie beim Glasfaserausbau) verhindern versuchen. Lokale Unternehmen könnten in regionalen Energiemärkten unter Kontrolle von Stadtwerken z.B. einen Schutz vor zunehmenden Abschaltungen vom Stromnetz finden (Interviews Umweltbundesamt, Bayrischer Gemeindetag).

Stadtwerke können theoretisch und praktisch viele Ressourcen vor Ort über Sektoren hinweg koppeln, Händler und Netzbetreiber sein und Fluktuationen im eigenen Netz ausgleichen. Kommunalwirtschaftliche Pioniere, die die technische Umsetzbarkeit demonstrieren, sind das A+O, um alle bzw. viele mitzuziehen. Die Vernetzung der energiewirtschaftlichen Akteure durch die Digitalisierung schafft neue Geschäftsmodelle. Da der kleinteilige Speichermarkt vermutlich bald mit Elektromobilität und Smart Homes belegt sein wird, könnte das Potenzial der Kommunalwirtschaft die hochpreisige Flexibilität in der Dunkelflaute oder Abendspitze werden (Interviews Umweltbundesamt, VKU, DWA, Bayrischer Gemeindetag).

2 Die Szenarien zu den politischen Rahmenbedingungen der Energiemarktintegration der Abwasserwirtschaft

Es werden nachfolgend – analog zum Projektbericht - die beiden Schlüsselfaktoren Stromverteilnetz und Strommarkt zum Referenz-Szenario ausführlicher beschrieben, die die wichtigsten politischen Rahmenbedingungen für die Energiemarktintegration von Kläranlagen schaffen. Die Schlüsselfaktoren Stromverteilnetz und Strom-

markt werden für die Szenarienerstellung getrennt betrachtet, insbesondere weil sie unterschiedliche relevante Akteure und institutionelle Regime repräsentierten (regulierte Stromnetzbetreiber und marktorientierte Stromhändler). Die Interdependenz der beiden Schlüsselfaktoren ist jedoch sehr hoch und in den energiepolitischen Debatten oft kaum zu trennen.

Energiewirtschaftlich wird **generell** erwartet, dass heutzutage vorhandene strukturelle Stromüberkapazitäten durch konventionelle Erzeuger abnehmen werden, u.a. durch den vermutlich irreversiblen Beschluss, aus der Atomenergieerzeugung 2022 auszusteigen und dem sich 2017 abzeichnenden Einstieg in die Elektromobilität. Deswegen und aufgrund der geltenden Beschlusslage hinsichtlich des voranschreitenden Ausbaus der regenerativen Energieerzeugung wird die Systemverantwortung der Erneuerbaren Energieträger bis 2027 anwachsen (beispielsweise (Baake, 2017)). In der Kombination bewirkt die Entwicklung beider Rahmenbedingungen, dass die Nachfrage nach den energiewirtschaftlichen Flexibilitätsoptionen, welche auch Kläranlagen anbieten können, ansteigt.

Von diesen und anderen veränderten Rahmenbedingungen werden **Stromverteilnetze** und deren Betreiber in 2027 stark betroffen sein. Der zuständige Staatssekretär im für Energie zuständigen Bundeswirtschaftsministerium (BMWi), Rainer Baake, erwartet für 2027 Stromknappheit allein aufgrund der massiven Nachfragesteigerung (durch Energiewende im Wärme- und Mobilitätssektor) nach Strom (Baake, 2017). Da die regenerative Stromeinspeisung in hohem und in ansteigendem Ausmaß in Verteilnetze erfolgt, und da hier Speicher von temporärem Überschussstrom zur Engpassbewirtschaftung in 2027 öfter als 2017 gebraucht werden, werden sich bis 2027 in Verteilnetzen Flexibilitäts-Nischen mit Speicher, PtG, Systemdienstleistungshandel usw. entwickeln, falls die politischen Rahmenbedingungen dies nicht verhindern (Anonymus, 2016).

Die für die Wirtschaftlichkeit des Stromverteilnetzbetriebes in 2017 maßgebliche Anreizregulierungsverordnung des Bundes jedoch „bestraft smarte Lösungen“ (Zerres, 2017). In 2017 ist in vielen energiewirtschaftlichen Details (Speicher, Sektorenkopplung oder Verteilnetzampel) noch offen, unter welchen politischen Rahmenbedingungen das Angebot und die höhere Nachfrage nach energiewirtschaftlicher Flexibilität dann in 2027 **genau ausbalanciert werden wird**. Je nach konkreter institutioneller und regulatorischer Ausgestaltung der **Schlüsselfaktoren Stromverteilnetze und Strommärkte** könnte dann gegebenenfalls vom Entstehen eines „regionalen Flexibilitätsmarkts“ gesprochen werden. Die für Energiepolitik zuständigen Bundestagsabgeordneten haben im November 2016 (Energiepolitische Sprecher Bundestagsfraktionen, 2016) festgestellt, dass viele neuere Entwicklungen bezüglich der Energiewende politisch noch unregelt seien, während die Energiewirtschaft eigentlich Planungssicherheit verlange. Viele energiepolitische Grundentscheidungen müssten

also jetzt nach der Bundestagswahl 2017 getroffen werden, weil die technischen und die betriebswirtschaftlichen Entwicklungen ohnehin voranschreiten.

Selbst die auftragsgemäß am Status quo orientierte Bundesnetzagentur hat deswegen im April 2017 ein maßgebliches Diskussionspapier zur Weiterentwicklung der energiepolitischen Rahmenbedingungen für „Flexibilität im Stromversorgungssystem“ herausgegeben (Bundesnetzagentur, 2017). Folgende für den Betrieb des Stromnetzes und für die Organisation des Strommarktes relevanten Kernelemente sind in Weiterentwicklung der vorhandenen politischen Rahmenbedingungen, u.a. laut Bundesnetzagentur, bereits absehbar:

- **Netzentgelte:** Viele Netzbetreiber werden das System spitzenentnahmebezogener Netzentgelte bis 2027 abgeschafft haben. Grundsätzlich hat in 2027 der Grundpreisanteil an Bedeutung gewonnen und der Arbeitspreisanteil abgenommen. Das heißt, die Netzentgeltsystematik stellt kein Hindernis für Flexibilitätsanbieter mehr dar, bietet aber auch keine spezifischen Anreize für diese. Einen solchen Anreiz würde die flexibilitätsbezogene Dynamisierung der Netzentgelte (oder der EEG-Umlage oder Stromsteuer) darstellen, die bis 2027 kommen könnte.
- **Digitalisierung:** Die Stromverteilnetze werden – wie vom diesbezüglichen Gesetz seit 2016 intendiert - in 2027 weitestgehend digitalisiert sein. Bereits ab 2018 wird beispielsweise das energiewirtschaftliche Potenzial aller Nicht-Wohngebäude erfasst werden. Dies hat zum Entstehen diverser attraktiver Geschäftsmodelle für Flexibilitätsanbieter geführt. Digitale Plattformen (Peer-to-Peer) und Abrechnungsmodelle (Block-Chain) ermöglichen es immer leichter den Stromhändlern, die von fluktuierenden Erzeugern geprägten Verteilnetze (und Bilanzkreise) mit Hilfe von Flexibilitätsanbietern „smart“ zu managen – gemäß der Unbundlingregeln des EU-Energierechts unternehmerisch abgegrenzt vom Netzbetrieb. Allein so konnten ohne neue politische Maßnahmen regionale Flexibilitätsmärkte entstehen, die u.a. das ENWG bereits 2017 erlaubte (z. B. im Rahmen des sog Einspeisemanagement §§ 13ff).
- **Zentral - dezentral:** Es ist in 2017 anzunehmen, dass es bis 2027 weder zu einer radikalen Dezentralisierung noch zu einer Zentralisierung des Energiesystems kommen wird. Sozialwissenschaftliche Forschungsprojekte² zur (deutschen) Energiewende gehen für das kommende Jahrzehnt vom Entstehen eines institutionell verwobenen Nebeneinanders von (neuen) dezentralen und (alten) zentralen Infrastrukturelementen aus. Energiepolitische Vorgaben für Stromverteilnetze und Strommärkte werden entsprechend - 2027 wie 2017 - auf allen politischen Ebenen, vom EU-Strombinnenmarkt bis zur kommunalen Konzessionsvergabe an

² Wie in der speziell an gesellschaftlichen Faktoren interessierten Helmholtz-Allianz ENERGY-TRANS zur Thematik „Zukünftige Infrastrukturen der Energieversorgung. Auf dem Weg zur Nachhaltigkeit und Sozialverträglichkeit“ (sehr empfehlenswert: <http://www.energy-trans.de/index.php>).

Netzbetreiber, gemacht, auch wenn technische und energiewirtschaftliche Trends in Richtung Dezentralität weisen (Agora Energiewende et al., 2017).

- **Speicher:** Der für das Stromnetz zwingend erforderliche Ausgleich zwischen Erzeugung (Einspeisung) und Verbrauch (Last) wird aller Voraussicht nach – aus dargestellten Gründen – teilweise von der Übertragungsnetz- auf die Verteilnetzebene herunterwandern. Das Ausmaß ist jedoch abhängig von zukünftigen politischen Weichenstellungen, wie die Förderung von Stromspeichern und Power-to-x-Technologien. In 2017 sieht die Energiepolitik keinen Förderbedarf für diese Techniken, weil Überkapazitäten im Netz sind, die im EU-Strombinnenmarkt exportiert werden können (eine sehr zentrale Flexibilitätsoption) (Zerres, 2017). Als Faustregel lässt sich sagen, dass die Förderung von Speichertechnologien die Dezentralisierung des Stromnetzes fördern würde (und die politische Förderung dezentraler Stromnetzebenen (Umkehrung Kaskadenmodell nach EnWG) den Speicherbedarf erhöht).

Es folgt auf den folgenden Seiten in tabellarischer Form eine pointierte Darstellung der vier sozialwissenschaftlichen Szenarien in arrivee.

2.1 2017 Politik der gebremsten Energiewende – 2027 Politik der ausgebremssten Energiewende?

Die folgenden Szenarien beruhen grundsätzlich auf den Erkenntnissen der beiden arrivee-Expertenworkshops in 2016 und werden durch die Erkenntnisse aus den 25 durchgeführten Experten-Interviews ergänzt. Das Positiv- und das Negativszenario sind zudem stark von besuchten energiepolitischen Fachkonferenzen im Zeitraum November 2016 bis März 2017 geprägt (wie der Dena-Kongress 2016, die 4. OTTI-Konferenz „Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“ 2017 sowie die 11th „International Renewable Energy Storage Conference“ (IRES) 2017).

Referenz-Szenario: Dieses Szenario beschreibt die politischen Rahmenbedingungen für eine erweiterte Energiemarktintegration, die der Kläranlagenbetreiber in 2027 vorfinden könnte, wenn die Schlüsselfaktoren sich so entwickeln, wie es 2017 laut der Recherchen zu erwarten ist.

Tabelle 1: Referenzszenario: 2017 Politik der gebremsten Energiewende – 2027 Politik der ausgebremssten Energiewende? (Eigene Darstellung)

Die politischen Rahmenbedingungen in 2027	
Schlüsselfaktor	Die politischen Rahmenbedingungen in 2027
Politikfeld Energie: Stromverteilnetz	Die politischen Rahmenbedingungen für den Einsatz von Flexibilität in Stromverteilnetzen in 2027 sind heute, zehn Jahre zuvor, noch offen, weil sie erst nach der Bundestagswahl 2017 Gegenstand energiepolitischer Entscheidungsfindung sein werden: Neue regionale oder weiterhin zentralisierte Systemdienstleistungsmärkte? Neue politisierte oder weiterhin regulierungsbehördlich dominierte Netzbetriebsstrukturen? Die EU-Energiepolitik wird sich bzgl. der Stromverteilnetze auf die Harmonisierung und Dynamisierung von Netzentgelten konzentrieren und nicht in Betreiberstrukturen eingreifen. Insgesamt wird es eine deutlich höhere Nachfrage nach Flexibilitäts-Anbietern in Stromverteilnetzen durch Vermarkter und Netzbetreiber geben, unter anderem zur Bewirtschaftung von Engpässen und zur Vermeidung von Abregelungen. Treiber hierfür könnten Schadensersatzforderungen abgeregelter Stromkunden an Netzbetreiber sein.
Politikfeld Energie: Strommarkt	Die Bundesenergiepolitik verzichtet bis 2027 auf grundlegende Weichenstellungen wie die Förderung von Stromspeichern oder Power-to-Gas. Auch werden nach dem Atomausstieg 2022 die fossilen Stromerzeuger nicht konsequent aus dem Markt genommen (kein verbindlicher Kohleausstieg). Nach der Bundestagswahl 2017 wurde das Politikmodell des „Ausbremsens und Befriedens“, welches bereits in der Legislaturperiode 2013-17 die Energiewende prägte, fortgesetzt. Die Grundziele der Energiewende wie EE-Ausbau bleiben dabei ambitioniert. Die Dynamik der Novellierungen und die Masse der Detail-Ausnahmenregelungen werden dann tendenziell nachlassen. Diese „Pseudo-Dynamik“ hatte bis Anfang der 2020er Jahre neue Akteure in der Energiewirtschaft abgeschreckt. Technisch-wirtschaftliche Entwicklungen werden dennoch Anbietern von Flexibilität wie Kläranlagen im Vergleich zu 2017 eine deutlich höhere Nachfrage in den weiteren Strommarktbestandteilen verschaffen, ohne dass dies als Resultat gezielter politischer Steuerung zu werten ist. Die Energiepolitik wird nachsteuern müssen, um Ziele wie Klimaschutz, Kostenstabilität und Versorgungssicherheit zugleich zu wahren. Die allmähliche Stabilisierung der Rahmenbedingungen, der Abbau der kleinteiligen Flexibilitätshemmnisse, neue Geschäftsmodelle in Folge der Digitalisierung sowie die rechtliche Erleichterung des Pooling zu Virtuellen Kraftwerken ist dann

Schlüsselfaktor	Die politischen Rahmenbedingungen in 2027
<p>Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kalkulation, Anreize</p>	<p>kommunalen Unternehmen entgegen gekommen, die im Gegensatz zu Startups genügend Zeit hatten, Geschäftsmodelle zu entwickeln.</p> <p>Die Rahmenbedingungen für die limitierte Gewinnerwirtschaft im kostendeckenden Tarifikalkulationsbereich werden sich bis 2027 wenig ändern. Der hoheitliche Charakter der Abwasserwirtschaft garantiert einige kommunalwirtschaftliche Privilegien wie reduzierte Umsatzsteuern. Aber die für die Abwasserwirtschaft maßgeblichen Genehmigungsbehörden (Kommunalaufsicht, Wasserbehörden) erlauben und begrüßen 2017 grundsätzlich energiewirtschaftliches Handeln. Falls eine Kläranlage jedoch sektorenübergreifend in der Energiewirtschaft handelt, werden fast immer die steuerlichen Privilegien usw. des hoheitlichen Handelns entfallen, wie Gerichtsentscheidungen und bundesfinanzpolitische Entscheidungen klarstellen.</p>
<p>Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kommunalpolitik/ Organisationsform</p>	<p>Die deutschen Kommunen werden 2027 in sehr unterschiedlichem Ausmaß und Verbindlichkeitsgrad politische Ziele wie Klimaschutz oder Energiewende ihren kommunalen Unternehmen vorgeben. Die Kommunalpolitik wird wie heute grundsätzlich in der Lage sein, die Kommunalwirtschaft auf das Erreichen bestimmter politischer Ziele wie Klimaschutz oder Energieeffizienz zu verpflichten. Hierbei kann die konkrete Ausgestaltung der Organisationsform den Unterschied machen. Das Sektoren übergreifend integrierte und das sozial-ökologisch politisierte Stadtnetz, welches Abwasser- und Energiewirtschaft institutionell verbindet, wird in 2027 in mehr Städten und Gemeinden als in 2017 anzufinden sein.</p>
<p>Politikfeld Abwasser: Sektorkopplung</p>	<p>Die Kopplung der Energiemarktsegmente untereinander wird massiv ansteigen (Elektromobilität, Wärmewende). Auch die Kopplung der Daseinsvorsorgungssektoren wie Abwasser, Trinkwasser oder Abfall an die Energiemärkte wird politisch in 2027 stärker als heute gefördert werden. Aber dies wird eher nicht explizit durch Abwasserpolitik und -recht, sondern übergeordnet über EU-Kreislaufwirtschafts-RL, Nachhaltigkeitsziele im Bundes-Klimaschutzplan usw. vorgegeben.</p>
<p>Politikfeld Abwasser: Reinigungsstandards</p>	<p>Die Abwasserpolitik, die sich auf die verbindliche Festlegung der Reinigungsstandards bezieht, wird in 2027 nach wie vor sektoral geprägt sein. D. h. die politischen Rahmenbedingungen auf Landesebene - wie die zur sogenannten „4. Reinigungsstufe“ - werden bezüglich energiewirtschaftlicher Aspekte wenige bis keine Regelungen enthalten. Nach der Novellierung der Klärschlammverordnung 2017 wird das Thema Reinigungsstandards bundespolitisch vermutlich ein paar Jahre ruhen, gut möglich, dass 2027 neue Novellierungen anstehen, wenn die Resultate bei der Umsetzung der 2017 neu eingeführten Vorgaben (zu Phosphorrückgewinnung, Klärschlammabbringung) absehbar sind. Ggf. wird die EU-Umwelt- und Wasserpolitik ein Treiber der energetischen Klärschlammnutzung, hierauf könnten 2017 aktuelle EU-Kommissions-Initiativen zum Water Re-Use oder zur ressourceneffizienten Abfallverwertung als Indiz genommen werden.</p>

2.2 Zentral, fossil und sektoral: Politische Rahmenbedingungen 2027 geben keine Anreize für Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen

Negativ-Szenario: Dieses Szenario stellt die möglichen politischen Rahmenbedingungen dar, die zu einer Entwicklung in Richtung der jeweils ungünstigeren Ausprägungsform der Schlüsselfaktoren in 2027 führen könnten.

Tabelle 2: Negativ-Szenario: Politische Rahmenbedingungen 2027 geben keine Anreize für Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen (zentral, fossil und sektoral) (Eigene Darstellung)

Schlüsselfaktor	Negative Ausprägung	Politische Rahmenbedingungen in 2027
Politikfeld Energie: Stromverteilnetz	Nachfrage durch Betreiber vorhanden Flexibilität nicht vorhanden	Die Rahmenbedingungen haben insbesondere den Übertragungsnetzausbau gefördert und keine Dezentralisierung der Stromnetze eingeleitet. Die forcierte Anwendung der EU-Unbündling-Regeln hemmen Akteure, Geschäftsmodelle für das Zusammenspiel Netz – Markt zu entwickeln oder die Netzsammel einzuführen. Der Einsatz von Stromspeichern und P-t-G wird zwar erforscht, aber de facto energiepolitisch durch viele Detailregelungen benachteiligt, weil die herkömmlichen (mit den Interessen der verbliebenen fossilen Erzeugern verbundenen) Netzbetreiber weiterhin angereizt werden, EE-Erzeuger abzuregeln. Die Rahmenbedingungen zur Digitalisierung der Energiewende haben den Netzbetreibern durch Detailregelungen Daten und damit Marktmacht verschafft, welche von diesen nicht intelligent, sondern gewinnmaximierend zu Lasten der Bürger eingesetzt haben. Neue Instrumente wie dynamisierte Netzentgelte, EEG- und KWKG-Umlagen o.Ä. dienen insbesondere diesen Interessen, und nicht der Flexibilitätsschließung in Verteilnetzen. Die im Sinne ihrer Ziele erfolgreiche EU-Energy-Road-Map schafft einen europäischen Strombinnenmarkt, in welchem zumeist konventionelle Flexibilität bereit steht.
Politikfeld Energie: Strommarkt	Geschäftsmodelle für Kläranlagen nicht vorhanden	Zentrale fossile und regenerative Erzeugungs- und Vermarktungsstrukturen sowie Großspeicher dominieren den Strommarkt der Energiewende, z. B. durch Rahmenbedingungen im EEG, in der EU EE-RL und zu Ausschreibungen von Windparks Offshore. Die konventionellen Akteure konnten in alle vorgeblichen Energiewendegesetze immer Detailregelungen einflechten, die ihnen Zeit und Geschäftsfelder zur Rückgewinnung verlorener Marktmacht gaben. So fördert das neue Stromspeichergesetz insb. Pumpspeicherwerke, welche von den Kohleunternehmen betrieben werden (wie bereits beim Hochspannungsnetzausbau, der de facto zwischen Kohlekraftwerken stattfand). Die Umstellung des EEG auf Ausschreibungen, die Eigenverbrauchsbelastung usw. haben dezentrale regenerative Erzeuger flächendeckend aus dem Markt genommen, insb. wenn die 20 Jahre Förderdauer abgelaufen waren oder Anlagenmodernisierungen anstanden. Zudem hat die politische Weichenstellung, den Verkehrs- und den Wärmesektor zu elektrifizieren, also den Stromverbrauch massiv zu erhöhen, einen neuen Strommangeldiskurs angeregt. Dies ist einer von

Schlüsselfaktor	Negative Ausprägung	Politische Rahmenbedingungen in 2027
Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kalkulation, Anreize	materielle und immaterielle Anreize gesunken	<p>vielen Gründen, neben Preisen, Landschaftsschutz usw., der den Energiewendekonsens der 2010er-Jahre aufgelöst hat. Die Klimaschutzpolitischen Ambitionen des Pariser Abkommens von 2016 sind fast in Vergessenheit geraten.</p> <p>Die Komplexität und die Dynamik der energiewendepolitischen Rahmenbedingungen haben bis 2027 weiterhin zugenommen. Die kommunalwirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen blieben weitgehend unverändert. Finanziell sehr hohe Anreize (Gebührensenkungspotenziale) durch die Energiemarktintegration, die den hohen (auch immateriellen) Umsetzungsaufwand für die Betreiber rechtfertigen würden, sind so selten gegeben.</p>
Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kommunalpolitik/ Organisationsform	sektoral-autonom	<p>Die Rahmenbedingungen bevorzugen in 2027 die großen Unternehmen der Energiewirtschaft; deren Interessen dominieren dann in der kommunalpolitischen Realität die der Abwasserwirtschaft (z.B. in Städten). Kommunalpolitisch wird den Kläranlagenbetreiber zumeist nur die möglichst kostengünstige Erledigung ihres Kernauftrages vorgegeben.</p>
Politikfeld Abwasser: Sektorkopplung	explizites Verbot	<p>Eigentlich ist die Abwasserpolitik nur ein Nebenschauplatz der Energiewende. Dennoch haben sich in der Abwasserpolitik (in Landesparlamenten, Umweltverwaltungen, Genehmigungsbehörden, Verbänden) sektoral geprägte Bedenkenträger durchgesetzt, die ein explizites Verbot energiewirtschaftlichen Handelns von Kläranlagen in den Rahmenbedingungen verankert haben. Ausschlaggebend waren Konflikte mit der Abfallwirtschaft um die spezifische Regulierung der Co-Vergärung.</p>
Politikfeld Abwasser: Reinigungsstandards	senken energiewirtschaftliches Flexibilitätpotenzial	<p>Strengere und fixe Ablaufwerte in Kombination mit energieintensiven Verfahrensaufgaben (4. Reinigungsstufe, Phosphorrückgewinnung) senken das Flexibilitätpotenzial der Kläranlagen erheblich. Diese Rahmenbedingungen verstärken zudem die Fokussierung auf Eigenbedarfserzeugung und Energiekostenminimierung der Betreiber an Stelle der Energiemarktintegration.</p>

2.3 Dezentral, regenerativ und intelligent: Politische Rahmenbedingungen 2027 schaffen Anreize für Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen

Positiv-Szenario: Dieses Szenario stellt die möglichen politischen Rahmenbedingungen dar, die zu einer Entwicklung in Richtung der jeweils günstigeren Ausprägungsform der Schlüsselfaktoren in 2027 führen könnten.

Tabelle 3: Positiv-Szenario: Politische Rahmenbedingungen 2027 schaffen Anreize für Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen (dezentral, regenerativ und intelligent) (Eigene Darstellung)

Schlüsselfaktor	Positive Ausprägung	Politische Rahmenbedingung in 2027
<p>Politikfeld Energie: Stromverteilnetz</p>	<p>Nachfrage Flexibilität durch Betreiber vorhanden</p>	<p>Es sind auf allen relevanten politischen Ebenen Ansätze zu erkennen, dass Rahmenbedingungen bis 2027 so angepasst werden, dass Stromverteilnetzbetreiber angebotene Flexibilität stärker als 2027 nachfragen. Möglich ist diesbezüglich der beschriebene Mix vieler kleinteiliger Maßnahmen, welche in der Summe intelligentes, regionales Verteilnetzmanagement bewirkt, und damit die Wirtschaftlichkeit der Geschäftsmodelle von Flexibilitätsanbietern erhöht. Die Konzepte hierfür – wie die Netzampel, dynamisierte Netzentgelte, Engpassmanagement usw. – sind 2027 ausgearbeitet und werden von einigen Energiepolitikern sowie Verbänden eingefordert. Diese Konzepte könnten durchzusetzen sein, weil energiewirtschaftliche und technische Entwicklungen in dieselbe Richtung gehen und z. B. das Abschalten von Lasten durch Netzbetreiber ansonsten zu kostenintensiv wird. Auch aus Klimaschutzpolitischen Erfordernissen ist eine Intensivierung der Energiewende bis 2027 möglich und realistisch.</p>
<p>Politikfeld Energie: Strommarkt</p>	<p>Geschäftsmodelle für Anbieter vorhanden</p>	<p>Die Bundesenergiepolitik der Jahre vor 2017 waren stark vom Ziel einer Konsolidierung der Rahmenbedingungen des „neuen“ Strommarktes geprägt, konterkariert durch überkomplexe Anpassungen im Detail. Neuer Schwung in der Energiepolitik könnte in Folge der Bundestagswahl 2017 entstehen, wenn sich die Erkenntnis durchsetzt, dass Deutschland die eigenen Klimaschutzpolitischen Zielsetzungen nicht ohne größere Anstrengungen erreicht. Instrumente könnten hierfür bis 2027 die EU Energy Union, der Bundes-Klimaschutzplan und das Bundes-Energiekonzept sein. Damit neue Geschäftsmodelle für Flexibilitätsanbieter in allen Energiemarktsegmenten entstehen, könnten zentrale Lenkungsinstrumente eingesetzt werden, die wie die CO₂-Abgabe oder ein Kohle-Ausstiegbeschluss fossile Erzeugungskapazitäten aus dem Markt nehmen. Im Rahmen des Abbaus kleinteiliger Hemmnisse für dezentrale Flexibilitätsanbieter im Strommarkt sind vielfältige Bedarfe auf den beiden arrivee-Workshops erarbeitet worden: die rechtliche Klarstellung der Marktrolle des Aggregators zum Pooling von Flexibilität (=Strommarktgesetzgebung), die Privilegierung/Gleichstellung von Flexibilitätsanbietern bei EEG-/KWKG-Umlage oder durch eine Flexibilitätsprämie, Stromsteuerbefreiungen, ein kommendes Stromspeichergesetz oder die Förderung der Markteinführung von Power-to-Gas-</p>

Schlüsselfaktor	Positive Ausprägung	Politische Rahmenbedingung in 2027
Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kalkulation, Anreize	materielle und immaterielle Anreize gestiegen	<p>Technologien (Forschung, Pilotanlagen, kostenfreier Überschussstrom usw.). Dieser Hemmnisabbau ist im 2017 gegenwärtigen Politikmodell Energiewende durchaus bis 2027 möglich.</p> <p>Die kommunalwirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen haben bereits 2017 energiewirtschaftliches Handeln von Kläranlagen ermöglicht. Auch in 2027 könnten materielle energiewirtschaftliche Erträge auf Abwassertarife senkend wirken. Im Sinne des Positivszenarios sind verbesserte immaterielle Anreize für Kläranlagenbetreiber möglich. Insbesondere werden in zehn Jahren viele energiewirtschaftliche Anwendungen technisch und betrieblich erprobt sein, so dass sie von den verbandspolitischen Akteuren propagiert werden können und kleinere Betreiber von Erfahrungen der Pioniere profitieren.</p>
Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kommunalpolitik/ Organisationsform	integrativ-kommunalpolitisch	<p>Es ist durchaus möglich, dass in 2027 die politischen Rahmenbedingungen auf allen Ebenen die zentrale Rolle städtischer Unternehmen und Infrastrukturen für Klimaschutzpolitik herausstreichen sowie materiell und organisatorisch fördern. Viele Städte und Gemeinden in Deutschland werden ihre Kommunalwirtschaft mit unterschiedlichem Verbindlichkeitsgrad nutzen, um energiepolitische Ziele zu erreichen. Aufgrund der kommunalen Selbstverwaltung in Deutschland werden in 2027 viele unterschiedliche Organisationsformen zur Anwendung kommen, aber insgesamt dominieren integrative Politikmodelle und Netzwerke, weil sie regionales, gemeinwohlorientiertes und inter-sektorales Handeln institutionell verankern.</p>
Politikfeld Abwasser: Sektorkopplung	explizite Erlaubnis	<p>Die abwasserpolitischen Rahmenbedingungen sind in 2027 geprägt vom Kreislaufwirtschaftsgedanken und integrativen Nachhaltigkeitskonzeptionen. Auf EU- und Bundesebene wird die Sektorkopplung im Abfall- und Energierecht vorgegeben. Die Wasserpolitik wird insbesondere in den deutschen Bundesländern Sektorkopplung deklaratorisch anstreben, rechtlich erlauben und durch Fördermittel unterstützen. Treibende Kraft werden hierfür die energiewendepolitischen Entwicklungen im Stromspeicher-, im Wärme- und Verkehrssektor sein, die Klimaschutzpolitisch notwendig wurden.</p>
Politikfeld Abwasser: Reinigungsstandards	erhöhen energiewirtschaftliches Flexibilitätpotenzial	<p>Die 2027 erfolgte Erhöhung der Reinigungsstandards wird zu eindeutigen bundespolitischen Vorgaben führen, um den hiermit einhergehenden erhöhten Energiebedarf zu begrenzen. Treiber hierzu waren insb. die EU-Kommission und aus Bundesländern. Im Ergebnis werden sich die Wassergenehmigungsbehörden mit den energiewirtschaftlichen Belangen der Abwasserreinigung 2027 vertraut gemacht haben, so dass in der Praxis ausgewogenen Modelle angewandt werden können, die energieintensivere Reinigungsverfahren mit optimierter Ausnutzung der Flexibilitätpotenziale verbinden.</p>

2.4 arrivee-Ziele für 2027: Die Kläranlage als energiewirtschaftlicher Flexibilitäts-Anbieter in Stromverteilnetzen

Normatives Szenario: Dieses Szenario formuliert für jeden Schlüsselfaktor wünschenswerte Ziele aus Sicht des arrivee-Projektes, die möglicherweise auch Gültigkeit darüber hinaus, z. B. für die Kommunalwirtschaft, beanspruchen können. Zudem werden hier exemplarisch politische Instrumente benannt, die anzuwenden sind, um die jeweils pro Schlüsselfaktor formulierten Ziele zu erreichen.

Tabelle 4: Normatives Szenario 2027: Die Kläranlage als energiewirtschaftlicher Flexibilitäts-Anbieter in Stromverteilnetzen (Eigene Darstellung)

Schlüsselfaktor	Wünschenswertes: in arrivee konsensuale Ziele	Politische Instrumente: Der Weg zur Erreichung dieser Ziele
Politikfeld Energie: Stromverteilnetz	Rahmenbedingungen bieten Verteilnetzbetreibern materielle und regulatorische Anreize, regionale Flexibilitäten zu nutzen.	Stromvernetzbetreiber zu Flexibilitäts-Nachfragen machen, insb. durch: <ul style="list-style-type: none"> - Anreize für Netzbetreiber über eine novellierte Anreizregulierungs-Verordnung - Finanzielle Anreize für Netzbetreiber über §14a Energiewirtschaftsgesetz einführen, anstatt abzuregeln oder Netz auszubauen - Dynamisierung der Netzentgeltssystematik und/oder der EEG-Umlage - Digitalisierung der Stromnetze (Gesetz z. Digitalisierung d. Energiewende)
Politikfeld Energie: Strommarkt	Stabile Rahmenbedingungen für Flexibilitäts-Anbieter, um Geschäftsmodelle erfolgreich zu entwickeln und zu praktizieren.	Flexibilitäts-Anbieter werden in volatilen Strommarktsegmenten belohnt, u.a. durch: <ul style="list-style-type: none"> - Stabile, klare Marktregeln und damit Planungssicherheit ab 2017, der 19. Bundestags-Legislaturperiode, schaffen - Extrem dynamische Arbeitspreise und Anschlusspreise - Nutzung der Potenziale von Informationstechnologien zur Bildung von regionalen, neuen Marktdesigns (über Ampelprinzip hinaus) - Besteuerung fossiler Energieerzeugung mit CO₂-Emissionen
Politikfeld Kommunalwirtschaft: Kalkulation, Anreize	Energiewirtschaftliches Handeln der Kläranlage ist rechtlich unproblematisch und in der Abwasserwirtschaft anerkannt.	Der hoheitliche Charakter und die kostendeckende Tarifikalkulation der Abwasserwirtschaft werden beibehalten, <ul style="list-style-type: none"> - Kommunalabgabengesetz schafft Klarheit zu gewerblichem Handeln - Informationsplattformen der Verbände zu innovativen Ansätzen und positiven Praktiken schaffen Akzeptanz als immateriellen Anreiz
Politikfeld Kommunalpolitik/ Organisationspolitik	Explizite und aktive kommunalpolitische Einbindung der Kläranlage in Klimaschutz- und Energiestrategien ist die Regel.	Europa-, Bundes- und Landespolitik schafft rechtliche und finanzielle Rahmenbedingungen, damit Kommunen politisch und organisatorisch aktiver Treiber von Klimaschutz und Energiewende sein können:

Schlüsselfaktor	Wünschenswertes: in arrivee konsensuale Ziele	Politische Instrumente: Der Weg zur Erreichung dieser Ziele
nisationsform		<ul style="list-style-type: none"> - Partizipative Prozesse, um zu gemeinsamen Zielen wie CO₂-Neutralität und zu inner-kommunalen Interessenausgleich zu gelangen - Politische Rolle und Marktrolle der Kommunalwirtschaft genau definieren, - Stadtwerke sind für Pionierhandeln im Daseinsvorsorgebereich prädestiniert.
Politikfeld Abwasser: Sektorkopplung	Ausdrückliche abwasserpolitische Zielvorgaben und abwasserrechtliche Regelungen fördern intersektorales Handeln der Kläranlagen.	Zukunftsorientiertes Handeln kann Sektorenkopplung fördern, wenn: <ul style="list-style-type: none"> - Bundespolitische Klarstellung: Energiewende gelingt nur im geförderten Zusammenschluss aller Energieträger (Strom, Gas, Wärme, Verkehr, P-t-x) - Neue Rollendefinition der Abwasserwirtschaft vornehmen: Kläranlage als „Kraftwerk“, „Stofflieferant“, „green factory“ oder „Bio-Energiezentrale“, Überzeugungsarbeit in Fachverbänden (DWA, BDEW, VKU usw.) notwendig - EU- und Bundeskreislaufwirtschaftsgesetz schließt Abwasser mit ein - Höhe Abwasserabgabe an Bereitschaft zu intersektoralem Handeln binden
Politikfeld Abwasser: Reinigungsstandards	Rahmenbedingungen priorisieren die Ziele des Gewässerschutzes, erhalten dabei aber energie-wirtschaftliche Kläranlagen-Flexibilität.	Förderung innovativer Technologien und Abbau rechtlich-bürokratischer Hürden: <ul style="list-style-type: none"> - Klare, förderliche und einheitliche Standards für Co-Substrate (insb. deren thermische Verwertung und die Substratbandbreite) - 4.Reinigungsstufe primär aus Gewässer- und Gesundheitsschutzzielen - Flexiblere Überwachungswerte, aber Priorität bleibt Einhaltung Reinigungsstandards

Literatur

Agora Energiewende; I°Energy; Regulatory Assistance Project (RAP) (2017): Energiewende und Dezentralität.

Anonymus (2016): Modul B - Zukunft Energiemarkt: Communities, Sektorkopplung und Netzflexibilität. dena kongresses 2016 „Zukunft der deutschen Energiewende“. Deutsche Energieagentur. Berlin, 22.11.2016. Online verfügbar unter <http://www.dena-kongress.de/medien/vortraege-und-videomitschnitte/>, zuletzt geprüft am 21.06.2017.

Baake, R. (2017): Stromnetze für die Energiewende. Otti - 4.Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin, 31.01.2017.

Bundesnetzagentur (2017): Flexibilität im Stromversorgungssystem. Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität.

Energiepolitische Sprecher Bundestagsfraktionen (2016): Zukunft der deutschen Energiewende. dena kongresses 2016. Weitere Beteiligte: Deutsche Energieagentur. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.dena-kongress.de/medien/vortraege-und-videomitschnitte/>, zuletzt geprüft am 21.06.2017.

Zerres, A. (2017): Netzentwicklung und Netzausbau. Otti - 4.Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin, 31.01.2017.

Korrespondenz an:

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

TU Kaiserslautern

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft

Tel: 0631-205 2946

Fax: 0631-205 3905

E-Mail: theo.schmitt@bauing.uni-kl.de

Flexibilität im Praxistest

Dirk Salomon, Wupperverband, Siedlungswasserwirtschaft

Philipp Pyro, WiW - Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft
mbH

Kurzfassung: In dem Projekt arrivee wurde eine integrierte Systemlösung an der Schnittstelle zwischen Abwasser- und Energiewirtschaft in Form einer Managementstrategie mit Handlungsempfehlungen für Stakeholder der Region entwickelt. Am Beispiel der Kläranlage Radevormwald wurde hierbei das Zusammenspiel von Markt, Netzlast und Kläranlage näher betrachtet. Die Flexibilitätsbereitstellung der KA Radevormwald wurde zuerst mit Hilfe der dynamischen Simulation untersucht und im Anschluss in der Praxis durch Abschaltversuche und Einbindung von Aggregaten in ein virtuelles Kraftwerk getestet. Es konnte gezeigt werden, dass die Kläranlage Radevormwald in der Lage ist Flexibilität bereitzustellen, ohne dass sich die Reinigungsleistung signifikant verschlechtert.

Key-Words: Flexibilitätsbereitstellung, Virtuelles Kraftwerk, Praxistests, Dynamische Simulation

1 Einleitung

In dem Projekt arrivee wurde in ineinander greifenden Arbeitspaketen eine integrierte Systemlösung an der Schnittstelle zwischen Abwasser- und Energiewirtschaft in Form einer Managementstrategie mit Handlungsempfehlungen für Stakeholder der Region entwickelt. Dies beinhaltete die Identifikation und Analyse von möglichen Regelenergiebausteinen auf Kläranlagen sowie die Ermittlung der sich daraus ergebenden Potenziale an Systemdienstleistungen für die Energienetze und die Beurteilung weiterer positiver Effekte, wie z. B. ein vermiedener Netzausbau. Basierend auf den vielfältigen Möglichkeiten, die sich auf der Kläranlage für die Speicherung und Umwandlung von überschüssigem Strom aus fluktuierenden erneuerbaren Energien (EE-Strom) ergeben, wurden Ansätze für Regelenergiekonzepte erarbeitet, technische Anlagenkonzepte für deren Umsetzung entwickelt sowie die Auswirkungen auf Betrieb und Energiebilanz der Kläranlage und die vorgelagerten Verteilnetze analysiert.

Am Beispiel der Kläranlage Radevormwald wurde hierbei das Zusammenspiel von Markt, Netzlast und Kläranlage näher betrachtet. Mit Hilfe eines Simulationsmodells dieser Musterkläranlage wurden die Auswirkungen durch externe Regeleinriffe zur Bereitstellung von Systemdienstleistungen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen (wie z. B. fortschreitender Ausbau der erneuerbaren Energien) betrachtet und analysiert. In einem weiteren Schritt wurden einzelne Regelbausteine der Kläranlage in ein virtuelles Kraftwerk eingebunden, um die Praktikabilität der zuvor theoretisch untersuchten Möglichkeiten aufzuzeigen. Durch diese Einbindung von Kläranlagen ergibt sich eine intelligente Mehrfachnutzung bereits vorhandener Anlagentechnik. Die Möglichkeiten und Potenziale wurden im Rahmen von arrivee unter ökonomischen Gesichtspunkten sowohl aus energiewirtschaftlicher Sicht als auch der Sicht der Kläranlagenbetreiber analysiert und bewertet.

2 KA Radevormwald

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 m³ Abwasser gereinigt. Die Kläranlage verfügt über zwei BHKW (je P_{el} = 80 kW; η_{el} = 31 %) mit denen aus 350.000 Nm³ Klärgas jährlich rund 670.000 kWh/a an elektrischer Energie produziert werden. In Abbildung 2.1 ist das Fließschema der Kläranlage Radevormwald dargestellt.

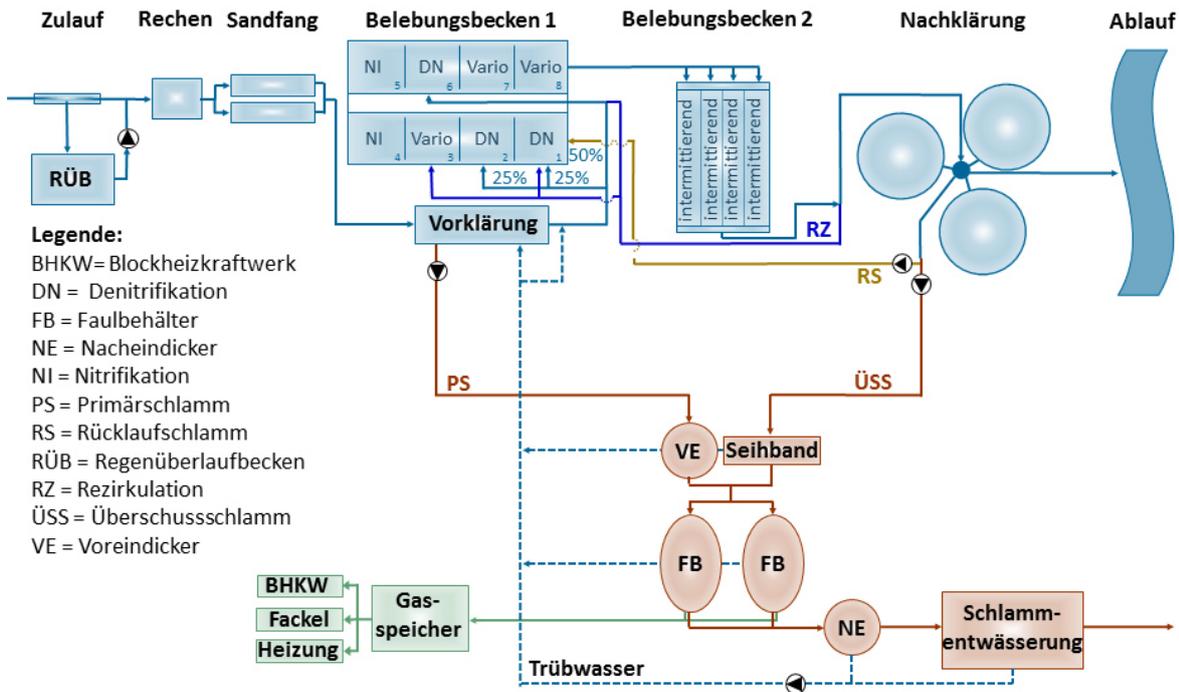


Abbildung 2.1: Fließschema der Kläranlage Radevormwald

3 Abschaltversuche auf der KA Radevormwald

In einem ersten Schritt wurden Abschaltversuche auf der Kläranlage Radevormwald durchgeführt, um die Auswirkungen eines flexibilisierten Anlagenbetriebs auf die Reinigungsleistung unter kontrollierten Bedingungen zu beurteilen. Die Versuche wurden mit den Gebläsen in beiden Belebungsbecken und den Rücklaufschlamm-pumpen (RS-Pumpen) als größte Verbraucher auf der Kläranlage durchgeführt. Der Zeitpunkt der Versuche wurde nach der Analyse der Zulaufbelastung bestimmt. Die Durchführung erfolgte bei mittlerer bis maximaler Zulaufbelastung an einem Trockenwettertag. Die Abschaltdauer wurde zwischen 15 und 120 min variiert.

In Abbildung 3.1 ist das Versuchsergebnis für das Abschalten aller Gebläse aus dem Belebungsbecken 1 und 2 für 60 min dokumentiert. Das Abschalten der Gebläse erfolgt zur Zeit der höchsten $\text{NH}_4\text{-N}$ -Belastung. Der Ablauf der Belegung (BB_{ges}) bleibt während der Versuchszeit und mehrere Stunden danach konstant. Das erst danach im Ablauf der Belegung bemerkbare Auftreten einer Ammoniumspitze ist zeitlich begrenzt und liegt deutlich unter dem vorgegebenen Überwachungswert der Kläranlage. Im Ablauf der Nachklärung (NK) ist kein Anstieg der Ammoniumkonzentration zu verzeichnen.

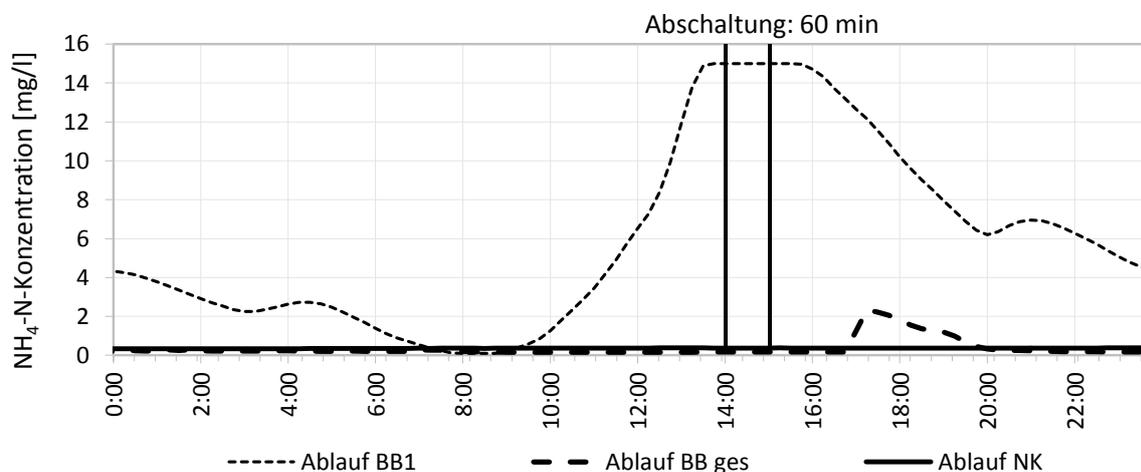


Abbildung 3.1: $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration während des Abschaltens aller Gebläse der Belebungsbecken 1 und 2

Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse der drei durchgeführten Versuche zur Außerbetriebnahme der RS-Pumpen. Die Speicherung des Rücklaufschlammes in der Nachklärung über zwei Stunden hat auf der KA Radevormwald keine negativen Auswirkungen auf die Ablaufqualität. Als Überwachungsparameter wurde hier der Schlamm Spiegel und die Ammoniumablaufkonzentration berücksichtigt. Die steigende $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration am dritten Versuchstag ist auf ein Regenereignis zurückzuführen. Eine Abschaltung der Rücklaufschlamm-pumpen während eines Re-

genereignisses sollte aufgrund der hohen Schlammbeschickung und damit Anstieg des Schlammspiegels in der Nachklärung nicht erfolgen.

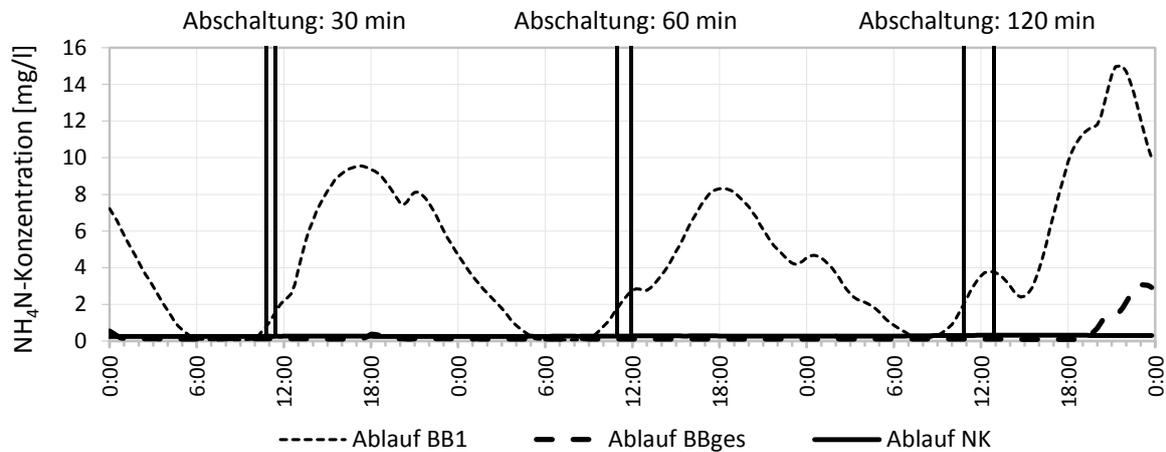


Abbildung 3.2: $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration während des Abschaltens der RS-Pumpen

Die Versuche haben gezeigt, dass die Kläranlage durch das Abschalten von Verbrauchern den Fremdbezug reduzieren kann ohne die Reinigungsleistung zu verschlechtern. Durch den gleichzeitigen Betrieb von zwei BHKW gekoppelt mit dem Abschalten von weiteren Aggregaten könnte ein Teil der erzeugten Leistung ins Verteilnetz eingespeist werden. Durch diese Maßnahme würde zusätzlich positive Flexibilität bereitgestellt.

4 Modellierung der Flexibilitätsbereitstellung

4.1 Einleitung

Das Potenzial zur Flexibilitätsbereitstellung einer Kläranlage ist abhängig von den stündlichen, täglichen und saisonalen Zulaufbelastung (siehe Abbildung 4.1) als auch von der Temperatur und dem Betrieb der Schlammfäulung / Gasverwertung. Um den Einfluss eines flexibilisierten Kläranlagenbetriebs auf die Reinigungsleistung, Energieproduktion und Fremdbezug über einen längeren Zeitraum zu beurteilen, wurden die Prozesse auf der Kläranlage Radevormwald in einem Simulationsmodell abgebildet.

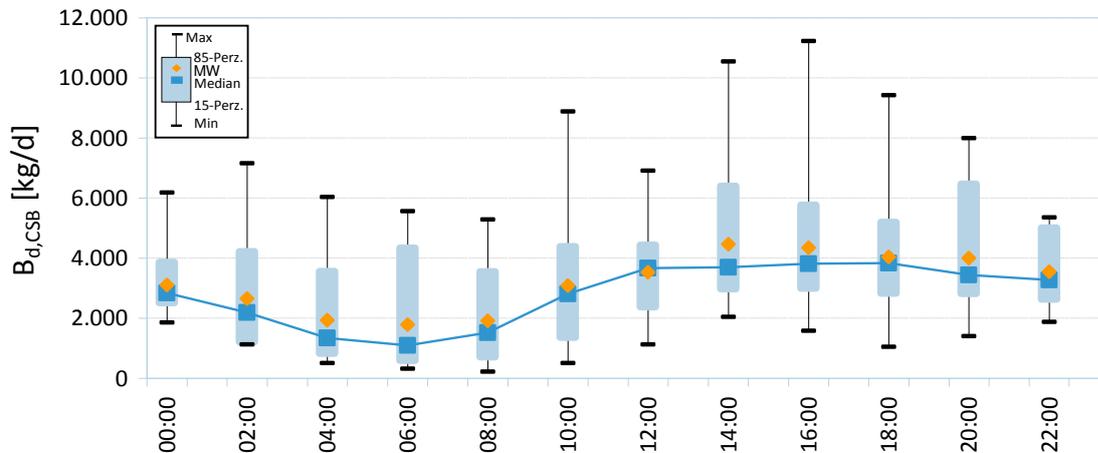


Abbildung 4.1: Tagesgang der CSB-Zulaufkraft für die Kläranlage Radevormwald (Auswertung: 19 Tagesgänge basierend auf 2 h Mischproben im Zulauf zur biologischen Stufe)

4.2 Modellaufbau der Kläranlage Radevormwald

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 (Henze et al., 2007). Die Nachklärung wird mit einem Modell aus drei Schichten abgebildet. Zur Abbildung der in den Faulbehältern ablaufenden, anaeroben Prozesse wird das Modell Siegrist eingesetzt (Siegrist et al, 2002). 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 Überschussschlammwindung 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 den Flexibilitätsbausteinen 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. In Abbildung 4.2 sind die für die einzelnen Aggregate jeweils berücksichtigten Restriktionen zusammengestellt. Die unterschiedlichen Restriktionen und Regelgrößen sind in (Schäfer et al., 2017) detailliert ausgeführt.

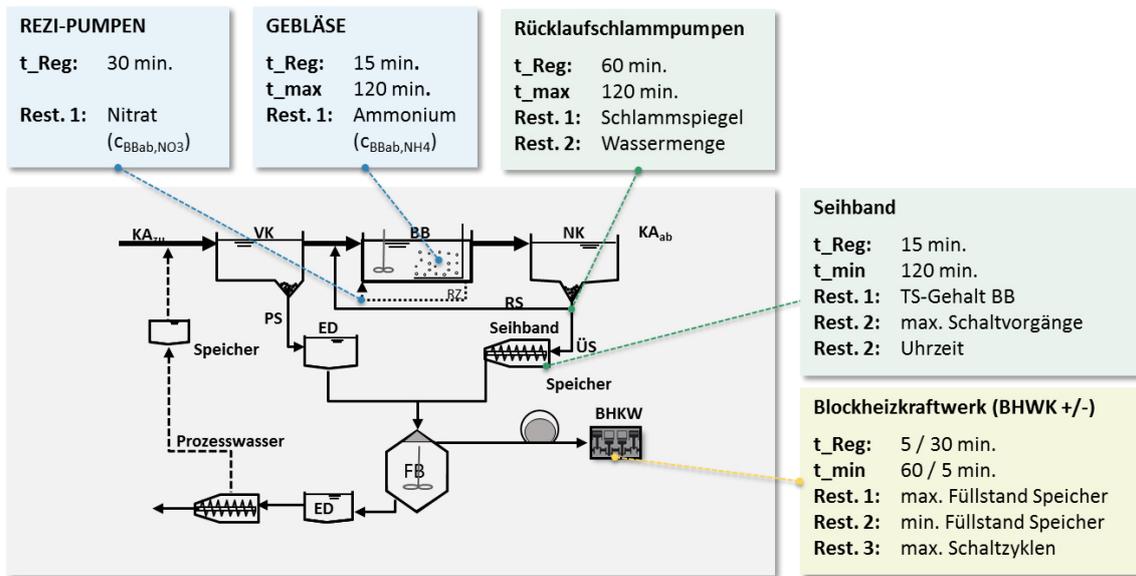


Abbildung 4.2: Im Simulationsmodell eingebundene Aggregate und Restriktionen

Die Funktionsweise des Flexibilitätsbausteins ist beispielhaft für das Abschalten der Gebläse in Abbildung 4.3 dargestellt. Hierbei werden die die Restriktionen „Max NH₄-N-Konzentration im Ablauf des Belebungsbeckens“, „Maximale Abschaltdauer“ und „Regenerationszeit“ berücksichtigt. Anhand des abgebildeten Sauerstoffgehaltes ist nachvollziehbar, dass ein externes Signal mit einer Dauer von mehr als vier Stunden zunächst zu einem Abschalten der Belüftung führt, dieses Abschalten jedoch zweitweise aufgrund der Überschreitung der eingestellten maximalen Abschaltdauer sowie der vorgegebenen maximalen NH₄-N-Konzentration unterbrochen wird.

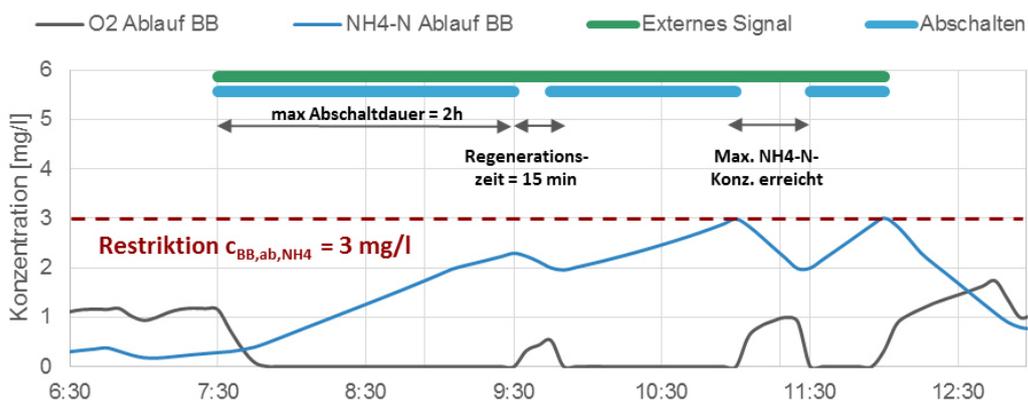


Abbildung 4.3: Abschalten der Gebläse der biologischen Stufe aufgrund eines externen Signals

Um mit der Flexibilisierung des Kläranlagenbetriebs einhergehende Änderungen des Stromfremdbezugs und der Stromproduktion bewerten zu können, wird der Strombedarfs der Kläranlage im Simulationsmodell berechnet. 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, Kläranlageninfrastruktur etc.) werden mit ihrer real gemessenen Leistung berücksichtigt. In Kombination mit der Faulgasverstromung ergibt sich ein Gesamtstrombezug oder -einspeisung der Kläranlage.

Als Datengrundlagen für das Simulationsmodell dienen die Zulaufdaten der Kläranlage Radevormwald aus dem Jahr 2014. Um die tageszeitlichen Schwankungen der Zulaufkraft abzubilden, wird ein normierter Trockenwettertagesgang aus zwei charakteristischen beprobten Trockenwettertagen abgeleitet und für die Dynamisierung der mittleren Tageskraft angesetzt. Darüber hinaus werden für alle beprobten Tage die gemessenen Tagesfrachten angesetzt. An den nicht beprobten Tagen geht die Tageskraft im Jahresmittel in die Berechnung ein. Die berechnete Reinigungsleistung, die Energieproduktion und der Fremdbezug aus dem Simulationsmodell der Kläranlage Radevormwald werden mit den gemessenen Daten abgeglichen. Aufgrund der relativ guten Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung kann das Simulationsmodell für die weitergehende Beurteilung der Flexibilitätsbereitstellung eingesetzt werden (siehe Schmitt et al., 2017).

4.3 Flexibilitätspotenzial der Kläranlage

Mit dem Simulationsmodell wurde die Bereitstellung von Flexibilität für die Minutenregelleistung (MRL) und Sekundärregelleistung (SRL) geprüft. Um den unterschiedlichen Flexibilitätsbedarf aufgrund eines fortgeschrittenen EE-Ausbaus zu berücksichtigen, wurden die Jahre 2014 und 2035 als Betrachtungszeitpunkte angesetzt (Schmidt et. al, 2017b). Die Dauer der einzelnen Zu- bzw. Abschaltensignale 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. Ein Großteil der Marktsignale können durch ein flexibles Betreiben der Aggregate bedient werden. Eine Gesamtübersicht für die untersuchten Aggregate und deren Flexibilität gibt Abbildung 4.4 beispielhaft für die MRL im Jahr 2035. Je Aggregategruppe ist der Anteil der externen Signale die umgesetzt werden konnten und der Anteil der Restriktionen die eine Flexibilisierung unterbunden haben dargestellt. Bei der MRL 2035 konnten die Abschaltensignale für die Gebläse unter Einhaltung der festgelegten Restriktionen zu 97 % bedient werden. Somit bestätigen die Simulationen die Erkenntnisse aus den im Vorfeld durchgeführten Abschaltversuche, die gezeigt haben, dass auf der KA Radevormwald keine Verschlechterung der Ablaufaufwerte durch Abschalten der Gebläse für die untersuchten Abschalt Dauern bei Trockenwetter auftritt. Die Flexibilitätsbereitstellung der Rücklaufschlammumpfen und Rezirkulationsumpfen ist im Vergleich zu den Gebläsen geringer. Die Rücklaufschlammumpfen werden hauptsächlich durch die Restriktion „Q_{zu}“ 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 festgelegten maximalen Nitratgehalt im Ablauf der Belebung begrenzt.

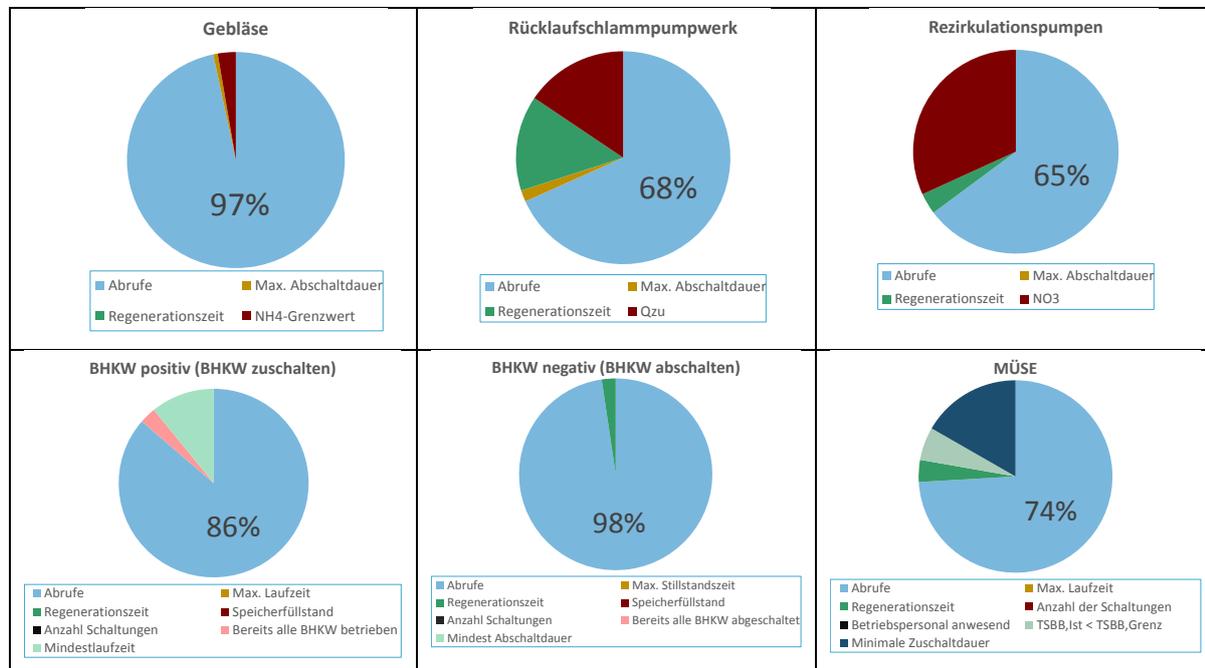


Abbildung 4.4: Positive /negative Flexibilitätsbereitstellung der Aggregate und BHKW der Kläranlage Radevormwald für MRL des Jahres 2035

Das Zuschalten der BHKW (positive Flexibilität) konnte für 86 % der angefragten Signale bedient werden. Das Zuschalten wurde überwiegend durch die Mindestlaufzeit begrenzt. Dies bedeutet, dass ein BHKW durch ein kurzes externes Signal zugeschaltet wurde und aufgrund der eingestellten Mindestlaufzeit nach Beendigung des externen Signals weiterbetrieben wurde, sodass es anschließend bei einem folgenden externen Signal nicht erneut zugeschaltet werden konnte. Das Abschalten der BHKW (negative Flexibilität) konnte bei MRL 2035 für 98 % der Anfragen durchgeführt werden. Bei der Flexibilisierung des Betriebs der mechanischen Überschussschlammindickung konnten 74 % der Signale umgesetzt werden.

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 von 8 mg/l. Bei den überwiegend nur kurzen Abrufdauern der SRL tritt in der Simulation keine Erhöhung der Ammonium-Ablaufwerte auf. Es zeigt sich, dass die Kläranlage Radevormwald Flexibilität zur Verfügung stellen kann ohne die Reinigungsleistung signifikant zu verschlechtern.

5 Einbindung der KA Radevormwald in ein virtuelles Kraftwerk

5.1 Technische Integration in ein virtuelles Kraftwerk

Eine Anlage neben internen, abwasserrechtlichen Belangen auch nach externen Anforderungen von Strommärkten zu fahren, ist eine große Herausforderung und erfordert einen hohen Informationsstand von Klärwerksbetreibern und Mitarbeitern. Neben der Analyse vorhandener Steuerungen sind geeignete Schnittstellen zu finden und diese gemeinsam mit dem Betriebsverantwortlichen so zu definieren, dass die internen und externen Anforderungen erfüllt werden.

Aufgrund der positiven Ergebnisse der Abschaltversuche und der dynamischen Simulation wurde die Einbindung der Kläranlage Radevormwald in ein virtuelles Kraftwerk untersucht. Hierzu musste eine bidirektionale Kommunikation mit den Erzeuger- und Verbraucheranlagen aufgebaut werden, so dass der Anlagenzustand bzw. der aktuelle Arbeitspunkt und damit ihr möglicher elektrischer Leistungshub bestimmt werden kann. Die Anlagen sollten entsprechend ihren Möglichkeiten zur Erbringung von Laständerungen im Sinne der Flexibilität angeregt werden. Folgende vier technische Einheiten (TE) wurden als Pool in dem virtuellen Kraftwerk der Technologiestelle Bingen (TSB) angebunden:

1. TE: BHKW 1 und 2 (2 x 80 kWel)
2. TE: Belüftungsgruppe in der Belebungsstufe BB1: 55, 75 u. 90 kWel
3. TE: Belüftungsgruppe in der Belebungsstufe BB2: 3 x 75 kWel
4. TE: Rücklaufschlammumpfen (RS) 3 x 30 kWel

Ein BHKW wird als Stromerzeuger jeweils in die positive (Leistung erhöhen) und negative (Leistung verringern) Richtung gesteuert. Die Rücklaufschlammumpfen und die Belüftungsgruppen der Belebungsstufe werden als Stromverbraucher nur in die positive Richtung (Leistung verringern) gesteuert.

Da die vier technischen Einheiten bereits durch das Prozessleitsystem der Kläranlage angesteuert wurden, konnte die notwendige Kommunikationstechnik in der Prozessleitstelle installiert werden, um die Signale der technischen Einheiten aufzunehmen. Die dazu benötigte Steuerungssoftware EC24 wurde von der TSB zur Verfügung gestellt. Somit konnten die vier technischen Einheiten in dem virtuellen Kraftwerkssystem der TSB mit den wesentlichen Leistungsdaten und den energetischen Verbrauchsdaten aus dem Prozessleitsystem der Kläranlage gekoppelt werden. Durch den Testbetrieb der technischen Einheiten sollte neben der Funktionsfähigkeit der Kommunikation auch aufgezeigt werden, dass die primäre Aufgabe der Abwasserreinigung betriebssicher eingehalten werden kann. Für den Betrieb der einzelnen technischen Einheiten wurden dafür Restriktionen in der Steuerungssoftware eingefügt (vgl. Kapitel 4). Dazu wurden im Vorfeld der externen Ansteuerung zusätzliche interne Tests

der einzubindenden Anlagen auf der Kläranlage durch den Wupperverband durchgeführt.

Das System EC24 ist analog zur Leittechnik in Kraftwerken aufgebaut. Der Aufbau des Systems lässt sich grundsätzlich in vier Ebenen aufteilen: die Leitwarte virtuelles Kraftwerk, Leittechnik, Kommunikationsebene und dezentrale Erzeuger / Verbraucher. Die nachfolgende Abbildung zeigt schematisch die logische Verknüpfung inkl. der Kommunikation des virtuellen Kraftwerks vom Server zu den einzelnen Energieerzeugungs- und Verbraucheranlagen der Kläranlage Radevormwald (Abbildung 5.1).

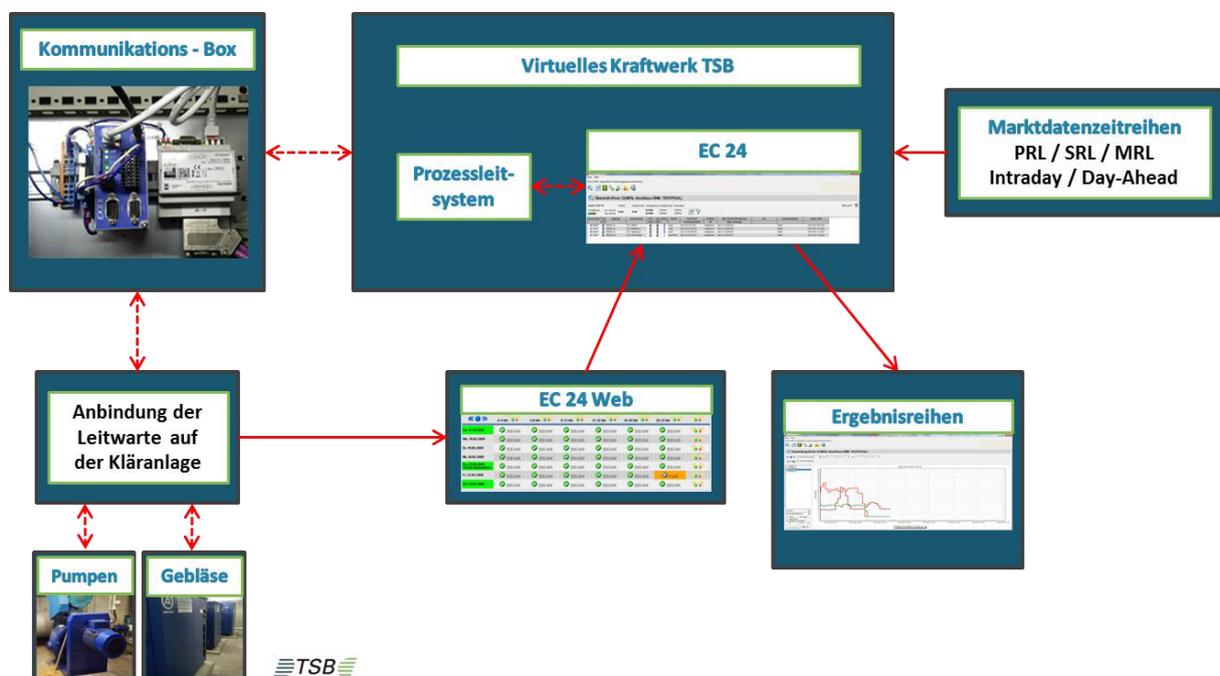


Abbildung 5.1: Beispielhaftes Schema einer Kommunikation der Steuerungssoftware für die Einbindung in ein virtuelles Kraftwerk von TSB

5.2 Doppelhockertest

In Bezug auf die Regelenergieerbringung muss im Vorfeld eine Präqualifikation der einzelnen Anlagen durchgeführt werden. Die Präqualifikation beschreibt den Nachweis über die Fahrplanteue einer Anlage. Dazu wird die elektrische Leistung minutengenau (MRL-Präqualifikation) bzw. sekundengenau (SRL-Präqualifikation) vorgegeben und dokumentiert. Der Abruf der Regelenergie steht sofort an und die tatsächliche Erbringung durch die technische Anlage wird zeitverzögert erbracht (siehe Bild B.4.54). Solche Abrufe können sehr kurz sein, weshalb sich Verbraucher und Erzeuger, die schnell aktiv reagieren können, besonders gut eignen. Da es sich hier um einen Testbetrieb handelt, ist eine kommerzielle Präqualifikation nicht notwen-

dig. Die Fahrplanteue wird jedoch im virtuellen Kraftwerk testweise simuliert (Darstellung in Form eines Doppelhubes).

In Abbildung 5.2 ist der Erbringungszyklus in Form des Doppelhubes für die vier technischen Einheiten dargestellt. Für das BHKW mit einer elektrischen Leistung von 80 kWel ist die Bereitstellung von negativer Regelenergie für die Stromverbraucher die Bereitstellung von positiver Regelenergie dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass das BHKW in der Lage ist, seine Leistung innerhalb der geforderten Rampendauer um die angebotene Regelleistung zu verringern, den niedrigeren Leistungsarbeitspunkt über die Abrufdauer (15 Minuten) zu halten und danach innerhalb des geforderten Zeitraumes wieder auf die Ausgangsleistung hochzufahren. Die Stromverbraucher (Gebläse, RS-Pumpen) weisen dagegen einen erhöhten Leistungsbezug beim Anfahren der Aggregate auf, dies kann durch eine Begrenzung der maximalen Leistungsaufnahme unterbunden werden. Aufgrund der eingebundenen Restriktionen zur Sicherstellung der Reinigungsleistung der Gebläse und Rücklaufschlammumpen (maximale Abschaltzeit) kann die geforderte maximale Abschaltzeit von 4 Stunden mit diesen Aggregaten auf der KA Radevormwald nicht gehalten werden.

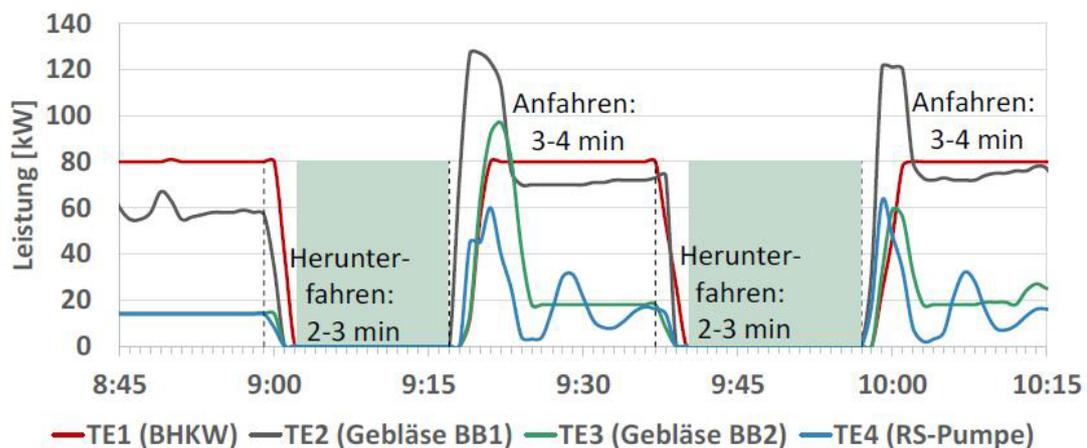


Abbildung 5.2: Doppelhub für alle vier technischen Einheiten auf der KA Radevormwald

Die Ergebnisse nach 6 Testwochen zeigen, dass die Reaktionszeiten der Verbraucher und des BHKW für die Erbringung in der Minuten- sowie Sekundärreserve qualifiziert sind. Ebenso war die Kommunikation stabil und die Abrufhäufigkeiten konnten eingehalten werden.

5.3 Ergebnisse SRL / MRL Bereitstellung

Die Analyse der MRL-Marktsignale hat gezeigt, dass in Extremfällen eine Anforderung für die Regelleistung über mehrere Stunden bestehen kann. Aus diesem Grund wurden zu den Untersuchungen durch vergleichsweise kurze Abrufdauern bis max. 60 min die Auswirkungen auf die Kläranlage durch lange Abrufdauern über mehrere Stunden untersucht. Hierzu wurde an vier Tagen ein künstlich generiertes Anforderungssignal über mehrere Stunden an die Kläranlage gesendet. Die Auswertung der Ablaufwerte für die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration sowie für die übrigen überwachungsrelevanten Parameter zeigt, dass auch bei der langen Abrufdauer die gute Reinigungsleistung der Kläranlage durch die Einhaltung der Restriktion beibehalten werden kann. In Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 sind beispielhaft die Ergebnisse für eine Signaldauer von 335 min dargestellt.

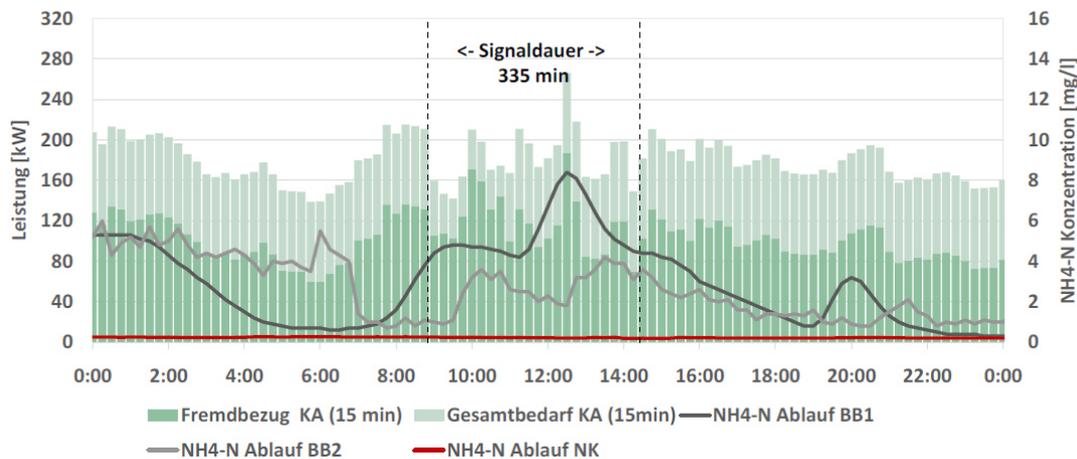


Abbildung 5.3: Energiebedarf, Ablaufkonzentrationen der Belebungsbecken und der Nachklärung der KA Radevormwald bei einer Signaldauer von 335 min

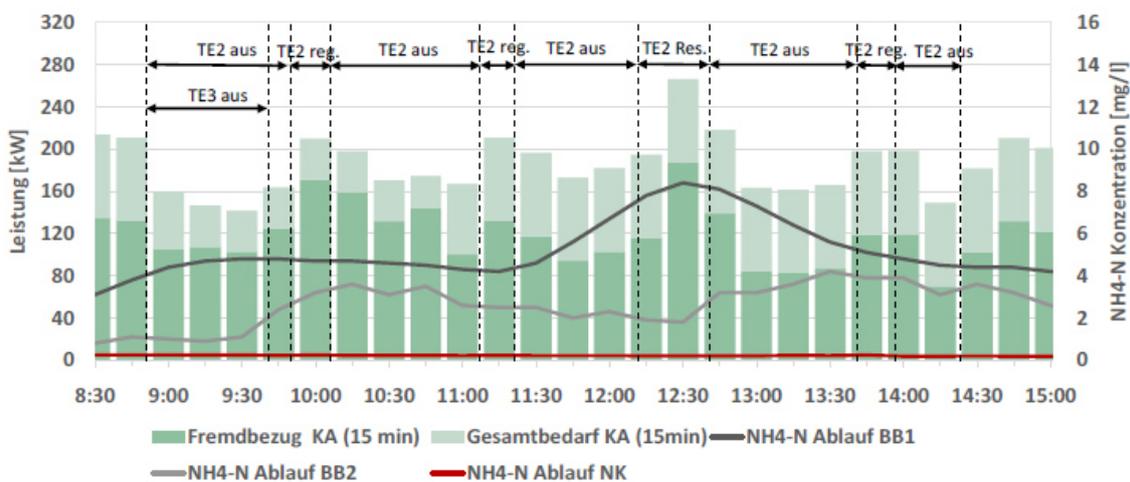


Abbildung 5.4: Detailausschnitt mit Angabe der Abrufdauern der einzelnen TE sowie Energiebedarf, Ablaufkonzentrationen der Belebungsbecken und der Nachklärung der KA Radevormwald

Die Gebläse im Belebungsbecken 1 (TE2) werden für 60 min (max. Abschaltzeit) abgeschaltet. Dann erfolgt durch eine Restriktion definierte Regenerationszeit von 15 min, während der die Gebläse wieder Sauerstoff in das Becken eintragen. Danach erfolgt die nächste Abschaltung für 60 min. Dieses Intervall wird über die gesamte Versuchszeit von 335 min wiederholt. Eine Ausnahme stellt die Zeit von 12:10 Uhr bis 12:40 Uhr dar. In dieser Zeit beträgt die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Belebungsbecken 1 mehr als 8 mg/l (festgelegt durch die Restriktion für BB1). Aus diesem Grund wird das Abschalten der Gebläse durch die Restriktion blockiert. Nach der Unterschreitung der 8 mg/l werden die Gebläse wieder ausgeschaltet. Die Gebläse im Belebungsbecken 2 (TE3) wurden nach den ersten 50 min für die Bereitstellung blockiert, da die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration über die 3 mg/l (festgelegt durch die Restriktion für BB2) angestiegen war. Die RS-Pumpen (TE4) wurden an diesem Tag komplett durch die Restriktion Abwasserzulaufmenge (> 500 l/s) für die Bereitstellung der Regelleistung blockiert, da an diesem Tag infolge Regen ein erhöhter Mischwasserfluss auftrat. Der große Abwasserzulauf erklärt auch den großen Leistungsbezug der TE 4 und den insgesamt flachen Verlauf der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Belebungsbecken 1.

Insgesamt wurde deutlich, dass die Kläranlage aus technischer Sicht in der Lage ist, Regelleistung über mehrere Stunden mit definierten Unterbrechungen für die Regeneration bereitzustellen. In der Regenerationszeit muss die Regelleistung dann durch andere Aggregate aus dem Pool bereitgestellt werden.

Deutlich wurde auch, dass es wahrscheinlich weitere anlagenspezifische Parameter gibt, die individuell untersucht und in der Vergleichskonzeption bedacht werden müssen. Für den Betreiber des virtuellen Kraftwerkes scheint es sinnvoll zu sein, dass der Pool nicht nur aus den Kläranlagen, sondern auch aus anderen Anlagen besteht. Dadurch kann die Sicherheit für die Verfügbarkeit der Regelleistung besser gewährleistet werden, wenn die Aggregate auf der Kläranlage keine Regelleistung aufgrund systembedingt gleicher Restriktionen erbringen können, z. B. bei erhöhten Mischwasserzuflüssen.

6 Zusammenfassung

Die Wasserwirtschaft hat sich zum Ziel gesetzt, neben der Erfüllung der wasserwirtschaftlichen Aufgaben auch ihre energetische Effizienz zu steigern. Dabei wird kontinuierlich der Energieverbrauch gesenkt und die CO_2 neutrale Erzeugung von elektrischer Energie gesteigert. Dadurch werden die wasserwirtschaftlichen Aufgaben kosteneffizienter ausgeführt und gleichzeitig der Klimaschutz unterstützt. Insgesamt wird dabei der Anteil an erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung auch in den kommenden Jahren steigen. Dies führt zu stärkeren Schwankungen der Energiemenge im Verteilnetz. Damit diese Schwankungen der Energiemenge nicht durch das

Abregeln der Energieerzeuger ausgeglichen werden, werden neue Regelkonzepte und Speichermöglichkeiten in der bestehenden Infrastruktur nötig werden.

Die im Projekt arrivee vorgelegten Ergebnisse zeigen, dass die Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung regelmäßig ein großes Potenzial für die Bereitstellung von Regelleistung vorweisen. Wie die Feldversuche als auch die dynamische Simulation dabei zeigten, wird die Kernaufgabe der Kläranlagen, nämlich die Reinigung des Abwassers nicht beeinträchtigt.

Durch die Integration der in der Fläche vorhandenen Kläranlagen in die energetische Infrastruktur würde bestehende Infrastruktur volkswirtschaftlich sinnvoll genutzt. Ferner würden die Kläranlagen ein zweites „Standbein“ bekommen und die wasserwirtschaftlichen Aufgaben könnten noch kosteneffizienter erfüllt werden.

Um dies zu realisieren und die Kläranlagen tatsächlich flächendeckend an energiewirtschaftlichen Aufgaben aber auch Chancen zu beteiligen, müssen signifikante Anpassungen an den gesetzlichen Rahmenbedingungen vorgenommen werden. Nur so kann die Verschiebung von Lasten, die Anpassung der Erzeugung an die energiewirtschaftliche Gesamtsituation und Speicherung des elektrischen Stroms für die Kläranlagen wirtschaftlich werden.

Das Projekt „arrivee“ wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS als Teil des Förderschwerpunkts Nachhaltiges Wassermanagement (Rahmenprogramm FONA). Die Autoren danken dem BMBF für seine finanzielle Unterstützung.

Literatur

- 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.
- Schäfer, M.; Schmitt, T.G.; Hobus, I. (2017): „Energetic flexibility on wastewater treatment plants“; In: Water Science & Technology (zur Veröffentlichung angenommen)
- 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
- Schmitt, T.G.; Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Bidlingmaier, A.; Hanke, B.; Hobus, I.; Honeck, V.; Kornrumpf, T.; Pyro, P.; Salomon, D.; Zdrallek, M. (2017a): „Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Stromnetz – Ergebnisse aus dem Verbundprojekt arrivee“, In: Wasserwirtschaft Wassertechnik Nr. 5, S. 08–14.

Schmitt, T.G.; Schäfer, M.; Gretzschel, O; Knerr, H.; Hüesker, F.; Kornrumpf, T. et al. (2017b): Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Hg. v. BMBF. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Kaiserslautern. Online verfügbar unter www.erwas-arrivee.de.

Korrespondenz an:

Dipl.-Ing. Dirk Salomon
Untere Lichtenplatzer Str. 100,
42289 Wuppertal
Tel.: 0202/583-114
E-Mail: sal@wupperverband.de

Philipp Pyro, M. Sc.
Untere Lichtenplatzer Str. 100,
42289 Wuppertal
Tel.: 0202/583-109
E-Mail: ppo@wupperverband.de

Optimierung der Klärschlammbehandlung und Faulgasverwertung auf der Kläranlage „Untere Selz“

Thomas Siekmann, Christoph Weisrock

Segbachstr. 9, 56743 Thür; Heinrich-Wieland-Str. 11, 55218 Ingelheim am Rhein

Kurzfassung: Die im Jahre 1958 errichtete, ursprünglich rein mechanisch arbeitende Kläranlage Untere Selz wurde 1982 in ein mechanisch-biologisches Klärwerk für eine Ausbaugröße von 92.500 EW umgebaut. Im Zeitraum von 1997 bis 1999 erfolgte die Umrüstung und Erweiterung der Anlage auf das Reinigungsziel Nährstoffelimination bei einer Ausbaugröße von 110.000 EW. Neben einer Erweiterung der Belebung war hierbei der Bau einer Mikrosiebung als „Nachreinigungsstufe“ zu den vorhandenen Nachklärbecken die wesentliche Maßnahme. Aufgrund von Betriebsproblemen wurde die Mikrosiebung 2005 durch den Neubau von zwei Nachklärbecken ersetzt. Außerdem wurden ein neues Rücklauf- und Überschussschlammumpwerk sowie ein neuer Faulturm in Stahlbauweise als Ergänzung zu den beiden alten Betonfaultürmen gebaut. Die heutige Verfahrensführung der biologischen Abwasserreinigung entspricht im Wesentlichen noch den damaligen Grundlagen. Aufgrund der Veränderung von verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. Belastungssituation), notwendig gewordener verfahrenstechnischer und baulicher Maßnahmen sowie zur nachhaltigen Optimierung der Klärschlammbehandlung und Faulgasverwertung wurde für die Kläranlage „Untere Selz“ ein Zukunftskonzept erstellt.

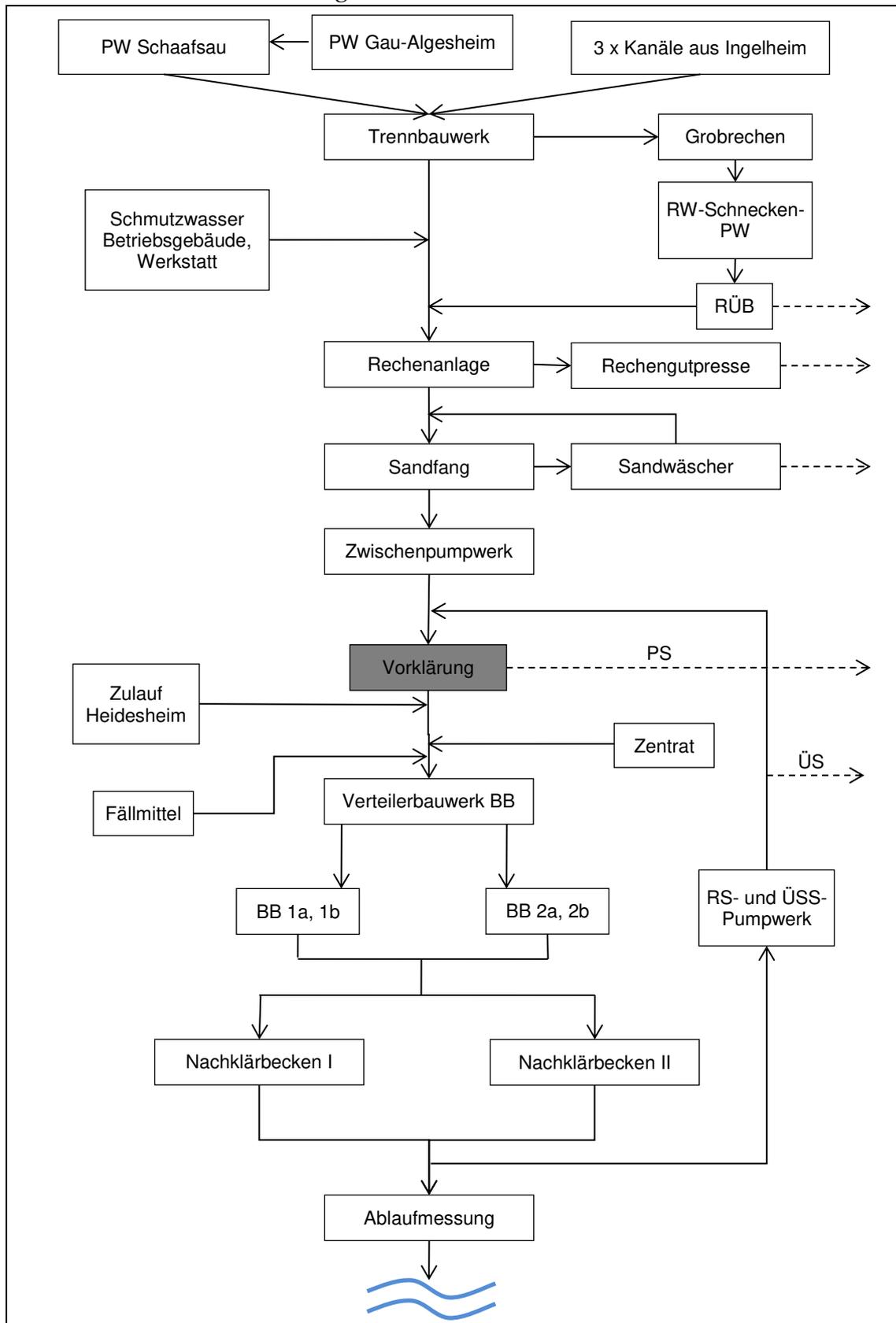
Key-Words: Klärschlammbehandlung, Klärschlammfäulung, Energetische Optimierung, Faulgasverwertung

1 Ausgangssituation

1.1 Abwasserweg

Die Abwasserreinigung erfolgt gemäß dem im Folgenden dargestellten Schaubild. Nach Hebung der Abwasserteilströme durch entsprechende Pumpwerke durchläuft das Abwasser die mechanische Reinigungsstufe (u. a. 2 St. Vorklärbecken). Ein

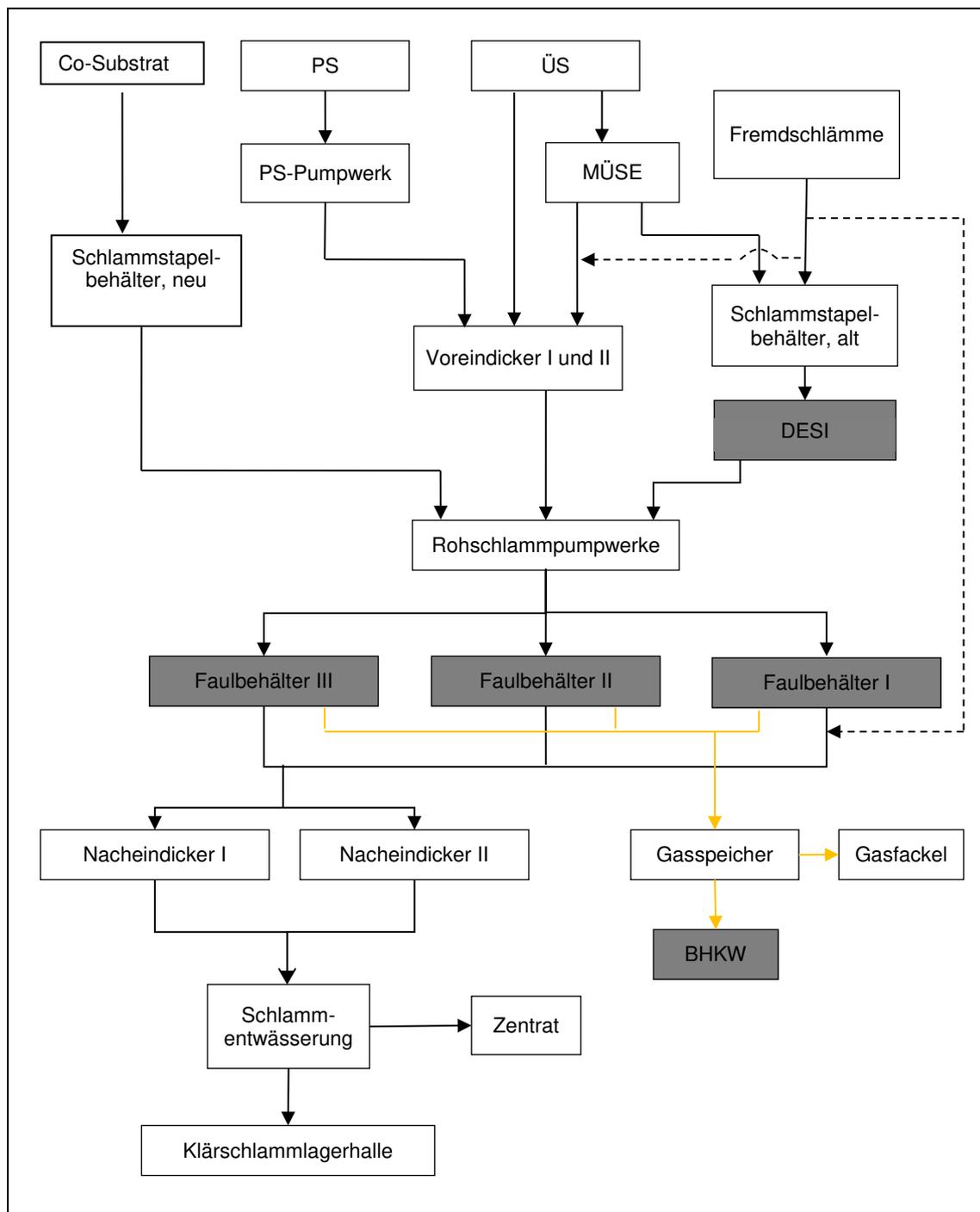
Zwischenpumpwerk fördert das Abwasser zur biologischen Reinigungsstufe, die sich i. W. aus vier Belebungsstraßen und 2 St. Nachklärbecken zusammensetzt.



Die Vorklärung wird in den weiteren Ausführungen nochmal aufgegriffen.

1.2 Schlammweg

Im Folgenden soll der Fokus jedoch auf die Schlammschiene gelegt werden. Das Fließschema fasst wesentliche Verfahrensstufen bzw. Elemente zusammen.



Zur Abtrennung des belebten Schlammes vom gereinigten Abwasser sind 2 St. Nachklärbecken als horizontal durchflossene Rundbecken vorhanden. Der anfallende

Überschussschlamm wird aus dem System entnommen, teilweise in die Vorklärung gefördert und teilweise maschinell eingedickt. Von hier aus wird der eingedickte Schlamm in den Schlammstapelbehälter (alt) gefördert. Über eine Ultraschalldesintegration wird der Schlamm in den Heizkreislauf der Faulbehälteranlage abgegeben.

Der aus den Vorklärbeckentrichtern abgezogene Primär- und Überschussschlamm wird zur weiteren statischen Eindickung in 2 St. Voreindicker gefördert, von wo aus er ebenfalls dem Heizkreislauf der Faulbehälter zugegeben wird.

Weiterhin wird Fremdschlamm einer nahegelegenen Industrie angenommen, der in die beiden Voreindicker oder in den Stapelbehälter (alt) gefördert wird. Ferner werden Co-Substrate angenommen, wobei es sich i. W. um Destillate aus Weinbaubetrieben und Fette handelt.

Zur Schlammentwässerung stehen 2 St. Zentrifugen zur Verfügung. Der entwässerte Schlamm wird anschließend zur Zwischenlagerung in eine Schlammhalle verbracht. Von hier aus wird der Schlamm zur weitergehenden thermischen Verwertung mittels LKW zu einer Verbrennungsanlage transportiert.

1.3 Aufgabenstellung

Durch das erstellte Zukunftskonzept wird für den Abwasserverband Untere Selz eine Grundlage geschaffen, um die Kläranlage – unter Berücksichtigung veränderter Randbedingungen, des baulichen Zustands einzelner Verfahrensstufen und Anlagenteile, technischer Neuerungen sowie energetischer Optimierungsstrategien – zukunftsorientiert anzupassen. Neben einer energetischen Optimierung der Gesamtanlage wurde der Anpassung der Schlammschiene sowie der Gasverwertung besondere Bedeutung beigemessen. Dies ist auch durch die zu erneuernden BHKW zu begründen.

1.4 Einbindung in „ZEBRAS“

Als eine von fünf Beispielanlagen des Projektes „ZEBRAS“ sind die folgenden Besonderheiten der Kläranlage „Untere Selz“ anzuführen:

- 2 St. groß dimensionierte Vorklärbecken
- Ultraschalldesintegration
- Annahme von Fremdschlämmen und Co-Substraten
- 3 St. parallel betriebene Faulbehälter
- abgängiges BHKW → *Repowering*

Gemäß den Ausführungen von Knerr (2017) zeigte eine Potenzialanalyse, die im Rahmen des Vorhabens „ZEBRAS“ durchgeführt wurde, dass die o. g. Verfahrensschritte bzw. Themen ein hohes Potenzial zur Optimierung der Verfahrensführung aufweisen.

2 Zukunftskonzept für die Kläranlage „Untere Selz“

Es handelt sich – ausgenommen der Erneuerung der BHKW, die in Umsetzung befindlich ist – mit Stand zum Oktober 2017 um theoretische Ansätze, die in den folgenden Jahren sukzessive auf Umsetzung geprüft werden.

Es wird an geeigneten Stellen auf die im Rahmen des Projektes ZEBRAS entwickelten Prüfroutinen verwiesen.

2.1 Energieanalyse nach DWA-A 216

In einem ersten Schritt wurde für die Gesamtanlage sowohl ein Energiecheck als auch eine Energieanalyse gemäß DWA-A 216 (2015) durchgeführt. Die Erfassung wesentlicher Verbraucher und die Bestimmung deren Stromverbrauchs erfolgte durch die Rhein Hessische Energie- und Wasserversorgungs-GmbH. Neben einer Auswertung von Bestandsdaten wurde auch ein Messprogramm für Strom und Wärme absolviert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Energiechecks dargestellt.

Das DWA-A 216 (2015) empfiehlt die regelmäßige Durchführung eines Energiechecks anhand einfacher Kennwerte. Hierdurch wird dem Anlagenbetreiber ermöglicht, den Einfluss ergriffener Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Anlage nachzuvollziehen.

In einem ersten Schritt werden der Gesamtstromverbrauch und der Verbrauch für den Betrieb der Belüftung (biologische Stufe) bewertet.

Der Gesamtverbrauch der Anlage lag im Betriebsjahr 2015 bei rd. 3,2 Mio. kWh/a; hiervon wurden rd. 2,15 Mio. kWh eigenproduziert, der Rest fremdbezogen.

Tabelle 1: Ergebnisse des Energiechecks für Gesamtstromverbrauch und Belüftung

Bezeichnung Kennwert	Formel	Ergebnis [kWh/(EW x a)]
spez. Gesamtstromverbrauch e_{ges}	$e_{ges} = E_{ges}/EW_{CSB}$	39,7
spez. Stromverbrauch Belüftung e_{Bel}	$e_{Bel} = E_{Bel}/EW_{CSB}$	14,0

Mit Verweis auf Abb. 1 wird deutlich, dass rd. 70 % der Kläranlagen der Größenklassen 3, 4 und 5 einen geringeren spezifischen Strombedarf aufweisen als die Kläranlage Untere Selz.

Folglich ist ein hohes Optimierungspotenzial für die Kläranlage Untere Selz feststellbar.

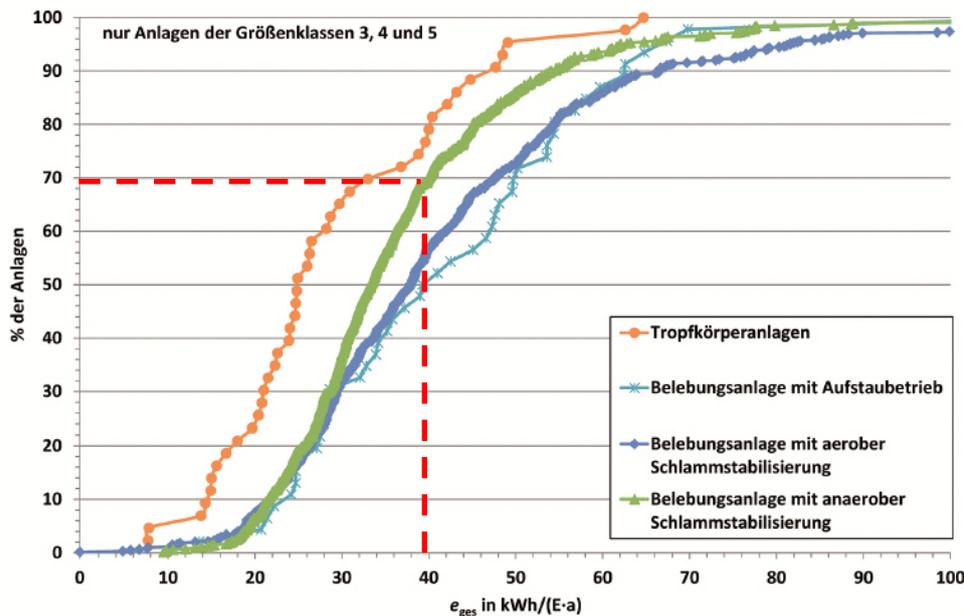


Abb. 1: Spezifischer Gesamtstromverbrauch in Abhängigkeit vom Reinigungsverfahren (Bildquelle: DWA-A 216, 2015)

Anhand des spezifischen Verbrauchswerts für die Belüftung des Belebungsbeckens wird ersichtlich, dass der Belüftung mit rd. 14 kWh/(EW × a) ein Anteil von rd. 35 % am Gesamtverbrauch zuzuordnen ist. Der spezifische Verbrauch vergleichbarer Kläranlagen liegt mit i. M. 16 kWh/(EW × a) etwas höher.

In der folgenden Tabelle sind die Kennwerte der Faulung bzw. der Faulgasерzeugung zusammengestellt.

Tabelle 2: Auszug der Ergebnisse des Energiechecks – Faulung

Bezeichnung Kennwert	Formel	Ergebnis
spez. Faulgasproduktion	$Y_{FG} = Q_{FG, d, aM} / B_{d, oTM, aM}$	555 l/(kg oTM)
Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität	$N_{FG} = (E_{KWK, el} \times 100) / (Q_{FG, a} \times g_{CH_4} \times 10)$	33,3 %
Eigenversorgungsgrad Elektrizität	$EV_{el} = E_{KWK, el} / E_{ges} \times 100$	63,2 %

Bei der Interpretation der Werte ist zu berücksichtigen, dass auf der Anlage Co-Substrate angenommen werden, die mit einem Anteil von rd. 40-50 % wesentlich zum Faulgasanfall beitragen³.

Im Betriebsjahr '16 wurden rd. 1.065.000 Nm³ Faulgas über das BHKW verstromt; rd. 90.000 Nm³/a wurden über die Gasfackel entsorgt.

Am Beispiel der spezifischen Faulgasproduktion wird der Einfluss der Co-Substrate deutlich. Mit 555 l/kg oTM liegt dieser Kennwert deutlich über dem Erwartungswert von rd. 440 l/(kg oTM) nach DWA-M 368.

Auch der Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität liegt in einer guten Größenordnung. Hierbei wurde der über Erdgas erzeugte Stromanteil in Abzug gebracht.

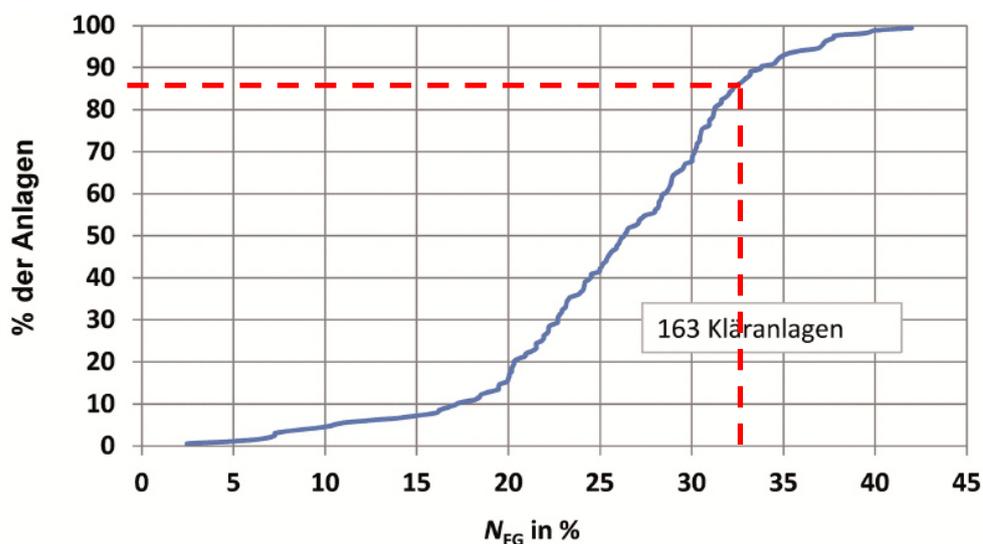


Abb. 2: Grad der Faulgasumwandlung in Elektrizität (Bildquelle: DWA-A 216, 2015)

Der Eigenversorgungsgrad mit elektrischer Energie liegt bei rd. 63 %. Lediglich rd. 20 % vergleichbarer Kläranlagen weisen einen höheren Eigenversorgungsgrad auf. Wie skizziert, ist die hohe Gasausbeute wesentlich auf die Mitbehandlung von Co-Substraten zurückzuführen.

³ BJ 2016: jährlich rd. 500.000 Nm³ Faulgas durch Co-Substrate

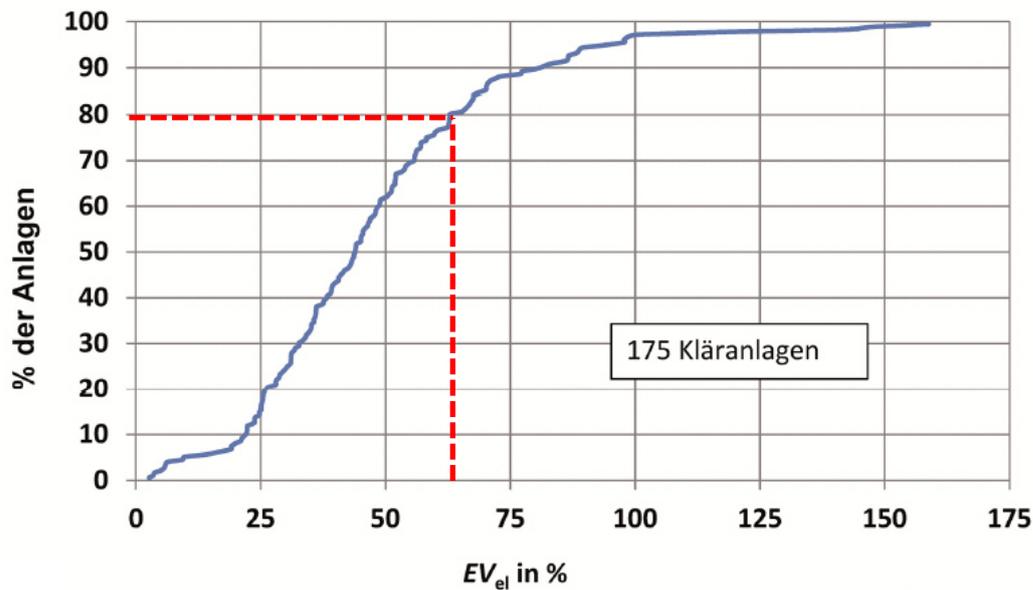


Abb. 3: Eigenversorgungsgrad mit elektrischer Energie (Bildquelle: DWA-A 216, 2015)

2.2 Energiecheck und Energieanalyse – Zwischenfazit

Hinsichtlich der Untersuchungen im Rahmen des Projektes „ZEBRAS“ zeigt sich an den Ergebnissen des Energiechecks für die KA Untere Selz vor allem der hohe Einfluss von Co-Substraten auf den Gasanfall. Wohlwissend, dass hier mittlerweile ein Markt geschaffen wurde bzw. Abnahmekonkurrenzen festzustellen sind, kann bei freiem Faulraumvolumen eine Annahme sinnvoll sein.

Auch die Annahme von Fremdschlämmen gewinnt aufgrund aktueller, die Klärschlammbehandlung und -verwertung betreffender rechtlicher Entwicklungen – mit novelliertem Abfall- und Düngerecht – an Bedeutung, da zum einen der Gasanfall erhöht und die zu entsorgende Klärschlammmenge reduziert werden kann.

2.3 Optimierungsansätze

2.3.1 Desintegration

Auf der Kläranlage Untere Selz wird seit dem Jahr 2002 eine Ultraschalldesintegration (Fa. Biogest) für den Aufschluss des Überschussschlammes eingesetzt. Das Betriebspersonal ist mit dem Einsatz des Aggregats zufrieden. Die Erfahrungswerte stützten sich auf Vergleiche des Gasanfalls vor und nach Umsetzung der Maßnahme. Mangels dem Teilvolumenstrom (mit/ohne Desintegration) konkret zuzuordnenden Messwerten ist eine Quantifizierung der Auswirkung der Verfahrensstufe jedoch nicht möglich.

2.3.2 Optimierung der Vorklärung

Hinsichtlich der Optimierung der Faulgasverwertung ist ein möglichst hoher Anfall an hoch kalorischen Primärschlamm wünschenswert. Dies hat wiederum – durch Beeinflussung des C:N-Verhältnisses – direkten Einfluss auf die biologische Behandlungsstufe.

Auf der KA Untere Selz existiert eine 2-straßige Vorklärung. Das Nutzvolumen der beiden Vorklärbecken beträgt jeweils 774 m³. Die resultierenden rechnerischen Aufenthaltszeiten bei Trocken- und Regenwetterzulauf sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Abwassermengen und Aufenthaltszeiten in der Vorklärung

2015	bei Regenwetterzulauf	bei Trockenwetterzulauf
Min	ca. 0,7 h	ca. 1,35
Mittel	ca. 1,75 h	ca. 2,0 h
85-Perzentil	ca. 2,2 h	ca. 2,35 h

Im ATV-DVKW-A 198 werden Durchflusszeiten in der Vorklärung bei Trockenwetter ($Q_{T,2h,max}$) zwischen 0,5 und 1,0 h bzw. zwischen 1,5 und 2,0 h angegeben. Die Aufstellung zeigt, dass die Aufenthaltszeiten in der Vorklärung der Kläranlage Untere Selz mit ca. 1,35 h bis 2,35 h sehr hoch sind. Selbst bei max. Mischwasserzufluss liegt die Aufenthaltszeit immer noch bei 0,7 h.

Die vergleichsweise hohe Aufenthaltszeit wirkt sich entsprechend auf den Schlammanfall aus:

Tabelle 4: Spezifischer Schlammanfall auf der KA Untere Selz und Referenz (M 368)

	KA Untere Selz	DWA-M 368 (2014)
PS	40 g TM/(EW x d)	28 g TM/(EW x d)
ÜSS	20 g TM/(EW x d)	32 g TM/(EW x d)

Im Vergleich zu den Erwartungswerten des DWA-M 368 (2014) bestätigt sich der hohe spezifische Primärschlammfall. Im Zulauf der biologischen Behandlungsstufe liegt demnach ein geringes C:N-Verhältnis vor, was ebenfalls durch die Filtratrückbelastung beeinflusst wird. Aus Gründen der Abwasserreinigung ist daher eine Stilllegung eines Vorklärbeckens angezeigt.

Bei der Prüfroutine „Abscheideleistung in der Vorklärung“ wird auf die Prüfung des C:N-Verhältnisses verwiesen. Dieser Fall dient als Beispiel dafür, dass trotz lobenswerter energetischer Sanierungsabsichten der Gewässerschutz, als wesentliches Ziel der Abwasserreinigung, stets an erster Stelle stehen muss.

2.3.3 Optimierung der Faulraumbewirtschaftung

Die Schlammfäulung wird auf der KA Untere Selz durch 3 Faulbehälter (4.000 m³, 2.000 m³, 1.000 m³), die parallel beschickt werden, realisiert.

Die Durchmischung der Faulbehälter erfolgt jeweils durch Kombination von einer außenliegenden Umwälzung und Gaseinpressung. Gemäß Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“ werden im DWA-M 368 (2015) Zielwerte einer Durchmischung von Faulräumen für verschiedene Aggregate genannt.

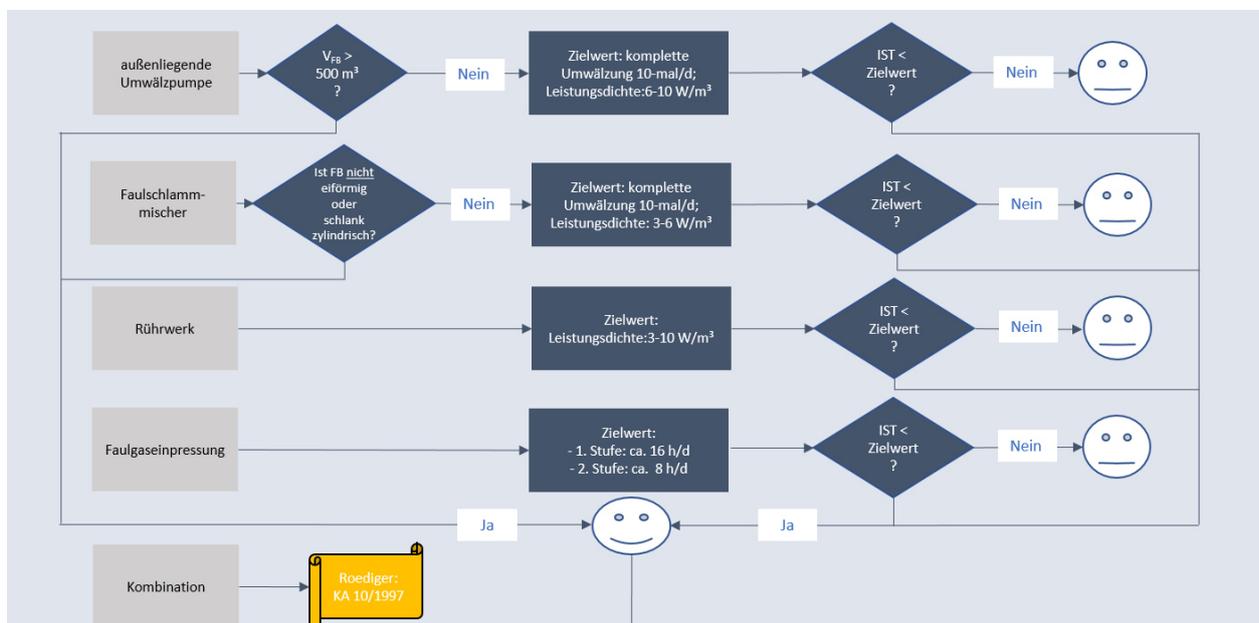


Abb. 4: Auszug aus Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“

Hinsichtlich einer Kombination zweier Verfahren wird auf Literatur (Roediger, 1997) verwiesen. Die Soll-Werte in Tabelle 5 beziehen sich auf diese Publikation. Auf der KA Untere Selz gestaltet sich die Situation wie in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Umwälzung und Gaseinpressung – IST- und Soll-Werte

	Umwälzung d ⁻¹		Gaseinpressung	
	IST	SOLL	IST	SOLL
Faulbehälter 1 (2.000 m ³)	ca. 1,5	4 bis 5	0,5-1 h/d	8 bis 12
Faulbehälter 2 (1.000 m ³)	ca. 3		0,5-1 h/d	
Faulbehälter 3 (4.000 m ³)	ca. 1		0,5-1 h/d	

Es zeigt sich, dass die Zielwerte deutlich vom Status Quo abweichen und hier folglich ein erhöhter Anpassungsbedarf festgestellt werden kann.

Gemäß Prüfroutine „Durchmischung Faulbehälter“ sollten entsprechend Anpassungsmaßnahmen auf Umsetzung geprüft werden, da hierdurch

- ein erhöhter Abbaugrad der Organik
- ein höhere Faulgasanfall
- und eine geringere, zu entsorgende Klärschlammmenge (nach der Entwässerung)

zu erwarten sind.

Die folgende Abbildung verdeutlicht weiteres Optimierungspotenzial.

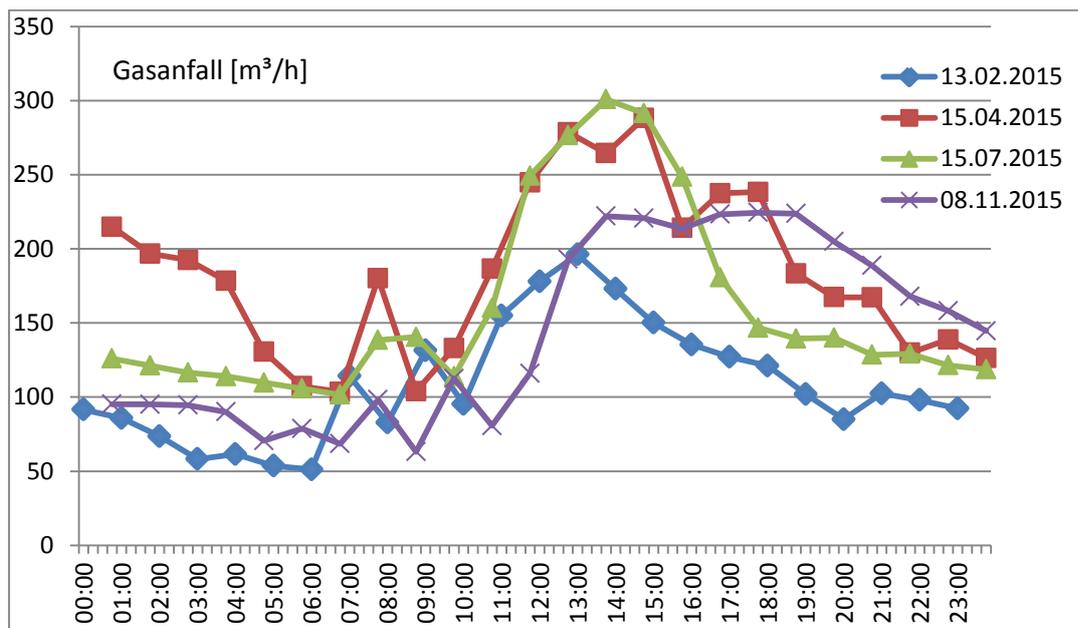


Abb. 5: Tagesgang des Faulgasanfalls für ausgewählte Tage

Dargestellt ist der Tagesgang des Faulgasanfalls. Bei Spitzen zur Mittagszeit mit rd. 300 m³/h liegt der Faulgasanfall in den Abend- und Nachstunden nur in einer Größenordnung von rd. 50-150 m³/h. Der Verlauf lässt darauf schließen, dass die Beschickung der Faulung nicht kontinuierlich, sondern stoßweise erfolgt. Der Gasanfall bzw. dessen Tagesgang ist wiederum für die Auslegung der BHKW und des Gasspeichers von Bedeutung (s. Kap. 2.3.4).

2.3.4 Erneuerung BHKW (Repowering) samt Peripherie

Das auf der KA Untere Selz anfallende Faulgas wurde bisher über 2 St. BHKW-Module mit einer elektrischen Leistung von jeweils 294 kW verstromt. Die Aggregate wurden im Jahr 1999 installiert. Aufgrund der bisherigen Nutzungsdauer von 18 Jahren sowie der Tatsache, dass mit den vorhandenen Aggregaten die zukünftig verschärften Anforderungen an die Abgasqualität hinsichtlich des Parameters Formaldehyd nicht eingehalten werden können, sind die Aggregate als erneuerungsbedürftig einzustufen. Da der Formaldehyd-Grenzwert ab 2018 eingehalten werden muss, sind die BHKW noch in 2017 zu erneuern (s. KWK-Anlage).

Das anfallende Faulgas sollte auch zukünftig einer wirtschaftlichen Verwertung mittels Gasverstromung über Blockheizkraftwerke zugeführt werden (KWK-Anlage). Neben dem Einsatz von Gasmotoren, wie bisher, besteht hierfür grundsätzlich auch die Möglichkeit des Einsatzes von Mikrogasturbinen. Der erzeugte Strom soll möglichst vollständig in das Netz der Kläranlage eingespeist und zur Reduzierung des Fremdstrombezugs selbst genutzt werden.

Nach Umsetzung der im Zukunftskonzept aufgezeigten energetischen Optimierungsmaßnahmen ist ein Stromgesamtbedarf von < 2,9 Mio. kWh/a realistisch.

Die anfallende Abwärme wird zur Beheizung der Faultürme genutzt. Überschüssige Abwärme kann zukünftig einem von der Rheinhessischen initiierten Nahwärmeverorgung zugeführt werden, bei dem zur Kläranlage benachbarte städtische Liegenschaften versorgt werden sollen (vgl. Einführung eines Wärmemanagements).

Hinsichtlich der Auslegung der neuen BHKW wird für das in der Faulung anfallende Klärgas aufgrund des mittleren Methangehalts von 65% ein spez. Energieinhalt von 6,5 kWh/Nm³ angenommen:

$$1.200.000 \text{ Nm}^3/\text{a} \times 6,5 \text{ kWh/Nm}^3 = \text{rd. } 8.000.000 \text{ kWh/a.}$$

Bei der Verstromung über einen Gasmotor wird von folgenden Wirkungsgraden (bei Vollastbetrieb) ausgegangen:

$$\eta_{\text{elektrisch}} = 37 \%$$

$$\eta_{\text{thermisch}} = 50 \%$$

Mit einer angenommenen Nutzungsdauer von 7.000 Betriebsstunden pro Jahr und einer Aufteilung der Gesamtleistung auf 2 Aggregate berechnet sich die erforderliche elektrische Leistung der BHKW zu

$$((8.000.000 : 2) \text{ kWh/a} : 7.000 \text{ Bh/a}) \times 0,37 = \text{rd. } 210 \text{ kW}$$

Zum Ausgleich nicht vermeidbarer Belastungsschwankungen werden 2 Aggregate mit einer elektrischen Leistung von jeweils 250 kW_{el} gewählt.

Eng mit der eigentlichen Faulgasverwertung ist die Faulgasspeicherung verknüpft.

Für den reibungslosen Betrieb und die weitestgehende energetische Nutzung des Faulgases sollte ein ausreichendes Gasspeichervolumen vorhanden sein. Gute Ergebnisse lassen sich dabei erfahrungsgemäß realisieren, wenn das Speichervolumen ca. 50 % des mittleren täglichen Gasanfalls beträgt. Im vorliegenden Fall wären das rd.

$$3.500 \text{ m}^3/\text{d} \times 0,5 = 1.700 \text{ m}^3$$

Auf der Kläranlage ist ein Niederdruckgasspeicher vom Fabrikat Eisenbau Heilbronn mit einem Volumen von 800 m³ vorhanden. Das entspricht demnach nur rd. 50% des empfohlenen Volumens.

3 Fazit

Am Beispiel der Kläranlage Untere Selz wurde die Anwendung der im Rahmen des Vorhabens „ZEBRAS“ entwickelten Prüfroutinen beispielhaft vorgestellt. Es zeigten sich Potenziale und Grenzen in der Nutzung der Routinen, die in Ergänzung bestehender Instrumente (z. B. DWA-A 216; 2015) Anwendung finden sollten.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Ergebnisse des Vorhabens eine gute Grundlage für die Umsetzung einer zukunftsfähigen Schlammbehandlung und Faulgasverwertung darstellen.

Literatur

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2014): Merkblatt DWA-M 368 Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. ISBN 978-3-944328-60-7, Hennef.

DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2015): Arbeitsblatt DWA-A 216 Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. ISBN 978-3-88721-276-6, Hennef.

Knerr, H.; Dilly, T.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: Schriftenreihe Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft Band 40, TU Kaiserslautern.

Roediger, M. (1997): Bemessungsvorschlag für Schlammfaulungsanlagen (KA 10/1997), Alzen.

Korrespondenz an:

Dr.-Ing. Thomas Siekmann
Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH
Segbachstraße 9, 56743 Thür
Tel.: 02652 – 93 98 22
Fax: 02652 – 93 98 10
E-Mail: t.siekmann@siekmann-ingenieure.de

Faulung optimieren! Flexibilität wagen!

Wie geht es weiter?

Heidrun Steinmetz; Oliver Gretzschel; Michael Schäfer

WIR - Wasser, Infrastruktur und Ressourcen

FG Ressourceneffiziente Abwasserreinigung und FG Siedlungswasserwirtschaft,
TU Kaiserslautern

Kurzfassung: Der Beitrag zeigt auf, dass bereits kurz- bis mittelfristig erhebliche Potenziale zur Steigerung der Klärgasproduktion und zur Verstromung von Klärgas vorliegen. Diese Potenziale gilt es zu heben und nicht nur zur Eigenstromversorgung zu nutzen, sondern bereits heute und verstärkt in Zukunft benötigte Dienstleistungen zur Verfügung zu stellen. Es zeigt sich, dass mittel- bis langfristig über die energetischen Betrachtungen hinaus, die Systeme der Abwasserentsorgung weiter entwickelt werden sollten, um zusätzliche energetische und stoffliche Potenziale zu erschließen. Bereits heute können Kläranlagen ihre flexibel nutzbaren Erzeugungsanlagen in die Energienetze einbinden. Zukunftsweisende Konzepte, die die Power-to-gas Technologie auf Kläranlagen integrieren und dort sinnvolle Synergien schaffen sind ein möglicher Baustein für eine ressourceneffiziente Langzeitspeicherung von regenerativem Strom mit Hilfe von Kläranlagen.

Key-Words: Anaerobe Klärschlammbehandlung, Energiepotenziale, Eigenenergie, Faulung, Flexibilität, Power-to-gas, Smart-grid, Sektorenkopplung

1 Faulung optimieren!

Zahlreiche Studien belegen, dass Kläranlagen sowohl auf der Strombedarfsseite als auch bei der Bereitstellung von Eigenenergie erhebliches Verbesserungspotenzial besitzen (z. B. DWA 2015, UM BW 2015). Dabei kann die Energieeffizienz zum einen durch verfahrens- und anlagentechnische Optimierungen gesteigert werden, zum anderen durch die Erhöhung der Eigenenergienutzung im Bereich der Faulung und Verstromung. Abbildung 1 gibt einen Überblick über Möglichkeiten zur Verbesserung der Eigenenergienutzung bzw. Stromerzeugung.

Auf Kläranlagen mit vorhandener anaerober Schlammbehandlung lassen sich sowohl die Schlammengen, die der Faulung zugeführt werden, durch verbesserte Sedimentation in der Vorklärung, ggf. unter Zugabe von Fällungs- und Flockungshilfsmitteln, erhöhen, als auch die anaerobe Abbaubarkeit von Schlamm, z. B. durch Senkung des Schlammalters, verbessern. In beiden Fällen ist zu beachten, dass die Stickstoffelimination (C:N-Verhältnis für die Denitrifikation, erforderliches Schlammalter für die Nitrifikation) nicht beeinträchtigt wird. Daher sind der erhöhten Entnahme von Primärschlamm Grenzen gesetzt. Will man möglichst viel des organischen Kohlenstoffs für die anaeroben Abbauvorgänge und damit zur Stromerzeugung nutzen, so bedarf es der Entwicklung neuer Verfahren zur Stickstoffelimination (z. B. partielle Nitrifikation und anaerobe Ammoniumoxidation im Hauptstrom der Kläranlage) oder zur Rückgewinnung von Stickstoff sowie deren großtechnischer Erprobung und Umsetzung.

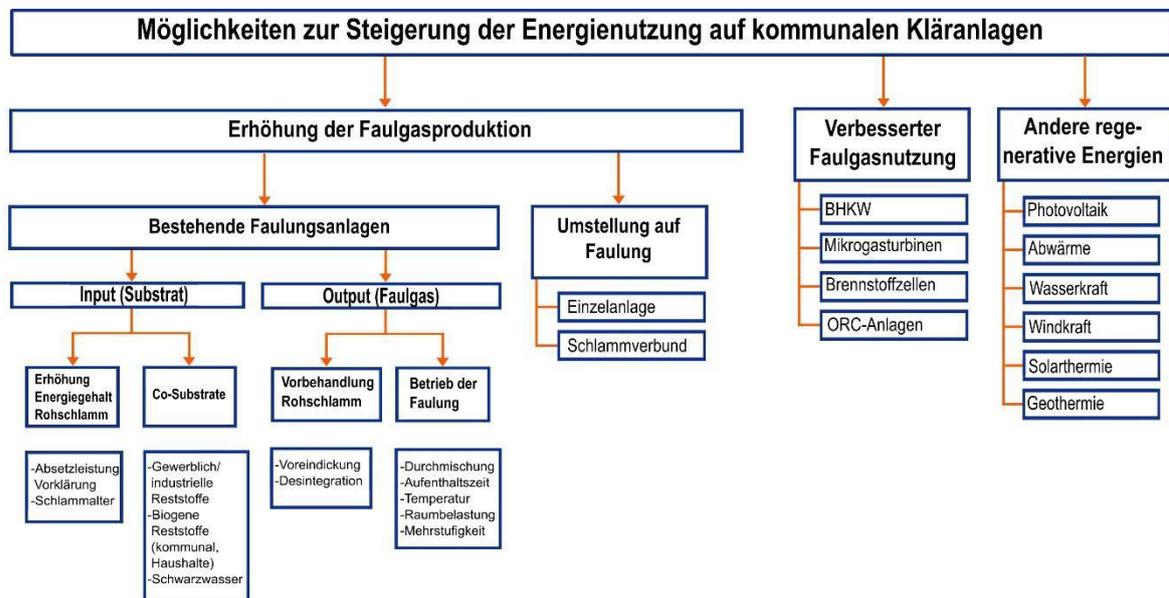


Abbildung 1: Maßnahmen zur Erhöhung der Stromerzeugung auf kommunalen Kläranlagen (modifiziert nach UM BW, 2015)

Vorhandene Kapazitäten im Faulturm können außer durch die Erhöhung der mitbehandelten Primärschlammmenge auch durch externe Substrate genutzt werden. Zahlreiche Studien belegen sowohl für einzelne Bundesländer (z. B. UM BW 2015, Knerr et al. 2017) als auch für Deutschland (Statistisches Bundesamt 2015), dass bestehende Faultürme oft erhebliche Volumenreserven und lange Faulzeiten, die deutlich über die Bemessungsdauer von 20 Tagen hinausgehen, aufweisen. Durch eine weitere Eindickung könnten zusätzliche Mitbehandlungskapazitäten geschaffen werden, die zukünftig besser ausgeschöpft werden sollten.

Gemeinsam mit dem Klärschlamm kann prinzipiell eine Vielzahl an Substraten anaerob behandelt werden, die einen hohen Gehalt an biologisch abbaubaren organischen Substanzen aufweisen. Dies trifft für zahlreiche industrielle und gewerbliche Abfälle,

aber auch für getrennt gesammelte biogene Abfälle aus dem kommunalen und privaten Bereich zu. Von Vorteil sind Co-Substrate, die regelmäßig und in möglichst gleichbleibender Qualität anfallen, pumpfähig sind und schadstoffarm. Vor allem Fette (z. B. Fettabscheiderinhalte aus der Gastronomie) erzeugen hohe spezifische Gasmengen mit hohem Methangehalt, können bei zu hohem Anteil aber auch zur Überlastung des Faulturms führen. Die Verfügbarkeit von geeigneten Co-Substraten ist regional sehr unterschiedlich und bedarf einer auf die Kläranlage zugeschnittenen Betrachtung.

Aber nicht nur Fremdsubstrate, sondern auch Klärschlamm von anderen Anlagen ohne getrennt anaerobe Schlammstabilisierung könnte zur Mitbehandlung in bestehenden Faultürmen genutzt werden. So hat z. B. das Projekt Zebras (Knerr et al. 2017) aufgezeigt, dass in Rheinland-Pfalz (RLP) ein hohes Gesamtpotenzial für die Mitbehandlung nicht stabilisierten Überschussschlammes in bestehenden Faulbehältern besteht, so dass theoretisch ca. 9 Mio. m³/a Klärgas und daraus resultierend ca. 20 GWh_{el}/a Strom produziert werden könnten. Diesen theoretischen Berechnungen steht entgegen, dass der Überschussschlamm teilweise zu weit transportiert werden müsste, um wirtschaftlich vertretbar mitbehandelt zu werden. Daher kann nur knapp 40% des zur Verfügung stehenden freien Faulraumvolumens durch die Zugabe von Rohschlämmen/Überschussschlämmen von umliegenden Stabilisierungsanlagen ausgenutzt werden (Knerr et al. 2017). Wohl könnte aber lokal nach geeigneten Co-Fermenten aus dem kommunalen und gewerblich/industriellen Bereich gesucht werden.

Bei der Bewertung von Klärschlammverbundkonzepten sollten neben der Erhöhung der Gasausbeute auch weitere Aspekte berücksichtigt werden. So bieten die größeren Mengen an zu behandelndem Klärschlamm nicht nur Vorteile bei der Biogasproduktion, sondern auch bei der Klärschlammmentsorgung und zukünftig vor allem beim Phosphorrecycling, was in größeren Mengen wirtschaftlicher betrieben werden kann. Dies erweitert die Perspektive von Klärschlamm als Energieträger zum Klärschlamm als Wertstoff.

Im Einzelfall ist auch zu ermitteln, inwieweit die Umstellung einer Kläranlage von einer simultan aerob stabilisierenden Anlage auf eine getrennt anaerobe Behandlungsanlage sinnvoll ist. Ähnlich wie bei der Nutzung von Co-Substraten ist dabei die erhöhte Rückbelastung insbesondere mit Stickstoff und deren Auswirkungen auf die Reinigungsleistung zu prüfen.

Neben zahlreichen Maßnahmen zur Steigerung des Gasertrages hat in der Gesamtbetrachtung auch die Verbesserung der Faulgasnutzung große Bedeutung für die Steigerung der Energieeffizienz von Kläranlagen. Auch hier haben Untersuchungen aus Rheinland-Pfalz (Knerr et al. 2017) und Baden-Württemberg (BW) (UM BW 2015) verdeutlicht, dass z. B. bei Ersatz alter BHKWs mit modernen Anlagen, die einen deutlich besseren Wirkungsgrad aufweisen, erhebliche Potenziale zur Stromproduk-

tion genutzt werden können. Abschätzungen für RLP ergaben ein Potenzial von über 6 GWh_{el}/a, wenn KWK Anlagen mit einem Wirkungsgrad unter 35% gegen Anlagen mit 35% Wirkungsgrad ausgetauscht würden (Knerr et al. 2017). Ähnliche Berechnungen zeigen für BW, dass dort knapp 13 GWh_{el}/a an zusätzlichem Strom durch Erneuerung der KWK-Anlagen auf Kläranlagen erzeugt werden könnten (UM BW 2015).

Die Nachrüstung von Kläranlagen, die bislang nicht über KWK-Anlagen verfügen, bietet ein zusätzliches Stromerzeugungspotenzial. Nach Knerr et al. (2017) könnten in RLP durch Nachrüstung von fünf Anlagen ca. 1,4 GWh_{el}/a zusätzlich produziert werden, eine Studie der Universität Stuttgart mit Partnern zeigt für BW ein Potenzial von ca. 5 GWh_{el} auf (UM BW 2015). In einer deutschlandweiten Betrachtung wurde in (Schäfer et al., 2015) ein zukünftiges Stromerzeugungspotenzial von 2,11 – 2,61 TWh_{el}/a (ohne Berücksichtigung von Co-Substraten) durch kommunale Kläranlagen abgeleitet. Zu beachten ist hierbei, dass die zur Wärmeerzeugung genutzte Gasmenge dadurch reduziert, aber das z. B. im Sommer abgefackelte Gas energetisch genutzt wird.

Weit über den Ansatz der energetischen Optimierung hinaus, gehen Neuartige Sanitärsysteme, deren Prinzip auf der Stoffstromtrennung bereits auf Haushaltsebene beruht und deren Zielsetzung die weitgehende stoffliche und energetische Nutzung der Abwasserinhaltsstoffe ist. In bestehenden Infrastrukturen, wie sie in Deutschland vorhanden sind, kann ein solcher Systemwechsel nur schrittweise vollzogen werden. Um im Transitionsprozess flexibel auf unterschiedliche Gegebenheiten der bestehenden Infrastrukturen reagieren zu können, kann die Mitbehandlung von Schwarzwasser im Faulturm ein sinnvolles Szenario darstellen. Im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes Twist++ wurden verschiedene Ansätze zur energetischen und stofflichen Nutzung der Schwarzwasserinhaltsstoffe im labor- und halbtechnischen Maßstab untersucht. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine sukzessive Steigerung des Anteils von im Faulturm mitbehandeltem Schwarzwasser bei stabilem Betrieb und Methananteil sowie gleichbleibender CSB- Elimination zu einer erhöhten spezifischen Methanausbeute führt (Hillenbrand et al. 2016). Mittel- bis langfristig ermöglicht die Mitbehandlung von Schwarzwasser in Faultürmen nicht nur die Steigerung der energetischen Nutzung der Abwasserinhaltsstoffe und die Reduzierung des Energieeinsatzes für die Abwasserreinigung, sondern erleichtert auch die Implementierung von Verfahren zur Nährstoffrückgewinnung auf Kläranlagen (siehe hierzu Hillenbrand et al. 2016).

Durch die Betrachtung der gesamten Abwasserentsorgungstrecke und nicht nur des Teilprozesses der Faulung könnten zukünftig die im Abwasser enthaltene chemisch gebundene Energie zum einen weitgehend genutzt, zum anderen der Strombedarf, der zum Großteil durch die Nitrifikation verursacht wird, deutlich reduziert werden. Hierzu bedarf es des Zusammenspiels von der Erfassung von Teilströmen, deren

Ableitung bis hin zur Abwasserreinigung und Schlammbehandlung. Die ermöglicht eine Entwicklung unserer Kläranlagen hin zu Ressourcenzentren.

Die mittels der vielfältigen aufgezeigten Optionen verbesserte Faulung kann dabei auch einen wesentlicher Beitrag zur Steigerung des Faulgasertrages leisten und somit auch zur Erhöhung der Flexibilitätspotenziale (vgl. Schäfer et al., 2017a) beitragen. Der Prozess der Faulung auf Kläranlagen ist ein wichtiger Baustein zur Erzeugung regenerativer Speichergase unter effizienter Ausnutzung vorhandener Ressourcen und somit ein wichtiger Beitrag für eine regenerative Energieversorgung.

Die genannten Beispiele verdeutlichen, dass bereits kurz- bis mittelfristig erhebliche Potenziale zu Steigerung der Biogas- bzw. Methanproduktion und zur Verstromung des Biogases genutzt werden könnten, um die Eigenstromversorgung von Kläranlagen zu verbessern. Es zeigt sich aber auch, dass mittel- bis langfristig über die energetischen Betrachtungen hinaus, die Systeme der Abwasserentsorgung weiter entwickelt werden sollten, um zusätzliche energetische und stoffliche Potenziale zu erschließen. Des Weiteren sind die ökonomischen Randbedingungen, bedingt durch sich schnell ändernde gesetzliche Regelungen, zu prüfen. Nur die ganzheitliche Systembetrachtung sichert zum einen die Einhaltung der Ablaufanforderungen und um zum anderen die energetische und stoffliche Nutzung der im Abwasser enthaltenen Ressourcen.

2 Flexibilität wagen!

2.1 Möglichkeiten im Bestand nutzen – Akzeptanz steigern

Kläranlagen bieten nicht nur die in Kap. 1 aufgezeigten Möglichkeiten zur Verbesserung der eigenen Energiebilanz, sondern lassen sich in den Betrieb von Energienetzen einbinden, indem Stromspitzen und -defizite (Bedarf und Verfügbarkeit) im Sinne von smart-grids teilweise ausgeglichen werden können. Dazu bedarf es der Flexibilisierung des Kläranlagenbetriebes und einer Anpassung an die Erfordernisse des Energienetzes (siehe dazu: (Schäfer et al., 2017b)). Mögliche Maßnahmen müssen sich dabei selbstverständlich daran orientieren, dass die Überwachungsanforderungen stets eingehalten werden.

Im vom BMBF geförderten Projekt *arrivee* konnte durch konzeptionelle Überlegungen, Berechnungen, Simulationsstudien und Versuche aufgezeigt werden, dass durch Nutzung von Speichermöglichkeiten auf Kläranlagen und Implementierung neuer Regelkonzepte Schwankungen in der erzeugten Strommenge aufgefangen werden könnten, so dass ein Abregeln der volatilen regenerativen Stromerzeuger vermieden oder zumindest erheblich verringert werden kann (Schmitt et al., 2017; Schäfer et al., 2017a; Kornrumpf und Zdrallek, 2017).

Um die aufgezeigten theoretischen Möglichkeiten zur Einbindung von Kläranlagen in den Betrieb von Energienetzen zu nutzen ist neben einer Bewusstseins-schärfung

und Werbung für diesen Ansatz vor allem die Akzeptanzsteigerung erforderlich, was durch die Umsetzung von Beispielprojekten befördert wird.

Erste Schritte sind bereits erfolgt: So haben in Deutschland einige Betreiber auf Kläranlagen (z. B. WVE auf der Kläranlage Kaiserslautern (Preiß, 2015) und die Gelsenwasser AG auf den Kläranlagen der Stadtentwässerung Dresden und der hanseWasser Bremen (Richter, 2017) die Flexibilisierung ihrer Stromerzeuger umgesetzt bzw. arbeiten daran. Emschergenossenschaft und Gelsenwasser AG haben sich zusammengetan um mit dem Produkt „Regelenergie“ die eigene Bilanz von Energieeinkauf, Eigenerzeugung und -verbrauch zu optimieren“ (Gelsenwasser, 2017) .

Die Kommunen und Verbände sind hier im Sinne der Energiewende und ihrer Vorbildfunktion beim Klimaschutz (Stichwort: kommunale Klimaschutzkonzepte) gefordert, das heute bereits unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten umsetzbare zu realisieren. Dazu gehört zweifelsohne der flexible Betrieb von BHKW. Darüber hinaus bedarf es im nächsten Schritt der Einbindung der Faultürme und weiterer Aggregate in ein Energiemanagement.

Um diese Aktivitäten zu unterstützen und anzureizen ist es wichtig die relevanten Akteure zusammenzubringen und mit positiven Praxisbeispielen die Umsetzbarkeit aufzuzeigen, um den Transfer von der Wissenschaft in die Praxis zu gewährleisten.

2.2 Fit für die Zukunft

Ausbau und Optimierung der Faulung sind durch die Erhöhung der Methanmenge wesentliche Grundlagen für die Bereitstellung von regenerativen Speichergasen (siehe hierzu Kap. 1). Darüber hinaus kann auch das CO₂ aus dem Biogas als Ausgangsprodukt für eine Methanisierung genutzt werden, wenn z.B. die Verwertung von EE-Überschüssen mittels Elektrolyse mit der biologischen Methanisierung gekoppelt wird.

Die Elektrolyse könnte in einer (noch bundesweit zu erstellenden) Speicherstrategie einen wichtigen Baustein darstellen, wenn es gelingt, sowohl den produzierten Wasserstoff (als Energiespeicher) als auch den anfallenden Sauerstoff sinnvoll zu nutzen. Kläranlagen mit Faulung sind als Standorte hierfür prädestiniert, da meist Anschlussmöglichkeiten ans öffentliche Gasnetz bestehen (großer verfügbarer Energiespeicher), verfahrenstechnisches Know-How beim Betriebspersonal vorhanden ist und die „Nebenprodukte“ der Elektrolyse in Form von Sauerstoff und Abwärme sinnvoll genutzt werden könnten.

Die Nutzung des Sauerstoffs bekommt durch die Diskussion um die Mikroschadstoffentfernung auf Kläranlagen eine neue Verwertungsoption. So können zukunftsweisende Ansätze zur neuartigen Kopplung innovativer Verfahrenskonzepte zur Energiespeicherung und -verwertung mit Prozessen zur Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen gezielt verfolgt werden. Dies könnte zu einer Lösung

des Konflikte führen, dass zum einen die Energieeffizienz auf Kläranlagen bis hin zur energieneutralen Kläranlage verbessert werden soll, zum anderen für die Spurenstoffelimination der Energiebedarf auf Kläranlagen, und, für die Bereitstellung der hierzu erforderlichen Ressourcen auch außerhalb der Kläranlagen, steigen wird. Bei der Behandlung des Abwassers mit Ozon wird dieser aus Reinsauerstoff oder seltener aus Luftsauerstoff unter Einsatz von elektrischer Energie erzeugt. Dabei stellt bereits die Erzeugung von Reinsauerstoff einen energieintensiven Prozess dar, auch wenn dieser außerhalb der Kläranlage stattfindet (638 kWh/t Flüssigsauerstoff (EIGA, 2010)). Wird stattdessen Sauerstoff zur Ozongeneration genutzt, welcher über den Wasserelektrolyseprozess unter Einsatz regenerativer Energie (systemdienliche Last) erzeugt wird und im Regelfall ungenutzt bleibt so verbessert sich die Energiebilanz erheblich.

Obwohl es bereits großtechnisch betriebene Ozonungsanlagen zur Spurenstoffelimination auf Kläranlagen gibt (Bsp. KA Neugut und Oberweymethal in der Schweiz, Bad Sassendorf in NRW) sowie Pilotprojekte zur biologischen Methanisierung außerhalb von Kläranlagen (beispielsweise Energiepark Pirmasens-Winzeln, RLP), so sind wichtige Aspekte, die bei der Kopplung der Prozesse mit einer Elektrolyse und bei der erforderlichen Sektorenkopplung zu beachten sind, noch nicht erprobt.

In einem geplanten Verbundforschungsprojekt (Partner: WiW mbH, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Kaufmann Umwelttechnik GmbH, KUMATEC, Technische Universität Kaiserslautern) soll die technische Machbarkeit der Verfahrenskette aus Elektrolyse-Sauerstoffspeicher-Ozongenerator-Mikroschadstoffelimination mittels Ozonung-Nachreinigung-Biofilter (vgl. Abbildung 2) erprobt werden. Die Abstimmung der Teilkomponenten aufeinander und insbesondere die diskontinuierliche Produktion von O_2 bei kontinuierlichem Bedarf an O_3 sind dabei wichtige neue Forschungsaspekte.

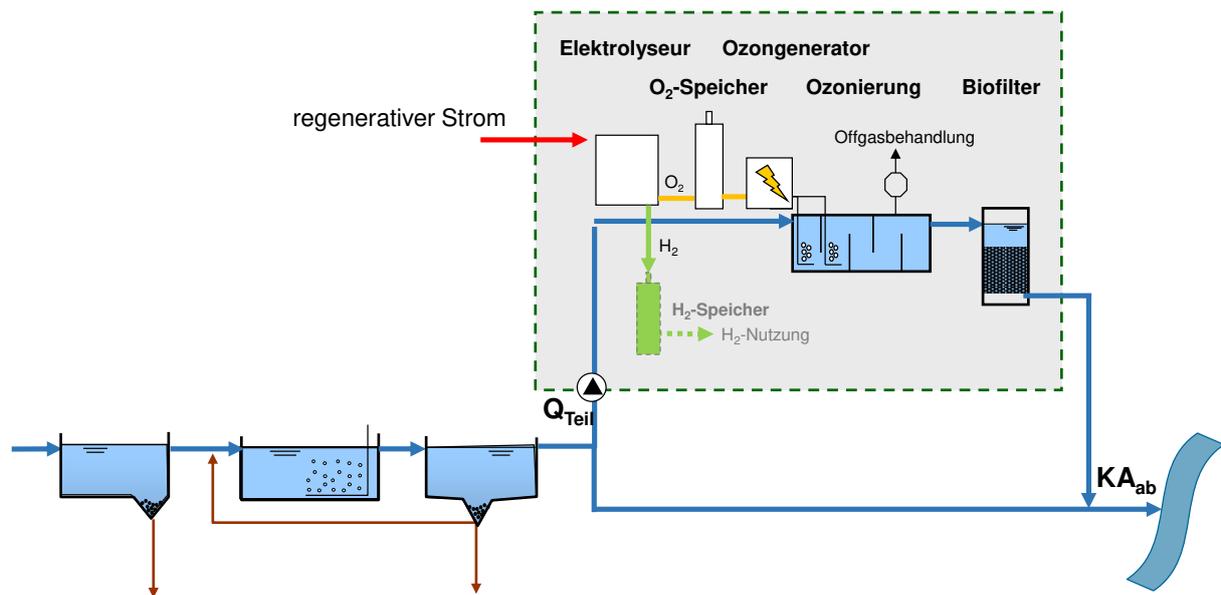


Abbildung 2: Geplante Verfahrenskette Sauerstoff-Elektrolyse, Ozonerzeugung und Mikroschadstoffelimination (Kolisch et al., unveröffentlicht)

Neben der Erprobung von verfahrenstechnischen Teilkomponenten bedarf es standortbezogener Überlegungen und Voruntersuchungen zu den Randbedingungen für eine Implementierung solch innovativer Konzepte.

Hierzu muss neben den typischen Fragen einer Kläranlagenerweiterung (Menge und Zusammensetzung des (gereinigten) Abwassers, Platzbedarf und Verfügbarkeit, Schnittstellen zu den bestehenden Verfahrensstufen etc.) auch das energetische Umfeld näher analysiert werden. Dazu gehört die Ermittlung bzw. Prognose zur Verfügbarkeit von Stromüberschüssen aus fluktuierenden EE-Anlagen ebenso, wie die Eruierung von Möglichkeiten der Wasserstoffnutzung vor Ort. Abbildung 3 verdeutlicht, dass hierzu zahlreiche Optionen bestehen, von denen lediglich die Mitverwertung im BHKW durch Beimischung zum Faulgasstrom und ggf. die Nutzung in eigenen Fahrzeugen oder einer Brennstoffzelle von Kläranlagenbetreibern alleine bewerkstelligt werden können. Andere Optionen, sei es eine Einspeisung ins Gasnetz oder die industrielle Nutzung bedürfen ebenso wie die Berücksichtigung der Stromversorgung einer sektorenübergreifenden Planung und Absprache und somit der Einbeziehung weiterer Akteure.

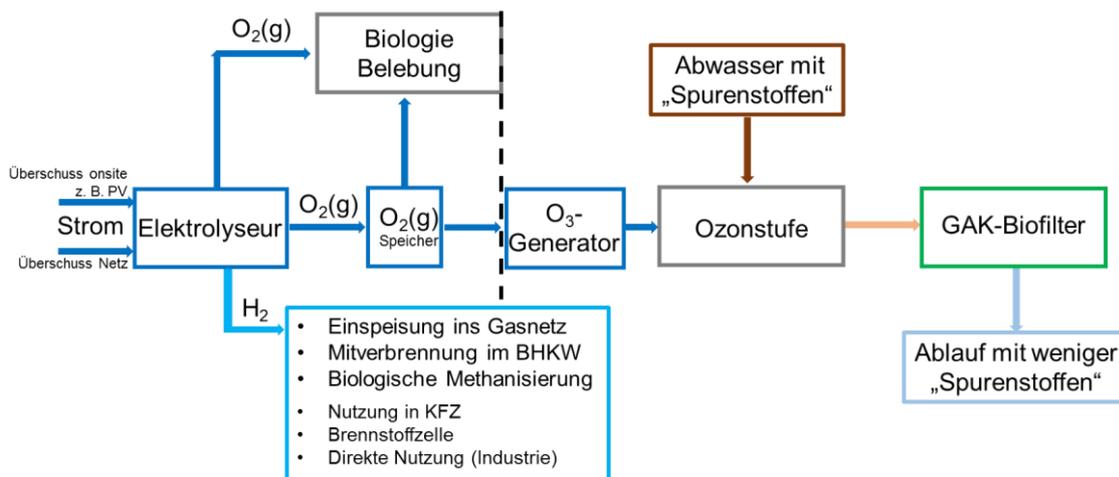


Abbildung 3: Verwertungsmöglichkeiten von aus Überschussstrom gewonnenen Wasserstoff und Sauerstoff

Auch für die Verwertung des während der Elektrolyse produzierten Sauerstoffs gibt es mehrere Optionen (siehe Abbildung 3), die bezogen auf die jeweiligen örtlichen Randbedingungen einer Kosten- und Nutzenanalyse bedürfen. Die Umsetzung der gesamten Verfahrenskette erfordert die Diskussion zwischen zahlreichen Akteuren, da neben den technischen Fragestellungen auch Zuständigkeiten geklärt und Betriebskonzepte entwickelt werden müssen.

2.3 Handlungsempfehlungen für Kläranlagenbetreiber

Aus den im Projekt *arrivee* durchgeführten Untersuchungen ergeben sich wichtige Handlungsempfehlungen für Kläranlagenbetreiber und Fachverbände. Weitere Handlungsempfehlungen können dem Schlussbericht *arrivee* (Schmitt et al., 2017) entnommen werden.

2.3.1 Flexibilitätspotenzial im Status Quo

„Die schon heute vorhandene technische Ausstattung auf Kläranlagen bietet mit den Aggregaten BHKW, Gebläsen, Rücklaufschlamm-pumpen, Rezirkulationspumpen, Rührwerken etc. ein relevantes Flexibilitätspotenzial, welches über ein intelligentes Aggregatemanagement mit geringen Investitionen erschlossen werden kann. Praxiserfahrungen können und sollten die Kläranlagenbetreiber z. B. in einem ersten Schritt über die Einbindung der KWK-Anlagen in den Regelenenergiemarkt (mit Hilfe eines Virtuellen Kraftwerks) sammeln und in einem zweiten Schritt über die Integration weiterer nutzbarer Aggregate ausbauen. Die Durchführung entsprechender Machbarkeitsstudien ist hierbei hilfreich und liefert erfahrungsgemäß zusätzlich Ansatzpunkte für eine Verbesserung der Energieeffizienz im Reinigungsbetrieb.“ (Schmitt et al., 2017)

2.3.2 Absehbare Entwicklungen nutzen

„Die ermittelten Flexibilitätspotenziale auf Kläranlagen sollten genutzt werden. Neben den externen Vermarktungsoptionen sprechen Energieeffizienzgründe sowie die Möglichkeit eines verbesserten internen Spitzenlastmanagements für ein solches Vorgehen. Das Heben der Potenziale bereitet auf eine absehbare Entwicklung, wie z. B. die Einführung von dynamischen Stromtarifen für industrielle und gewerbliche Verbraucher, sowie den steigenden Flexibilitätsbedarf im Energieversorgungssystem vor. Die daraus resultierenden Vorteile könnten dann frühzeitig genutzt werden.“ (Schmitt et al., 2017)

2.3.3 Flexible Einsatzmöglichkeiten bei Reinvestitionen beachten

„Bei anstehenden Reinvestitionen oder einer Neuplanung von BHKW und Gasspeichern auf Kläranlagen sowie anderweitig für Flexibilitätsoptionen relevante Komponenten sollten flexibilisierte Einsatzmöglichkeiten berücksichtigt werden. Daraus können sowohl größere Gasspeicher als auch leistungsstärkere BHKW für einen ergänzenden Einsatzbereich als sinnvolle Maßnahmen resultieren, wenn die Abwägung zwischen möglichen Erlösen und Mehrkosten dies rechtfertigt.“ (Schmitt et al., 2017)

2.3.4 Adäquate Messinfrastruktur für Strom und Gas berücksichtigen

„Bei Sanierungs- oder Umbauprojekten der Kläranlagen sollte stets eine geeignete Messinfrastruktur (z. B. in Anlehnung an DWA A 216) aufgebaut werden. Dadurch kann ein genaues Lastgangprofil für jeden Verbraucher erstellt und so ein mögliches Flexibilitätspotenzial aufgedeckt werden. Diese Messtechnik erleichtert ebenfalls die Steuerung der Aggregate durch das Virtuelle Kraftwerk, wenn sie für die Flexibilitätsdienstleistung angeboten werden. Sie kann zudem für eine Erhöhung der Energieeffizienz im Reinigungsbetrieb genutzt werden.“ (Schmitt et al., 2017)

2.3.5 Einsatz innovativer Anlagenkonzepte mit Elektrolyse

„Mit der Nutzung der Power-to-Gas-Technologie (PtG) kann auf Kläranlagen Strom aus Erneuerbaren Energien (EE) in speicherbare, regenerative Energieträger umgewandelt (Wasserstoff/Methan) werden. Mit dieser Verfahrenstechnik ausgestattete Kläranlagen könnten sowohl als Kurzzeit- als auch als Langzeitspeicher für EE-Strom agieren. Die Umsetzung der untersuchten Konzepte ist technisch möglich, aber derzeit nicht wirtschaftlich.“ Zur Verringerung der Investitionskosten der PtG-Technologien könnten beispielsweise bundespolitische Markteinführungsprogramme beitragen. Auch der Erlass bestimmter Strompreisbestandteile (z. B. dynamische Netznutzungsentgelte, EEG-Umlage oder Stromsteuer) bei Aufnahme von Überschussstrom könnte einen wirtschaftlichen Betrieb ermöglichen. (Schmitt et al., 2017)

2.3.6 Handlungsempfehlungen für die Fachverbände

Um innovative und neue Technologien umzusetzen, bedarf es einer Verbreitung des Wissens in Fachkreisen. Im Bereich des Kläranlagenbetriebes ist die DWA mit ihren Arbeitsgruppen und Regelwerken der geeignete Fachverband. Für weitergehende Konzepte ist eine Vernetzung der Energie- und Wasserwirtschaftsverbände erforderlich.

„Das Thema Flexibilität auf Kläranlagen sollte durch die Fachverbände sowohl im Bereich der Abwasserwirtschaft (DWA, BWK) als auch seitens der Energie- und Wasserfachverbände (z. B. BDEW) verstärkt öffentlichkeitswirksam, z. B. auf Fachtagungen“, in Seminaren und im Rahmen der Nachbarschaftsarbeit vermittelt werden. Ergänzend könnten in bestehenden oder neuen Facharbeitsgruppen das bisherige Wissen und die Erfahrungen zur Flexibilität auf Kläranlagen zusammengetragen und in Form von Arbeitsberichten bis hin zu Regelwerken veröffentlicht wird. Erforderliche Ergänzungen z. B. zur Energieanalysen nach DWA A 216 könnten im entsprechenden Merkblatt Eingang finden. „Das wäre ein wesentlicher Beitrag zur Hebung dieser Potenziale und würde auch dazu beitragen, den flexiblen Betrieb einer Kläranlage verstärkt in die Fachwelt zu tragen, Hemmschwellen abzubauen und mittelfristig als Stand der Technik zu implementieren.“ (Schmitt et al., 2017)

3 Neue Herausforderungen – neue Chance

Kurzfristig werden Kläranlagenbetreiber energetische Potenziale durch Maßnahmen auf einzelnen Kläranlagen besser nutzen können. Dazu gehören neben Maßnahmen zur Installation energieeffizienterer Anlagenteile, der Implementierung von Strategien zur Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik sowie einer an die Zulaufbelastung angepassten Betriebsweise (z. B. Reduzierung des Schlammalters, Intervallbelüftung etc.) vor allem die Optimierung der Klärschlammfaulung sowie ggf. der Einsatz von Co-Substraten, um den Eigenversorgungsgrad wesentlich zu verbessern.

Im Projekt Zebras konnte gezeigt werden, dass Verbünde zur anaeroben Behandlung des Klärschlammes sinnvoll sein können, auch weil kommunale Faultürme häufig freie Kapazitäten aufweisen. So können bereits heute bestehende Kläranlagen potenziell energieneutral werden oder sogar Energie für andere Zwecke bereitstellen. Dies bedarf jedoch der Vernetzung mehrerer Kläranlagen und ggf. unterschiedlicher Betreiber.

Freie Faulraumkapazitäten könnten auch zukünftig durch Abwasserteilströme genutzt und dadurch die Energieeffizienz von Kläranlagen verbessert werden. So weist Schwarzwasser, zumal wenn es über ein Vakuumsystem erfasst und abgeleitet wird, Konzentrationen an organischem Kohlenstoff auf, die eine Mitbehandlung im Faulturm erlauben. Massenbilanzen von (Morandi et al. 2017) verdeutlichen anhand von Modellrechnungen an einer Beispielkläranlage von 100.000 EW, dass Schwarzwasser von bis zu 35 % der angeschlossenen Einwohner mittels Vakuumsystemen zur Ver-

besserung der Energiebilanz direkt oder nach Eindickung in einen Faulurm eingespeist werden kann, bevor eine Verschlechterung des C/N-Verhältnisses Maßnahmen zur Rückgewinnung bzw. Elimination von Stickstoff aus dem Schlammwasser erfordert. Dabei kann der in Schwarzwasser enthaltene Kohlenstoff in Biogas umgesetzt und gleichzeitig der Strombedarf für die Belüftung verringert werden.

Durch eine zukünftige Stoffstromtrennung können nicht nur die im Abwasser enthaltenden Energiepotenziale deutlich besser genutzt werden, sondern auch Nährstoffe und Wasser einfacher einem Recycling zugeführt werden.

Allein die Weiterentwicklung von Abwasserinfrastrukturen in dem genannten Sinne stellt eine große Herausforderung für die Abwasserwirtschaft dar, bietet aber eben auch mit der Weiterentwicklung unserer Abwasseranlagen zu ressourceneffizienten Systemen enorme Chancen.

Darüber hinaus kann die Einbindung von Kläranlagen in Energienetze die Nutzung regenerativer Energie auch außerhalb von Kläranlagen erheblich befördern.

Zukünftig könnten (größere) Kläranlagen einen wichtigen Beitrag zur Langzeitspeicherung leisten. Wenn die vorhandenen Potenziale in Zukunft aktiviert werden sollen (vgl. (Schäfer et al., 2017a)), ist eine Speicherung von Klärgas im klassischen Gasbehälter vor Ort kontraproduktiv, da dort die Speicherzeiten (bis zu einem Tag) deutlich geringer sind. Mittels Elektrolyse und biologischer Methanisierung kann das Klärgas einspeisefähig aufbereitet und zusätzliches Speichergas generiert werden. Die in (Schäfer et al. 2017) beschriebene Konzeption zeigt die Speicherpotenziale sowie die Verwertungspfade für die Nebenprodukte der Elektrolyse auf. Auf diese Weise kann die Power-to-gas Technologie ressourceneffizient umgesetzt werden (vgl. auch Kapitel 2.2). Dazu sind die regulatorischen Rahmenbedingungen so anzupassen, dass eine Langzeitspeicherung (bis zu mehreren Monaten) im Gasnetz für die Betreiber wirtschaftlich interessant wird.

Kläranlagen als öffentliche Infrastruktur sollten aktiv in der Hebung und Bereitstellung ihrer Potenziale gestützt werden, denn sie können so ihren Spielraum in der Daseinsvorsorge (Bereich – Wasser) erweitern und auch eine wichtige Funktion im Daseinsvorsorgebereich der Energieversorgung übernehmen: Stabilisierung der lokalen Netze, Flexibilitäten bereitstellen und Speicherleistung aktivieren. Dieser Ansatz ist möglicherweise am vielversprechendsten wenn Versorger und Kläranlagenbetreiber an einem Strang ziehen und entsprechende Synergien genutzt werden können.

Der in Abbildung 4 skizzierte „Fahrplan“ zum Ausbau der Kläranlagenflexibilität sieht ein gestuftes Vorgehen vor um die in (Schäfer et al., 2017a) und (Knerr et al., 2017) aufgeführten Potenziale Schritt für Schritt zu heben:

Kläranlagen können demnach mit den BHKW erste „Gehversuche“ auf dem für sie neuen Handlungsfeld der Flexibilität vornehmen. In einem zweiten Schritt können

die weiteren Potenziale im vorhandenen Bestand durch Einbeziehung weiterer Aggregate aktiviert werden. Mit zunehmendem Bedarf der langfristigen Speicherung von EE-Überschussstrom können Kläranlagen um die Bausteine der Elektrolyse und Methanisierung erweitert werden.

Parallel dazu können sukzessive eine Optimierung der Faulung (i. b. auch Ausnutzung freier Faulraumkapazitäten) und auch eine Anpassung der Prozesse zur Effizienzsteigerung umgesetzt werden, die neben den energetischen Vorteilen auch die Ausgangssituation für ein Phosphorrecycling verbessern.

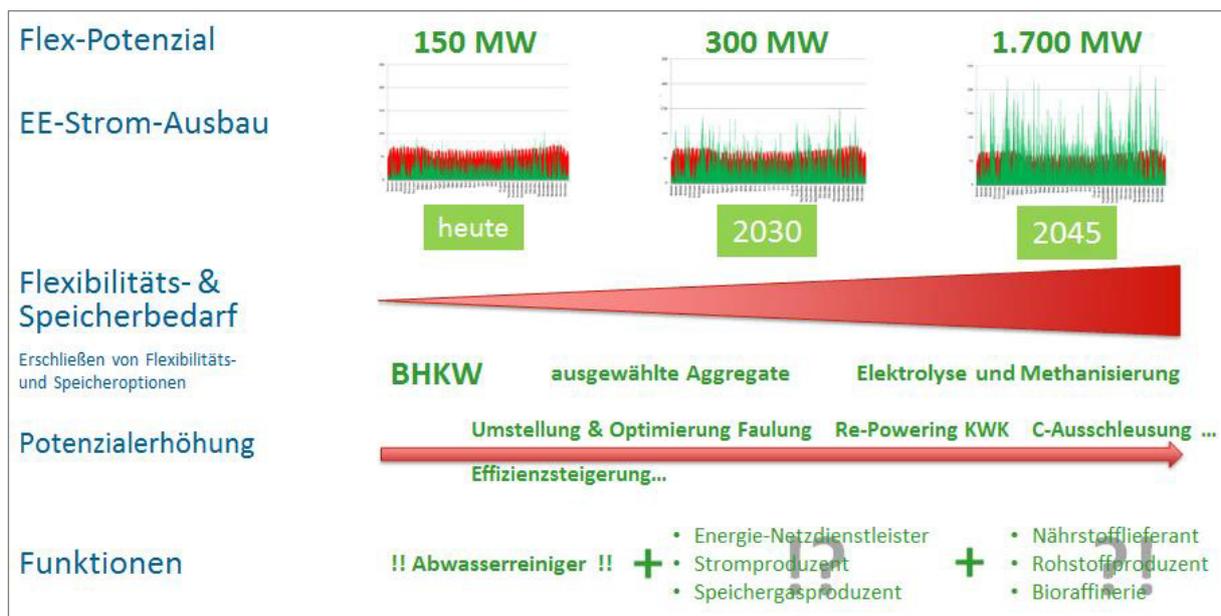


Abbildung 4: Vision und „Fahrplan“ zur stufenweise Steigerung der Flexibilitätspotenziale auf Kläranlagen (Gretzschel et al. 2017)

Die beschriebenen Aspekte werden alle Akteure der Abwasserreinigung und, bei Sektorenkopplung auch darüber hinaus, vor neue Herausforderungen stellen, die zugleich die Chance bieten, weitere Ressourcenaspekte zu berücksichtigen und Kläranlagen zu flexiblen Umweltzentren auszubauen.

4 Fazit und Ausblick

Kläranlagen dienen bislang ausschließlich dem Gewässerschutz. Um das Ziel einer weitgehenden Entfernung von Abwasserinhaltsstoffen zu erreichen, bedarf es des Einsatzes von Hilfsstoffen und Energie, der durch die Implementierung neuer Verfahren z. B. zur Mikroschadstoffentfernung oder zur Phosphorrückgewinnung zukünftig zunehmen wird. Parallel zur Verbesserung der Reinigungsleistung von Kläranlagen hat es in den letzten Jahren zahlreiche Ansätze gegeben, deren Betrieb energieeffizienter zu gestalten, wobei der Ausbau von Anlagen zur anaeroben Klärschlammbehandlung durch Verbundkonzepte und/oder verfahrenstechnische

Optimierungen und die damit verbundene Gewinnung von Klärgas einen wichtigen Beitrag leistet.

Die Versuche Abwasserreinigung, Stoffrecycling und Energieeffizienz miteinander zu verzahnen, werden jedoch nur dann erfolgreich sein, wenn die bisherigen Systemgrenzen erweitert und die Abwasserentsorgung zukünftig stärker mit der Landwirtschaft (Rückgewinnung von Nährstoffen, Bewässerungswasser), der Abfallwirtschaft (Co-Vergärung), dem produzierenden Gewerbe (Rohstofflieferung, z. B. Phosphate, Biopolymere) und vor allem auch der Energiewirtschaft (Einbindung von Kläranlagen in „Smart Grids“ und Sektorenkopplung) verzahnt wird. Forschungsergebnisse und erste Pilotprojekte verdeutlichen, dass dies möglich ist und Kläranlagen so zukünftig auch einen Beitrag zur Stabilisierung der Energienetze und somit auch zum Gelingen der Energiewende leisten können.

Dazu bedarf es weiterer Aktivitäten. Zum einen müssen auf bestehenden Kläranlagen vorhandene Potenziale zur Verfahrensoptimierung ausgeschöpft werden zum anderen gezielt Konzepte und Verfahren entwickelt und umgesetzt werden, bei denen unterschiedliche Systeme miteinander gekoppelt werden. Beispiele sind die Nutzung von Flexibilitätsoptionen auf der Kläranlage, oder die Elektrolyse von regenerativem Überschussstrom, die Energiespeicherung von Wasserstoff oder aufbereitetem Klärgas im Gasnetz und die Nutzung von aus regenerativer Energie produziertem Ozon zur Spurenstoffelimination.

Schlussendlich werden die im Abwasser enthaltenen stofflichen und energetischen Potenziale aber nur dann bestmöglich genutzt werden, wenn Stoffströme frühzeitig getrennt, vorhandene Ressourcen so besser genutzt und der Einsatz von Ressourcen zu Reinigung minimiert werden können. Die dazu erforderliche schrittweise Umstellung der Entsorgungsinfrastrukturen auf Stoffstromtrennung und Einbindung in andere Infrastrukturen ist möglich. Der Kläranlagenbetrieb kann so an die zukünftigen Anforderungen angepasst und die Kläranlage von heute sukzessive zu einem modernen Produktionsbetrieb und einem Stabilisator der Energienetze ausgebaut werden.

Literatur

DWA (2015): DWA Arbeitsblatt 216, Energiecheck und Energieanalyse, Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef, ISBN: 978-3-88721-276-6

EIGA (Hg.) (2010): Indirect CO₂ emissions compensation: Benchmark proposal for Air Separation Plants. Position Paper. Online verfügbar unter <https://eiga.eu/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=193&token=793e0bebd55ff45884c633d0f8f91aa475d1b652>, zuletzt geprüft am 23.10.2017.

- Gelsenwasser (2017): Emschergenossenschaft und GELSENWASSER arbeiten im Virtuellen Kraftwerk für die Wasser- und Abwasserbranche zusammen. Online verfügbar unter https://www.gelsenwasser.de/unternehmen/presse/presse-einzelansicht/news/emschergenossenschaft-und-gelsenwasser-arbeiten-im-virtuellen-kraftwerk-fuer-die-wasser-und-abwasser/?tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bday%5D=8&tx_news_pi1%5Bmonth%5D=2&tx_news_pi1%5Byear%5D=2017&cHash=939d9aa9237fbb23b4be960c95a20bb5, zuletzt geprüft am 23.10.2017.
- Gretzschel, O.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Kläranlagen als Flexibilitätsdienstleister im Stromnetz. Beitrag beim Kölner Kanal und Kläranlagen Kolloquium 2017. 14.-15.9.2017, Maternuhaus Köln
- Hillenbrand T., Londong J., Steinmetz H., Wilhelm C., Sorge C., Söbke H., Nyga I., Minke R., Menger-Krug E. (2016) Anpassung an neue Herausforderungen – nachhaltige Wasserinfrastruktursysteme für Bestandsgebiete. KA, Korrespondenz Abwasser, Abfall 2016 (63) Nr. 11, S. 992- 998
- Knerr, H. Dilly T., Schäfer M., Schmitt T.G. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren Flexibilität wagen. Kaiserslautern (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Kornrumpf, Tobias; Zdrallek, Markus (2017): Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Mittelspannungsnetz. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren Flexibilität wagen. Kaiserslautern (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Morandi, C., Wasielewski, S.; Mouarkech, K.; Minke, R.; Steinmetz, H. (2017): Impact of new sanitation technologies upon conventional wastewater infrastructures. *Urban Water Journal* 20 (7), 1–8. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2017.1301502>
- Preiß, Stefan (2015): WVE bündelt Klärgasanlagen zu virtuellem Kraftwerk. In: EUWID Wasser und Abwasser, 14.10.2015 (WA43), S. 13.
- Richter, Michael R. (2017): Ein Jahr strategische Partnerschaft zwischen der e2m und Gelsenwasser AG – Status quo und quo vadis? Wie Flexibilität von Wasserwerken und Kläranlagen auf Kurzfrist-Strommärkten genutzt wird. Pressemitteilung, 7.2.2017. e2m. Leipzig/Essen. Online verfügbar unter [https://www.e2m.energy/files/e2m/Downloads/Presse/2017/20171001_PM_gelsenwasser\(BG\).pdf](https://www.e2m.energy/files/e2m/Downloads/Presse/2017/20171001_PM_gelsenwasser(BG).pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2017.

- Schäfer, M.; Gretzschel, O. (2016): Potenzial of Wastewater Treatment Plants for Long-Term-Storage Options via Power-to-Gas. Posterbeitrag - 11th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), Düsseldorf. Online verfügbar unter http://erwas-arrivee.de/userspace/EXT/arrivee/Dokumente/170313_Poster_IRES_2017_Schaefer.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2017.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Hobus, Inka (2017a): Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren Flexibilität wagen. Kaiserslautern (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning (2015): Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potenzial Analysis. In: Energy Procedia 73, S. 87–93. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Taudien, Yannick (2017b): Flexibilitätspotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt. In: wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik (3), S. 8–12.
- Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Huesker, Frank; Salomon, Dirk; Bidlingmaier, Artur et al. (2017): Abwassereinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://erwas-arrivee.de/veroeffentlichungen/schlussbericht-arrivee/#c655176>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.
- Statistisches Bundesamt (2015): Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland. Datensatz. Online verfügbar unter <https://www-genesis.destatis.de>, zuletzt geprüft am 02.02.2015
- UM BW (2015): Leitfaden energieeffizienz auf Kläranlagen. UM BW (2015): Bezug: Ministerium für Umwelt, Klima und energiewirtschaft Baden-Württemberg, www.um.baden-wuerttemberg.de

Korrespondenz an:

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz
TU Kaiserslautern
Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserreinigung
Tel.: 0631-205 2944
Fax: 0631-205 3905
E-Mail: heidrun.steinmetz@bauing.uni-kl.de

**Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft
der Technischen Universität Kaiserslautern**

- Band 1: Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. K. Jacobitz, Kaiserslautern 1987 EUR 20,--
- Band 2: Horster, Monika: Untersuchungen zur Stickstoffelimination in Belebungsanlagen mit separater Belüftung des Rücklaufschlammes, Dissertation Kaiserslautern 1990 EUR 12,--
- Band 3: Festschrift zum 10-jährigem Jubiläum des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft an der Universität Kaiserslautern: Vorträge zu aktuellen Problemen der Siedlungswasser- und Abfallwirtschaft am 25.10.1991, Kaiserslautern 1992 EUR 10,--
- Band 4: Wagner, Wolfgang: Optimierung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von Kläranlagen auf der Basis von Risikoanalysen, Dissertation Kaiserslautern 1992 EUR 12,--
- Band 5: Burde, Michael: Vorsorgende und langfristige Grundwassersicherung durch Ausweisung von Grundwasservorranggebieten als Aufgabe von Raumplanung und Fachplanung, Dissertation Kaiserslautern 1992 EUR 15,--
- Band 6: Welker, Antje: Die Belastung von Reststoffen aus der Papierindustrie mit halogen-organischen Verbindungen – Aufklärung der chemischen Zusammensetzung und Folgerungen für die Reststoffentsorgung, Dissertation Kaiserslautern 1992 EUR 15,--
- Band 7: Vom Stadtbauwesen zur Siedlungswasserwirtschaft; Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. K. Jacobitz, Kaiserslautern November 1995 EUR 15,--
- Band 8: Neuer Umgang mit Regenwasser in Siedlungen, Beiträge der 4. Umwelttage Kaiserslautern, Kaiserslautern 1995 EUR 20,--
- Band 9: Steinmetz, Heidrun: Einfluß von Abwasserinhaltsstoffen, Stoffwechselprozessen und Betriebsparametern von Belebungsanlagen auf den Sauerstoffeintrag in Abwasser-Belebtschlamm-Gemische, Dissertation Kaiserslautern 1996 EUR 15,--

- Band 10: Hansen, Joachim: Der Einsatz von Fuzzy Control für Regelungsaufgaben im Bereich der Nährstoffelimination in kommunalen Kläranlagen, Dissertation Kaiserslautern 1997 EUR 15,--
- Band 11: Fuzzy Control und Neuronale Netze zur Optimierung der Stickstoff- und Phosphorelimination, Beiträge der Fachtagung zum Einsatz innovativer Methoden der Steuerungstechnik in der Abwasserbehandlung, Kaiserslautern 1998 EUR 20,--
- Band 12: Dynamische Simulation als Werkzeug zur optimierten Planung und Betriebsführung von Abwasserreinigungsanlagen, Kaiserslautern 1999 EUR 20,--
- Band 13: Zettl, Ulrike: Einsatz der Dynamischen Simulation als Bemessungshilfe für Kläranlagen in Weinbaugebieten, Dissertation Kaiserslautern 2000 EUR 20,--
- Band 14: Einsatz der SBR-Technologie in der kommunalen und industriellen Abwasserbehandlung, Kaiserslautern 2001 EUR 20,--
- Band 15: Regenwasserbehandlung – Anwendungspraxis und Perspektiven, Kaiserslautern 2002 EUR 20,--
- Band 16: Leinweber, Ulla: Anforderungen an die integrierte Modellierung von Entwässerungssystem und Kläranlage, Dissertation Kaiserslautern 2002 EUR 20,--
- Band 17: Kasting, Ulrich: Reinigungsleistung von zentralen Anlagen zur Behandlung von Abflüssen stark befahrener Straßen, Dissertation Kaiserslautern 2003 EUR 20,--
- Band 18: Blähschlamm, Schwimmschlamm und Schaum in kommunalen und industriellen Abwasserbehandlungsanlagen, Kaiserslautern 2003 EUR 20,--
- Band 19: Wiese, Jürgen: Entwicklung von Strategien für einen integrierten Betrieb von SBR-Kläranlagen und Mischkanalisationen – Simulation und Großtechnik, Dissertation Kaiserslautern 2005 EUR 20,--
- Band 20: Welker, Antje: Schadstoffströme im urbanen Wasserkreislauf – Aufkommen und Verteilung, insbesondere in den Abwasserentsorgungssystemen, Habilitation Kaiserslautern 2005 EUR 20,--

- Band 21: Integrale Betrachtung von Kanalnetz, Kläranlage und Gewässer, Kaiserslautern 2005 EUR 20,--
- Band 22: Klepiszewski, Kai: Analyse und modelltechnische Nachbildung der Reinigungswirkung eines kombinierten Bauwerks zur Mischwasserbehandlung, Dissertation Kaiserslautern 2006 EUR 20,--
- Band 23: Dittmer, Ulrich: Prozesse des Rückhaltes und Umsatzes von Kohlenstoff- und Stickstoffverbindungen in Retentionsbodenfiltern zur Mischwasserbehandlung, Dissertation Kaiserslautern 2006 EUR 20,--
- Band 24: Wozniak, Renata: Ermittlung von Belastungsgrenzen an Bodensubstraten zu weitergehenden Mischwasserbehandlung in Retentionsbodenfiltern, Dissertation Kaiserslautern 2007 EUR 20,--
- Band 25: siwawi 2030 – Themen und Lösungsansätze für die nächsten 25 Jahre, Kaiserslautern 2006 vergriffen
- Band 26: Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Energieoptimierung von Kläranlagen, Kaiserslautern 2007 vergriffen
- Band 27: Illgen, Marc: Das Versickerungsverhalten durchlässig befestigter Siedlungsflächen und seine urbanhydrologische Quantifizierung, Dissertation Kaiserslautern 2009 EUR 20,--
- Band 28: KOMPLETT – Ein innovatives System zur Schließung von Wasser- und Stoffkreisläufen, Kaiserslautern 2009 EUR 20,--
- Band 29: Md. Aktaruzzaman: High Resolution Digital Surface Model (DSM) to Support Modelling of Urban Flooding, Dissertation Kaiserslautern 2011 EUR 20,--
- Band 30: Schlammfäulung statt aerober Stabilisierung – Trend der Zukunft?, Kaiserslautern 2011 EUR 20,--
- Band 31: Meyer, Daniel: Modellierung und Simulation von Retentionsbodenfiltern zur weitergehenden Mischwasserbehandlung, Dissertation Kaiserslautern 2011 EUR 20,--
- Band 32: Aqua Urbanica 2012 – Siedlungsentwässerung im Wandel, D-A-CH Gemeinschaftstagung, München 2012 EUR 20,--

- Band 33: Knerr, Henning: Untersuchungen zur Zusammensetzung und zum Abbau von Schwarzwasser mittels des Belebungsverfahrens sowie zur Kinetik des heterotrophen und autotrophen Stoffwechsels, Dissertation Kaiserslautern 2012 EUR 20,--
- Band 34: Kaufmann Alves, Inka: Strategieentwicklung zur Integration ressourcen-orientierter Abwasserbewirtschaftung durch mathematische Optimierung, Dissertation Kaiserslautern 2012 EUR 20,--
- Band 35: Hasselbach, Ralf: Leistungsfähigkeit von Pflanzenkläranlagen im Mischsystem mit Lavasand als Filtersubstrat, Dissertation Kaiserslautern 2013 EUR 20,--
- Band 36: Siedlungswasserwirtschaft 20..40..60 – Herausforderungen und Perspektiven 'insight outside K'town', Kaiserslautern 2013 EUR 20,--
- Band 37: Dierschke, Martina: Methodischer Ansatz zur Quantifizierung von Feinpartikeln (PM63) in Niederschlagsabflüssen in Abhängigkeit von der Herkunftsfläche, Dissertation Kaiserslautern 2014 EUR 20,--
- Band 38: Aydin, Nazli Yonca: Scenario-Based Sustainability Assessment to Provide Interactive Decision Support for the Long-Term Transition of Urban Water Supply Systems, Dissertation Kaiserslautern 2014 EUR 20,--
- Band 39: Mikroschadstoffe aus Abwasseranlagen in Rheinland-Pfalz, Kaiserslautern 2017 EUR 20,--

