

Schriftenreihe Band 5 | 2019

wasser infrastruktur ressourcen



**Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung
energetischer Flexibilität durch einen
anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb**

Michael Schäfer

wasser infrastruktur ressourcen



Technische Universität Kaiserslautern

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung

Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft

Zentrum für Innovative AbWassertechnologien

Paul-Ehrlich-Straße

67663 Kaiserslautern

☎ +49 631 205-3685

✉ +49 631 205-3905

www.bauing.uni-kl.de/wir



ISSN: 2570-1460 | ISBN: 978-3-95974-108-8

Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität
durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb

5
wir

Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb

Dipl.-Ing. Michael Schäfer

Kaiserslautern
2019

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.

Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen · Band 5

Herausgeber: Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen

Technische Universität Kaiserslautern
Paul-Ehrlich-Straße 14
67663 Kaiserslautern

Verfasser: Schäfer, Michael

Verlag: Technische Universität Kaiserslautern

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

D-386

© Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen · Kaiserslautern 2019



Dieses Werk und alle Einzelbeiträge sind unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung 4.0 International (CC BY) zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 2570-1460

ISBN 978-3-95974-108-8

Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb

vom Fachbereich Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Schäfer

Dekan Prof. Dr. rer. nat. Oliver Kornadt

Prüfungskommission

Vorsitzender Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz

1. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

2. Berichterstatter Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Datum der Prüfung 07.02.2019

Kaiserslautern 2019

(D 386)

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt herzlich bedanken, der mich jederzeit konstruktiv und fördernd mit seiner wohlwollenden Art unterstützt hat. Seine vertrauensvolle Begleitung die letzten Jahre hat mich sowohl fachlich als auch auf menschlicher Ebene positiv beeinflusst.

Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz bedanke ich mich für ihr Interesse an meiner Arbeit, ihrem konstruktiven und fachlichen Rat sowie ihrer Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Wilko Manz als Vorsitzenden der Prüfungskommission für die Leitung des Promotionsverfahrens.

Ich bedanke mich bei allen ehemaligen und derzeitigen Kolleginnen und Kollegen des Instituts Wasser – Infrastruktur – Ressourcen für ein fruchtbares und freundschaftliches Arbeitsklima. Insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel für seine motivierende Unterstützung, dem regen Austausch und wertvollen Anregungen während der Bearbeitung dieser Arbeit und darüber hinaus.

Ein großer Dank geht an das BMBF für die Förderung des Forschungsprojektes *arrivee*, das die Anfertigung dieser Dissertation ermöglicht hat. Den ehemaligen Partnern des Projektes für eine außergewöhnlich freundschaftliche Zusammenarbeit und den vielen positiven Erfahrungen in der gemeinsamen Bearbeitung. Des Weiteren gilt mein Dank dem Wupperverband für die Bereitstellung der Daten sowie dem Engagement der beteiligten Personen im Rahmen des Projektes.

Zum Schluss danke ich von Herzen meinen Eltern, die mir diesen Weg ermöglicht haben, immer an mich geglaubt und jederzeit für mich da waren. Meiner Partnerin Yvonne, die mich mit ihrer stets fröhlichen und geduldigen Art bedingungslos unterstützt hat. Zusammen mit meiner gesamten Familie sind sie der Rückhalt gewesen, die meine Promotion erst möglich gemacht haben.

Kurzfassung

Im Rahmen der Energiewende werden eine Neustrukturierung des Energiesektors und eine grundlegende Transformation der elektrischen Energieversorgung erforderlich. Die volatile Erzeugung von Strom aus Wind und Sonne erfordert mit stetig steigendem Anteil an der Gesamtenergieproduktion einen immer höheren Bedarf an Flexibilität zur Stabilisierung der Stromnetze. Aus energetischer Sicht zeichnen sich Kläranlagen durch eine Vielfalt an Prozessen aus, bei denen Energie umgewandelt, gespeichert, bezogen und produziert wird.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zu einem besseren Verständnis und vertieften Erkenntnissen an der Schnittstelle zwischen der Abwasser- und der Energiewirtschaft liefern, indem die Vereinbarkeit zwischen den Belangen der Abwasserreinigung und einem flexiblen Anlagenbetrieb sowie die Stromerzeugungs- und Flexibilitätpotenziale kommunaler Kläranlagen in Deutschland umfassend untersucht wurden.

Vor diesem Hintergrund wurden Erkenntnisse gewonnen, die zur Auswahl, Bewertung und möglichst sicheren Implementierung von typischen Aggregaten auf Kläranlagen herangezogen werden können, um durch einen anpassungsfähigen Anlagenbetrieb Flexibilität bereit zu stellen. Die zugrundeliegende Methodik wurde im Wesentlichen am Beispiel der Kläranlage Radevormwald entwickelt. Dabei wurden relevante Kennzahlen erarbeitet, die die klärtechnischen Anforderungen sowohl mit den technisch-physikalischen als auch energiemarktbedingten Anforderungen an die Aggregate in Einklang bringen. Ein wesentlicher Fokus liegt auf den abgeleiteten Restriktionen und Kontrollparametern, um einen sicheren Reinigungsbetrieb zu gewährleisten.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnte eine Vielzahl von Erkenntnissen an der Schnittstelle von Energie- und Abwasserwirtschaft gewonnen, bestätigt und zur Ableitung von Anwendungsempfehlungen genutzt werden. Die vorhandene Flexibilität auf Kläranlagen kommt für eine Vielzahl von Verwendungsmöglichkeiten in Betracht. Damit können sie bereits heute und zukünftig verstärkt an Produkten der Energieversorgung und neuen Geschäftsmodellen teilhaben. Die untersuchten Aggregate weisen dabei je nach Verwendungszweck unterschiedliche Eignungen auf und nicht jedes Aggregat ist für jede Nutzungsoption einsetzbar. Die Ergebnisse belegen, dass Kläranlagen mit ihren Leistungsgrößen und verschiebbaren Energiemengen relevante Beiträge zur Energiewende leisten können und zu mehr in der Lage sind als, weitgehend losgelöst vom Energiemarkt und den sich dort abzeichnenden Änderungen, elektrische Energie nur zur eigenen Nutzung zu verwenden.

Abstract

Approaches of an adaptable wastewater treatment plant operation to provide energetic flexibility

In the context of the German energy transition, a reorganization of the energy sector and a fundamental transformation of the electrical energy supply system are required. This is caused by abandoning of nuclear power, the reduction of fossil-based energy production and the increasing share of renewable energy production. Under these circumstances the operation of energy grids driven by a highly volatile solar and wind-based energy production will not be sustainable and arising energy surpluses and deficits have to be balanced by flexible energy generators and consumers. This will face providers with new challenges in system operation and will lead to a growing demand for energetic flexibility to stabilize electricity grids. The objective of this thesis is to contribute to a better general understanding and to an in-depth knowledge at the interface between the wastewater and the energy sector. This work intends to show the compatibility of a flexible plant operation without endangering the system's functionality and the potentials to provide flexibility for municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in Germany.

Within this thesis, a methodical approach has been developed that can be used to select, evaluate and safely implement typical aggregates on WWTPs for flexible plant operation and the provision of energetic flexibility. Relevant key figures have been developed that reconcile requirements of the purification processes with technical-physical necessities as well as demands of the energy market. Furthermore, restrictions and control parameters have been established which complement the developed key figures to ensure effluent quality.

It was demonstrated, that WWTPs are able to adapt their operation mode to external and internal requirements under controlled conditions. The existing flexibility is suitable for a variety of uses and WWTPs in general are able to participate in today's and in future energy supply products and new business models. Even for vulnerable components load shifting is possible with appropriate control parameters and reasonable time slots without endangering system functionality. The aggregates investigated have different suitabilities depending on their intended use. Therefore, not every aggregate can be optimally used for every utilization path. The results show that WWTPs have a significant potential to provide energetic flexibility and are able to make relevant contributions to the German energy transition in terms of power generation, shiftable loads and gas production.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Veranlassung und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit.....	4
1.3	Vorgehensweise.....	5
1.4	Das Projekt „arrivee“	8
2	Die Kläranlage an der Schnittstelle zwischen Wasser- und Energiewirtschaft ... 9	
2.1	Die Energiewirtschaft im Wandel.....	10
2.1.1	Definitionen und begriffliche Abgrenzungen	10
2.1.2	Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität und Interaktion mit Energienetzen	12
2.2	Energiebereitstellung durch Kläranlagen.....	19
2.2.1	Anaerobe Schlammstabilisierung.....	20
2.2.2	Quantifizierung von Faulgas.....	21
2.2.3	Gasnutzung mittels Kraft-Wärme-Kopplung.....	24
2.2.4	Stand der Faulgasverwertung und Stromerzeugung in Deutschland	27
2.2.5	Bisherige Potenzialabschätzungen zur Faulgasverstromung	28
2.2.6	Netzersatzanlagen	30
2.3	Energiebedarf auf Kläranlagen	32
2.3.1	Mechanische Reinigungsstufe.....	33
2.3.2	Biologische Reinigungsstufe	34
2.3.3	Schlammbehandlung und Entwässerung	34
2.3.4	Hebwerke	35
2.3.5	Nachgeschaltete Filtration und Spurenstoffelimination	36
2.4	Kenntnisstand zu Lastmanagement und -verschiebung auf Kläranlagen ...	36
2.5	Fokus und Abgrenzung des Themas.....	42
2.5.1	Themenschwerpunkte dieser Arbeit als Folgerung erkannter Defizite.....	42
2.5.2	Abgrenzung des Themas	43

3	Entwicklung eines methodischen Ansatzes für einen flexiblen Kläranlagenbetrieb	45
3.1	Identifizierung von Aggregaten, Methodik der Datenanalyse und Berechnung von spezifischen Flexibilitätspotenzialen.....	46
3.2	Erforderliche technische und kläranlagenbezogene Kenngrößen.....	49
3.3	Restriktionen und Kontrollparameter.....	52
3.4	Zwischenfazit zur Methodenentwicklung.....	52
4	Methodenanwendung zum flexiblen Anlagenbetrieb	53
4.1	Beschreibung des Projektgebietes und der Projektanlage Radevormwald..	53
4.1.1	Anlagenbeschreibung.....	54
4.1.2	Datengrundlage.....	56
4.1.3	Zuflusscharakteristik, Energieverbrauch und Energieproduktion ...	57
4.2	Ergebnisse zur Bewertung der Aggregate anhand der Kläranlage Radevormwald	59
4.2.1	Sandfang.....	60
4.2.2	Belüftung der Belebungsbecken	62
4.2.3	Rührwerke der Belebungsbecken.....	64
4.2.4	Rezirkulationspumpen.....	65
4.2.5	Rücklaufschlammumpen	67
4.2.6	Rührwerke der Faulbehälter	68
4.2.7	Heizschlammumpen (Faulbehälter)	69
4.2.8	Rohschlammumpen	70
4.2.9	Maschinelle Überschussschlammendickung	70
4.2.10	Schlamm entwässerung (Kammerfilterpresse).....	72
4.2.11	Zusammenfassung der Aggregatauswahl	74
4.2.12	BHKW-Anlagen	76
4.2.13	Netzersatzanlagen	78
4.3	Einbindung weiterer potenziell nutzbarer Aggregate.....	78
4.3.1	Hebewerke	79
4.3.2	Abwasserpumpwerke im Kanalnetz.....	79
4.3.3	Nachgeschaltete Filtration und Spurenstoffelimination	80
4.4	Zwischenfazit - Methodenanwendung.....	81

5 Validierung und Verifikation der Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparameter	85
5.1 Abschaltversuche	87
5.2 Mathematische Simulation	90
5.2.1 Simulationsergebnisse „Kläranlage Radevormwald“	93
5.2.2 Simulationsergebnisse „Musterkläranlage“	95
5.3 Integration in ein Virtuelles Kraftwerk	97
5.3.1 Präqualifikation	98
5.3.2 Versuchsdurchführung	99
5.4 Weitere betriebliche Erkenntnisse	101
5.5 Zwischenfazit – Validierung und Verifikation	102
6 Bewertung und Diskussion der Kläranlagenflexibilität	103
6.1 Summative Evaluation eines flexiblen Anlagenbetriebes	103
6.1.1 Zulauf und mechanische Reinigung	103
6.1.2 Biologische Reinigungsstufe	104
6.1.3 Schlammbehandlung	107
6.1.4 Energieerzeugung	108
6.1.5 Ableitung allgemeiner Flexibilitätskennzahlen relevanter Aggregate	109
6.1.6 Zwischenfazit – Bewertung der Aggregatgruppen	111
6.2 Bewertung von Kläranlagenflexibilität im Energiesektor	115
6.2.1 Marktdienlicher Einsatz	115
6.2.2 Netzdienlicher Einsatz	117
6.2.3 Systemdienlicher Einsatz	118
6.2.4 Zwischenfazit – Einsatzmöglichkeiten der Kläranlagenflexibilität ..	120
6.3 Virtuelle Kraftwerke, IT-Sicherheit und Kritische Infrastrukturen	122
6.3.1 Anbindung an Virtuelle Kraftwerke	122
6.3.2 IT-Sicherheit und Kritische Infrastrukturen	123
6.4 Kläranlagen in der Rolle als (Langzeit-)Energiespeicher	125
6.5 Weiterführende Überlegungen	131
6.5.1 Energieverbrauchsprognosen und Flexibilität bei erhöhter Anlagenbelastung	131

6.5.2	Kumulative Regenerationszeiten.....	133
6.5.3	Einbindung in regionale Energieverbände.....	134
7	Potenzialanalyse kommunaler Kläranlagen in Deutschland	137
7.1	Konzept und Vorgehen zur Berechnung der Stromerzeugungs- und Flexibilitätpotenziale.....	137
7.2	Datengrundlage und -erhebung.....	138
7.2.1	Kläranlagennachbarschaften des Jahrgangs 2012/2013.....	140
7.2.2	Kommunale Lageberichte der Bundesländer.....	140
7.2.3	Rohdatensätze aus dem Projekt ZEBRAS	141
7.2.4	Rohdatensätze aus dem Projekt TP2.....	142
7.3	Datenqualität, Voraussetzungen und Annahmen.....	142
7.3.1	Ausbau und Anschlussgröße	143
7.3.2	Faulgasqualität, spezifischer Faulgasanfall und Energiegehalt.....	144
7.3.3	Faulgasverstromung.....	144
7.3.4	Wirkungsgrade von KWK-Anlagen.....	144
7.3.5	Berechnungsgrundlagen.....	145
7.3.6	Ergebnisse der Datenauswertung zur Faulgasnutzung in Deutschland.....	145
7.4	Stromerzeugungspotenziale kommunaler Kläranlagen.....	147
7.4.1	Ausrüstung aller Faulungsanlagen mit KWK-Anlagen.....	148
7.4.2	Steigerung der Energieausbeute	149
7.4.3	Umstellungspotenzial auf anaerobe Schlammstabilisierung	150
7.4.4	Ausnutzung von Kapazitätsreserven im Faulturn	151
7.4.5	Zwischenfazit: Zusammenfassung der Stromerzeugungspotenziale.....	154
7.5	Flexibilitätpotenziale kommunaler Kläranlagen in Deutschland	157
7.5.1	Flexibilität durch KWK-Anlagen.....	157
7.5.2	Potenzialermittlung der Aggregate im Klärprozess.....	162
7.5.3	Potenzialermittlung der Netzersatzanlagen	166
7.5.4	Individuelle Betrachtung der möglichen Flexibilitätpotenziale.....	168
7.5.5	Zusammenfassung der Flexibilitätpotenziale kommunaler Kläranlagen.....	171

8 Zusammenfassung und Ausblick.....	173
8.1 Zusammenfassung	173
8.2 Forschungsbedarf und Ausblick	176
8.2.1 Forschungs- und Handlungsbedarf	176
8.2.2 Erfordernisse Kläranlagenbetrieb, Betreiber, Personal	178
9 Literaturverzeichnis	181
Anhang	201
A 1. Fließschema der KA Radevormwald	202
A 2. Aggregatliste (Verbrauchermatrix) KA Radevormwald	203
A 3. Anlagenbelastung der Kläranlage Radevormwald	207
A 4. Spezifischer Stromverbrauch der KA Radevormwald im Vergleich mit Literaturdaten	208
A 5. Ausführliche Darstellung der Abschaltversuche sowie Kurzbeschreibungen der KA Odenthal und KA Kohlfurth	209
A 6. Aggregatgruppenbezogener Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen	221
A 7. Integration in ein Virtuelles Kraftwerk	222
A 8. Flexibilitätskennzahlen der Kläranlagen Odenthal und Kohlfurth	223
A 9. Ergänzende Daten/Informationen zu Kapitel 6.4 „Kläranlagen in der Rolle als (Langzeit-)Energiespeicher“	225

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1	Gesamtkonzept und Vorgehen.....	7
Abbildung 2.1:	Unterschiedliche Einsatzbereiche für Flexibilität (nach BDEW 2015; FfE 2016; DENA 2017).....	13
Abbildung 2.2:	Schematische Darstellung der Regelleistungsarten (nach Consentec 2014; VDN 2007a; VDN 2003, 2009, 2007b; Stand: 2017).....	16
Abbildung 2.3:	Prinzipskizze der Nutzung von KWK auf Kläranlagen (nach Schaumann und Schmitz 2010; Weichgrebe 2015; Konstantin 2007).....	25
Abbildung 2.4:	Entwicklung der Klärgasnutzung und Verstromung 1990 - 2017 (Eigene Auswertung nach DESTATIS 2018a, 2018b).....	28
Abbildung 2.5:	Typisches Fließschema einer kommunalen mechanisch-biologischen Kläranlage mit getrennt anaerober Schlammstabilisierung inkl. Verteilung des mittleren spezifischen Stromverbrauchs (alle GK) der einzelnen Verfahrensgruppen (Eigene Darstellung nach Gujer (2007) mit Energiedaten nach Kolisch et al. (2014))	33
Abbildung 3.1:	Schematischer Ablauf zur Entwicklung des Aggregatmanagements (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b; Schmitt et al. 2017b)	46
Abbildung 3.2:	Prinzipschema des Vorgehens zur Einschätzung von Aggregaten zur flexiblen Nutzung.....	48
Abbildung 3.3:	Schematische Darstellung der Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017b)	50
Abbildung 4.1:	Kläranlage Radevormwald (Bildquelle: Wupperverband; Copyright: Stadt Wuppertal)	54
Abbildung 4.2:	Schematische Darstellung der Wasser- und Schlammwege der KA Radevormwald	55
Abbildung 4.3:	Zuflusswassermenge (alle Tage im Betrachtungszeitraum 2014) sowie CSB- und N _{Ges} -Fracht zur KA Radevormwald.....	58
Abbildung 4.4:	Fließschema der KA Radevormwald mit Standorten der identifizierten und untersuchten Aggregatgruppen.....	60
Abbildung 4.5:	Nutzbare Flexibilität des Sandfanggebläses der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf.....	61
Abbildung 4.6:	Positive Flexibilität der Belüftungssysteme in der biologischen Stufe im mittleren Tagesverlauf	63
Abbildung 4.7:	Identifizierte Flexibilität der Rührwerke der biologischen Stufe der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf.....	65

Abbildung 4.8:	Nutzbare Flexibilität der Rezirkulationspumpen im mittleren Tagesverlauf	66
Abbildung 4.9:	Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rücklaufschlammumpen der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf	67
Abbildung 4.10:	Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rührwerke des Faulturmes der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf	68
Abbildung 4.11:	Nutzbare Flexibilität der Heizschlammumpen des Faulturmes auf der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf	69
Abbildung 4.12:	Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rohschlammumpen der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf	70
Abbildung 4.13:	Nutzbare Flexibilität (negativ) der Seihbandanlage auf der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf	72
Abbildung 4.14:	Nutzbare Flexibilität der Schlammentwässerung im mittleren Tagesverlauf (Werktag)	73
Abbildung 4.15:	Theoretisches Flexibilitätsband der KA Radevormwald	75
Abbildung 4.16:	Gesamtenergiebedarf der Anlage und die mögliche Anpassung durch flexiblen Betrieb der Aggregate (ohne BHKW und NEA)	75
Abbildung 5.1:	NH ₄ -N-Konzentrationen infolge der Abschaltung aller Gebläse für 60 Minuten auf der Kläranlage Radevormwald (Schmitt et al. 2017b)	89
Abbildung 5.2:	NH ₄ -N-Konzentrationen infolge der Abschaltung der RLS-Pumpen für 30, 60 und 120 Minuten auf der KA Radevormwald (Schmitt et al. 2017b)	89
Abbildung 5.3:	Flexibilisierung der Gebläse in der biologischen Stufe aufgrund eines externen Signals für das Modell „Radevormwald“ (Schäfer et al. 2018c)	93
Abbildung 5.4:	Simulationsergebnisse der NH ₄ -N-Ablaufkonzentrationen für den Referenzzustand (V0) und im flexibilisierten Betrieb (MRL/SRL der Jahre 2014 und 2035) für das Simulationsmodell „KA Radevormwald“ über einen Betrachtungsraum von einem Jahr (nach Schmitt et al. 2017b)	94
Abbildung 5.5:	Flexibilisierung der Gebläse in der biologischen Stufe aufgrund eines externen Signals für das Modell „Musterkläranlage“ mit (oben) und ohne (unten) gleichzeitigem Abschalten der Rezirkulation (nach Schäfer et al. 2018c)	96
Abbildung 5.6:	Simulationsergebnisse der NH ₄ -N-Ablaufkonzentrationen für den Referenzzustand und im flexibilisierten Betrieb (MRL 2014, 2035) für die Musterkläranlage über einen Betrachtungsraum von einem Jahr (nach Pyro et al. 2017)	97
Abbildung 5.7:	Präqualifikation in Form des „Doppelhub“ der vier angeschlossenen technischen Einheiten zur Bereitstellung von	

	negativer (TE 2-4) bzw. positiver (TE 1) MRL (Schmitt et al. 2017b)	99
Abbildung 5.8:	Auswirkungen auf Energiebedarf und Ablaufkonzentrationen eines Abschaltens der Belüftung von 335 Minuten im Tagesverlauf (oben) und im Detail zur Abrufzeit (unten) (nach Schmitt et al. 2017b).....	100
Abbildung 6.1:	Erweitertes Ablaufschema von der Identifikation bis zur Einbindung von Aggregaten zur flexiblen Nutzung in den Betriebsablauf der Kläranlage (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b)	114
Abbildung 6.2:	Leistungs-Energie-Diagramm des netzdienlichen Flexibilitätsbedarfs und Deckung durch Flexibilitätsoptionen im Verteilnetz der KA Radevormwald (Szenario: OG-2035; Schmitt et al. 2017b)	117
Abbildung 6.3:	Schematische Darstellung eines „Pre-Poolings“ von Kläranlagenaggregaten zur Integration in ein Virtuelles Kraftwerk.....	122
Abbildung 6.4:	Vereinfachte Darstellung Power-to-X (nach Sterner 2009; Sterner und Stadler 2016).....	126
Abbildung 6.5:	Schematische Einbindung der Kläranlage in ein PtG-Konzept zur Sektorenkopplung	130
Abbildung 6.6:	Schematische Darstellung eines regionalen Energieverbundes (nach Hirschl et al. 2010; AEE 2008).....	135
Abbildung 7.1:	Übersicht der Potenzialberechnungen	137
Abbildung 7.2:	Anteil anaerober Stabilisierungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland nach Anzahl (links) und Ausbaugröße (rechts).....	146
Abbildung 7.3:	Vorgehen zur Ermittlung der bundesweiten Stromerzeugungspotenziale.....	148
Abbildung 7.4:	Verlauf der Stromerzeugung auf Kläranlagen mit den untersuchten Potenzialen in TWh _{el} /a sowie der Leistung in MW _{el} (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2015a)	156
Abbildung 7.5:	Vorgehen zur Ermittlung der KWK-Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017a)	158
Abbildung 7.6:	Potenziale verschiebbarer Energiemengen in MWh/d in Abhängigkeit des Füllstandes bei einer max. Gasspeicherausnutzung von 90% (verändert nach Schäfer et al. 2017a).....	160
Abbildung 7.7:	Vorgehen zur Ermittlung der Aggregatflexibilität	162

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Eigenschaften von Spot- und Terminbörsen (nach Riedel Martin, Zander, Wolfgang 2012, zitiert in Schmitt et al. 2017a).....	14
Tabelle 2.2:	Arten von Regelleistung und deren Eigenschaften (nach Consentec 2014; VDN 2007a; VDN 2003, 2007b, 2009; Stand: 2017).....	17
Tabelle 2.3:	Prozessschritte des anaeroben Abbaus (nach Gujer 2007; Weichgrebe 2015; Seyfried et al. 2015).....	20
Tabelle 2.4:	Abhängigkeit des zu erwarteten Biogasanfalls von der Verfahrenstechnik der Abwasserbehandlung (nach DWA 2010a).....	22
Tabelle 2.5:	Zusammensetzung von Faulgas (nach Weichgrebe 2015).....	23
Tabelle 2.6:	Gewinnung und Verwertung von Faulgas in Deutschland 2017 (DESTATIS 2018a, 2018b)	27
Tabelle 2.7:	Potenzialstudien zur Faulgasverstromung (Auszug)	29
Tabelle 2.8:	Abschaltdauer verschiedener Aggregatgruppen nach Literaturstellen (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b)	41
Tabelle 3.1:	Übersicht der relevanten Aggregatkenngößen.....	51
Tabelle 4.1:	Auszug der verwendeten Daten der KA Radevormwald (Bezugsjahr 2014).....	57
Tabelle 4.2:	Belastungs- und Energiekennwerte der KA Radevormwald (2014)	59
Tabelle 4.3:	Restriktionen und Kontrollparameter der Sandfanggebläse	61
Tabelle 4.4:	Installierte Leistung und Betriebsstunden der Gebläsestationen auf der KA Radevormwald	62
Tabelle 4.5:	Restriktionen und Kontrollparameter der Belüftung der Belebungsbecken	63
Tabelle 4.6:	Restriktionen und Kontrollparameter der Rührwerke im Belebungsbecken	64
Tabelle 4.7:	Regelungsbereiche der Rezirkulationspumpen der KA Radevormwald	66
Tabelle 4.8:	Restriktionen und Kontrollparameter der Rezirkulationspumpen.....	66
Tabelle 4.9:	Restriktionen und Kontrollparameter der Rücklaufschlammumpen	67
Tabelle 4.10:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Rührwerke im Faulbehälter	68
Tabelle 4.11:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Heizschlammumpen im Faulbehälter.....	69
Tabelle 4.12:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Rohschlammumpen zum Faulbehälter	70

Tabelle 4.13:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der ÜSS-Pumpen/Seihbandanlage auf der KA Radevormwald.....	71
Tabelle 4.14:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Kammerfilterpressen.....	73
Tabelle 4.15:	Übersicht der untersuchten Aggregate auf der KA Radevormwald zur Bereitstellung von Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017b).....	74
Tabelle 4.16:	Betrieb der BHKW in Abhängigkeit vom Füllstand im Gasspeicher (Bezugsjahr 2014)	76
Tabelle 4.17:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von BHKW-Anlagen.....	77
Tabelle 4.18:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Netzersatzanlagen	78
Tabelle 4.19:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Hebewerken	79
Tabelle 4.20:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Abwasserpumpwerken	80
Tabelle 4.21:	Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Filtrationsanlagen	81
Tabelle 4.22:	Übersicht der untersuchten Aggregate inkl. quantifizierter Kenngrößen und Restriktionen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der KA Radevormwald, (erweitert nach Schäfer et al. 2017b)	83
Tabelle 5.1:	Kontrollparameter und deren Validierungsstufen der untersuchten Aggregate/-gruppen	86
Tabelle 5.2:	Durchgeführte Abschaltversuche auf den untersuchten Kläranlagen nach abgeschalteten Aggregaten und zugehörigen Versuchsdauern (nach Schmitt et al. 2017b).....	88
Tabelle 5.3:	Hinterlegte Restriktionen und Kontrollparameter für die beiden Simulationsmodelle zur Bereitstellung negativer Flexibilität.....	91
Tabelle 5.4:	Hinterlegte Restriktionen und Kontrollparameter für die beiden Simulationsmodelle zur Bereitstellung positiver Flexibilität.....	92
Tabelle 5.5:	An das virtuelle Kraftwerk angeschlossene Aggregatgruppen und durchgeführte Versuchsreihen (nach Schmitt et al. 2017b).....	98
Tabelle 6.1:	Aggregatspezifische Kennzahlen eines flexiblen Anlagenbetriebes (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2018c).....	110
Tabelle 6.2:	Zusammenfassende Bewertung der Aggregatgruppen als Flexibilitätsoptionen.....	111
Tabelle 6.3:	Einschätzung der untersuchten Aggregate/-gruppen nach Regelleistungsarten (Stand: 2017)	119

Tabelle 6.4:	Einschätzung der Anforderungen der Einsatzmöglichkeiten für die Kläranlagenflexibilität (im Trockenwetterfall)	121
Tabelle 6.5:	Gegenüberstellung PtG-H ₂ und PtG-CH ₄ (nach DVGW 2014; Sterner und Stadler 2016; FfE 2017)	128
Tabelle 6.6:	Beeinflussung und mögliche Nutzung unterschiedlicher Aggregatgruppen im Regenwetterfall	132
Tabelle 7.1:	Datengrundlage zur Auswertung der bundesweiten kommunalen Kläranlagen	139
Tabelle 7.2:	Anzahl kommunaler Kläranlagen in Deutschland (Stand: 2012/2013)	146
Tabelle 7.3:	Einwohnerwerte nach Größenklasse und Reinigungsverfahren (Eigene Auswertung, Datengrundlage: DWA-Nachbarschaften 2012/2013)	147
Tabelle 7.4:	Energiepotenziale durch Ausrüstung aller Anlagen mit KWK-Anlagen	149
Tabelle 7.5:	Energiepotenziale durch Steigerung der Energieausbeute	150
Tabelle 7.6:	Energiepotenziale durch Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisation	151
Tabelle 7.7:	Energiepotenziale durch Ausnutzung von Kapazitätsreserven aus Fremdschlämmen	152
Tabelle 7.8:	Datengrundlage zur Abschätzung der Kapazitätsreserven (aus Roos 2008, UBA 2008 und eigene Berechnungen)	153
Tabelle 7.9:	Energiepotenziale bei vollständiger Ausnutzung von Kapazitätsreserven mittels externer Co-Substrate (Verfügbarkeit unterstellt)	153
Tabelle 7.10:	Zusammenfassung der untersuchten Potenziale (Schäfer et al. 2015a)	154
Tabelle 7.11:	Gewinnung und Verwertung von Faulgas in Deutschland in den Jahren 2012 – 2017 (DESTATIS 2018a)	155
Tabelle 7.12:	Ermittelte Kennwerte zur Potenzialabschätzung „Flexibilität“ in Abhängigkeit der Größenklassen (Schäfer et al. 2017a)	157
Tabelle 7.13:	Potenziale der installierten Leistung sowie der theoretischen zu- und abschaltbaren Energiemengen (unter voller Ausnutzung des Gasspeichers) (Schäfer et al. 2017a)	159
Tabelle 7.14:	Befüllungs- und Entleerungszeiten sowie zu- und abschaltbare Energiemengen der bundesweiten Anlagen bei Verdopplung des Klärgasspeichervolumens	161
Tabelle 7.15:	Zusammengefasste Ergebnisse der ab- und zuschaltbaren Leistungen sowie Energiemengen der Aggregate aller deutschen Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren	163

Tabelle 7.16:	Spezifische Aggregatleistungen, Betriebsstunden, Abschalt Dauern und Lastabwurfpotenzial je Aggregatgruppe.....	164
Tabelle 7.17:	Berechnete ab- und zuschaltbare Leistungen und Energiemengen je Aggregatgruppe.....	165
Tabelle 7.18:	Auswertung relevanter Kenngrößen zu NEA auf Kläranlagen (Schäfer et al. 2017a).....	166
Tabelle 7.19:	Potenzial positiver Flexibilität durch NEA im Ist-Zustand (nach Schäfer et al. 2017a).....	167
Tabelle 7.20:	Mögliche Entwicklung des Potenzials von NEA auf KA (nach Schäfer et al. 2017a).....	167
Tabelle 7.21:	Exemplarische Berechnung der Flexibilitätspotenziale ausgewählter Aggregate einer fiktiven Kläranlage (50.000 $EW_{\text{Anschluss}}$) für eine Bereitstellungszeit von $x = 4$ Stunden.....	170
Tabelle 7.22:	Zusammenfassung der Flexibilitätspotenziale der bundesweiten Kläranlagen (erweitert nach Schäfer et al. 2017a).....	171

Abbildungen und Tabellen im Anhang

Abbildung A- 1:	Erweitertes Fließschema der KA Radevormwald.....	202
Abbildung A- 2:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 70 min (6:40 Uhr bis 7:50 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	210
Abbildung A- 3:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 70 min (9:25 Uhr bis 10:35 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	210
Abbildung A- 4:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 90 min (7:00 Uhr bis 8:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	211
Abbildung A- 5:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 120 min (10:30 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b).....	211
Abbildung A- 6:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 110 min (10:40 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b).....	211
Abbildung A- 7:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 120 min (8:30 Uhr bis 10:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b).....	212
Abbildung A- 8:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 95 min (BB 1 und 3, 8:40 Uhr bis 10:15 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	212
Abbildung A- 9:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 105 min (BB 1 und 3, 11:15 Uhr bis 13:00 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	212
Abbildung A- 10:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 120 min (BB 1 und 3, 10:15 Uhr bis 12:15 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	213
Abbildung A- 11:	Abschaltversuch der RLS für 60min (9:30 Uhr bis 10:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	213
Abbildung A- 12:	Abschaltversuch der RLS für 60min (10:30 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)	213
Abbildung A- 13:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 60 min (10:35 Uhr bis 11:35 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	215
Abbildung A- 14:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 90 min (10:00 Uhr bis 11:30 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	215

Abbildung A- 15:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 120 min (10:15 Uhr bis 12:15 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	216
Abbildung A- 16:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 60 min (10:15 Uhr bis 11:15 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	216
Abbildung A- 17:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 90 min (09:50 Uhr bis 11:20 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	216
Abbildung A- 18:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 120 min (09:45 Uhr bis 11:45 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	217
Abbildung A- 19:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 60 min (10:30 Uhr bis 11:30 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b).....	217
Abbildung A- 20:	Abschaltversuche der RLS (30min, 60min, 120min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)	218
Abbildung A- 21:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 (15 min, 30 min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b).....	218
Abbildung A- 22:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b).....	218
Abbildung A- 23:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 (15 min, 30 min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b).....	219
Abbildung A- 24:	Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b).....	219
Abbildung A- 25:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 15 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)	219
Abbildung A- 26:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 30 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)	220
Abbildung A- 27:	Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)	220
Tabelle A- 1:	Vollständige Aggregatliste der KA Radevormwald	203
Tabelle A- 2:	Zusammengefasste Anlagenbelastung der Kläranlage Radevormwald (Bezugsjahr 2014)	207
Tabelle A- 3:	Spezifischer Stromverbrauch der KA Radevormwald im Vergleich	208
Tabelle A-4:	Spezifischer Stromverbrauch (Median) und prozentualer Anteil am Gesamtenergieverbrauch kommunaler Kläranlagen (Datenquelle: Kolisch et al. 2014 , nach Schmitt et al. 2017b).....	221
Tabelle A- 5:	Versuchsergebnisse der TE 1 - 4 im Rahmen der Untersuchungen zur Einbindung der Kläranlage Radevormwald in ein Virtuelles	

	Kraftwerk mit MRL/SRL-Signalen aus dem Jahre 2014 (nach Schmitt et al. 2017b).....	222
Tabelle A-6:	Übersicht der identifizierten Aggregate inkl. Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der Kläranlage Odenthal.....	223
Tabelle A-7:	Übersicht der identifizierten Aggregate inkl. Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der Kläranlage Odenthal.....	224
Tabelle A- 8:	Auszug ausgewählter Literaturstellen im Themenbereich Energiespeicher und Power-to-X-Technologien	225

Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen und Symbole

Zeichen	Bedeutung, Erläuterung
η_{el}	Elektrischer Wirkungsgrad
ΔH^0	Standardverbrennungsenthalpie
ΔW_i	Verschiebbare Energiemenge
$^{\circ}C$	Grad Celsius
a	Jahr
AbwV	Abwasserverordnung
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ASF	Abfiltrierbare Stoffe
ASMI	Activated Sludge Model 1
$B_{d,x}$	Fracht des Parameters x pro Zeiteinheit
BB	Belebungsbecken
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BSIG	Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BHKW	Blockheizkraftwerk
Bio-P	Biologische Phosphorelimination
BiomasseV	Biomasseverordnung
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BNetzA	Bundesnetzagentur
BSI-KritisV	Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz
BWK	Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau e.V.
C_x	Konzentration des Parameters x in der homogenisierten Probe
CH ₄	Methan
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSB	Chemischer Sauerstoffbedarf
d	Tag
DVGW	Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall
DESTATIS	Statistisches Bundesamt
DOE	Department of Energy (USA)
DR	Demand Response
DRRC	Lawrence Berkeley National Laboratory's Demand Response Research Center
DSM	Demand-Side-Management (Lastmanagement)

Zeichen	Bedeutung, Erläuterung
DWD	Deutscher Wetterdienst
eFG	Spez. Faulgasanfall
E	Einwohner
E _{el}	Elektrische Energie
E _{Primär}	Primärenergie
EE	Erneuerbare Energien
EEX	European Energy Exchange
EGW	Einwohnergleichwert (industriell + gewerblich)
EVS	Entsorgungsverband Saar
EW	Einwohnerwert (EW = EZ + EGW)
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
EMSR	Elektrisches Messen, Steuern und Regeln
EZ	Einwohnerzahl
F&E	Forschung und Entwicklung
Fe ²⁺	Eisen(II)-oxid
Fe ³⁺	Eisen(III)-oxid
FfE	Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft
FU	Frequenzumrichter
GAK	Granulierte Aktivkohle
GK	Größenklasse
GUD	Gas-und-Dampfturbinen-Kraftwerk
h	Stunde
H ₂	Wasserstoff
H _i	Heizwert
H ₂ O	Wasser
ifak	Institut für Automation und Kommunikation e.V.
ISV	Schlammindex
IT	Informationstechnik
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MP	Mischprobe
MUEEF	Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz
MULNV NRW	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen
MÜSE	Maschinelle Überschussschlammeindickung
MRL	Minutenreserveleistung
Nm ³	Normkubikmeter
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NEA	Netzersatzanlagen (Notstromaggregate)

Zeichen	Bedeutung, Erläuterung
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
NO ₃ -N	Nitratstickstoff
NRW	Nordrhein-Westfalen
NH ₄ -N	Ammoniumstickstoff
oTS	organischer Anteil der Trockensubstanz
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
p _b	Betriebsdruck
p _n	Standarddruck (1,01325 bar)
P	Phosphor
PAK	Pulveraktivkohle
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran (Elektrolyse)
PS	Primärschlamm
PtG	Power-to-Gas
PtH	Power-to-Heat
PtL	Power-to-Liquids
PtX	Power-to-X
PLS	Prozessleitsystem
ppm	parts per million (1 ppm = 1*10 ⁻⁶ = 0,000 001)
PRL	Primärregelleistung
Q _{Faulgas, gem}	Gemessene Faulgasmenge
Q _{Faulgas, norm}	normierte Faulgasmenge
RLS	Rücklaufschlamm
SBC	Schlammbehandlungszentren
SBR	Sequencing Batch Reactor
SRL	Sekundärregelleistung
SNG	Synthetic Natural Gas
t _{A, VK}	Aufenthaltszeit im Vorklärbecken
T _b	Betriebstemperatur
T _n	Standardtemperatur (273,15 K = 0 °C)
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TE	Technische Einheit
tectraa	Zentrum für innovative AbWassertechnologien an der Technischen Universität Kaiserslautern
TS	Trockensubstanzgehalt
TS _{BB}	Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken
TSB	Transferstelle Bingen
ÜNB	Übertragungsnetzbetreiber
ÜSS	Überschussschlamm

Zeichen	Bedeutung, Erläuterung
ÜW	Überwachungswert
V _{BB}	Volumen des Belebungsbeckens
V _{FB}	Faulbehältervolumen
V _{Gasspeicher}	Volumen des Gasspeichers
VDE	Verband der Elektrotechnik
VK	Virtuelles Kraftwerk

Bildnachweise und Nutzungsrechte

Wupperverband (2019): Luftbild Kläranlage Radevormwald. Urheber: Stadt Wuppertal. Gemäß Freigabe vom 09.04.2019.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung und Problemstellung

Wasser- und Energiesysteme sind eng miteinander verbunden, werden aber meist unabhängig betrieben und organisiert. Energie wird benötigt um Wasser zu reinigen, zu verteilen und zu nutzen – ebenso wird Wasser benötigt um Energie zu gewinnen und zu nutzen (DOE 2014). Die Siedlungswasserwirtschaft wird neben den klassischen Aufgaben, wie dem Gewässerschutz, dem Sicherstellen der Ver- und Entsorgungssicherheit sowie dem Überflutungsschutz, mit immer neuen Herausforderungen konfrontiert. Neben zusätzlichen Anforderungen an die Reinigungsleistung von Kläranlagen (z.B. die Entfernung von Mikroschadstoffen) gewinnt dabei seit Jahren die Forderung einer ressourcenschonenden und energieeffizienten Abwasserreinigung immer mehr an Bedeutung.

Aus energetischer Sicht zeichnen sich Kläranlagen durch eine Vielfalt an Prozessen aus, bei denen Energie bezogen, umgewandelt, gespeichert und produziert wird. Insbesondere die Erzeugung von Strom und Gas ist allerdings auf Kläranlagen fast ausschließlich zur Eigennutzung vorgesehen. Eine Interaktion nach außen erfolgt meist nur über den Fremdbezug elektrischer Energie. Diese Position steht im Gegensatz zu einer geforderten, und volkswirtschaftlich sinnvollen, zukünftig engeren Verbindung mit dem Energiesektor. Sowohl bei der Abwasserreinigung als auch bei der Energieversorgung handelt es sich um prioritäre (Grund-) Versorgungsaufgaben, die es sicherzustellen gilt, die aber nicht unbedingt die gleichen Ziele verfolgen.

Im Rahmen der Energiewende hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt seine Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % bis zum Jahr 2050 (bezogen auf das Jahr 1990) zu senken (Bundesregierung der BRD 2010). Auch im Koalitionsvertrag von 2018 wird die zentrale Orientierung in Verbindung mit den Zielen der Versorgungssicherheit, verlässlicher Bezahlbarkeit und Umweltverträglichkeit bekräftigt. Der Ausbau der Erneuerbaren Energieträger (EE) soll zudem deutlich erhöht (Anteil an EE von rund 65% bis 2030) und die Energiewende weiter vorangetrieben werden (Bundesregierung der BRD 2018). Die Energiewende beschreibt im Kern den Übergang von fossilen Energieträgern hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung durch EE. Die Grundpfeiler dieser Transformation bilden die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, die Reduzierung des Energiebedarfs sowie der Ausbau der Nutzung regenerativer Energiequellen (Wind, Sonne, Wasser, Biomasse, Geothermie etc.). Damit wird eine Neustrukturierung des Energiesektors und eine grundlegende Transformation der elektrischen Energieversorgung erforderlich (BMWI 2014; DENA 2014; Sterner und Stadler 2016).

Die zukünftige Stromversorgung wird sich im Gegensatz zu heute nicht mehr aus typischen Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastkraftwerken zusammensetzen, sondern wird stark dominiert durch die fluktuierende Erzeugung durch Photovoltaik und Wind (Elsner et al. 2015). Das Dargebot von Strom aus Wind und Sonne schwankt nach ihrem natürlichen Aufkommen und unterscheidet sich sowohl in ihrer Stromerzeugung als auch in ihrer lokalen, dezentralen Einspeisung in die verschiedenen Netzhierarchien grundlegend von der bisherigen Struktur der Stromerzeugung aus zentralen Großkraftwerken. Der Ersatz dieser Großkraftwerke erfolgt nicht im Übertragungsnetz, sondern der überwiegende Anteil der installierten EE-Anlagen speist dezentral in das Verteilnetz ein. Diese Verschiebung bringt die vorhandenen Betriebsmittel an ihre Kapazitätsgrenzen. Ein hierfür erforderlicher konventioneller Netzausbau ist jedoch mit hohen Investitionen verbunden (DENA 2014).

In einem solchen, durch volatile erneuerbare Energieerzeugungsanlagen getriebenen System müssen sogenannte Flexibilitätsoptionen dafür sorgen, dass Schwankungen in Stromerzeugung und -bezug ausgeglichen werden, da der Strombezug zu jedem Zeitpunkt mit der Last in Einklang stehen muss. Dies hat zur Folge, dass ein solches System Technologien benötigt, die sich flexibel dieser volatilen Einspeisung und dem Bedarf anpassen können. Dazu zählen entsprechende Kraftwerke, Speicher und abschaltbare Lasten sowie Technologien die Stromüberschüsse aufnehmen und nutzen können (Elsner et al. 2015). Die schwankende Diskrepanz zwischen Strom aus EE und dem Anteil aus fossilen Kraftwerken wird als Residuallast bezeichnet. Flexible Lasten können diese Residuallast glätten und somit die Integration von EE erleichtern, indem ein Abregeln von Strom aus Wind und Sonne bei einem Stromüberschuss im Netz reduziert wird. Dieser Effekt wird durch zunehmenden Ausbau an EE und die fehlende Flexibilität konventioneller Kraftwerke (Atom-, Braun- und Steinkohlekraftwerke) verstärkt. Kurzzeit-Flexibilität könnte nach Götz et al. (2016) bis zum Jahr 2035 (Ausbaugrad: 74% EE) die Stromschwankungen vollständig ausgleichen und teure Langzeitspeicherkosten deutlich reduzieren. Damit spielen Flexibilitätsoptionen eine zentrale Rolle bei der sicheren und kostengünstigen Transformation des elektrischen Versorgungsystems. Um die Vorhaben der Energiewende umzusetzen wird es nicht die eine Lösung geben. Die „neue Stromversorgung“ wird vielmehr getragen werden von einer Ansammlung aus verschiedenen Flexibilitätsoptionen aus den unterschiedlichsten Bereichen und Sektoren (Agora 2015).

Die mehr als 10.000 über ganz Deutschland verteilten Kläranlagen sind, als klassische Mittelspannungsverbraucher, hierbei interessante Optionen und lassen ein beachtenswertes Potenzial zum Einsatz in einem solchen Energiesystem vermuten. Insbesondere flexibel einsetzbare Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) und das Lastmanagement erweisen sich als vielversprechende Flexibilitätsoptionen zur Stabilisierung der Netze (Elsner et al. 2015). Beide Technologien können auf Kläranlagen eingesetzt und genutzt werden. Viele der Aggregate auf Kläranlagen werden ohnehin variabel betrieben, um trotz stark schwankender Zulauf- und Frachtmengen eine si-

chere Abwasserreinigung zu gewährleisten. Diese Kapazitäten vorhandener Stromverbrauchsaggregate bieten zusammen mit den Stromerzeugungsanlagen interessante Ansatzpunkte zur Bereitstellung von Flexibilität. Hierbei liegt vor allem eine „brachliegende Flexibilität“ vor, welche bisher ungenutzt ist, deren Nutzung aber technisch realisierbar erscheint. Diese nicht unwesentlichen Potenziale sind meist durch vorherrschende Regularien und Märkte finanziell unattraktiv und daher häufig noch weitgehend unerforscht (DENA 2017). Durch eine Veränderung dieses Umfeldes und dessen Rahmenbedingungen können neue Handlungsspielräume hinsichtlich der Ressourceneffizienz und dem wirtschaftlichen Einsatz von finanziellen Mitteln geschaffen werden. Dazu müssen allerdings die eigenen Fähigkeiten und die realistische Position, die in einem solchen Themenkomplex eingenommen werden kann, bekannt sein.

Zukünftig werden sich die Sektoren Abwasser- und Energiewirtschaft in Sachen Effizienz, verwendeten Technologien, Entscheidungsprozessen und der Nutzung von Energie vor Herausforderungen wiederfinden, deren Lösungen noch zu entwickeln sind. Soll die Siedlungswasserwirtschaft einen Beitrag zur Energiewende leisten, muss auch eine Anpassung der wasserwirtschaftlichen Anlagen erfolgen. Dies ist nicht nur unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, sondern auch unter der Betrachtung, dass in einem solchen flexiblen System unflexible Teilnehmer deutliche Benachteiligungen erfahren werden, da die Stromversorger etwaige Kosten auf den Kunden übertragen werden. Auf Verbraucherseite kann dies höhere Kosten im Strombezug bedeuten, wenn eine Verlagerung in günstige Stromtarifzeiten nicht möglich ist. Bei der Stromerzeugung können zu Niedrigpreisphasen die Erzeugungskosten nicht mehr gedeckt sein bzw. zu einem anderen Zeitpunkt könnte der erzeugte Strom wirtschaftlicher genutzt werden (BNetzA 2017).

Die Aufgabe hierzu ist in Anhang 1 B, Abs. 2 der Abwasserverordnung (AbwV) klar festgeschrieben und untermauert die weitergehende Auseinandersetzung mit dem Thema Energie auf Kläranlagen:

„Abwasseranlagen sollen so errichtet, betrieben und benutzt werden, dass eine energieeffiziente Betriebsweise ermöglicht wird. Die bei der Abwasserbeseitigung entstehenden Energiepotenziale sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, zu nutzen.“

(AbwV 2004)

In der Vergangenheit standen überwiegend Energieeinsparung, -effizienz und -nutzung im energetischen Fokus auf Kläranlagen (Hansen et al. 2007; Mergelmeyer et al. 2014; Dohmann und Schröder 2011). Mit der Ausweitung der Systemgrenze „Kläranlage“ wird die Siedlungswasserwirtschaft mit neuen, unterschiedlichsten interdisziplinären Belangen konfrontiert, deren Komplexität noch stärker als bisher umfassendes Expertenwissen außerhalb der jeweils klassischen Aufgabenfelder erfordert. Die zu erwartenden Veränderungen in den kommenden Jahren und Jahrzehnten erfordern

neue Instrumentarien, um positive Effekte aus den anstehenden Veränderungen generieren zu können. Dabei stellt die Auseinandersetzung mit Energiemärkten und deren unterschiedlichen Randbedingungen, den betroffenen Akteuren bei der Interaktion mit Energienetzen sowie die Kenntnis der eigenen Möglichkeiten zur Flexibilisierung eine große Herausforderung für die Betreiber von Kläranlagen dar.

1.2 Zielsetzung und Schwerpunkt der Arbeit

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit soll eine Schnittstellenbetrachtung zwischen Abwasser- und Energiewirtschaft erfolgen und untersucht werden, welche Rolle die Kläranlage in diesem Komplex einnehmen und wie sie unter Berücksichtigung ihrer primären Aufgabe, der Abwasserreinigung, ohne negative Umweltauswirkungen einen flexiblen Anlagenbetrieb umsetzen kann. Zur sachgerechten Bewertung der Flexibilität sind sowohl die Einsatzmöglichkeiten auf der Anlage als auch an den unterschiedlichen Märkten herauszuarbeiten. Es soll untersucht werden, ob Kläranlagen positive Beiträge zur Energiewende leisten können und eine weitergehende Interaktion als bisher mit dem Energiesektor möglich und sinnvoll ist.

Die vorliegende Arbeit verfolgt damit im Wesentlichen die folgenden Ziele:

- Aufdecken und Zusammenführen der relevanten Schnittstellen zwischen Abwasser- und Energiewirtschaft über eine Literaturrecherche zum Stand des Wissens
- Entwicklung eines strukturierten Vorgehens von der Identifikation typischer Aggregate auf Kläranlagen, bis zu ihrer Einbindung in ein Managementsystem zur Bereitstellung von Flexibilität unter Berücksichtigung ihrer individuellen Randbedingungen
- Entwicklung von Anforderungsprofilen an den Schnittstellen von energietechnischen, physikalisch-technischen und klärtechnischen Anforderungen an Aggregate und Prozesse auf Kläranlagen in Form von Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparametern
- Identifizierung von Problemfeldern, Auswirkungen sowie Ableiten von Lösungsansätzen und Strategieempfehlungen für eine flexible Nutzung der Aggregate für die vorherrschenden Prozesse und Verfahren auf Kläranlagen und deren Bewertung am Energiemarkt
- Erstellung einer fundierten Bestandsanalyse und einer Positionsbestimmung kommunaler Kläranlagen am Energiemarkt in Form einer Potenzialanalyse, in Bezug auf Stromerzeugung, Leistungsbereitstellung und verschiebbaren Energiemengen

1.3 Vorgehensweise

Die Gesamtstruktur sowie das Vorgehen zur Zielerreichung der vorliegenden Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

Zu Beginn erfolgt in Kapitel 2 zunächst eine Definition und Eruiierung der Möglichkeiten zur Bereitstellung von Flexibilität und deren Einsatzmöglichkeiten, mit speziellem Fokus auf Kläranlagen. Darüber hinaus werden die Grundlagen und der Kenntnisstand zur Bereitstellung von elektrischer Energie und Gas sowie des Energiebedarfs auf Kläranlagen zusammengetragen, dokumentiert und bewertet. Von besonderem Interesse ist dabei ebenfalls der aktuelle Sachstand zum Lastmanagement und des Lastabwurfs auf Kläranlagen sowie vorhandene Potenzialstudien zu diesem Themenkomplex.

Der im Rahmen der durchgeführten Literaturrecherche ermittelte Kenntnisstand stellt eine Grundlage zur Entwicklung eines methodischen Ansatzes zum flexiblen Kläranlagenbetrieb dar. In Kapitel 3 wird hierzu ein systematisches Vorgehen vorgestellt, das die verschiedenen Randbedingungen aus Energie- und Abwasserwirtschaft so miteinander verknüpft, dass eine Nutzung von Flexibilität durch Aggregate auf der Kläranlage ermöglicht wird. Wie in Abbildung 1.1 verdeutlicht, werden die einzelnen Schritte nicht immer strikt nacheinander abgearbeitet. Die vorgestellte Methodik ist entsprechend des Wissensgewinns bei der Methodenanwendung (Kapitel 4) iterativ entwickelt worden. Der Kern des Ansatzes bildet dabei das Identifizieren und Definieren von benötigten Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparametern, um einen anpassungsfähigen Betrieb unter Berücksichtigung der originären Aufgabe der Aggregate zu ermöglichen.

Im nächsten Schritt erfolgt die Darstellung der Anwendung der Methodik anhand der Kläranlage Radevormwald (Kapitel 4). Hierbei werden für identifizierte Aggregate das theoretische Flexibilitätspotenzial, dessen individuelle Randbedingungen und Einflussgrößen für einen flexiblen Betrieb durch eine detaillierte Analyse der entsprechenden Betriebsdaten und der Betriebsführung ermittelt und dargestellt. Darauf aufbauend werden Kenntnisse verschiedener prozessrelevanter Parameter gewonnen und als Restriktionen und Kontrollparameter beschrieben.

In Kapitel 5 erfolgt die Darstellung der Verifikation ausgewählter Aggregate zur flexiblen Nutzung und deren Kontrollgrößen anhand von Abschaltversuchen, modelltechnischen Simulationen und des Anschlusses an ein Virtuelles Kraftwerk.

Diese Überprüfung basiert auf Arbeiten die innerhalb des Forschungsprojektes *arrivee* gemeinsam mit den entsprechenden Projektpartnern durchgeführt wurden¹ (Kapitel 5.1 – 5.3).

Im Anschluss erfolgt in Kapitel 6.1 zunächst eine summative Evaluation des flexiblen Kläranlagenbetriebes. Hierbei werden mögliche Aus- und Wechselwirkungen auf die Aggregate, Prozesse und Verfahrenstechnik mit den abgeleiteten Erkenntnissen aus den eigenen Untersuchungen sowie dem Stand des Wissens kritisch reflektiert und ergebnisbewertend zusammengefasst. Aus dieser Synthese werden allgemein gültigere Einschätzungen für die verschiedenen Verfahrensstufen der Kläranlage getroffen. Neben der Definition von Anwendungsbereichen und (Leistungs-)Potenzialen werden angepasste Kennzahlen, Kontrollgrößen und Restriktionen abgeleitet und Empfehlungen zur Umsetzung eines anpassungsfähigen Anlagenbetriebes formuliert. Insbesondere die Entwicklung der Kennzahlen und der zusätzlich erforderlichen Restriktionen sowie eine mögliche Übertragbarkeit erfordern eine iterative Vorgehensweise, um den fortschreitenden Wissensgewinn zu berücksichtigen. Des Weiteren erfolgt eine Darstellung und Bewertung der aktuellen und sich abzeichnenden Nutzungsoptionen von Kläranlagenflexibilität im Energiesektor (Kapitel 6.2). Neben den bisherigen Untersuchungen zur (Kurzzeit-)Flexibilität erfolgt in Kapitel 6.4 eine Betrachtung der Kläranlage als Langzeitspeicheroption. Weiterhin werden Synergien, Potenziale und Vorteile der Kläranlage als lokales Energiezentrum aufgezeigt.

Kapitel 7 umfasst die energetische Positionsbestimmung der kommunalen Kläranlagen in Deutschland, welche das Anwendungspotenzial des in den vorigen Kapiteln entwickelten flexiblen Anlagenbetriebes verdeutlicht. Zunächst erfolgt eine Potenzialanalyse zur Stromerzeugung, welche neue Entwicklungen, die eine erhöhte Stromerzeugung zukünftig begünstigen dürften, berücksichtigt. Des Weiteren werden Flexibilitätspotenziale für die nutzbaren Energieerzeuger und -verbraucher auf Kläranlagen, in Form verfügbarer Leistungen und verschiebbarer Energiemengen, erhoben und bewertet.

Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst, Folgerungen für einen flexiblen Anlagenbetrieb abgeleitet und neben einem Ausblick der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt (Kapitel 8).

¹ Forschungsprojekt „*arrivee* - Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung“ gefördert vom BMBF (Projektlaufzeit: 04/2014 - 03/2017); vgl. Kapitel 1.4 (Schmitt et al. 2017b).

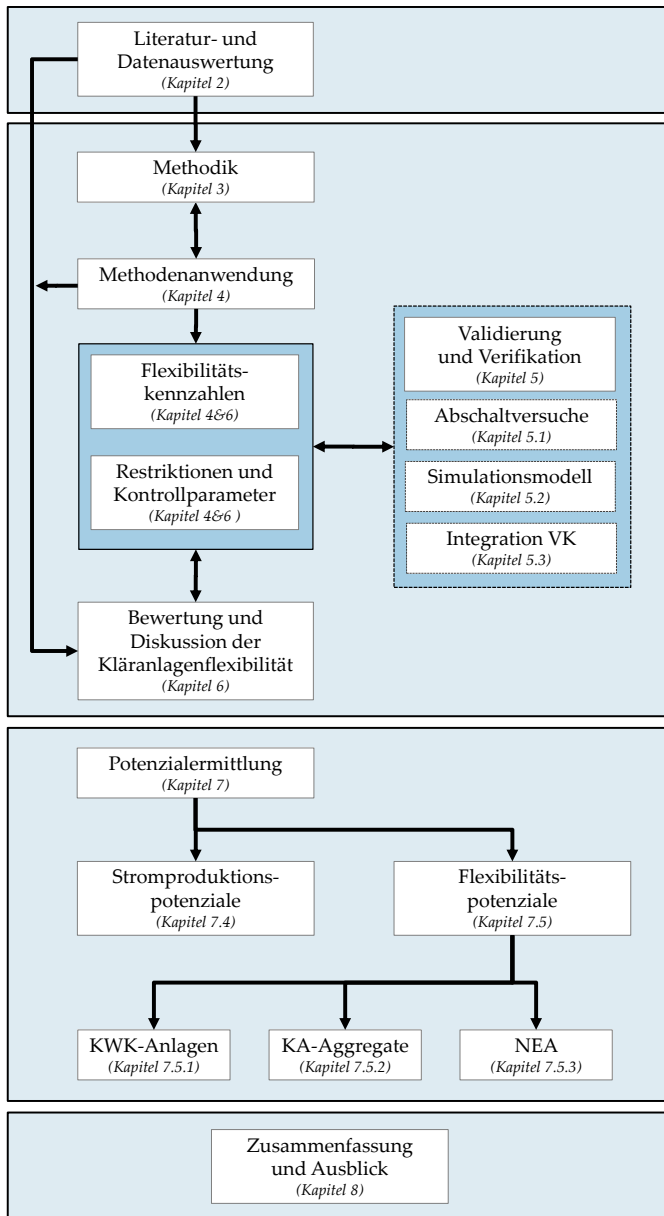


Abbildung 1.1 Gesamtconcept und Vorgehen

1.4 Das Projekt „*arrivee*“

Die vorliegende Dissertation ist im Wesentlichen über die Mitarbeit im BMBF-Verbundvorhaben „*arrivee* - Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung“ entstanden (Projektlaufzeit: 04/2014 - 03/2017). Das Vorhaben wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS gefördert (Az: WTER02023013). Teile dieser Arbeit sind in den im August 2017 vorgelegten Projektbericht eingeflossen (Schmitt et al. 2017b). Über die intensive Mitwirkung des Autors in allen Bereichen der Bearbeitung hinaus wurde im Projektbericht für die Themenfelder des flexibilisierten Anlagenbetriebs (Aggregatmanagement) und der Potenzialanalyse explizit die Einzelautorenschaft hervorgehoben. Im Wesentlichen betrifft dies die Kapitel 3, 4 und 6 für das Aggregatmanagement sowie Kapitel 7 für die Potenzialanalyse dieser Arbeit.

Des Weiteren sind verschiedene Projektergebnisse in Form von Publikationen in Fachzeitschriften, auf nationalen und internationalen Konferenzen und Tagungen vorgestellt und veröffentlicht worden. Die Veröffentlichungen sind im Literaturverzeichnis mit der (Co-)Autorenschaft „Schäfer, Michael“ aufgeführt.

2 Die Kläranlage an der Schnittstelle zwischen Wasser- und Energiewirtschaft

In diesem Kapitel werden grundlegendes Wissen und übergreifende Zusammenhänge der Themen (Ab-)Wasser und Energie näher dargestellt. Bereits in den 80er Jahren beschäftigte sich die Abwasserwirtschaft intensiv mit dem Thema Energie und der energetischen Optimierung von Kläranlagen. Die Aktualität der Thematik folgt dabei einem Trend, der sich am Kostendruck auf die Betreiber durch den Energiebezug nachvollziehen lässt. So führten die extremen Ölpreisanstiege ausgelöst durch die Ölpreiskrisen 1973 und 1979/80 zu einer massiven Auseinandersetzung mit dem Thema Energie auf Kläranlagen Anfang der 1980er Jahre (Dohmann und Schröder 2011). Nach einem Rückgang des Interesses erreichte die Thematik mit Erscheinen der ersten strukturierten Handlungsempfehlungen und Leitfäden zur Energieoptimierung Ende der 90er Jahre (bspw. Müller et al. 1999) eine Renaissance und erreichte ein neues Qualitätsniveau. Über den verstärkten Einsatz von Mess-, Steuer und Regeltechnik (MSR) sind seither neue und bessere Optimierungsansätze durch fundierte Datenanalysen möglich. Durch optimierte und effiziente Betriebsweisen lassen sich der Energiebezug verringern, der Kostendruck reduzieren und positive Effekte in Sachen Umweltschutz generieren. Vor diesem Hintergrund sind kontinuierlich Leitfäden, Ratgeber, Werkzeuge und Regelwerke entstanden und weiterentwickelt worden, die die Bedeutung des Energiemanagements verdeutlichen (u.a. Müller et al. 1999; UBA 2008; Baumann et al. 2014; DWA 2015a).

Heute ist im Rahmen der Energiewende die Interaktion mit Energienetzen (u.a. Schäfer et al. 2015b; Schmitt et al. 2017a; Engelhart et al. 2018), bei einem bestmöglichen Umgang mit den vorhandenen Ressourcen und Energieformen auf Kläranlagen aktueller denn je, was sich auch in der Vielzahl aufgelegter F&E-Förderprogramme, Arbeitskreise und Neuauflagen einschlägiger Fachliteratur (z.B. Pinnekamp et al. 2018) widerspiegelt. Dabei ist nicht nur der Energiebedarf von bedeutender Rolle, sondern auch die Erzeugung, Wiedergewinnung, Speicherung und besonders die vielfältige Nutzung der unterschiedlichen Energieformen.

2.1 Die Energiewirtschaft im Wandel

2.1.1 Definitionen und begriffliche Abgrenzungen

Wie in Kapitel 1.1 bereits beschrieben sind flexible Erzeuger und Verbraucher am Strommarkt zur Transformation des Stromversorgungssystems im Rahmen der Energiewende von großer Bedeutung. Damit gewinnt mit fortschreitendem Ausbau der EE die Bereitstellung von Flexibilität zunehmend an Relevanz (Agora 2015).

Sowohl im täglichen Gebrauch als auch in der Fachliteratur werden unter dem Begriff der „Flexibilität“ unterschiedliche Sachverhalte und Eigenschaften verstanden. Von der Betriebswirtschaft über die Mathematik und Physik bis hin zur Energietechnik wird dieser teils unterschiedlich verwendet und ist je nach tangiertem Themenfeld entsprechend anders belegt und definiert.

Laut Duden ist er wie folgt definiert:

- „1. flexible Beschaffenheit; Biegsamkeit, Elastizität
2. Fähigkeit des flexiblen, anpassungsfähigen Verhaltens“

(Duden online 2017)

Im Kontext der Energiewende und der daraus resultierenden Systemumgestaltung der Energienetze ist Flexibilität einer der am meisten verwendeten Begriffe im Energiesektor (DENA 2017). Oftmals wird unter Energieflexibilität nur die Anpassung von Stromerzeugern verstanden, was unter den heutigen Rahmenbedingungen nicht mehr vollständig zutreffend ist (Meese et al. 2016). Denn Flexibilität umfasst Managementmaßnahmen und somit Prozesse, die elektrische Energie einsetzen (Sterner und Stadler 2016). Daher wird im allgemeinen Zusammenhang in der Energieversorgung unter Flexibilität die Fähigkeit einer technischen Anlage verstanden, aufgrund eines Signals die elektrische Leistungsaufnahme/-abgabe für eine begrenzte Zeit zu variieren. Damit stellt Flexibilität den Gegenpart zur Netzstabilisation der volatilen Erneuerbaren Energien dar (Agora 2015).

In Bezug auf die Siedlungswasserwirtschaft und insbesondere für die Abwasserreinigung in der Kopplung mit dem Energiesektor bedarf es daher ebenfalls einer näheren Definition und konkreteren begrifflichen Abgrenzung unter Einbeziehung der speziellen Randbedingungen, die auf Kläranlagen vorherrschen. Obwohl Unterschiede auf den ersten Blick nur marginal erscheinen, sind gerade diese von entscheidender Bedeutung. In Anlehnung an DENA (2017) werden im Sinne dieser Arbeit die nachstehenden Festlegungen getroffen:

Der Begriff „Flexibilität“ umfasst als Sammelbegriff:

- Lastmanagement: Die angepasste und flexible Nutzung von Verbrauchern und Prozessen durch Vermeidung und Verschiebung von Lasten zu definierten Zeiten.
- Einspeisemanagement: Der bedarfsgerechte und effiziente Betrieb von Stromerzeugungsanlagen zur Glättung von Lastspitzen und die Reaktion auf externe Anforderungen/Signale.
- Speichermanagement: Die Speicherung von Energie (vornehmlich Gas) zur Entkopplung starrer Prozesse.

Die Bereitstellung von Flexibilität kann in zwei Richtungen erfolgen:

- a) Positive Flexibilität: Die Reduktion des Strombezugs durch Verbraucher und/oder Erhöhung der Leistung von Stromerzeugern.
- b) Negative Flexibilität: Zum einen das gezielte Zuschalten von Verbrauchern zur Erhöhung des Strombezugs und/oder die Verminderung der Stromerzeugung durch die Erzeugungsanlagen.

Auf den Begriff des Lastmanagements muss ebenfalls näher eingegangen werden. Hierbei erfolgt kein Verzicht des Verbrauchers auf seinen Strombezug, sondern dieser holt diesen später lediglich nach. In dieser ersten Situation wird also auf ein Angebotsdefizit durch eine Senkung des Verbrauchs reagiert, was stabilisierend auf den Markt wirkt. Es erfolgt dabei keine Einsparung von Energie, sondern eine zeitliche Verschiebung. Dadurch wird in einer zweiten Situation die Nachfrage erhöht und ggf. auf ein Überangebot im Netz reagiert (Agora 2015). Durch jede zeitlich verschobene Energieeinheit kann durch Lastmanagement eine Teilfunktion eines Energiespeichers (als Ausspeichereinheit) erfüllt werden und somit können Kläranlagen die Funktion eines Energiespeichers durch die Bereitstellung von Flexibilität erfüllen. Eine gängige Unterscheidung ist dabei in Kurzzeit- und Langzeitspeicher. Der Anspruch an Kurzzeitspeicher besteht in der Bereitstellung von häufigen Lade-/Entladezyklen und hohen Wirkungsgraden zum Ausgleich von kurzfristigen Schwankungen. Zeitlich klassifiziert werden sie im Bereich von Sekunden bis 24 Stunden (Tagesspeicher). Darüber hinaus wird von Langzeitspeicher gesprochen, deren Aufgabe darin besteht über Tage, Wochen und bis hin zu mehreren Monaten und Jahren ihre Ladung mit geringen Energieverlusten zu halten, um saisonale Schwankungen (Windflauten und Dunkelperioden) auszugleichen (Sterner und Stadler 2016).

Zur Definition von Lastmanagement (engl. „Demand-Side-Management; DSM“) und Lastverschiebung (engl. „Demand-Response; DR“) finden sich ebenfalls unterschiedliche Auslegungen und keine einheitliche Definition. Beispielsweise definiert die Europäische Kommission nur eine Verbrauchsreduktion als Laständerung, während das Department of Energy (DOE) der USA jede Art einer Änderung des Energieverbrauchs als Laständerung ansieht. Beide Definitionen sehen DR als Reaktion auf ein

externes Signal in Form einer Dienstleistung an, welches auch für das DSM gilt (DENA 2016b). Für die vorliegende Arbeit wird unter Lastmanagement die direkte Beeinflussung des Energieverbrauchs durch gezieltes Zu- und Abschalten von Verbrauchslasten, unabhängig ob dies aus internen Gründen (z.B. Spitzenlastmanagement) oder aufgrund externer Signale (z.B. Regelleistungsabruf) erfolgt, verstanden. Dies entspricht weitestgehend den Definitionen der Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE; vgl. FfE 2016) und des Verbands der Elektrotechnik (VDE; VDE/ETG 2012, zitiert in Styczynski und Sauer 2015). Weitere Hinweise und Grundlagen zum DSM sind beispielsweise in DENA (2016b) gegeben.

Hierbei ist klar zu unterscheiden zwischen Energieeffizienz, die darauf abzielt einen gewissen Nutzen bei geringerem Energieverbrauch zu erreichen, und dem Lastmanagement, das auf die Veränderung des Lastprofils abzielt ohne die tatsächlich benötigte Energiemenge zu beeinflussen.

2.1.2 Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität und Interaktion mit Energienetzen

Die Einsatzmöglichkeiten von Flexibilität sind vielfältig und nicht auf ein Anwendungsgebiet beschränkt. Sie geben den groben Rahmen der Anforderungen an flexibel nutzbare Aggregate von Seiten des Energiesektors, in Form der Interaktion mit den Energienetzen, vor. In DENA (2017) sowie FfE (2016) ist eine Vielzahl von Nutzungsoptionen aufgeführt und beschrieben. Eine Gruppierung lässt sich, in Anlehnung an BDEW (2015), in drei Bereiche vornehmen: marktdienlich, systemdienlich und netzdienlich (vgl. Abbildung 2.1).

Die Randbedingungen der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten sind sehr dynamisch und unterliegen ständigen Veränderungen bedingt durch technologischen Fortschritt sowie politische und rechtliche Anpassungen. Die Rahmenbedingungen einer Nutzung untereinander unterscheiden sich dabei teils erheblich. Nachfolgend sind in Kurzform die für die Abwasserwirtschaft interessanten Einsatzmöglichkeiten zum Stand 2017/2018 dargestellt und näher erläutert.

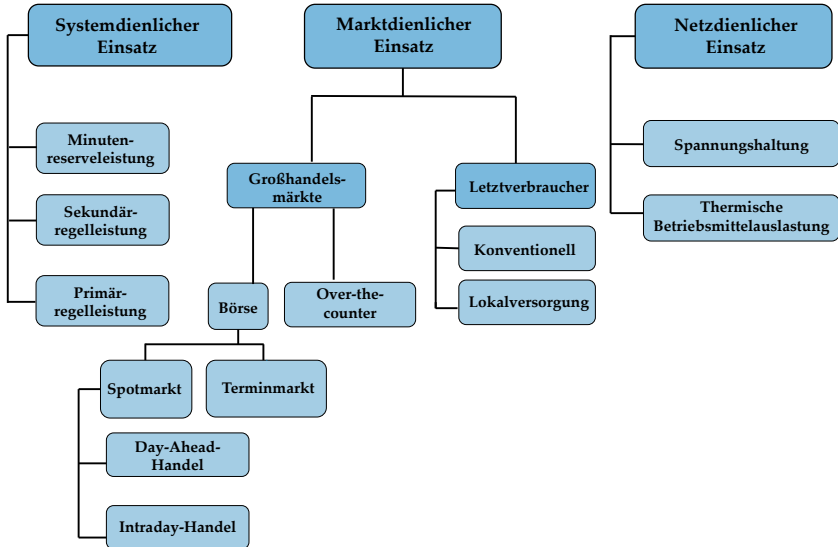


Abbildung 2.1: Unterschiedliche Einsatzbereiche für Flexibilität (nach BDEW 2015; FfE 2016; DENA 2017)

2.1.2.1 Marktdienlicher Einsatz

Der marktdienliche Einsatz von Flexibilität umfasst hauptsächlich den Handel von elektrischer Energie. Darunter fallen der Terminhandel für z.B. langfristige Stromverträge und der kurzfristige Spothandel von Strom. Bei Letzterem stehen kurzfristige Lieferungen im Fokus, die sich in zwei Kategorien einordnen:

- **Day-Ahead-Auktion:** Handel von Stromprodukten bis 12:00 Uhr am Vortag der Lieferung. Der Zuschlag erfolgt für einzelne Stundenangebote nach Handelschluss in einer Merit-Order-Kurve² (EPEXspot 2017; FfE 2016).
- **Intra-Day-Auktion:** Untertägiger Handel bis 15 Minuten vor physischer Lieferung, dient hauptsächlich der Fahrplanoptimierung. Die Preisfindung erfolgt nach dem Pay-as-bid-Verfahren³ (EPEXspot 2017; FfE 2016).

² Beim Merit-Order-Verfahren erfolgt die Preisbildung durch eine Aufreihung der Bietenden nach aufsteigenden Grenzkosten. Der Preis für alle bezuschlagten Gebote wird durch den Letztbietenden zur Nachfrageerfüllung festgelegt (Graeber 2014).

³ Beim Pay-as-bid-Verfahren bzw. Gebotspreisverfahren wird genau der Zuschlagspreis erhoben der bei der jeweiligen Transaktion geboten wurde (Ockenfels et al. 2008).

Die unterschiedlichen Produkte werden an Energiebörsen, wie beispielsweise der EEX (European Energy Exchange) gehandelt. An der EEX mit Sitz in Leipzig wird der überwiegende Teil des Stromhandels für Deutschland/Österreich, Frankreich und der Schweiz abgewickelt (FfE 2016). Die nachfolgenden Ausführungen beruhen daher auf den entsprechenden Regularien und Marktdaten. Die detaillierten Marktregeln sind z.B. EPEXspot (2017) und EEX (2017) zu entnehmen. Die Eigenschaften des Spot- und Terminhandels sind in Tabelle 2.1 näher ausgeführt. Über einen Energiehändler ist es für Dritte möglich sich am Stromhandel zu beteiligen ohne sich ein vollumfängliches Expertenwissen aneignen und alle benötigten Zulassungen durchlaufen zu müssen.

Tabelle 2.1: Eigenschaften von Spot- und Terminbörsen (nach Riedel Martin, Zander, Wolfgang 2012, zitiert in Schmitt et al. 2017a)

	börslicher Spothandel	börslicher Terminhandel
Fristigkeit	kurz (<i>Day-Ahead, Intra-Day</i>)	lang (<i>Week-, Month-, Quarter-, Year-Ahead</i>)
Produkte	Tage, Stunden (<i>Einzelstunden, Blöcke</i>)	Wochen, Monate, Quartale, Saison, Jahre
Motivation/ Zweck	Absicherung gegen Mengenrisiken physische Erfüllung	Absicherung gegen Preisrisiken (<i>Hedging</i>), spekulative Gewinne, finanzielle Absicherung
Vertrags- erfüllung	physische Lieferung der Ware	finanzieller Ausgleich
Preisbildung	fortlaufender Handel beidseitiges Auktionsmodell	fortlaufender Handel mit Anfangs- und Schlussauktion

Durch die volatile Energieerzeugung aus EE entstehen fluktuierende Preise an den Märkten, die entsprechend genutzt werden können, um eine Kostenreduktion durch optimierten Stromeinkauf und angepasste Eigenproduktion zu erreichen. Des Weiteren sind zukünftig dynamische Stromtarife möglich, die durch verbrauchs- und erzeugerseitige Flexibilität einen systematisch niedrigeren Durchschnittspreis beim Energiebezug ermöglichen.⁴ Solche Modelle könnten zukünftig auch für kleine und mittlere Verbraucher zur Verfügung stehen (Meese et al. 2015a). Bereits heute können Kosten durch Spitzenlastmanagement gesenkt werden (vgl. Kapitel 2.4), indem Verbrauchsspitzen vermieden werden. Über die Ausnutzung von Preisunterschieden an den Märkten (Arbitrage) ist es ebenfalls möglich zusätzliche Erlöse oder eine Kostensenkung zu generieren (Graeber 2014).

⁴ Dynamische Stromtarife für die Industrie wurden z.B. im Forschungsprojekt „Happy Power Hour“ untersucht (Meese et al. 2015a).

Weiter denkbar ist der Einsatz zur Bilanzkreisoptimierung. Unter einem Bilanzkreis wird ein virtuelles Energiemengenkonto zum Ordnen des Strommarktes zur Vermeidung von Über- bzw. Unterproduktion verstanden. Der Bilanzkreisverantwortliche (i.d.R. der Stromhändler) ist verpflichtet auf Prognosemodellen basierende Fahrpläne für jeden Erzeuger und Verbraucher sowie zum Strom An- und Verkauf in seinem Bilanzkreis an den Bilanzkreiskoordinator (i.d.R. der Übertragungsnetzbetreiber; ÜNB) zu übermitteln. Er hat sicherzustellen, dass zu jeder Viertelstunde die Leistungsbilanz ausgeglichen ist (StromNZV 2016). Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Energiemengen müssen durch Ausgleichsenergie bilanziell ausgeglichen werden. Durch die Aufnahme von flexiblen Aggregaten in das Portfolio des Stromhändlers kann dieser besser reagieren, um den Bilanzkreis auszugleichen, indem er kurzfristig Strom an- bzw. verkauft. Kommt es dennoch zu einem Bilanzungleichgewicht, muss die physische Balance mit Hilfe von Regelleistung (vgl. Kapitel 2.1.2.2) hergestellt werden (FfE 2016).

Neben dem börslichen Handel existiert noch der direkte Stromhandel (Over-the-counter; OTC), bei dem außerbörslich bilateral zwischen Brokern hauptsächlich längerfristige Tages- bzw. Wochenprodukte im Namen der Kunden gehandelt werden. Durch die geringe Regulierung und Intransparenz ist dieser Markt mit deutlich mehr Risiko verbunden, bietet allerdings auch mehr Freiheit in der Vertragsgestaltung (Graeber 2014).

2.1.2.2 Systemdienlicher Einsatz

Flexibilität kann nicht nur auf dem Stromgroßhandelsmarkt angeboten werden, sondern auch zur Bereitstellung von sogenannten Systemdienstleistungen genutzt werden. Neben der Verteilung und Übertragung von elektrischer Energie zum Anschlussnutzer sind die Netzbetreiber verpflichtet den Netzbetrieb in ausreichender Qualität sicherzustellen. Dies erfolgt über Leistungen die zur Stabilisierung und Aufrechterhaltung der Stromversorgung eingesetzt und als Systemdienstleistungen bezeichnet werden. Neben der Frequenzhaltung gehören hierzu die Spannungshaltung, der Versorgungswiederaufbau und die System-/Betriebsführung der Stromnetze (VDN 2007a).

Während prognostizierbare Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch über die Strombörse ausgeglichen werden können, benötigen die ÜNB Regelleistung (bzw. Regelenergie) zum Ausgleich von kurzfristigen, unvorhergesehenen Ereignissen. Regelleistung ist die physikalische Bereitstellung von Leistung und Arbeit und dient der Erhaltung der Soll-Frequenz von 50 Hertz auf der Übertragungsebene. Die Diskrepanzen im Netz entstehen beispielsweise durch Ausfälle von Kraftwerken oder Prognoseabweichungen in der Erzeugung von Strom aus EE. Für den sicheren und zuverlässigen Betrieb der Stromnetze sind die ÜNB in ihrer jeweiligen Regelzone verantwortlich (Consentec 2014). In Deutschland gibt es vier Regelzonen bzw. Übertragungsnetzbetreiber: Tennet TSO, 50Hertz Transmission, Amprion und TransnetBW.

Regelleistung wird, analog zur Flexibilität ebenfalls, in positive und negative Richtung und nach drei Qualitäten unterschieden, die den ÜNB zur Frequenzhaltung als Instrument zur Verfügung stehen:

- **Primärregelleistung (PRL):**
Die PRL dient der Wiederherstellung des physikalischen Gleichgewichts zwischen verbrauchter und erzeugter Leistung innerhalb von Sekunden, also dem Erhalt der Netzfrequenz innerhalb der zulässigen Grenzwerte. Die Bereitstellung erfolgt im Solidaritätsprinzip aller ÜNB (VDN 2003).
- **Sekundärregelleistung (SRL):**
Die SRL hat ebenfalls das Ziel das physikalische Gleichgewicht zwischen verbrauchter und erzeugter Leistung wiederherzustellen – allerdings in der entsprechenden Regelzone. Des Weiteren erfolgt eine Wiederherstellung der Frequenz-Soll-Werte zwischen den Regelzonen, damit die aktivierte PRL wieder als Reserve zur Verfügung steht (VDN 2009).
- **Minutenreserveleistung (MRL):**
Die MRL wird zur Wiederherstellung des freien Sekundärregelbandes eingesetzt und löst bei andauernder Störung von länger als 15 Minuten die SRL ab. Zusätzlich werden Leistungsdefizite durch Lastabweichungen oder Kraftwerksausfälle ausgeglichen (VDN 2007b). Die zu erbringenden technischen Anforderungen sind hierbei deutlich geringer als bei der PRL und der SRL und die Aktivierung erfolgt nicht über ein Regelsignal der ÜNB, sondern über eine Fahrplanänderung des Erzeugers (FfE 2016).

Eine vereinfachte Darstellung der Regelleistungsformen ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

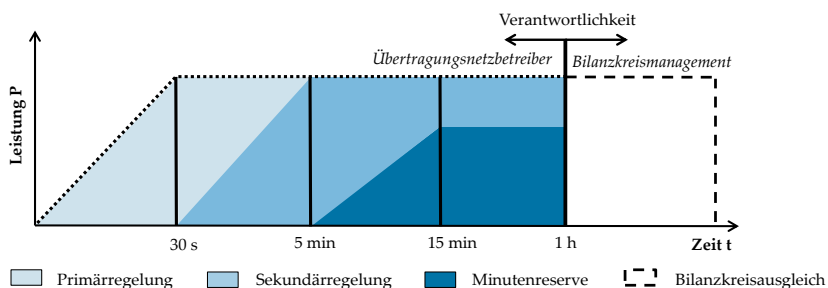


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Regelleistungsarten (nach Consentec 2014; VDN 2007a; VDN 2003, 2009, 2007b; Stand: 2017)

In Tabelle 2.2 sind die unterschiedlichen Arten von Regelleistung und deren Eigenschaften (Stand: 2017) näher aufgeführt.

Tabelle 2.2: Arten von Regelleistung und deren Eigenschaften (nach Consentec 2014; VDN 2007a; VDN 2003, 2007b, 2009; Stand: 2017)

	PRL	SRL	MRL
Aktivierung	< 30 Sek. (durch den ÜNB)	< 5 Min. (durch den ÜNB)	< 15 Min. (durch Fahrplanlieferung des Anbieters)
Ausschreibungszeitraum	Wöchentlich	Wöchentlich	täglich
Vergabe	Leistungspreis-Merit-Order	Leistungspreis-Merit-Order	Leistungspreis-Merit-Order
Produktzeitscheiben	Keine (gesamte Woche)	HT: werktags, 8-20 Uhr, ohne Feiertage; NT: restlicher Zeitraum	6 x 4h-Blöcke pro Tag
Vergütung	Pay-as-bid (Leistungspreis)	Pay-as-bid (Leistungs- und Arbeitspreis)	Pay-as-bid (Leistungs- und Arbeitspreis)
Produktdifferenzierung	Keine (symmetrisches Produkt)	Positive / negative SRL	Positive / negative MRL
Mindestgebotsgröße	1 MW _{el}	5 MW _{el}	5 MW _{el} (bis max. 25 MW _{el})
Angebotsinkrement	1 MW _{el}	1 MW _{el}	1 MW _{el}
Abrufdauer	30 Sek. - 15 Min.	5 Min - 4 Std.	15 Min - 4 Std.
Änderungsgeschwindigkeit	automatische Aktivierung nach Frequenzabweichung (Genauigkeit ± 10 mHz)	min. 2 %/Minute d. Nennleistung	min. 2 %/Minute d. Nennleistung

Die Eignung zur Teilnahme an der Vergabe von Regelleistung wird Präqualifikation genannt und ist im Allgemeinen im Transmissionscode (VDN 2007a) der ÜNB geregelt. In detaillierter Form jeder Regelleistungsart sind die definierten Anforderungen an die Aggregate des technischen Nachweises zur Erbringung von Regelleistung in dessen Anhang D (VDN 2003, 2009, 2007b) näher beschrieben. Die Ausschreibungsverfahren sind durch die Beschlusskammer 6 der Bundesnetzagentur (BNetzA) festgeschrieben.

2.1.2.3 Netzdienlicher Einsatz

Der netzdienliche Einsatz von Flexibilität findet auf der Ebene der Verteilnetze statt und dient der Vermeidung kritischer Netzzustände, z.B. durch lokale Grenzwertverletzungen und die damit verbundene thermische Überlastung der Betriebsmittel bzw. Leitungen (BDEW 2015). Im Zuge der Energiewende werden diese Grenzwertverletzungen durch den weiteren Zubau von fluktuierenden EE zunehmen und einen teuren Netzausbau zur Folge haben. Dieser Netzausbau wird je nach betrachtetem Szenario und Studie mit ca. 23 bis 49 Mrd. € beziffert (DENA 2012a; BMWI 2014). Er lässt sich mit innovativen Technologien sowie Betriebsmitteln und -konzepten verringern. Grundvoraussetzung für einen dynamischen netzdienlichen Einsatz von flexiblen Lasten und Erzeugern ist die Überwachung des Netzzustandes mit sogenannten Smart-Grid-Systemen (DENA 2017). Dies kann einen lokalen Netzausbau verhindern oder reduzieren (VDE 2014; BDEW 2015). Dazu ist allerdings zusätzliche Sensorik und eine „Live-Überwachung“ der Mittel- und Niederspannungsnetze erforderlich, die von den üblichen Planungs- und Betriebskonzepten abweicht. Kläranlagen der GK 3 bis 5 sind überwiegend am Mittelspannungsnetz angeschlossen und können somit den jeweiligen Anschlussstrang sowie den Transformator im Umspannwerk beeinflussen, sind allerdings in ihrem netzdienlichen Einsatz auch auf diesen begrenzt (vgl. Kapitel 6.2.2; Schmitt et al. 2017b).

Zu einer netzdienlichen Nutzung sind derzeit keine Marktregularien definiert und somit kein aktiver Markt vorhanden (vgl. VDE 2014; Schmitt et al. 2017b). Insbesondere auf der Verteilnetzebene ergeben sich große regulatorische Hemmnisse, die mit den daraus resultierenden Randbedingungen noch zu klären sind (BNetzA 2017). Vorschläge für eine Ausgestaltung einer solchen Netznutzung werden beispielsweise in VDE (2014) und DENA (2017) gegeben und sind Bestandteil der aktuellen Forschung im Bereich der Verteilnetze (z.B. Meese et al. 2015b; Kornrumpf et al. 2016). Weitere Hinweise zum Forschungsbedarf auf Verteilnetzebene sind bspw. in DENA (2016b) beschrieben.

2.1.2.4 Beteiligung über Virtuelle Kraftwerke

Flexibilität kann unter bestimmten Voraussetzungen prinzipiell von jedem Anlagenbetreiber selbst vermarktet werden. Die Marktzugangsvoraussetzungen in Form von Mindestgebotsgrößen übersteigen allerdings teilweise deutlich die auf wasserwirtschaftlichen Anlagen vorhandenen Größenordnungen und verhindern eine direkte Teilnahme der meisten Kläranlagen. Des Weiteren ist der damit verbundene Aufwand für die Mehrheit der Betreiber unverhältnismäßig und im laufenden Betrieb kaum zu realisieren. Für die meisten Betreiber lohnt sich daher die Vermarktung über einen spezialisierten Dienstleister, der einen Marktzugang mit Hilfe von Virtuellen Kraftwerken (VK) ermöglicht (Schmitt et al. 2017b). Unter dem Konzept eines VK wird der informationstechnische Zusammenschluss (kleiner) dezentraler Erzeugungsanlagen, Verbraucher und Speicher zu einem zentral gesteuerten Verbund („Pool“) verstanden

(ASUE 2010). Ein solcher Anlagenpool kann sich grundsätzlich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Anlagen zusammensetzen, die mit Hilfe einer übergeordneten Steuerzentrale verbunden und über einen Poolbetreiber extern verwaltet werden. Das Ziel eines VK ist die Vermarktung des Stroms sowie die Bereitstellung von Systemdienstleistungen. Die Einbindung von VK in den Energiemarkt bietet einige Vorteile gegenüber Großkraftwerken, da sie u.a. deutlich schneller und flexibler agieren können. Des Weiteren wird gesichert elektrische Energie auf dezentraler Ebene mit unterschiedlichen Technologien zur Verfügung gestellt (You et al. 2010, Neusel-Lange und Zdrallek 2015). Zusätzliche Aufwendungen entstehen durch die zentrale Steuerung durch einen Poolbetreiber und die benötigte Kommunikationstechnologie (Schaumann und Schmitz 2010). Im Beschluss BK6-06-066 (BNetzA 2010) der BNetzA werden die ÜNB explizit verpflichtet Regelleistungspools an den Ausschreibeverfahren zu zulassen. Somit können auch kleine und mittlere Anlagen, trotz Mindestangebotsgrößen (bspw. für Regelleistung; siehe Tabelle 2.2), unter den aktuellen Randbedingungen Regelleistung über VK anbieten und daran profitieren.

Ausführliche Beschreibungen, umgesetzte Projekte und Betriebskonzepte für VK sind in der Literatur beschrieben (u.a. Arndt et al. 2006, Schaumann und Schmitz 2010, ASUE 2010).

2.2 Energiebereitstellung durch Kläranlagen

Die Grundlage zur Erzeugung von (elektrischer) Energie auf Kläranlagen ist die chemisch gebundene Energie in der Biomasse bzw. den organischen Stoffen (Klärschlamm). Klärschlamm besitzt aufgrund seines hohen Gehaltes an organischen Kohlenstoffverbindungen und der darin gespeicherten Energie eine zentrale Bedeutung für die Energiebereitstellung durch Kläranlagen. Als mengenmäßig größtem „Reststoff“ kommt ihm eine wesentliche Rolle im Rahmen der Klärschlammbehandlung und -verwertung zu. Die wesentlichen Ziele sind die Stabilisierung des Klärschlammes, die Reduzierung des Wassergehaltes durch Entwässerung und die Reduzierung des organischen Anteils der Feststoffe im Rohschlamm⁵ (DWA 2014). Auf mittleren bis großen Anlagen (GK 3 bis 5) ist das gängige Verfahren hierzu die anaerobe Schlammbehandlung (vgl. Kapitel 7.3.6). Als Nebenprodukt entsteht dabei Faulgas, das überwiegend aus Methan (ca. 65% CH₄) und Kohlendioxid (ca. 35% CO₂) besteht, welches mittels Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) energetisch genutzt werden kann (Weichgrebe 2015; Seyfried et al. 2015).

⁵ Als Rohschlamm/Frischschlamm wird üblicherweise der nicht eingedickte bzw. nicht ausgefaulte Schlamm aus Vorklärung und Überschussschlamm bezeichnet.

2.2.1 Anaerobe Schlammstabilisierung

Das dominierende Verfahren zur anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm ist die mesophile Schlammfäulung (Kahn 2007; Seyfried et al. 2015). Darunter werden anaerobe Prozesse, also unter Ausschluss von Sauerstoff, verstanden, die in einem geschlossenen Reaktor (z.B. Faulturm) stattfinden (Gujer 2007; Seyfried et al. 2015). Der anfallende, meist voreingedickte Klärschlamm wird zunächst auf das Temperaturniveau des Faulreaktors von ca. 35°C angehoben (mesophiler Bereich: 15°C – 45°C). Dies geschieht bspw. mittels Wärmetauscher durch einen Heizkessel oder durch die Nutzung von Prozesswärme, die beim Verstromen des Faulgases im Blockheizkraftwerk (BHKW) entsteht (DWA 2014). Der anaerobe Abbau des Substrates erfolgt durch eine Vielzahl von mikrobiologischen Abbauprozessen im Faulturm in vier Stufen: Hydrolyse – Acidogenese – Acetogenese – Methanogenese. In Tabelle 2.3 sind die einzelnen Prozesse des anaeroben Abbaus vereinfacht beschrieben. Der organische Anteil (oTS) im Faulschlamm wird durch den anaeroben Abbau um rund 50% reduziert und dabei entsteht Faulgas. Die benötigte Aufenthaltszeit dazu beträgt 15 bis 30 Tage (Gujer 2007). In der Praxis liegen oftmals deutlich höhere Verweilzeiten von über 40 Tagen vor, was deutliche Kapazitätsreserven in den vorhandenen Faulraumvolumina vermuten lässt (UBA 2008; Knerr et al. 2016).

Tabelle 2.3: Prozessschritte des anaeroben Abbaus (nach Gujer 2007; Weichgrebe 2015; Seyfried et al. 2015)

Prozess	Beschreibung
(1) Hydrolyse	Aufspaltung von partikulären Substanzen und hochmolekularen org. Verbindungen in niedermolekulare Komponenten (Mehr- und Einfachzucker, Aminosäuren, langkettige Fettsäuren) durch Enzyme (Hydrolasen).
(2) Acidogenese (<i>Versäuerung</i>)	Fermentation/Vergärung der Hydrolyseprodukte (primärer Gärungsprozess) in organische Säuren (Acetat, Butyrat, Propionat) und Bildung von kurzkettigen Alkoholen, CO ₂ sowie H ₂ .
(3) Acetogenese	Umsetzung der gebildeten organischen Säuren zu Acetat, CO ₂ und H ₂ (sekundärer Gärungsprozess).
(4) Methanogenese	Umwandlung der Reaktionsprodukte der fermentativen und acetogenen Bakterien (H ₂ , CO ₂ , Formiat und Acetat) zu CH ₄ und H ₂ O.

Das bei der Methanogenese entstehende Faulgas wird in einem Gasspeicher zwischengespeichert und anschließend meist in einer KWK-Einheit (z.B. BHKW oder Mikrogesturbinen) verstromt. Der elektrische (Fremd-)Energieeinsatz für den Betrieb des Faulturms ist durch die Nutzung der Abwärme eines BHKW zur Schlamm- aufheizung

relativ gering und fällt zur Durchmischung des Substrates überwiegend auf die Rührwerke bzw. Umwälzpumpen zurück (Kolisch et al. 2014).

Im Anschluss an die Behandlung im Faulturm wird der Schlamm weiter entwässert und entsorgt. Die bei der anaeroben Schlammbehandlung anfallenden Prozesswässer (u.a. Trübwasser und Faulwasser) werden der Kläranlage erneut zugeführt. Die Rückbelastung insbesondere durch freigesetztes Ammonium (NH_4) beim Abbau des organisch gebundenen Stickstoffs kann dabei zu erheblichen Mehrbelastungen der Anlage führen. Dies gilt es insbesondere bei der zusätzlichen Annahme von Fremdschlämmen zu berücksichtigen (Gujer 2007, DWA 2013).

Zur weiteren Ausführung des komplexen Themas der anaeroben Behandlung von Klärschlamm sei auf Seyfried et al. (2015), Weichgrebe (2015) sowie DWA (2008), DWA (2010a) und DWA (2014) verwiesen. Dort werden ausführliche Darstellungen der biologischen Grundlagen, unterschiedlichen Verfahren, deren Anwendung, Bemessung und Einflussfaktoren im Detail beschrieben.

2.2.2 Quantifizierung von Faulgas

Nach DIN-EN 16323 (2014) ist Faulgas ein beim anaeroben Abbau entstehendes Gasgemisch, das sich hauptsächlich aus CH_4 , CO_2 und geringen Mengen weiterer Gase zusammensetzt. Aus technischer Sicht gehört Faulgas damit zu den Biogasen. Nach Weichgrebe (2015) ist Biogas eine Mischung der gasförmigen Produkte der anaeroben Atmung bzw. Gärung. Eine einheitliche Definition des Gesetzgebers liegt für Biogas allerdings nicht vor. Somit werden in einigen Normen/Regelwerken/Gesetzen die Begrifflichkeiten unterschiedlich verwendet und schließen Faul- bzw. Klärgas teilweise von dem Begriff des Biogases explizit aus. So auch in DIN-EN 16323 und der Biomasseverordnung (§3 Nr. 11 BiomasseV 2016), obwohl die technische Bezeichnung korrekt ist (DWA 2010a; Weichgrebe 2015). Im Rahmen dieser Arbeit wird Faulgas in die Kategorie der Biogase eingeordnet.

Das aus dem Rohschlamm gewonnene Faulgas weist je nach Substrat im Rohschlamm (Anteile an Proteine, Fette, Kohlenhydrate) eine deutliche Schwankungsbreite im Gasanfall und dessen Zusammensetzung auf. Die eingesetzte Verfahrenstechnik sowie die Betriebsweise der biologischen Stufe (z.B. das Schlammalter) und die Aufenthaltszeit im Vorklärbecken haben neben der Anlagenbelastung (Zusammensetzung der Zulauf- fracht) ebenfalls einen Einfluss auf den Faulgasanfall (vgl. Tabelle 2.4). Die Spanne des spezifischen Faulgasanfalls für kommunale Kläranlagen schwankt nach Literaturangaben zwischen 17 und 30 l/(E*d) (u.a. DWA 2010a; DWA 2010b; UBA 2008). Für größere Kläranlagen kann der spezifische Faulgasanfall bis zu 33 l/(E*d) betragen (DWA 2010a).

Tabelle 2.4: Abhängigkeit des zu erwarteten Biogasanfalls von der Verfahrenstechnik der Abwasserbehandlung (nach DWA 2010a)

Schlammalter in der biologischen Stufe	Org. Belastung im Zulauf der biologischen Stufe	spez. Klärgasanfall
$t_{rs} = 8 \text{ d}$ (Nitrifikation im Sommer, ggf. Teildenitrifikation)	35 g BSB ₅ /(EW*d) (große Vorklärung)	Mittelwert: 20,7 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 16,5 - 25 l/(EW*d)
$t_{rs} = 15 \text{ d}$ (Nitrifikation und Denitrifikation, ganzjährig)	35 g BSB ₅ /(EW*d)	Mittelwert: 18,3 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 14,5 - 22 l/(EW*d)
$t_{rs} = 15 \text{ d}$	48 g BSB ₅ /(EW*d) (kleine Vorklärung)	Mittelwert: 13,2 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 10,5 - 15,9 l/(EW*d)
$t_{rs} = 15 \text{ d}$	60 g BSB ₅ /(EW*d) (ohne Vorklärung)	Mittelwert: 7,8 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 6,2 - 9,4 l/(EW*d)
$t_{rs} = 25 \text{ d}$ (Anlage mit aerober Stabilisation)	60 g BSB ₅ /(EW*d) (ohne Vorklärung)	Mittelwert: 4,4 l/(EW*d) Schwankungsbreite: 3,5 - 5,3 l/(EW*d)

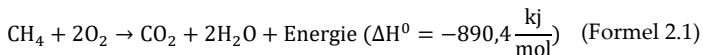
Die typische Zusammensetzung entspricht dabei einem Methangehalt zwischen 60 und 70 Vol.-% CH₄ sowie 30 und 40 Vol.-% CO₂, Spuren von Stickstoff (N₂) und geringen Mengen von Schwefelwasserstoff und anderen Spurengasen (vgl. Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Zusammensetzung von Faulgas (nach Weichgrebe 2015)

Gaskomponenten	Einheit	Biogas ¹	Faulgas ²	Klärgas ³
Methan	CH ₄ Vol.-%	45 - 70	60 - 70	50 - 85
Kohlendioxid	CO ₂ Vol.-%	30 - 55	30 - 40	15 - 50
Stickstoff	N ₂ Vol.-%	0 - 5	0 - 4	2 - 4
Sauerstoff	O ₂ Vol.-%	0 - 2	< 1	0 - 2
Wasserstoff	H ₂ Vol.-%	0 - 1	0-1,5	-
Schwefelwasserstoff	H ₂ S ppm _v	< 500 (50 - 5.000)	500 - 1.500	50 - 30.000
Schwefel (Gesamt)	S mg/Nm ³	20 - 2.500	20 - 2.500	-
Ammoniak	NH ₃ Vol.-%	< 0,25	< 0,05	-
Kohlenwasserstoffe	C _x H _y mg/ Nm ³	< 2	< 10	-
Siliziumverbindungen/ Siloxane	SiO _x mg/ Nm ³	< 1	< 50	-
Halogene	HCL mg/ Nm ³	-	0 - 1.000	-
	HF			
Chlor _{ges}	Cl ₂ mg/ Nm ³	< 30	1 - 5	-
Fluor _{ges}	F mg/ Nm ³	-	1 - 5	-
Wasserdampf	H ₂ O	gesättigt	gesättigt	gesättigt
Staub/Partikel (< 10µm)		vorhanden		-

¹ Biogas: landwirtschaftliche Biogasanlagen inkl. NawaRo
² Faulgas: Klärschlammfaulung
³ Klärgas: anaerobe Industriewasserbehandlung

Reines Methangas besitzt einen volumenbezogenen Energiegehalt (Heizwert – H_i) von 35,89 MJ je Normkubikmeter (Nm³). Dies entspricht 9,97 kWh/Nm³ CH₄ (Weichgrebe 2015). Methan verbrennt mit Sauerstoff (O₂) nach untenstehender Gleichung zu CO₂ und Wasser (H₂O) (Seyfried et al. 2015):



Ein Vergleich von Gasmengen ist über das Normvolumen möglich, das in DIN 1343 (1990) definiert ist. Auf diese Bezugsgröße wird die mit unterschiedlichen Drücken (p_b) und Temperaturen (T_b) anfallende (gemessene) Faulgasmenge umgerechnet.

Das Volumen aus dem Betriebszustand lässt sich wie folgt in den Normzustand umrechnen:

$$Q_{\text{Faulgas,norm}} = Q_{\text{Faulgas,gem}} * \frac{p_b * T_n}{p_n * T_b} \quad (\text{Formel 2.2})$$

Mit: p_n = Standarddruck = 101.325 [Pa] = 1.013,25 [hPa] = 101,325 [kPa] = 1,01325 [bar]

p_b = Betriebsdruck [Pa, hPa, kPa, bar]

T_n = Standardtemperatur = 273,15 [K] = 0 [°C]

T_b = Betriebstemperatur [K]

$Q_{\text{Faulgas,norm}}$ = normierte Faulgasmenge [Nm³/a]

$Q_{\text{Faulgas,gem}}$ = gemessene Faulgasmenge [m³/a]

2.2.3 Gasnutzung mittels Kraft-Wärme-Kopplung

Grundsätzlich kann Faulgas zur Strom- und Wärmeproduktion sowie in aufbereiteter Form als Kraftstoff oder als ins Erdgasnetz einspeisefähiges SNG (Synthetic Natural Gas) genutzt werden. Das gängige Verfahren auf Kläranlagen ist allerdings die Nutzung in einer eigenen KWK-Einheit zur Strom- und Wärmeproduktion mittels BHKW (siehe Kapitel 2.2.4).

Ein BHKW besteht aus Verbrennungsmotor, Generator, Schaltanlage und Heizkreis. Dabei ist der Motor starr mit dem Generator gekoppelt und liefert mit konstanter Drehzahl elektrische Energie. Die bei der Verbrennung (Stromgewinnung) entstehende Wärme wird über Wärmetauscher an den Heizkreis weitergegeben (vgl. Abbildung 2.3). Bei der KWK wird nahezu die gesamte Energie systematisch durch Auskopplung von Strom und Wärme, die auf einem hohen Temperaturniveau (ca. 90°C) zur Verfügung steht, genutzt (ASUE 2015). Dies bietet einen großen Vorteil im Gegensatz zu konventionellen (Groß-)Kraftwerken, bei denen die Wärme ungenutzt oder sogar unter Energieeinsatz abgeführt werden muss. Dieses Prinzip zeichnet sich somit durch eine besonders effiziente Nutzung der gesamten enthaltenen Energie in einem Energieträger (z.B. Faulgas) aus (Schaumann und Schmitz 2010).

Je nach Erfordernis können Anlagen strom-, wärmegeführt oder kombiniert betrieben werden (Schaumann und Schmitz 2010):

- Wärmegeführte Betriebsweise:

Diese Betriebsweise ist die am häufigsten eingesetzte Fahrweise und wird durch die Wärmeanforderungen der angeschlossenen Verbraucher bestimmt. Hierbei wird das BHKW, um möglichst hohe Vollbenutzungsstunden zu erzielen, in Grundlast gefahren und ggf. durch einen Wärmespeicher ergänzt, um Schwankungen im Bedarf auszugleichen.

- Stromgeführte Betriebsweise:

Die rein stromgeführte Betriebsweise resultiert aus dem Anliegen, den eigenen Strombezug zu optimieren. Das BHKW dient dazu teure Stromspitzen zu vermeiden und das eigene Lastprofil zu glätten. Hohe Vollbenutzungsstunden werden hierbei für gewöhnlich nicht erzielt, die Wirtschaftlichkeit ergibt sich aus den vermiedenen Kosten beim Strombezug oder durch das Ausnutzen von Schwankungen im Börsenpreis (Arbitrage).

- Kombinierte Betriebsweise:

Bei der kombinierten Betriebsweise gilt es, einen möglichst hohen Anteil der Strom- sowie der Wärmegrundlast mit möglichst hohen Vollbenutzungsstunden abzudecken. Als prioritäre Führungsgröße ist auch hier die Wärmeanforderung typisch. Insbesondere bei relativ konstanter Grundlast mit wiederkehrendem Lastprofil bietet sich ein zweites Aggregat an, welches nun stromgeführt betrieben wird, um Schwankungen auszugleichen. Da das zweite Aggregat hierbei deutlich geringere Vollbenutzungsstunden aufweist, ist die Wirtschaftlichkeit besonders zu untersuchen.

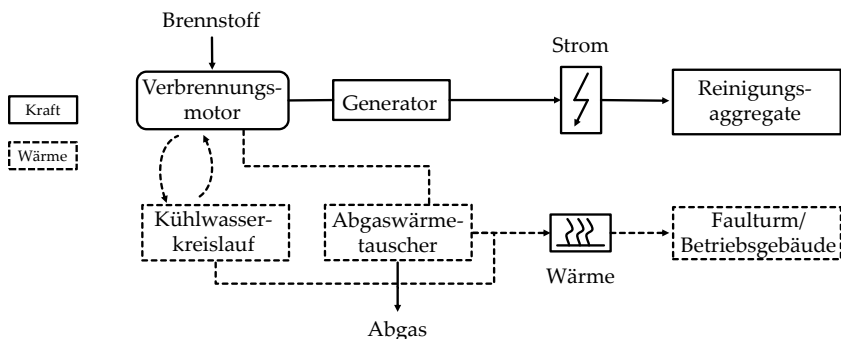


Abbildung 2.3: Prinzipische Skizze der Nutzung von KWK auf Kläranlagen (Eigene Darstellung nach Schaumann und Schmitz 2010; Weichgrebe 2015; Konstantin 2007)

Auf Kläranlagen kommen folgende KWK-Anlagentypen⁶ in Betracht:

- BHKW mit Zündstrahlmotor
- BHKW mit Ottomotor
- KWK-Anlage mit Gasturbine (Mikrogasturbine)
- Brennstoffzellen-BHKW

Für KWK-Anlagen können bei der Brennstoffausnutzung Gesamtwirkungsgrade von ca. 90% erreicht werden (UBA 2006; Schaumann und Schmitz 2010). Die elektrische Leistungsspanne der auf Kläranlagen eingesetzten Faulgas-BHKW-Module erstreckt sich über eine große Bandbreite von 16 kW_{el} bis 3.770 kW_{el} mit elektrischen Wirkungsgraden (η_{el}) von 28 % bis 43 % (ASUE 2014). Mikrogasturbinen besitzen einen geringeren elektrischen Wirkungsgrad von 25 bis 30%. Diese eignen sich dafür deutlich besser für den Teillastbetrieb als BHKW, deren Wirkungsgrad sich bei Teillast oftmals deutlich verschlechtert (DWA 2010a).

Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz der Brennstoffzellentechnologie, die durch eine kontrollierte elektrochemische Umsetzung von Sauerstoff und Wasserstoff zu Wasser, Strom und Wärme produziert. Die Technologie ist bereits seit über 150 Jahren bekannt und befindet sich auch heute noch in der ständigen Weiterentwicklung (Weichgrebe 2015; Töpler und Lehmann 2017). Der Brennstoff ist dabei Wasserstoff, der aus dem Klärgas aufwendig reformiert werden oder extern bezogen werden müsste. Des Weiteren kann H₂ ebenfalls durch innovative biologische Verfahren, z.B. mit Hilfe von Algen (Bolle et al. 2012a) oder fermentativ („Dark Fermentation“; vgl. Sinha und Pandey 2011; Mariakakis 2013; Cardoso et al. 2014), gewonnen werden. Brennstoffzellen-BHKW können bisher nicht wirtschaftlich mit den konventionellen KWK-Anlagen konkurrieren und haben sich nicht durchgesetzt (DWA 2010a; Dehoust et al. 2010). Insbesondere für kleinere Anlagen kann sich durch die Stromerzeugung und damit geringere Wärmeproduktion in der Winterzeit ein Mehrbedarf an fossilen Energieträgern (Erdgas/Heizöl) ergeben. Für weitere Ausführungen zur Nutzung der Brennstoffzellentechnologie sei auf Töpler und Lehmann (2017), Crastan (2009) sowie mit speziellem Fokus auf die Kläranlage auf das Merkblatt M-299 der DWA verwiesen (DWA 2006).

Zur Verstromung von Faulgas in Verbrennungsmotoren ist ein Mindestmethangehalt von 40 Vol.-% CH₄ erforderlich. Außerdem müssen die Emissionsgrenzwerte der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sowie der Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) erfüllt sein (Weichgrebe 2015).

⁶ Weitere Hinweise zu den verfahrenstechnischen Unterschieden der einzelnen Anlagentypen und weitergehende Informationen zum Betrieb von KWK-Einheiten sind in Schaumann und Schmitz 2010 sowie Konstantin (2007) enthalten.

2.2.4 Stand der Faulgasverwertung und Stromerzeugung in Deutschland

Im Jahr 2017 wurde laut Statistischem Bundesamt in Deutschland in 1.258 Anlagen Faulgas gewonnen.⁷ Der Primärenergiegehalt des Faulgases entspricht dabei 6,19 TWh/a. In 88 % der Anlagen wird der überwiegende Teil des Klärgases zur Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt. Sie erzeugten dabei 1,49 TWh_{el}/a Strom aus Faulgas, wovon ca. 92 % auf den Anlagen selbst genutzt und 8 % in das öffentliche Netz eingespeist wurden. 10 % des Faulgases standen dabei nicht zur Strom- und Wärmeerzeugung zur Verfügung. Die abgegebene Faulgasmenge beträgt rund 2 % und wurde ausschließlich an Versorgungsunternehmen abgegeben (DESTATIS 2018b). Für das Jahr 2017 sind die Angaben zur Gewinnung und Verwertung von Faulgas in Deutschland in Tabelle 2.6 dargestellt.

Tabelle 2.6: Gewinnung und Verwertung von Faulgas in Deutschland 2017 (DESTATIS 2018a, 2018b)

	Fallzahl	Faulgas	Primärener- giegehalt	Strom- erzeugung
	[-]	[Mio. m ³]	[TWh/a]	[TWh _{el} /a]
Gewinnung (Anlagen mit anaerober Stabili- sierung)	1.258	889,459	6,19	1.491
Einsatz in Stromerzeugungs- anlagen	1.098	727,766	5,03	-
Verwendung zu Heiz-und Antriebszwecken	795	76,800	0,54	-
Verluste	949	46,596	0,33	-
zur Abgabe verfügbar	40	38,296	0,28	-

In Abbildung 2.4 ist der Verlauf des Energiegehaltes des erzeugten Faulgases sowie die Stromerzeugung deutscher Kläranlagen seit der Wiedervereinigung im Jahr 1990 aufgeführt. Dabei hat sich die Anzahl der Anlagen mit Faulung von 993 auf 1.258 sowie das produzierte Faulgas in Summe von ca. 551 Mio. m³ auf 889 Mio. m³ um 61 % erhöht. Der Eigenverbrauchsanteil stieg in diesem Zeitraum um 8 %. Der Anteil des Faulgases zur Stromgewinnung hat seit Erfassung als eigenständige Position der DESTATIS-Veröffentlichungen dabei stetig zugenommen und die erzeugte Strommenge hat sich vom Jahre 1998 zum Jahre 2017 von 0,63 TWh_{el} auf 1,49 TWh_{el} mehr als verdoppelt.

⁷ Die Ergebnisse der „Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas“ des DESTATIS werden jährlich ca. 8 Monate nach Abschluss des Berichtsjahres veröffentlicht. Die Daten zum Jahr 2017 stellen zum Stand 09/2018 die aktuellste Datengrundlage dar.

Seit 1990 sind die Anteile von Verlusten von 17 % auf rund 5 % kontinuierlich gesunken. In den letzten Jahren stagniert dieser Wert. Dies könnte an unvermeidbaren Verlusten durch Stillstandszeiten für Wartungsarbeiten und Spitzen in der Faulgasproduktion, die nicht vollständig zwischengespeichert werden können, liegen. Der Anteil von Faulgas an der gesamten Stromproduktion aus EE beläuft sich auf rund 1 % (DESTATIS 2018b).

Entwicklung der Klärgasnutzung und Verstromung

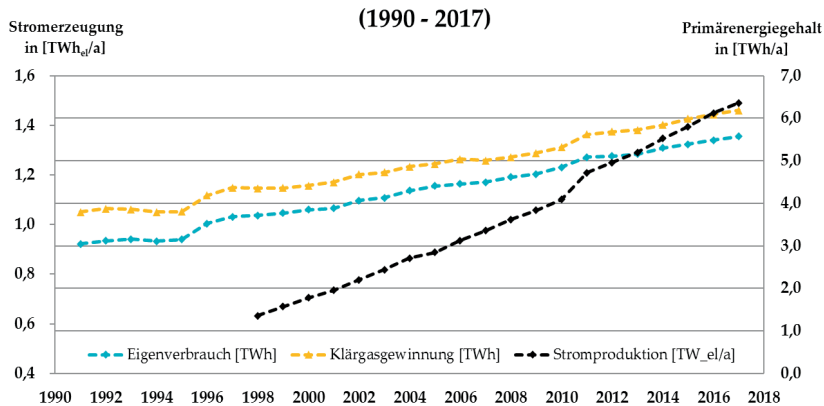


Abbildung 2.4: Entwicklung der Klärgasnutzung und Verstromung 1990 - 2017 (Eigene Auswertung nach DESTATIS 2018a, 2018b)

2.2.5 Bisherige Potenzialabschätzungen zur Faulgasverstromung

In der Fachliteratur sind hauptsächlich ältere ausführliche Potenzialabschätzungen zur Faulgasverstromung zu finden. Zu nennen sind insbesondere die Untersuchungen des Umweltbundesamtes (UBA 2008), von Blesl und Ohl (2010) sowie der DWA (DWA 2010b).

In den genannten Studien wurden ähnliche Szenarien untersucht, um die Stromerzeugung auf Kläranlagen zu erhöhen (siehe Tabelle 2.7). Eine direkte Vergleichbarkeit ist allerdings nicht immer gegeben. In UBA (2008) ist ein wesentlicher Fokus die Co-Fermentation, welche im Ergebnis mit einer Vervielfachung der Stromerzeugung abgeschätzt wurde. Eine Verdopplung der Eigenerzeugung wird demnach durch Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades der BHKW oder in Kombination von moderaten Annahmen zu erhöhtem Faulgasanfall und einer effizienteren Verstromung angegeben. Ähnliche Ergebnisse liefert die Auswertung nach DWA (2010b), insofern die vergleichbaren Szenarien einzeln betrachtet werden. Das deutlich höhere (gesamte) Stromerzeugungspotenzial ist auf die Berücksichtigung der Brennstoffzellentechnolo-

gie auf Kläranlagen sowie weiterer, in den anderen Studien unberücksichtigter Optimierungsmaßnahmen, zurückzuführen. In Blesl und Ohl (2010) wurde ebenfalls ein Hauptfokus auf die Untersuchung der Brennstoffzellentechnologie auf Kläranlagen gelegt. Die Stromerzeugungspotenziale sowie die untersuchten Szenarien sind in Tabelle 2.7 dargestellt.

Tabelle 2.7: Potenzialstudien zur Faulgasverstromung (Auszug)

Studie	Bezugsjahr der Daten	Untersuchte Szenarien	Zusätzliches Stromerzeugungspotenzial [TWh _e /a]
UBA (2008)	1996 bis 2004	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhter Anteil an Faulgas zur Verstromung und verstärkte Co-Fermentation • Verbesserter elektrischer Wirkungsgrad der BHKW • Mehr Kläranlagen mit Faulung statt aerober Stabilisierung (Größenklasse 4) • Kombination aller Maßnahmen 	<p style="text-align: right;">∑ ca. 0,3 – 2,8</p>
Blesl und Ohl (2010)	2007	<ul style="list-style-type: none"> • Neubaupotenzial von BHKW, Reduktion von Fackelverlusten, ungenutzte Klärgasmenge • Stromerzeugung in Brennstoffzellen 	<p style="text-align: right;">1,40</p> <p style="text-align: right;">1,15</p> <p style="text-align: right;">∑ 2,55</p>
DWA (2010b)	2004 bis 2006	<ul style="list-style-type: none"> • Ausrüstung aller KA > 10.000 E mit BHKW • Steigerung der Energieausbeute • Stromerzeugung in Brennstoffzellen • Co-Vergärung + Brennstoffzelle 	<p style="text-align: right;">1,74</p> <p style="text-align: right;">3,14</p> <p style="text-align: right;">3,93</p> <p style="text-align: right;">1,32</p> <p style="text-align: right;">∑ 8,81</p>

Basis der Untersuchungen der DWA (2010b) und des UBA (2008) bilden die Daten des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS) aus dem Jahre 2004 und in Blesl und Ohl (2010) aus dem Jahre 2007. Ergänzend wurden Annahmen auf Grundlage von Literaturwerten hinzugezogen. Die Ermittlungen der DWA (DWA 2010b) wurden auf Basis des Primärenergiegehaltes abgeschätzt (Bezugsjahre der Daten: 2004 – 2006). Die angeschlossenen Einwohner wurden hierbei aus Daten des Statistischen Bundesamtes zum gesamten Faulgasanfall, mit Annahmen zum spezifischen Klärgasanfall, Schlammmanfall und dem mittleren oTS (organischer Anteil der Trockensubstanz), abgeleitet. Die Hauptdatengrundlage der Energiekennwerte in UBA (2008) sind das Schweizer Handbuch „Energie in ARA“ (Müller et al. 1994) sowie das mittlerweile überarbeitete Energiehandbuch aus Nordrhein-Westfalen (Müller et al. 1999) und die dort ausgewertete Umfrage aus dem Jahre 1995. Ergänzend hierzu wurden die Daten des Statistischen Bundesamtes zur Art der Abwasserbehandlung aus dem Jahr 2004 verwendet.

Zu beachten ist, dass die Daten des Statistischen Bundesamtes Ungenauigkeiten aufgrund fehlender Messeinrichtungen (Gasverbrauch, Stromerzeugung) oder systematischer Messfehler (Temperatur, Gasdruck) aufweisen (UBA 2008). Die Fallzahl ist außerdem betreiber- und nicht anlagenbezogen – die tatsächliche Anzahl der klärgasproduzierenden Anlagen könnte also deutlich größer sein (DESTATIS & DWA 2015). Des Weiteren wird in UBA (2008) explizit darauf hingewiesen, dass es keine bundesweiten Auswertungen zu angeschlossenen Einwohnern und dem zugrundeliegenden Reinigungsverfahren gibt. Eine solche Auswertung im Rahmen der Studie wurde als zu aufwendig eingeschätzt (UBA 2008). Diese Informationen sind allerdings für eine tiefergehende Betrachtung des Energieverbrauchs wie auch für die Energieproduktion eine grundlegende Voraussetzung, da die Faulgasproduktion abhängig von der Größenklasse und dem eingesetzten Reinigungsverfahren (getrennt anaerobe Schlammstabilisierung) ist. Angaben zur installierten Leistung der KWK-Anlagen auf den Kläranlagen sind nicht verfügbar bzw. werden nicht erfasst. In Blesl und Ohl (2010) wird die installierte Leistung über wenige bekannte Anlagen auf alle Anlagen mit 354 MW_{el} abgeschätzt.

In den letzten Jahren entwickelte sich der Sektor Energie auf Kläranlagen, insbesondere in Bezug auf Nutzung von MSR-Technologie, fortschreitende Digitalisierung, sowie Optimierung des Stromverbrauchs und der Stromerzeugung, sehr stark. Letztendlich lässt sich die Aussage treffen, dass die vorliegenden Untersuchungen aufgrund ihrer nicht mehr aktuellen und unzureichender Datenbasis sowie der fortschreitenden Entwicklungen im Energiebereich nur noch bedingt repräsentativ sind. Neue Untersuchungen sind erforderlich, um den technischen Fortschritt (z.B. Wirkungsgrade) sowie Veränderungen im Energiesektor (bspw. die Energiewende) ausreichend zu berücksichtigen. Bereits heute und zukünftig wird vermehrt die Bereitstellung von Flexibilität oder eine weitergehende Interaktion mit Energienetzen als bisher von Belang sein (vgl. Kapitel 1.1). Dies spielte in bisherigen Potenzialstudien eine untergeordnete Rolle, da hierzu kein Bedarf vorhanden war.

2.2.6 Netzersatzanlagen

Als Notstromaggregate bzw. Netzersatzanlagen (NEA) werden Stromerzeugungsanlagen bezeichnet, die temporär die benötigte elektrische Energie für sensible Einrichtungen bereitstellen, um Ausfälle der öffentlichen Stromversorgung auszugleichen. Diese bestehen meist aus einem Verbrennungsmotor, der einen Generator mit beispielsweise Benzin oder Diesel antreibt und einem entsprechenden Treibstofftank (BBK 2015).

Einheitliche und klare rechtliche Regelungen zum Vorhandensein oder zu der auf Kläranlagen vorzuhaltenden Leistung und der zu überbrückenden Zeitspanne existieren nicht (BBH 2014). Diese sind meist durch die Sicherheitspolitik/Unternehmensphilosophie des Betreibers bzw. des Verbandes definiert. Prinzipiell kommen alternativ

zu stationären Anlagen mobile NEA oder die vorhandenen KWK-Anlagen (falls ausreichend dimensioniert und für einen Notstrombetrieb ausgelegt) in Frage. Ein allgemeiner Leitfaden zur Notstromversorgung wurde 2015 vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe ausgegeben (BBK 2015). Speziell für Abwasserreinigungsanlagen wurde 1995 ein Merkblatt des Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft veröffentlicht (LfW 1995), mit dem Ziel eine Entscheidungshilfe bereit zu stellen, ob und mit welcher Leistung eine NEA notwendig ist. Außerdem werden Empfehlungen zu prioritären Aggregaten (z.B. Pump- und Hebewerke, Rechen, Störmeldeeinrichtungen und Notbeleuchtung) herausgegeben, welche auch bei mehrstündigem Ausfall funktionsfähig bleiben müssen, um Schäden am Gewässer zu minimieren.

NEA können im Inselbetrieb, also als autarke Systeme ohne Anschluss an eine öffentliche Stromversorgung, betrieben werden oder als netzsynchrone Anlagen mit der Option ins Stromnetz einspeisen zu können. Der netzparallele Betrieb, welcher Grundvoraussetzung zur Interaktion mit dem Energienetz ist, erfordert allerdings erhöhten technischen Aufwand, bedingt durch die Synchronisierung mit dem öffentlichen Netz. Außerdem ist eine reguläre Stromeinspeisung wirtschaftlich nicht darstellbar und kann für Tarifkunden durch gesetzliche Vorgaben eingeschränkt sein (§4 StromGVV 2016; NAV 2006). Des Weiteren sind bei einer Auslegung die Trafonennleistung vor Ort sowie die vertragliche Netzanschlussleistung zu beachten (Schmiedeskamp 2010). Restriktionen in der Nutzung bestehen einerseits hinsichtlich der Größe des Treibstoffspeichers und dessen Bewirtschaftung sowie durch §4 des StromGVV (2016) wonach NEA nicht mehr als 15 Stunden pro Monat außerhalb ihrer eigentlichen Bestimmungen (zur Erprobung/Testbetrieb) als Notaggregat betrieben werden dürfen.

Der Informationsstand und Datenverfügbarkeit hinsichtlich NEA auf Kläranlagen ist als unzureichend einzustufen. Einzig mit Keicher et al. (2007) liegt eine Untersuchung zu Baden-Württemberg aus dem Jahre 2007 (Bezugsjahr 2005) vor. Dort wurde gezeigt, dass ein erhebliches Defizit bei der Absicherung von Kläranlagen gegenüber Stromausfällen besteht und nur rund 17% der Kläranlagen eine stationäre NEA vorhalten.

2.3 Energiebedarf auf Kläranlagen

Der Stromverbrauch auf Kläranlagen weist eine große Schwankungsbreite auf und ist von einer Reihe von Faktoren abhängig. Dies betrifft insbesondere das angewandte Reinigungsverfahren, die Anlagengröße und Anlagenbelastung sowie die örtlichen Randbedingungen. So können beispielsweise eine bewegte Topografie und die damit benötigten Pumpwerke einen erheblichen Mehrverbrauch von bis zu 50% verursachen (UBA 2008).

Für Anlagen der Größenklasse 1 und 2 sind die Schwankungen im Energieverbrauch besonders groß. Dies ist vor allem auf die Vielzahl unterschiedlicher Verfahrensarten in den unteren Größenklassen und verschiedenen möglichen Einzellösungen sowie deren spezifische Aggregate zurückzuführen und weniger auf geringere Wirkungsgrade von Pumpen, Motoren oder Regelungen. Anlagen mit Abwasserteichen oder Tropfkörperverfahren lassen sich (energetisch) nur bedingt mit Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren vergleichen (UBA 2008; DWA 2015a). Nach UBA (2008) weisen Kläranlagen über 5.000 EW (GK 3 bis 5) hinsichtlich ihres Energieverbrauchs allerdings kaum noch größere Schwankungen auf. Dies ist dem dominierenden Einsatz des Belebtschlammverfahrens in diesen Größenklassen zuzuordnen. Diese Einschätzung wird durch das DWA-Arbeitsblatt 216 (DWA 2015a) bestätigt. Dieses bietet ein Instrument zur Vergleichbarkeit, Bewertung und Optimierung des Energieverbrauchs von Kläranlagen. Des Weiteren können zukünftig benötigte Filtrationsstufen, z.B. im Zuge der Spurenstoffelimination, zusätzliche Verbraucher darstellen und benötigen eine getrennte Betrachtung im Vergleich (Biebersdorf et al. 2012; Mergelmeyer et al. 2014).

Für die Produktion von elektrischer Energie sind nur Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung relevant, welche sich überwiegend in die GK 3 bis 5 einordnen lassen (vgl. Kapitel 7.3.6). In den folgenden Beschreibungen der Aggregatgruppen wird der Fokus daher auf Anlagen gelegt, die nach dem Belebtschlammverfahren mit getrennt anaerober Stabilisierung betrieben werden. Auf eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise aller Kläranlagenaggregate im Reinigungsprozess wird an dieser Stelle verzichtet und auf entsprechende Grundlagenliteratur verwiesen (siehe dazu: u.a. Bischof 1998; Gujer 2007). Die Darstellung erfolgt mit Fokus auf den Stromverbrauch und den Untersuchungen in den folgenden Kapiteln. Die im Weiteren dargestellten Angaben zum Stromverbrauch der Aggregatgruppen (in Prozent auf Basis des Stromverbrauchs (Median) pro Einwohner und Jahr) beziehen sich auf Auswertungen von Energieanalysen (n = 91) aus NRW, die Kolisch et al. (2014) zugrunde liegen. Untersuchungen aus Baden-Württemberg (UM 2015; Gasse et al. 2017) bestätigen diese Ergebnisse und weisen ähnliche Verteilungen zum Stromverbrauch auf.

In Abbildung 2.5 ist ein typisches Fließschema einer kommunalen Belebtschlammanlage zusammen mit der Verteilung des mittleren spezifischen Stromverbrauchs einzelner Verfahrensgruppen dargestellt.

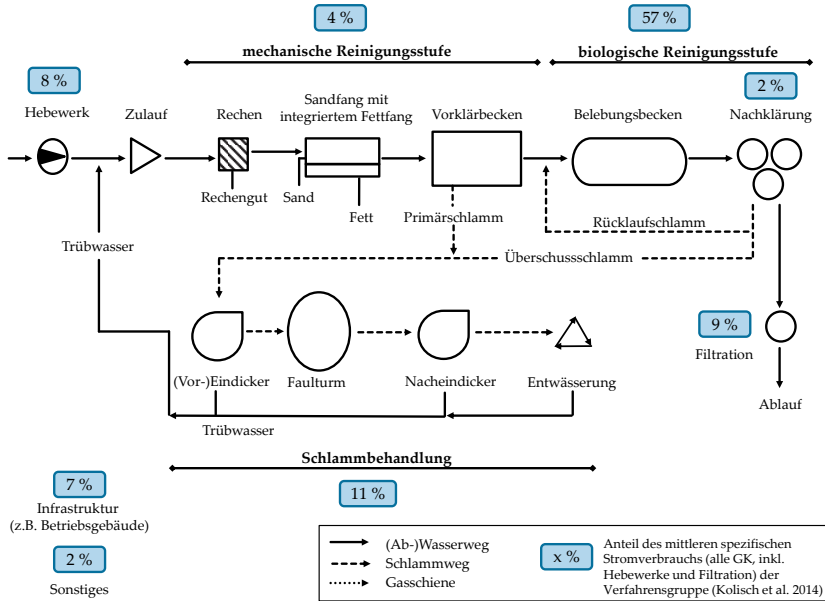


Abbildung 2.5: Typisches Fließschema einer kommunalen mechanisch-biologischen Kläranlage mit getrennt anaerober Schlammstabilisierung inkl. Verteilung des mittleren spezifischen Stromverbrauchs (alle GK) der einzelnen Verfahrensgruppen (Eigene Darstellung nach Gujer (2007) mit Energiedaten nach Kolisch et al. (2014))

2.3.1 Mechanische Reinigungsstufe

Die mechanische Reinigungsstufe umfasst Rechen, Sandfang sowie Vorklärung und macht einen relativ geringen Anteil am Gesamtstromverbrauch von Kläranlagen aus. Hauptenergieverbraucher dieser Stufe ist der Sandfang, in dem mineralische Feststoffe ab einer Korngröße von ca. 0,1 mm abgeschieden werden (Gujer 2007). In üblicherweise dauerbelüfteten Sandfängen wird die Abscheidung durch Sekundärströmung unterstützt. Dazu ist eine Belüftung des Sandfangs notwendig, die rund 3 % des Gesamtstromverbrauchs der Kläranlage ausmacht (Kolisch et al. 2014).

2.3.2 Biologische Reinigungsstufe

Die gesamte biologische Stufe ist für ca. 57 % (ohne Hebewerke und Filtration bis zu 70 %) des gesamten Strombedarfs zur Abwasserreinigung verantwortlich (Kolisch et al. 2014). Die im vorgeklärten Abwasser enthaltenen organischen Verbindungen werden in dieser Stufe durch Mikroorganismen u.a. unter aeroben Bedingungen abgebaut. Der Belüftungsbedarf hierzu ist abhängig von der Kohlenstoff- und Stickstofffracht (überwiegend in Form von NH_4) im Zulauf. Je höher die Fracht im Zulauf ist, desto mehr Sauerstoff wird benötigt, um die chemischen Verbindungen zu oxidieren. Zur Deckung des Sauerstoffbedarfs der Biomasse im Belebungsbecken muss dieser über Belüftersysteme eingetragen werden (Gujer 2007). Je nach Größenklasse belüftet sich der spezifische Stromverbrauch für die Belüftung auf 29 % bis 43 % und stellt den größten Einzelverbraucher dar. Des Weiteren wird durch die Belüftung der Becken eine Durchmischung erzeugt, die ein Absetzen des Belebtschlamm verhindert (Kolisch et al. 2014).

In den unbelüfteten Bereichen der biologischen Stufe müssen Rührwerke zur Umwälzung eingesetzt werden, um die Sedimentation des Schlammes zu verhindern. Ihr Anteil am Gesamtstromverbrauch beträgt ca. 7 bis 12 %. Die Umwälzaggregate sind in der Regel dauerhaft in Betrieb, weshalb der Stromverbrauch relativ konstant ist (Kolisch et al. 2014).

Bei der Verfahrensvariante der vorgeschalteten Denitrifikation fällt für den Betrieb der Rezirkulationspumpen ein zusätzlicher Stromverbrauch an, der 4 bis 6% bezogen auf den Gesamtstromverbrauch betragen kann. Die Rezirkulationspumpen fördern nitrat-haltiges Abwasser aus dem Ablauf des Belebungsbeckens in die vorgeschaltete Denitrifikation und werden üblicherweise proportional zum Zulaufvolumenstrom betrieben (Kolisch et al. 2014).

Durch die Rücklaufschlamm-pumpen wird der in der Nachklärung abgesetzte Belebtschlamm zurück in die Belebungsbecken gefördert. Der Stromverbrauch beträgt ca. 7 % des Gesamtstromverbrauchs. Die geförderte Rücklaufschlammmenge wird in der Regel ebenfalls proportional zum Kläranlagenzulauf betrieben (Kolisch et al. 2014).

2.3.3 Schlammbehandlung und Entwässerung

Bei der getrennt anaeroben Schlammstabilisierung (Schlammfäulung) werden organische Bestandteile des Rohschlammes zu Biogas umgesetzt (vgl. Kapitel 2.2.1). Der Großteil der elektrischen Energie wird dabei für die Umwälzung der Faulbehälter benötigt. Der Wärmebedarf kann meist vollständig über die Abwärme der KWK-Einheiten abgedeckt werden. Gegebenenfalls werden diese mit einem Heizkessel ergänzt. Aufgrund der langen Aufenthaltszeit im Faulbehälter von mehreren Wochen haben Zulauf- und Belastungsschwankungen keinen signifikanten Einfluss auf den Betrieb der

Schlammfäulung. Der Energiebedarf der Schlammfäulung ist somit als relativ konstant anzusehen und beträgt 5 bis 10 % des Stromverbrauchs (Kolisch et al. 2014).

Der Prozess der Schlammmentwässerung auf kommunalen Kläranlagen spielt eine zentrale Rolle bei der Schlammbehandlung. Das Ziel dabei ist eine möglichst effiziente Trennung von Schlamm und Wasser, um die Entsorgungskosten des Klärschlammes so gering wie möglich zu halten. Die wichtigsten Parameter sind dabei die Entwässerungsleistung, der TS-Gehalt sowie der Polymer- und der Strombezug. Bei der Entwässerung wird das Volumen des Schlammes meist durch maschinelles Abtrennen des Wassers weiter reduziert. Anders als bei der kontinuierlichen Eindickung (z.B. unter Einsatz von Krälwerken), handelt es sich bei der maschinellen Entwässerung häufig um einen diskontinuierlichen Prozess, dessen Ablauf im Tagesverlauf flexibel verschoben werden kann. Dabei steht eine Vielzahl von Verfahren zur Verfügung, z.B. durch Dekanter, Zentrifugen, Band- und Kammerfilterpressen, die an dieser Stelle nicht näher ausgeführt werden (DWA 2013). Oftmals ist eine Überwachung dieser Aggregate durch das Betriebspersonal notwendig. Dies hat zur Folge, dass diese Aggregate in der Regel nur zu den üblichen Arbeitszeiten betrieben werden (können). In Abhängigkeit vom eingesetzten Entwässerungsaggregat ist eine Unterbrechung bei laufendem Betrieb verfahrenstechnisch nicht uneingeschränkt möglich, z. B. bei Zentrifugen oder Kammerfilterpressen (Schloffer et al. 2015). Neue Anlagen bieten allerdings immer mehr eine vollautomatische Regelung mit vollständiger Einbindung in das PLS der Anlage mit Fernüberwachung und Fernwartungsoptionen, welches eine Flexibilisierung deutlich erleichtert. Der Stromverbrauch der Schlammmentwässerung (einschließlich der Schlammeindickung) beträgt insgesamt ca. 6 % des Gesamtstromverbrauchs auf kommunalen Kläranlagen (Kolisch et al. 2014).

2.3.4 Hebewerke

Hebewerke (insbesondere Pumpen) sind notwendig, um Höhendifferenzen vom Kläranlagenzulauf bis zur Einleitung in den Vorfluter zu überwinden. Sofern das Wasser nicht im freien Gefälle die Anlage durchfließen kann, muss es unter Einsatz von elektrischer Energie angehoben werden. Der Stromverbrauch von Hebewerken ist maßgeblich von der Förderhöhe und dem Förderstrom abhängig (Baumann et al. 2014). Je nach topographischen Bedingungen ergeben sich hier zum Teil erhebliche Unterschiede in Belangen der Verfahrenstechnik und des Stromverbrauchs. Für Kläranlagen, die über ein Zulaufhebewerk verfügen, beträgt der Anteil des erforderlichen Stroms für das Hebewerk am Gesamtstromverbrauch rund 8 % (Kolisch et al. 2014).

2.3.5 Nachgeschaltete Filtration und Spurenstoffelimination

Nachgeschaltete Filteranlagen werden zur Einhaltung gewässerbezogener erhöhter Reinigungsanforderungen (z. B. an die Phosphorelimination oder Spurenstoffelimination) nach dem Ablauf der Nachklärung angeordnet. Hierdurch können sehr niedrige CSB-, AFS- und Phosphorablaufkonzentrationen erreicht werden. Eingesetzt werden Raum- und Flächenfilter, die mit einem Stromverbrauch von etwa 7 bis 9 % des Gesamtstromverbrauchs energieintensive Verbraucher darstellen (Kolisch et al. 2014). Sie bestehen üblicherweise aus Zulaufhebwerk, Spülluftgebläse, Spülwasserpumpen sowie der Schlammwasserförderung. Die Energie wird maßgeblich für das erneute Anheben des Abwassers und die Filterspülung benötigt (Pinnekamp et al. 2018).⁸

Zur Entfernung anthropogener Spurenstoffe kommen adsorptive oder oxidative Verfahren zur Anwendung. Hierzu gehören Verfahren mit Pulveraktivkohle (PAK) oder granulierter Aktivkohle (GAK) sowie mittels Ozonung mit nachgeschalteter biologisch aktiver Stufe, wie z.B. Teiche, Sand- oder Aktivkohlefilter zur Entfernung von Transformationsprodukten.⁹ Erfolgt die Elimination von Spurenstoffen mit Hilfe einer Ozonung, kann der Energiebedarf durch die stromintensive Ozonproduktion vor Ort deutlich höher liegen als durch adsorptive Verfahren. Ohne Pumpenenergie liegt der Stromverbrauch, bei einer Ozondosierung von 2 bis 7 gO₃/m³, zwischen 0,04 kWh_e/m³ bis 0,9 kWh_e/m³ (Pinnekamp et al. 2015; KOM-M.NRW 2016).

2.4 Kenntnisstand zu Lastmanagement und -verschiebung auf Kläranlagen

Die zunehmende Bedeutung von flexiblen Verbrauchern und Erzeugern war in den letzten 5 bis 10 Jahren Anlass für einzelne, jedoch überwiegend isoliert vollzogene Potenzialstudien zur Interaktion von Kläranlagen mit Energiemärkten. Die für die Fragestellungen dieser Arbeit relevantesten Untersuchungen und gewonnen Erkenntnisse sollen nachfolgend prägnant zusammengefasst werden.

Im deutschsprachigen Raum existiert eine Reihe von Studien zu Lastverschiebungspotenzialen (u.a. DENA 2010; Berger et al. 2011; VDE/ETG 2012). Der Fokus liegt bei diesen, aufgrund des deutlich größeren Potenzials, auf den Sektoren Haushalt, Gewerbe und Dienstleistungen. Oftmals wird die Abwasserbehandlung zwar als geeignet eingestuft und ein allgemeines Potenzial erkannt, aber nicht weiter auf Details, die Ermittlung bzw. Berechnungsgrundlagen eingegangen. Mit besonderem Fokus auf die Abwasserreinigung sind insbesondere vier Studien aus Österreich und der Schweiz

⁸ Hinweise zur Gestaltung und Bemessung von Raumfiltern siehe DWA 2016.

⁹ Hinweise zur Gestaltung und Bemessung von Anlagen zur Spurenstoffelimination geben KOM-M.NRW 2016 und DWA 2015b.

zu nennen: Berger et al. 2011, Müller et al. 2013, Bruyn et al. 2014, sowie Schloffer et al. 2015.

Ziel in Müller et al. (2013) war die Ermittlung der Potenziale Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung, mit besonderem Blick auf die Bereitstellung von Regelleistung. Untersucht wurde dies anhand von je zwei bis drei Fallbeispielen zu Wasserversorgungs-, Klär- und Müllverbrennungsanlagen. Eruiert wurden die Möglichkeiten der größten Stromverbraucher und Produktionsanlagen für kurzfristige (bis 15 Minuten) und über mehreren Stunden denkbare Lastverschiebungen bis hin zu saisonalen Ausgleichen. Auf die Ermittlung der prognostizierten Abschalt Dauern wurde hierbei nicht näher eingegangen. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde auf ein heutiges Gesamtpotenzial der Schweiz sowie ein Potenzial für das Jahr 2050 geschlossen. Am Ende fand eine monetäre Bewertung zur Wirtschaftlichkeit der Lastverschiebungspotenziale statt. Laut Studienautoren können die Ergebnisse aufgrund der vielen Annahmen und großen Schwankungsbreiten (insbesondere der untersuchten Kläranlagen) nur als grobe Größenordnungen verstanden werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen konnte in Müller et al. (2017) die Eignung und Wirtschaftlichkeit von (Kläranlagen-)BHKW zur Erbringung von Regelleistung und Lastspitzenoptimierung aufgezeigt werden. Weitere (Reinigungs-)Aggregate auf der Kläranlage wurden hierbei nicht mit einbezogen.

In Bruyn et al. (2014) wurde untersucht, inwieweit Lastverschiebungspotenziale der kommunalen Infrastruktur in Österreich genutzt werden können. In einem gesonderten Arbeitspapier wurden hierzu die Abwasserreinigung sowie die Wasserversorgung näher betrachtet. Hierbei wurden für vier Kläranlagen unterschiedliche energetische Verbrauchergruppen und deren maximale Abschalt dauern in strikt definierte Zeitfenster (5/15/30/60/240 Minuten) mit den jeweiligen Betreibern festgelegt (vgl. Tabelle 2.8). Ergänzend dazu wurde eine Analyse an zwei Kläranlagen durchgeführt, um daraus ein Gesamtpotenzial für Österreich nach der Bottom-Up- und Top-Down-Methode zu errechnen. Schlussfolgernd wurde die Aussage getroffen, dass Flexibilitäten grundsätzlich vorliegen, allerdings keine Anreize bestehen diese umfassend zu nutzen.

Detaillierte Erkenntnisse mit speziellem Fokus auf die Abwasserreinigung sind in den Veröffentlichungen zum Projekt „Loadshift ARA“ zu finden, dass zeitlich parallel zum Forschungsprojekt *arrivee* durchgeführt wurde (Schloffer et al. 2015; Nowak et al. 2015). Dort erfolgte eine theoretische Sondierung der Machbarkeit von Lastverschiebungen auf Kläranlagen zur Einbindung in smarte Energiesysteme. Dabei wurden allgemeine technische Lösungsvorschläge zur Nutzung von Teilprozessen in der Abwasserreinigung sowie Handlungsempfehlungen zur Teilnahme am (österreichischen) Energiemarkt erarbeitet. Die Bewertung und Analyse der betrachteten Aggregatgruppen erfolgte anhand allgemeiner Überlegungen, Erfahrungen der Autoren und Aussagen von Teilnehmern durchgeführter Workshops. Als Auswahlkriterium der Aggregate diente die Aussage der Netzbetreiber vor Ort, eine Mindestleistung von 5 - 10

kW_{el} pro Aggregat nicht zu unterschreiten, die mit der Leistung der Kläraggregate auf Grundlage von Energieanalysen abgeglichen wurde. Dabei wurden überwiegend vereinfacht mittlere konstante Jahresleistungen der Aggregate herangezogen. Letztendlich wurde die Aussage getroffen, dass Kläranlagen über Aggregate verfügen, die grundsätzlich zur Lastverschiebung geeignet (Belüftung, Rührwerke, Pumpwerke, ÜSS-Eindickung, Schlammumwälzung im Faulturm) und 15 – 30 Minuten abschaltbar sind (vgl. Tabelle 2.8). Anhand von vier Fallbeispielen wurde beispielhaft die theoretische Möglichkeit der Lastverschiebung darauf aufbauend näher untersucht. Aufgrund der Komplexität bzw. unsicherer Datenlage wurden allerdings nur zwei Anlagen für die Lastverschiebungspotenziale dargestellt. Die biologische Stufe (aerober Anlagen) wurde dabei als einzig realistisch nutzbare Option zur Hebung von Lastverschiebungspotenzialen eingestuft. In einem ASM1-Modell für die Beispielanlagen wurde die maximale Abschaltdauer der Belüftungsaggregate analysiert. Als zentrales Hemmnis wurden die gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben identifiziert, die Lastverschiebung auf Kläranlagen für Netzbetreiber unattraktiv erscheinen lassen und daher kein Interesse diesbezüglich besteht. Auf Grundlage dessen wurde die Empfehlung getroffen, dass Lastverschiebung in Kombination mit einer PV-Anlage für eine möglichst hohe Eigenstromabdeckung sinnvoll sein könnte, indem der Stromverbrauch der Belüftung an die PV-Erzeugung angepasst wird. Zusammen mit den Stromerzeugungsanlagen wurde daher versucht die Lastverschiebung zur optimalen Nutzung einer fiktiven Photovoltaik-Anlage zu nutzen. Dies wurde abschließend als zentrale Nutzungsoption bewertet. Des Weiteren wurde zur Hebung der Lastverschiebungspotenziale die Entwicklung eines Reglers als weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

Eine weitere Art des Lastmanagements wird auf Kläranlagen in Form von Spitzenlastmanagement, für sehr kleine Zeiteinheiten (15min-Werte) bereits seit Jahren betrieben (z.B. Mittelstedt 2016). Ein Anteil der Strombezugskosten setzt sich aus den Netznutzungsentgelten zusammen, welche u.a. an der größten bezogenen Leistung im Abrechnungszeitraum festgesetzt werden. Damit sind die Leistungspreiskosten umso geringer, je gleichmäßiger sich der Strombezug darstellt. Dazu werden beim Spitzenlastmanagement Lasten abgeworfen, um Spitzen im Stromverbrauch der Kläranlage zu glätten (engl. Peak Shaving) und damit die individuellen Strombezugskosten zu senken. Allerdings finden sich zu dieser (sehr) kurzfristigen Form des Lastabwurfs, die eher eine „Notabschaltung“ zur Vermeidung von Lastspitzen darstellt, kaum belastbare wissenschaftliche Publikationen und transparente veröffentlichte Praxiserfahrungen.

Grundsätzliche Ansätze und Informationen zum Vorgehen, zur Identifizierung sowie zur Vermarktung und Erschließung flexibler Lasten für die Industrie sind im „Handbuch Lastmanagement“ (DENA 2012b) beschrieben und stellen eine gute Grundlage zur allgemeinen Thematik sowie den Schritten zur Implementierung und Entwicklung eines Lastmanagements dar. Des Weiteren wird ein mögliches Vorgehen zur Einführung eines überbetrieblichen Lastmanagements für Unternehmen vorgeschlagen. Al-

lerdings sind diese generellen Empfehlungen zu unspezifisch für eine direkte Übertragbarkeit auf Kläranlagen und können nur eine erste Hilfestellung zur Einführung in die Thematik und relevanter Daten geben. Der Fokus liegt auf Unternehmen und deren Struktur sowie deren stromintensiven Prozessen (> 250 - 500 kW_{el}). Diese unterscheiden sich teilweise erheblich von der Betriebsstruktur, -führung sowie den Randbedingungen und Leistungsgrößen der Prozesse und Aggregate auf Kläranlagen.

In der internationalen Literatur spielen Flexibilität und Lastmanagement auf Kläranlagen bislang eine untergeordnete Rolle. Im weitesten Sinne ist in Bezug auf die Bereitstellung von Flexibilität das Lawrence Berkeley National Laboratory's Demand Response Research Center (DRRC) in Kalifornien zu nennen, das verschiedene Studien zur Eruierung und Umsetzung von DR-Potenzialen von Kläranlagen in den USA durchgeführt hat und dessen Eignung unter gewissen Randbedingungen bestätigt (Lekov A. et al. 2009; Thompson et al. 2010; Thompson L. et al. 2008; Olsen et al. 2012; Aghajanzadeh et al. 2015). Der Fokus liegt auf dem Identifizieren von Energieeffizienzmaßnahmen, der generellen Eignung zur Bereitstellung von DR, deren Leistungspotenzialen und vor allem die messtechnische Anbindung der Gesamtanlage an das DR-System des Instituts sowie den regulatorischen Hemmnissen auf dem US-Energie Markt. Insbesondere die Abschaltversuche im Rahmen von Wartungsarbeiten in Thompson et al. (2010) und Olsen et al. (2012) belegen zum einen die technische Machbarkeit der Anbindung von Kläranlagen in DR-Systeme und zum anderen die Möglichkeit, von ausgewählten Aggregaten (Pumpen, Zentrifugen, Belüfter), über eine mögliche Abschaltung DR bereit zu stellen. Eine vertiefte Prüfung von Aggregaten, der vorherrschenden Prozesse und insbesondere die Analyse von Auswirkungen auf den Reinigungsbetrieb stellen auch hier kein zentrales Element dar. Des Weiteren sind die Rahmenbedingungen nur begrenzt mit denen in Deutschland vergleichbar. Dies gilt sowohl für die Struktur des Energiesektors als auch für die Situation der Abwasserreinigung. Nur etwa 22 % der Anlagen in den USA werden mit anaerober Schlammstabilisierung betrieben und weniger als 1 % nutzen das Faulgas zur Stromerzeugung (Aghajanzadeh et al. 2015). Die dort abgeleiteten Handlungsempfehlungen zur Energieeffizienz sind überwiegend bereits Standard auf deutschen kommunalen Kläranlagen.

In Frankreich kommt dem Lastmanagement eine bedeutende Rolle zu. Allerdings steht hier die bessere Nutzung des Atomstroms im Vordergrund, um in den Nachtstunden die hohen Anteile der konstant anfallenden Kernenergie, z.B. durch Nachtspeicherheizungen, zu nutzen und steht konträr zur Energiewende und den in Deutschland vorherrschenden Zielen und Problemen des Stromnetzes (DENA 2012b).

Zwischenfazit und erkannte Defizite aus der Literaturrecherche zum Lastmanagement/-verschiebung

Generell lässt sich festhalten, dass in den vorliegenden Studien erste grobe Angaben zum Lastverschiebungspotenzial wasserwirtschaftlicher Anlagen enthalten sind. Oftmals besteht laut Studienautoren kaum Interesse an Lastmanagement auf Kläranlagen, da aufgrund fehlender ökonomischer Anreize und vorhandenen Hemmnissen eine Bereitstellung unattraktiv erscheint (z.B. Nowak et al. 2015). Darüber hinaus liegen für die deutsche Abwasserwirtschaft nach derzeitigem Kenntnisstand keine vergleichbaren Potenzialstudien vor und die erzielten Ergebnisse sind aufgrund der Divergenz der Strukturen/Regularien in der Schweiz/Österreich/USA zu Deutschland und dessen Energiewende nur teilweise übertragbar.

Die vorhandenen Studien gehen oftmals isoliert auf die betrachteten Vermarktungs- bzw. Verwendungsarten ein (z.B. Regelleistung; vgl. u.a. Müller et al. 2013). Die Kläranlage wird allerdings aus vielen Bereichen des Energiesektors tangiert (DSM/DR/Lastabwurf/ Lastverschiebung/-management) und eine Änderung der regulatorischen Rahmenbedingungen kann insbesondere bei der Auswahl und Bewertung von Aggregaten zu hinfälligen Aussagen führen. Eine isolierte Betrachtung geht hier nicht weit genug. Daher bedarf es einer zusammenfassenden, übergeordneten und neutralen Bewertung der vorhandenen Aggregate und Prozesse auf der Kläranlage weitestgehend unabhängig von aktuell vorherrschenden Bedingungen der einzelnen Einsatzmöglichkeiten auf dem Energiemarkt.

Die Identifikation und Anbindung von Prozessen für ein industrielles Lastmanagement ist grundsätzlich in der Literatur beschrieben (z.B. DENA 2012b), aber nicht ohne weiteres auf den Abwassersektor übertragbar und ohne Bezug zu individuellen Randbedingungen. Ein gezieltes und strukturiertes Vorgehen für Kläranlagen zur Identifikation, zur Überprüfung und zur Einbindung von Aggregaten mit ihren individuellen Restriktionen ist bislang nicht bekannt.

Auf Aggregat-/Prozessebene befinden sich die vorhandenen Erkenntnisse weitestgehend auf theoretischer Ebene. Für die aufgestellten Abschalt Dauern findet keine Verifizierung statt, sondern diese beruhen auf rein theoretischen Aussagen und Meinungen weniger Betreiber/Autoren (z.B. Bruyn et al. 2014). Lediglich in Schloffer et al. 2015 erfolgt eine Bestätigung der theoretischen Überlegungen über Simulation der biologischen Stufe. Des Weiteren ist das Zuschalten von Aggregaten überwiegend nicht berücksichtigt bzw. wird als nicht möglich eingeschätzt (z.B. Müller et al. 2013; Bruyn et al. 2014). Ferner wurden keine weitergehenden Untersuchungen über die tatsächliche technische Eignung sowie Anforderungen an die Aggregate zum flexiblen Betrieb durchgeführt, sondern als pauschale Annahme hinterlegt.

Abschließend lässt sich die Aussage treffen, dass sich aus den vorliegenden Untersuchungen eine gute Basis zur vertieften Analyse von Kläranlagen ableiten lässt, wobei insbesondere die angegebenen Abschalt Dauern und potenziellen Aggregatgruppen sowie die Grundlagen aus DENA (2012b) von Interesse sind.

Eine Zusammenfassung der Literaturwerte zu den untersuchten Aggregatgruppen und deren Abschalt Dauern sind in Tabelle 2.8 dargestellt.

Tabelle 2.8: Abschalt dauer verschiedener Aggregatgruppen nach Literaturstellen (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b)

Aggregat- gruppe	Abschaltdauer				
	Müller et al. 2013		Bruyn et al. 2014	Schloffler et al. 2015	Berger et al. 2011
	[min]		[min]	[min]	[min]
	Tag	Nacht			
Hebewerk ¹	15 - 30	30 - 60	5	60 - 120	Nutzbar (Schneckenpumpwerk)
Sandfang	30	30	5-15 (Räumer)	Nutzbar	-
Belüftung	30	60 - 120	15	180 – 360 ²	15
Rezirkulation	-	-	15	-	-
Rührwerke	15	30	5 - 15	10 - 15	-
RLS-Pumpwerk	60	120	5 - 15	60 - 120	-
Faulung	< 120 ³	> 120 ³	-	Nutzbar ⁴	-
Entwässerung/ Eindickung ⁴	> 120 (Dekanter)	Nicht nutzbar	240 (Zentrifuge)	Nutzbar ⁵	-

¹ Die Nutzung von Abwasserpumpen, Zulaufpumpen /-hebwerke und Zentrifugen wurden in Thompson et al. (2010) und Aghajanzadeh et al. (2015) bestätigt.

² Bei Trockenwetter für Anlagen mit anaerober Stabilisation.

³ Inklusive Pumpen, Rührwerke und Heizschlamm pumpen.

⁴ Inklusive Pumpen und Rührwerke.

⁵ Inklusive Zentrifugen, Kammerfilterpresse, Schneckenpresse und ÜSS-Eindickung.

2.5 Fokus und Abgrenzung des Themas

2.5.1 Themenschwerpunkte dieser Arbeit als Folgerung erkannter Defizite

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation soll ein methodischer Ansatz zur Ermittlung und Hebung von Flexibilitätspotenzialen mit speziellem Fokus auf Kläranlagen erarbeitet werden. Hierzu wird u.a. die Identifikation und Anbindung von Prozessen an ein Flexibilitätsmanagement auf den Abwassersektor übertragen und der Bezug auf die individuellen Randbedingungen und Besonderheiten der Kläranlage hergestellt.

Hinsichtlich der Flexibilitätserstellung wird eine Vielzahl von Nutzungsoptionen (vgl. Kapitel 2.1.2) untersucht, da die bisherigen Studien meist auf bestimmte Einsatzmöglichkeiten (z.B. Regelleistung; vgl. u.a. Müller et al. (2013)) ausgerichtet und in ihrer Wertung entsprechend beeinflusst sind. In dieser Arbeit erfolgt daher eine möglichst vollumfängliche und neutrale Erfassung und Bewertung aller potenziell nutzbaren Aggregate auf Kläranlagen. In bisherigen Betrachtungen basiert die Auswahl und Bewertung der Aggregate teilweise auf Grundlage einer mittleren konstanten Leistung, vordefinierten Abschaltdauern und/oder ist oftmals nicht begründet bzw. unzureichend dokumentiert (bspw. Bruyn et al. 2014). Ferner berücksichtigt diese Arbeit die schwankende (Wirk-)Leistung vieler Aggregate im Tagesverlauf, da sie über die Anlagenbelastung gesteuert wird und einer konkreten Zuordnung einer zeitlichen Verfügbarkeit der Flexibilität im Tagesverlauf erfordert, welche bisher kaum Berücksichtigung gefunden hat.

Die Frage, inwiefern eine Flexibilitätserstellung der Aggregate im laufenden Betrieb erfolgen kann ohne den Reinigungsbetrieb zu gefährden, blieb bislang weitestgehend unberücksichtigt bzw. wurde nicht beantwortet. Daher liegt ein wesentlicher Fokus der vorliegenden Arbeit darauf, zur grundsätzlichen Herangehensweise geeignete Empfehlungen und Kontrollmechanismen für einen flexiblen Anlagenbetrieb und den individuellen Randbedingungen der Aggregate/Prozesse zu erarbeiten. Insbesondere die Schnittstelle der energietechnischen Anforderungen an die Aggregate zum einen, mit den klärtechnischen Anforderungen zum anderen, ist bisher weitestgehend unberücksichtigt und wird über entsprechende Kennzahlen abgebildet. Komplettiert werden diese Kennzahlen durch die Ableitung möglicher Restriktionen und Kontrollparameter zur Einbindung von Aggregaten zur Sicherstellung der originären Funktion bei einem flexiblen Anlagenbetrieb, welche bisher in der Literatur nicht ausreichend beschrieben oder diskutiert sind.

Diese abgeleiteten Kenngrößen und Restriktionen sind durch eine umfassende Literaturrecherche, Simulationsergebnisse sowie praktische Umsetzungen verifiziert und iterativ optimiert worden.

Die Bewertung der Kläranlagenflexibilität erfolgt unter Einbeziehung von (Langzeit-) Simulationen sowie realer Tests in Form von gezielten Abschaltversuchen und die Anbindung der Kläranlage an ein Virtuelles Kraftwerk. Die eigenen Ergebnisse werden unter einem Einfließen der praktischen Untersuchungen mit den bisherigen Erkenntnissen aus der Literatur zusammenfassend kritisch bewertet, woraus sich eine allgemein höhere Objektivität der Aussagen sowie ein höherer Anwendungsbezug zur Flexibilitätserstellung als bisher vorhanden ergibt.

In dieser Arbeit werden sowohl Stromerzeugungs-, als auch Flexibilitätspotenziale dezidiert unter Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen der Aggregate bzw. Verbrauchergruppen sowie einer repräsentativen und deutlich fundierteren Datengrundlage als bisher ermittelt (z.B. UBA 2008; DWA 2010b). Dies erfolgt unter Einbeziehung der eingesetzten Reinigungsverfahren, der jeweils angeschlossenen Einwohnerwerte, der Aufteilung in die entsprechenden Größenklassen sowie der individuellen Randbedingungen der Aggregate (Flexibilitätskennzahlen). Bisherige Betrachtungen der Lastverschiebungspotenziale (für Österreich bzw. die Schweiz) basieren auf überwiegend einfachen, auf ein Gesamtpotenzial extrapolierten Berechnungen (z.B. Müller et al. 2013; Schloffer et al. 2015). Eine entsprechende Abschätzung für kommunale Kläranlagen in Deutschland existiert bisher nicht. Somit leistet diese Arbeit einen weitergehenden Beitrag zur Fragestellung welche Rolle Kläranlagen am Energiemarkt und im Rahmen der Energiewende einnehmen können.

2.5.2 Abgrenzung des Themas

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf kommunalen Kläranlagen mit anaerober Schlammbehandlung und deren Randbedingungen in Deutschland.

Für den Bereich der industriellen Abwasserreinigung gelten zwar durchaus ähnliche Fragestellungen, die vorherrschenden Randbedingungen sind allerdings durch ihren produktionsgetriebenen Betrieb, die Art der Abwasserzusammensetzung und die Betriebsstruktur meist nur schwer mit kommunalen Anlagen vergleichbar. Daher werden im Folgenden keine Strategien und Konzepte speziell für die Industrieabwasserbehandlung erarbeitet.

Des Weiteren wird der aktuelle Stand des Energierechts nicht näher beleuchtet, da dieses sehr kurzfristigen Umgestaltungen unterliegen kann und Bewertungen nur begrenzte Aktualität und Aussagekraft besitzen würden.

Die Verwendungsart bzw. Vermarktung der Flexibilität steht ebenfalls nicht im Fokus dieser Arbeit, sondern die möglichst unvoreingenommene Auswahl und eine mögliche Bereitstellung der Flexibilität – unabhängig von einer (zukünftigen) Nutzung. Aus diesem Grunde sowie aufgrund der sich schnell ändernden Marktgefügen und Erlösmöglichkeiten erfolgen keine Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (siehe hierzu z.B. Schmitt et al. 2017b) der unterschiedlichen Vermarktungsoptionen, sondern eine Einschätzung der technischen Machbarkeit und deren Auswirkungen auf den Anlagenbetrieb.

3 Entwicklung eines methodischen Ansatzes für einen flexiblen Kläranlagenbetrieb

Im Rahmen der Gesamtuntersuchung sollen umfassende, fundierte und detaillierte Erkenntnisse über die Möglichkeit einer flexiblen Nutzung von Aggregaten, Aggregatgruppen und Prozessen auf der Kläranlage sowie zu deren Auswirkungen auf die Abwasserreinigung als auch im Energiesektor gewonnen werden. Die Grundlagen sowie der bisherige Kenntnisstand wurden ausführlich in Kapitel 2 dargestellt und bilden den Ausgangspunkt der eigenen Untersuchungen.

Unter dem zu entwickelnden Aggregatmanagement ist das gezielte Nutzen der Aggregate auf der Kläranlage zur Bereitstellung von Flexibilität unter Einbeziehung der kläranlagenspezifischen Randbedingungen zu verstehen. Hierbei wird unter Berücksichtigung der primären Aufgabe, der ordnungsgemäßen Abwasserreinigung und Schlammbehandlung und einem vorausgesetzten energieeffizienten Betrieb der Anlagenteile ein methodisches Vorgehen vorgestellt, um freie Kapazitäten für einen flexiblen Betrieb zeitlich befristet zu nutzen. Dabei spielt nicht nur die Vorgehensweise zur Einschätzung flexibler Aggregate und deren theoretisches Potenzial eine entscheidende Rolle, sondern in besonderem Maße unter welchen Randbedingungen diese Aggregate genutzt werden können – sowohl aus technischer, als auch kläranlagenbedingter Sichtweise.

Die Methodik der weiteren Untersuchungen von der Ermittlung relevanter Aggregate bis zur Berechnung der Flexibilität sowie dem Aufstellen und Überprüfen der Kennzahlen und Restriktionen ist schematisch in Abbildung 3.1 dargestellt. Das Vorgehen gliedert sich in mehrere Schritte, abgeleitet aus der Literaturlauswertung (u.a. DENA 2012b; vgl. Kapitel 2) und einer iterativen Entwicklung auf Grundlage der im Rahmen der Methoden Anwendung (vgl. Kapitel 4) gewonnenen Erkenntnisse. Zunächst erfolgt eine Ersteinschätzung potenziell geeigneter Aggregate in Anlehnung und mit Hinweisen aus der Literatur und der Aggregatliste der Kläranlage. Prinzipiell sollten allerdings alle Aggregate unter Einbeziehung des Betriebspersonals berücksichtigt und die Ersteinschätzung ergänzt und/oder einschränkt werden. Im nächsten Schritt werden diese Aggregate im Detail analysiert, indem Aggregat- sowie Prozessdaten (z.B. Zufluss, Konzentrationen, Betriebsweise etc.) ausgewertet werden. Darauf aufbauend erfolgt die Ermittlung der Flexibilitätspotenziale hinsichtlich ihrer elektrischen Wirkleistung und zeitlichen Verfügbarkeit unter Berücksichtigung ihrer prozessrelevanten Restriktionen (z.B. Mindestlaufzeiten, Konzentrationsgrenzwerte etc.). Zur Bereitstellung der Flexibilität und der weiteren Nutzung der Aggregate sind Kenngrößen relevant, die für die jeweiligen Aggregate bestimmt bzw. festgelegt werden müssen (vgl. Kapitel 3.2). Diese umfassen sowohl technische Eigenschaften der Aggregate (z.B. An-

und Abfahrzeiten) als auch reinigungstechnische Aspekte (z.B. Regenerationszeit, maximale Abschaltdauer etc.). In einem letzten Schritt werden die aufgestellten Restriktionen und Kontrollparameter (vgl. Kapitel 3.3) iterativ über Simulationen und Abschaltversuche in ihren prozessstabilen Grenzen festgelegt. Die beschriebenen Kennzahlen und Restriktionen bilden dabei den Kern des Ansatzes, einen anpassungsfähigen Anlagenbetrieb in Einklang mit einer gesicherten Abwasserreinigung zu bringen.

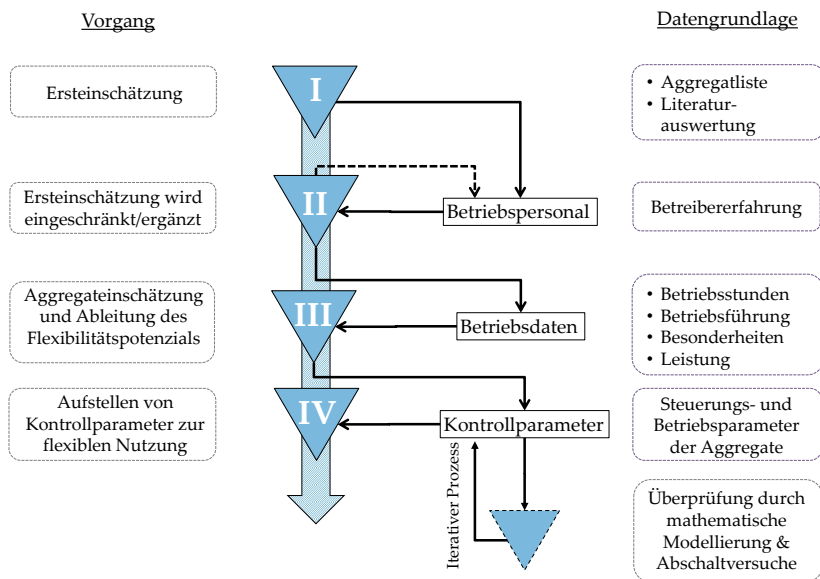


Abbildung 3.1: Schematischer Ablauf zur Entwicklung des Aggregatmanagements (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b; Schmitt et al. 2017b)

3.1 Identifizierung von Aggregaten, Methodik der Datenanalyse und Berechnung von spezifischen Flexibilitätspotenzialen

Zur Einbindung von Aggregaten in ein Managementsystem ist eine tiefgehende Analyse der technischen Eigenschaften, der tatsächlichen Betriebsweise sowie eine Auswertung und Plausibilisierung der gemessenen Anlagendaten erforderlich. Eine solche Auswertung geht deutlich über Analysen in gängigen Leitfäden bzw. Regelwerken wie beispielsweise in DWA (2015a) hinaus.

In einem ersten Schritt zur Identifizierung nutzbarer Aggregate sind die in der Literatur beschriebenen Aggregate (vgl. Kapitel 2.4) sowie die größten Verbraucher die vorrangigen Untersuchungsobjekte. Das Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Methodik sowie der weiteren Untersuchungen ist allerdings eine neutrale Bestandsaufnahme und Bewertung möglichst aller auf Kläranlagen typischerweise eingesetzten Aggregate und Prozesse. Daher werden möglichst alle Aggregate in Betracht gezogen, um „versteckte Potenziale“ zu identifizieren. In den weiteren Analysen wird demzufolge jedem Aggregat als Prämisse unterstellt für eine flexible Nutzung prinzipiell zur Verfügung zu stehen (Schritt I, Abbildung 3.1).

Die gesamte Aggregateinschätzung findet unter Rücksprache mit dem Betriebspersonal statt. Kläranlagen sind sehr individuell und die lokalen Randbedingungen, das vorhandene anlagenspezifische Wissen und die Vorschläge des Personals sollten bestmöglich in die Bewertung einfließen und von diesen ergänzt bzw. eingeschränkt werden (Schritt II, Abbildung 3.1). Die spätere Festlegung zur tatsächlichen flexiblen Nutzung erfolgt über die detaillierten Betriebsdatenauswertungen und vertieften Betrachtungen der einzelnen Aggregate.

Eine Sonderposition nehmen dabei die Stromerzeugungsanlagen (KWK-Anlagen, NEA) ein, die per se für weitergehende Untersuchungen interessant sind und bereits heute als Flexibilitätsoption am Markt partizipieren (vgl. Kapitel 2.1.2 und Kapitel 2.2.3).

Im nächsten Schritt erfolgt die Datenanalyse. Hierzu gehört ebenfalls die Auswertung der Betriebstagebücher (Zuflusscharakteristik, Anlagenbelastung etc.) und die Erfassung der energetischen Ist-Situation der Gesamtanlage. Darauf aufbauend werden für die zu untersuchenden Aggregate die vorhandenen Betriebs- und Prozessdaten (Lastgänge, Volumenströme etc.) detailliert analysiert und eine Einschätzung zur flexiblen Nutzung gewonnen (Schritt III, Abbildung 3.1). Eine Vorauswahl ist insofern notwendig, da die Quantität der gemessenen Daten auf Kläranlagen unter Umständen erheblich sein kann und eine umfangreiche Analyse nur für relevante Aggregate in angemessenem Verhältnis steht. Ein Schema mit den wichtigsten Daten ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Auswertungen der Betriebs- und Prozessdaten bei der Aggregateinschätzung bilden u.a. die Grundlage zur Ermittlung der aggregatspezifischen Flexibilitätspotenziale und fließen in die Ableitung der Randbedingungen zu einer flexiblen Nutzung ein.

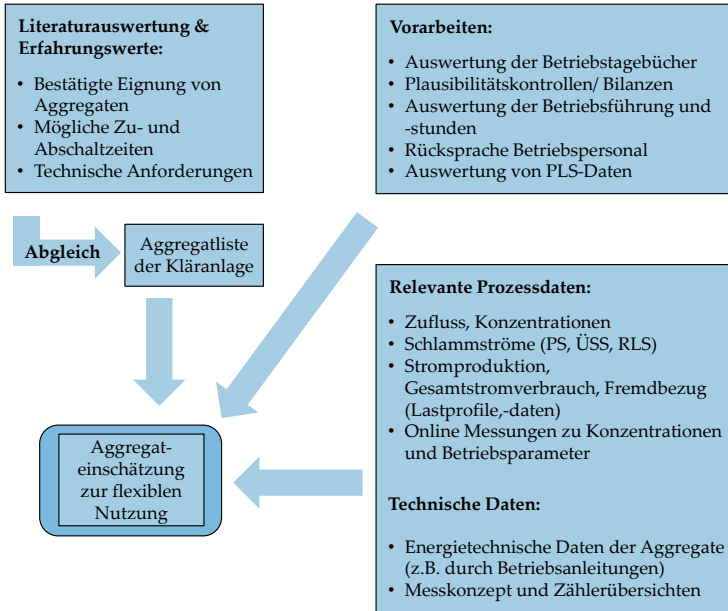


Abbildung 3.2: Prinzipschema des Vorgehens zur Einschätzung von Aggregaten zur flexiblen Nutzung

Viele Aggregate unterliegen einer tageszeitlichen Schwankung in der Leistungsaufnahme und/oder werden nur temporär eingesetzt. Eine pauschale Betrachtung der Leistung ohne Zuordnung ihrer zeitlichen Verfügbarkeit ist zur Bereitstellung von Flexibilität nicht ausreichend. Aufgrund dessen wird durch die Auswertung von in 15-Minuten-Werten diskretisierten Leistungsaufzeichnungen ein repräsentativer Tagesverlauf der tatsächlichen elektrischen Leistung erstellt. Diese Daten setzen sich aus Mittelwerten für ein gesamtes Jahr zusammen (365 Einzelwerte pro 15-Minuten-Block), der die elektrische Wirkleistung zu jeder Viertelstunde eines Tages angibt. Darüber können auch jahreszeitliche Schwankungen in Bezug auf Wassermengen, Frachtmengen und andere saisonale Einflüsse über Mittelwerte abgemindert werden. Alternativ kann über die gemessene Wirkleistung und die Betriebsstunden sowie die spezifische Betriebsführung (z.B. Laufzeiten nur zu bestimmten Tageszeiten) ein entsprechender Tagesverlauf abgeleitet werden. Auf dieser Grundlage können Zeitfenster identifiziert werden, in denen eine flexible Nutzung des Aggregats möglich ist. Des Weiteren lässt sich zu jeder Uhrzeit die zur Verfügung stehende Wirkleistung berechnen und in aggregierter Form als gesamtes (theoretisches) „Flexibilitätsband“ der Kläranlage darstellen.

Dabei lässt sich die elektrische Leistung bzw. die mögliche zu verschiebende Energiemenge wie folgt berechnen:

$$\text{Leistung} \quad P_{\text{el},i} = \frac{W_i}{t_i} \quad [\text{kW}_{\text{el}}] \quad (\text{Formel 3.1})$$

$$\begin{array}{l} \text{Verschiebbare} \\ \text{Energiemenge} \\ \text{bzw. Arbeit} \end{array} \quad \Delta W_{\text{el},i} = \sum_{i=1}^n P_{\text{el},i} * \Delta t_i = \int_{t_0}^{t_1} P_{\text{el},i}(t) dt \quad [\text{kWh}_{\text{el}}] \quad (\text{Formel 3.2})$$

Bei konstanter Leistungsaufnahme kann die verschiebbare Energiemenge vereinfacht über Formel 3.3 berechnet werden:

$$\Delta W_{\text{el},i} = P_{\text{el},i} * \Delta t_i \quad [\text{kWh}_{\text{el}}] \quad (\text{Formel 3.3})$$

Mit: W = Stromverbrauch [kWh_{el}]
 P_{el} = Leistung [kW_{el}]
 t_i = Zeit (bzw. Betriebsstunden) [h]

Über die detaillierte Auswertung der Daten können in einem nächsten Schritt die Randbedingungen abgeleitet werden (vgl. Kapitel 3.3), die eine flexible Nutzung ermöglichen bzw. einschränken (Schritt IV, Abbildung 3.1).

3.2 Erforderliche technische und kläranlagenbezogene Kenngrößen

Zur Bereitstellung von Flexibilität sind Parameter erforderlich, die im Regelfall im laufenden Betrieb auf Kläranlagen nicht von Belang sind und nicht systematisch erfasst werden. Diese sind überwiegend technisch-physikalischer Natur und ergeben sich u. a. aus den Anforderungen seitens des Energiesektors und der physikalischen Eigenschaften des Aggregats (vgl. Tabelle 3.1). Die Basis zur Bewertung von Flexibilität ist die Erfassung der relevanten technischen Rahmenbedingungen. Diese technischen Restriktionen legen den Grad der Flexibilität fest und ermöglichen einen Vergleich mit den Anforderungen der jeweiligen Nutzungsoption. Zu diesen gehören die An- und Abfahrzeiten, die angeben, in welcher Zeit ein Aggregat seine volle Leistung erbringt. Daraus wiederum ergibt sich der Bezugs- bzw. Einspeisegradiant („Anfahrrampe“). Dieser ist ein Indikator für die Flexibilität einer Anlage und ermöglicht einen Vergleich untereinander in Leistung pro Zeiteinheit. Des Weiteren ist dies ein zu erfüllendes Kriterium bei der Präqualifikation am Regelleistungsmarkt (z.B. min. 2% der Nennleistung pro Minute für SRL und MRL). Für die Abwasserreinigung spielt dieser aufgrund ihrer relativ geringen Leistungsgrößen und damit oftmals sehr schnellen Reaktionszeiten allerdings nur eine untergeordnete Rolle. Ferner sind Mindest- und Maximallaufzeiten maßgebende Einflussfaktoren.

Abgeleitet wurden die Kenngrößen unter anderem aus den Auswertungen der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten am Energiemarkt (vgl. Kapitel 2.1.2). Sie werden in den weiteren Untersuchungen durch entsprechende Kennzahlen quantifiziert. Daneben spielen insbesondere klärtechnische Aspekte eine wichtige Rolle. Durch definierte Grenzen von ab- und zuschaltbaren Zeiteinheiten sowie die Einführung einer Regenerationszeit wird die Prozessstabilität sichergestellt. Ergänzend sind unter Umständen zusätzliche individuelle Restriktionen und Kontrollparameter (vgl. Kapitel 3.3) für das jeweilige Aggregat notwendig. Da klärtechnische Restriktionen prioritär einzustufen sind, werden einige Kenngrößen, wie z.B. Mindestlaufzeiten, verschärft und verändert, obwohl aus rein technischer Sicht ggf. geringere Werte ansetzbar sind. Die aufgestellten Zeitintervalle sollen daher nicht nach rein technisch-physikalischen Kriterien gewählt werden, sondern vor dem Hintergrund die originäre Funktion des Aggregats auf der Anlage zu erfüllen. Am Beispiel eines Rührwerkes bedeutet dies, dass das Aggregat mindestens 15 Minuten zugeschaltet bleiben muss, um das zu durchmischende Medium in Schwebelage zu bringen bzw. zu halten, obwohl ein An- bzw. Ausschalten im Bereich von wenigen Minuten technisch problemlos möglich wäre. Ziel ist explizit keine Optimierung der Kenngrößen hinsichtlich einer maximalen Nutzung, sondern einer sinnvollen Integration in ein Managementsystem bezogen auf die individuellen Randbedingungen für Kläranlagen.

Nachfolgend sind in Tabelle 3.1 sowie ergänzend in Abbildung 3.3 die wichtigsten Parameter näher dargestellt und erläutert.

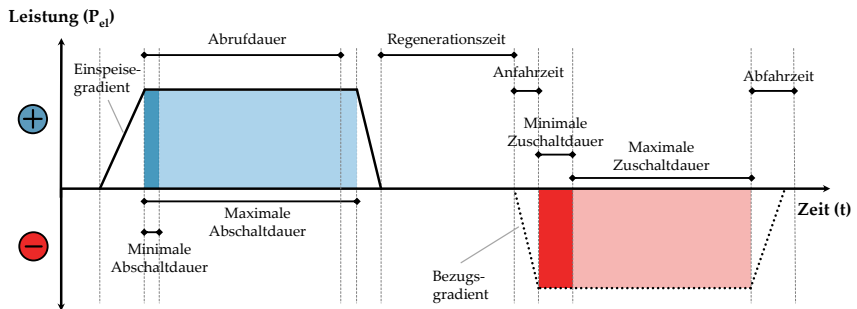


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017b)

Tabelle 3.1: Übersicht der relevanten Aggregatkenngößen

Kenngroße		Ursprung	Beschreibung
Abrufdauer	[t_{Abruf}]	Internes/ externes Signal	Gesamte Dauer, in der ein Aggregat die geforderte Leistung erbringt/abwirft.
Anfahrzeit	[t_{Anf}]	Technisch-physikalische Größe	Benötigte Zeit, die vom Stillstand bis zur maximalen Leistung nach Einschalten des Aggregats erreicht ist.
Abfahrzeit	[t_{Abf}]	Technisch-physikalische Größe	Benötigte Zeit, die nach Abschalten benötigt wird bis die Leistung auf 0 absinkt.
Minimale Abschaltdauer	[$t_{\text{Ab,min}}$]	Klärtechnische Größe	Minimale Zeit, die ein Aggregat abgeschaltet bleiben muss, ohne dass ein Zuschalten möglich ist.
Maximale Abschaltdauer	[$t_{\text{Ab,max}}$]	Klärtechnische Größe	Maximale Zeit, die ein Aggregat abgeschaltet werden kann.
Minimale Zuschaltdauer	[$t_{\text{Zu,min}}$]	Klärtechnische Größe	Minimale Zeit, die ein Aggregat eingeschaltet bleiben muss, bevor es wieder abgeschaltet werden kann.
Maximale Zuschaltdauer	[$t_{\text{Zu,max}}$]	Klärtechnische Größe	Maximale Zeit, die ein Aggregat während eines Abrufes zugeschaltet bleiben kann.
Regenerationszeit	[t_{Reg}]	Klärtechnische Größe	Zeit, die nach Beendigung eines Abrufs benötigt wird, bis die Flexibilität erneut zur Verfügung steht.
Bezugs-/Einspeise-gradient	[-]	Technisch-physikalische Größe	Berechnet sich aus maximaler Leistung und der An- bzw. Abfahrzeit. Dieser Parameter gibt an, wie schnell die volle Leistung zur Verfügung steht bzw. auf 0 absinkt. Dies ist z. B. ein wichtiger Parameter, um eine Aussage zur Eignung für eine Interaktion mit Energienetzen treffen zu können (Rampenfähigkeit).

3.3 Restriktionen und Kontrollparameter

Zur tatsächlichen Nutzung der identifizierten und untersuchten Aggregate sind individuelle Restriktionen der unterschiedlichen Prozesse unerlässlich, um den Betrieb und die Stabilität der Kläranlage nicht zu gefährden. Umgesetzt werden diese über die jeweiligen Kontrollparameter, die die individuellen Restriktionen quantifizieren. Während die erforderlichen technisch-physikalischen und klärtechnischen Kenngrößen aus Kapitel 3.2 jedem Aggregat zugeordnet werden können, ergänzen die Kontrollparameter diese durch die Berücksichtigung der individuellen Randbedingungen der einzelnen Aggregate. Dazu sind umfassende Kenntnisse der Betriebsweise sowie des Zusammenhangs der Eingriffe auf die verfahrenstechnischen Prozesse und Verfahrensstufen auf der jeweiligen Kläranlage notwendig. Jedes Aggregat bzw. jede Aggregatgruppe hat dabei individuelle Parameter, wie z.B. minimale Betriebszeiten pro Tag, die eruiert werden müssen. Zusätzlich müssen die Grenzen, in denen die jeweilige Prozessstabilität gewährleistet ist, ermittelt werden. Darüber hinaus sind spezifische technische Restriktionen der eingesetzten Aggregate zu beachten, die eine Verwendung einschränken (z.B. maximale Schaltzyklen pro Tag). Erst durch die Analyse der bisherigen Steuerung und Betriebsführung sowie des Automatisierungsgrades des Aggregats kann unter Berücksichtigung der Kontrollparameter eine sinnvolle Integration in ein Managementsystem gewährleistet werden. Es ist zu empfehlen, die Parameter und deren Auswirkungen auf den Betrieb iterativ über Modellierung und/oder Vorversuche auf den jeweiligen Anlagen zu überprüfen und fortlaufend anzupassen.

3.4 Zwischenfazit zur Methodenentwicklung

Unter Verwendung der vorgestellten Methodik kann diese Managementstrategie zur Erfassung und Hebung von Flexibilitätspotenzialen auf Kläranlagen dienen. Die Definition von erforderlichen Kenngrößen und die Einführung von Restriktionen und Kontrollparametern verbinden die kläranlagenseitigen mit den energetischen Anforderungen an Aggregate unter Berücksichtigung derer technischen bzw. physikalisch leistbaren Eigenschaften. Im anschließenden Kapitel erfolgt die Darstellung der Durchführung der vorgestellten Methodik anhand einer realen Kläranlage. Hierbei sollen nutzbare Aggregate dargestellt, das Flexibilitätspotenzial bestimmt und bewertet sowie die in diesem Kapitel beschriebenen Kenngrößen, Restriktionen und Kontrollparameter definiert und quantifiziert werden, um Aussagen zu einem flexiblen Anlagenbetrieb zu ermöglichen.

4 Methodenanwendung zum flexiblen Anlagenbetrieb

Nachfolgend wird die in Kapitel 3 vorgestellte Methodik anhand einer realen Kläranlage dargestellt. Hierzu werden zunächst alle auf der Anlage vorhandenen Aggregate in Betracht gezogen und eine Auswahl unter Einbeziehung der Literatur sowie Erfahrungen und Vorschläge des Betriebspersonals vorgenommen (vgl. Kapitel 3.1). In einem nächsten Schritt wird anhand dieser Vorauswahl, eine detaillierte Analyse der einzelnen Aggregate durchgeführt, mit dem Betreiber abgestimmt und unter Berücksichtigung der lokalen Randbedingungen für die Kläranlage neu bewertet. Für jede Aggregatgruppe werden hierbei das spezifische Flexibilitätspotenzial, die entsprechenden Kenngrößen (vgl. Kapitel 3.2) sowie die relevanten Einflussgrößen als auch mögliche Kontrollparameter über ermittelte Restriktionen abgeleitet (vgl. Kapitel 3.3). Zusätzlich sind für einige Aggregate, die für eine Flexibilitätsnutzung in Frage kommen, auf der Projektanlage allerdings nicht eingesetzt werden, in Kapitel 4.3 allgemeine Empfehlungen sowie Restriktionen beschrieben.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage zur praktischen Umsetzung in Form der Abschaltversuche (Kapitel 5.1) und zum Aufbau der Flexibilitätsbausteine des Simulationsmodells (Kapitel 5.2) sowie der Teilnahme am Regelleistungsmarkt über die Integration in ein Virtuelles Kraftwerk (Kapitel 5.3).

4.1 Beschreibung des Projektgebietes und der Projektanlage Radevormwald

Das Projektgebiet bzw. die Projektanlage Radevormwald (Abbildung 4.1) befindet sich im ländlich geprägten Oberbergischen Kreis in Nordrhein-Westfalen. Radevormwald ist eine der ältesten Städte im Bergischen Land und trägt offiziell den Titel „Stadt der Höhe“. Sie liegt in einer Randalage etwa 25 km östlich von Wuppertal bzw. rund 55 km östlich der Metropolen Köln und Düsseldorf. Das Einzugsgebiet beträgt ca. 54 km². Die Einwohnerzahl der Stadt Radevormwald wird mit 22.662 (Stand 2016) angegeben und ist seit 1975 leicht rückläufig (Stadt Radevormwald 2017).



Abbildung 4.1: Kläranlage Radevormwald (Bildquelle: Wupperverband; Copyright: Stadt Wuppertal)

4.1.1 Anlagenbeschreibung

Das Klärwerk Radevormwald ist eine Kläranlage mit getrennt anaerober Schlammstabilisierung, die das Abwasser der Stadt Radevormwald sowie der Stadtteile Lennep und Bergisch Born reinigt. Die Ausbaugröße beträgt 66.700 EW und gehört damit zur Größenklasse 4 (Anhang 1, AbwV 2004). Die Anlage zeichnet sich durch einen klassischen Aufbau von Belebtschlammanlagen mit separat anaerober Schlammstabilisierung aus. Einzig bei der biologischen Stufe weist sie eine Besonderheit auf und bietet den Vorteil, dass sowohl das Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation (BB 1) als auch das der intermittierenden Denitrifikation (BB 2) eingesetzt wird. Die auf der Anlage eingesetzten Verfahrenstechniken und verbauten Aggregate decken damit ein breites Spektrum der im klärtechnischen Betrieb üblicherweise eingesetzten Aggregate ab. Auch Zulaufganglinie, Abwasserzusammensetzung und Energieverbrauch bewegen sich in dafür typischen Bereichen (siehe Kapitel 4.1.3). Dies führte u.a. zur Auswahl als Projektanlage im Rahmen des Projektes *arrivee*.

Die Anschlussbelastung im Jahre 2014 beträgt auf Grundlage des mittleren CSB_{120} rund 58.000 EW_{120} mit einer Jahresabwassermenge von rund 7.200.000 m^3/a . Eine stark vereinfachte schematische Darstellung der Wasser- und Schlammwege ist in Abbildung 4.2 abgebildet. Eine detaillierte Darstellung des Fließschemas der Anlage ist Anhang A 1 zu entnehmen.

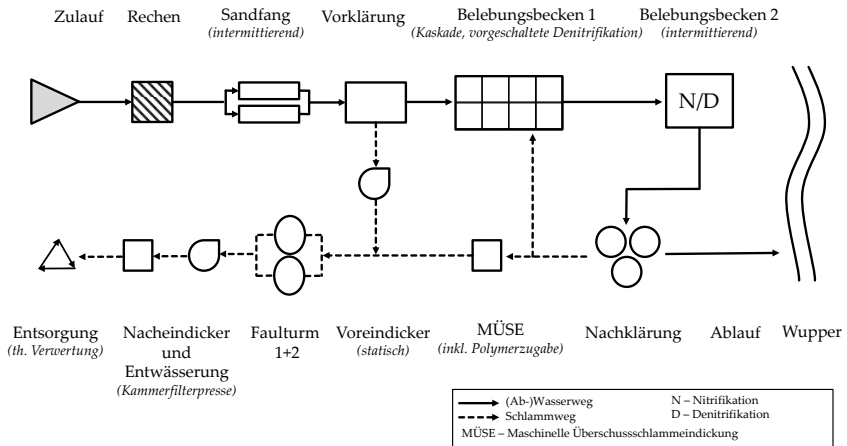


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Wasser- und Schlammwege der KA Radevormwald

Das Abwasser fließt der Anlage im freien Gefälle zu, weshalb keine Hebewerke benötigt werden. Die mechanische Reinigung erfolgt in einer zwei-straßigen Rechenanlage und einem intermittierend betriebenen, belüfteten Sandfang. Anschließend fließt das Abwasser in das Vorklärunbecken mit einem Volumen von $V_{VK} = 900 \text{ m}^3$ und einer mittleren Aufenthaltszeit von rund einer Stunde ($t_{A,VK} = 1,1 \text{ h}$).

Die biologische Stufe besteht aus zwei nacheinander durchflossenen Becken mit einem Gesamtvolumen von 19.536 m^3 ($V_{BB1} = 13.536 \text{ m}^3$; $V_{BB2} = 6.000 \text{ m}^3$). Das erste Belebungsbecken (BB 1) besteht aus einer zweistufigen Kaskade mit acht gleichgroßen Kammern, die nacheinander durchflossen werden. Drei der Kammern werden als Denitrifikationsbecken (unbelüftet), zwei zur Nitrifikation (belüftet) und drei variabel betrieben („Vario-Becken“). Die Vario-Becken werden anhand der Ammoniumstickstoffkonzentration ($\text{NH}_4\text{-N}$) im Ablauf des ersten Belebungsbeckens geregelt. Die Beschickung erfolgt zu je 25 % in Kammer 1 und 2 und zu 50% in Kammer 6. Die Umwälzung wird über intermittierend betriebene Rührwerke in den Denitrifikations-Zonen sichergestellt. Das zweite Becken (BB 2) wird vierstraßig, parallel durchflossen und mit einer intermittierenden Belüftung betrieben, welche eine ausreichende Durchmischung ohne zusätzliche Rührwerke gewährleistet.

Die Phosphorelimination erfolgt zum einen über eine Simultanfällung im ersten Belebungsbecken und zum anderen im Verteilerbauwerk der Nachklärung. Des Weiteren erfolgt eine Zugabe von Kalkmilch zur Stabilisierung des pH-Wertes.

Die Nachklärung erfolgt in drei identischen vertikal durchströmten Rundbecken, auf die das Abwasser gleichmäßig verteilt wird. Im Anschluss fließt das gereinigte Abwasser in die Wupper. Die Rücklaufschlammförderung erfolgt über drei Kreiselpumpen in das erste Belebungsbecken.

Der in der Vorklärung entnommene Primärschlamm wird zunächst in einem statischen Eindicker entwässert. Der aus dem Rücklaufschlamm schacht der Nachklärung entnommene Überschussschlamm wird unter Polymerzugabe durch ein Seihband maschinell eingedickt (maschinelle Überschussschlamm eindickung; MÜSE). Zusammen mit dem Überschussschlamm wird der eingedickte Primärschlamm zur Stabilisierung in zwei parallel beschickte Faulbehälter ($V_{FB} = 1.440 \text{ m}^3$) gefördert und dort ausgefault. Anschließend erfolgen eine Nacheindickung und eine Entwässerung über zwei Kammerfilterpressen. Zur thermischen Verwertung wird der Klärschlamm zur Kläranlage Buchenhofen abtransportiert.

Das bei der anaeroben Stabilisierung entstehende Klärgas wird in einem Niederdruckgasbehälter ($V_{\text{Gasspeicher}} = 800 \text{ m}^3$) zwischengespeichert. Die Klärgasverwertung erfolgt in zwei baugleichen BHKW mit einer elektrischen Leistung von je 80 kW_{el} und einer thermischen Leistung von je 147 kW_{th} . Der produzierte Strom wird ausschließlich zur Eigenbedarfsdeckung genutzt (keine Netzeinspeisung vorgesehen). Die Abwärme wird zur Beheizung der beiden Faulbehälter und der Betriebsgebäude verwendet. Bei zusätzlichem Wärmebedarf wird ein Teil des Klärgases in einem Gasheizkessel genutzt. Zur Sicherstellung des Anlagenbetriebes bei Stromausfall ist ein stationäres Notstromaggregat mit einer Leistung von 480 kW_{el} installiert.

4.1.2 Datengrundlage

Für die KA Radevormwald stehen neben allgemeinen Informationen (Anlagenbeschreibung, Fließschema, Ausbaugröße etc.) umfassende Betriebsdaten aus den Betriebstagebüchern zur Verfügung. Neben den energetischen Daten zu Stromerzeugung und -bezug sind Betriebsstunden sowie die vollständige Aggregatliste der Anlage (siehe Anhang A 2) vorhanden. Des Weiteren kann auf Messungen zur Anlagenbelastung (Konzentrationen im Zulauf der Anlage, der biologischen Stufe und der Nachklärung) und der Wasser-, Schlamm- und Gasmengen für eine weitergehende Untersuchung zurückgegriffen werden. Als Datengrundlage steht eine Reihe von hochaufgelösten, in 15-Minuten-Online-Werten, diskretisierten Datensätzen (Abwasserqualität, Stromverbrauch etc.) zur Verfügung. Eine Übersicht der ausgewerteten Daten ist in Tabelle 4.1 dargestellt.

Tabelle 4.1: Auszug der wichtigsten verwendeten Daten der KA Radevormwald (Bezugsjahr 2014)

Datensatz	Beschreibung	
Aggregatliste	Liste und Detailangaben der installierten Aggregate auf der Anlage	<ul style="list-style-type: none"> • Hersteller • Wirk-/Nennleistung • Betriebsstunden • Stromverbrauch • Ggf. Förderhöhe, Durchfluss etc.
Betriebsstunden	Betriebsstunden der wichtigsten Verbraucher in 2-Stunden-Intervallen	
Leistungsaufzeichnungen	Auswertungen der 15-Minuten-Online Aufzeichnungen	<ul style="list-style-type: none"> • Stromerzeugung (BHKW) • Klärgasanfall und Füllstand Gasspeicher • Druckluftherzeugung (BB1 und BB2) und daraus berechnete Leistungsaufnahme • NH_4- und NO_x-Konzentrationen in der biologischen Stufe und im Ablauf der Nachklärung • Zulaufwassermengen und (Schlamm-) Volumenströme (Abzug Vorklärung, Zentrifuge, RLS, Voreindicker)
Betriebsdaten	Zusammenstellung der Zulaufkonzentrationen/-frachten (24 h MP)	Zulaufwassermengen, Konzentrations- (BSB_5 , CSB , P_{Ges} , N_{Ges}) und Zuflussmessungen zur Kläranlage
Stromdaten	Gesamtstromverbrauch, Stromerzeugung, Fremdbezug (in Stundenwerten)	

4.1.3 Zuflusscharakteristik, Energieverbrauch und Energieproduktion

Der Energieverbrauch einer Kläranlage ist eng mit der Anlagenbelastung – also den Wassermengen und Frachten - gekoppelt. Bei schwankenden Zulaufwassermengen und Frachten wird durch die variable Leistungsaufnahme vieler Aggregate mehr oder weniger Strom benötigt und es ergibt sich ein ausgeprägter Lastgang. Somit liegt der Stromverbrauch in den belastungsstarken Mittagsstunden höher als in den Schwachlastzeiten am frühen Morgen.

Auf der KA Radevormwald weist der Zufluss ebenfalls deutliche Schwankungen vom Morgen bis zum Mittag auf. Das Maximum von 185 l/s wird zwischen 9:00 Uhr und 12:00 Uhr und das Minimum von rund 100 l/s gegen 6:00 Uhr erreicht. Im restlichen Tagesverlauf verläuft die Zuflussmenge (im Median) relativ konstant bei 160 l/s. Die Zulauffrachten zeigen einen typischen Verlauf analog zur Zulaufwassermenge (vgl. Abbildung 4.3). Die detaillierte Anlagenbelastung in Form der Frachten und Konzentrationen im Zulauf der Anlage sowie zur biologischen Stufe ist Anhang A 3 zu entnehmen.

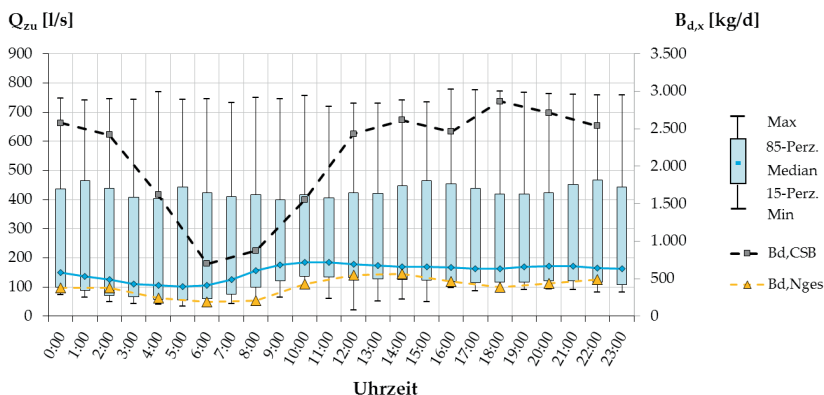


Abbildung 4.3: Zuflusswassermenge (alle Tage im Betrachtungszeitraum 2014) sowie CSB- und N_{Ges} -Fracht zur KA Radevormwald

Mit einem einwohnerspezifischen (Gesamt-)Energieverbrauch von 29,5 kWh/(E*a) liegt der Stromverbrauch der KA Radevormwald, nach DWA (2015a) unter dem Median der GK 4 für anaerobe Stabilisierungsanlagen von 31,9 kWh/(E*a). Die Belüftung liegt mit 13,8 kWh/(E*a) im üblichen Bereich (Median nach DWA (2015a) für alle GK: 15,6 kWh/(E*a)). Die Aufteilung des Stromverbrauchs auf die unterschiedlichen Aggregatgruppen entspricht überwiegend der üblichen Verteilung auf kommunalen Kläranlagen (siehe Anhang A 4).

In den beiden Faultürmen wurden im Jahr 2014 etwa 366.000 Nm³ Klärgas produziert und mit einem angegebenen Wirkungsgrad von 32 % in den BHKW zu 726.494 kWh_{el} verstromt. Der Eigenversorgungsgrad beträgt damit rund 42 %. Der mittlere CH₄-Gehalt ist mit 58 % geringer als im bundesweiten Durchschnitt (vgl. Kapitel 7.3.2). In Tabelle 4.2 sind die wichtigsten Anlagendaten näher aufgeführt.

Tabelle 4.2: Belastungs- und Energiekennwerte der KA Radevormwald (2014)

Abwasseranfall (Zulauf)	7.190.634 [m ³ /a]	Klärgasanfall ¹	366.176 [Nm ³ /a]
B _{d,CSB,Z} (Mittelwert, alle Tage)	6.948 [kg/d]	Stromerzeugung	726.494 [kWh _{el} /a]
B _{d,BSB,Z} (Mittelwert, alle Tage)	2.431 [kg/d]	Gesamtstrom- verbrauch ² (gemessen)	1.713.745 [kWh _{el} /a]
B _{d,Nges,Z} (Mittelwert, alle Tage)	661 [kg/d]	CH ₄ -Gehalt des Klärgas (Mittelwert)	58,0 [%]
B _{d,Pges,Z} (Mittelwert, alle Tage)	98 [kg/d]	Spez. Strombedarf (nach DWA 2015a)	29,5 [kWh/(E*a)]

¹ Aufgrund fehlerhafter Kalibrierung im Jahr 2014 wurde der Klärgasanfall über die Stromerzeugung berechnet.

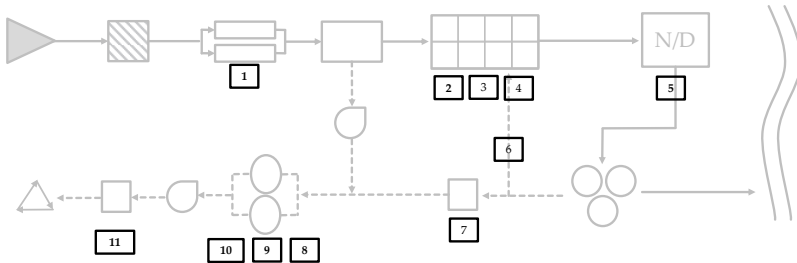
² Der berechnete Gesamtstromverbrauch beträgt 1.623.445 kWh/a.

(vgl. Aggregatliste; Anhang A 2).

4.2 Ergebnisse zur Bewertung der Aggregate anhand der Kläranlage Radevormwald

Im Rahmen der Identifikation von Aggregaten, die für eine Flexibilisierung grundlegend in Frage kommen, wurden zunächst die Aggregate, die in der Literatur bereits für einen flexiblen Einsatz als theoretisch geeignet erachtet wurden mit der Aggregatliste der KA Radevormwald (vgl. Anhang A 2) abgeglichen und die vorhandenen Betriebsdaten gesichtet. Die so ermittelte erste Aggregateinschätzung wurde in einem nächsten Schritt, unter Einbindung des Betriebspersonals, um weitere Aggregate ergänzt bzw. um ungeeignete Aggregate reduziert, die aufgrund ihrer möglichen Ansteuerbarkeit im internen PLS der Kläranlage und Betriebsführung für eine weitergehende Analyse interessant erscheinen. Dabei wurden alle auf der Anlage installierten Aggregate für eine Flexibilisierung betrachtet und diskutiert. Insgesamt wurden für die KA Radevormwald 11 Aggregate bzw. Aggregatgruppen als geeignet identifiziert. In einem nächsten Schritt werden diese anhand der Betriebsdaten und -führung ausführlich analysiert und deren Flexibilitätspotenzial quantifiziert. Die identifizierten und näher untersuchten Aggregate sind in Abbildung 4.4 im Fließschema der Kläranlage dargestellt. Deren Analyse ist nachfolgend im Detail beschrieben.

Im weiteren Verlauf sind die im Folgenden entwickelten Restriktionen und deren Kontrollparameter sowohl als allgemeingültiger Vorschlag als auch mit den genutzten spezifischen Parametern der Projektanlage angegeben.



1	Sandfanggebläse	4	Rezirkulationspumpen	7	MÜSE	10	Rührwerke Faulturm
2	Gebläse BB 1	5	Gebläse BB 2	8	Heizschlamm pumpen	11	Kammerfilterpressen
3	Rührwerke BB 1	6	Rücklaufschlamm pumpen	9	Rohschlamm pumpen		

Abbildung 4.4: Fließschema der KA Radevormwald mit Standorten der identifizierten und untersuchten Aggregatgruppen

4.2.1 Sandfang

Der zweistraßige Sandfang der KA Radevormwald besitzt drei Sandfanggebläse. Die Möglichkeit zur Abschaltung der Gebläse ist abhängig von der Zuflusssituation und der gewünschten Abscheideleistung der Straße. Ebenso wird die mögliche Dauer der Abschaltung maßgeblich von der Zulaufmenge bestimmt. Seit April 2014 werden die Sandfanggebläse diskontinuierlich betrieben und alle 6 Stunden für 1 Stunde eingeschaltet. Somit laufen die Gebläse 4 h pro Tag. Ab einer Zulaufmenge von 500 l/s wird die zweite Sandfangstraße in Betrieb genommen und das zweite Gebläse zugeschaltet. Sandfanggebläse werden üblicherweise kontinuierlich betrieben, aufgrund der hohen Aufenthaltszeit im Sandfang wird hier ein Intervallbetrieb durchgeführt. Diese Betriebsweise ist für kommunale Kläranlagen untypisch und eine Besonderheit der KA Radevormwald.

Zur flexiblen Nutzung wird nur das Gebläse 1 berücksichtigt, da dieses als einziges ständig (im o.g. Intervall) in Betrieb ist und somit ständig nutzbare Flexibilität bieten kann. Aus der Betriebsweise ergibt sich eine Nutzung sowohl zur positiven als auch zur negativen Bereitstellung von Flexibilität (vgl. Abbildung 4.5), welche erst durch den Intervallbetrieb ermöglicht wird. Bei einem üblichen Dauerbetrieb wäre eine Nutzung durch Abschalten als positive Flexibilität denkbar.

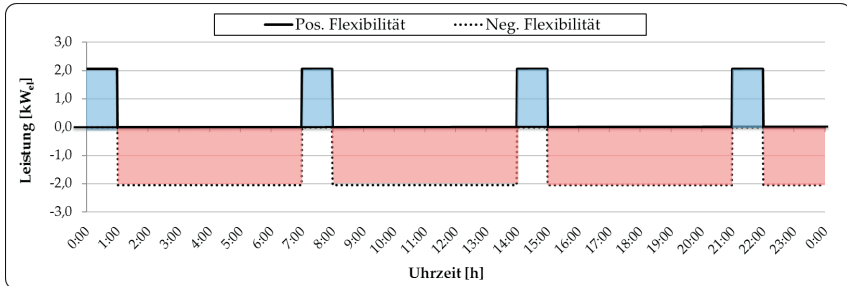


Abbildung 4.5: Nutzbare Flexibilität des Sandfanggebüses der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für den Sandfang definiert:

Tabelle 4.3: Restriktionen und Kontrollparameter der Sandfanggebüses

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Zulaufwassermenge [l/s]	$Q_{\text{Ist}} < Q_{\text{Grenz}}$	$Q_{\text{Ist}} < 500$
Sedimentationsverhalten der organischen Substanzen [h]	$t_{n-1} < x$	$t_{n-1} < 5$

Die Flexibilitätsbereitstellung des Sandfangs wird über die hydraulische Belastung der Kläranlage (Q_{Grenz}) begrenzt, um bei hohen Zulaufwassermengen eine gute Sandabscheidung zu gewährleisten. Die Begrenzung der Zulaufmenge kann über Versuche, Auswertungen der Betriebstagebücher und entsprechender Erfahrung des Betriebspersonals bestimmt werden. Im vorliegenden Fall entspricht dieser Wert ca. dem 2,2-fachen des Jahresmittelwertes des Zulaufs.

Die zweite Restriktion stellt sicher, dass das letzte Belüftungsintervall nicht länger als 5 Stunden zurückliegt, und verhindert ein übermäßiges Absetzen von organischem Material im Sandfang (Erfahrungswert des Betreibers). Bei entsprechender Vorkenntnis einer geplanten Abschaltung, z. B. durch internes Lastmanagement, könnte die Belüftungszeit gezielt vorgezogen werden, um auch bei Verletzung der Restriktion eine Nutzung zu ermöglichen.

4.2.2 Belüftung der Belebungsbecken

Auf der KA Radevormwald bieten die Belüftungsaggregate der biologischen Stufe, welche rund die Hälfte des Gesamtenergieverbrauchs ausmachen, erwartungsgemäß das größte Flexibilitätspotenzial. Die Belastung weist sowohl einen Tages- als auch einen Wochengang auf. In Abhängigkeit von der Zulauffracht und der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf der biologischen Stufe können die Gebläse, bzw. Teile der Gebläse, ausgeschaltet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Möglichkeit zur teilweisen Abschaltung, beispielsweise durch mehrere betriebene Gebläse oder die Möglichkeit einer Leistungsreduzierung (z.B. durch FU), gegeben ist und ein Absetzen des Belebtschlammes durch ausreichende Durchmischung verhindert wird.

Der Sauerstoffeintrag in die beiden Belebungsbecken erfolgt über zwei Gebläsestationen. Die installierte Leistung und die Betriebsstunden der Gebläse sind in Tabelle 4.4 aufgeführt. In Abhängigkeit des erforderlichen Luftbedarfs werden die FU-gesteuerten Gebläse zugeschaltet. Die Wirkleistungsaufnahme wurde über die gemessene Frequenz und die zugehörige Leistung berechnet. Die Wirkleistung wurde über eine Leistungsmessung aufgenommen. Hiermit ergibt sich eine nutzbare Leistung für BB 1 zwischen 46,8 – 74,5 kW_{el} und für BB 2 zwischen 14,4 und 25,6 kW_{el} (vgl. Abbildung 4.6), die deutlich von den installierten Leistungen abweichen.

Tabelle 4.4: Installierte Leistung und Betriebsstunden der Gebläsestationen auf der KA Radevormwald

Belebungsbecken 1	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3
Leistung	90 kW_{el}	75 kW_{el}	55 kW_{el}
Betriebsstunden	6.027 h/a	2.036 h/a	3.940 h/a
Belebungsbecken 2	Gebläse 1	Gebläse 2	Gebläse 3
Leistung	75 kW_{el}	75 kW_{el}	75 kW_{el}
Betriebsstunden	3.120 h/a	3.049 h/a	2.667 h/a

Für die Flexibilitätbereitstellung der Gebläse ist als wichtigster Kontrollparameter die Ammoniumkonzentration im Ablauf der Belebungsbecken zu berücksichtigen. Zusätzlich kann die Zulaufbelastung (z. B. in Form der CSB- und NH_4 -Fracht) als Kontrollparameter berücksichtigt werden, um bei Stoßbelastungen ein Abschalten der Gebläse zu verhindern. Alternativ könnte die Zulaufwassermenge hinzugezogen werden, allerdings könnten hierbei ggf. viele Zeiträume mit geringer Zulauffracht (Verdünnungseffekt) nicht berücksichtigt werden.

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Gebläse der Belebungsbecken definiert:

Tabelle 4.5: Restriktionen und Kontrollparameter der Belüftung der Belebungsbecken

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
NH ₄ -Konzentration [mg/l]	$C_{\text{NH}_4, \text{BBab}} < C_{\text{NH}_4, \text{BBab}, \text{Grenz}}$	$C_{\text{NH}_4, \text{BBab}} < 3,0$
CSB-Zulauffracht [kg/d]	$B_{d, \text{CSB}, \text{Zu}} < B_{d, \text{CSB}, \text{Grenz}}$	Nicht hinterlegt (Regelung über NH ₄ -Konzentration ausreichend)
NH ₄ -Zulauffracht [kg/d]	$B_{d, \text{NH}_4, \text{Zu}} < B_{d, \text{NH}_4, \text{Grenz}}$	Nicht hinterlegt (Regelung über NH ₄ -Konzentration ausreichend)
Alternativ: Zulaufwassermenge	$Q_{\text{Ist}} < Q_{\text{Grenz}} \text{ [l/s]}$	Nicht hinterlegt
Auswirkungen auf die Biozönose beachten (z.B. Zusammensetzung, P-Rücklösung)	Einzelfallbetrachtung	Keine Restriktion

CSB-Zulauffracht: $B_{d, \text{CSB}, \text{Zu}} = C_{\text{CSB}} * Q_{\text{Zu}} < B_{d, \text{CSB}, \text{Grenz}}$
bzw. NH₄-Zulauffracht: $B_{d, \text{NH}_4, \text{Zu}} = C_{\text{NH}_4} * Q_{\text{Zu}} < B_{d, \text{NH}_4, \text{Grenz}}$

Ein Zuschalten der Belüftung über den Bedarf an Sauerstoff hinaus („Überbelüftung“) zur Bereitstellung von negativer Flexibilität wird unter reinigungstechnischen und Energieeffizienzgründen als nicht sinnvoll erachtet und nicht näher betrachtet (siehe dazu Kapitel 6.1). Die tatsächlich nutzbare Flexibilität der beiden Belebungsbecken ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

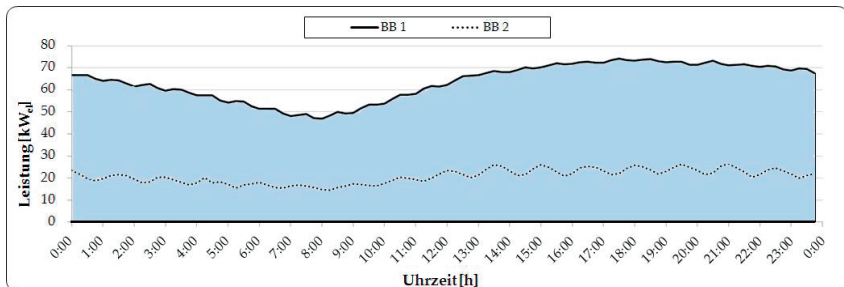


Abbildung 4.6: Positive Flexibilität der Belüftungssysteme in der biologischen Stufe im mittleren Tagesverlauf

4.2.3 Rührwerke der Belebungsbecken

Ein Abschalten der Rührwerke ist prinzipiell jederzeit möglich, wobei aufgrund der Notwendigkeit der Durchmischung die Abschaltdauer limitiert und von der Durchmischungsleistung bzw. der Schubleistung der Rührwerke abhängig ist. In der biologischen Stufe der KA Radevormwald sind insgesamt 6 Rührwerke in den Denitrifikations- und Vario-Zonen zur Umwälzung des Belebtschlammes installiert. Davon arbeiten vier Rührwerke im Intervallbetrieb (je Stunde 40 min ein- und 20 min ausgeschaltet) sowie zwei Rührwerke im Dauerbetrieb. Bei der Nutzung der Rührwerke zur Flexibilitätsbereitstellung ist eine vollständige Remobilisierung des Schlammes nach dem Ausschalten der Rührwerke im Belebungsbecken sicherzustellen. Dies kann durch die Berechnung einer ausreichenden Schubleistung der Rührwerke erfolgen. Alternativ kann durch eine Außerbetriebnahme der Belüftung in den belüfteten Teilen der Belebungsbecken überprüft werden, ob Schlammablagerungen bei Intervallbetrieb der Rührwerke entstehen. Die maßgebende Leistung wurde durch Leistungsmessungen mit 1,8 kW_{el} pro Aggregat ermittelt.

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Rührwerke des Belebungsbeckens definiert:

Tabelle 4.6: Restriktionen und Kontrollparameter der Rührwerke im Belebungsbecken

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Absetzeigenschaften in der Biologie	Ausreichende Schubleistung bzw. Bodengeschwindigkeit	Keine Restriktion

Die nutzbare Flexibilität ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die Rührwerke können sowohl in positiver (Abschaltung der „Dauerläufer“) und in negativer Richtung genutzt werden.

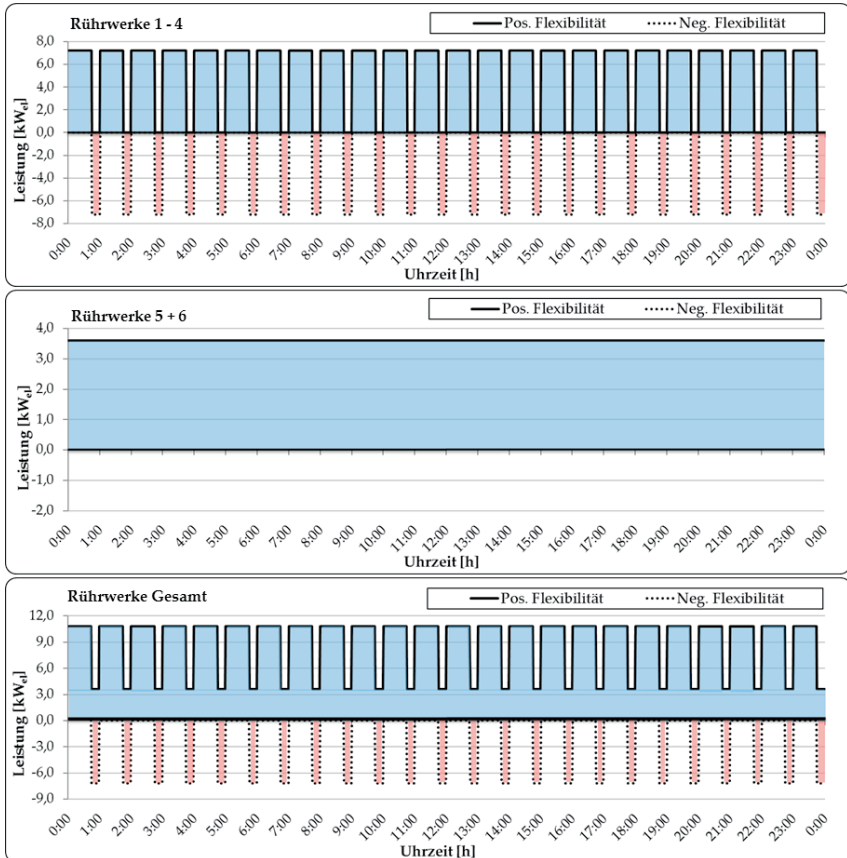


Abbildung 4.7: Identifizierte Flexibilität der Rührwerke der biologischen Stufe der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.4 Rezirkulationspumpen

Die interne Rezirkulation zur Rückführung von nitrathaltigem Abwasser aus dem Ablauf des zweiten Belebungsbeckens erfolgt in Kammer 1, 3 oder 6 der ersten biologischen Stufe. Die Rezirkulationspumpen der KA Radevormwald werden über den Nitratgehalt in Kammer 3 der ersten biologischen Stufe geregelt (siehe Tabelle 4.7). Die Regelung des Rezirkulationsstromes erfolgt mit einem fest eingestellten Wert für die Frequenzumrichter (100 % / 75 % / 50 % der Leistung).

Tabelle 4.7: Regelungsbereiche der Rezirkulationspumpen der KA Radevormwald

Leistungsbereich	NO ₃ -Konzentration	Pumpen in Betrieb in Abhängigkeit des Leistungsbereichs
100 %	bis 2,0 mg/l	87,8 %
75 %	bis 4,5 mg/l	99,3 %
50 %	bis 5,0 mg/l	99,6 %
0 %	> 5,0 mg/l	0,4 %

Die Auswertung der Laufzeiten über die Betriebsdaten ergab, dass im Jahresverlauf ganztägig im Mittel 1,5 Pumpen dauerhaft in Betrieb sind. Eine Überprüfung der NO₃-N-Werte in der Denitrifikationszone (Kammer 3) des Belebungsbeckens 1 ergab eine Überschreitung des NO₃-N-Wertes von 5 mg/l über das gesamte Jahr nur in 0,4 % der Zeit (Regelung: Pumpe aus). In Folge dessen war zu über 99 % mindestens eine der Pumpen mit mindestens 75 % der Leistung in Betrieb. Es wird daher angenommen, dass unter Berücksichtigung der aufgestellten Restriktion (Nitratgehalt im Ablauf der Belebung < 7 mg/l) eine der beiden Pumpen zur Abschaltung immer zur Verfügung steht. Da die zweite Pumpe nur unregelmäßig zur Unterstützung von Pumpe 1 in Betrieb ist, kann sie keine verlässliche Flexibilität bieten und bleibt unberücksichtigt (vgl. Abbildung 4.8).

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Rezirkulationspumpen definiert:

Tabelle 4.8: Restriktionen und Kontrollparameter der Rezirkulationspumpen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Nitratablaufkonzentration im BB [mg/l]	$C_{NO_3, BBab} < C_{NO_3, BBab, Grenz}$	$C_{NO_3, BBab} < 7$

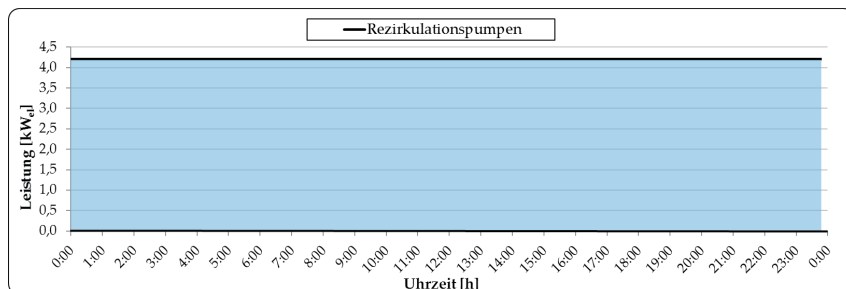


Abbildung 4.8: Nutzbare Flexibilität der Rezirkulationspumpen im mittleren Tagesverlauf

4.2.5 Rücklaufschlammumpen

Ein mögliches Abschalten der Rücklaufschlammumpen ist von verschiedenen verfahrenstechnischen Aspekten abhängig. Zum einen darf der Trockensubstanzgehalt im Belebungsbecken (TS_{BB}) durch das Abschalten der Rücklaufschlammförderung nicht zu stark absinken und zum anderen darf der maximale Schlamm Spiegel in der Nachklärung nicht überschritten werden, um Schlammabtrieb auszuschließen. Aus diesen Gründen ist ein Abschalten vornehmlich bei Trockenwetter möglich. Teilweise wird ein Ausschalten der Rücklaufschlammumpen durch die Art der Schlammförderung aus der Nachklärung ausgeschlossen, so sind beispielsweise Saugräumer auf einen konstanten Betrieb angewiesen. Die Rücklaufschlammumpen werden in einer Stufenfunktion FU-gesteuert und in Abhängigkeit vom Anlagenzufluss betrieben. Das Rücklaufschlammverhältnis beträgt dabei im Mittel 128 % des Zuflusses zum Belebungsbecken. Die (Wirk-)Leistungsaufnahme der Pumpen wurde über die betriebene Frequenz hergeleitet. Die daraus resultierenden abschaltbaren Leistungen über den Tagesverlauf sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

Um eine Beeinträchtigung der Ablaufwerte und des Betriebes der Anlage sicherzustellen, wurden zwei Restriktionen zur Abschaltung definiert:

Tabelle 4.9: Restriktionen und Kontrollparameter der Rücklaufschlammumpen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Schlamm Spiegel [m]	$h_{ist} < h_{Grenz}$	$h_{ist} < 2,0$
Zulaufwassermenge [l/s]	$Q_{ist} < Q_{Grenz}$	$Q_{ist} < 500$

Zur Bestimmung des Schlamm Spiegels wird die Sichttiefe gemessen und im PLS in den Schlamm Spiegel umgerechnet. Als Kontrollparameter wurde für den Schlamm Spiegel eine maximale Höhe h_{Grenz} von 2,0 m und für die Zulaufmenge Q_{Grenz} ein Wert von 500 l/s festgelegt.

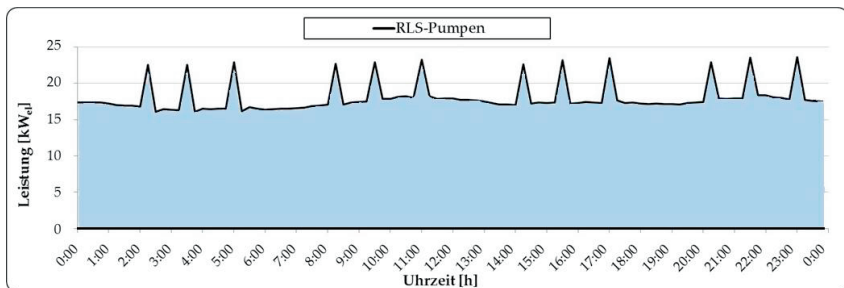


Abbildung 4.9: Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rücklaufschlammumpen der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.6 Rührwerke der Faulbehälter

Die beiden Faulraumischer werden kontinuierlich betrieben. Bei der Flexibilisierung des Betriebs der Rührwerke wird der „Schaumalarm“ als Restriktion für einen Lastabwurf herangezogen. Der Schaumalarm zeigt eine vermehrte Schaumbildung im Behälter an, die unter anderem durch eine ungenügende Durchmischung bedingt sein kann. Die maximale Abschaltdauer wird, mit ausreichend Sicherheit, mit 15 Minuten angenommen. Allgemein ist auf eine Tauglichkeit der Aggregate für einen diskontinuierlichen Betrieb zu achten, sofern diese nicht für einen Intervallbetrieb ausgelegt sind (z.B. maximale Schaltzyklen pro Tag). Bei zu großem Verschleiß an den Aggregaten bei häufigen Schaltungen ist von einer Nutzung abzusehen. Die theoretische Flexibilitätsleistung für die KA Radevormwald beträgt pro Rührwerk 7,6 kW_{el}, in Summe 15,2 kW_{el} (vgl. Abbildung 4.10).

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Rührwerke im Faulbehälter definiert:

Tabelle 4.10: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Rührwerke im Faulbehälter

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Schaumbildung	Kein Schaumalarm	Kein Schaumalarm
Max. Abschaltdauer [min]	$t_{\text{Max}} = x$	$t_{\text{Max}} = 15$

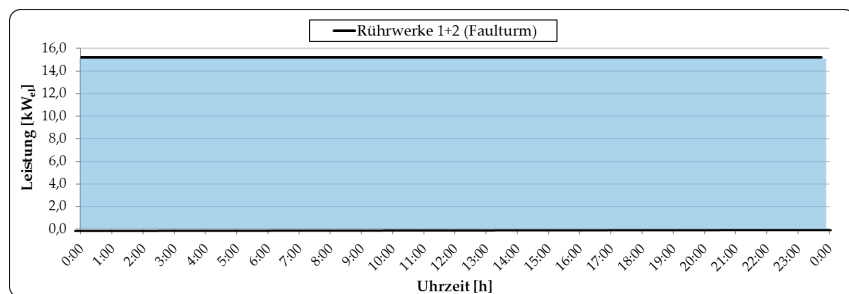


Abbildung 4.10: Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rührwerke des Faulturmes der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.7 Heizschlamm-pumpen (Faulbehälter)

Die Heizschlamm-pumpen im Faulbehälter stellen die Betriebstemperatur zwischen 32 °C ($T_{FB,min}$) und 36 °C ($T_{FB,max}$) sicher und werden über Temperaturmessungen geregelt. Der Schlamm wird üblicherweise aus dem unteren Drittel des Faulbehälters angesaugt und in den mittleren Bereich rezirkuliert. Auf der KA Radevormwald sind zwei solcher Heizschlamm-pumpen installiert. Aus den Auswertungen der Betriebstagebücher ergibt sich, dass in Summe ständig eine der Pumpen in Betrieb ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Heizschlamm-pumpen im Tagesverlauf in beide Flexibilitätsrichtungen zur Verfügung stehen. Das Zuschalten einer der Pumpen könnte u.a. gezielt als Wärmespeicherung eingesetzt werden (Power-to-Heat-Technologie, vgl. Kapitel 6.4) und dadurch deutlich mehr Flexibilität ermöglichen. Das entsprechende Regelungsfenster von $\Delta 4\text{°C}$ und die Abkühlung der Faulbehältertemperatur von rund 1°C in rund 24h (Schmitt et al. 2017b) wird als ausreichend groß eingestuft. Als maximale Zu- bzw. Abschalt-dauern werden, auf der sicheren Seite liegend, 24 Stunden angesetzt, wobei je nach Situation deutlich längere Zeiträume denkbar wären.

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Heizschlamm-pumpen definiert:

Tabelle 4.11: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Heizschlamm-pumpen im Faulbehälter

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Faulraumtemperatur [°C]	$T_{FB,min} > T_{FB} > T_{FB,max}$	$32 > T_{FB} > 36$

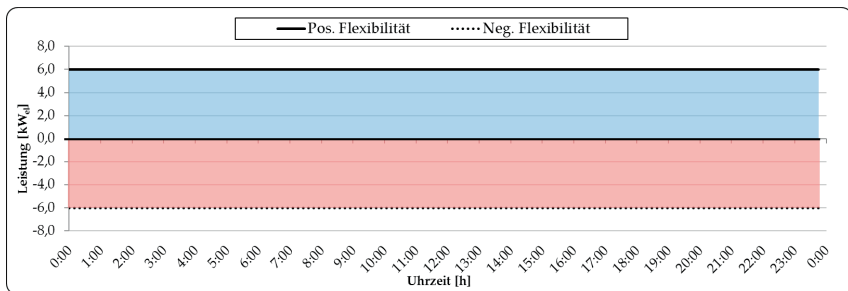


Abbildung 4.11: Nutzbare Flexibilität der Heizschlamm-pumpen des Faulturmes auf der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.8 Rohschlammumpen

Die Beschickung der Faulbehälter erfolgt mit Rohschlammumpen aus dem Eindicker bzw. Vorlagebehälter. Als Restriktion kann der Höhenstand im Vorlagebehälter (bzw. im Voreindicker) gewählt werden. Die Rohschlammumpen in Radevormwald fördern mit einer konstanten Leistung den voreingedickten Primärschlamm in den Faulbehälter. Zur Beschickung des Faulturmes haben die Auswertungen ergeben, dass 19 Stunden pro Tag hierfür benötigt werden. Zur Gewährleistung einer ausreichenden Beschickung wird hierdurch eine maximale Stillstandszeit von 300 min pro Tag berücksichtigt. Die nutzbare Flexibilität ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

Zur Absicherung eines störungsfreien Betriebes werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter für die Rohschlammumpen definiert:

Tabelle 4.12: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Rohschlammumpen zum Faulbehälter

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Summe Stillstandszeit [min/d]	$\sum t_{\text{Abschalt}} < t_{\text{Max}}$	$\sum t_{\text{Abschalt}} < 300$
Füllstand Vorlagebehälter [m]	$h_{\text{Füllstand}} = x$	Keine Restriktion

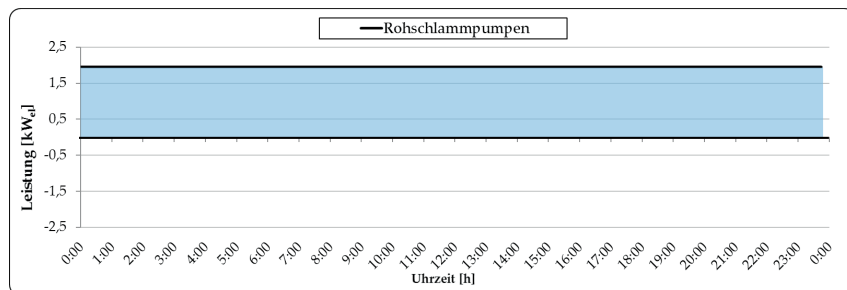


Abbildung 4.12: Nutzbare Flexibilität (positiv) der Rohschlammumpen der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.9 Maschinelle Überschussschlamm eindickung

Bei der MÜSE wird das Volumen des Schlammes so weit wie möglich reduziert, indem Wasser mechanisch vom Schlamm abgetrennt wird. Auf der KA Radevormwald ist zur Überschussschlamm eindickung ein Seihband installiert. Das Seihband inklusive Polymerdosierung, Überschussschlammabzug und Beschickung des eingedickten Schlammes in die Faulbehälter wird als Einheit vollständig automatisch betrieben. Die Aggregatgruppe besteht aus insgesamt 8 Einzelaggregaten. Für die Flexibilisierung des Betriebs der Seihbandanlage und damit des ÜSS-Abzugs kann ein Sollwert

für den TS-Gehalt im Belebungsbecken oder eine vom Betriebspersonal vorgegebene Überschussschlammfracht pro Tag als Restriktion gewählt werden. Die Vorgabe des TS-Gehaltes erfolgt in Abhängigkeit vom erforderlichen Schlammalter in der Belebung. Zudem muss bei einem Zuschalten in Radevormwald geprüft werden, ob die RLS-Pumpen in Betrieb sind (Prüfung: Volumenstrom Rücklaufschlamm $Q_{RS} > 0$ l/s), da der Überschussschlamm aus der Rücklaufschlammleitung entnommen wird. Die Mindestbetriebszeit des Seihbandes beträgt rund 120 Minuten pro Schaltvorgang, zusätzlich werden 15 Minuten für die Reinigung der Maschine benötigt. Dies wurde über die Regenerationszeit (vgl. Kapitel 3.2) berücksichtigt. Die Betriebszeit des Seihbands beträgt im Mittel 8 Stunden pro Tag. Aufgrund der erforderlichen Reinigung wird die Anzahl der Schaltvorgänge pro Tag begrenzt. Die dabei notwendige Leistung beträgt rund 10 kW_{el} (vgl. Abbildung 4.13) und steht theoretisch rund um die Uhr zur Verfügung. Eine Flexibilisierung außerhalb der Dienstzeiten ist aufgrund der Überwachung, Reinigungsarbeiten und Einstellung der Polymerdosierung beim Betriebspersonal allerdings nicht erwünscht.

Bei der Untersuchung dieser Aggregatgruppe wird deutlich, dass auch für Aggregate mit geringer (Einzel-)Wirkleistung (alle Aggregate < 3 kW_{el}) eine Nutzung unter günstigen Randbedingungen möglich ist.

Für die MÜSE werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter definiert:

Tabelle 4.13: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der ÜSS-Pumpen/Seihbandanlage auf der KA Radevormwald

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
TS-Gehalt im BB	TS _{BB,Soll} als Funktion des erforderlichen t_{rs}	2,5 g/l < TS _{BB,Soll} < 3,0 g/l
Alternativ: ÜS-Entnahme	ÜS _{d,Soll}	Nicht hinterlegt
Anwesenheit Betriebspersonal ¹	Anlagenbesetzung	Nur werktags zwischen 6:00 Uhr und 16:00 Uhr möglich
Max. Schaltvorgänge [1/d]	$n_{max} = x$	$n_{max} = 2$
RLS-Pumpe in Betrieb ²	-	$Q_{RS} > 0$ l/s

¹ Bei unzureichender Automatisierung

² spezifisches Kriterium der KA Radevormwald

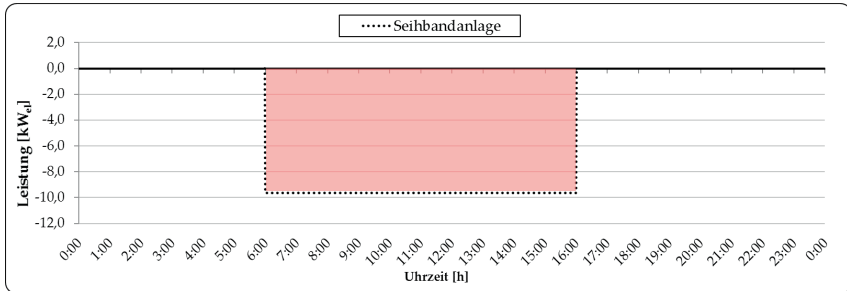


Abbildung 4.13: Nutzbare Flexibilität (negativ) der Seihbandanlage auf der KA Radevormwald im mittleren Tagesverlauf

4.2.10 Schlammwässerung (Kammerfilterpresse)

Zur Entwässerung des ausgefaulten Schlammes stehen zwei Kammerfilterpressen zur Verfügung. Der Betrieb erfolgt diskontinuierlich, kann also im Tagesverlauf flexibel verschoben werden. Ein Pressvorgang dauert 2 h bis 2,5 h, pro Tag werden im Mittel vier Vorgänge durchgeführt. Nach dem Start können die Pressvorgänge nicht unterbrochen werden und eignen sich daher nur für die Bereitstellung von negativer Flexibilität. Die Pressen werden auf der KA Radevormwald im Normalbetrieb meist parallel betrieben. Die Anzahl der durchgeführten Vorgänge ist abhängig von der Menge des anfallenden Schlammes. Die Presse besteht aus zwei Kolbenmembranpumpen mit jeweils 10 kW_{el} maximaler Wirkleistung. Die Leistungsmessungen haben allerdings ergeben, dass die Leistung über die Dauer des Entwässerungsvorgangs nicht konstant bleibt. Daher wird zur Berechnung eine Minderung von 25 % angesetzt. Dies ergibt eine nutzbare Leistung von 15 kW_{el}.¹⁰ Darüber hinaus ist die Betriebsweise über die Bedienung durch das Betriebspersonal reglementiert, welches die Einschränkung einer Nutzung werktags (Mo.-Fr.) von 6:00 Uhr bis 13:00 Uhr bedingt.

¹⁰ P_{Kammerfilterpresse} = 2*10 kW_{el} * (100 % - 25%) = 15 kW_{el}.

Für die Kammerfilterpresse werden daher folgende Restriktionen und Kontrollparameter definiert:

Tabelle 4.14: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Kammerfilterpressen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Berücksichtigung der Vorgangsdauer [h]	$t_{\text{einschalt}} = t_{\text{end}} - t_{\text{B}} + x$	$t_{\text{einschalt}} = t_{\text{end}} - t_{\text{B}} + 2,5\text{h}$
Anwesenheit Betriebspersonal*	Anlagenbesetzung	Nur (werktags) zwischen 6:00 Uhr und 13:00 Uhr möglich
Max. Schaltvorgänge [1/d]	$n_{\text{max}} = x$	$n_{\text{max}} = 4$

* Bei unzureichender Automatisierung; mit t_{B} = Betriebszeit [h]

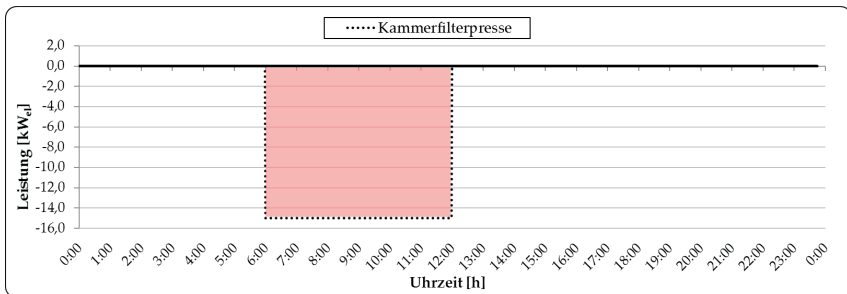


Abbildung 4.14: Nutzbare Flexibilität der Schlammwässerung im mittleren Tagesverlauf (Werktag)

4.2.11 Zusammenfassung der Aggregatauswahl

Eine Übersicht der untersuchten Aggregate im Wasser- und Schlammweg der Anlage und ihrer installierten und nutzbaren Leistung ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

Tabelle 4.15: Übersicht der untersuchten Aggregate auf der KA Radevormwald zur Bereitstellung von Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017b)

Aggregate	Anzahl	Gesamte installierte Leistung	Flexibel nutzbare Leistung		Benutzungsstunden	Anteil am Gesamtstromverbrauch
			(+) [kW _{el}]	(-) [kW _{el}]		
	[-]	[kW _{el}]			[h/a]	[%]
Sandfanggebläse	3	23,4	2,1	2,1	8.760	1,2
Gebläse Belebungsbecken	6	445,0	61,6 - 98,9	-	8.760	49,2
Rücklaufschlamm-pumpen	3	90,0	16,1 - 23,6	-	8.760	13,4
Umwälzung	6	13,8	3,6 - 10,8	7,2	8.760	5,3
Rezirkulations-pumpen	2	8,0	4,2	-	8.760	3,3
Rührwerke Faulbehälter	2	19,4	-	-	8.760	7,6
Heizschlamm-pumpen	2	11,0	6,0	6,0	8.760	3,2
Seihband/ ÜSS-Pumpen	-	12,7	-	9,6	8.760	2,0
Entwässerung (Kammerfilter- presse)	2	20,0	-	15,0	1.820	1,2
Rohschlamm-pumpen	2	4,4	2,0	-	6.935	0,8

Aufsummiert ergibt sich eine Flexibilitätssummenlinie („Flexibilitätsband“) aller nutzbaren Aggregate mit dem entsprechenden Wirkleistungspotenzial über den Tag verteilt (siehe Abbildung 4.15). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die KA Radevormwald ein erhebliches Potenzial zur Bereitstellung von Flexibilität von 112 bis

158 kW_{el} in positiver und 16 bis 40 kW_{el} in negativer Richtung, durch bereits vorhandene Aggregate neben den BHKW-Anlagen und der NEA, vorweisen kann. In Abbildung 4.15 ist das schwankende theoretische Angebot abgebildet, das die nutzbare Leistung in 15-Minuten-Werten über den Tagesverlauf darstellt. Abbildung 4.16 zeigt den Gesamtenergiebedarf der Anlage mit den theoretisch möglichen, maximalen Anpassungen des Energiebedarfs durch die untersuchten Aggregate. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Energiebedarf auf bis zu 28,5 % (49,1 kW_{el}; 06:15 Uhr) reduzieren und auf bis zu 119,9 % (240,9 kW_{el}; 11:45 Uhr) erhöhen lässt. Anzumerken ist, dass dieses Potenzial nur bei Einhaltung aller Restriktionen zur Verfügung steht. Bei einem Abruf der Flexibilität verringert sich das Potenzial für die kommenden 15-Minuten-Blöcke um die jeweilige Regenerationszeit der entsprechenden Aggregate. Des Weiteren ist anzumerken, dass z. B. die Schlammntwässerung nur manuell in Betrieb genommen werden kann und die technischen Voraussetzungen (Automatisation) ggf. noch zu schaffen sind. Ebenfalls findet keine Unterscheidung in werktags oder alle Tage statt.

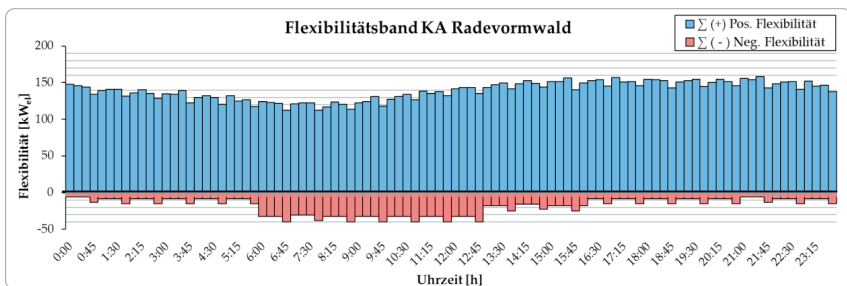


Abbildung 4.15: Theoretisches Flexibilitätsband der KA Radevormwald

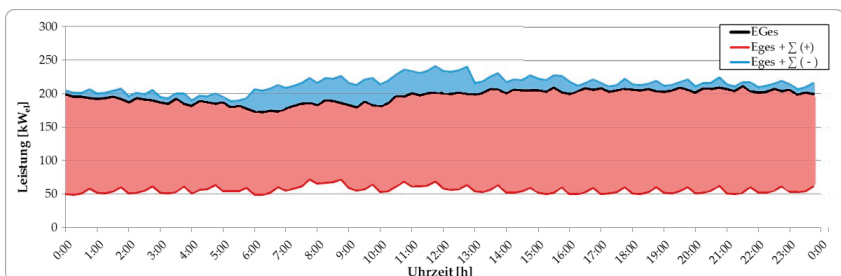


Abbildung 4.16: Gesamtenergiebedarf der Anlage und die mögliche Anpassung durch flexiblen Betrieb der Aggregate (ohne BHKW und NEA)

4.2.12 BHKW-Anlagen

Eine ausführliche Beschreibung der eingesetzten KWK-Anlagen auf Kläranlagen erfolgte bereits in Kapitel 2.2.3 bzw. ist Schaumann und Schmitz (2010) im Detail zu entnehmen. Im Weiteren wird der Fokus auf die Einbindung in das Managementsystem und speziell auf die Randbedingungen der Projektanlage gelegt und weniger auf eine Optimierung der vorliegenden BHKW-Steuerung.

Auf der KA Radevormwald sind zwei identische BHKW mit einer elektrischen Leistung von jeweils $80 \text{ kW}_{\text{el}}$ installiert. Diese werden aus einem Gasspeicher mit einem Volumen von 800 m^3 mit Faulgas gespeist. Der Gasspeicher besitzt eine Sicherungsvorrichtung, die sogenannte Notfackel, welche bei Überschreitung eines Füllstandes von 750 m^3 eingeschaltet wird und das überschüssige Faulgas verbrennt. Der Gasspeicher wird aus betriebstechnischen Gründen nicht komplett entleert, daher werden bei Unterschreitung eines Füllstandes von 100 m^3 die beiden BHKW und ggf. der Heizkessel abgeschaltet.

Die BHKW werden bisher gasgeführt gesteuert, sodass sich das Lastprofil aus dem Faulgasanfall und der Bewirtschaftung des Gasspeichers ergibt. Die Steuerpunkte für das Bezugsjahr 2014 sind in Tabelle 4.16 aufgelistet. Diese können nach Bedarf angepasst werden.

Tabelle 4.16: Betrieb der BHKW in Abhängigkeit vom Füllstand im Gasspeicher (Bezugsjahr 2014)

Aggregat	Füllstand Gasspeicher
Einschaltpunkt Fackel	$> 750 \text{ m}^3$
Ausschaltpunkt Fackel	$< 700 \text{ m}^3$
Einschaltpunkt 2. BHKW (<i>Volllast</i>)	$> 500 \text{ m}^3$
Ausschaltpunkt 2. BHKW	$< 300 \text{ m}^3$
Einschaltpunkt 1. BHKW (<i>Volllast</i>)	$> 250 \text{ m}^3$
Einschaltpunkt 1. BHKW (<i>Teillast</i>)	$> 180 \text{ m}^3$
Ausschaltpunkt 1 BHKW	$< 100 \text{ m}^3$

Der Mittelwert der bereitgestellten Leistung durch die beiden BHKW über das Jahr 2014 beträgt ca. $83 \text{ kW}_{\text{el}}$. Somit übersteigt die Faulgasproduktion geringfügig die benötigte Brennstoffleistung eines BHKW im Dauerbetrieb. Diese Überschüsse werden im Gasspeicher zwischengespeichert und im Regelfall tagsüber bei Mehrbedarf an elektrischer Energie durch das zweite BHKW verstromt.

Durch die vorhandene Überkapazität an BHKW-Leistung (Überbauung) und dem relativ großen Gasspeicher auf der KA Radevormwald kommen unterschiedliche Ansatzpunkte zur flexiblen Nutzung in Betracht. Der Gasspeicher kann zum einen am

unteren Limit bewirtschaftet werden, sodass bei Bedarf an negativer Flexibilität beide BHKW für mehrere Stunden komplett abgeschaltet werden können. Zum anderen kann in positiver Richtung Flexibilität bereitgestellt werden, wenn der Gasspeicher am oberen Limit bewirtschaftet wird und bei Bedarf die beiden BHKW zugeschaltet werden und zusätzliche 160 kW_{el} erzeugen können. Als dritte Alternative bietet sich eine Kombination an, indem das zweite BHKW zugeschaltet und das überschüssige Faulgas verwertet wird. Das dauerbetriebene BHKW kann bei Bedarf an negativer Flexibilität abgeschaltet werden und die Kläranlage würde 80 kW_{el} mehr Leistung aus dem Stromnetz beziehen bzw. einspeisen können. Dieser Ansatz hätte den Vorteil, dass er möglichst geringe Auswirkungen auf den bisherigen Betriebsablauf hätte und eine gewisse Grundlast der Anlage an Strom und Wärme, bei Bereitstellung von 50% der Gesamtflexibilität, abdeckt. Hier ist darauf zu achten, dass keine Lastspitze erzeugt wird, die sich negativ auf die Kosten des Strombezugs auswirkt (vgl. Kapitel 6.1).

Zur Nutzung der BHKW-Anlagen werden folgende Restriktionen und Kontrollparameter definiert:

Tabelle 4.17: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der BHKW-Anlagen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Max. Entleerung Gasspeicher [m ³]	$V_{\text{Gasspeicher}} < x$	$V_{\text{Gasspeicher}} < 100$
Max. Füllung Gasspeicher [m ³]	$V_{\text{Gasspeicher}} > x$	$V_{\text{Gasspeicher}} > 700$
Max. Schaltvorgänge [1/d]	$n_{\text{max}} = x$	$n_{\text{max}} = 5$

Eine detaillierte Optimierung einer strommarktgeführten BHKW-Fahrweise wird im Rahmen dieser Arbeit nicht angestrebt. Umfassende Untersuchungen für strommarktgeführte BHKW sind zudem im Abwassersektor kaum vorhanden. Allerdings liegen im Bereich der Biogasanlagen langjährige Erfahrungen vor und können ergänzend hierzu verwendet werden, da sich die dort eingesetzten Anlagen technisch nur wenig von Klärgas-BHKW unterscheiden.¹¹

¹¹ Weitere Hinweise zu optimierten BHKW-Betriebsweisen sind Müller et al. 2017; Hien 2017; Grim et al. 2015; Gohsen und Allelein 2015; Engelhart et al. 2018 zu entnehmen.

4.2.13 Netzersatzanlagen

NEA sind vergleichsweise einfach in den Energiemarkt einzubinden. Durch ihre meist großen Nennleistungen sind sie bereits heute für Poolbetreiber interessante Bausteine im Verbund eines virtuellen Kraftwerks (vgl. Kapitel 6.2; Hansen 2011). Die Kombination, mit Regelleistungsabrufen die ohnehin benötigten Testläufe abzudecken, ist ein monetärer Anreiz ohne nennenswerten zusätzlichen Aufwand (Schmiedeskamp 2010). Bei höheren Abrufzahlen/-dauern wäre mit zusätzlichen Wartungsaufwendungen, z. B. durch Treibstoffbewirtschaftung, zu rechnen. Technische Voraussetzung für die Bereitstellung von Regelleistung ist die Möglichkeit des Netzparallelbetriebs der Anlage. Mit Anfahrzeiten von wenigen Sekunden bis zu 10 Minuten (BBK 2015) stellt bspw. die Präqualifikation für den Regelleistungsmarkt kein Problem dar. Restriktionen bestehen einerseits hinsichtlich der Größe des Treibstoffspeichers und dessen Bewirtschaftung sowie durch §4 der StromGKV (2016), nach dem NEA in ihrer Nutzung auf 180 h/a (15h/Monat) beschränkt sind.

Auf der Kläranlage Radevormwald ist ein Notstromaggregat mit einer installierten Leistung von 600 KVA (480 kW_{el}) vorhanden, das netzparallel betrieben und zur Flexibilitätsbereitstellung genutzt werden kann.

Zur Nutzung der NEA werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter definiert:

Tabelle 4.18: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung der Netzersatzanlagen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter	KA Radevormwald
Füllstand Treibstoffspeicher [l]	$h_{\text{Full}} > x$	$h_{\text{Full}} > 2.000$
Max. Betriebsstunden [h] (nach §4 StromGKV 2016)	$\sum B_{h,\text{max}} < 15$	$\sum B_{h,\text{max}} < 15$

4.3 Einbindung weiterer potenziell nutzbarer Aggregate

Kläranlagen sind in ihrer Belastung an Schmutzstofffrachten und Wassermengen sowie in der Abwasserzusammensetzung sehr inhomogen. Zusammen mit der Topografie und anderen lokalen Randbedingungen ergeben sich für die verfahrenstechnische Umsetzung der Abwasserreinigung Freiheiten in Bezug auf die benötigten und eingesetzten Aggregate. Die wesentlichsten Aggregate konnten in den vorstehenden Unterkapiteln anhand der Projektanlage untersucht und bewertet werden. Allerdings sind durchaus weitere flexible Aggregate denkbar, die nicht auf der KA Radevormwald vorhanden sind. Zur Integration solcher Aggregate kann die Auswertung/Analyse der Aggregate analog zu Kapitel 4.2 erfolgen.

Nachfolgend wird ergänzend auf ausgewählte abwassertechnische Baugruppen näher eingegangen die interessante Flexibilitätsoptionen darstellen und zukünftig an Relevanz gewinnen, sowie Vorschläge für deren Restriktionen und Kontrollparameter formuliert.

4.3.1 Hebewerke

Bei Hebewerken ist der Stromverbrauch von der Förderhöhe und dem Förderstrom abhängig und stellen je nach örtlichen Gegebenheiten nicht unerhebliche Verbraucher dar (Kolisch et al. 2014). Die Möglichkeit zum Abschalten ergibt sich aus dem vorhandenen Einstauvolumen vor den entsprechenden Hebewerken und der Zulaufsituation. Im Falle des Zulaufpumpwerks können der Pumpensumpf und Teile der angeschlossenen Kanalisation als Stauraumvolumen prinzipiell genutzt werden. Ein Abschalten des Zulaufpumpwerks ist nur bei Trockenwetter möglich, damit bei eintretenden Regenereignissen kein Einstau vorhanden ist. Dabei ist sicherzustellen, dass es im Einstaubereich nicht zu übermäßig vermehrten Ablagerungen im Kanal kommt. In der Nacht ist die mögliche Dauer einer Abschaltung aufgrund niedrigerer Abwassermengen höher; allerdings bei daraus resultierender geringerer erforderlicher Leistung (Schmitt et al. 2017b; Schloffer et al. 2015).

Für Hebewerke werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter vorgeschlagen:

Tabelle 4.19: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Hebewerken

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter
Zulaufwassermenge [l/s]	$Q_{\text{Ist}} < Q_{\text{Grenz}}$
Einstaudauer [min]	$t_{\text{Einstau}} = x$

4.3.2 Abwasserpumpwerke im Kanalnetz

Abwasserpumpwerke unterscheiden sich aggregattechnisch wenig von den vorstehend dargestellten Zulaufpumpwerken, unterliegen allerdings anderen Randbedingungen. Aufgabe ist der Transport von Abwasser aus Misch- oder Trennsystemen, über Druck-/Saugleitungen, meist über größere Distanzen (vgl. Gujer 2007).

Abwasserpumpwerke werden hydraulisch im Rahmen eines, oftmals sehr komplexen, Kanalnetzmanagements mit entsprechender EMSR-/ und Kommunikationstechnik betrieben und bieten bereits die erforderliche Technik zur Implementierung in ein Managementsystem. Pufferkapazitäten bei Pumpzeiten sind oftmals vorhanden und werden im üblichen Betriebsregime ohnehin genutzt. Zu beachten ist allerdings, dass

durch erhöhte Standzeiten des Abwassers und die einsetzenden Zehrprozesse vermehrt Schwefelwasserstoff (H_2S) entstehen kann und dies vermehrt zu Geruchs- und Korrosionsproblemen führen könnte (Gujer 2007).

Unterschiede ergeben sich ebenfalls hinsichtlich Bilanzgrenzen und der Einordnung in räumliche Einheiten. In stark urbanisierten Räumen werden andere Bedingungen zu berücksichtigen sein als in sehr ländlich geprägten Regionen, in denen der Transport über weite Strecken erfolgt. Aus Sicht des Kläranlagenbetreibers gehört das Abwasserpumpwerk zur Kläranlage, von energierechtlicher Seite ist dies nicht unbedingt gegeben, da sich je nach Entfernung die Aggregate in einem anderen Netzabschnitt bzw. Verteilnetz befinden könnten und dies eine Integration in ein Managementkonzept der KA (z.B. mit Interaktion mit dem lokalen Verteilnetz) deutlich erschwert bzw. ausschließt.

Für Abwasserpumpwerke werden die folgenden Restriktionen und Kontrollparameter vorgeschlagen:

Tabelle 4.20: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Abwasserpumpwerken

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter
Füllstand im Pumpensumpf [m]	$h_{\text{Ist}} < h_{\text{Grenz}}$
Einstaudauer [min]	$t_{\text{Einstau}} = x$

4.3.3 Nachgeschaltete Filtration und Spurenstoffelimination

Zur Einhaltung erhöhter gewässerbezogener Anforderungen zur Phosphorelimination oder Spurenstoffelimination wird nach dem Ablauf der Nachklärung eine zusätzliche Filtration angeordnet bzw. zukünftig erforderlich werden.

Der Stromverbrauch ergibt sich maßgeblich durch das Anheben des Abwassers im Zulauf der Filterstufe und die Spülwasserpumpen. Die Möglichkeit der Abschaltung des Hebewerks vor der Filtration ist vom verfügbaren, meist limitierten Stauraumvolumen, in der Regel das Volumen des Pumpensumpfs, abhängig. Außerdem gilt es einen Rückstau in die Nachklärung zu verhindern. Die Filterspülung erfolgt üblicherweise nach 24h in Abhängigkeit des Filterwiderstands (DWA 2016). Bei Trockenwetter kann eine solche Spülung in der Regel zeitlich verschoben werden und eine flexible Nutzung durch Anpassung der Spülzyklen erfolgen. Bei Pulveraktivkohlefiltern (PAK) ist der Energieverbrauch zur Einbringung, Durchmischung und Rezirkulation weitestgehend unabhängig von Dosiermengen, sondern die Pumpenenergie maßgebend (Pinnekamp et al. 2018).

In Tabelle 4.21 sind Vorschläge für Restriktionen und Kontrollparameter von nachgeschalteten Filtrationsanlagen aufgeführt.

Tabelle 4.21: Restriktionen und Kontrollparameter zur Nutzung von Filtrationsanlagen

Restriktion	Vorgeschlagener Kontrollparameter
Zulaufwassermenge [l/s]	$Q_{\text{Ist}} < Q_{\text{Grenz}}$
Einstaudauer bzw. Spülintervall [min]	$t_{\text{Einstau}} = x$

Bei der Entfernung anthropogener Spurenstoffe durch eine Behandlung mittels Ozon (O_3) besteht wenig Spielraum einer flexiblen Nutzung, da O_3 nicht speicherbar ist und bedarfsgerecht produziert werden muss. Dennoch besteht, je nach Auslegung, die Möglichkeit einzelne Belüfter zur Einbringung des O_3 bedarfsgerecht zu- oder abzuschalten. Die Belüftungseinheiten zur Begasung sind aus technischer Sicht mit denen der biologischen Stufe vergleichbar und die entsprechenden technischen Kennzahlen können als erste Orientierung herangezogen werden (vgl. Kapitel 6.1.5).

4.4 Zwischenfazit - Methodenanwendung

Ein wesentlicher Punkt einer Flexibilitätsuntersuchung ist die Aufnahme und Analyse der energetischen Ist-Situation der Kläranlage. Wichtig ist an dieser Stelle frühzeitig möglichst alle relevanten Daten zu erfassen, aufzubereiten und auszuwerten, die in den weiteren Schritten benötigt werden. Insbesondere die tatsächliche Leistungsaufnahme und ihre tageszeitliche Dynamik in Form von Lastgängen sowie der Einfluss der Betriebsweise sind an dieser Stelle essenziell. Generell erfordert eine solche Untersuchung eine sehr hohe Qualität der gemessenen Daten pro Aggregat, die oftmals nicht in ausreichender Güte zur Beurteilung der Prozesse vorliegen. Häufig wird besonders auf kleineren Kläranlagen, falls überhaupt, nur baugruppenspezifisch der Jahresstrombezug aufgenommen, was für eine Flexibilitätsanalyse nicht ausreichend ist.

Anhand der durchgeführten Untersuchungen der Aggregate wurden Kenntnisse verschiedener prozessrelevanter Parameter gesammelt und diese als Kennzahlen, Restriktionen bzw. Kontrollparameter vorgeschlagen. Letztendlich belegt die Auswertung, dass die KA Radevormwald ein signifikantes Flexibilitätpotenzial, insbesondere bzgl. der Bereitstellung von negativer Flexibilität im Bereich der Reinigungsaggregate, aufweist.

Die identifizierten Aggregate und die dargestellte Auswertung stellen eine gute Grundlage für Anlagenbetreiber dar eine Ersteinschätzung/Vorauswahl für relevante

Aggregate und Prozesse sowie den Randbedingungen die es zu beachten gilt, zu treffen (vgl. Kapitel 6.1.6). Die entwickelten Kennzahlen sowie Restriktionen für die KA Radevormwald sind in Tabelle 4.22 dargestellt und können als erste Empfehlungen zur Flexibilitätsbereitstellung durch die aufgeführten Aggregate angesehen werden.

In einem nächsten Schritt werden, unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse und Erkenntnisse, die aufgestellten Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparameter überprüft, auf ihre Übertragbarkeit untersucht und weiterentwickelt.

Tabelle 4.22: Übersicht der untersuchten Aggregate inkl. quantifizierter Kenngrößen und Restriktionen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der KA Radevormwald, (erweitert nach Schäfer et al. 2017b)

Aggregatgruppe	Abschalt- dauer (min./max.)	Zuschalt- dauer (min./max.)	Regenerati- onszeit	Anfahr- zeit	Abfahr- zeit	Restriktion/Kontrollparameter
	[min]	[min]	[min]	[s]	[s]	[-]
Sandfang (<i>intermittierende Belüftung</i>)	5 – 60	5 – 60	30	60	60	<ul style="list-style-type: none"> • Zulaufwassermenge • Absetzverhalten der org. Substanzen
Belebungsbecken 1+2 (<i>Belüftung</i>)	5 – 120	-	15	10	5	<ul style="list-style-type: none"> • NH₄-N-Konzentration • CSB-Zulauffracht • NH₄-N-Zulauffracht • Auswirkungen auf die Biozönose
Belebungsbecken 1 (<i>Rührwerke, intermittierend</i>)	15 – 30	15 – 40	30	60	60	<ul style="list-style-type: none"> • Absetzeigenschaften des Belebtschlammes • Ausreichende Schubleistung/ Bodenge- schwindigkeit
Rücklaufschlamm- pumpen	5 – 120	-	60	60	5	<ul style="list-style-type: none"> • Schlamm Spiegel • Zulaufwassermenge
Rezirkulations- pumpen	5 – 1.440	-	30	60	60	<ul style="list-style-type: none"> • Nitratblaufkonzentration im BB
Heizschlammpumpe (<i>Faultrum 1+2</i>)	15 – 1.440	15 – 1.440	60	10	5	<ul style="list-style-type: none"> • Faulraumtemperatur

Aggregatgruppe	Abschalt- dauer (min./max.)	Zuschalt- dauer (min./max.)	Regenerati- onszeit	Anfahr- zeit	Abfahr- zeit	Restriktion/Kontrollparameter
Rohschlammpumpe (<i>Faulturm 1+2</i>)	15 – 360	-	60	120	60	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Stillstandszeit
Rührwerke (<i>Faulturm 1+2</i>)	15 – 30	-	15	180	60	<ul style="list-style-type: none"> • Schaumbildung • Max. Abschaltdauer
Seihbandanlage/ ÜSS-Pumpen	-	120 – 1.440	15	60	900	<ul style="list-style-type: none"> • TS-Gehalt im BB • Anwesenheit Betriebspersonal • Max. Schaltvorgänge • RLS-Pumpe in Betrieb
Kammerfilterpresse 1+2	-	120	60	120	120	<ul style="list-style-type: none"> • Berücksichtigung der Vorgangsdauer • Anwesenheit Betriebspersonal • Max. Schaltvorgänge
BHKW 1+2	5 – 1.440	5 – 1.440	5*/30**	180	300	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Entleerung Gasspeicher • Max. Füllung Gasspeicher • Max. Schaltvorgänge
NEA	-	15 – 240	2.5	60	30	<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Treibstoffspeicher • Max. Betriebsstunden

* negative Flexibilität; **positive Flexibilität

5 Validierung und Verifikation der Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparameter

Zur Überprüfung der in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnisse und Aussagen zur Flexibilisierung von Aggregaten werden im folgenden Kapitel eine Validierung und Verifikation der aufgestellten Restriktionen und Kontrollparameter durch mathematische Simulation und praktische Umsetzung für ausgewählte Aggregate dargestellt. Die Kontrollparameter und deren Validierungsstufen sind in Tabelle 5.1 gegeben.

Aus der Aggregate-Analyse wurden Restriktionen bzw. Kontrollparameter abgeleitet, die Aussagen dazu treffen, unter welchen Bedingungen die Aggregate für die Bereitstellung von Flexibilität nutzbar, nicht nutzbar oder eingeschränkt nutzbar sind bzw. von welchen Faktoren sie beeinflusst werden. Diese komplementieren die aufgestellten Kennzahlen, indem sie als Verbindung zwischen den reinigungstechnischen Anforderungen und den physikalischen Größen der Aggregate eine sinnvolle und realistische Implementierung auf der Kläranlage ermöglichen.

Zur Sicherstellung des Reinigungsbetriebes wurden die aus der Literatur und den eigenen Untersuchungen abgeleiteten Kriterien in Simulationsmodelle eingebunden und überprüft. Begleitend dazu wurden reale Abschaltversuche für die Belüftungsaggregate sowie die Rücklaufschlamm- und Rezirkulationspumpen zur Verifizierung der Simulationsergebnisse und der aufgestellten zu- und abschaltbaren Zeiten auf der KA Radevormwald durchgeführt. In einem letzten Schritt wurden darauf aufbauend diese Aggregate an einen Marktparallelservers (Virtuelles Kraftwerk) angeschlossen, im Realbetrieb getestet und auf ihre Wirksamkeit anhand von historischen Energiemarktdaten überprüft.

Tabelle 5.1: Kontrollparameter und deren Validierungsstufen der untersuchten Aggregate/-gruppen

Aggregat/-gruppen	Kontrollparameter	Literatur	Simulation	Abschaltversuche	Anschluss Virtuelles Kraftwerk
Hebewerke	<ul style="list-style-type: none"> • Stauraumvolumen der Zulaufpumpen • Füllstand Pumpensumpf / Zulaufwassermenge¹ 	✓			
Sandfang (Belüftung)	<ul style="list-style-type: none"> • Zulaufwassermenge¹ • Mindestbelüftungszeit 	✓	o		
Belebungsbecken (Belüftung)	<ul style="list-style-type: none"> • NH₄ -Konzentration (biol. Stufe und Ablauf NK) • Zulauffracht (NH₄-/ CSB) 	✓	x/o	✓	✓
Belebungsbecken (Rührwerke)	<ul style="list-style-type: none"> • Mindestlaufzeit • Max. Schaltvorgänge 	✓	o		
Rücklaufschlammpumpe	<ul style="list-style-type: none"> • Zulaufwassermenge¹ • Schlamm Spiegel 	✓	x/o	✓	✓
Rezirkulationspumpen	<ul style="list-style-type: none"> • NO₃-Konzentration (Ablauf BB) 	✓	x/o		
Heizschlammumpen (Faulturm)	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatur (min/max) 	✓			
Rohschlammumpen (Faulturm)	<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Voreindicker/ Vorlagebehälter (min/max) • Maximale Stillstandszeit 	✓	o		
Faulturm (Rührwerke)	<ul style="list-style-type: none"> • Mindestlaufzeit • Schaumbildung 	✓	o		
Überschussschlamm-eindickung (Pumpen, Seihbandanlage)	<ul style="list-style-type: none"> • Trockensubstanzgehalt² (TS_{BB}) bzw. ÜS-Entnahme • Anlagenbesetzung⁴ 	✓	x/o		
Entwässerung ³ (Kammerfilterpresse/ Zentrifuge/Bandpresse)	<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Nacheindicker (min/max) • Anlagenbesetzung⁴ 	✓	o		
BHKW	<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Gasspeicher (min/max) • Max. Schaltvorgänge 	✓	x/o	✓	✓
NEA	<ul style="list-style-type: none"> • Füllstand Treibstoffspeicher (min/max) • Max. Nutzungsstunden⁵ 	✓			

¹ Verhindert Abschaltung bei zu hohen Zulaufwassermengen

² Verhindert eine zu große Entnahme

³ Schlamm entwässerung meist nicht zu unterbrechen

x Untersucht im Modell „KA Radevormwald“ (Kapitel 5.2.1)

⁴ Abhängig vom Grad der Automatisierung

⁵ Begrenzt auf 180 h/a (StromGVV 2016)

o Untersucht im Modell „Musterkläranlage“ (Kapitel 5.2.2)

Die Validierung und Verifikation basiert auf Arbeiten, die gemeinsam mit den entsprechenden Partnern im Projekt *arrivee* durchgeführt wurden:

- Die durchgeführten Abschaltversuche (Kapitel 5.1) basieren auf den theoretischen Rahmenbedingungen, die auf Grundlage der Literaturrecherche erarbeitet wurden (vgl. Kapitel 2). Die Durchführung auf der KA Radevormwald erfolgte in Abstimmung federführend vom Wupperverband.
- Der Modellaufbau inkl. der Parameter zur Entwicklung der Flexibilitätsbausteine der KA Radevormwald sowie der Musterkläranlage erfolgte nach den in Kapitel 3 und Kapitel 4 erarbeiteten Randbedingungen zur Flexibilitätsbereitstellung. Die Simulationen selbst wurden federführend von der WiW mbh durchgeführt (Kapitel 5.2).
- Die Integration und Anbindung in das VK vor Ort (Kapitel 5.3) wurde federführend vom Wupperverband und der Transferstelle Bingen (TSB) auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus Abschaltversuchen, Simulationen und den theoretischen Betrachtungen durchgeführt.

Die für diese Arbeit relevanten Ergebnisse werden nachfolgend als Extrakt aus dem *arrivee*-Schlussbericht (Schmitt et al. 2017a und dessen Zusatzanhang Pyro et al. 2017) sowie aus gemeinsamen Veröffentlichungen (z.B. Schäfer et al. 2018c, Hobus et al. 2017) kompakt dargestellt.

5.1 Abschaltversuche

Zur Verifikation der aufgestellten zu- und abschaltbaren Zeiten der Aggregate und Validierung des Simulationsmodells (siehe Kapitel 5.2.1) wurden für die Kläranlage Radevormwald Abschaltversuche für besonders sensible Aggregate durchgeführt. Des Weiteren wurden zur besseren Übertragbarkeit und Einschätzung der Ergebnisse zusätzlich Versuche auf den Kläranlagen Odenthal und Kohlfurth des Wupperverbandes durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Kläranlage Radevormwald erfolgte bereits in Kapitel 4.1.1, für die Anlagen Odenthal und Kohlfurth sind Kurzbeschreibungen und Ergebnisse in Anhang A 5 hinterlegt.

Die Abschaltversuche wurden für drei Anlagen mit unterschiedlichen Anschlussgrößen durchgeführt, um ein möglichst repräsentatives Spektrum abzudecken:

- KA Odenthal: 17.500 EW_{Anschluss}
- KA Radevormwald: 58.000 EW_{Anschluss}
- KA Kohlfurth: 146.000 EW_{Anschluss}

Die Abschaltungen erfolgten überwiegend in den Morgen- bis Mittagsstunden, nach Analyse der Zulaufdaten, bei mittlerer bis maximaler Zulaufbelastung im Trockenwetterfall. Die Abschaltdauern wurden mit 15 bzw. 30 Minuten beginnend, in Intervallen bis auf 120 Minuten gesteigert (vgl. Tabelle 5.2). Insgesamt wurden auf allen Anlagen für die Belüftung n = 25 Versuche und für die RLS-Pumpen n = 5 Versuche durchgeführt (Schmitt et al. 2017b).

Tabelle 5.2: Durchgeführte Abschaltversuche auf den untersuchten Kläranlagen nach abgeschalteten Aggregaten und zugehörigen Versuchsdauern (nach Schmitt et al. 2017b)

Abgeschaltete Aggregate	Versuchsdauer				
	15 min	30 min	60 min	90 min	120 min
Belüftung (Gebläse, einzeln)	R	R	R, O, K	O, K	O, K
Belüftung (Gebläse, Gesamt)	R	R	R, K	O	O
RLS-Pumpe (Gesamt)	-	R	R, O	-	R, O
R = KA Radevormwald;		O = KA Odenthal;		K = KA Kohlfurth;	

Durch das Abschalten der Belüftung erfolgte zeitverzögert ein erwartungsgemäßer Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration, infolge der gestoppten aeroben Prozesse, im jeweiligen Belebungsbecken. Dieser zeitlich begrenzte Anstieg wirkte sich allerdings nicht bzw. nur geringfügig auf den Gesamttablauf der Anlagen aus. Für die KA Kohlfurt konnten bspw. im BB 1 Anstiege auf bis zu 8 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ verzeichnet werden, die durch die folgenden, in Reihe geschalteten Becken gut abgefangen werden konnten (vgl. Anhang A 5). Anzumerken ist, dass auch im täglichen Betrieb, durch sich ändernde Belastungszustände, Schwankungen bei der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration entstehen können und nicht zwingend durch die Abschaltung der Belüftung verursacht sein müssen. Dies wäre durch Vergleiche mit Tagesgängen ähnlicher Belastungszustände ohne Abschaltungen näher zu untersuchen. Es lässt sich feststellen, dass für die Belüftung bei Trockenwetter eine Abschaltdauer von bis zu 120 Minuten, ohne signifikante Auswirkungen auf die Ablaufwerte der Nachklärung, sowohl für kleine als auch für große Anlagen möglich ist. Die Grenzen einer maximalen Abschaltdauer zu identifizieren wurde ausdrücklich nicht angestrebt, längere Abschaltdauern sind daher durchaus denkbar. Die Festlegung der geprüften Versuchsdauern erfolgte dabei in enger Absprache mit dem jeweiligen Betriebspersonal. In Abbildung 5.1 ist die Abschaltung der Belüftung (KA Radevormwald) für 60 Minuten während eines auftretenden $\text{NH}_4\text{-N}$ -Frachstoßes dargestellt. Zu erkennen ist, dass auch bei hohen Belastungszuständen, nach einem kurzen Anstieg der Ammoniumkonzentration im BB (auf bis zu 2 mg/l), sich keine erkennbaren Einbußen der Reinigungsleistung an den Ablaufwerten ($\text{NH}_4\text{-N}$) der Nachklärung feststellen lassen (Schmitt et al. 2017b).

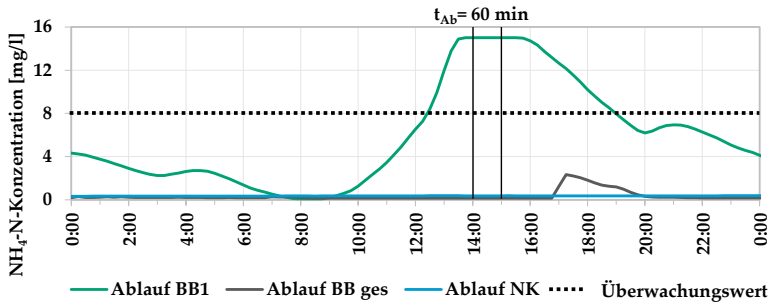


Abbildung 5.1: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen infolge der Abschaltung aller Gebläse für 60 Minuten auf der Kläranlage Radevormwald (Schmitt et al. 2017b)

Für die RLS-Pumpen konnten ebenfalls keine Auswirkungen auf die Ablaufwerte bei einer Abschaltdauer von 30 bis 120 Minuten festgestellt werden. Im Falle der KA Kohlfurth schieden die RLS-Pumpen aufgrund der Gefahr von Schlammabtrieb bei hydraulischer Überlastung aus der Nachklärung zum flexiblen Betrieb aus.

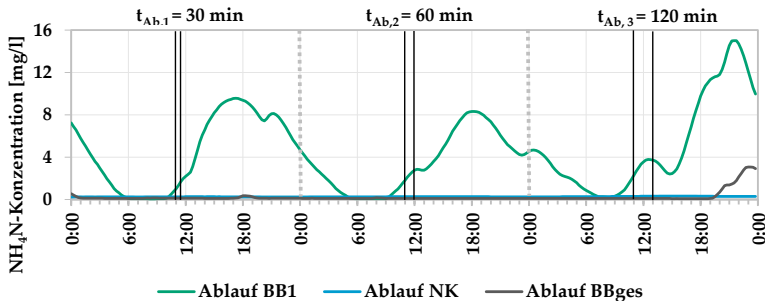


Abbildung 5.2: $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen infolge der Abschaltung der RLS-Pumpen für 30, 60 und 120 Minuten auf der KA Radevormwald (Schmitt et al. 2017b)

Letztendlich ist festzustellen, dass für die drei untersuchten Anlagen Abschaltungen bis zu 120 Minuten für die Belüfter sowie RLS-Pumpen möglich sind. Die maßgebenden Zeiten sind allerdings immer individuell auf jeder Kläranlage zu prüfen, da sowohl längere als auch kürzere Abschalt Dauern möglich sind (Schmitt et al. 2017b).

Die vollständige Dokumentation aller durchgeführten Versuche in Bezug auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte ist in Anhang A 5 aufgeführt.

Die BHKW konnten jeweils problemlos, entsprechend der vorhandenen Gasspeichervolumina und ihrer Bewirtschaftung, in den aufgestellten Grenzen zu- bzw. abgeschaltet werden (Schmitt et al. 2017b).

5.2 Mathematische Simulation

Zur Beurteilung und Bewertung eines flexiblen Anlagenbetriebes hinsichtlich Reinigungsleistung, Energieerzeugung und –bezug ist es erforderlich die Auswirkungen über einen längeren Zeitraum zu untersuchen. Ein geeignetes Mittel hierfür ist die modelltechnische Abbildung von Kläranlagen über eine mathematische Simulation. Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Abschaltversuche aus Kapitel 5.1 durch eine (Langzeit-)Simulation von Flexibilitätseingriffen über ein gesamtes Jahr (Bezugsjahr 2014) ergänzt. Hierzu wurden Kläranlagenmodelle verwendet, die mit der Software SIMBA (Version 6.4) des Instituts für Automation und Kommunikation e.V. (ifak) erstellt wurden. Mit dieser Simulationssoftware kann die gesamte Kläranlage mit ihren biologischen Prozessen und dem zugehörigen Energiebezug abgebildet werden. Dies umfasst die mechanische Reinigung und die biologischen Prozesse im BB, die über das Belebtschlammmodell ASM1 (Henze et al. 2007) abgebildet wurden, sowie die Nachklärung mit einem Modell aus drei Schichten. Zur Abbildung der anaeroben Prozesse zur Faulgasproduktion in den Faulbehältern wurde das Modell nach Siegrist et al. (2002) verwendet. Zur Abbildung der Stromerzeugung wurden die Faulgasspeicher und die BHKW im Modell integriert. Des Weiteren wird der Energieverbrauch der im Modell integrierten Aggregate über die spezifischen Leistungsdaten in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms berücksichtigt. Die übrigen Aggregate werden mit der gemessenen Leistung (vgl. Aggregatliste, Anhang A 2) bzw. über den aggregatgruppenbezogenen Stromverbrauch kommunaler Kläranlagen (vgl. Anhang A 6) abgebildet (Schmitt et al. 2017b).

Darüber hinaus wurden zur Überprüfung der Kennzahlen und Restriktionen sogenannte „Flexibilitätsbausteine“ entwickelt, die ein Zu- und Abschalten des jeweiligen Aggregats aufgrund eines externen Eingangssignals (z.B. für SRL- oder MRL-Abrufe) ermöglichen. Mit Hilfe dieser Flexibilitätsbausteine können die individuellen Restriktionen und Kontrollparameter für jedes Aggregat hinterlegt und die Auswirkungen auf die Reinigungsleistung weitergehend untersucht werden. Bei einer Grenzwertverletzung während des flexiblen Betriebs wird das Aggregat wieder auf Normalbetrieb gesetzt und steht nach einer entsprechenden Regenerationszeit zur Flexibilitätsbereitstellung erneut zur Verfügung, insofern der Kontrollparameter wieder bzw. weiterhin in den definierten Grenzen liegt. Die dafür hinterlegten Restriktionen und Kontrollparameter für die beiden Simulationsmodelle sind in Tabelle 5.4 und Tabelle 5.3 dargestellt.

Für das Modell der KA Radevormwald erfolgt ein Modellabgleich der berechneten Frachten, der Reinigungsleistung, des Gasanfalls sowie der Energieerzeugung und des Energiebezugs mit den realen Betriebsdaten (z.B. Zufluss, RLS-Volumenstrom etc.). Des Weiteren wurde zur Abbildung tageszeitlicher Frachtschwankungen ein normierter Trockenwettertagengang aus charakteristischen beprobten Trockenwettertagen herangezogen. Im Fall der Musterkläranlage werden Lastgänge einer Anlage mit

400.000 EW abgeleitet und entsprechend auf eine fiktive Anlage ($EW_{\text{Ausbau}} = 150.000 \text{ E}$; vgl. Kapitel 5.2.2) skaliert. Als Eingangssignale zur Zu- bzw. Abschaltung dienen historische Daten des Regelleistungsmarktes (SRL, MRL) des Jahres 2014 sowie der prognostizierten Daten für das Jahr 2035, um einen fortgeschrittenen EE-Ausbau zu berücksichtigen. Dabei erfolgten für die MRL Abrufe von 15 Minuten bis 11,5 Stunden während für die SRL Abrufe im Bereich von einer bis 5 Minuten bei deutlich engerer Abrufhäufigkeit charakteristisch sind (Schmitt et al. 2017b).

Ausführliche Beschreibungen der beiden Kläranlagenmodelle und der Simulationsergebnisse sind in Schäfer et al. (2018c) sowie zusätzlich für das Modell „Radevormwald“ in Schmitt et al. (2017b), Hobus et al. (2017) und für das Modell „Musterkläranlage“ in Pyro et al. (2017) beschrieben.

Tabelle 5.3: Hinterlegte Restriktionen und Kontrollparameter für die beiden Simulationsmodelle zur Bereitstellung negativer Flexibilität

Flex.	Aggregat	Restriktionen	Wert	
			„KA Radevormwald“	„Musterkläranlage“
Negativ	BHKW	• Min. Abschaltdauer $t_{\text{Ab,min}}$		5 Min.
		• Regenerationszeit t_{Reg}		30 Min.
		• Max. Speicherfüllstand	700 m ³	$V_{\text{Speicher}} > V_{\text{Speicher,Max}}$ - 100 m ³
		• Anzahl der Schaltzyklen		5/d
		• BHKW in Betrieb		-
	MÜSE	• Min. Zuschaltdauer $t_{\text{Min,zu}}$		120 Min.
		• Regenerationszeit t_{Reg}		15 Min.
		• Anzahl der Schaltzyklen		2/d
		• Anlagenbesetzung		6-16 Uhr
		• Min. TS-Gehalt im Ablauf der Belebung	2,5 g/l	$TS_{\text{BB}} > TS_{\text{BB,Soll}}$ - 0,2 g/l
	Zentrifuge	• Min. Zuschaltdauer $t_{\text{Min,zu}}$	n.u.	150 Min.
		• Anzahl der Schaltzyklen	n.u.	1/d
		• Anlagenbesetzung	n.u.	6-12 Uhr
		• Füllstand Nacheindicker	n.u.	$V_{\text{Nacheindicker}} \geq 150 \text{ m}^3$

n.u. = nicht untersucht

Tabelle 5.4: Hinterlegte Restriktionen und Kontrollparameter für die beiden Simulationsmodelle zur Bereitstellung positiver Flexibilität

Flex	Aggregat	Restriktionen	Wert	
			„KA Radevornwald“	„Musterkläranlage“
Positiv	Sandfang	• Max. Abschaltdauer $t_{Ab,max}$	n.u.	60 Min.
		• Regenerationszeit t_{Reg}	n.u.	30 Min.
		• Max. Zulaufwassermenge	n.u.	$1,5 * Q_{d,aM} \text{ m}^3/\text{h}$
	Gebläse Biologie	• Max. Abschaltdauer $t_{Ab,max}$	120 Min.	60 Min.
		• Regenerationszeit t_{Reg}		15 Min.
	Rührwerke Biologie und Faulturm	• Max. $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration Ablauf Belebung		3 mg/l
		• Min. Abschaltdauer $t_{Ab,min}$	n.u.	15 Min.
		• Max. Abschaltdauer $t_{Ab,max}$	n.u.	30 Min.
	Rohschlamm-pumpen	• Regenerationszeit t_{Reg}	n.u.	30 Min.
		• Min. Abschaltdauer $t_{Ab,min}$		15 Min.
		• Max. Abschaltdauer $t_{Ab,max}$		360 Min.
	Rücklaufschlamm-pumpen	• Regenerationszeit t_{Reg}		60 Min.
		• Max. Abschaltdauer $t_{Ab,max}$		120 Min.
		• Max. Zulaufwassermenge	500 l/s $(2,2 * Q_{d,aM} \text{ l/s})$	$1,5 * Q_{d,aM} \text{ m}^3/\text{h}$
	Rezirkulationspumpen	• Füllstand Voreindicker	$V_{Voreindicker} < 0,9 * V_{Voreindicker,Max}$	
		• Regenerationszeit t_{Reg}		30 Min.
		• Max. $\text{NO}_x\text{-N}$ Konzentration Ablauf Belebung		7 mg/l
	BHKW	• Max. $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentration Ablauf Denitrifikation	n.u.	12 mg/l
		• Min. Zuschaltdauer $t_{Min,zu}$		60 Min.
		• Regenerationszeit t_{Reg}		5 Min.
			• Min. Speicherfüllstand	100 m^3
		• Max. Anzahl der Schaltzyklen		5/d
		• BHKW nicht bereits in Betrieb		-

n.u. = nicht untersucht

5.2.1 Simulationsergebnisse „Kläranlage Radevormwald“

Als Ergebnis des flexibilisierten Anlagenbetriebes lässt sich festhalten, dass für die CSB- und NO_3 -Ablaufwerte für alle Untersuchungen keine Verschlechterung der Ablaufwerte über das gesamte Betrachtungsjahr festzustellen ist. Für die NO_3 -Werte in der biologischen Stufe ist zunächst eine Erhöhung infolge der Abschaltung der Rezirkulationspumpen und RLS-Pumpen zu erwarten, allerdings ist bedingt durch die intermittierende Denitrifikation in der zweiten Belebungsstufe der Einfluss der Rezirkulations- und RLS-Pumpen insgesamt gering. Oftmals erfolgt ein paralleles Abschalten von Rückführung (Rezirkulations- und RLS-Pumpen) und Belüftung und nach der Zehrung des verbliebenen gelösten Sauerstoffs steht das gesamte Beckenvolumen zur Denitrifikation zur Verfügung (Schmitt et al. 2017b).

Für die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte in der Nachklärung ist bei vereinzelt längeren Abrufsignalen (MRL) ein leichter Anstieg in der Simulation zu beobachten. Die sehr guten Ablaufwerte werden allerdings über das gesamte Jahr sichergestellt (Anstieg zum Referenzszenario im Jahresmittel um $0,22 \text{ mg/l}$) und liegen mit einem Maximum von $2,3 \text{ mg/l}$ zu jeder Zeit deutlich unter dem Überwachungswert von 8 mg/l (vgl. Abbildung 5.4).

In Abbildung 5.3 ist exemplarisch die Flexibilisierung der Gebläse dargestellt. Zu erkennen ist, dass die hinterlegten Restriktionen einen zu hohen Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen verhindern und dennoch die angefragte Flexibilität nahezu vollständig bereitgestellt wird.

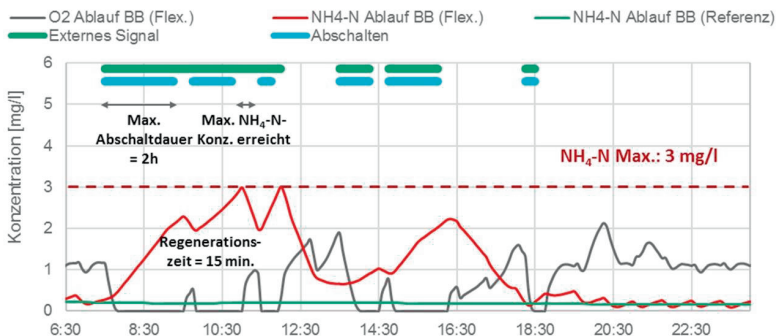


Abbildung 5.3: Flexibilisierung der Gebläse in der biologischen Stufe aufgrund eines externen Signals für das Modell „Radevormwald“ (Schäfer et al. 2018c)

Der flexible Betrieb der Anlage wirkt sich im Simulationsmodell leicht positiv auf deren Energiebilanz aus. Für das Jahr 2014 ergibt sich ein um $0,4 \%$ (MRL) bzw. $0,2 \%$ (SRL) geringerer Energiebedarf der Anlage. Allerdings tritt durch eine ungünstige Konstellation von erhöhter Netzeinspeisung durch das BHKW und das gleichzeitige Abschalten von Aggregaten ein leicht erhöhter Fremdstrombezug bei der MRL von

0,3% auf, während dieser bei der SRL um 0,1% sinkt. Darüber hinaus sind Situationen denkbar, in denen höhere Spitzen im Fremdbezug entstehen, welche sich unter den aktuellen Rahmenbedingungen negativ auf die Netzentgelte auswirken würden (Schmitt et al. 2017b).

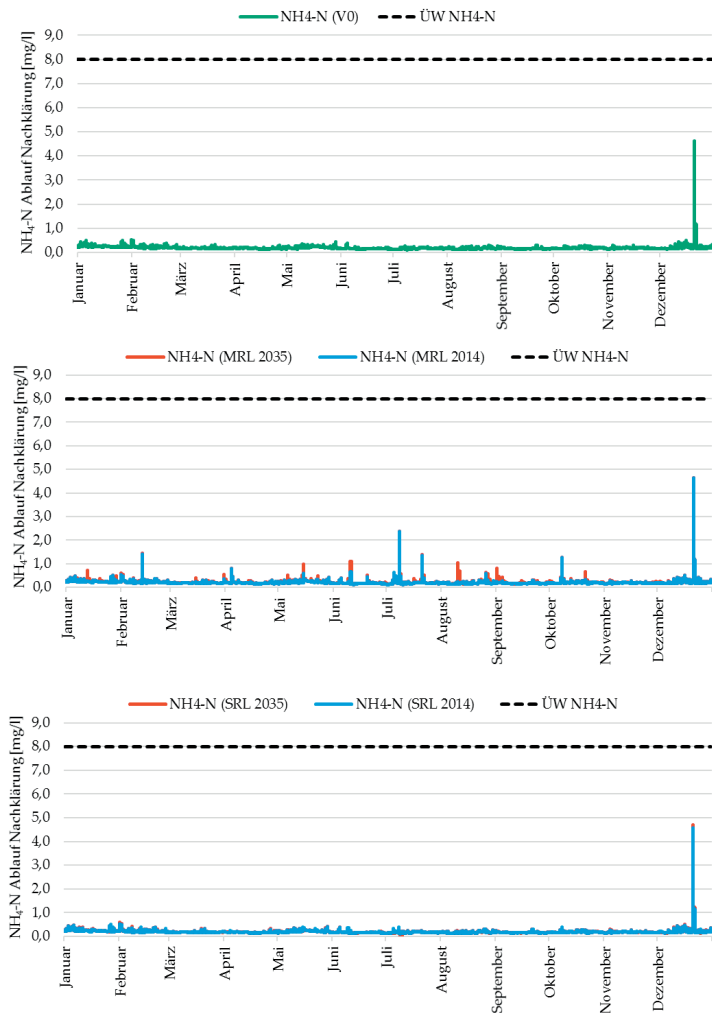


Abbildung 5.4: Simulationsergebnisse der NH₄-N-Ablaufkonzentrationen für den Referenzzustand (V0) und im flexibilisierten Betrieb (MRL/SRL der Jahre 2014 und 2035) für das Simulationsmodell „KA Radevormwald“ über einen Betrachtungsraum von einem Jahr (nach Schmitt et al. 2017b)

5.2.2 Simulationsergebnisse „Musterkläranlage“

Zur besseren Übertragbarkeit und Absicherung der bisherigen Ergebnisse wurden die Auswirkungen des flexiblen Anlagenbetriebes zusätzlich anhand einer Kläranlage, die auf Grundlage des Arbeitsblattes DWA A-131 (ATV-DVWK 2000) ausgelegt wurde, untersucht. Dabei soll vor allem eine verbesserte Aussagefähigkeit für konventionelle Anlagen getroffen werden, da die KA Radevormwald mit einer zweistufigen Belebung (1. Stufe: Kaskade mit vorgeschalteter Denitrifikation und 2. Stufe: intermittierender Betrieb) hierbei Besonderheiten aufweist (vgl. Kapitel 4.1.1). Das Modell der Musterkläranlage wurde für eine Anschlussgröße von 150.000 EW_{Anschluss} als einstufige biologische Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation und separater anaerober Schlammstabilisierung erstellt. Das Volumen der biologischen Stufe wurde mit 253 l/E geringer angesetzt als im Modell „Radevormwald“ (293 l/E) und bietet damit weniger Pufferkapazität beim biologischen Abbau. Zusätzlich wurden neben den bei Radevormwald untersuchten Baugruppen der Sandfang, die Zentrifuge, die Rohschlamm-pumpen zur Beschickung des Faulturms sowie die Rührwerke der Belebung und des Faulturms als Flexibilitätsbausteine berücksichtigt (Pyro et al. 2017).

Die Simulationsergebnisse der Musterkläranlage zeigen, dass bei geringer Pufferkapazität und vorgeschalteter Denitrifikation eine gleichzeitige Abschaltung von Re-zirkulations-, Rücklaufschlamm-pumpen und Gebläse zu einem Anstieg der Ammonium-konzentration im Ablauf führen kann. In Abbildung 5.5 ist der stufenweise Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration infolge des Wechsels von belüfteten und unbelüfteten Phasen durch die Flexibilitätsabrufe, gefolgt von einem starken Anstieg der Konzentration nach Wiederinbetriebnahme der Aggregate und Verletzung der Restriktionen der Gebläse abgebildet (Schäfer et al. 2018c).

Im Normalbetrieb erfolgt eine Verdünnung des der biologischen Stufe zufließenden Abwassers aus der Vorklärung durch die interne Re-zirkulation. Dieser Effekt bleibt bei der Abschaltung der Re-zirkulations-pumpen aus und führt bei Wiederinbetriebnahme zu einer hydraulischen Verdrängung der hohen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration aus der Deni- in die Nitrifikationszone, das nicht schnell genug umgesetzt werden kann und damit zu einer deutlichen Erhöhung im Ablauf der Belebung führt. Wird die Re-zirkulation von einer Flexibilisierung ausgeschlossen, stellt sich dieser Effekt stark abgeschwächt dar. Zusätzlich wurde die Restriktion einer maximalen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration von 12 mg/l im Ablauf der Denitrifikationszone eingeführt. Mit diesen Anpassungen wird eine Flexibilisierung der Gebläse und Rücklaufschlammförderung in den festgelegten Grenzwerten ermöglicht. Dies wird allerdings nur bei längeren Abschaltungen von mehreren Stunden (MRL) notwendig. Bei kürzeren, dafür allerdings häufigeren Abschaltungen bei der Bereitstellung von SRL sind keine signifikanten Verschlechterungen der Ablaufwerte festzustellen (Schäfer et al. 2018c, Pyro et al. 2017).

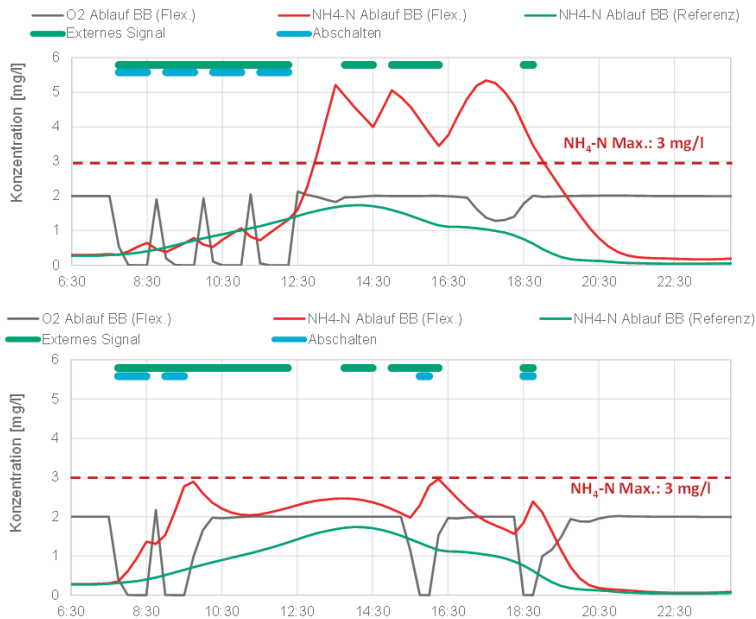


Abbildung 5.5: Flexibilisierung der Gebläse in der biologischen Stufe aufgrund eines externen Signals für das Modell „Musterkläranlage“ mit (oben) und ohne (unten) gleichzeitigem Abschalten der Rezirkulation (nach Schäfer et al. 2018c)

Als Ergebnis der Simulationsläufe für die Musterkläranlage lässt sich zusammenfassen, dass über das gesamte Jahr ebenfalls eine gute Ablaufqualität sichergestellt werden kann. Allerdings ist eine deutliche Abhängigkeit der Ammoniumablaufqualität von der Abwassertemperatur (Sommer- und Winterbetrieb) zu verzeichnen. Im Mittel beträgt die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf in der Nachklärung rund 1,4 mg/l. Der eingerichtete Kontrollwert von 3,0 mg/l im Ablauf des BB wird allerdings zeitweise bereits im Referenzzustand überschritten. Der Überwachungswert von 10,0 mg/l im Ablauf der Nachklärung wird ganzjährig sicher eingehalten (vgl. Abbildung 5.6), mit einer maximal aufgetretenen Ablaufkonzentration von 4,5 mg/l. Für den CSB und die Stickstoffparameter $\text{NO}_3\text{-N}$ und $\text{NO}_2\text{-N}$ sind in der Simulation keine Verschlechterungen im Ablauf der Nachklärung über das gesamte Jahr feststellbar (Pyro et al. 2017).

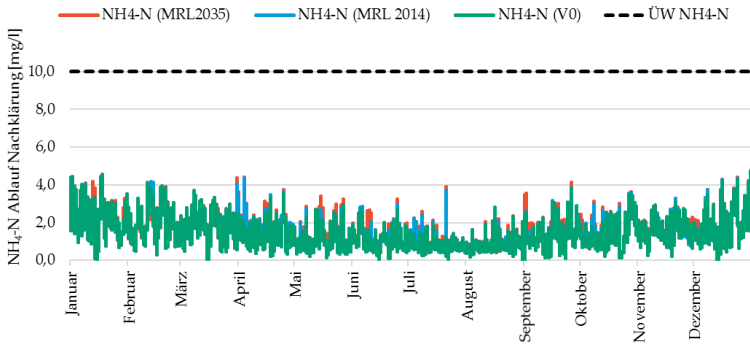


Abbildung 5.6: Simulationsergebnisse der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentrationen für den Referenzzustand und im flexibilisierten Betrieb (MRL 2014, 2035) für die Musterkläranlage über einen Betrachtungsraum von einem Jahr (nach Pyro et al. 2017)

5.3 Integration in ein Virtuelles Kraftwerk

Die Integration der KA Radevormwald in ein Virtuelles Kraftwerk (VK) erfolgte über einen Zeitraum von sechs Wochen. Als Eingangssignale dienten auch hier die realen (Regelleistungs-)Marktsignale des Jahres 2014, analog der Untersuchungen mit mathematischer Simulation (vgl. Kapitel 5.2). Die Abrufe erfolgten als Zusammenstellung besonders aktiver Marktsituationen. Aufgrund des temporären Testcharakters der Versuche wurde die Kommunikationseinheit nicht über die Schnittstelle zum ÜNB betrieben, sondern händisch über die Leitwarte des VK. Der Signalaustausch zu den Aggregaten erfolgte über das PLS der Kläranlage. Zur besseren Überwachung der Auswirkungen auf die Anlage und der Möglichkeit eines Eingreifens im Störfall wurden die Versuche zu den Arbeitszeiten des Betriebspersonals (8:00 Uhr – 16:00 Uhr) durchgeführt. Die hinterlegten Restriktionen sind, sofern nicht abweichend beschrieben, identisch zu den Parametern, die dem Simulationsmodell „Radevormwald“ zugrunde liegen (siehe Tabelle 5.4 und Tabelle 5.3).

Die an das virtuelle Kraftwerk angeschlossenen Aggregate, deren Leistung sowie die durchgeführten Versuchsreihen sind in Tabelle 5.5 zusammengestellt.

Tabelle 5.5: An das virtuelle Kraftwerk angeschlossene Aggregatgruppen und durchgeführte Versuchsreihen (nach Schmitt et al. 2017b)

Flex.	Aggregatgruppe	Installierte Leistung	Durchgeführte Versuchsreihen
Positiv/ Negativ	TE 1: BHKW 1 und 2	160 kW _{el} (80, 80 kW _{el})	MRL (2014)
	TE 2: Belüftung BB 1	220 kW _{el} (55, 75, 90 kW _{el})	MRL(2014), SRL(2014), Langzeit
Positiv	TE 3: Belüftung BB 2	225 kW _{el} (75,75,75 kW _{el})	MRL(2014), SRL(2014), Langzeit
	TE 4: RLS-Pumpen	90 kW _{el} (30, 30, 30 kW _{el})	MRL(2014), SRL(2014), Langzeit

Als TE (Technische Einheit) ist der Zusammenschluss mehrerer Aggregate zu einer Gruppe, die an das VK angeschlossen wird, zu verstehen.

5.3.1 Präqualifikation

Durch die Präqualifikation wird die Fahrplantreue der Aggregate nachgewiesen, welche Voraussetzung zur Anbindung an das VK ist. Die Anbindung der KA Radevormwald an das VK strebt die Teilnahme an den Märkten zur SRL sowie MRL an. Hierzu sind die damit verbundenen Präqualifikationsvoraussetzungen zu erfüllen (vgl. Tabelle 2.2). Dieser Leistungstest beinhaltet ein Anfahren bzw. Herunterfahren der Aggregate aufgrund eines externen Signals und erfolgt meist als zweimaliger Abruf innerhalb einer Stunde („Doppelhub“). In Abbildung 5.7 ist die erfolgreiche Präqualifikation der angeschlossenen Technischen Einheiten (TE) dargestellt und zeigt, dass die geforderten zeitlichen Reaktionskriterien eingehalten werden können. Die beim Anfahren der Aggregate entstandenen Leistungsspitzen (vgl. Abbildung 5.7) können durch eine Begrenzung der maximalen Leistungsaufnahme unterbunden werden (Schmitt et al. 2017b).

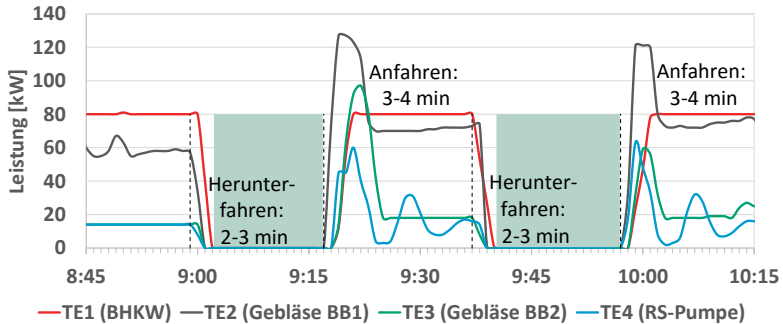


Abbildung 5.7: Präqualifikation in Form des „Doppelhub“ der vier angeschlossenen technischen Einheiten zur Bereitstellung von negativer (TE 2-4) bzw. positiver (TE 1) MRL (Schmitt et al. 2017b)

5.3.2 Versuchsdurchführung

In der ersten Testphase wurde positive MRL durch Abschalten der Belüftungsaggregate sowie der RLS-Pumpen bereitgestellt (TE 2 bis 4). Bereits zu Anfang wurde festgestellt, dass die hinterlegten Restriktionen im Ablauf des BB 1 von 3 mg/l $\text{NH}_4\text{-N}$ zu streng gewählt sind und es erfolgte eine Anpassung des $\text{NH}_4\text{-N}$ -Kontrollparameters von 3 mg/l auf zunächst 12 mg/l und abschließend auf 8 mg/l. Mit dieser Maßnahme konnten deutlich mehr Abrufe bedient werden. Dabei konnten ca. 81 % der benötigten Energiemenge bereitgestellt werden, ohne dass eine Verschlechterung im Reinigungsbetrieb festgestellt wurde (Schmitt et al. 2017b).

In der zweiten Testphase erfolgte die Untersuchung der BHKW. In einem ersten Schritt wurde BHKW-1 in Vollast und BHKW-2 in Teillast betrieben, um sowohl positive als auch negative Flexibilität anzubieten (40 kW_{el} positiv, 40 kW_{el} negativ). Zwei Abrufe konnten nicht bedient werden, da zur Zeit des Abrufs nicht genug Gas zur Verfügung stand. Mit entsprechender Prognosegüte zum Gasanfall und einer angepassten Fahrweise wären auch diese Signale umsetzbar gewesen. In einem zweiten Schritt wurden beide BHKW in Vollast betrieben und 80 kW_{el} negative Flexibilität angeboten. Die BHKW konnten für über 95% der angeforderten Zeiten die angebotene Leistung erbringen (Schmitt et al. 2017b).

Aus den gewonnenen Erkenntnissen aus der Bereitstellung der MRL wurden Anpassungen der Restriktionen vorgenommen, um auf die kürzeren, dafür häufigeren Abrufe der SRL besser reagieren zu können. Dazu wurde die Regenerationszeit für die RLS-Pumpen erst ab einer Abschaltdauer von 60 Minuten aktiviert, im Falle der Gebläse ab 30 Minuten. Mit diesen Anpassungen konnten alle Abrufe bedient und 92 % der benötigten Energiemenge bereitgestellt werden. Auswirkungen auf die Reinigungsleistung wurden nicht festgestellt (Schmitt et al. 2017b).

Unter den aktuellen Rahmenbedingungen zur Erbringung von Regelleistung muss diese bis zu einer Dauer von 4 Stunden bereitgestellt werden (SRL/MRL). Vor diesem Hintergrund wurden aufbauend auf den positiven Ergebnissen aus den Untersuchungen zur Bereitstellung von MRL und SRL, mit einer max. Abschaltdauer von bis zu 60 Minuten, die Restriktionen und Kontrollparameter mit einem künstlich erzeugten Langzeitabruf von mehreren Stunden weitergehend getestet. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 5.8 (oben) anhand des Tagesverlaufs der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf der BB 1 und 2 und der Nachklärung sowie der Energiedaten bei einem Abrufsignal mit einer Gesamtlänge von 335 Minuten. Zu erkennen ist, dass die aufgestellten Restriktionen und Kontrollparameter aktiv werden und dies zu unterbundenen Abrufen bzw. Wiederanfahren der Aggregate führt (Abbildung 5.8, unten). Für die biologische Stufe ist die hinterlegte maximale Abschaltdauer ($t_{\text{Ab,max}} = 60 \text{ Min.}$) sowie die Regenerationszeit ($t_{\text{Reg}} = 15 \text{ Min.}$) ausreichend gewählt, um auch bei mehreren, hintereinander folgenden (maximalen) Abschaltungen stabile Prozesse zu gewährleisten.

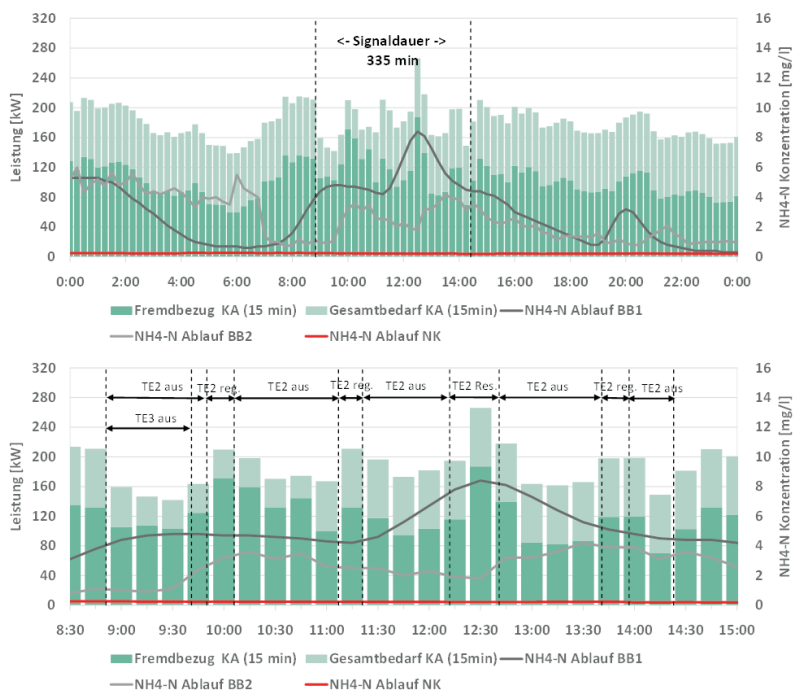


Abbildung 5.8: Auswirkungen auf Energiebedarf und Ablaufkonzentrationen eines Abschaltens der Belüftung von 335 Minuten im Tagesverlauf (oben) und im Detail zur Abrufzeit (unten) (nach Schmitt et al. 2017b)

Die RLS-Pumpen standen zu diesem Ereignis nicht zur Verfügung, da aufgrund großer Zulaufmengen die Restriktion Q_{Max} (500 l/s) eine Flexibilisierung verhindert hat. Die Ablaufwerte in der Nachklärung wurden mit Hilfe der Kontrollparameter auch unter diesen erhöhten Anforderungen nicht gefährdet und sicher eingehalten (Schmitt et al. 2017b).

Eine tabellarische Darstellung aller Versuchsergebnisse ist Anhang A 7 zu entnehmen.

5.4 Weitere betriebliche Erkenntnisse

Während der Versuchsphase wurden neben den vorig beschriebenen Ergebnissen weitere betriebliche Erkenntnisse gewonnen. Diese sind überwiegend auf die individuellen Anlagenkonfigurationen zurück zu führen und stellen keine bedeutenden Hürden bezüglich eines flexiblen Betriebes dar, bedürfen allerdings einer Anpassung im täglichen Betrieb (Schmitt et al. 2017b):

- Im Falle der Belüftung stieg nach einem Abschalten der Gebläse beim Wiederanfahren der Leistungsbedarf sehr stark, um möglichst schnell den O_2 -Sollwert im BB wiederherzustellen. Diese „Überschwinger“ sind aus regulatorischen Gründen für die Aggregate zu vermeiden und führen zusätzlich zu einem erhöhten Strombezug. Dies kann durch eine angepasste Steuerung, z.B. eine programmiertechnische Umsetzung der max. Leistungsaufnahme beim Anfahren der Aggregate, verhindert werden.
- Durch eine ungünstige Konstellation durch Abschalten der BHKW wurde in der Testphase eine neue Leistungsspitze im (Fremd-)Strombezug generiert, die negative Auswirkungen in Form von Mehrkosten bei den Strombezugskosten nach sich zog. Im regulären Betrieb wäre diese Spitze nicht entstanden, da im Gasspeicher zu dieser Zeit ausreichend Volumen zur Zwischenspeicherung zur Verfügung stand. Sollte keine Anpassung in der Berechnung der Netznutzungsentgelte hinsichtlich Regelleistung (z.B. Befreiung während eines system-/netzdienlichen Einsatzes) stattfinden, könnte eine zusätzliche Restriktion in Form einer maximalen Leistungsspitze Abhilfe schaffen.
- Nach drei Tagen intensiver Abschaltungen wurde ein Anstieg des ohnehin bereits hohen ISV¹² festgestellt und die Testphase für einige Tage ausgesetzt. Eine ursächliche Verknüpfung mit der Bereitstellung von Flexibilität konnte allerdings nicht sicher festgestellt werden.

¹² Der Schlammindex (ISV) ist ein Maß für die Absetzeigenschaften des Belebtschlammes und gibt an welches Volumen (in ml) 1 g Trockensubstanz beansprucht. Bei hohen ISV-Werten (z.B. durch fadenförmige Bakterien) kommt es zu Problemen bei der Eindickung bzw. „Blähschlamm“ (Bischof 1998; Gujer 2007).

-
- Der Abzug des Überschussschlammes erfolgt auf der KA Radevormwald direkt aus der Rücklaufschlammleitung, da kein Vorlagebehälter vorhanden ist. Bei zu langen Abschalt Dauern der RLS-Pumpen kann daher nicht genügend Überschussschlamm für die MÜSE bereitgestellt werden. Dadurch stellt sich bei zu langen Abschalt Dauern der RLS-Pumpen ein ungünstiges Verhältnis von ÜSS zu Polymerdosierung ein und führte zu einer schlechteren Eindickung. Während bei der SRL weniger Probleme auftraten, müsste bei der Bereitstellung von MRL, durch die längeren Abrufe, eine weitere Restriktion die Abrufdauer begrenzen. Bei Betrieb der ÜSS-Eindickung ist bei der aktuellen Betriebsweise ein Abschalten der RLS-Pumpen nicht ratsam.

5.5 Zwischenfazit – Validierung und Verifikation

Die entwickelten Restriktionen und Kontrollparameter erwiesen sich als geeignet und zielführend zur Bereitstellung von Flexibilität unter Einhaltung einer betriebssicheren Abwasserreinigung. So erscheint es realistisch, dass bereits mit relativ geringen Anpassungen Regelleistung, mit definierten Unterbrechungen, auch über mehrere Stunden auf der KA Radevormwald bereitgestellt werden kann. Die untersuchten Aggregate sind sowohl für die SRL als auch zur Bereitstellung von MRL geeignet. Weiterhin zeigte sich, dass die jeweiligen Märkte und deren Anforderungen unterschiedliche Auswirkungen auf die Prozesse haben und somit individuelle Ansprüche an eine Integration in den Kläranlagenbetrieb stellen, die individuell über die Kontrollparameter der Restriktionen berücksichtigt werden müssen.

Aus technischer Sicht konnte die Funktionsfähigkeit der Kopplung von Kommunikationstechnik des VK mit den Aggregaten über das PLS der Kläranlage durchgängig nachgewiesen werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass trotz eines externen Signals die Kontrolle beim Kläranlagenbetreiber verbleiben kann, um den Belangen der Abwasserreinigung in vollem Maße Rechnung zu tragen.

6 Bewertung und Diskussion der Kläranlagenflexibilität

6.1 Summative Evaluation eines flexiblen Anlagenbetriebes

In den vorangegangenen Kapiteln konnte die Nutzbarkeit von Aggregaten auf der Kläranlage unter Berücksichtigung technisch-physikalischer, klärtechnischer und energiemarktbedingter Anforderungen aufgezeigt werden. Die Ergebnisse lassen sich allerdings aufgrund der hohen Individualität von Kläranlagen nicht uneingeschränkt auf alle Kläranlagen übertragen und sind anlagenbezogen zu hinterfragen. Im folgenden Kapitel erfolgt daher eine summative Evaluation, indem die abgeleiteten Erkenntnisse aus den eigenen Untersuchungen mit möglichen Aus- und Wechselwirkungen auf die Aggregate, Prozesse und Verfahrenstechnik kritisch reflektiert werden, woraus sich ein zusätzlicher Erkenntnisgewinn ergibt. Die Anpassung an eine flexible Betriebsweise erfordert detailliertes Wissen über die einzelnen Prozesse und Betriebsweisen auf Kläranlagen und deren übergeordneten Zusammenhänge. Die Vielzahl an tangierten Themenfeldern und die teilweise sehr spezifischen Problemstellungen können im Rahmen dieser Arbeit nicht vollumfänglich gelöst werden. Daher wird auf grundlegende Problemstellungen hingewiesen und Lösungsvorschläge werden unterbreitet. Diese Synthese hat zum Ziel zusammenfassend und ergebnisbewertend unter Einbeziehung der einschlägigen Fachliteratur (z.B. Regelwerke, Leitfäden, relevante Studien, Praxisberichte) zu einer allgemeingültigeren Aussage und Bewertung der verschiedenen Verfahrensstufen bei einem flexiblen Anlagenbetrieb zu gelangen.

6.1.1 Zulauf und mechanische Reinigung

Bei einer flexiblen Nutzung des **Zulaufhebewerks** sind die spezifischen Randbedingungen der Kläranlage maßgebend; generelle Empfehlungen sind nur schwer möglich. Bei Anlagen mit ungünstigen topografischen Bedingungen stellen die Pumpen relevante Verbraucher dar, die es näher zu untersuchen gilt. Insbesondere in Schwachlastzeiten ist ein Einstau im Pumpensumpf oder im vorgelagerten Zulaufkanal denkbar und ermöglicht prinzipiell einen flexiblen Betrieb (vgl. Schloffer et al. 2015). Weiterhin ist zu überprüfen, ob bei gezieltem Einstau des Zulaufkanals bei hydraulischen Stoßbelastungen negative Auswirkungen auf die Anlage zu erwarten sind. Vorhandene Stauraumvolumina sind für Regenereignisse vorzuhalten und müssen mit einsetzendem Mischwasserzufluss verfügbar sein. Das Auftreten schnell ansteigender Mischwasserzuflüsse bei vorherigem gezieltem Einstau des Zulaufkanals könnte zu erhöhten Mischwasserentlastungen führen und ist unbedingt zu vermeiden. Für Becken, die Funktionen in der zentralen Regenwasserbehandlung und -rückhaltung

übernehmen, muss sichergestellt werden, dass die Einrichtungen, das Volumen und ihre Behandlungsfunktion mit einsetzendem Mischwasserabfluss verfügbar sind. Dies könnte ggf. über die Verknüpfung mit einer Niederschlagsvorhersage (z.B. mit Hilfe von DWD-Radardaten) abgesichert werden. Bei einem dem Pumpwerk nachgeschalteten Speicher-/Pufferbecken, z.B. zur Vergleichmäßigung des Zulaufs, ist bei verfügbarem Speichervolumen und entsprechender Topografie eine temporär erhöhte Förderung als negative Flexibilität denkbar. Die Funktionsweise ähnelt hierbei dem eines Pumpspeicherkraftwerks, indem die zuvor gespeicherte, zu hebende Abwassermenge zeitlich vorgezogen wird. Individuelle Konzepte bieten im Zulaufbereich ein breites Spektrum an möglichen Einzellösungen. Negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung werden durch Abschalten der Zulaufaggregate nicht erwartet.

Für dauerbelüftete **Sandfänge** sind Abschaltungen der Gebläse in Bereichen von 30 bis 120 Minuten, in Abhängigkeit der Randbedingungen vor Ort (Sandanfall, spez. Lufteintrag etc.), denkbar. Generell ist die Eignung eines intermittierenden Betriebs zu prüfen, welcher bei überdimensionierten Sandfängen ohne ein zu starkes Absetzen der organischen Stoffe möglich ist. Hier sind die Mindestbelüftungszeiten sowie die ankommende Wassermenge relevante Parameter, die es zu beachten gilt.

6.1.2 Biologische Reinigungsstufe

Die Untersuchungen zur biologischen Stufe haben gezeigt, dass die durch die Steuerung der Luftzufuhr nutzbare Leistung über den Tag stark schwankt und von der installierten Leistung deutlich abweicht.¹³ So haben Anlagen mit größeren Pufferkapazitäten, z.B. durch Unterauslastung oder große spezifische Beckenvolumina, ebenfalls höhere Potenziale in Sachen Flexibilität, da sie ohnehin unterhalb ihrer Auslegungsgrenze arbeiten und entsprechende freie Kapazitäten aufweisen. Sollte die biologische Stufe allerdings nahe an ihrer Belastungsgrenze arbeiten, wird sich kein vertretbares Flexibilitätspotenzial heben lassen. Hierzu sind Vorversuche und eine dynamische Simulation der Anlage ein adäquates Mittel, die vorhandenen Möglichkeiten der biologischen Stufe vorab risikofrei auszuloten (vgl. Kapitel 5.2). Die konkreten Grenzen der gewählten Parameter zur Sicherung der Funktionsfähigkeit sollten hierbei, beginnend mit großen Sicherheiten, iterativ bestimmt werden. Für energetisch bereits weitestgehend optimierte Anlagen mit hoher Auslastung wird eine Abschaltung der Belüftungsaggregate einen erhöhten Einfluss auf der Reinigungsleistung haben, vor allem bei niedrigem Schlammalter und geringen spezifischen Beckenvolumina. Bei zu großen Pufferkapazitäten sollte geprüft werden, ob eine bauliche/maschinenteknische Anpassung aus Effizienzgründen der Nutzung bzw. Bereitstellung als Flexibilitätsoption

¹³ Beispiel Radevormwald: Gesamte installierte Nennleistung 445 kW_a (gemessene Wirkleistung: 202,4 kW_a), davon nutzbare Leistung für Flexibilität: 60 - 100 kW_a (BB 1 und 2).

tion vorzuziehen ist. Die Untersuchungen bestätigen eine mögliche Nutzung als positive Flexibilität und zeigen, dass insbesondere kurze Abschaltungen ohne signifikanten Einfluss auf die Reinigungsleistung durchführbar sind, und belegen die theoretischen Einschätzungen aus der Literatur (z.B. Schloffer et al. 2015).

Die angewandte Verfahrenstechnik spielt auch bei vorhandener Pufferkapazität eine wesentliche Rolle und ist im Kontext der gesamten Verfahrensstufe zu betrachten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine intermittierende Denitrifikation dabei von Vorteil ist, da die Belüftungsaggregate für eine Stoßbelüftung und definierte Abschaltzeiten ausgelegt sind. Im Falle der vorgeschalteten Denitrifikation wird von einem konstanten Betrieb der belüfteten Zonen ausgegangen und die Belüftungssysteme sind auf eine Eignung eines intermittierenden Betriebs und ausreichende Dimensionierung zu überprüfen, um einen flexiblen Betrieb ohne Schlammablagerungen zu realisieren. Des Weiteren ist eine parallele Abschaltung der Rezirkulationspumpen bei vorgeschalteter Denitrifikation zu vermeiden (Stoßbelastung beim Wiederanfahren), um eine Nutzung der Gebläse zu ermöglichen (vgl. Kapitel 5.2). Ferner könnte sich durch geringere Durchmischung bei Röhrenreaktoren im Gegensatz zu volldurchmischten Reaktoren eine größere Ammoniumspitze ausbilden, die vom System nur bedingt aufgefangen werden kann.

Durch lange Anaerobphasen ist eine unerwünschte Phosphorrücklösung in den sonst belüfteten Einheiten möglich und könnte eine Anpassung des Fällmittelkonzepts erfordern (z.B. höherer Fällmittelbedarf, Verlegung der Dosierstelle u.a.), um eine längere Abschaltung der Belüftung bei ansonsten dauerbelüfteten Becken ohne Auswirkungen auf die Phosphorablaufwerte zu riskieren. Hierzu konnte auf den untersuchten Anlagen allerdings nichts festgestellt werden. Zu Auswirkungen bei einer gezielten biologischen Phosphorelimination (Bio-P) liegen keine Erfahrungen vor. Bei der chemisch-physikalischen P-Elimination ist außerdem darauf zu achten, dass einige Fällmittel nur in aerobem Milieu (Oxidation von Fe^{2+} zu Fe^{3+}) angewendet werden können (DWA 2011).¹⁴

Für kleinere Kläranlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung sind deutlich längere Abschaltzeiten denkbar, die durch größere Pufferkapazitäten, insbesondere durch das hohe Schlammalter, zu begründen sind. Simulationen zeigen hierbei Abschaltungen von bis zu 12 Stunden ohne größere negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung (Schloffer et al. 2015; Hansen und Hien 2016). Bei häufigen Abschaltungen in dieser Größenordnung sind allerdings Auswirkungen auf die Schlammstabilisation (Absenkung des aeroben Schlammalters) denkbar.

¹⁴ Weitere Hinweise und Anpassungsmöglichkeiten zur chemisch-physikalischen P-Elimination sind DWA 2011 zu entnehmen.

Die Nutzung „in negativer Richtung“ in Form einer „Überbelüftung“ durch erhöhten Sauerstoffeintrag erscheint nicht sinnvoll. So konnten in Bruyn et al. (2014) keine zusätzlichen Vorteile festgestellt werden. Ein zu hoher Sauerstoffeintrag führt nicht nur zu einem Energiemehrverbrauch, sondern kann durch Sauerstoffverschleppung negative Einflüsse auf die Denitrifikationsprozesse und die Phosphorrücklösung bei der biologischen Phosphorelimination zur Folge haben (Baumann et al. 2014).

Die **Rührwerke** in den Belebungsbecken sind je nach Ausführung der Beckengeometrie ebenfalls ein nennenswerter Stromverbraucher und zum flexiblen Betrieb geeignet. Zu beachten ist hierbei die Vielzahl an unterschiedlichen möglichen Bau- und Betriebsweisen (intermittierend oder Dauerbetrieb) und verfahrenstechnischen Ausführungen. Die Nutzung der Rührwerke kann außerdem stark von der Belüftung abhängig sein und unter Umständen nicht zur Verfügung stehen während die Belüftung abgeschaltet ist, um die benötigte Durchmischung zu gewährleisten (vgl. auch Nowak et al. 2015). Ein Abschalten der Aggregate ist nicht von der hydraulischen Belastung oder Fracht abhängig, sondern vom erzeugten Schub und den Absetzeigenschaften des Schlammes. Hier sollte die Bodengeschwindigkeit zwischen 0,1 und 0,3 m/s liegen, um auch bei niedrigem ISV einen ablagerungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Bei hoher spezifischer Leistungsdichte der Rühraggregate kann ein intermittierender oder drehzahlreduzierter Betrieb umgesetzt werden, wobei die anzusetzenden Zeitintervalle durch Vorversuche und Feststoffkonzentrationsmessungen ermittelt werden sollten (DWA 2017c).¹⁵

Des Weiteren stellen die **Rücklaufschlammumpen** eine gut integrierbare positive Flexibilitätsoption dar. Kurze Abschaltzeiten sind problemlos möglich, längere Phasen sollten über die Schlammspiegelhöhe oder alternativ (zusätzlich) über den Zulauf der Anlage reguliert werden, um ein zu starkes Absinken des TS-Gehaltes im Belebungsbecken zu verhindern. Auswirkungen auf die Reinigungsleistung bezüglich der Parameter AFS und CSB sind stark abhängig von der Kapazität der Nachklärung und des aktuellen Zuflusses (siehe auch Nowak et al. 2015).

Die bei der vorgeschalteten Denitrifikation benötigten **Rezirkulationspumpen** eignen sich ebenfalls zur Lastverschiebung in beide Flexibilitätsrichtungen. Bei zu langen Abschaltzeiten und damit geringerer Rezirkulationsrate kann es allerdings zu unzureichendem Nitratabbau kommen. Bei längeren Zuschaltdauern und hoher Rezirkulationsrate wird eine zu hohe Nitratfracht zurückgeführt, die bei einem ungünstigen C/N-Verhältnis nicht denitrifiziert werden kann und energetisch nicht zweckmäßig ist. Hier sind individuelle Grenzen für den flexiblen Betrieb zu definieren. Das Leistungspotenzial ist allerdings deutlich geringer als bei der Belüftung oder den Rührwerken.

¹⁵ Weitere Hinweise zur Ausgestaltung und Betrieb unterschiedlicher Rührwerkssysteme sind DWA 2017b und DWA 2017c zu entnehmen.

6.1.3 Schlammbehandlung

In der Verfahrensgruppe der **Faulung** bieten sich die Pumpen (Heizschlammumpen, Rohschlammumpen) sowie die Rührwerke für eine Nutzung an. Die Rührwerke sind für kurze Zeitintervalle prinzipiell geeignet, allerdings sind die Absetzeigenschaften des Schlammes, mögliche Schaumbildung, Auswirkungen in der Biogasproduktion und ggf. die technische Eignung (Auslegung der Aggregate auf Dauerbetrieb) zu beachten. Die Auswirkungen können hier je nach Art der Umwälzung (interne/externe Umwälzung, Schaufler etc.) und Bauform stark variieren und somit auch die Zu-/Abschaltedauern. Eine ausreichende Durchmischung ist über Mindestumwälzzeiten der Pumpen und Mindestumwälzraten einzuhalten. Bei den Beschickungs- bzw. Heizpumpen bestehen relativ große Freiheitsgrade in der Nutzung. Insbesondere die Heizschlammumpen bieten große Flexibilität mit der Möglichkeit, die Temperatur im Faulturm bei Bedarf anzupassen. Hier ist auch die Nutzung als Wärmespeicher denkbar. Sowohl bei der Beschickung als auch bei der Erwärmung können, je nach Nutzungsart, Steigerungen/Reduzierungen in der Biogasproduktion auftreten. Die gezielte Beschickung des Faulturms mit Co-Substraten zur gesteuerten Biogasproduktion und -verstromung eignet sich ebenfalls als Flexibilitätsoption (siehe hierzu z.B. Lensch et al. 2016; Hien 2017; Engelhart et al. 2018).¹⁶

Die Verfahren der **Schlammmentwässerung** sind meist diskontinuierliche Prozesse, die unabhängig von der Reinigung des Abwassers betrieben werden und eignen sich damit generell zur Flexibilitätsoption bzw. Lastverschiebung für mehrere Stunden. Je nach Art des Aggregats sind diese gut automatisierbar, verfügen auf den Anlagen allerdings meist nicht über eine entsprechende Automatisierung um vollständig in ein Energiemanagement eingebunden zu werden. Eine Verschiebung der Last ist daher an den Betriebsablauf bzw. an das Personal gekoppelt zu integrieren, und somit weitestgehend an deren Arbeitszeiten gebunden. Während bei Kammerfilterpressen im Anschluss Reinigungsarbeiten durchgeführt werden müssen, ist bei Zentrifugen/Schneckenpressen das Entwässerungsergebnis zu überwachen und z.B. die Polymerzugabe anzupassen. Die meisten Verfahren der Schlammmentwässerung sind prozesstechnisch relativ unflexibel, bieten allerdings den Vorteil gegenüber den Reinigungsaggregaten zeitlich sehr variabel und gut planbar einsetzbar zu sein, da keine Beeinflussung mit der Belastungsdynamik der Anlage besteht. Des Weiteren ist der Strombezug je Vorgang u.U. nicht konstant und ist bei einer Nutzung als Flexibilitätsoption zu berücksichtigen.

¹⁶ Die Nutzung der Schlammfäulung und insbesondere deren Beschickung und Zugabe mit Co-Substraten als Flexibilitätsoption wird in der Fachwelt kontrovers diskutiert (bspw. DWA KEK-2 2017; Roediger und Loll 2017) und an dieser Stelle wird hierzu auf die Ergebnisse in Engelhart et al. (2018) verwiesen.

Die maschinelle **Überschussschlammindickung** kann zusammen mit den Überschussschlammumpfen ebenfalls über mehrere Stunden abgeschaltet werden. Hierbei ist die Einhaltung des erforderlichen TS-Gehaltes in der Belebungsstufe zu beachten. Außerdem ist die Nutzung in das Konzept der Faulturmbeschickung einzubinden.

6.1.4 Energieerzeugung

Die **KWK-Anlagen** stellen aufgrund ihrer Leistungsgrößen neben den Belüftungsaggregaten die zentrale Einheit zur Flexibilitätsbereitstellung auf Kläranlagen dar. Die Bereitstellung von positiver und negativer Flexibilität durch die Blockheizkraftwerke ist problemlos möglich, allerdings stark abhängig von den technischen Randbedingungen des BHKW-Betriebs und dem vorhandenen Gasspeicher, der limitierend wirkt (siehe dazu Kapitel 7.5.1). Dieser entkoppelt die biologischen Prozesse im Faulturm vom Betrieb der Stromerzeugungsaggregate und ermöglicht eine Nutzung weitestgehend unabhängig vom Reinigungsbetrieb und dem momentanen Gasanfall. Die KWK-Einheit und der Gasspeicher müssen hier als eine Einheit betrachtet und bewirtschaftet werden. Dabei ist auch auf verringerte Wirkungsgrade im Teillastbetrieb zu achten (Opportunitätskosten). Durch eine modulare Bauweise mit mehreren Aggregaten wird sowohl die Verfügbarkeit als auch der Betrieb in günstigeren Lastbereichen ermöglicht und bietet mehr Freiräume in der Flexibilitätsbereitstellung. Eine Optimierung der Gasverwertung ist durch eine Simulation der Faulgasverwertung möglich, die durch Erweiterungen im Bereich der BHKW-Steuerung ergänzt werden können. Am Markt stehen zahlreiche simulationsgestützte Planungshilfen zur Verfügung, die einen angepassten und individuellen Betrieb der BHKW-Anlage ermöglichen (siehe hierzu: ifak 2014; Weinrich 2017; Hien 2017; Müller et al. 2017). Die BHKW stellen damit die zentrale Einheit im Gesamtkonzept der Flexibilitätsbereitstellung dar und ergänzen die unterschiedlichen Betriebsweisen (vgl. Kapitel 2.2.3) um die der „marktgeführten“ Fahrweise.

Ältere Motoren sind auf eine Grundlastdeckung und nicht auf häufiges An- und Abfahren ausgelegt und ohne Nachrüstung nur bedingt für einen flexiblen Betrieb geeignet. Beim Einsatz als Flexibilitätsoption ist zu prüfen, welche Auswirkungen hinsichtlich Alterung sowie Instandhaltung und Wartung durch neue/geänderte Betriebsweisen entstehen, denn üblicherweise werden BHKW kontinuierlich und in Volllast betrieben (siehe z.B. Bruyn et al. 2014; Dietrich 2016). Generell ist aus technischer Sicht eine Nutzung als negative Flexibilitätsoption (Abschalten/Leistungsreduktion) einem (häufigen) Starten vorzuziehen. Insbesondere viele Startvorgänge bei (sehr kurzen) Abrufdauern sind als kritisch anzusehen (z.B. bei der SRL). Dies kann zwar über die Regenerationszeit bzw. über eigene Restriktionen (z.B. max. Schaltvorgänge) begrenzt werden, eine Verwendung der Flexibilität unter solchen Randbedingungen ist allerdings kritisch zu hinterfragen (vgl. Kapitel 6.2.3). Eine flexible Fahrweise kann zum einen durch eine Taktung (An-/Abfahren) oder durch einen Teillastbetrieb erfolgen. Daraus können eine Reihe von Problemen resultieren die es zu beachten gilt. Für Gas-

Otto-BHKW sind dies nach Dietrich (2016) z.B. verringerte Wirkungsgrade, unpassende Auslegung von peripheren Anlagenteile, erhöhter Verschleiß und zusätzlich benötigte Regel- und Steuertechnik. In den letzten Jahren haben die Hersteller allerdings auf die geänderten Randbedingungen reagiert und die Motoren der neuen Generation für einen flexiblen Betrieb angepasst. Nichtsdestotrotz sind die technischen Herstellervorgaben (z.B. Garantieansprüche), Reduzierung der Lebensdauer und die Kompatibilität zu entsprechenden Steuereinheiten zu prüfen. Einige BHKW-Hersteller haben eine Kommunikationseinheit in ihrem Angebot bereits integriert, was bei einer Neuananschaffung und einer geplanten Marktteilnahme von Vorteil ist. Eine gezielte Überdimensionierung an Leistungskapazität zur Flexibilitätsbereitstellung (Überbau) kann unter positiven Randbedingungen sinnvoll sein. Hier werden zukünftige Anreizsysteme maßgeblich die Wirtschaftlichkeit, durch z.B. Flexibilitätsprämien, beeinflussen und ggf. eine größere Auslegung der Kapazitäten forcieren. Für neuere BHKW-Anlagen ist eine Teilnahme am Regelleistungsmarkt in der Regel kein Problem und bereits Stand der Technik (Siehe hierzu: ASUE 2015; Mittelstedt 2016; Müller et al. 2017).

Bei den **Netzersatzanlagen** ist auf eine Netzparallelität zu achten, welche die Grundvoraussetzung zur Anbindung an das öffentliche Stromnetz ist. Die wichtigste Komponente ist hierbei die Fernwirktechnik, die unter Umständen nachzurüsten ist. Bei den meist ohnehin abgeschriebenen Anlagen amortisiert sich die Kommunikationstechnik daher schnell oder kann von einem Dienstleister gestellt werden (Schmiedeskamp 2010). Es bestehen neben eventuell erhöhtem Aufwand bei der Treibstoffbewirtschaftung keine zu erwartenden negativen Auswirkungen. Eine kontinuierliche Prüfung der individuellen Gestehungskosten ist allerdings unerlässlich, da bei ungünstigen Konstellationen die erzielten Gewinne nicht ausreichen könnten die Treibstoffkosten zu decken. Durch die Reglementierung auf 180 h/a (StromGVV 2016) bietet sich eine Vermarktung hinsichtlich der Verfügbarkeit bzw. Flexibilität und weniger hinsichtlich der tatsächlichen Bereitstellung von elektrischer Energie in größeren Mengen oder einem internen Lastmanagement an.

6.1.5 Ableitung allgemeiner Flexibilitätskennzahlen relevanter Aggregate

Als Synthese werden auf der Grundlage der gewonnen Erkenntnisse aus den eigenen Untersuchungen der KA Radevormwald (Kapitel 4), der Simulation und der praktischen Umsetzung (Kapitel 5) sowie der Berücksichtigung entsprechender Fachliteratur die Flexibilitätskennzahlen der KA Radevormwald weiterentwickelt, um allgemeingültigere Aussagen zu treffen und eine Übertragbarkeit auf andere Anlagen zu verbessern. Hierzu wurden individuelle Randbedingungen ausgeklammert und einige Parameter mit Sicherheiten belegt. An dieser Stelle fließen ebenfalls die iterativen Anpassungen im Rahmen der Simulation und der praktischen Umsetzung ein.

Des Weiteren sind die Kennzahlen mit dem Betriebspersonal der Kläranlagen Kohlfurth und Odenthal besprochen und für die beiden Anlagen ebenfalls erhoben worden (siehe Anhang A 8) und in die in Tabelle 6.1 aufgeführten Kennzahlen eingeflossen.

Anzumerken ist, dass die im Folgenden dargestellten Einschätzungen als erste Erfahrungen und Empfehlungen zu verstehen sind.

Tabelle 6.1: Aggregatspezifische Kennzahlen eines flexiblen Anlagenbetriebes (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2018c)

Aggregat	Abschaltdauer		Zuschaltdauer		Regenerationszeit	Anfahrzeit	Abfahrzeit
	min	max	min	max			
	[min]	[min]	[min]	[min]			
Hebewerke	5	15	-	-	30	60	60
Sandfanggebläse	5	60	-	-	30	60	60
Belüftung (Belebungsbecken)	5	60 / 120 ¹	-	-	15	60	60
Rührwerke (Belebungsbecken)	15	30	15	40	30	60	60
Rührwerke (Faulturm)	15	30	-	-	15	180	60
Rücklaufschlammförderung	5	120	-	-	60	60	60
Rezirkulationspumpen	5	720	-	-	30	60	60
Heizschlammpumpe (Faulturm)	15	1.440	15	1.440	60	60	60
Roh-/Primärschlamm- pumpe (Faulturm)	15	30	-	-	15	120	60
Seihband/Siebtrommel (MÜSE)	-	-	120	1.440	15	60	900
Zentrifuge (Entwässerung)	-	-	240	420	60	1.200	1.200
Kammerfilterpresse (Entwässerung)	-	-	150	150	60	120	120
BHKW	5	1.440	60	1.440	5 ² / 30 ³	180	300
NEA	-	-	15	900	2,50	60	60

¹ aerobe Stabilisation; ² Neg. Flexibilität; ³ Pos. Flexibilität;

6.1.6 Zwischenfazit – Bewertung der Aggregatgruppen

In Tabelle 6.2 ist zusammenfassend die Bewertung der Auswirkungen auf den Betrieb der Kläranlage für die unterschiedlichen Aggregatgruppen dargestellt. Enthalten sind hierzu die mögliche Flexibilitätsrichtung, die angeboten werden kann, eine Einschätzung der Leistungsgröße sowie mögliche Auswirkungen auf die entsprechenden Prozesse.

Tabelle 6.2: Zusammenfassende Bewertung der Aggregatgruppen als Flexibilitätsoptionen

Aggregatgruppe	Flexibilitäts- richtung und Leistungsgröße	Bemerkung zu möglichen Auswirkungen
Zulaufhebwerk	+ ●●	<ul style="list-style-type: none"> - Stark abhängig vom vorgelagerten Kanalnetz und Regen-/ Trockenwetterfall - Unterscheidung von unterschiedlichen Grenzwerten in Tag/Nacht sinnvoll
Sandfanggebläse	+ ●	<ul style="list-style-type: none"> - Absetzen von org. Substanzen beachten - Wenig Spielraum zur Abschaltung bei passender hydraulischer Auslegung
Belüftung (<i>Belebungsbecken</i>)	+ ●●●	<ul style="list-style-type: none"> - Bei längeren Abschaltungen ist auf Änderungen der Biozönose zu achten - Gewährleistung einer ausreichenden Durchmischung des Belebtschlammes - Phosphor Rücklösung durch lange Anaerobzeiten denkbar
Rührwerke (<i>Belebungsbecken</i>)	+ ●●	<ul style="list-style-type: none"> - Absetzverhalten und Zeitintervalle prüfen (ISV, TS_{BB} etc.) - Abschaltung mit Belüftung ggf. nicht möglich
Rücklaufschlamm- pumpen	+ ●●	<ul style="list-style-type: none"> - TS-Gehalt in der Belebung kann durch längere Abschaltung und großen Zufluss zu stark absinken - Schlammabtrieb aus der Nachklärung bei zu langer Stillstandszeit möglich
Rezirkulations- pumpen	+ / - ●	<ul style="list-style-type: none"> - Anstieg der NO₃-N-Ablaufkonzentration möglich - Abschaltung mit Belüftung ggf. nicht möglich

Aggregatgruppe	Flexibilitäts- richtung und Leistungsgröße		Bemerkung zu möglichen Auswirkungen
Heizschlammpumpe (<i>Faulturm</i>)	+ / -	•	- Möglicher Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Stabilität und Geschwindigkeit der anaeroben Umsetzungsprozesse und damit Biogasproduktion prüfen
Primär-/Rohschlamm- pumpen (<i>Faulturm</i>)	+	•	- Biogasproduktion abhängig von der Beschickung
Rührwerke (<i>Faulturm</i>)	+	••	- Schaumbildung prüfen - Biogasproduktion könnte sinken - Ausreichende Durchmischung gewährleisten: Absetzverhalten prüfen, Mindestlaufzeiten der Pumpen und geforderte Umwälzraten beachten
MÜSE/ ÜSS-Pumpen	-	••	- Abhängig vom ÜSS-Anfall und Aggregatleistung - Mindestlaufzeit der Aggregate sinnvoll
Kammerfilterpresse	-	••	- Vorgang u.U. nicht zu unterbrechen - Nur bei Anlagenbesetzung möglich, da im Anschluss die Reinigung notwendig wird
Zentrifuge	-	••	- Ggf. nur bei Anlagenbesetzung möglich, da im Anschluss die Überwachung/ Dosieranpassung erfolgen muss
BHKW	+ / -	•••	- Anzahl Schaltzyklen ggf. reglementiert - Eingeschränkte Flexibilität bei zu geringem Gasspeichervolumen
NEA	-	•••	- Je nach Treibstoffspeichergroße erhöhter Aufwand bei der Bewirtschaftung
		+ Positive Flexibilität	- Negative Flexibilität
		• gering	•• mittel ••• hoch

In Abbildung 6.1 ist das erweiterte und angepasste Ablaufschema zur Einbindung von Aggregaten zur Flexibilitätsnutzung, aufbauend auf der in Kapitel 3 (vgl. Abbildung 3.1) vorgestellten Methodik, dargestellt. Die in den vorigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse liefern zu den Schritten I bis IV wichtige Beiträge. Die in Tabelle 6.2 dargestellten Aggregate und deren Einschätzung können als Vorauswahl an selbigen dienen (Schritt I). Weitere Kriterien, die zu einer Ersteinschätzung zusätzlich herangezogen werden können, sind die (Wirk-)Leistung, mögliche bzw. bereits vorhandene Zusammenschlüsse in steuerbare Aggregatgruppen im internen PLS der Kläranlage sowie die generelle Möglichkeit/ Sinnhaftigkeit einer technischen Integration in ein Managementkonzept. Darauf aufbauend kann eine individuelle Liste durch Ergänzungen/Einschränkungen des Betreibers erstellt werden (Schritt II). Die Darstellung und Auswertung relevanter Daten ist im Detail in Kapitel 4.2 dargestellt (Schritt III). Mit den in Tabelle 6.1 aufgeführten Kennzahlen und Restriktionen steht ein methodischer Ansatz zur Etablierung eines Flexibilitätsmanagements für Kläranlagen zur Verfügung, der auf die individuellen Randbedingungen der vorhandenen Aggregate angepasst werden kann (Schritt IV). Des Weiteren ist im Ablaufschema die praktische Einbindung in den Betriebsablauf der Kläranlage auf Basis der in Kapitel 5 gewonnenen Erkenntnisse bei der praktischen Umsetzung ergänzt. Dies kann zunächst über die programmier-technische Integration in das PLS der Kläranlage erfolgen (Schritt V). In einem weiteren Schritt können erste eigene Erfahrungen mit dem System erworben werden, indem die hinterlegten Flexibilitätsparameter unter Betriebsbedingungen getestet werden. Das betroffene Personal sollte in der Verwendung des Aggregatmanagements entsprechend geschult werden, da die Kontrollparameter mit zunehmendem Wissensgewinn angepasst werden sollten, um negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung und den üblichen Betriebsablauf zu vermeiden sowie das Aggregatmanagement weiter individuell zu optimieren (Schritt VI). Im Anschluss daran erfolgt die Integration in den regulären Betriebsablauf (Schritt VII).¹⁷ Aus den bisherigen Erfahrungen einer Implementierung des Aggregatmanagements werden Synergien durch eine tiefergehende Auseinandersetzung mit den Prozessen auf der Kläranlage auch außerhalb des energetischen Bereiches durch das Personal generiert und die Gesamteffizienz der Anlage erhöht.

Flexibilität findet bei der Anlagen- und Prozessplanung auf Kläranlagen bisher keine Berücksichtigung. Durch das geänderte Anforderungsprofil bei der Bereitstellung von Flexibilität können sich gängige (Bemessungs-)Parameter der Aggregate verändern und von den üblich herangezogenen Parametern abweichen (vgl. DENA 2016b). Beispielsweise sind für ein stromgeführtes BHKW die üblichen Volllaststunden für wärmegeführte BHKW als Auslegungsgröße nicht zielführend oder ein ursprünglich auf konstanten Betrieb ausgelegter Klärgasspeicher nicht ausreichend, um Gas in benötigtem Maße bei einer Flexibilisierung länger zwischenspeichern (vgl. Kapitel 7.5.1).

¹⁷ Weitere Hinweise zur generellen Einbindung flexibler Lasten in ein Lastmanagement siehe z.B. DENA 2012b.

Dies ist bei Planung und Betrieb sowie Neuinvestitionen zu berücksichtigen und könnte durch Simulation oder Sensitivitätsanalysen näher untersucht und bewertet werden.

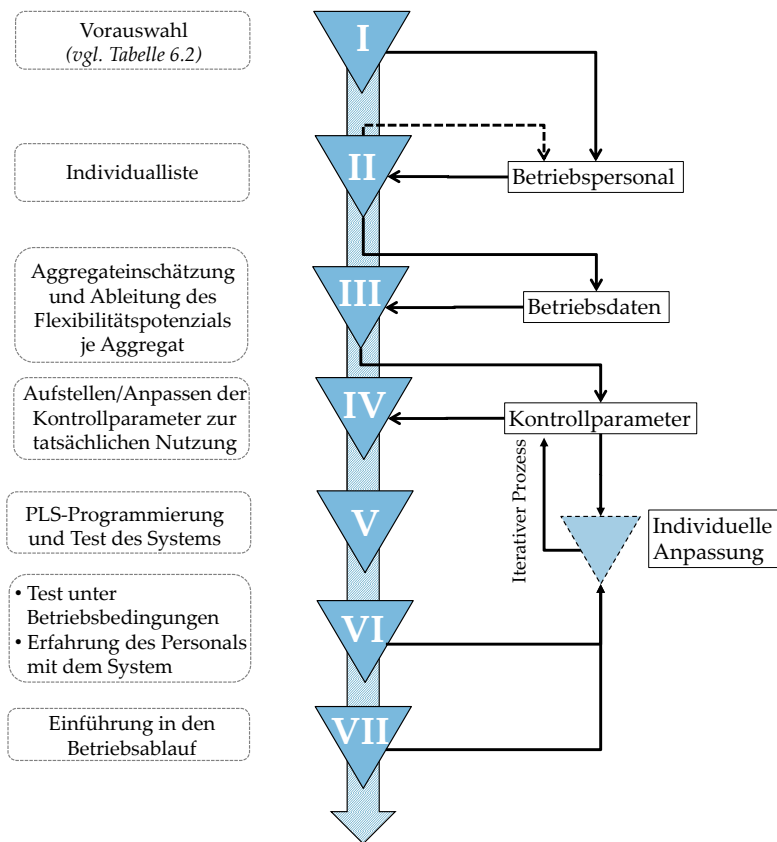


Abbildung 6.1: Erweitertes Ablaufschema von der Identifikation bis zur Einbindung von Aggregaten zur flexiblen Nutzung in den Betriebsaufbau der Kläranlage (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2017b)

6.2 Bewertung von Kläranlagenflexibilität im Energiesektor

Im Folgenden wird auf die einzelnen Nutzungsoptionen eingegangen, die sich unter den gewonnenen Erkenntnissen als vielversprechend erwiesen haben bzw. für Kläranlagen unter günstigen Bedingungen erschließbar sind. Ausschlaggebend für eine Entscheidung zur Nutzungsart der vorhandenen Flexibilität werden für Betreiber vorrangig wirtschaftliche Anreize und Erlöse im Verhältnis zu Aufwand und Risiko sein. Der Energiemarkt stellt ein sehr dynamisches Umfeld mit einem sehr volatilen Marktgefüge dar, daher wird in diesem Unterkapitel auf eine quantitative Aussage in Form einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu möglichen Erlöspotenzialen aufgrund der zeitlich eng begrenzten Aktualität verzichtet. Stattdessen werden qualitative Einschätzungen und Bewertungen zu möglichen Nutzungsoptionen getroffen, mit dem Fokus auf der technischen Realisierbarkeit und zukünftigen Chancen und Entwicklungen, auch wenn für diese heute noch keine Märkte oder Wirtschaftlichkeit gegeben sind. Grundlage dieser Einschätzungen sind die eigenen Untersuchungen als auch Erkenntnisse aus relevanter Literatur, die mit speziellem Fokus auf die Kläranlage bewertet wird (z.B. Schmitt et al. 2017b, DENA 2016b; vgl. Kapitel 2.1).

6.2.1 Marktdienlicher Einsatz

Der marktdienliche Einsatz von Flexibilität umfasst hauptsächlich die Kosten- und Erlösoptimierung im Rahmen des Energiehandels der Kläranlage.

Zur Teilnahme am **börslichen Handel** ist ein entsprechender Stromtarifvertrag notwendig, welcher einen (Teil-)Bezug des Energiebedarfs über die Strombörse zulässt. Grundlage dafür ist eine vorausplanende Strombeschaffung (Graeber 2014). Ein Vorteil aus dem Bezug über die Strombörse durch einen flexiblen Betrieb ergibt sich durch die Möglichkeit der Nutzung von Aggregaten, die prozesstechnisch unflexibel, zeitlich aber sehr variabel und planbar eingesetzt werden können. Daher bietet der Handel an der Strombörse eine sinnvolle Ergänzung zur Vermarktung auch für Aggregate, deren Prozess nicht unterbrochen werden kann oder nur schwer kurzfristig einsetzbar und damit ungeeignet für eine kurzfristige Flexibilitätsnachfrage (z.B. Regelleistung) ist. Hierzu gehören insbesondere die Schlammmentwässerungsaggregate und die MÜSE. Beispielsweise kann die Entwässerung über eine Zentrifuge langfristig gezielt in günstige Tarifzeiten eingeplant werden, während dies für die Belüftung nur bedingt sicher planbar ist. Die Planungshorizonte beim Terminhandel bieten große Freiräume und sind von wöchentlich bis jährlich wählbar. Bei höheren Unsicherheiten bzgl. der Verfügbarkeit sind ebenfalls kurzfristige Vermarktungen über den Spotthandel bis 12:00 Uhr am Vortag (Day-Ahead) und bis 15 Minuten vor Fälligkeit beim Intra-Day-

Handel möglich (vgl. Tabelle 2.1, Kapitel 2.1.2.1). Bereits heute können durch Flexibilität am Spotmarkt Gewinne erzielt werden, sofern kurzfristig auf Strompreisdifferenzen reagiert werden kann. Dadurch können Mehrerlöse im Gegensatz zu den üblichen Preisen, für die gleiche Strommenge ohne Direktvermarktung, erzielt werden. Unter Direktvermarktung wird der Verkauf von erzeugtem EE-Strom an Großabnehmer oder der Strombörse, anstatt an den regionalen Netzbetreiber, über ein optionales Marktprämienmodell verstanden. Das Marktprämienmodell umfasst zum Marktpreis eine Management- sowie die Marktprämie selbst (Graeber 2014). Für Biogasanlagen existiert bereits heute zusätzlich eine Flexibilitätsprämie (EEG 2017). Hier wird deutlich, sollte zukünftig der Preisanteil für die tatsächlich produzierte Strommenge weiter sinken, dass Gewinne überwiegend über Flexibilität erwirtschaftet werden könnten. Voraussetzung dazu ist ein Direktvermarkter, der zum einen kontinuierlich die Marktsituation verfolgt und zum anderen einen umfassenden Überblick über die Nutzungsmöglichkeiten der Flexibilität seiner Anlagen besitzt.¹⁸ Die Kläranlage kann hierbei unter Berücksichtigung von Wetterprognosen, Wärmebedarf und Speicherfüllständen (z.B. Klärgasspeicher, Schlammbehälter) gut planbar ihre Flexibilität einsetzen.

Beim **Spitzenlastmanagement** bieten sich Potenziale in der Glättung des Fremdbezugslastgangs der Kläranlage. Dabei darf der Strombezug aus dem Netz einen gewissen Grenzwert nicht überschreiten. Die wichtigsten Anforderungen sind dabei die Verfügbarkeit und eine schnelle Reaktionsfähigkeit (An-/Abfahrzeit). Ein Lastabwurf kann über eine Erweiterung des PLS eingebunden und automatisiert werden. Damit lassen sich Leistungsspitzen reduzieren oder vermindern und so der Leistungspreis dauerhaft reduzieren (Schmitt et al. 2017a). Der überwiegende Anteil der Aggregate eignet sich zum Spitzenlastmanagement, da ein solcher kurzfristiger Lastabwurf selten Abschalt Dauern von 15 Minuten überschreitet (vgl. Tabelle 6.1).

Die Untersuchungen bestätigen, dass die KWK-Anlagen eine zentrale Rolle in einer **vorausplanenden Strombeschaffung** einnehmen können. Durch einen marktorientierten Fahrplan können Mehrerlöse zu Zeiten hoher Börsenpreise generiert und ungünstige Einspeisungen verhindert werden (Stromkostenoptimierung). Somit besteht die Möglichkeit den produzierten Strom gewinnbringend zu vermarkten oder teure Tarifzeiten durch erhöhte Eigenproduktion zu umgehen.

Der **OTC-Handel** und die Bilanzkreisoptimierung, sofern nicht von einem entsprechenden Experten übernommen, sind aufgrund höherer Risiken, ihrer Komplexität und unverhältnismäßigem Mehraufwand nur bedingt für Kläranlagen attraktiv.

¹⁸ Weitere Hinweise zum Handel mit Strom aus EE sind u.a.in Graeber 2014 gegeben.

6.2.2 Netzdienlicher Einsatz

Zum netzdienlichen Einsatz existiert zurzeit kein aktiver Markt. Wie in Kapitel 2.1.2.3 bereits beschrieben befindet sich die netzdienliche Nutzung von innovativen Handlungsoptionen im Verteilnetz noch im Stand der Forschung (vgl. VDE 2014). Entsprechend liegen kaum bzw. keine umfassenden Untersuchungen und praktische Erfahrungen, insbesondere im Bereich der (Kläranlagen-)Flexibilität, vor. Im Rahmen des Projektes *arrivee* (Schmitt et al. 2017b; Kornrumpf und Zdrallek 2017) konnte erstmalig gezeigt werden, dass im betrachteten Verteilnetz und unter den erarbeiteten Prognoseszenarien durch die Kläranlage 87% des benötigten Flexibilitätsbedarfs im betrachteten Szenario für das lokale Verteilnetz abgedeckt werden können. Hierbei konnte der Anteil der abgeregelten Energie um 92% reduziert werden. Dabei wurden 62% durch die BHKW und 25% durch die Belüftungsaggregate bereitgestellt (vgl. Abbildung 6.2). Eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse ist nur bedingt möglich, da für unterschiedliche Netzstränge gänzlich andere Randbedingungen und damit ein unterschiedlicher Bedarf an Leistungshöhe und Abrufhäufigkeit der Flexibilität vorliegen kann. Nichtsdestotrotz ist auch eine partielle Erfüllung des Bedarfs durch die Kläranlage möglich und sinnvoll, da im Gegensatz zu einer Abregelung von z.B. Windkraftanlagen die Kläranlage mit ihrem Gasspeicher als Energiespeicher fungieren kann und diese Energie später wieder zur Verfügung steht (Schmitt et al. 2017b).

Während die Aggregate technisch in der Lage sind den Anforderungen, die das Verteilnetz stellt, zu genügen, können sich aus reinigungstechnischer Sicht je nach Ausgestaltung zukünftiger Verträge durchaus wesentliche Hindernisse ergeben. Diese resultieren überwiegend aus dem Konflikt mit der originären Aufgabe der Aggregate und strengen Verfügbarkeitsansprüchen, Dauer und Art der Eingriffe sowie Art der Ansteuerung (Schmitt et al. 2017b).

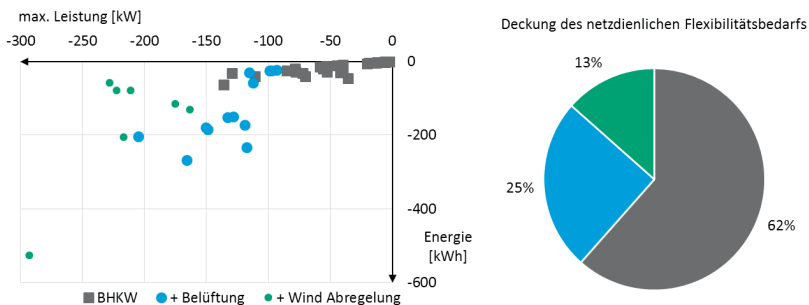


Abbildung 6.2: Leistungs-Energie-Diagramm des netzdienlichen Flexibilitätsbedarfs und Deckung durch Flexibilitätsoptionen im Verteilnetz der KA Radevormwald (Szenario: OG-2035; Schmitt et al. 2017b)

Des Weiteren ist für den Netzbetreiber immer die kostengünstigste Flexibilitätsoption entscheidend und eine Überprüfung aller Randbedingungen im Einzelfall durchzuführen. Hierbei könnten finanzielle Anreizsysteme zum Verzicht auf eine Abregelung den regionalen Flexibilitätsbedarf deutlich erhöhen. Letztendlich konnte gezeigt werden, dass die Nutzung der Kläranlagenflexibilität auf Verteilnetzebene möglich ist und eine sinnvolle Alternative zur Abregelung von EE-Anlagen darstellt (Schmitt et al. 2017b). Unter positiven individuellen Randbedingungen kann der netzdienliche Einsatz einen möglichen zukünftigen Markt darstellen Flexibilität anzubieten und die Kläranlage kann eine aktive Rolle in der lokalen Energieversorgung einnehmen.

6.2.3 Systemdienlicher Einsatz

Unter systemdienlichem Einsatz wird die Bereitstellung von Systemdienstleistungen zur Frequenzhaltung in Form von Regelleistung auf Übertragungsnetzebene verstanden.

Die auf Kläranlagen vorhandenen Stromerzeugungsanlagen (KWK, NEA) stellen gute Ergänzungen des Anlagenpools für Betreiber von VK dar, da diese im Gegensatz zu anderen EE gut steuerbar und planbar sind. Regelleistung kann darüber hinaus auch durch regelbare Lasten erbracht werden. Die hierzu untersuchten Reinigungsaggregate stellen allerdings höhere Anforderungen an eine Nutzung als die üblichen angebotenen Einheiten und bergen damit ein höheres Ausfallrisiko bei der Flexibilitätsbereitstellung für den Poolbetreiber. Je nach Vertragsgestaltung können Abrufsignale sanktionslos ignoriert bzw. abgelehnt werden oder führen im negativsten Fall zu Pönalen oder zum Ausschluss aus dem Pool des VK-Betreibers. Nach Stadler (2006) könnte der komplette Bedarf an Primär- und Sekundärregelleistung über verbrauchersseitige Speicherkapazitäten, wozu auch die Flexibilität von Kläranlagen zählt, gedeckt werden. Durch Beteiligung am Minutenreservemarkt könnten Kläranlagen somit dafür sorgen, dass Kraftwerke effizienter betrieben und Kraftwerksreserven abgebaut werden können.

Die technische Realisierbarkeit und Einbindung in den praktischen Betrieb unter Berücksichtigung der Belange der Kläranlage konnte durch die aufgestellten Restriktionen und Kontrollparameter in Kapitel 5 aufgezeigt werden. Allerdings ist nicht jedes Aggregat für die Erbringung von Regelleistung geeignet. Einige Aggregate können häufige, kurze Abrufe besser bedienen als wenige, lange Abrufe und umgekehrt (vgl. Tabelle 6.3). Des Weiteren können sich, je nach Art des Abrufs, unterschiedliche Auswirkungen auf die Prozesse einstellen, die individuell zu untersuchen sind. Für Pumpen und Gebläse sind die Anforderungen der SRL und MRL prinzipiell gut vereinbar, während z.B. für die MÜSE und die Kammerfilterpresse aufgrund des unflexiblen Prozesses und des während des Pressvorgangs möglichen schwankenden Strombezugs die Eignung zur Bereitstellung von Regelleistung unter den derzeitigen Bedingungen nicht gegeben ist. Bei den Regelleistungsprodukten SRL/MRL ist die Abrufhäufigkeit

über den Arbeitspreis bestimmt und in gewissem Maß steuerbar. Ein niedriger Arbeitspreis bedeutet höhere Abrufquoten, während für (gewünscht) niedrigere Abrufzahlen höhere Preise angesetzt werden können. Generell sind die Abrufe bei der SRL häufiger und kürzer als bei der MRL. Mit einer solchen auf die Aggregate angepassten Vermarktungsstrategie ist es möglich auf die unterschiedlichen Anforderungen zu reagieren. Allerdings muss diese Strategie sich dynamisch an die sich ständig verändernden Marktbedingungen und –preise anpassen.

Aufgrund der hohen Anforderungen (< 15 Sek. für 50% und < 30 Sek. für 100% der Leistung über 15 Minuten) und der nicht abruf-, sondern automatischen netzfrequenzabhängigen Bereitstellung in beide Flexibilitätsrichtungen eignen sich der überwiegende Anteil gängiger Aggregate auf der Kläranlage nicht zur Bereitstellung von PRL. Denkbar wäre für Belüftungsaggregate¹⁹ und die BHKW diese im Teillastbetrieb zu betreiben und fortlaufend durch geringfügige positive und negative Leistungsänderungen automatisch auf Frequenzabweichungen zu reagieren. Für solch schnelle Laständerungen sind thermische Kraftwerke, Batteriespeicher oder Elektrolyseure (vgl. Kapitel 6.4) bei geringerem Risiko für die Prozesse und den Poolbetreiber allerdings deutlich besser geeignet.

Eine Übersicht zur Einschätzung der unterschiedlichen Vermarktungsoptionen der untersuchten Aggregate zur Regelleistung ist in Tabelle 6.3 dargestellt.

Tabelle 6.3: Einschätzung der untersuchten Aggregate/-gruppen nach Regelleistungsarten (Stand: 2017)

Aggregat(-gruppe)	PRL	SRL	MRL	Bemerkung zur Vermarktung
Sandfang (<i>Gebläse</i>)	○	●	●	Stark abhängig von der Zulaufwassermenge
Belebungsbecken (<i>Gebläse</i>)	●	●●●	●●●	Häufige, kurze Abrufe bevorzugt
Rücklaufschlammförderung	○	●●●	●●	Häufige kurze Abrufe bevorzugt
Rezirkulationspumpen	○	●	●●	Stark abhängig vom NO ₃ -Kontrollwert
Rohschlammumpen	○	●●	●●	Kurze und lange Abrufe möglich
Rührwerke	○	●	●	Wenige Abrufe bevorzugt
MÜSE	○	○	○	Prozesstechnisch unflexibel
Kammerfilterpresse	○	○	○	Prozesstechnisch unflexibel
Zentrifuge	○	○	●	Wenige, lange Abrufe bevorzugt
BHKW	●●	●●	●●●	Wenige, lange Abrufe bevorzugt
NEA	○	●	●●●	Wenige, lange Abrufe bevorzugt

○ nicht geeignet ● mäßig ●● hoch ●●● sehr hoch ●●● vorgeschlagener Einsatz

¹⁹ Simulationstechnische Untersuchungen zur Bereitstellung von PRL durch Belüftungsaggregate und deren Auswirkungen auf den Reinigungsprozess werden im Forschungsprojekt „KlärLam“ untersucht (Kielmeier und Wagner 2017).

6.2.4 Zwischenfazit – Einsatzmöglichkeiten der Kläranlagenflexibilität

Mit den dargestellten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass die lastvariable Kläranlage ein nicht unerhebliches Potenzial besitzt und technisch in der Lage ist, Schwankungen im Energienetz auszugleichen und an der Energiewende zu partizipieren. Es konnte eine Reihe von Einsatzmöglichkeiten identifiziert und deren erfolgreiche Umsetzung aufgezeigt werden. Die jeweiligen Anforderungen der Einsatzart müssen jedoch zu den entsprechenden Eigenschaften der Aggregate passen, um eine erfolgreiche Einbindung zu gewährleisten. Die Marktzugangsbedingungen sind teilweise sehr hoch und nicht auf (kleine) flexible Verbraucher ausgelegt, die darüber hinaus individuelle Restriktionen aufweisen, die es zusätzlich zu beachten gilt. Besonders deutlich wird dies bei der Teilnahme am Regelleistungsmarkt (vgl. Tabelle 2.2), welche meist nur über den Zusammenschluss in einem VK möglich ist und die Bereitstellung der Flexibilität über Zeitscheiben von mehreren Stunden voraussetzt. Kläranlagenbetreiber werden sich allerdings nur auf eine Flexibilitätsbereitstellung einlassen, wenn sie betriebswirtschaftlich sinnvoll sind und die Erlöse die Opportunitätskosten sowie die Komforteinbußen übersteigen. Bisher vorhandene Anreize beschränken sich weitgehend auf kurzfristige ökonomische Vorteile. Diese o.g. Einschätzungen bestätigen und bekräftigen ebenfalls die Untersuchungen in DENA (2016b). Der dort beschriebene Forschungsbedarf, Hemmnisse sowie Handlungsempfehlungen zum industriellen DSM decken sich teilweise mit den Problemfeldern bei der Nutzung der Kläranlagenflexibilität.

Für die Betreiber von Kläranlagen spielt die Optimierung der Netzentgelte über ein Spitzenlastmanagement zur Minimierung von Leistungsspitzen eine wichtige Rolle und bietet über die Reduzierung der Stromkosten (aktuell) den wohl größten Anreiz zur Flexibilitätsnutzung. Mit einem solchen internen Lastmanagement als ersten Schritt können Flexibilitäten eingesetzt werden, um praktische Erfahrungen zu sammeln und die Anlage mit den erforderlichen Restriktionen sicher auszustatten, ohne zusätzliche Verpflichtungen einzugehen. Es hat sich gezeigt, erst wenn die Flexibilitätsnutzung beherrscht wird und die entsprechenden Kontrollparameter erfolgreich etabliert sind, sollte in einem zweiten Schritt die Interaktion nach außen erfolgen. Wie in der praktischen Erprobung auf der KA Radevormwald aufgetreten, sollte ein systemdienlicher Eingriff in Form von Regelleistung nicht zu einer Erhöhung der für die Ermittlung der zu zahlenden Netzentgelte maßgeblichen Leistungsspitze führen. Hieraus resultiert ein Konflikt, den es zu beheben gilt. Systemdienlich bedingte Leistungsspitzen sollten von der Berechnung der Netzentgelte ausgenommen werden (siehe hierzu auch: Schmitt et al. 2017b; DENA 2016b).

Darüber hinaus ist eine Kombination der Einsatzmöglichkeiten möglich und sinnvoll. So könnte eine Vermarktung über die erlösstärksten Märkte erfolgen sowie ein Teil der Flexibilität zur Regelleistungsbereitstellung genutzt und parallel dazu die benötigte Fremdbezugsstrommenge durch preiselastische Angebote an der Strombörse be-

zogen werden. Unabhängig davon kann ein Spitzenlastmanagement erfolgen. Die gesamte Optimierungsstrategie zur Stromnutzung wird sich an den möglichen Gewinnen bei der Vermarktung orientieren. Es ist unklar, wie sich die Geschäftsmodelle entwickeln und wie zukünftig eine Flexibilitätsbereitstellung für Kläranlagen attraktiver gestaltet werden kann. Anreize könnten dynamische Stromtarife liefern (vgl. u.a. Meese et al. 2015a), um Kläranlagenbetreiber über reduzierte Strompreise zu veranlassen ihre planbaren Prozesse in vorab definierte Zeitfenster zu verschieben. Aufgrund des Forschungscharakters solcher Tarife und der unklaren zukünftigen Ausgestaltung sind die Einschränkungen und die Risiken für die Kläranlage schwer zu bewerten. Bei vielen notwendigen Anpassungen sowohl im Abwasser als auch im Energiesektor wird Neuland betreten, weshalb diese noch unausgereift sind. Hier müssen sinnvolle Geschäftsmodelle geschaffen und die vorhandenen Strukturen angepasst werden.

Letztendlich ist festzuhalten, dass je länger die mögliche Abschalt- bzw. Zuschaltdauer und je höher die Leistung sowie die Leistungsänderungsgeschwindigkeit bzw. An- /Abfahrzeit ist, desto flexibler und damit attraktiver ist das jeweilige Aggregat für den Markt.

Eine zusammenfassende Bewertung der Anforderungen der Einsatzmöglichkeiten an die Kläranlagenflexibilität ist in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Einschätzung der Anforderungen der Einsatzmöglichkeiten für die Kläranlagenflexibilität (im Trockenwetterfall; Stand: 2017)

Einsatz	Anfahrzeit [min]	Abrufdauer [min]	Abrufhäufigkeit	Verlässlichkeitsanspruch	Eignung KA-Flexibilität
PRL ¹	< 0,5	0,5 - 15	●●●	●●●	●
SRL ^{1,2}	< 5	5 - 240	●●	●●	●●
MRL ^{1,2}	< 15	15 - 240	●	●●	●●●
Strombörse/ Stromkostenoptimierung	beliebig	planbar	planbar	●	●●●
(Spitzen-) Lastmanagement	beliebig	~ 15	planbar	●	●●●
Verteilnetz ³	-	-	-	●●●	●
	● mäßig	●● hoch		●●● sehr hoch	

¹ Marktbedingungen zum Jahr 2017.

² Abrufhäufigkeit ist abhängig vom angesetzten Arbeitspreis.

³ Stark abhängig von lokalen Randbedingungen.

6.3 Virtuelle Kraftwerke, IT-Sicherheit und Kritische Infrastrukturen

6.3.1 Anbindung an Virtuelle Kraftwerke

Bei der Einbindung in ein VK kann sich die zentrale Steuerung über einen Poolbetreiber für wasserwirtschaftliche Anlagen als zusätzlicher Vorteil erweisen, da die Vermarktung und Koordination über diesen erfolgt und nicht selbst organisiert werden muss. Hier sind die Grenzen der Ausgestaltung relativ offen. Der Anschluss in ein VK kann zum einen über einen Dienstleister stattfinden, der weitestgehend alle Aufgaben übernimmt, zum anderen ist der Aufbau und Betrieb eines eigenen Kläranlagen-Pools möglich. Eigene VK, bestehend aus Kläranlagen, werden z.B. von der WVE GmbH (Preiß 2015), dem EVS (EVS 2017) oder der Gelsenwasser AG betrieben (Janda 2016). Die unterschiedlichen nutzbaren Aggregate können dabei auf der Kläranlage im internen PLS vorgesteuert, in Aggregatgruppen zusammengefasst und als eine oder mehrere Einheiten dem Poolbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Hier liegt ein großer Vorteil bei den Kläranlagen, da eine leistungsfähige Prozessleittechnik Voraussetzung für die meisten Vermarktungsmöglichkeiten und diese auf Kläranlagen typischerweise vorhanden ist. Damit entfällt eine relativ kostspielige Anschaffung und Implementierung eines solchen Systems.

Eine schematische Darstellung eines solchen „Pre-Poolings“ ist in Abbildung 6.3 dargestellt.

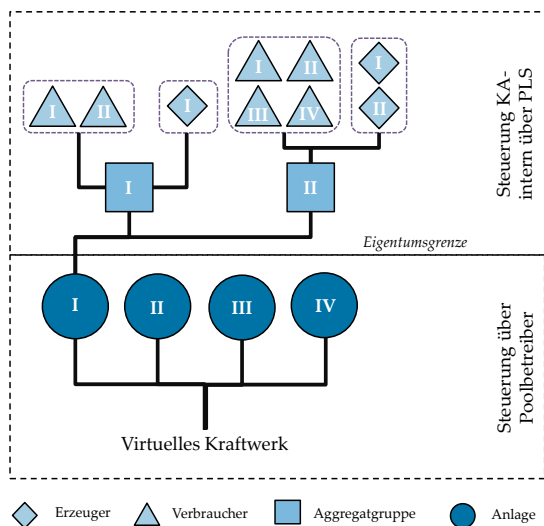


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung eines „Pre-Poolings“ von Kläranlagenaggregaten zur Integration in ein Virtuelles Kraftwerk

Die Kommunikation zwischen Kläranlage, Kraftwerksbetreiber und Netzbetreiber erfolgt über eine Steuerungssoftware. Hierzu werden die relevanten Prozess- und Belastungsdaten sowie die energetischen Verbrauchsdaten aus dem PLS der Kläranlage mit dem Kraftwerkspark des Poolbetreibers gekoppelt. Die Steuerungssoftware stellt darüber hinaus die Kommunikationsschnittstelle zum Empfang der Abrufsignale mit dem Netzbetreiber dar. Die Übertragung kann über mobile Netze oder dezidierte Internetanschlüsse (z.B. ADSL, Standleitung) erfolgen (Schmitt et al. 2017b). Eine mögliche kommunikationstechnische Anbindung verschiedener Aggregatgruppen ist bspw. in Schmitt et al. (2017b) oder Müller et al. (2017) beschrieben.²⁰

Die anfallenden Kosten einer Flexibilitätsbereitstellung beschränken sich hauptsächlich auf einmalige Kosten für Machbarkeitsstudien, Kosten der Umsetzung (Anpassung der Steuerungssysteme, MSR-Technik, Anbindung an das VK etc.) und Opportunitätskosten (z.B. Wirkungsgradeinbußen, geringerer Faulgasanfall). Weitere laufende Kosten sind im Regelfall nicht zu erwarten. Ist die Integration in einem Managementsystem und der täglichen Routine einmal abgeschlossen, ergeben sich kaum (finanzielle) Mehraufwendungen im regulären Betrieb (Müller et al. 2017).

Oftmals ist für die Betreiber der Kläranlagen der Erhalt der Selbstbestimmung, einen Leistungsabruf durch einen externen Eingriff ablehnen zu können, eine wichtige Prämisse. Mit Hilfe einer Vorsteuerung kann die Kontrolle und Entscheidung einer Flexibilitätsbereitstellung weitestgehend auf der jeweiligen Kläranlage verbleiben. Je nach vertraglicher Ausgestaltung kann eine Ablehnung des Abrufes sanktionsfrei bleiben – im schlimmsten Falle führen wiederholte Ablehnungen zu Mindereinnahmen oder zum Ausschluss aus dem jeweiligen Pool. Allerdings sollten bei zu häufigen Verletzungen der Restriktionen die festgelegten Kontrollparameter und/oder die gewählte Vermarktung kritisch hinterfragt werden.

6.3.2 IT-Sicherheit und Kritische Infrastrukturen

In §3 der Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-KritisV 2017) sind neben der Trinkwasserversorgung auch die Abwasserbeseitigung aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für die Allgemeinheit als kritische Dienstleistungen anzusehen. Somit gelten nach Anhang 2 zu Kritischen Infrastrukturen die folgenden Anlagen der Abwasserbeseitigung:

- Siedlungsentwässerung – Kanalisation: $\geq 500.000 \text{ EW}_{\text{Anschluss}}$
- Abwasserbehandlung – Kläranlage: $\geq 500.000 \text{ EW}_{\text{Ausbau}}$
- Steuerung und Überwachung – Leitzentrale: $\geq 500.000 \text{ EW}_{\text{Ausbau}}$

²⁰ Weitere Hinweise zu benötigten Ansteuerungs- und Messkonzepten sind z.B. in Pinnekamp et al. (2018) gegeben sowie die Bereitstellung von Regelleistung durch BHKW in Müller et al. (2017).

In Deutschland weisen 35 Kläranlagen eine Anschlussgröße von mehr als 500.000 E-W_{Anschluss} auf. Die Verordnung greift somit direkt nur für rund 0,4 % der kommunalen Kläranlagen.²¹ Allerdings sind die Vorgaben des BSI ebenfalls zu erfüllen, sollte die Ausbaugröße der gesteuerten und überwachten Anlagen, z.B. durch eine Leitzentrale, in Summe die Grenze von 500.000 EW_{Ausbau} überschreiten. Damit greift das BSIG (2017) auch für kleinere Anlagen, die z.B. zentral überwacht werden oder an einem Virtuellen Kraftwerk partizipieren. Diese müssen dann den schärferen Anforderungen in Sachen IT-Sicherheit genügen. Aufgrund fortschreitender Automatisierung, Erhebung, Verarbeitung/Speicherung von Daten (z.B. durch Cloud-Lösungen²²) und Vernetzung von Prozessen ist eine angemessene Absicherung der IT auf Kläranlagen ohnehin anzuraten, um den ordnungsgemäßen Reinigungsbetrieb sicherzustellen. Dies wird mit fortschreitender Digitalisierung und Vernetzung der eingesetzten Aggregate und verwendeten Informationstechnik von immer größerer Bedeutung sein. Ein Mindestniveau an IT-Sicherheit kann z.B. durch die Umsetzung der A-Maßnahmen des Maßnahmenkatalogs des IT-Sicherheitsleitfadens abgedeckt werden (vgl. DWA 2017a).

Betreiber Kritischer Infrastrukturen sind verpflichtet die für die Erbringung ihrer Dienste benötigte Informationstechnik nach dem Stand der Technik angemessen abzusichern und dies alle zwei Jahre nachzuweisen. Des Weiteren sind erhebliche Störungen und deren Auswirkungen bei den Aufsichtsbehörden zu melden. Ferner kann die Beseitigung aufgedeckter Sicherheitsmängel durch diese angeordnet werden (BSI 2017). Sofern nicht anders geregelt, können Betreiber Kritischer Infrastrukturen die Absicherung ihrer Systeme selbst ausgestalten oder branchenspezifische Sicherheitsstandards nach dem spezifischen Stand der Technik erarbeiten. Der Branchenstandard Wasser/Abwasser wurde u.a. in Zusammenarbeit von DWA und DVGW erarbeitet und besteht aus dem Merkblatt DWA-M 1060 (DWA 2017a), dem IT-Sicherheitsleitfaden (BSI 2012) und den Regularien zur Nachweisführung gemäß §8a (3) BSIG (2017).

Betreiber Kritischer Infrastrukturen müssen folgende Schutzziele erfüllen (DWA 2017a):

- Schutz vor Ausfall der IT-Systeme und Gewährleistung von permanentem Zugriff auf relevante Daten
- Schutz der IT-Systeme, Komponenten und Prozesse vor unbefugtem Zugriff, Preisgabe und Modifikation
- Gewährleistung der Echtheit, Überprüfbarkeit und Vertrauenswürdigkeit der Daten und ihrer Herkunft

²¹ Eigene Auswertung (Datengrundlage siehe: Kapitel 7.2).

²² Unter Cloud-Computing wird die Bereitstellung von IT-Infrastruktur (Speicherplatz, Rechenleistung oder Software für Anwender) als Dienstleistung über das Internet verstanden.

Für die Wasserwirtschaft ist dies überwiegend in DWA (2017a) geregelt, für weitergehende Informationen wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen (u.a. DWA 2017a; BSI 2012, 2017; BSIG 2017; BSI-KritisV 2017).

6.4 Kläranlagen in der Rolle als (Langzeit-)Energiespeicher

Eingrenzung: Die Ausführungen im folgenden Kapitel sind aufgrund ihrer Komplexität nicht vollumfänglich, sondern fokussiert auf die wesentlichen Schnittstellen in Bezug auf diese Arbeit dargestellt. Übergeordnet wird auf das Standardwerk „Energiespeicher“ (Sterner und Stadler 2016) verwiesen. Des Weiteren ist in Anhang A 9 eine Zusammenstellung ausgewählter Grundlagenliteratur zu den tangierten Themen hinterlegt.

Ein Energiespeicher definiert sich über die Entkopplung von Energieerzeugung und Energiebedarf, welcher bei der Elektrizitätsversorgung nicht nur durch eine Speicherung von Strom erreicht werden kann. Die Verschiebung des Strombezugs in Phasen mit hohem Anteil an Stromerzeugung aus Wind- und Solarkraftwerken erfüllt exakt die gleiche Funktion wie ein Energiespeicher (Sterner und Stadler 2016). Im Rahmen der Energiewende können Kläranlagen bereits im Bestand durch die Reinigungsaggregate sowie der KWK-Anlagen mit ihren Gasspeichern eine Speicherung überwiegend in Form von Kurzzeitspeicher durch ihre vorhandene Flexibilität von einigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden bereitstellen (siehe Kapitel 7.5). Darüber hinaus werden für die Energiewende sogenannte Langzeitspeichertechnologien benötigt, um saisonale Unterschiede im Energiebedarf auszugleichen und Stromüberschüsse langfristig verfügbar zu machen (Sterner et al. 2010; Sterners et al. 2011). Nach VDE (2012) dienen Kurz- und Langzeitspeicher bis zu einem Anteil von 40% EE an der Energieversorgung überwiegend der Einsatzoptimierung von Kraftwerken, werden allerdings bei Anteilen über 40% verstärkt zur Speicherung von EE-Strom notwendig. Kläranlagen, ausgestattet mit entsprechenden innovativen Technologien, sind ebenfalls in der Lage einen Beitrag als Langzeitspeicher zu liefern (Schäfer et al. 2016b; Schmitt et al. 2017b; Schäfer et al. 2018a).

Langzeitspeichertechnologien unterscheiden sich von den Kurzzeitspeichern insofern, dass sie ausreichend große Kapazitäten an Speichervolumen aufweisen können, um Energie langfristig verfügbar zu machen. Dafür weisen sie relativ geringe Wirkungsgrade bei der Umwandlung auf. Als vielversprechendste Option bietet sich die Überführung überschüssigen EE Stroms mithilfe der Wasserelektrolyse in Form einer stofflichen Speicherung an, da eine direkte Speicherung, aus heutiger Sicht, nicht möglich ist. Dies wird auch als Power-to-X (PtX) bezeichnet.

Darunter sind alle jene Verfahren zu verstehen, die Stromüberschüsse aus EE in Wärme, chemische Energieträger, strombasierte Kraftstoffe für die Mobilität oder Rohstoffe für die chemische Industrie umwandeln und damit den Stromsektor mit anderen Sektoren koppeln können. Dies wird entsprechend als Power-to-Heat, Power-to-Gas, Power-to-Liquid etc. bezeichnet (Sternier und Stadler 2016).

Eine vereinfachte Darstellung des PtX-Konzeptes ist in Abbildung 6.4 dargestellt.

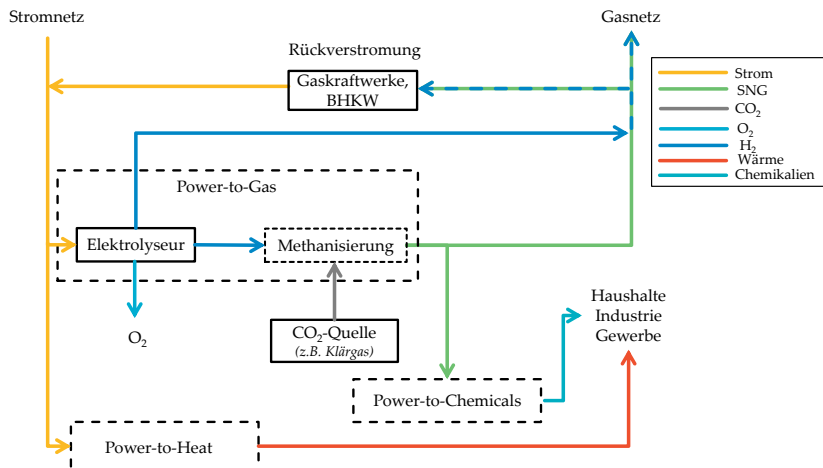


Abbildung 6.4: Vereinfachte Darstellung Power-to-X (nach Sternier 2009; Sternier und Stadler 2016)

Ausreichende Speicherkapazitäten bietet vor allem der Gassektor mit seiner flächen-deckenden Gasnetzinfrastruktur. An Standorten mit gasförmigen Energieträgern bietet sich das Power-to-Gas-Konzept (PtG) an, da dieses aufgrund von vorhandener und nutzbarer Infrastruktur viele Synergieeffekte schaffen und nutzen kann. Unter dem Prinzip PtG wird die Idee verstanden Strom aus EE in Wasserstoff (H₂) bzw. Methan (CH₄) umzuwandeln, das in der Gasinfrastruktur gespeichert und transportiert sowie bei Bedarf wieder verstromt wird. Ebenso ist die direkte Nutzung der beiden Energieträger in unterschiedlichen Sektoren möglich (Mobilität, Gewerbe und Industrie, Wärmeversorgung etc.) und trägt zur Dekarbonisierung bei, indem fossile Energieträger substituiert werden. PtG ist eine vielbeachtete und diskutierte systemübergreifende Technologie zur Integration von EE in das Energiesystem (VDE 2012; DENA 2016a; FfE 2017). Allerdings existiert noch eine Reihe von praktischen und regulatorischen Hemmnissen bei der Umsetzung. Beispielsweise unterscheiden sich die Vorgaben je nach Verwendung und Art der anfallenden Energieträger.

Daneben sollen unter der originären Idee von PtG nur Überschüsse aus EE genutzt werden und nicht aus wirtschaftlichem Druck die Anlage durch die Nutzung von Kohle- und Atomstrom ausgelastet werden. Für den Betrieb einer Elektrolyseanlage existiert derzeit noch kein eigener (energie-)rechtlicher Rahmen, wodurch die Nachweisführung des Einsatzes von „grünem Strom“ erschwert wird (siehe dazu: DVGW 2014; Schmitt et al. 2017b).

Grundsätzlich lassen sich PtG-Konzepte in zwei Kategorien, bezogen auf den verwendeten Energieträger H_2 oder CH_4 , einordnen (PtG- H_2 , PtG- CH_4). Der Kernprozess ist dabei die Wasserelektrolyse, bei der H_2O zu H_2 und O_2 aufgespalten wird. Hierzu stehen drei relevante Verfahren zur Verfügung: die alkalische Wasserelektrolyse, die Polymer-Elektrolyt-Membran-Elektrolyse (PEM) und die Hochtemperatur-Wasserdampfelektrolyse. Dabei erweist sich die PEM-Elektrolyse aufgrund technischer Vorteile hinsichtlich schneller Lastwechsel, guter Teillastfähigkeit und einer guten Skalierbarkeit auch im unteren Leistungsbereich als derzeit favorisierte Lösung für flexible Anlagenkonzepte (DENA 2013; Schmitt et al. 2017b). Bei einer energiewendeadienlichen Fahrweise des Elektrolyseurs kann dieser, neben der Funktion zur Langzeitspeicherung, zur Frequenzhaltung alle drei Formen der Regelleistung (PRL, SRL, MRL; vgl. Kapitel 2.1.2.2) bereitstellen und die Energienetze durch Kurzzeitflexibilität zusätzlich entlasten (Sterner und Stadler 2016).

Der erzeugte H_2 kann mit Hilfe einer CO_2 -Quelle in einer nachgeschalteten Methanisierung zu einem SNG aufbereitet werden. Dieses SNG weist nahezu die identischen CH_4 -Gehalte ($> 96\%$) und damit brenntechnischen Eigenschaften wie Erdgas auf. Damit steht es allen Anwendungen von konventionellem Erdgas zur Verfügung und kann nahezu unbegrenzt in das Erdgasnetz eingespeist oder in Trailer abgefüllt werden. Bei der Methanisierung wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Zum einen die chemische Methanisierung (thermochemische, katalytisch bzw. kalalytische Hydrierung von CO/CO_2) und zum anderen die biologische Methanisierung (in-situ bzw. ex-situ mit Reinkulturen). Der externe Methanisierungsreaktor ist in der Lage schnelle Lastwechsel durchzuführen und längere Stillstandszeiten, ohne negative Auswirkungen auf die Produktivität, zu tolerieren (Sterner und Stadler 2016; Dröge und Pacan 2017). Er ist damit in einen flexiblen Anlagenbetrieb gut integrierbar bzw. als zusätzliche Flexibilitätsoption zu prüfen. Eine Gegenüberstellung der beiden Verfahren ist in Tabelle 6.5 dargestellt.

Die Wirtschaftlichkeit ist für PtG-Anlagen derzeit (Stand 2018) ohne Förderung oder sehr gute Rahmenbedingungen nur schwer darstellbar. Die Standortwahl ist daher eine der maßgebenden Faktoren, da durch die Kopplung möglichst vieler Sektoren das erforderliche wirtschaftliche und ökologische Synergiepotenzial gehoben werden kann. Unter diesen Randbedingungen ist die Kläranlage ein prädestinierter Standort einer solchen PtG-Anlage. Ferner sind Power-to-Heat (z.B. Erwärmung Faulturm, Heizkessel/-stab) und Power-to-Liquid (PtL; z.B. Methanolherstellung, vgl. Bolle et al. 2012b) ebenfalls Technologien die auf Kläranlagen genutzt werden können.

Der große Vorteil den Kläranlagen im Vergleich zu anderen Standorten bieten, liegt in der effizienteren Ressourcen- und Energienutzung. Eine kompatible Infrastruktur sowie Fachpersonal ist vor Ort vorhanden und kann entsprechend eingesetzt werden.

Tabelle 6.5: Gegenüberstellung PtG-H₂ und PtG-CH₄ (nach DVGW 2014; Sterner und Stadler 2016; FfE 2017)

	Power-to-Gas(-H₂)	Power-to-Gas(-CH₄)
Reaktionsgleichung (vereinfacht)	$2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{Elektrolyse}} 2\text{H}_2 + \text{O}_2$	$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \xrightarrow{\text{Methanisierung (CO}_2\text{)}} \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$
Wirkungsgrade*	54 - 84%	49 - 79%
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Direkte Nutzung im Mobilitäts- und Industriesektor möglich • Keine CO₂-Quelle notwendig (damit unabhängiger in der Standortwahl) • Höherer Wirkungsgrad als PtG-CH₄ • Beitrag zur Dekarbonisierung im Verkehrs- und Industriesektor 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastruktur vorhanden in allen Sektoren, die konventionelles Erdgas verwenden • Durch dreifach höhere Energiedichte einfacher zu verdichten, zu lagern und zu transportieren als H₂ • Nahezu unbegrenzte Speichermöglichkeit durch das Gasnetz • Keine Gasaufbereitung notwendig bei biol. Methanisierung (geringerer Energiebedarf)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Einspeisevermögen im Gasnetz begrenzt (1-2 Vol.-%) • H₂-Infrastruktur nur begrenzt vorhanden 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Wirkungsgrad durch weiteren Wandlungsschritt • Geringere Vorerfahrung als mit PtG-H₂ • Einschränkungen, z.B. in der Standortwahl, durch benötigte CO₂-Quelle

* Die Wirkungsgrade differieren je nach Speicherart, Druck und verwendeten Ausspeichertechnologien (vgl. Sterner und Stadler 2016).

Damit ergeben sich eine Reihe von Synergieeffekten und Nutzungsoptionen der anfallenden Stoff- und Energieströme:

- Die Abwärme der Elektrolyse und der Methanisierung kann im Faulturm, zur Beheizung der Betriebsgebäude oder im Rahmen einer lokalen Wärmeversorgung verwendet werden.
- Der produzierte H_2 kann zu gewissen Anteilen in den KWK-Anlagen mitverstromt werden oder ins Gasnetz eingespeist werden. Denkbar wäre ebenfalls eine Nutzung in der H_2 -Mobilität (eigener Fuhrpark des Betreibers, ÖPNV, H_2 -Tankstelle etc.). Ferner ist eine temporäre Zudosierung von H_2 in den Faulturm zur Verbesserung des Gasertrags und Steigerung des Methangehaltes in Form einer in-situ Methanisierung denkbar (Reuter 2013; Graf et al. 2014).
- Der anfallende O_2 aus der Elektrolyse wird üblicherweise auf PtG-Anlagen atmosphärisch abgelassen, da üblicherweise kein Verwertungspfad gegeben ist. Auf der Kläranlage kann O_2 zur Unterstützung der biologischen Prozesse in der biologischen Stufe genutzt und Belüftungsenergie eingespart werden (Bosch 2016; Schmitt et al. 2017b). Des Weiteren ist eine Verwendung im Rahmen einer Spurenstoffelimination möglich, indem O_2 zu O_3 aufbereitet und in einer Ozonungsanlage genutzt wird (Schäfer et al. 2018b). Dies ermöglicht die Substitution eines Fremdbezugs von O_2 . Damit lässt sich der Gesamtwirkungsgrad der PtG-Anlage erhöhen, die biologischen Prozesse im Reinigungsprozess unterstützen sowie die Kosten der Spurenstoffelimination ggf. reduzieren.
- Bei einer weitergehenden Methanisierung kann das erzeugte CH_4 vor Ort direkt verstromt oder ins Erdgasnetz eingespeist werden. Eine Nutzung im Mobilitätssektor ist analog zur H_2 -Nutzung über Erdgasfahrzeuge möglich. Ein erheblicher Vorteil des Standortes Kläranlage ergibt sich aus der einfachen Verfügbarkeit einer biogenen CO_2 -Quelle, die oftmals ein kritischer Faktor darstellt. Das im Klärgas enthaltene CO_2 kann die Methanproduktion um rund ein Drittel erhöhen ohne vorab und vor der Einspeisung aufbereitet werden zu müssen (Dröge und Pacan 2017). Alternativ wäre, nach einer Aufbereitung, eine Nutzung des CO_2 aus dem Rauchgas der KWK-Anlagen prinzipiell ebenfalls denkbar.

Vorschläge und Ansätze zur Umsetzung und Planung einer PtG-Anlage auf dem Standort Kläranlage und deren Integration in die umliegende Gasinfrastruktur wurden u.a. in Schäfer et al. (2016a) erarbeitet. Deutlich wird, dass durch positive lokale Rahmenbedingungen, wie z.B. zusätzliche industrielle Abnehmer von H_2 , Integration von H_2 -Mobilität und hohe Einspeisekapazitäten des lokalen Gasnetzes, sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Kopplung der Sektoren erheblich verbessert werden kann.

Die vielseitige Einbindung der Kläranlage in ein PtG-Konzept zeigt schematisch Abbildung 6.5.

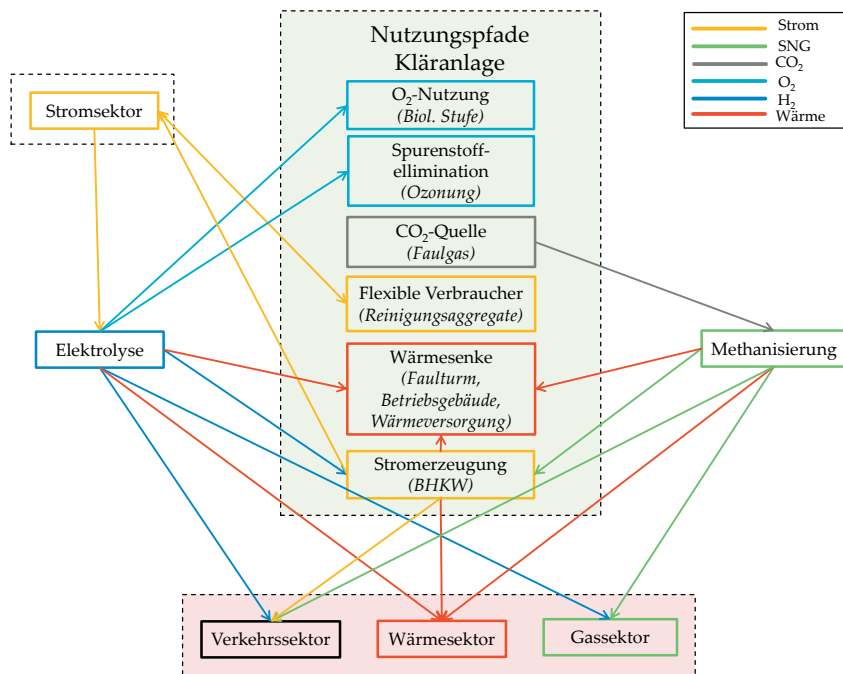


Abbildung 6.5: Schematische Einbindung der Kläranlage in ein PtG-Konzept zur Sektorenkopplung

Zukünftig ist aus volkswirtschaftlicher Sicht kritisch zu prüfen inwieweit ein, im Vergleich zu Großkraftwerken leistungsschwaches, dezentrales KWK-Aggregat auf der Kläranlage (mit PtG) notwendig und sinnvoll ist. Während im oberen Einsatzbereich auf Kläranlagen elektrische Wirkungsgrade von rund 43 % erreicht werden können (vgl. ASUE 2014), sind in modernen Gas- und Dampfturbinen-Kraftwerken (GuD) Wirkungsgrade bis zu 60 % realistisch (Strauss 2016). Somit könnte das Gas zum einen deutlich effizienter verstromt werden und zum anderen auch eine relevante CO₂ Reduktion erreicht werden (Zutter et al. 2015). Dieser Ansatz wird u.a. in der Schweiz bereits heute als Alternative zur Vor-Ort-Verstromung verfolgt und KWK-Anlagen werden zugunsten von Gaseinspeiseanlagen zurückgebaut (siehe z.B. Hunziker 2005; Zutter et al. 2015; Peyer Thomas et al. 2016). Die benötigte Wärme zur Beheizung der Faulbehälter, könnte durch die Abwärme der Elektrolyse/Methanisierung bereitgestellt werden, was anlagenbezogen näher zu prüfen ist.

Aus dem anfallenden Klärgas der bundesweiten Kläranlagen der GK 4 und 5 könnte durch eine Methanisierung speicherfähiges CH₄ mit einem Energiegehalt von ca. 9,55 TWh/a erzeugt werden, das in das Erdgasnetz eingespeist werden kann (Schmitt et al. 2017b). Nach VDE (2012) werden bei einem Anteil von 80 % EE ca. 18 GW bzw. 7,5 TWh (Speicherbedarf für 17 Tage) an zusätzlichen Langzeitspeichern benötigt, wozu Kläranlagen mit den vorgezeigten Optionen einen relevanten Beitrag liefern könnten. Unter der Annahme der in Kapitel 7.4 aufgezeigten Optimierungspotenziale zur Klärgaserzeugung könnte das theoretische Langzeitspeicherpotenzial um weitere 3,65 TWh/a auf ca. 13,20 TWh/a gesteigert werden (Schmitt et al. 2017b).

6.5 Weiterführende Überlegungen

6.5.1 Energieverbrauchsprognosen und Flexibilität bei erhöhter Anlagenbelastung

Die Bereitstellung von Flexibilität ist stark abhängig von der aktuellen Belastungssituation der Kläranlage (Fracht sowie Zufluss). Es besteht ein klarer Zusammenhang zwischen einem Regenereignis und einem höheren (Gesamt-)Energieverbrauch der Kläranlage, welcher sich hauptsächlich durch die zu pumpende Abwassermenge ergibt. Mit Hilfe von Belastungsprognosen kann der entsprechende Strombezug vorausgesagt werden. Des Weiteren spielen auch die Korrelationen von ankommender Fracht, Ammoniumkonzentrationen in der biologischen Stufe und Verdünnungseffekte bei hohen Durchflussmengen eine Rolle. Oftmals stellen starke Regenereignisse eine maximale Belastungssituation hinsichtlich der Ausbaugröße dar und das Flexibilitätspotenzial der Reinigungsaggregate steht nur sehr eingeschränkt bzw. nicht zur Verfügung.

Im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung ist es möglich eine Vielzahl von Informationen intelligent zu nutzen und ebenfalls Wetterdaten als Prognosen einzubeziehen. Je nach Art, Größe bzw. Länge und Zusammensetzung des Kanalnetzes ergibt sich über die Verweilzeit im Netz eine Vorlaufzeit, bis der erwartete Effekt durch ein Regenereignis auf der Anlage eintritt. Mit diesem Wissen kann relativ kurzfristig flexibel auf einen erhöhten Strombezug reagiert und z.B. Strombezugsspitzen abgemindert oder frühzeitig der wetterbedingte Ausfall von bestimmten Aggregaten zur Flexibilitätserstellung eingeplant werden. Voraussetzung hierzu sind detaillierte Kenntnisse über die Auswirkungen eines Regenereignisses auf die jeweilige Anlage. Dies kann durch Auswertung der historischen Betriebsdaten zu relevanten Regenereignissen und regulärem Betrieb, kombiniert mit einem Niederschlags-Abfluss/ Kanalnetz-Modell, erfolgen. Für das Niederschlags-Abfluss/ Kanalnetz-Modell werden hierzu Online-Daten, wie z.B. Füllstände in Regenbecken, Niederschlagsmessungen,

Durchflüsse, aktive Restriktionen und ggf. weitere Parameter, benötigt. Durch Auswertung repräsentativer Tage kann für den Trockenwetterfall ebenfalls mit entsprechenden Unsicherheiten die zu erwartende Belastung abgeleitet werden. Entsprechende Modelle sind am Markt verfügbar und gekoppelt mit einem Kläranlagenmodell ist eine Energiebedarfsprognose möglich. Während Langzeitprognosen durch Simulationen mit großen Unsicherheiten behaftet sind, sind Kurzzeitprognosen verlässlicher (Haag et al. 2012). Weitere Hinweise zur Prognose mit Hilfe von Kläranlagenmodellen sind in Palmowski und Pinnekamp 2018) gegeben. Die Betrachtungstiefe kann hierbei von einer Prognose des Gesamtenergiebedarfs bis hin zu einer detaillierten aggregatspezifischen Untersuchung gehen.

Im Regenwetterfall sind einige Aggregate nicht bzw. nur eingeschränkt nutzbar, da ein solches Ereignis eine Hochlastphase für den gesamten Reinigungsprozess darstellt. Über die Kontrollparameter ist dieser Effekt teilweise berücksichtigt. Nichtsdestotrotz ist eine Reihe von Aggregaten dennoch ausreichend flexibel nutzbar, um die erhöhte Nachfrage an Strom auszugleichen, die ein Regenereignis auslöst. Dies umfasst überwiegend die Schlammbehandlung und die BHKW, da diese weitestgehend unbeeinflusst von der aktuellen Anlagenbelastung arbeiten. Ein Überblick zur Beeinflussung und Nutzbarkeit der Aggregate im Regenwetterfall gibt Tabelle 6.6.

Tabelle 6.6: Beeinflussung und mögliche Nutzung unterschiedlicher Aggregatgruppen im Regenwetterfall

Aggregatgruppe	Beeinflussung	Nutzbarkeit	Anfahrzeit
Hebwerk	●●●	○	< 5 Min.
Sandfang (<i>Belüftung</i>)	●●●	○	< 5 Min.
Belebungsbecken (<i>Belüftung</i>)	●●	○	< 5 Min.
Belebungsbecken(<i>Rührwerke</i>)	●	●●	< 5 Min.
Rücklaufschlammumpen	●●	○	< 5 Min.
Rezirkulationsumpen	●●	○	< 5 Min.
Heizschlammumpen (<i>Faulturm</i>)	○	●●	< 5 Min.
Rohschlammpumpe (<i>Faulturm</i>)	○	●●	< 5 Min.
Rührwerke (<i>Faulturm</i>)	○	●●	< 5 Min.
Seihbandanlage/ ÜSS-Pumpen	○	●	< 15 Min.
Entwässerung	○	●●●	< 15 Min.
BHKW	○	●●●	< 15 Min.
○ gering	● mäßig	●● hoch	●●● sehr hoch

Interessant werden diese Betrachtungen ab einer Vorlaufzeit von 15 bis 30 Minuten, da die meisten Aggregate innerhalb dieser Zeit für eine Flexibilitätsbereitstellung zur Verfügung stehen und genutzt werden können. In einem Managementsystem ist darüber hinaus das frühzeitige Wissen eines Ausfalls bestimmter Aggregate ein wichtiger Faktor, der ggf. durch andere Maßnahmen kompensiert oder die angebotene Flexibilität reduziert werden kann.

6.5.2 Kumulative Regenerationszeiten

Die Ergebnisse der praktischen Umsetzung haben gezeigt, dass die Regenerationszeit ein wichtiger und sehr sensibler Parameter darstellt. Viele kurze Abrufe können dazu führen, dass Restriktionen für bestimmte Aggregate nicht im angedachten Sinne eingreifen. So konnten viele Abrufe der SRL zunächst nicht bedient werden, da nach 1-minütiger Nutzung die volle Regenerationszeit ($t_{\text{Reg},i}$) von 15 Minuten ausgelöst wird und weitere Abschaltungen verhindert werden, obwohl technisch als auch reinigungsbedingt keine Notwendigkeit hierzu besteht. Dies wurde anhand des Belastbarkeits-test der Nitrifikation für die biologische Stufe im Rahmen der Integration in das VK geprüft (vgl. Kapitel 5.3), indem die Regenerationszeit für die Untersuchungen der SRL erst ab einer Abschaltdauer (t_{Ab}) von 30 bzw. 60 Minuten einsetzte. Die Abrufquote der Gebläse konnte mit dieser Maßnahme deutlich gesteigert werden ohne negative Auswirkungen auf die Reinigungsleistung festzustellen.

Zur Lösung dieser Problematik können kumulative Regenerationszeiten für bestimmte Aggregate definiert werden:

$$t_{\text{Reg},i,\text{kum}} = \begin{cases} 0, & \sum_{k=1}^j t_{\text{Ab},i,k} < t_{\text{Reg},i} \\ t_{\text{Reg},i}, & \sum_{k=1}^j t_{\text{Ab},i,k} \geq t_{\text{Reg},i} \end{cases} \quad (\text{Formel 6.1})$$

Dies würde bedeuten, dass eine Regenerationszeit nur dann vorgesehen ist, sobald eine tatsächliche Stillstandszeit von in Summe x Minuten in einer vordefinierten Zeitspanne erreicht ist, die als erste Annäherung der angesetzten Regenerationszeit entsprechen kann. Die betrachtete Zeitspanne könnte auf 24 Stunden oder 4 Stunden (Zeitscheibe bei der Bereitstellung von SRL/MRL) festgelegt werden, je nach Schalthäufigkeit des Aggregats.

Alternativ hierzu ist auch eine gestaffelte Regenerationszeit denkbar:

$$t_{\text{Reg},i,\text{kum}} = \begin{cases} 0, & t_{\text{Ab},i} < 15 \text{ min} \\ \frac{t_{\text{Reg},i}}{2}, & 15 \text{ min} < t_{\text{Ab},i} < t_{\text{Reg},i} \\ t_{\text{Reg},i}, & t_{\text{Ab},i} \geq t_{\text{Reg},i} \end{cases} \quad (\text{Formel 6.2})$$

Diese Vorgehensweise würde gestatten kurze Abrufe einfacher zu ermöglichen und dennoch eine Sicherstellung von Mindestlaufzeit und Regeneration der Prozesse zu gewährleisten. Insbesondere Aggregate mit langer möglicher Abschaltdauer und zugleich hoher Regenerationszeit profitieren von einer solchen Regelung (z.B. RLS-, Rezirkulations- und Heizschlamm-pumpen).

6.5.3 Einbindung in regionale Energieverbände

Immer mehr Kommunen erkennen den Nutzen und die Chancen Erneuerbarer Energien. In sogenannten „Energie-Kommunen“ erfolgt eine Umsetzung der Energiewende auf lokaler Ebene, mit dem Trend zur 100%-EE-Kommune. In solchen Städten und Gemeinden werden die kommunalen Handlungsmöglichkeiten beim Ausbau der EE gefördert, umgesetzt und damit regionale Wertschöpfungseffekte generiert. Damit können Energiekosten gesenkt und Gewinne, Unabhängigkeit von den großen Stromerzeugern, innerhalb der Kommune erwirtschaftet und genutzt werden. Der Fokus liegt dabei auf der Erschließung von EE-Erzeugungspotenzialen mit dem Ziel einer langfristigen Umgestaltung der Strom- und Wärmeerzeugung in der Region (Hirschl et al. 2010; AEE 2008).

In diesem Kontext ist eine Nutzung der Flexibilitätsbereitstellung der Kläranlage in einem regionalen Energieverbund oder einem kommunalen Energiemanagement eine denkbare und sinnvolle Ergänzung zu den bisher betrachteten reinen EE-Erzeugungsanlagen. In einem solchen regionalen energetischen Gesamtkonzept bietet sich die Kläranlage an, stabilisierend und unterstützend zur lokalen Energieversorgung beizutragen. Neben den Kläranlagen sind weitere kommunale Anlagen, wie Wasserversorgungsanlagen, dezentrale Netzersatzanlagen (z.B. in Krankenhäusern) oder Müllverbrennungsanlagen interessante Bausteine, um in ein solches Konzept eingebunden zu werden. Kooperationen zur Integration und Beteiligung von weiteren Verbrauchern und Erzeugern aus Industrie, Gewerbe und innovativen Technologien (z.B. Batteriespeicher) sind ebenfalls denkbar. Die Kläranlage kann dabei eine zentrale Rolle als Speichereinheit für die volatilen EE-Erzeugungsanlagen einnehmen. Die Steuerung könnte dabei auch hier über ein VK erfolgen (vgl. Kapitel 6.3.1). Eine schematische Darstellung eines möglichen Energieverbundes ist in Abbildung 6.6 abgebildet. Als Standort einer PtX-Anlage (vgl. Kapitel 6.4) kann die Kläranlage sich als innovatives lokales „Energiezentrum“ zur Kopplung der Sektoren etablieren und als Bindeglied zwischen regionalem Strom-, Gas- und Mobilitätssektor fungieren. Dadurch kann der lokale Ausbau der EE forciert und die Energiewende auf dezentraler Ebene weitergehend unterstützt werden.

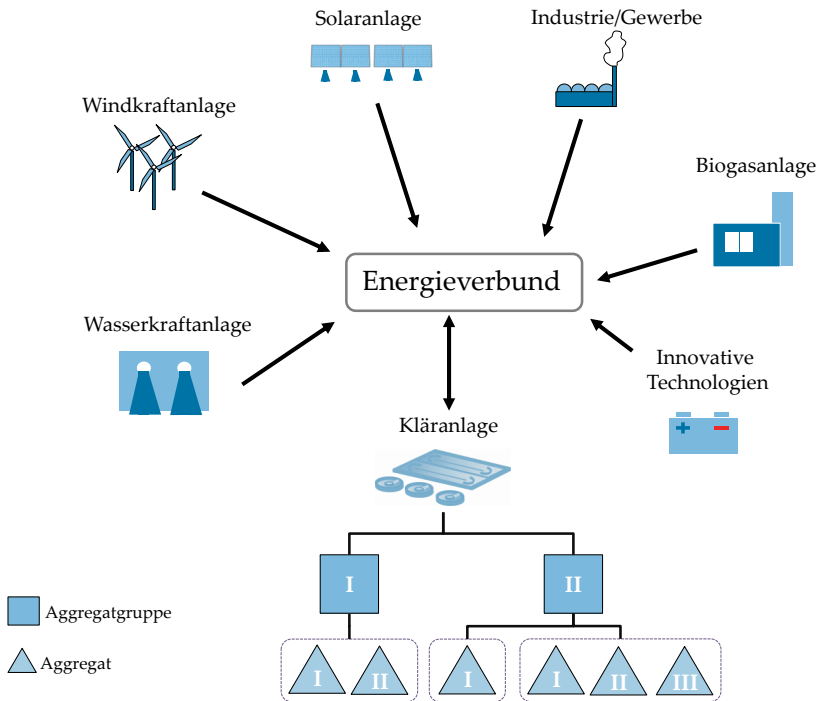


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung eines regionalen Energieverbundes (nach Hirschl et al. 2010; AEE 2008)

7 Potenzialanalyse kommunaler Kläranlagen in Deutschland

Im folgenden Kapitel erfolgt zunächst die Darstellung einer Bestandsanalyse bezüglich der Faulgasnutzung und Stromproduktion kommunaler Kläranlagen in Deutschland. Darauf aufbauend erfolgt eine Positionsbestimmung in Form einer Potenzialanalyse in Bezug auf Stromerzeugung, Leistungsbereitstellung und verschiebbaren Energiemengen. Zur Ermittlung von Flexibilitätspotenzialen werden die aus den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse zum flexiblen Anlagenbetrieb, insbesondere die zu- und abschaltbaren Zeitspannen der unterschiedlichen Aggregate herangezogen, auf den Bestand in der Bundesrepublik angewendet und deren theoretisches Potenzial ausgelotet.

Eine Übersicht zur Struktur der folgenden Potenzialberechnungen ist in Abbildung 7.1 gegeben.

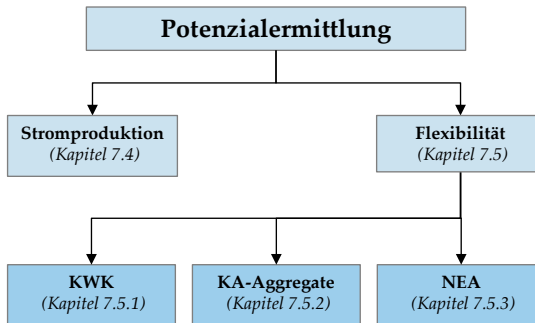


Abbildung 7.1: Übersicht der Potenzialberechnungen

7.1 Konzept und Vorgehen zur Berechnung der Stromerzeugungs- und Flexibilitätspotenziale

Für eine fundierte Potenzialermittlung sind detaillierte Informationen der kommunalen Kläranlagen in Deutschland notwendig. Benötigt werden insbesondere Daten zur Ausbaugröße, eingesetztem Reinigungsverfahren sowie zur Gas- und Klärschlammverwertung. Eine Aufschlüsselung der Einwohnerwerte nach entsprechenden Reinigungsverfahren und Größenklassen ist dabei unabdingbar, da nur Kläranlagen mit

getrennt anaerober Schlammstabilisierung Strom aus Faulgas produzieren. Diese Unterscheidung ist zwingend notwendig, um mögliche Stromerzeugungspotenziale adäquat berechnen zu können. Des Weiteren werden diese Daten zur Berechnung der Flexibilitätspotenziale sowie bei der Ermittlung von einwohnerbezogenen Kennzahlen benötigt. Ferner muss eine Unterscheidung nach Größenklasse der Anlagen erfolgen, da sich die betrachteten einwohnerspezifischen Kennzahlen teilweise erheblich unterscheiden.

7.2 Datengrundlage und –erhebung

Als Datengrundlage zur Aufschlüsselung der Kläranlagen nach Größenklassen, Einwohnerwerten und eingesetztem Reinigungsverfahren werden die Publikationen der DWA-Landesverbände („Kläranlagen-Nachbarschaften“) sowie zusätzlich verfügbare Datensätze der Bundesländer Rheinland-Pfalz (RLP) und Saarland ausgewertet. Des Weiteren fließen die jeweiligen Lageberichte der Länder über die Beseitigung von kommunalem Abwasser und Klärschlamm sowie unterschiedliche Daten des Statistischen Bundesamtes in die Auswertungen ein. Eine Übersicht der ausgewerteten Datenquellen ist in Tabelle 7.1 dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Bearbeitung stellten die Daten aus dem Jahre 2012/2013 die aktuellste gemeinsame Datenbasis der unterschiedlichen verwendeten Quellen dar. Daher bezieht sich im folgenden Kapitel der „Ist-Zustand“ auf die Jahre 2012/2013. Aufgrund der langlebigen Infrastrukturen in der Abwasserbehandlung ist nicht von grundlegenden strukturellen Veränderungen innerhalb der seither vergangenen Jahre auszugehen. Daher würde eine mit erheblichem Aufwand verbundene Aktualisierung einzelner Datenbestände keine signifikanten Auswirkungen bzw. Mehrgewinne auf die Aussagekraft in Bezug auf die berechneten Potenziale bzw. deren Berechnungsgrundlage generieren. Des Weiteren sind die unterschiedlichen Veröffentlichungsintervalle der ergänzenden Daten nur schwer auf ein einheitliches Bezugsjahr abzustimmen. Diese schwanken zwischen jährlichen und dreijährlichen Veröffentlichungen, für Bezugsjahre die bis zu zwei Jahre in der Vergangenheit liegen. Sofern möglich und sinnvoll, wurde in den kommenden Ausführungen allerdings auf die jeweils aktuellsten vorliegenden Daten zurückgegriffen und dies entsprechend vermerkt.

Tabelle 7.1: Datengrundlage zur Auswertung der bundesweiten kommunalen Kläranlagen

Bundesland	Kommunaler Lagebericht	Kläranlagen Nachbarschaften
Baden-Württemberg	UM 2013	DWA LV BW 2013
Bayern	LfU 2013	DWA Bayern 2013; LfU 2014*
Brandenburg	MUGV 2013	DWA Nordost 2013
Hessen	HMUELV 2013	DWA HRS 2013
Mecklenburg-Vorpommern	LUNG 2013	DWA Nord 2013
Niedersachsen	NLWKN 2013	DWA Nord 2013
Nordrhein-Westfalen	MKULNV 2010	DWA NRW 2014
Rheinland-Pfalz	MULEWF 2013	DWA HRS 2013; LUWG 2013*
Saarland	MUV 2013	DWA HRS 2013; EVS 2013*
Sachsen	SMUL 2013	DWA Sachsen/Thüringen 2014
Sachsen-Anhalt	MLU 2013	DWA Nord 2013
Schleswig-Holstein	LLUR-SH 2013	DWA Nord 2013
Thüringen	TMLFUN 2013	DWA Sachsen/Thüringen 2014
Stadtstaaten (Berlin, Hamburg, Bremen)	BWB 2014*; hanseWasser 2014*; Hamburg Wasser 2014*	
* Ergänzende Daten		

In den folgenden Unterkapiteln werden die verwendeten Datengrundlagen und ihre Verwendung in den durchgeführten Berechnungen kurz erläutert.

7.2.1 Kläranlagennachbarschaften des Jahrgangs 2012/2013

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) führt sieben Landesverbände. Die jeweiligen Landesverbände geben regelmäßig im Rahmen ihrer Nachbarschaftsarbeit ein Jahrbuch „Kläranlagen- und Kanalnachbarschaften“ heraus. Die Nachbarschaftsbroschüren beinhalten die Stammdaten aller Kläranlagen der jeweiligen Landesverbände mit den folgenden Kenngrößen:

- Ausbaugröße
- Abwasserreinigungsverfahren
- Klärschlammbehandlung/Klärschlammverwertung
- Faulgasverwertung

Damit bilden sie die Datengrundlage zur Aufschlüsselung der Einwohnerwerte ($E_{\text{W}_{\text{Ausbau}}}$) nach Größenklassen und Reinigungsverfahren.

7.2.2 Kommunale Lageberichte der Bundesländer

Die Richtlinie 91/271 der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) betrifft das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser sowie bestimmter Industriebranchen mit dem Ziel, die Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen dieses Abwassers zu schützen. Nach dieser sind die Mitgliedsstaaten verantwortlich für die Überwachung der Einleitungen aus Abwasserbehandlungsanlagen und der Gewässer. In diesem Rahmen ist alle zwei Jahre ein Prüfbericht zu veröffentlichen (EWG 1991).

Die Lageberichte jedes Bundeslandes kommen der Forderung gemäß Artikel 16 der Kommunalabwasserrichtlinie 91/271/EWG nach und unterscheiden sich in ihrer Detaillierung, beinhalten allerdings immer den jeweils aktuellen Stand der Abwasserbeseitigung, Reinigungsleistung sowie der Klärschlambeseitigung. Die Auswertung der Lageberichte dient hauptsächlich der Validierung und Komplementierung der Auswertung der Nachbarschaften. Wichtige Kenngrößen, die dabei herangezogen wurden, sind:

- Ausbaugröße
- Anzahl der Anlagen
- Art der Abwasserreinigung
- Klärschlammbehandlung/Klärschlammverwertung
- Reinigungsleistung
- Landesspezifische Zusatzinformationen

7.2.3 Rohdatensätze aus dem Projekt ZEBRAS²³

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MUEEF) des Landes RLP wurde vom Zentrum für innovative AbWassertechnologien an der Technischen Universität Kaiserslautern (tectura) im Jahr 2015 eine Datenerhebung (Bezugsjahr: 2014) zu allen 84 Faulungsanlagen in RLP durchgeführt. Zusätzlich wurden energetische Daten gezielt zur Nutzung im Projekt *arrivee* abgefragt und ausgewertet.

Dabei wurden anhand eines Fragebogens folgende Kennwerte erfasst (Knerr et al. 2016):

- Allgemeine Daten der Kläranlage (z.B. Ansprechpartner, Ausbaugröße, Indirekteinleiter)
- Parameter der Abwasserreinigung (z.B. Abwassermengen, Zulauffrachten, Beckenvolumina, Schlammalter, Phosphor-Elimination)
- Angaben zum Schlammanfall (z.B. Primärschlamm, Überschussschlamm, externe Schlämme, Co-Substrate, Faulschlamm)
- Angaben zur Faulstufe (z.B. Verfahrensführung, Baujahr, Isolierung, Durchmischung, Betriebstemperatur)
- Mengenangaben zum Faulgasanfall (inkl. Methangehalt)
- Art und Umfang der Faulgasnutzung
- Informationen zur Faulschlammwässerung und -verwertung
- Angaben zum Erdgasnetz- und dem Stromnetzanschluss
- Daten zur Strom- und Energieerzeugung
- Angaben zur Leittechnik und sonstige Aggregate

Zur Auswertung standen 64 verwertbare Rohdatensätze (Rücklaufquote 76%) mit den speziell für den Energiesektor abgefragten Informationen zur Verfügung. Diese umfassen u.a. Angaben zu Netzersatzanlagen, Faulgasanfall, Methangehalt, Faulgasspeicher und installierter BHKW-Leistung sowie weiteren energetischen Kennwerten.

Genutzt wurden diese Daten insbesondere zur Bestimmung der Flexibilitätspotenziale und der Auswertung zum elektrischen Energiebezug und -erzeugung auf Kläranlagen.

²³ „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz- ZEBRAS“ (Schmitt et al. 2018).

7.2.4 Rohdatensätze aus dem Projekt TP2²⁴

Als zweiter umfangreicher Datensatz wurden die Rohdaten des Teilprojektes 2 „Verbesserung der Faulgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen“ zum Forschungsvorhaben „Energie und Klimaschutz“ des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV NRW) ausgewertet. Hierbei wurde in Abstimmung mit dem MULNV NRW von den Studienautoren ein Fragebogen an 284 Faulungsanlagen in Nordrhein-Westfalen verschickt. Zur Auswertung lagen 176 verwertbare Datensätze (Rücklaufquote 62%) vor. Die erhobenen Daten umfassen u.a. folgende Kennwerte (Mergelmeyer et al. 2014; Kolisch et al. 2014):

- Grundlegende abwassertechnische Daten (Q_d , $B_{d,CSB}$, $B_{d,Nges}$, tv_K , tr_S)
- Schlammanfall (ÜS, PS, externe Schlämme und Co-Substrate)
- Faulstufe (Volumen, Verfahrensweise, Temperaturbereich)
- Faulgasanfall (Volumen und Methangehalt)
- Faulgasnutzung (Speichervolumen, Art und Leistung der verwendeten Aggregate)
- Strombezug und -eigenerzeugung

Anwendung finden die Daten bei der Auswertung zum Energiebezug und -erzeugung auf Kläranlagen, zusammen mit den Daten aus Kapitel 7.2.3, der Flexibilitätspotenziale der KWK-Anlagen und Kläranlagenaggregate (vgl. Kapitel 7.5.1 und Kapitel 7.5.2).

7.3 Datenqualität, Voraussetzungen und Annahmen

Die verwendeten Daten erfassen mehr als 98% der Anlagen größer 10.000 EW_{Ausbau} (vgl. Kapitel 7.3.6). Für Anlagen kleiner 2.000 EW_{Ausbau} sind in den vorliegenden Daten allerdings nur lückenhaft Informationen verfügbar. Diese Anlagen spielen bei der Produktion von Faulgas zur Stromerzeugung sowie beim Umstellungspotenzial auf eine Schlammfäulung ohnehin nur eine untergeordnete Rolle und werden daher in den weiteren Untersuchungen nicht näher berücksichtigt. Des Weiteren liegt nach Schmitt et al. (2010) die wirtschaftliche Grenze zu einer Umstellung auf Fäulung bei rund 10.000 EW .²⁵ Damit liegt unter diesen Gesichtspunkten eine solide und belastbare Datengrundlage zur Abschätzung von Strom- und Flexibilitätspotenzialen vor.

²⁴ „Verbesserung der Faulgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen – TP2“ (Mergelmeyer et al. 2014).

²⁵ Diese Grenze ist stark schwankend, da sie maßgebend von wirtschaftlichen Entwicklungen, aktuellen rechtlichen Gesetzgebungen sowie Subventionen beeinflusst wird.

Sowohl in den kommunalen Lageberichten als auch in den DWA-Nachbarschaften sind folgende Daten nicht mit angefragt und ausgewertet:

- Anschlussgröße der Anlagen
- Produzierte Faulgasmenge
- Installierte KWK-Leistung
- Vorgehaltene Gasspeicherkapazitäten
- Faulraumvolumen und freie Faulraumkapazitäten

Dies erfordert zur weiteren Betrachtung gewisse Abgrenzungen und Annahmen, auf die im Weiteren näher eingegangen wird. Für diese fehlenden Daten wurden unter Berücksichtigung von Angaben des Statistischen Bundesamtes und ausgewerteter Daten sowie unter Berücksichtigung einschlägiger Literatur die nachstehenden Annahmen abgeleitet.

7.3.1 Ausbau und Anschlussgröße

Die Nachbarschaftsbroschüren der DWA geben lediglich Auskunft über die Ausbaugröße der Kläranlagen, nicht aber über die tatsächlich angeschlossenen Einwohnerwerte. Dieser Bezug ist insofern bedeutsam, da zur Berechnung des Faulgases die anlagenbezogene Belastung durch die tatsächlich behandelten EW (schwankende Anlagenbelastung) von Relevanz ist und nicht die bei der Planung festgelegte Ausbaugröße. Im Gegensatz dazu ist bei der Verwendung von Kennzahlen bei der Anlagentechnik (bspw. der KWK-Anlagen) eine Verwendung der Ausbaugröße durchaus angebracht, da sie unabhängig von der aktuellen Anlagenbelastung über ihre Nutzungsdauer über Jahre konstant definiert ist und die Ausbaugröße hierbei als adäquate Bezugsgröße eingestuft wird.

Das Statistische Bundesamt (DESTATIS) macht in der aktuellen Fachserie 19 Reihe 2.1.2 „Öffentliche Wasserversorgung und öffentliche Abwasserentsorgung“²⁶ Angaben über die Ausbaugröße ($EW_{\text{Ausbau}} = 151.130.193 \text{ E}$) und die Anschlussgröße ($EW_{\text{Anschluss}} = 116.872.889 \text{ E}$) aus dem Bezugsjahr 2013 für $n = 9.307$ Anlagen ohne Unterscheidung nach Reinigungsverfahren und Größenklasse (DESTATIS 2015). Dies ergibt ein Verhältnis von Anschluss- zu Ausbaugröße von etwa 77%. Diese Angaben decken sich mit der Auswertung der Datensätze der Kläranlagen aus Rheinland-Pfalz (81%; $n = 63$) und Nordrhein-Westfalen (79%; $n = 177$).

Damit wird für die nachfolgenden Berechnungen angenommen, dass die Anschlussgröße im Mittel 80 % der Ausbaugröße entspricht.

²⁶ Die Fachserie 19, Reihe 2.1 erscheint im dreijährigen Turnus. DESTATIS 2015 stellt zum Jahr 07/2018 die aktuellste Datengrundlage (Bezugsjahr 2013) dar.

7.3.2 Faulgasqualität, spezifischer Faulgasanfall und Energiegehalt

Faulgas ist ein Gasgemisch, das sich aus Methan, Kohlendioxid und geringen Mengen weiterer Gase zusammensetzt und wurde ausführlich in Kapitel 2.2.2 beschrieben. Reines Methangas besitzt einen Energiegehalt von rund 10 kWh/Nm³ CH₄. Bei einem durchschnittlicher Methangehalt im Faulgas von 65 Vol.-% (DWA 2010a; UBA 2008) ergibt sich ein typischer Energiegehalt von 6,5 kWh/Nm³ der für die weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt wird.²⁷

Die Schwankungsbreite der spezifischen Faulgasproduktion (vgl. Kapitel 2.2.2) wird auf Grundlage der ausgewerteten Literatur mit 20 bis 30 l/(E*d) angenommen (z.B. DWA 2010b; DWA 2010a; UBA 2008; Seyfried et al. 2015; Dehoust et al. 2010).

7.3.3 Faulgasverstromung

Für die DWA-Landesverbände Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Saarland und Hessen liegen Daten zur Faulgasverstromung vor. Auf rund 80 % der Faulungsanlagen ist eine KWK-Anlage installiert. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Daten des Statistischen Bundesamtes, wobei 984 von 1.232 Betrieben Gas zur Verstromung nutzen (DESTA 2013). Angaben über die installierte Leistung der KWK-Anlagen werden nicht erfasst.

Damit wird davon ausgegangen, dass deutschlandweit zum Betrachtungszeitpunkt etwa 80% der Faulungsanlagen ihr gewonnenes Faulgas in einer KWK-Anlage in Form von Strom und Wärme verwerten.

7.3.4 Wirkungsgrade von KWK-Anlagen

Aus den 644,537 Mio. m³ genutztem Faulgas wurden im Jahre 2012 1,25 TWh_{el}/a an Strom erzeugt (DESTA 2013). Bei einem Jahresprimärenergiegehalt des verstromten Faulgases von 4,49 TWh/a beträgt der elektrische Wirkungsgrad rechnerisch im Mittel rund 28 %. Dieser Wert liegt deutlich unter den Herstellerangaben moderner Klärgas-BHKW-Anlagen (vgl. Kapitel 2.2.3). Damit würde ein angenommener Wirkungsgrad von 28% das zukünftige Potenzial deutlich unterschätzen. Für moderne Anlagen können Wirkungsgrade von 28 % bis 43 % bis 1.000 kW_{el} erreicht werden (n = 264). Bei Anlagen größer 1.000 kW_{el} können elektrische Wirkungsgrade von über 44% als realistisch angesehen werden (ASUE 2014).

²⁷ Anzumerken ist, dass sich nach DESTA 2013 rechnerisch ein mittlerer Energiegehalt des Faulgases von rund 7 kWh/m³ ergibt. Diese Abweichung wird in der unzureichenden Darstellung (in TWh) sowie durch Messungenauigkeiten vermutet.

Für die folgenden Berechnungen wird von einer Bandbreite von 32% bis 40% für den elektrischen Wirkungsgrad in Zukunft für Kläranlagen-BHKW ausgegangen.

7.3.5 Berechnungsgrundlagen

Die Berechnung der Stromerzeugungspotenziale erfolgt über den Jahresprimärenergiegehalt des anfallenden Faulgases (berechnet über Einwohnerwerte und spez. Gasanfall) und den elektrischen Wirkungsgrad der KWK-Anlage. Die Leistung eines Aggregats lässt sich über die Arbeit pro Zeiteinheit berechnen. Die verschiebbare Energiemenge (ΔW_i) – also die „gespeicherte“ Energie - ergibt sich aus dem Produkt der Leistung über die zur Verfügung stehende Zeit. Hierbei kann weiter, analog zu den beiden Flexibilitätsrichtungen, in zu- und abschaltbare Energiemenge unterschieden werden. Die wichtigsten Berechnungsformeln sind nachfolgend aufgeführt.

$$\text{Faulgasanfall} \quad \dot{Q}_{\text{Faulgas}} = q_{\text{Faulgas}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{EW} * \text{a}} \right] * \text{EW} [\text{E}] \quad [\text{m}^3/\text{a}] \quad (\text{Formel 7.1})$$

$$\text{Primärenergie} \quad E_{\text{Primär}} = \dot{Q}_{\text{Faulgas}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right] * H_{i,\text{Faulgas}} \left[\frac{\text{TWh}}{\text{m}^3} \right] \quad [\text{TWh}/\text{a}] \quad (\text{Formel 7.2})$$

$$\text{Elektrische Energie} \quad E_{\text{el}} = Q_{\text{Klärgas}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{a}} \right] * H_{i,\text{Faulgas}} \left[\frac{\text{TWh}}{\text{m}^3} \right] * \eta_{\text{el,BHKW}} [-] \quad [\text{TWh}_{\text{el}}/\text{a}] \quad (\text{Formel 7.3})$$

Mit: E_{el} = elektrische Energie [TWh_{el}/a]
 Q_{Faulgas} = Faulgasmenge [m³/a]
 q_{Faulgas} = spez. Faulgasanfall [m³/(EW*a) bzw. l/(E*d)]
 $H_{i,\text{Faulgas}}$ = mittlerer Energiegehalt von Faulgas = 6,5 [kWh/m³]
 η_{BHKW} = BHKW-Wirkungsgrad (elektrisch) [-]

7.3.6 Ergebnisse der Datenauswertung zur Faulgasnutzung in Deutschland

Über die DWA-Nachbarschaften konnten über 98% der Kläranlagen der Größenklasse 4 und 5 erfasst werden, welche rund 93 % des gesamten Abwassers in Deutschland behandeln (auf Basis von angegebenen $\text{EW}_{\text{Ausbau}}$). Für eine Analyse der Stromerzeugung auf Kläranlagen ist eine nähere Betrachtung der Produktion von Faulgas im Ist-Zustand notwendig, welches nur auf Anlagen mit anaerober Schlammstabilisierung produziert wird. Die Anteile von Kläranlagen mit anaerobem Stabilisierungsverfahren im Verhältnis zu anderen Reinigungsverfahren ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Somit werden Abwässer von über 70% der EW in Faulungsanlagen behandelt, welche weniger als ein Drittel aller Anlagen ausmachen (Bezugsjahr 2013).

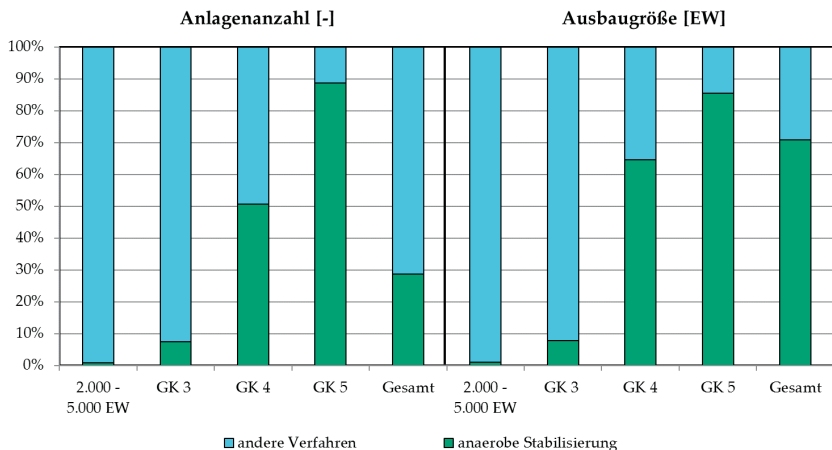


Abbildung 7.2: Anteil anaerober Stabilisierungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland nach Anzahl (links) und Ausbaugröße in EW_{Ausbau} (rechts)

Wird davon ausgegangen, dass Anlagen ab GK 3 (> 10.000 EW) unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten für eine getrennt anaerobe Schlammstabilisierung in Frage kommen (u.a. Schmitt et al. 2010), ergibt sich damit eine belastbare Datenbasis für die weiteren Berechnungen (vgl. Tabelle 7.2).

Für die Potenzialabschätzungen in den weiteren Kapiteln werden die in Tabelle 7.3 dargestellten Einwohnerwerte auf Grundlage der Auswertungen der DWA-Nachbarschaften, aufgeschlüsselt nach Reinigungsverfahren und Größenklasse, verwendet.

Tabelle 7.2: Anzahl kommunaler Kläranlagen in Deutschland (Stand: 2012/2013)

Größenklasse	Kommunale Lageberichte	DWA-Nachbarschaften
GK 1-3	7.062	3.023
GK 4	1.915	1.881
GK 5	234	232
Summe Σ	9.211	5.136

Quellen: siehe Tabelle 7.1

Die Ausbaugröße der untersuchten Faulungsanlagen (n = 1.230) beträgt ca. 104,1 Mio. E. Unter der Annahme eines Verhältnisses von Anschluss- zu Ausbaugröße von 80 % entspricht dies einer Anschlussgröße von EW = 83,3 Mio. E.

Tabelle 7.3: Einwohnerwerte nach Größenklasse und Reinigungsverfahren (Eigene Auswertung, Datengrundlage: DWA-Nachbarschaften 2012/2013)

Größenklasse	Faulungsanlagen (Anaerobe Stabilisierung, n = 1.230)		Belebtschlammverfahren (Gesamt, n = 1.804)
	EW _{Ausbau} [E]	EW _{Anschluss} [E]*	EW _{Ausbau} [E]
GK 1-3	533.135	426.508	2.387.288
GK 4	39.402.713	31.522.170	45.565.387
GK 5	64.139.584	51.311.667	71.636.584
Summe Σ	104.075.432	83.260.346	119.589.259

* Berechnet auf Grundlage Anschlussgröße = 80% der Ausbaugröße.

Nach DESTATIS (2013) wurden im Bezugsjahr insgesamt 810,719 Mio. m³ Faulgas erzeugt, woraus sich ein spez. Faulgasanfall von $e_{FG,Ausbau} = 21,34 \text{ l}/(E^*d)$ bzw. $e_{FG,Anschluss} = 26,68 \text{ l}/(E^*d)$ ergibt. Dies beläuft sich im erwarteten Bereich der Literatur (vgl. Kapitel 2.2.2) von 17 - 30 l/(E*d).

7.4 Stromerzeugungspotenziale kommunaler Kläranlagen

In Kapitel 2.2.4 wurde der Stand der Faulgasverwertung der bundesweiten kommunalen Kläranlagen dargestellt. Nachfolgend werden die einzelnen Potenziale näher beschrieben und berechnet, die zu einer Steigerung der Stromerzeugung auf Kläranlagen führen können.²⁸ In Abbildung 7.3 ist das Vorgehen zur Ermittlung der bundesweiten Stromerzeugungspotenziale grafisch abgebildet.

Zusammenfassend wurden folgende Optimierungsansätze identifiziert und untersucht:

- Ausrüstung der aktuell vorhandenen Kläranlagen mit Schlammfaulung mit KWK-Anlagen
- Umrüstung aller Belebungsanlagen ab einer gewissen Größe auf Schlammfaulungsanlagen mit entsprechenden KWK-Anlagen
- Steigerung der Energieausbeute aus Klärschlamm (innerbetriebliche Optimierung Schlammbehandlung/Faulung, Desintegration des Klärschlammes, Hochlastfaulung etc.)
- Ausnutzung von Kapazitätsreserven im Faulturm

²⁸ Weitere Hinweise und Ansätze zur Optimierung der Faulung und Faulgasverwertung sind in Schmitt et al. 2018 gegeben.

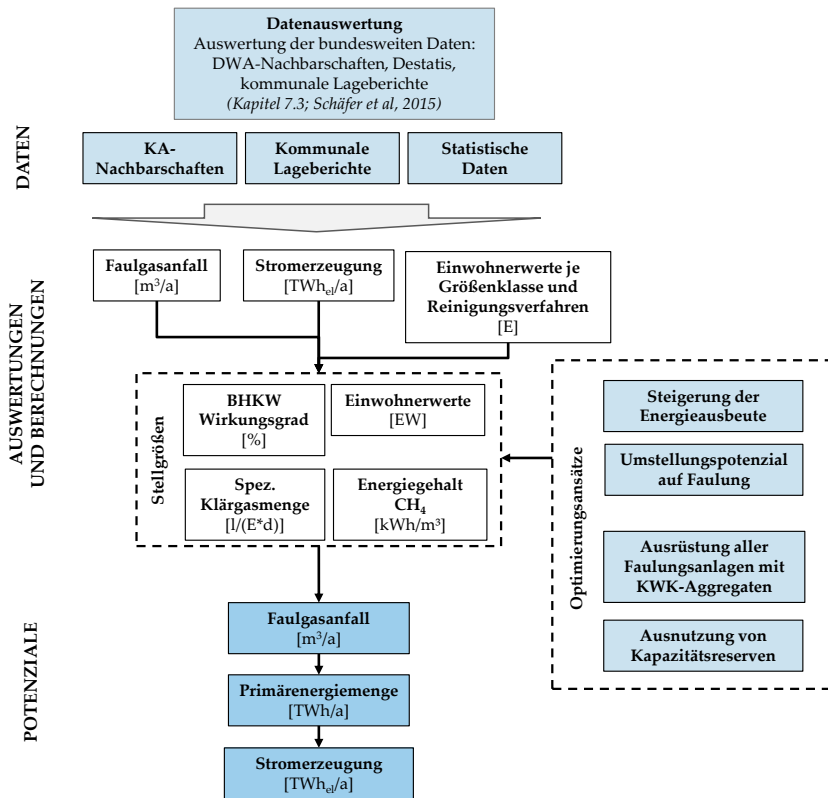


Abbildung 7.3: Vorgehen zur Ermittlung der bundesweiten Stromerzeugungspotenziale

7.4.1 Ausrüstung aller Faulungsanlagen mit KWK-Anlagen

Im Bestand sind bisher nur rund 80% der anaeroben Stabilisierungsanlagen mit KWK-Anlagen zur Stromerzeugung ausgerüstet (DESTATIS 2013). Mit der Ausrüstung aller Faulungsanlagen mit KWK-Anlagen können rund 86,7 Mio. m³ zusätzliches Faulgas mit einem Primärenergiegehalt von 0,613 TWh/a zur Stromerzeugung genutzt werden. Unter Berücksichtigung unvermeidbarer Verluste von 5 % (Stillstandszeiten für Wartung etc.) ergibt sich eine zusätzliche Stromerzeugung von 0,196 – 0,245 TWh_{el}/a (vgl. Tabelle 7.4).

Tabelle 7.4: Energiepotenziale durch Ausrüstung aller Anlagen mit KWK-Anlagen

	Zus. Faulgas [Mio.m ³ /a]	Jahresprimär- energiemenge ¹ [TWh/a]	Stromerzeugung ² [TWh _e /a]
Bisher nicht verstromtes Faulgas	86,744	0,613	0,196 - 0,245

¹ Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³
² Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

7.4.2 Steigerung der Energieausbeute

Ansatzpunkte zur Steigerung der Energieausbeute liegen sowohl in der Erhöhung der Abbaurate der organischen Bestandteile zu Methan als auch in einer Verbesserung der Faulgasnutzung. Dadurch ergeben sich Ansatzpunkte zur innerbetrieblichen Optimierung hinsichtlich der Energieausbeute.

Mögliche Potenziale können genutzt werden durch:

- Optimierung in der Betriebsweise: z. B. Anpassung der Aufenthaltszeit in der Faulung, Verschaltung der Faulbehälter, Anpassung des Schlammalters in der biologischen Stufe
- Steigerung der Primärschlammmentnahme mit hohem organischen Kohlenstoffgehalt (z.B. durch Vorfällung)
- Desintegration des Klärschlammes
- Hochlastfaulung
- Wirkungsgraderhöhung durch Re-Powering der KWK-Anlagen

Der spezifische Faulgasanfall wird in der Literatur mit einer Spannbreite von 17 – 30 l/(E*d) angegeben, für große Anlagen mit bis zu 33 l/(E*d) (vgl. Kapitel 2.2.2). Für die weiteren Betrachtungen wird daher davon ausgegangen, dass durch o. g. Maßnahmen der spez. Faulgasanfall in Zukunft auf rund 30 l/(E*d) erhöht werden kann.²⁹ Wird für vorhandene Anlagen eine Wirkungsgradsteigerung der BHKW durch Re-Powering auf 32 % - 40 % unterstellt, ergibt sich folgendes Potenzial:

²⁹ Hinweise zu den genannten Verfahren und Möglichkeiten zur Steigerung des Gasanfalls sind u.a. in Schmitt et al. (2018), Remy und Diercks (2016) sowie Engelhart et al. (2018) gegeben.

Tabelle 7.5: Energiepotenziale durch Steigerung der Energieausbeute

	Zus. Faulgas ¹	Jahresprimär- energiemenge ²	Stromerzeugung ³
	[Mio. m ³ /a]	[TWh/a]	[TWh _{el} /a]
Steigerung des Gasanfalls	100,982	0,656	0,210 - 0,263

¹ spez. Faulgasmenge: 30 l/(EW_{Anschluss}*d)
² Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³
³ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 - 0,4

7.4.3 Umstellungspotenzial auf anaerobe Schlammstabilisierung

Bei Anlagengrößen kleiner als 20.000 EW wurden in der Vergangenheit überwiegend Anlagen mit simultan aerober Stabilisierung errichtet, während der Einsatzbereich von anaeroben Stabilisierungsanlagen erst bei Ausbaugrößen von etwa 30.000 EW als wirtschaftlich erachtet wurde. Steigende Energiepreise und fortschreitende Entwicklungen am Markt, die die Investitionskosten senken, tragen dazu bei, die Wirtschaftlichkeit der Schlammfäulung zu erhöhen. Ferner sind Veränderungen im Energierecht entscheidende Faktoren, die über eine Wirtschaftlichkeit entscheiden (z.B. KWK-Umlage). Diese vormals relativ klaren Grenzen haben sich verschoben und es wurde auch für kleinere Anlagen (< 10.000 EW) die Wirtschaftlichkeit nachgewiesen (Schmitt et al. 2010; Gretzschel et al. 2011). Mergelmeyer et al. 2014 zeigen auf, dass ein Betrieb von BHKW-Anlagen auch für Kläranlagen ab ca. 10.000 EW wirtschaftlich interessant ist, um zumindest die teilweise Deckung des Eigenbedarfs zu erreichen.

Für die Potenzialermittlung wird eine Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisierung unter folgenden Voraussetzungen berücksichtigt:

- Ausbaugröße: > 10.000 EW
- Eingesetztes Reinigungsverfahren: Belebtschlammverfahren

Damit kommen 855 Anlagen mit einer Anschlussgröße von rund 23,63 Mio. EW für eine Umstellung auf eine Faulungsanlage in Frage. Nicht berücksichtigt werden hierdurch 199 Anlagen, zu denen keine Angaben über das Reinigungsverfahren vorliegen oder bei denen eine Umstellung ohne weiteres nicht möglich ist (z.B. Pflanzenkläranlagen).

Tabelle 7.6 zeigt die Potenziale durch Umstellung auf Faulungsanlagen. Durch eine Umstellung auf anaerobe Stabilisierung kann deutschlandweit eine zusätzliche elektrische Energiemenge von 0,36 bis 0,67 TWh_{el} erzeugt werden.

Tabelle 7.6: Energiepotenziale durch Umstellung auf anaerobe Schlammstabilisation

	Zus. Faulgas ¹ [Mio. m ³ /a]	Jahresprimär- energiemenge ² [TWh/a]	Stromerzeugung ³ [TWh _{el} /a]
Aerobe Stabilisierung (n = 616)	92,74 – 139,11	0,603 – 0,904	0,193 – 0,362
Andere Belebungsanlagen (n = 239)	79,77 – 119,66	0,518 – 0,778	0,166 – 0,311
Summe Σ	172,51 – 258,77	1,121 – 1,682	0,359 – 0,673

¹ spez. Faulgasmenge: 20 – 30 l/(EW_{Anschluss}*d)
² Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³
³ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

7.4.4 Ausnutzung von Kapazitätsreserven im Faulturm

7.4.4.1 Vergärung von Schlämmen aus Anlagen mit einer Anschlussgröße < 10.000 EW in „Schlammbehandlungszentren“

Eine flächendeckende Umstellung von aeroben Stabilisierungsanlagen auf Faulung birgt zwar ein erhebliches Potenzial zur Energieeffizienzsteigerung, die resultierenden Investitionskosten und Aufwendungen wären jedoch derart hoch, dass eine flächendeckende bautechnische Umrüstung aller Anlagen nicht sinnvoll ist. Allerdings ist festzustellen, dass auf zahlreichen Faulungsanlagen ein zum Teil erhebliches Potenzial im Bereich der Faulraumkapazitäten besteht und dieses genutzt werden könnte und auch sollte. Aerobe Stabilisierungsanlagen < 10.000 EW könnten mit geringerem Schlammalter als sogenannte „Satellitenanlagen“ mit der alleinigen Aufgabe der Abwasserbehandlung (Kohlenstoff- und Nährstoffelimination) betrieben werden. Der nicht stabilisierte Schlamm dieser Anlagen könnte einer nahegelegenen Faulungsanlage mit der entsprechenden Infrastruktur (ausreichend großer Faulbehälter, Verstromung des Gases durch BHKW, Wärmenutzung) zugeführt werden, die als „semizentrales Schlammbehandlungszentrum“ (SBC) betrieben wird (vgl. Hansen et al. 2009).

Zur weiteren Potenzialabschätzung werden die Anlagen mit einer Ausbaugröße von 2.000 EW bis 10.000 EW betrachtet, die ihr Abwasser nach dem Belevungsverfahren reinigen und keine eigene Faulungsanlage besitzen. Deren Anteil macht an der Gesamtanzahl der Kläranlagen in der Bundesrepublik Deutschland über 36% (n = 1.543) aus, jedoch reinigen sie nur rund 6 % des bundesweiten Abwassers (bezogen auf die Anschlussgröße). Ausgenommen wurden dabei Anlagen, die bei der Datenerhebung keine Angaben zum Reinigungsverfahren oder „Sonstiges“ angegeben haben. Unter „Sonstiges“ fallen u.a. Abwasserteiche, Pflanzenkläranlagen, Tropfkörperanlagen und SBR-Anlagen.

Das entstehende Stromerzeugungspotenzial durch die Mitbehandlung dieser „Satellitenanlagen“ ist Tabelle 7.7 zu entnehmen.

Tabelle 7.7: Energiepotenziale durch Ausnutzung von Kapazitätsreserven aus Fremdschlämmen

	Zus. Faulgas ¹	Jahresprimär- energiemenge ²	Stromerzeugung ³
	[Mio. m ³ /a]	[TWh/a]	[TWh _{el} /a]
Schlammbehandlungszentren	46,745 – 70,118	0,304 – 0,456	0,097 – 0,182

¹ Spez. Gasanfall* 20 - 30 l/(EW_{Anschluss}*d)

² Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³

³ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

* Anmerkung: Der spez. Gasanfall von Stabilisierungsanlagen liegt üblicherweise deutlich unter dem von Faulungsanlagen, da meist keine Vorklärung vorhanden ist (vgl. Tabelle 2.4). Im Rahmen der Vereinheitlichung der Potenzialabschätzung wird vereinfacht der spez. Gasanfall von Faulungsanlagen angesetzt. Dies könnte z.B. durch Umbau und Installation einer Vorklärung auf den Satellitenanlagen erreicht werden.

7.4.4.2 Co-Vergärung externer Substrate

Zur Steigerung der Faulgasausbeute können zusätzlich externe Substrate zur Co-Vergärung genutzt werden. Durch optimale Nutzung der Faulraumkapazität und entsprechend geeignetes Substrat könnte die Faulgaserzeugung mehr als verdoppelt werden (UBA 2008). Nachteilig wirken sich allerdings zusätzliche Rückbelastungen auf die biologische Reinigungsstufe sowie betriebliche und rechtliche Probleme bei der Aufbereitung und Annahme des Co-Substrates aus (UBA 2008). Die Randbedingungen hierbei sind u. U. sehr anlagenspezifisch und werden beeinflusst von Anlagenkapazität und -ausbau, demografischen Einflüssen, Strukturwandel in Industrie und Gewerbe, lokale Verfügbarkeit sowie Bemessungsreserven. Zur weiteren Berechnung werden die freien Faulraumkapazitäten abgeschätzt. Die verwendeten Berechnungsgrundlagen sind in Tabelle 7.8 angegeben.

In der Vergangenheit wurde die Faulraumkapazität mit einer mittleren Aufenthaltszeit von 20 bis 30 Tagen bemessen.³⁰ In der Praxis haben sich allerdings Faulzeiten von 18 bis 20 Tagen als vollkommen ausreichend erwiesen (mit ggf. geringerer Faulgasausbeute). Daher wird eine mögliche freie nutzbare Faulzeit von zwei bis sieben Tagen angenommen. Des Weiteren haben Untersuchungen gezeigt, dass im Mittel nur rund 80% der Faulraumkapazität genutzt werden (Roos 2008). Dies bestätigen ebenfalls die Ergebnisse aus den eigenen Auswertungen der Datensätze aus Rheinland-Pfalz.

³⁰ In einer Umfrage für das Land Hessen lag die durchschnittliche Faulzeit sogar bei rund 40 Tagen, also der doppelten Bemessungszeit (UBA 2008). Für Faulbehälter in Rheinland-Pfalz (n = 63) ergaben die Untersuchungen von (Knerr et al. 2016) Aufenthaltszeiten von 27 bis 36 Tage, in Einzelfällen bis zu 90 Tage.

Tabelle 7.8: Datengrundlage zur Abschätzung der Kapazitätsreserven (aus Roos 2008, UBA 2008 und eigene Berechnungen)

Parameter	Einheit	Wert
Schlammanfall	[kg TR/(E*d)]	0,08
	[kg oTR/(E*d)]	0,052
	[m ³ /(E*d)]	0,001
TR Gehalt	[%]	8
oTR Gehalt (v.TR)	[%]	65
Faulzeit	[d]	20 - 30
Raumbelastung	[kg oTR/(m ³ *d)]	2,6
Faulbehältervolumen	[m ³ /E]	0,02
Anaerob behandelte EW	[Mio. E]	104,1
Spez. Gasanfall	[l/kg]	450
Durchschnittliche Faulraumauslastung	[%]	80

Damit ergeben sich Potenziale aus der Reduktion der Aufenthaltszeit im Faulturm für die Zugabe von Co-Substrate von 0,555 bis 1,271 TWh_{el}/a (vgl. Tabelle 7.9).

Tabelle 7.9: Energiepotenziale bei vollständiger Ausnutzung von Kapazitätsreserven mittels externer Co-Substrate (Verfügbarkeit unterstellt)

	Zus. Faulgas ¹	Jahresprimär- energiemenge ²	Stromerzeugung ³
Externe Substrate	[Mio. m ³ /a]	[TWh/a]	[TWh _{el} /a]
100% Faulraumauslastung	177,781	1,156	0,370 – 0,462
Reduktion der Faulzeit (2d – 7d)	88,891 – 311,117	0,578 – 2,022	0,185 – 0,809
Summe Σ	266,77 – 488,90	1,73 – 3,18	0,555 -1,271

¹ Spez. Gasanfall 30 l/(EW_{Anschluss}*d)
² Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³
³ Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

Die Verfügbarkeit einer entsprechenden Substratquelle ist stark von den örtlichen Randbedingungen abhängig und kann nicht pauschal jeder Kläranlage mit Schlammfäulung zugeordnet werden. Bei der Quantifizierung der Substratquellen sind Mehrfachzählungen nicht auszuschließen, da der Markt stark umworben ist und Kläranlagenbetreiber beispielsweise in Konkurrenz mit Biogasanlagen treten. Das Potenzial zur Nutzung externer Substrate ist der Vollständigkeit mit aufgeführt, wird jedoch bei der Gesamtpotenzialermittlung nicht weiter berücksichtigt.

7.4.5 Zwischenfazit: Zusammenfassung der Stromerzeugungspotenziale

Mit der Ausrüstung aller Faulungsanlagen mit KWK, Steigerung der Energieausbeute auf den bestehenden Anlagen, Umstellung auf Faulung von geeigneten Anlagen und der Ausnutzung von Kapazitätsreserven im Faulbehälter könnte die Stromerzeugung deutlich von 1,25 auf bis zu 2,61 TWh_{el} pro Jahr erhöht werden. Dem Gesamtpotenzial nicht hinzugerechnet wurde der Anteil, der durch eine Mitvergärung von Co-Substraten erreicht werden könnte.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 7.10 dargestellt.

Tabelle 7.10: Zusammenfassung der untersuchten Potenziale (Schäfer et al. 2015a)

Potenzialbereich	Zus. Faulgas [Mio. m ³ /a]	Jahresprimärenergie ¹ [TWh/a]	Stromerzeugung ² [TWh _{el} /a]	Mittlere Leistung ³ [MW _{el}]
Ist-Zustand (2012/2013)	644,54	4,49	1,25	142,7
Ausrüstung aller Anlagen mit KWK-Aggregaten	86,74	0,61	0,12 – 0,25	22,4 – 28,0
Steigerung der Energieausbeute	100,98	0,66	0,21 – 0,26	24,0 – 30,0
Umstellung auf Faulung	172,51 – 258,77	1,12 – 1,68	0,36 – 0,67	41,0 – 76,8
Schlammbehandlungszentren	46,75 – 70,12	0,30 – 0,46	0,10 – 0,18	11,1 – 20,8
(Externe Co-Substrate)	(266,67 – 488,90)	(1,73 – 3,18)	(0,56 – 1,27)	(63,3 – 145,1)
Gesamtpotenzial⁴		7,19 – 7,90	2,11 – 2,61	241,1 – 298,2

¹ Energiegehalt Methan: 6,5 kWh/Nm³

² Elektrischer Wirkungsgrad BHKW: 0,32 – 0,4

³ berechnet mit 8760 h/a (Vollbenutzungsstunden) der KWK-Anlagen

⁴ ohne externe Co-Substrate

Abbildung 7.4 zeigt den Verlauf der Stromerzeugung auf Kläranlagen seit 1998 bis zum Bezugsjahr 2012 zusammen mit den berechneten Potenzialen. Zu erkennen ist, dass sich die Stromerzeugung seit 1998 um den Faktor 2,0 bis zum Jahre 2012 bzw. 2,4 bis zum Jahre 2017 erhöht hat. Damit ist die Energieerzeugung um 3 - 4 % pro Jahr konstant gewachsen und belegt das bestehende Bewusstsein der Betreiber für die Erhöhung und die Optimierung der Stromerzeugung auf Kläranlagen. Es ist davon auszugehen, dass in den kommenden Jahren weiterhin sowohl mehr Energie eingespart als auch mehr Strom durch Faulgas erzeugt wird.

Das bundesweite Potenzial zur Stromerzeugung auf Kläranlagen wird insgesamt abgeschätzt auf 2,11 bis 2,61 TWh_{el}/a, welches (für den oberen Wert) eine Erhöhung der Stromerzeugung um den Faktor 2,1 gegenüber dem Bezugsjahr darstellt. Dies entspricht einer mittleren elektrischen Leistung von mindestens 240 MW_{el} bis 300 MW_{el}, die benötigt wird, um das anfallende Faulgas zu verstromen und unter diesen Randbedingungen zur Abschaltung zur Verfügung stehen würde (Schäfer et al. 2015a). Die berechnete Leistung ist somit sehr konservativ einzuschätzen, da eine Auslegung der KWK-Anlagen in der Regel mit einem deutlichen Überbau³¹ an Leistungskapazität erfolgt (siehe Kapitel 7.5.1).

Der Vergleich des Bezugsjahres 2012 mit den aktuell vorliegenden Daten von 2017 (Stand 2018; vgl. Tabelle 7.11) bestätigt die getroffenen Annahmen hinsichtlich der Entwicklung von Wirkungsgraden, Faulgasanfall und Anzahl stromerzeugender Anlagen. Die vorstehenden Ausführungen zeigen allerdings auch, dass noch große Potenziale auf Kläranlagen zu erschließen sind und die deutsche Abwasserwirtschaft sich in die prognostizierte Richtung entwickelt.

Tabelle 7.11: Gewinnung und Verwertung von Faulgas in Deutschland in den Jahren 2012 – 2017 (DESTATIS 2018a)

Jahr	Fallzahl	Faulgas	Stromerzeugung
	[-]	[Mio. m ³]	[TWh _{el} /a]
2012	1.232	810,72	1,25
2013	1.240	817,29	1,29
2014	1.253	834,79	1,35
2015	1.252	857,38	1,40
2016	1.258	874,09	1,45
2017	1.258	889,46	1,49

³¹ Unter einem Überbau an Kraftwerksleistung wird die Installation einer höheren Leistung oder größerer Speicherkapazität als tatsächlich benötigt verstanden.

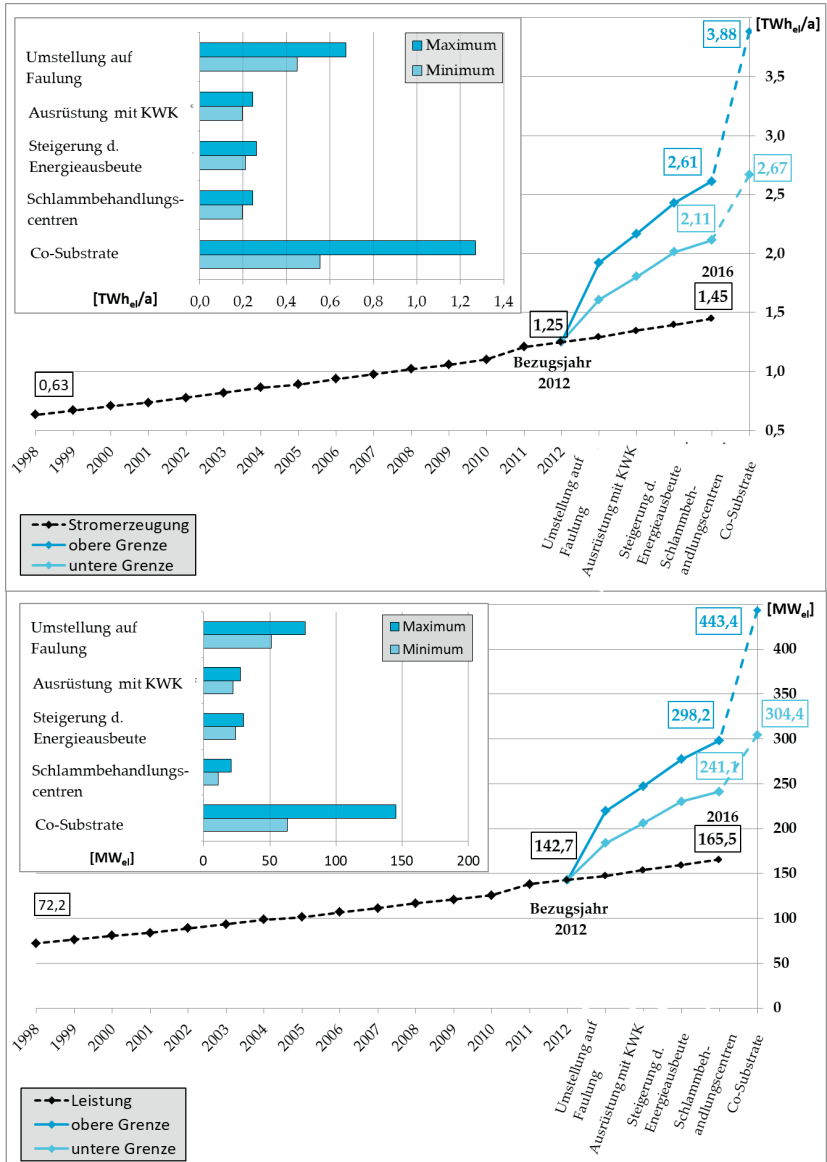


Abbildung 7.4: Verlauf der Stromerzeugung auf Kläranlagen mit den untersuchten Potenzialen in TWh_e/a sowie der Leistung in MW_e (erweitert und verändert nach Schäfer et al. 2015a)

7.5 Flexibilitätspotenziale kommunaler Kläranlagen in Deutschland

7.5.1 Flexibilität durch KWK-Anlagen

Zur Abschätzung des bundesweiten Flexibilitätspotenzials der Faulungsanlagen sind neben den Daten zur Energieerzeugung detaillierte Werte über den Gasanfall, das Speichervolumen und die Größe der KWK-Anlagen erforderlich. Dazu wird auf die Rohdatengrundlagen der Studien aus Nordrhein-Westfalen (Mergelmeyer et al. 2014; n=178) und Rheinland-Pfalz (Knerr et al. 2016; n=64) zurückgegriffen (vgl. Kapitel 7.2). Für die Ermittlung der Flexibilitätspotenziale der KWK-Anlagen standen somit in Summe 239 detaillierte Datensätze von Kläranlagen mit Faulung in unterschiedlichen Größenklassen zur Verfügung. In Tabelle 7.12 sind die relevanten Kennwerte zur Potenzialermittlung aufgeführt.

Tabelle 7.12: Ermittelte Kennwerte zur Potenzialabschätzung „Flexibilität“ in Abhängigkeit der Größenklassen (Schäfer et al. 2017a)

Parameter	Symbol	Einheit	GK 1-3*	GK 4*	GK 5*
Anzahl ausgewerteter Anlagen*	n	[-]	16	176	47
Faulgasproduktion*	$Q_{FG,d}$	[Nm ³ /d]	240,4	614,1	3.451,3
Gasspeicher*	V_{Sp}	[m ³]	75	270	1.000
Spezifisches Gasspeichervolumen*	v_{Sp}	[l/Eausbau]	8,80	8,33	6,71
Wirkungsgrad BHKW*	η_{el}	[-]	31,3	32,0	35,0
Installierte BHKW-Nennleistung*	P	[kW]	112,0	267,9	1.049,2
Elektrische Anschlussleistung BHKW*	P_{el}	[kW _{el}]	35	90	337
Spez. elektrische Leistung BHKW*	$P_{el,spez}$	[W/E]	4,06	2,15	2,00
Max. Gasverbrauch BHKW ¹	Q_{BHKW}	[Nm ³ /h]	16,66	40,27	158,97
Zeit bis Speicher geleert ² (bei Nennleistung inkl. Gasproduktion)	$t_{Entleerung}$	[h]	6,43	8,22	7,62
Zeit bis Speicher gefüllt ³	$t_{Füllung}$	[h]	8,25	11,74	8,85

* Medianwert aus der Datenerhebung

$$^1 \text{ Berechnet über: } Q_{BHKW} = \frac{P [kW]}{H_{i,Faulgas} \left[\frac{kJ}{m^3} \right]}$$

$$^2 \text{ Berechnet über: } t_{Entleerung} = \frac{Q_{FG,d} \left[\frac{m^3}{d} \right]}{24 \cdot Q_{BHKW} \left[\frac{m^3}{h} \right]} + \frac{V_{Sp} [m^3]}{Q_{BHKW} \left[\frac{m^3}{h} \right]}$$

$$^3 \text{ Berechnet über: } t_{Füllung} = \frac{V_{Sp} [m^3]}{Q_{FG,d} \left[\frac{m^3}{h} \right]}$$

Diese je Größenklasse zusammengestellten Kennwerte werden für die Ermittlung des Flexibilitätspotenzials der Kläranlagen in Deutschland verwendet. Die Vorgehensweise hierzu ist in Abbildung 7.5 schematisch dargestellt.

Die Produktion elektrischer Energie schwankt sehr stark abhängig von der Anlagengröße und den Randbedingungen. Dadurch variieren auch die Anschlussleistungen der KWK-Anlagen, welche für die Flexibilitätsbereitstellung maßgebend sind. Auf Basis der Einwohnerwerte je Größenklasse und der installierten Leistung pro EW (siehe Tabelle 7.12) kann in Summe eine bundesweit installierte KWK-Leistung auf kommunalen Kläranlagen von derzeit rund 215 MW_{el} abgeschätzt werden. Über den Faulgasanfall und den Gasverbrauch ist es möglich die Zeit bis zur Speicherfüllung bzw. –entleerung zu ermitteln und mit der entsprechenden Leistung die Speicherkapazität respektive die verschiebbare Energiemenge zu errechnen.

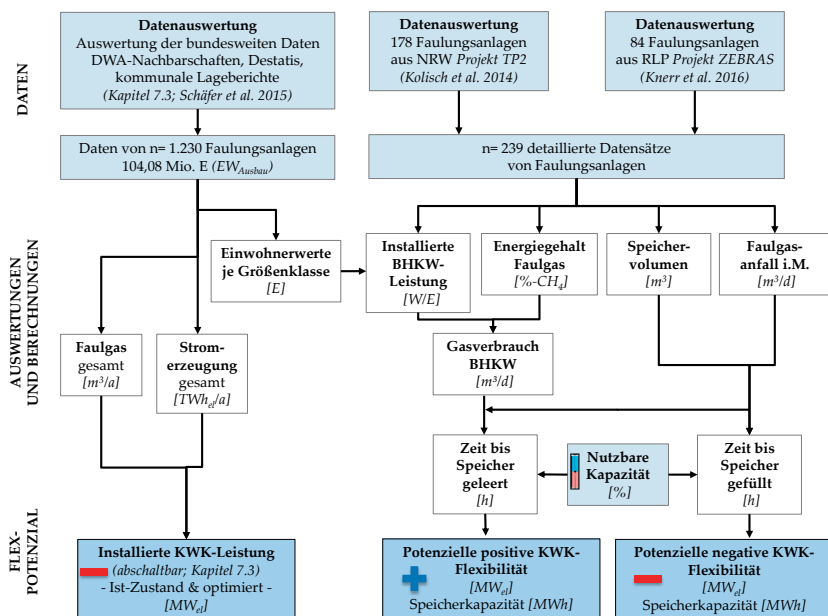


Abbildung 7.5: Vorgehen zur Ermittlung der KWK-Flexibilität (verändert nach Schäfer et al. 2017a)

Die theoretisch verschiebbare Energiemenge der bundesweiten Kläranlagen liegt demnach zwischen +1,69 GWh und -2,15 GWh (vgl. Tabelle 7.13). In einem zukünftig optimierten Zustand, wie in Kapitel 7.4 beschrieben, werden als mittlere installierte KWK-Leistung mindestens 241 MW_{el} bis 300 MW_{el} zur Verstromung des anfallenden Faulgases benötigt.

Die ausgewerteten Daten zeigen, dass ein Überbau an Leistung, je nach Größenklasse, von 30 % bis 60 % auf den Anlagen vorliegt. Dies würde die zukünftig theoretisch verfügbare Leistung auf Basis des Optimierungsszenarios aus Kapitel 7.4 auf 313 MW_{el} bis 473 MW_{el} erhöhen.

Tabelle 7.13: Potenziale der installierten Leistung sowie der theoretischen zu- und abschaltbaren Energiemengen (unter voller Ausnutzung des Gasspeichers) (Schäfer et al. 2017a)

Größenklasse	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
Summe Σ	104.075.432	214,98	1.685,59	2.146,35

Die potenzielle Flexibilität des Betriebs der KWK-Anlagen ergibt sich insbesondere aus der Kapazität der Gasspeicher und deren Bewirtschaftung unter Berücksichtigung des Gasanfalls sowie der Gasnutzung. Erst die Entkopplung des kontinuierlichen Gasanfalls im Faulturm vom Betrieb der KWK-Anlage durch eine Speichereinheit ermöglicht eine flexible Nutzung. Die Dauer der möglichen Leistungserbringung wird dabei maßgebend von der Speichergröße bestimmt. Die Daten zeigen, dass bei leerem Speicher das anfallende Klärgas auf den Anlagen etwa 8 bis 12 Stunden zwischengespeichert werden kann bzw. bei vollem Speicher etwa 6 bis 8 Stunden Strom erzeugt werden kann (vgl. Tabelle 7.12).

Für eine weitergehende Abschätzung der Auswirkung des Füllungsgrades im Gasspeicher auf die Verwendung des Faulgases als Flexibilitätsoption ist die nutzbare Kapazität des Gasspeichers näher zu untersuchen. In den bisherigen Betrachtungen ist die vollständige Nutzung des Gasspeichers angenommen. Allerdings sollte der Gasspeicher, technisch bedingt weder komplett leer noch vollständig gefüllt (Notwendigkeit des Abfackelns) sein. Daher wird zu einer realistischeren Einschätzung die Annahme getroffen, dass effektiv 90% des Speichervolumens zur Verfügung stehen. Die Auswirkungen des Füllungsgrades auf die ermittelten Potenziale sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Je nach Speicherbewirtschaftung ändert sich die verschiebbare Energiemenge. Bei einem Füllstand von 40% ergeben sich beispielsweise +0,59 GWh bis -1,18 GWh die potenziell zur Verfügung stehen.

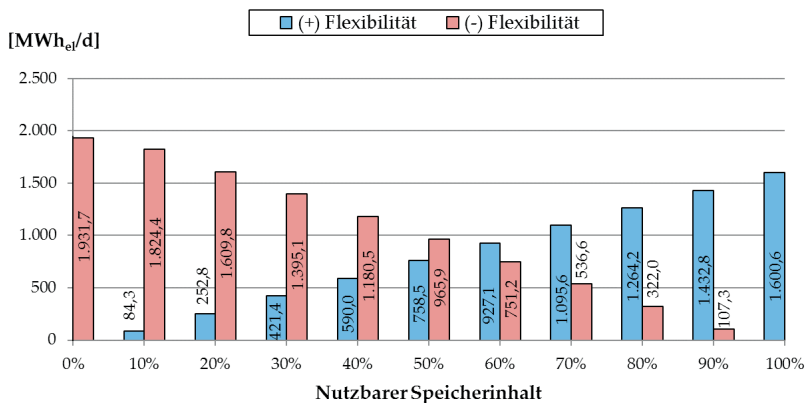


Abbildung 7.6: Potenziale verschiebbarer Energiemengen in MWh/d in Abhängigkeit des Füllstandes bei einer max. Gasspeicherausnutzung von 90% (verändert nach Schäfer et al. 2017a)

Vergrößerung der Klärgasspeicher

Die BHKW mit ihren zugehörigen Gasspeichern sind die zentrale Einheit zur Bereitstellung von Flexibilität auf Kläranlagen (vgl. Kapitel 6.1.4). Ausgelegt sind diese üblicherweise zur Produktion von Strom und Wärme auf einen konstanten Betrieb, der ein deutlich kleineres vorzuhaltendes Volumen notwendig macht als eine dynamische Fahrweise mit längeren Stillstandszeiten der KWK-Einheiten. Vor dem Hintergrund einer flexiblen, anpassungsfähigen Fahrweise sind solche minimal ausgelegten Speichervolumina nicht mehr zeitgemäß. Die Auswertungen des Ist-Zustandes zeigen, dass die bundesweiten Kläranlagen nur ca. 6 Stunden (positive Flexibilität) bis 12 Stunden (negative Flexibilität) Klärgas zwischenspeichern und damit Energie verschieben können. Durch den stetigen Zubau von regenerativen Energieerzeugern auf den Kläranlagen wie z.B. Photovoltaik oder Windkraft können zusammen mit einer immer weiter optimierten Faulgasverwertung Situationen entstehen, bei denen ungewollt der eigens produzierte Strom ins Netz einspeist wird. Während eine Substitution von netzbezogenem Strom üblicherweise immer wirtschaftlich ist, liegen die Gestehungskosten des eigens produzierten Stroms meist über der Einspeisevergütung. Erreicht der Gasspeicher einen kritischen Füllstand, gerät der Betreiber unter Handlungsdruck und wird gegebenenfalls zur Verstromung zu ungünstigen Last- bzw. Strompreisen gezwungen und benötigtes Gas steht in Defizitzeiten nicht zur Verfügung.

Für eine am Strommarkt angepasste Betriebsführung der KWK-Anlagen, aber auch zur Abdeckung des variierenden Stromverbrauchs im Tagesgang, ist das für die Flexibilität nutzbare Gasspeichervolumen die maßgebende und sensitive Einflussgröße. Mit einer Vergrößerung des Klärgasspeichers werden zusätzliche Freiräume geschaffen, um flexibel auf Last- und Preisschwankungen reagieren zu können. Zwangsläufig

wird ein entsprechendes Bewirtschaftungskonzept notwendig sein, um sowohl genügend Faulgas (Sicherstellung der Strom- und Wärmeversorgung) als auch ausreichend freies Gasspeichervolumen zur Flexibilitätsbereitstellung vorzuhalten. Dies setzt ein umfängliches Wissen der eigenen Gasproduktion und des Verbrauchs sowie dessen zeitliche Beeinflussung voraus.

Exemplarisch wird nachstehend die Auswirkung einer Vergrößerung der Klärgasspeicher auf die mögliche Energieverschiebung aufgezeigt. Demnach würde eine Verdopplung der Speichervolumina, je nach Größenklasse, mit einer Erhöhung der Speicherzeit auf ca. 12 Stunden (positive Flexibilität) bis 22,5 Stunden (negative Flexibilität) einhergehen und die theoretisch verschiebbare Energiemenge (im Median, unter voller Ausnutzung des Speichervolumens) auf 3.161 MWh_{el}/d (zuschaltbar) und 4.127 MWh_{el}/d (abschaltbar) ansteigen (vgl. Tabelle 7.14). Dies zeigt, dass selbst bei einer Verdopplung der vorhandenen Speichergrößen der Handlungsspielraum für eine flexible Fahrweise unter erstrebenswerten 24 Stunden liegt. Damit weist der aktuelle Bestand für das Anliegen einer weitergehenden Flexibilitätsnutzung deutlich unzureichende Speichergrößen auf und besitzt ein noch großes Potenzial hinsichtlich der Speicherung von Energie. Eine Vergrößerung des Klärgasspeichers sollte bei einer anstehenden Investition im Rahmen der Gasverwertung als Chance genutzt und untersucht werden, um die Flexibilitätspotenziale der Anlage zu erhöhen und nutzen zu können. Innovative Alternativen zur Vergrößerung des Gasspeichers wäre ein Ausbau des Substratspeichers für eine angepasste Beschickung des Faulbehälters (siehe hierzu z.B. Hien 2017; Engelhart et al. 2018) oder die Speicherung überschüssigen Stroms mit Hilfe eines Batteriespeichers. Beide Varianten sind allerdings unüblich auf Kläranlagen und individuell näher zu untersuchen.

Tabelle 7.14: Befüllungs- und Entleerungszeiten sowie zu- und abschaltbare Energiemengen der bundesweiten Anlagen bei Verdopplung des Klärgasspeichervolumens

Größenklasse	t _{Entleerung} (Median)	t _{Füllung} (Median)	Zuschaltbare Energiemenge	Abschaltbare Energiemenge
	[h]	[h]	[MWh/d]	[MWh/d]
GK 1-3	12,1	16,5	26,19	35,73
GK 4	15,6	22,5	1.322,25	1.902,17
GK 5	14,1	17,1	1.812,23	2.188,66
Summe Σ	-	-	3.160,67	4.126,56

7.5.2 Potenziermittlung der Aggregate im Klärprozess

Neben den Stromerzeugungsanlagen können auf Kläranlagen ebenfalls die Aggregate zur Reinigung des Abwassers sowie der Schlammbehandlung genutzt werden, um Flexibilität bereit zu stellen. Die Voraussetzungen und Randbedingungen hierzu wurden in den vorigen Kapiteln ausführlich beschrieben. Die Auswertungen, die Kolisch et al. (2014) zugrunde liegen, liefern eine solide Datengrundlage aus Energieanalysen ($n = 178$), um baugruppenspezifische Leistungen in Abhängigkeit der angeschlossenen Einwohner abzuleiten. Bei den aggregatspezifischen Potenzialen wurden nicht wie in den vorherigen Kapiteln die angeschlossenen Einwohner der Faulungsanlagen, sondern die aller Belebungsanlagen berücksichtigt, da das Lastverschiebungspotenzial weitestgehend unabhängig von der Art der Schlammbehandlung ist. Die Prozesse, verfahrenstechnischen Umsetzungen und die dazu eingesetzten Aggregate sind nahezu identisch (vgl. Kapitel 2.3 und Kapitel 4). Für Anlagen mit simultaner aerober Stabilisation bestehen hauptsächlich Unterschiede durch das höhere Schlammalter und die damit verbundene höhere Verweilzeit in der biologischen Stufe. Für diese Anlagen ergeben sich dadurch deutlich längere mögliche Abschaltauern, beispielsweise der Belüftungsaggregate. Das Vorgehen zur Ermittlung der Potenziale ist in Abbildung 7.7 dargestellt.

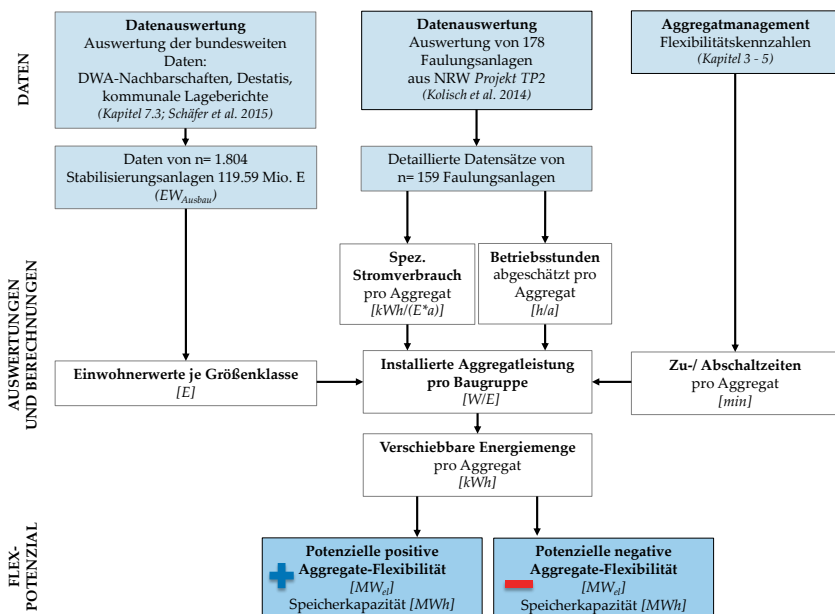


Abbildung 7.7: Vorgehen zur Ermittlung der Aggregateflexibilität

Um das Flexibilitätspotenzial der einzelnen Verbrauchergruppen der Kläranlagen abzuschätzen, wird im ersten Schritt aus dem Jahresverbrauch und den Betriebsstunden die aggregatspezifische Leistung berechnet. Da sich der Stromverbrauch der Aggregatgruppen jedoch auf mehrere Einzelaggregate verteilt und diese im Regelfall unterschiedlich betrieben werden, werden die Jahresbetriebsstunden hauptsächlich über den Hauptverbraucher in jeder Aggregatgruppe abgeschätzt (vgl. Tabelle 7.16). Auf Basis dieser Annahmen wurde der mittlere Stromverbrauch getrennt für die Kläranlagengrößen GK 1-3, GK 4 und GK 5 in eine aggregatspezifische mittlere Leistung umgerechnet. Im Rahmen der Aggregatanalyse wurden in Kapitel 4 (siehe auch Kapitel 6.1.5) Zeitfenster ermittelt, in denen bestimmte Aggregate zu- bzw. abgeschaltet werden können. Daraus lassen sich die verschiebbaren Energiemengen in positiver bzw. negativer Richtung berechnen (vgl. Tabelle 7.15). Die nutzbaren Aggregatgruppen sowie die entsprechenden Kennwerte zur Ermittlung des Flexibilitätspotenzials sind in Tabelle 7.16 dargestellt.

Anzumerken ist, dass hierbei nicht alle Bau- und Aggregatgruppen berücksichtigt werden können. In der Potenzialabschätzung nicht berücksichtigt werden z.B. Rechen, Vorklärung, Filtration sowie die Infrastruktur (Betriebsgebäude, Beleuchtung etc.), da diese auf übergeordneter, bundesweiter Ebene nur ein schwer quantifizierbares Potenzial darstellen. Insbesondere allgemeingültige Annahmen für diese Baugruppen zu treffen erscheint äußerst schwierig und nicht zielführend.

In Summe ergibt sich eine abschaltbare Leistung von rund 356 MW_{el} und eine zuschaltbare Leistung von 123 MW_{el}. Die verschiebbaren Energiemengen belaufen sich (bei einem Abruf/Nutzung pro Tag) auf 36 – 360 MWh_{el} positiver und 184 – 245 MWh_{el} negativer Flexibilität pro Tag (vgl. Tabelle 7.15). Die Ergebnisse zeigen, dass Kläranlagen insbesondere bei der negativen Flexibilität mit ihren vorhandenen Aggregaten trotz konservativer Annahmen beachtliche Potenziale aufweisen.

Tabelle 7.15: Zusammengefasste Ergebnisse der ab- und zuschaltbaren Leistungen sowie Energiemengen der Aggregate aller deutschen Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren

Größenklasse	EW _{Ausbau}	Zuschaltbare Leistung	Abschaltbare Leistung	Zuschaltbare Energiemenge	Abschaltbare Energiemenge
	[E]	[MW _{el}]	[MW _{el}]	[MWh/d]	[MWh/d]
GK 1-3	2.387.288	4,55	13,45	1,48 – 13,55	5,38 – 7,14
GK 4	45.565.387	50,38	152,87	15,65 – 154,96	70,14 – 94,24
GK 5	71.636.584	67,97	189,68	18,40 – 191,11	108,73 – 143,54
Summe Σ	119.589.259	122,90	355,99	35,53 – 359,61	184,25 – 244,91

Die nach Aggregatgruppen und Einzelaggregaten aufgeschlüsselten Ergebnisse der Potenzialabschätzung sind in Tabelle 7.16 und Tabelle 7.17 dargestellt.

Tabelle 7.16: Spezifische Aggregatleistungen, Betriebsstunden, Abschalt-dauern und Lastabwurfpotenzial je Aggregatgruppe

Aggregatgruppe	Spez. Stromverbrauch ¹		Betriebsstunden ²		Spezifische Aggregateleistung		Ab-schalt-dauer		Zuschalt-dauer		Spezifisches Lastabwurfpotenzial				
	GK1-3	GK4	GK5	[h/d]	[h/a]	GK1-3	GK4	GK5	min	max	min	max	GK1-3	GK4	GK5
Sandfang	3,97	1,11	0,52	24	8.760	0,45	0,13	0,06	5	60	5	60	0,038 - 0,453	0,011 - 0,126	0,005 - 0,059
Befüllung	20,58	15,58	13,82	24	8.760	2,35	1,78	1,58	5	60	-	-	0,196 - 2,35	0,148 - 1,778	0,131 - 1,577
Umwälzung	8,79	4,06	2,20	24	8.760	1,00	0,46	0,25	15	30	15	40	0,251 - 0,502	0,116 - 0,231	0,063 - 0,126
Rezirkulation	4,09	1,45	1,20	24	8.760	0,47	0,17	0,14	5	30	-	-	0,039 - 0,233	0,014 - 0,083	0,011 - 0,069
Rücklaufschlamm-förderung	4,69	2,62	2,17	24	8.760	0,54	0,30	0,25	5	120	-	-	0,045 - 1,071	0,025 - 0,599	0,021 - 0,495
Abwasserhebewerke	4,39	3,39	2,68	24	8.760	0,50	0,39	0,31	5	30	-	-	0,042 - 0,25	0,032 - 0,193	0,026 - 0,153
Nachklärung (nur ÜSS-Pumpe ³)	0,96	0,47	0,23	6	2.190	0,44	0,21	0,10	5	120	-	-	0,036 - 0,872	0,018 - 0,429	0,009 - 0,205
Voreindickung	0,56	0,70	0,86	12	4.380	0,13	0,16	0,20	-	-	120	240	-	-	-
Stabilisierung / Faulung	6,82	2,67	1,60	24	8.760	0,78	0,30	0,18	15	30	15	30	0,195 - 0,389	0,076 - 0,152	0,046 - 0,091
Nacheindickung	0,38	0,16	0,04	12	4.380	0,09	0,04	0,01	-	-	120	240	-	-	-
Entwässerung	2,34	1,53	1,54	8	2.920	0,80	0,52	0,53	-	-	120	120	-	-	-

¹ Datenquelle: Kollisch et al. 2014; Median nach GK

² geschätzt für Hauptverbraucher

³ Annahme: ÜSS-Pumpen entsprechen rund 50% des Verbrauchs der Nachklärung

Tabelle 7.17: Berechnete ab- und zuschaltbare Leistungen und Energiemengen je Aggregatgruppe

	(+ Lastabwurf										(-) Lasterhöhung							
	Leistung		Abschaltbare Energiemenge ¹					Abschaltbare Energiemenge ¹										
	GK 1-3 [MW]	GK 4 [MW]	GK 5 [MW]	GK 1-3 [kWh]	GK 4 [kWh]	GK 5 [kWh]	GK 1-3 [MW]	GK 4 [MW]	GK 5 [MW]	GK 1-3 [kWh]	GK 4 [kWh]	GK 5 [kWh]						
Sandfang	1,08	5,75	4,25	90,21	1.082,5	479,4	5.753,3	354,4	4.252,4	-	-	-	-	-	-			
Belüftung	5,61	81,04	113,00	467,44	5.609,2	6.753,0	81.035,8	9.416,9	113.002,5	-	-	-	-	-	-			
Umwälzung	1,20	10,55	9,02	299,45	598,9	2.636,9	5.273,8	2.253,9	4.507,7	1,20	10,55	9,02	299,45	798,53	2.636,89	7.031,71	2.253,87	6.010,32
Rezirkulation	1,11	7,55	9,85	92,85	557,1	629,0	3.774,2	820,7	4.924,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rücklaufschlamm- förderung	1,28	13,64	17,73	106,52	2.556,5	1.136,7	27.279,8	1.477,8	35.467,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Abwasser- hebwerke	1,20	17,62	21,93	99,58	597,5	1.468,4	8.810,1	1.827,6	10.965,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nachklärung (nur USS-Pumpe ²)	1,04	9,78	7,36	86,75	2.082,1	814,9	19.557,8	613,3	14.719,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Voreindickung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,30	7,28	14,03	605,41	1.210,82	14.557,84	29.115,69	28.060,79	56.121,57
Stabilisierung/ Faulung	0,93	6,94	6,53	232,17	464,3	1.735,8	3.471,7	1.633,2	3.266,3	0,93	6,94	6,53	232,17	464,34	1.735,84	3.471,68	1.633,17	3.266,34
Nachendickung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,21	1,70	0,68	415,49	830,99	3.406,18	6.812,35	1.363,47	2.726,95
Entwässerung	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,92	23,90	37,71	3.831,77	3.831,77	47.805,52	47.805,52	75.415,24	75.415,24
Summe Σ	13,45	152,87	189,68	1.475,0	13.548,2	15.654,1	154.956,3	18.397,7	191.106,3	4,55	50,38	67,97	5.384,3	7.136,5	70.142,3	94.236,9	108.726,5	143.540,4

Berechnet auf Grundlage aller dem Belebtschlammverfahren angeschlossenen Einwohner.

¹ Bei einer Abschaltung pro Tag² Annahme: USS-Pumpen entsprechen rund 50% des Verbrauchs der Nachklärung

7.5.3 Potenzialermittlung der Netzersatzanlagen

Netzersatzanlagen als Flexibilitätsdienstleister sind bereits heute Stand der Technik. Allerdings ist aufgrund fehlender rechtlicher Regelungen bzgl. des Vorhandenseins sowie der vorzuhaltenden installierten Leistung von NEA auf Kläranlagen die Datenverfügbarkeit gering. Als Grundlage zur Ermittlung des Potenzials der NEA werden die Daten aus Rheinland-Pfalz (vgl. Kapitel 7.2.3) herangezogen. Sie bestehen aus 84 Datensätzen, von denen 64 Angaben zu NEA enthalten. Diese Grundlage wurde um 6 zusätzliche Datensätze des Wupperverbandes aus Nordrhein-Westfalen ergänzt, um die Datenbasis zu erhöhen. Die ermittelten relevanten Kenngrößen sind Tabelle 7.18 zu entnehmen.

Tabelle 7.18: Auswertung relevanter Kenngrößen zu NEA auf Kläranlagen (Schäfer et al. 2017a)

Parameter	Symbol	Einheit	GK 1-3	GK4*	GK5*
Anzahl Anlagen	n	[-]	0	32	7
Nennleistung	P	[kVA]	-	323	1.000
Spez. Nennleistung	p_{spez}	[KVA/E]	-	8,94	2,50
Leistungsfaktor		[-]		0,8	
Wirkleistung	P_{el}	[kW]	-	258	800

* Medianwert aus der Datenerhebung

Die Auswertungen zeigen, dass rund 53 % der Anlagen eine NEA vorhalten (keine Angabe: n = 20). Davon wird rund die Hälfte netzparallel betrieben und eignet sich damit zur Interaktion mit Energienetzen und um Flexibilität bereit zu stellen. Die Anlagen der GK 1 - 3 können aufgrund einer zu geringen Datengrundlage nicht hinreichend quantifiziert und somit nicht in der Potenzialermittlung berücksichtigt werden. Allerdings ist davon auszugehen, dass auf Anlagen dieser Größenklassen nur wenige NEA vorhanden sind. In Keicher et al. (2007) gaben bspw. nur 4% der Anlagen der GK 1 - 3 in Baden-Württemberg an eine NEA vorzuhalten. Durch fehlende rechtliche Rahmenbedingungen sind den Betreibern keine Vorgaben zur Auslegung der NEA vorgeschrieben und diese können, je nach eigenem Sicherheitsbefinden, beliebig groß ausgelegt werden. Als Hilfsgröße zur Berechnung der Potenziale wird die spez. Nennleistung der NEA (p_{spez}) je Größenklasse aus der Datenauswertung herangezogen (siehe Tabelle 7.18) und analog zu den vorigen Kapiteln mit den EW_{Ausbau} verrechnet. Die Ergebnisse der Potenzialuntersuchung sind in Tabelle 7.19 dargestellt.

Tabelle 7.19: Potenzial positiver Flexibilität durch NEA im Ist-Zustand (nach Schäfer et al. 2017a)

	EW _{Ausbau}	Nennleistung	Leistung	Verschiebbare Energienmenge
	[E]	[kVA]	[MW _{el}]	[MWh/d]
GK 4	39.402.713	84.199,1	67,4	33,2
GK 5	64.139.584	38.333,4	30,7	15,1
Summe Σ	103.542.297	122.532,6	98,0	48,3

Eine energetische Optimierung von Kläranlagen umfasst nicht nur eine Erhöhung der Stromerzeugung und den Einsatz effizienterer Aggregate, sondern auch die Verbesserung der elektrischen Versorgungssicherheit. Durch ein gesteigertes Bewusstsein zur Absicherung der Anlagen vor möglichen Stromausfällen und dem damit einhergehenden Risiko einer vermeidbaren zusätzlichen Gewässerbelastung wird mit einem Anstieg der vorgehaltenen NEA auf Kläranlagen zu rechnen sein. Insbesondere bei zusätzlichen Nutzungsoptionen und Erlösmöglichkeiten.

Zur Abschätzung zukünftiger Leistungsgrößen und Energiemengen werden dazu folgende Annahmen zugrunde gelegt:

- **Netzparallelität:** Steigerung durch Neuanschaffungen von 50 % auf 75 %, da ein Inselbetrieb keine Zusatzerlöse zulässt und Netzparallelität angestrebt wird.
- **Leistung:** Die (benötigte) elektrische Leistung der NEA wird sich auch zukünftig nicht signifikant erhöhen und wird größenklassenspezifisch unverändert bleiben.
- **Verfügbarkeit:** Steigerung des Anteils von KA mit NEA von 54 % auf 60 % (GK 4) bzw. auf 70 % (GK 5).

Tabelle 7.20: Mögliche Entwicklung des Potenzials von NEA auf KA (nach Schäfer et al. 2017a)

	EW _{Ausbau}	Nennleistung	Leistung	Verschiebbare Energienmenge
	[E]	[kVA]	[MW _{el}]	[MWh/d]
GK 4	39.402.713	158.492,5	126,8	62,5
GK 5	64.139.584	84.183,2	67,4	33,2
Summe Σ	103.542.297	242.675,7	194,1	95,7

NEA bieten gemäß den vorliegenden Daten ein großes Potenzial für positive Flexibilität ohne größeren technischen und organisatorischen Aufwand. So könnte zukünftig unter positiven Randbedingungen die angebotene Leistung von 98 MW_{el} auf 194 MW_{el} nahezu verdoppelt werden. Bei einer maximalen Laufzeit von 15 h/Monat bzw. 180 h/a (§4, StromGVV 2016) und ausreichend vorgehaltenem Brennstoff ergibt sich theoretisch eine verschiebbare Energiemenge von ca. 35.000 MWh pro Jahr.

7.5.4 Individuelle Betrachtung der möglichen Flexibilitätspotenziale

In den vorstehenden Kapiteln wurden die Potenziale auf bundesweiter Ebene zur Positionsbestimmung am Energiemarkt berechnet, welche nicht ohne pauschalisierter Annahmen erfolgen kann. Vor allem die in Kapitel 7.5.2 dargestellten Potenziale der Aggregate im Reinigungsbetrieb und der Schlammbehandlung können aufgrund ihres sehr individuellen Betriebs und deren Einbindung die sehr unterschiedlichen Randbedingungen auf den verschiedenen Anlagen nur schwer abbilden. Aufgrund der nicht gewährleisteten Übertragbarkeit der getroffenen Annahmen mancher Aggregatgruppen wurden daher mit einer Abschaltung pro Tag sehr konservativ die minimalen verschiebbaren Energiemengen ermittelt. Dies ist auf übergeordneter Ebene für eine erste Einschätzung durchaus ausreichend, unterschätzt das tatsächliche Lastverschiebungspotenzial einzelner Aggregat(-gruppen) allerdings erheblich. Dennoch ist es möglich bei höherer Informationsgüte exaktere anlagenspezifische Flexibilitätspotenziale zu berechnen.

Insbesondere der fehlende Bezug der stark streuenden zu- und abschaltbaren Zeiten (von wenigen Minuten bis Tage) in einem einheitlichen zeitlichen Kontext erschwert eine exaktere Berechnung. Benötigt wird eine mögliche Anzahl von Abrufen innerhalb einer bestimmten Zeitspanne. Diese Komponente kann sich als durchaus anspruchsvoll in ihrer Bestimmung erweisen, da sie von unterschiedlichsten Faktoren abhängig sein kann. Dies macht eine detaillierte Untersuchung des Einzelaggregats und dessen Einbindung in den Betrieb der Anlage erforderlich.

Nach Formel 7.4 lassen sich für unterschiedliche zu- und abschaltbare Zeiten für jedes Aggregat verschiebbare Energiemengen über eine definierte Bereitstellungsdauer berechnen.

Verschiebbare Energiemenge:

$$\Delta W_{el,i} = P_{el,i} * n_i * t_{Flex,i} = P_i * \frac{x}{t_{Flex,i} + t_{Reg,i}} * t_{Flex,i} \quad [kWh_{el}] \quad (\text{Formel 7.4})$$

Mit: $P_{el,i}$ = Wirkleistung des Aggregats in kW_{el}
 n_i = mögliche Anzahl an Abrufen bezogen auf x Stunden
 x = Bereitstellungsdauer in Stunden
 $t_{Flex,i}$ = Flexibilitätsdauer (min./max. der zu- bzw. abschaltbaren Zeit)
 t_{Reg} = Regenerationszeit

Damit lassen sich die unterschiedlichen Randbedingungen auf eine (beliebige) einheitliche Bereitstellungsdauer umrechnen und zusammenführen. Dies ermöglicht eine Aussage zum Flexibilitätspotenzial, unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Randbedingungen der Nutzungsoptionen - z.B. auf eine 4-Stunden-Zeitscheibe am Regelleistungsmarkt (MRL/SRL) oder auf 12 bzw. 24-Stunden bezogen auf den Day-Ahead-Handel. Die verschiebbaren Energiemengen ergeben sich aus der Multiplikation der Wirkleistung mit der möglichen Flexibilitätsdauer und der möglichen Abrufe bezogen auf x Stunden (n_i). Ohne zusätzliche Restriktionen lässt sich dieser Faktor aus der Bereitstellungsdauer und der Dauer eines Abrufvorgangs (Summe aus Regenerationszeit und zu- bzw. abschaltbarer Zeit) errechnen. Je nach Dauer der Abrufe ergibt sich eine Spanne der möglichen Anzahl von Abrufen in der betrachteten Bereitstellungsdauer. Sollten allerdings zusätzliche Restriktionen vorhanden sein, muss dieser Wert individuell reglementiert werden. Dies wird bspw. erforderlich durch eine maximale Abrufdauer pro Tag (Zentrifuge, BHKW), max. Laufzeit pro Jahr (NEA) oder bei größerer Regenerationszeit als die angestrebte Bereitstellungsdauer. Damit können ebenfalls unterschiedliche Marktbedingungen abgebildet werden, indem die Bereitstellungsdauer entsprechend festgelegt und deren Auswirkungen auf die Flexibilitätsbereitstellung berücksichtigt wird.

Exemplarisch wird nachfolgend für eine fiktive Anlage der GK 4 (50.000 EW^{Anschluss}) für die RLS-Pumpen, die Rührwerke (biol. Stufe), der Entwässerungsaggregate sowie der BHKW und der NEA das individuelle Flexibilitätspotenzial für eine Bereitstellungsdauer von 4 Stunden berechnet (vgl. Tabelle 7.21).

Dieses Vorgehen könnte sich als sinnvolle Ergänzung im Rahmen einer Energiestudie (bspw. nach DWA 2015a) eignen. Somit können in einer Flexibilitätsuntersuchung nach einer Auswahl von möglichen Aggregaten (vgl. Kapitel 3) erste anlagenbezogene Aussagen zu den vorhandenen Flexibilitätspotenzialen getroffen werden, bevor eine tiefergehende Analyse erfolgen kann.

Tabelle 7.21: Exemplarische Berechnung der Flexibilitätspotenziale ausgewählter Aggregate einer fiktiven Kläranlage (50.000 EW_{Anschluss}) für eine Bereitstellungszeit von $x = 4$ Stunden.

	P_i^1 [kW _{el}]	t_{Flex}^2 [h]	t_{Reg} [h]	n_i [-]	$\Delta W_{1,4h}$ [kWh]
Positive Flexibilität	max./min.				
RLS	14,97	$t_{Ab,min} = 0,08$ $t_{Ab,max} = 2,00$	1,0	3,7 1,3	4,61 – 39,91
Rührwerke (<i>Biologie</i>)	23,15	$t_{Ab,min} = 0,25$ $t_{Ab,max} = 0,50$	0,5	5,3 4,0	30,86 – 46,30
BHKW	107,50	$t_{Zu,min} = 1,0$ $t_{Zu,max} = 4,0^3$ (24,0)	0,5	2,7 1,0	286,67 – 430,00
NEA	357,60	$t_{Zu,min} = 0,25$ $t_{Zu,max} = 4,0^3$ (15,0)	0,04	4,0 ⁴ (24,0) 1,0	357,60 – 1.430,40
Summe Σ	503,22				678,74 – 1.946,61
Negative Flexibilität	max./min.				
Rührwerke (<i>Biologie</i>)	23,15	$t_{Zu,min} = 0,25$ $t_{Zu,max} = 0,67$	0,5	5,3 3,4	30,86 – 52,91
Entwässerung (z.B. <i>Zentrifuge</i>)	26,23	$t_{Zu,min} = 2,00$ $t_{Zu,max} = 2,00$	1,0	1,0 ⁵ (4,33)	69,94
BHKW	107,50	$t_{Ab,min} = 0,08$ $t_{Ab,max} = 4,0^3$ (24,0)	0,5	4,0 ⁴ (24,0) 1,0	35,83 – 430,00
Summe Σ	156,88				136,64 – 552,85

¹ Berechnet über die installierte Leistung für Kläranlagen der GK4 (vgl. Tabelle 7.12; Tabelle 7.16; Tabelle 7.18).

² t_{Flex} ergibt sich, je nach Flexibilitätsrichtung, aus der maßgebenden min. bzw. max. Abschalt- oder Zuschaltdauer des Aggregats.

³ Reglementiert auf 4h ($t_{Flex} > x$).

⁴ Reglementiert auf $n_{max} = 4$ (max. Schaltzyklen pro Tag überschritten).

⁵ Reglementiert (nicht zu unterbrechen, da in 4h nur ein Vorgang möglich ist).

7.5.5 Zusammenfassung der Flexibilitätspotenziale kommunaler Kläranlagen

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass Kläranlagen ein vielversprechendes Potenzial besitzen, sowohl um ihre Stromerzeugung weiter zu steigern als auch Flexibilität in nennenswertem Umfang bereit zu stellen. Insbesondere die KWK-Anlagen und die Nutzung der Aggregate auf den Anlagen bieten ein erhebliches Flexibilitätspotenzial, das es durch konsequente Umsetzung von Projekten und Optimierungen zu erschließen gilt.

In Tabelle 7.22 ist das theoretische Flexibilitätspotenzial der bundesweiten Kläranlagen zusammengefasst. Das maximale Flexibilitätspotenzial der KWK-Anlagen, KA-Aggregate und NEA kann auf 669 MW_{el} (positiv) und - 338 MW_{el} (negativ) abgeschätzt werden. Im Vergleich zu anderen Bereichen im Energiesektor mögen diese relativ gering erscheinen, dennoch stellen sie sinnvolle Beiträge dar. Dies gilt in besonderem Maße, da sie zusätzlich ohne größere Zusatzinvestitionen neben ihrer eigentlichen Aufgabe zur Realisierung der Energiewende bereitgestellt werden können.

Tabelle 7.22: Zusammenfassung der Flexibilitätspotenziale der bundesweiten Kläranlagen (erweitert nach Schäfer et al. 2017a)

	Leistung		Zuschaltbare Energiemenge	Abschaltbare Energiemenge
	[MW _{el}]		[MWh/d]	[MWh/d]
NEA	(+) 98,00	-	48,30	-
KWK-Anlagen	(+ / -) 214,98		1.685,59	2.146,35
KA-Aggregate	(+) 355,99	(-) 122,90	35,53 – 359,61	184,25 – 244,91
Summe Σ	(+) 668,97	(-) 337,88	1.769,42 – 2.129,03	2.330,60 – 2.391,26

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Betreiber von abwassertechnischen Anlagen werden zukünftig mit dem Thema Energie noch stärker als bislang konfrontiert werden. Hierzu ist es erforderlich das eigene Flexibilitäts- und Stromerzeugungspotenzial zu kennen. Zur Nutzung dieser Potenziale werden geeignete Methoden und Vorgehensweisen benötigt, die die Vereinbarung des Umwelt- und Gewässerschutzes mit den neuen Herausforderungen der Energiewende sicherstellen, um der originären Aufgabe der Abwasserreinigung weiterhin ausreichend Rechnung zu tragen. Vor diesem Hintergrund gilt es den bisherigen Kenntnisstand eines flexiblen Anlagenbetriebs deutlich zu erweitern und unter definierten Bedingungen ein strukturiertes Vorgehen zur Erschließung dieser Potenziale zu entwickeln. Die vorliegende Forschungsarbeit leistet hierzu einen entsprechenden Beitrag.

Zu Beginn der Arbeit wurden die wissenschaftlichen Grundlagen der Bereiche Energie- und Abwasserwirtschaft, insbesondere deren Schnittstellen, eruiert und zusammengetragen. Die Synthese der in der Fachliteratur dokumentierten Erfahrungen und Erkenntnisse mit ihren unterschiedlichen Ausrichtungen wurde detailliert dargestellt und erörtert (Kapitel 2). Zahlreiche Studien untersuchen im weitesten Sinne einen bestimmten Teilaspekt des Sammelbegriffs der Flexibilität und machen Vorschläge zur Identifikation und Auswahl nutzbarer Aggregate. Methoden und Vorgehen für eine konkrete Umsetzung unter Beachtung der Reinigungsleistung sind in der Literatur dagegen nicht beschrieben. In Folge dessen wird in dieser Arbeit ein methodischer Ansatz vorgestellt (Kapitel 3), der auf dem Weg zu einem flexiblen Anlagenbetrieb herangezogen werden kann. Aufbauend auf der Literaturrecherche wurden hierzu relevante Kenngrößen identifiziert, definiert und allgemein beschrieben sowie anhand von Kennzahlen im Verlauf der Arbeit auch zahlenmäßig charakterisiert. Die Auswahl der ausgewiesenen Kennzahlen berücksichtigt dabei den Einfluss wesentlicher Randbedingungen der unterschiedlichen Verwendungsmöglichkeiten der Flexibilität an unterschiedlichen Märkten, als auch der technisch-physikalischen Grenzen der in Frage kommenden Aggregate im Rahmen der Abwasserbehandlung. Komplettiert werden diese durch die Etablierung klärtechnischer Kenngrößen, wie minimale und maximale Zu- und Abschalt Dauern sowie Regenerationszeiten, um einen stabilen Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Anhand der durchgeführten detaillierten Untersuchungen der Aggregate der KA Radevormwald wurden Kenntnisse verschiedener prozessrelevanter Parameter gewonnen und als Restriktionen beschrieben (Kapitel

4.2). Diese werden benötigt, um die individuelle Charakteristik der einzelnen Aggregate zu berücksichtigen und ihre Funktionsgrenzen mit Hilfe von Kontrollparametern abzubilden. Als Ergebnis liegt ein Instrument vor, welches die Ermittlung, Quantifizierung und Umsetzung von Flexibilität unterstützt und vorhandene Flexibilisierungspotenziale detailliert aufzeigen kann.

Für ausgewählte Aggregate wurden die aufgestellten Kennzahlen, Restriktionen und Kontrollparameter weitergehend überprüft und im praktischen Betrieb erprobt (Kapitel 5). In einem ersten Schritt wurden dazu Abschaltversuche auf der KA Radevormwald ausgewertet. Diese wurden zudem durch mathematische Simulationen der Flexibilitätseingriffe ergänzt, welche eine Auslotung der Funktionsgrenzen ermöglicht, ohne eine tatsächliche Gefährdung des Anlagenbetriebs zu riskieren. Hierzu wurde sowohl ein Modell der KA Radevormwald, als auch einer „Musterkläranlage“ nach DWA A-131 (ATV-DVWK 2000) herangezogen, um die Aussagekraft hinsichtlich einer möglichen Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen. In einem letzten Schritt wurde die Anlage an ein VK angeschlossen und die Flexibilitätsbereitstellung anhand historischer Daten des Regelleistungsmarktes aus dem Jahre 2014 im laufenden Betrieb getestet. Diese Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes *arrivee* gemeinsam mit Projektpartnern durchgeführt und konnten die Wirksamkeit der entwickelten Restriktionen und Kenngrößen bestätigen. Somit konnte die kommunikationstechnische Anbindung an ein VK und die erfolgreiche Bereitstellung von Flexibilität durch externe Signale belegt werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde der flexible Anlagenbetrieb ausführlich hinsichtlich der Eignung, möglicher Auswirkungen sowie Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Kläranlagenaggregate bzw. -baugruppen bewertet und diskutiert (Kapitel 6.1). Des Weiteren konnten die aufgestellten Kenngrößen und Restriktionen der KA Radevormwald durch die Zusammenführung der sukzessive gewonnenen Erkenntnisse auf eine, auf andere Anlagen besser übertragbarere, Ebene erweitert werden. Diese Kenngrößen stellen eine zum Teil deutlich verbesserte und zugleich durch mathematische Simulation sowie praktischer Erprobung abgesicherte Basis zur Sicherstellung des Reinigungsbetriebs bei Flexibilitätseingriffen dar, die in dieser Form bislang nicht zur Verfügung stand (Kapitel 6.1.5). Daran anknüpfend erfolgte unter Betrachtung der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten eine Bewertung der Kläranlagenflexibilität am Energiemarkt (Kapitel 6.2). Die Untersuchungen bekräftigen eine unvoreingenommene Betrachtung bei der Aggregatauswahl. So konnte gezeigt werden, dass Aggregate für gewisse Verwendungsoptionen gut geeignet sein können, während dies für andere nicht bzw. nur erschwert gegeben ist. Damit erwies sich eine Untersuchung zur Flexibilitätsnutzung als angebracht, die entkoppelt von einer im Vorfeld angestrebten Verwendungsmöglichkeit ist. In einem nächsten Schritt kann die so ermittelte Flexibilität des Aggregats für die verschiedenen Nutzungsoptionen bestmöglich und damit mit geringerem Ausfallrisiko eingesetzt werden. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse und Bewertungen zu den unterschiedlichen Märkten können hierzu herangezogen werden.

In Bezug auf Kurz- und Langzeitspeicherung konnte gezeigt werden, dass die Kläranlage als Energiespeicher sich von anderen Energiespeichern darin unterscheidet, dass bereits existierende Prozesse und Strukturen sinnvoll genutzt werden können. Durch die Implementierung einer PtX-Anlage auf der Kläranlage kann diese in der Funktion als Langzeitspeicher mit vielen Synergieeffekten in nennenswertem Umfang Speichergase erzeugen (Kapitel 6.4). Damit sind Kläranlagen im Stande technologie- und sektorenübergreifend einen substanziellen Beitrag, sowohl als Kurz- als auch Langzeitspeicher, im Rahmen der Energiewende zu leisten und stellen einen prädestinierteren Standort für eine lokale Energiezentrale dar (Kapitel 6.5.3).

Zum Abschluss der Arbeit wurde eine Bestandsanalyse der kommunalen Kläranlagen in Deutschland zur Abschätzung von Potenzialen zur Stromerzeugung und Flexibilitätserstellung durchgeführt (Kapitel 7.3). Die aus der Bestandsanalyse resultierende Aufschlüsselung der Kläranlagen nach Größenklasse, Reinigungsverfahren und angeschlossenen Einwohnern sowie die Ermittlung einwohnerspezifischer Kennwerte bietet eine deutlich belastbarere Datengrundlage zur Ermittlung von Potenzialen als bisher verfügbar. Darauf aufbauend konnten zusammen mit den entwickelten Kenngrößen und gewonnen Erkenntnissen die Position und die Potenziale der kommunalen Kläranlagen in Deutschland bestimmt werden. Dies erfolgte anhand einer Betrachtung der Stromerzeugungspotenziale unter Berücksichtigung möglicher zukünftiger Entwicklungen im Aufkommen und Verwerten von Faulgas (Kapitel 7.4). Darüber hinaus wurde für die KWK-Anlagen, die NEA und für die Aggregate im Reinigungsprozess das Flexibilitätspotenzial in Form von zu- und abschaltbaren Leistungen sowie Energiemengen eingehend untersucht und quantifiziert (Kapitel 7.5). Letztendlich belegen die durchgeführten Untersuchungen, dass Kläranlagen einen sinnvollen Beitrag sowohl durch ihre Stromerzeugungspotenziale, als auch durch die Anpassung ihres Anlagenbetriebes, dazu leisten können, Flexibilität in nennenswertem Umfang zur Verfügung zu stellen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte eine Vielzahl von Erkenntnissen an der Schnittstelle von Energie- und Abwasserwirtschaft gewonnen und zur Ableitung von Anwendungsempfehlungen genutzt werden. Mehrfach konnten bisherige Einschätzungen bestätigt und auf einer deutlich breiteren Basis mit Zahlenwerten untermauert werden. Die Ermittlung und Bereitstellung von Flexibilität wurde durch den vorgestellten methodischen Ansatz systematisiert, mit Kennwerten umschrieben, die unterschiedlichen Auswirkungen auf die Aggregate mit Kontrollparametern charakterisiert und mögliche Auswirkungen ausführlich diskutiert.

8.2 Forschungsbedarf und Ausblick

8.2.1 Forschungs- und Handlungsbedarf

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass über ein intelligentes Management der unterschiedlichen Aggregate eine Kommunikation mit den Energienetzen möglich ist. Nun müssen die gewonnenen Erkenntnisse in der Praxis genutzt und weiterentwickelt werden. Hier liegen allerdings kaum bzw. keine Erfahrungen mit der Steuerung vieler Einzelaggregate, insbesondere mit derart zahlreichen und individuellen Restriktionen, vor. Dies gilt sowohl für die Abwasserwirtschaft mit der Kommunikation über die Grenze der Kläranlage hinaus, als auch für die Energiewirtschaft, die sich bisher weitestgehend mit leistungsstarken Stromerzeugern beschäftigt hat.

Ein wesentlicher Ansatz weiterer Forschung ist die Variabilität der Randbedingungen auf den Kläranlagen. Hieraus entsteht ein Bedarf an zusätzlichen praktischen Untersuchungen hinsichtlich der komplexen verfahrenstechnischen Zusammenhänge der unterschiedlichen Prozesse, konkret in Bezug auf die Nutzung der auf der Kläranlage vorhandenen Aggregate als Flexibilitätsoption. Um die allgemeine Gültigkeit der getroffenen Aussagen weiter zu verbessern, sind fundierte Umsetzungen für die unterschiedlichen verfahrenstechnischen Konstellationen, den dabei eingesetzten Aggregaten und deren mögliche Auswirkungen auf die Stabilität der Anlage wünschenswert. Eine Betrachtung einzelner Verfahrensstufen ohne ihre gesamtsystematische Einbindung in die Kläranlage ermöglicht nur eine eingeschränkte Beurteilung und ist für eine erfolgreiche Umsetzung nicht zu empfehlen. Obwohl die vorhandenen Aggregate der KA Radevormwald ein großes Spektrum der üblicherweise eingesetzten Aggregate von separat anaerober Stabilisierungsanlagen abdeckt, erscheint es sinnvoll möglichst viele weitere Anlagen auf ihre Potenziale zur Flexibilisierung zu untersuchen und weitere Umsetzungen zu initiieren. Dies gilt in besonderem Maße für Anlagen, die sich hinsichtlich ihrer Größe, eingesetzter Aggregate, Verfahrenstechnik und Belastungscharakteristik unterscheiden. Weitere Aspekte für zukünftige Untersuchungen sind die Möglichkeiten zur Flexibilitätsbereitstellung im Regenwetterfall. Dies führt nicht nur zu verminderter Flexibilität der Aggregate auf der Anlage, sondern kann ebenfalls mit Einbußen der Eigenstromerzeugung durch PV verbunden sein. Ferner sind neu eingesetzte Aggregate bzw. Verfahrensstufen, wie z.B. im Rahmen einer Spurenstoffelimination, fortlaufend zu ergänzen und die Auswirkungen auf diese zu prüfen. Eine wie die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik lebt von ihrer Anwendung. Es sind mehr Umsetzungen notwendig, um Kontrollparameter und Abhängigkeiten in der Verfahrenstechnik besser einschätzen und Anpassungen vornehmen zu können. Eine solche kontinuierliche Optimierung, Verbreiterung der Datenbasis und Erfassung weiterer Aggregate führt zu einer höheren möglichen Flexibilitätsbereitstellung und besseren Übertragbarkeit auf ähnliche Anlagen bei gleichzeitiger Risikominimierung im Anlagenbetrieb.

Ein weiterer offener Punkt stellt die mögliche Auswirkung sich ändernder aerober und anaerober Phasen in Folge der Flexibilisierung auf die biologischen Prozesse dar. Dazu sind die Langzeitauswirkungen einer Flexibilitätsnutzung auf die Biozönose hinsichtlich Reinigungsleistung und Schlammeigenschaften weiter zu untersuchen. Hier besteht ebenfalls Bedarf an einer systematischen Untersuchung zur Phosphorelimination, insbesondere auf eine gezielte Bio-P bei längeren Abschaltungen der Belüftung (z.B. Auswirkung auf den Fällmittelbedarf, P-Rücklösung, P-Ablaufwerte).

Ziel der Flexibilitätsbereitstellung auf Kläranlagen ist die zeitlich befristete Nutzung von vorhandenen (und benötigten) Pufferkapazitäten. Ein effizienter Anlagenbetrieb an der Auslastungsgrenze wird sich negativ auf die Flexibilität auswirken, während große Flexibilitätspotenziale auf eine ineffiziente Betriebsweise hindeuten können. Der Zusammenhang ist weitestgehend unklar, allerdings ist hierbei der Fokus auf die Energieeffizienz der Aggregate zu legen, denn nicht benötigte elektrische Energie muss letztendlich nicht erzeugt werden. Auch bei entsprechenden (wirtschaftlichen) Anreizen sollte das Ziel ein nachhaltiger Umgang mit Ressourcen sein und keine Situationen entstehen bei denen zugunsten von Flexibilität Kläranlagen ineffizient betrieben werden. Unklar ist außerdem wie sich Effizienzsteigerungsmaßnahmen, die weiterhin eine große Rolle spielen werden (z.B. im Rahmen der Förderung von Energieanalysen), auf die vorhandene Flexibilität auswirken und welche Auswirkungen die Flexibilitätsbereitstellung auf bereits effizient betriebene Aggregate und Prozesse haben. Durch die Nutzung als Flexibilitätsoption können die eingesetzten Aggregate einen Beitrag zur Versorgungssicherheit durch Stabilisierung der Energienetze leisten. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen geänderter Betriebsführung durch eine Flexibilitätsnutzung und dem Ausmaß der (Langzeit-)Auswirkungen auf Wartungs- und Instandhaltungsaufwand sowie Alterung der Aggregate bislang unklar (vgl. Kapitel 6.1.4). Diese Einschätzungen decken sich mit den identifizierten Handlungsfeldern und dem Forschungsbedarf für das industrielle DSM (DENA 2016b). Es ist näher zu untersuchen, ob ein zusätzlicher Verschleiß auftritt und ggf. zu berücksichtigen ist, welche Vermarktungsoptionen zu besonders hohem zusätzlichem Verschleiß führen und ob, und in welchem Maß, es lohnenswert erscheint bei Neuinvestitionen von Aggregaten gezielt auf eine Flexibilitätseignung zu achten.

Das Verschwimmen der Grenzen von Verbrauchern und Erzeugern elektrischer Energie erfordert einen steigenden Informationsfluss und eine steigende Innovationsbereitschaft aller Beteiligten. Die Abwasserwirtschaft wird sich der fortschreitenden Digitalisierung, die sich unter dem Schlagwort Wasserwirtschaft 4.0 vollzieht (siehe z.B. BMWI 2018; GWP o.J.), nicht verwehren können. Die zunehmende Vernetzung und der Wechsel vom Analogen ins Digitale verbessern und erleichtern den Betrieb auch in der Abwasserwirtschaft, führen allerdings auch zu neuen Problemen und Verordnungen, die es einzuhalten gilt. Um die vielen dezentralen Einheiten und deren Daten koordinieren zu können, ist entsprechende Informationstechnik notwendig, die zunehmend an Bedeutung und Einfluss gewinnen wird. Allerdings müssen diese Daten

und Informationen vor unbefugtem Zugriff und Manipulation geschützt werden, welches mit erhöhtem Aufwand verbunden ist. Smart-Grids und der technische Fortschritt in der Automatisierung und Vernetzung von Pumpen, Verdichtern, Zentrifugen etc. halten verstärkt Einzug in der Anlagentechnik von Kläranlagen. So sind heute bereits viele Aggregate vollständig automatisiert und in Cloudlösungen eingebunden. Einstellungen, Änderungen und Wartungen laufen über externe Zugriffe und entsprechende Programmierung der Hersteller. Die Möglichkeiten dieser Automatisierung werden bisher kaum genutzt, da der überwiegende Teil der Abwasserbranche eine sehr konservative Haltung dem gegenüber einnimmt und sich den bietenden Chancen so verwehrt.

8.2.2 Erfordernisse Kläranlagenbetrieb, Betreiber, Personal

Um Vorbehalte und Hemmnisse abzubauen werden Managementstrategien, abgesicherte Vorgehen und belastbare Empfehlungen für die Betreiber benötigt. Der Betrieb der Kläranlage hinsichtlich der internen und externen Anforderungen stellt für alle Beteiligte eine große Herausforderung dar. Erforderlich ist ein hoher Informations- und Wissensstand des Personals, der deutlich über die Kernkompetenzen und Aufgabenfelder des täglichen Betriebs hinausgeht. Die Analyse hinsichtlich der Ermittlung und Nutzung von Flexibilität geht deutlich über die Untersuchungen im Rahmen von klassischen energetischen Analysen hinaus (z.B. nach DWA 2015a). Der benötigte Datenumfang sowie die Qualität der Daten ist dabei erheblich. Während die Prozesse und Verfahren im klärtechnischen Bereich in der Regel sehr gut beherrscht werden, fehlt für die energetischen Belange oftmals benötigtes (Grundlagen-)Wissen, welches sich ebenfalls in der Akzeptanz dessen widerspiegelt. Ein möglicher Ansatz wäre die Ergänzung von Energiestudien mit einer Flexibilitätsüberprüfung, um auf die Eignung der vorhandenen Aggregate hinzuweisen und bei der Umsetzung zu unterstützen. Weiter könnte durch Empfehlung entsprechender Vermarkter/Experten eine Hilfestellung bei der Auswahl der vielen Verwendungsmöglichkeiten der vorhandenen Flexibilität gegeben werden, da aufgrund ihrer Komplexität und Dynamik oftmals die aktuellen Vermarktungsmöglichkeiten schwer zu erkennen sind. Hier sind Wissensdefizite auf beiden Seiten abzubauen, um das gegenseitige Verständnis der jeweiligen Belange zu erhöhen. Es hat sich gezeigt, dass die für den konkreten Umsetzungsfall eingesetzten Aggregate sich nur aus einem iterativen Diskurs mit den Betreibern und dem Personal vor Ort ergeben können, da eine Nutzung nur durch entsprechende Akzeptanz und Motivation zur Umsetzung der Beteiligten von Erfolg ist. Es ist die Verbreitung und die Kommunikation über Fachverbände (z.B. DWA/BWK) sowie Fachzeitschriften, -tagungen und umgesetzter Projekte wünschenswert, um kompetente und transparente Aufklärungsarbeit zu leisten (vgl. Schmitt et al. 2017b). Die Umsetzungen auf der Projektanlage haben gezeigt, dass durch die Implementierung des Aggregatmanagements auf der Anlage und insbesondere die Sensibilisierung und Aus-

einandersetzung des Personals mit einem flexiblen Anlagenbetrieb zu einem Wissensgewinn über die Fähigkeiten und Prozesse der eigenen Anlage führte, die viele Synergien im täglichen Betrieb geschaffen und den Gesamtbetrieb weiter verbessert hat. Eine Flexibilisierung stellt, insbesondere zu Beginn der Arbeiten, einen nicht zu unterschätzenden Mehraufwand für das beteiligte Personal dar. Hier müssen entsprechende Freiräume geschaffen werden, um sich dem Thema Flexibilität und Energievermarktung zu widmen, umzusetzen und auch fortlaufend betreiben zu können. Dies wird bereits für größere Abwasserverbände zur Herausforderung und ist für den einzelnen Anlagenbetreiber deutlich schwerer bzw. nicht ohne weiteres leistbar.

Eine prinzipielle Umsetzung wird zumeist auf institutioneller oder organisatorischer Ebene beschlossen. Vor diesem Hintergrund gilt es die Kommunen und Verbände weiterhin und in erhöhtem Maße bspw. über Fördermittel in die Lage zu versetzen an der Umgestaltung des Energiesystems und an der Umsetzung der Energiewende mit zu wirken. Diese Einrichtungen können durch den Einsatz von unterschiedlichen innovativen Technologien als Katalysator wirken, da die Übertragbarkeit auf die vielen Standorte mit ähnlichen Verwaltungsstrukturen, Hemmnissen aber auch Chancen die Umsetzung innovativer Technologien und Schaffung von Synergien mit volkswirtschaftlichem Nutzen ermöglichen und beschleunigen können.

Außer Frage steht, dass der Anteil an EE weiter steigen wird und die dargebotsabhängige Energie aus Wind und Sonne zukünftig die dominierenden Stromerzeugungsquellen darstellen. Somit kommt dem Bedarf an Flexibilität und Energiespeichern sowie der Sektorkopplung eine immer größere Bedeutung zu. In Folge dessen werden und müssen sich die regulatorischen Rahmenbedingungen anpassen. Im Eingang dieser Arbeit beschriebenen zukünftigen Energiesystem werden diejenigen eine zentrale Rolle einnehmen, die flexibel Stromüberschüsse aufnehmen und Defizite ausgleichen können. Somit findet ein Wechsel vom reinen Stromkonsumenten, zum aktiven Dienstleister am Energiemarkt statt, was zu neuen hierarchischen Verhältnissen und unklaren Rollen- bzw. Aufgabenverteilungen zwischen Energie- und Abwasserwirtschaft führen kann. Vormalig zentrale Aufgaben müssen zukünftig von dezentralen Systemen übernommen werden. Damit dies gelingt müssen sich die beteiligten Akteure mutig auf Veränderungen und neue Rollenverteilungen einstellen.

Weitere Schritte eines Beitrages von Kläranlagen zur Energiewende können mit den Grundlagen und Ansätzen dieser Arbeit gegangen werden, um bereit für zukünftige Veränderungen zu sein, frühzeitig von absehbaren Entwicklungen profitieren zu können und weiterhin innovativ zum Umwelt- und Klimaschutz beizutragen.

9 Literaturverzeichnis

- AbwV (2004): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV). AbwV, vom 17.06.2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 121 des Gesetzes vom 29.03.2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist.
- AEE (2008): Energie-Kommunen. Kommunalatlas. Hg. v. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.kommunal-erneuerbar.de/energie-kommunen/kommunalatlas.html>, zuletzt geprüft am 24.04.2018.
- Aghajanzadeh, Arian; Wray, Craig; McKane, Aimee (2015): Opportunities for Automated Demand Response in California Wastewater Treatment Facilities. DOI: 10.2172/1233609.
- Agora (2015): Aktionsplan Lastmanagement. Endbericht einer Studie von Connect Energy Economics. Hg. v. Agora Energiewende. Berlin.
- Arndt, Ulli; Roon, Serafin von; Wagner, Ulrich (2006): Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität? In: *BWK Das Energie-Fachmagazin* (58), S. 52–57.
- ASUE (2010): Virtuelle Kraftwerke. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE). Berlin.
- ASUE (2014): BHKW Kennzahlen 2014/2015. Module, Anbieter, Kosten. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE). Berlin.
- ASUE (2015): BHKW-Fibel. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (ASUE). Berlin.
- ATV-DVWK (Hg.) (2000): ATV-DVWK-A 131 - Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. ATV-DVWK, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall; Abwassertechnische Vereinigung. Stand: Mai 2000. Hennef: GFA-Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V (ATV-DVWK-Regelwerk, A 131).
- Baumann, Peter; Maurer, Peter; Roth, Manfred (Hg.) (2014): Senkung des Stromverbrauchs auf Kläranlagen. Systematisches Vorgehen zur Steigerung der Energieeffizienz durch Nutzung des Einsparpotenzials. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. 3. Auflage. Stuttgart: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V. Landesverband Baden-Württemberg (Praxisleitfaden DWA, Heft 4).
- BBH (2014): Rechtliche Pflichten für Betreiber von Kläranlagen zur Vorhaltung von Notstromaggregaten. Vermerk. Unter Mitarbeit von Julian Heß und Jana Siebeck. Hg. v. Becker Büttner Held (BBH), Unveröffentlicht. Berlin und Köln (Az. 03090-12).

-
- BBK (2015): Leitfaden für die Planung, die Einrichtung und den Betrieb einer Notstromversorgung in Unternehmen und Behörden. Stand: April 2015. Bonn: Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Praxis im Bevölkerungsschutz, 13).
- BDEW (Hg.) (2015): Smart Grids Ampelkonzept. Ausgestaltung der gelben Phase. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150310-diskussionspapier-smart-grids-ampelkonzept-de/\\$file/150310%20Smart%20Grids%20Ampelkonzept_final.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20150310-diskussionspapier-smart-grids-ampelkonzept-de/$file/150310%20Smart%20Grids%20Ampelkonzept_final.pdf), zuletzt geprüft am 23.10.2015.
- Berger, Helmut; Eisenhut, Thomas; Polak, Sascha; Hinterberger, Robert (2011): Demand Response Potential of the Austrian industrial and commerce sector. Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 65/2011. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Biebersdorf, Norbert; Schröder, Markus; Palmowski, Laurence; Veltmann, Katrin; Kaste, Andrea (2012): Kosten der Mikroschadstoffentfernung / Energieverbrauch. Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Mikroschadstoffen. Bochum (2. Fachsymposium Mikroschadstoffe.NRW 2012).
- BiomasseV (2016): Verordnung über die Erzeugung von Strom aus Biomasse (Biomasseverordnung - BiomasseV). BiomasseV, vom 21.06.2001 (BGBl. I S. 1234), die zuletzt durch Artikel 8 des Gesetzes vom 13.10.2016 (BGBl. I S. 2258) geändert worden ist.
- Bischof, Wolfgang (1998): Abwassertechnik. 11., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Stuttgart: Teubner.
- Blesl, Markus; Ohl, Michael (2010): Bundesländerspezifische Potenziale von Blockheizkraftwerken und Brennstoffzellen auf Kläranlagen in Deutschland. Stuttgart (Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg, 12/2010).
- BMWI (Hg.) (2014): Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilnetzstudie). Forschungsprojekt Nr. 44/12. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.
- BMWi (2018): Kommunal 4.0. Pilotprojekte in der Wasserwirtschaft 4.0. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter <https://www.kommunal4null.de/>, zuletzt geprüft am 28.08.2018.
- BNetzA (Hg.) (2010): Festlegung zu Verfahren zur Ausschreibung von Regelenergie in Gestalt von Sekundärregelung. Beschluss. Bundesnetzagentur (Az: BK6-06-066).
- BNetzA (Hg.) (2017): Flexibilität im Stromversorgungssystem. Bestandsaufnahme, Hemmnisse und Ansätze zur verbesserten Erschließung von Flexibilität. Diskussionspapier. Bundesnetzagentur (BNetzA).
- Bolle, Friedrich-Wilhelm; Genzowsky, Kristoffer; Gredigk-Hoffmann, Sylvia; Reinders, Michael; Riße, Henry; Schröder, Markus; Manja, Steinke; Wöffen, Bernhard; Illing, Frank; Jagemann, Peter; Schmelz, Karl-Georg; Schulte, Patrick (2012a): WaStraK NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I. Band I: Kompendium Wasserstoff. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

- Bolle, Friedrich-Wilhelm; Reinders, Michael; Riße, Henry; Schröder, Markus; Bernhard, Wölfen; Illing, Frank (2012b): WaStrak NRW „Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung“ - Phase I. Band II: Methanolsynthese. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Bosch, Franziska (2016): Beurteilung der Reinsauerstoffbeimischung bei Belüftungssystemen der biologischen Stufe kommunaler Kläranlagen. Bachelorarbeit. FG Siedlungswasserwirtschaft an der TU Kaiserslautern. Betreut durch Michael Schäfer und Theo G. Schmitt., Kaiserslautern.
- Bruyn, Kathrin de; Kollmann, Andrea; Moser, Simon; Schmidthaler, Michael; Amann, Christoph; Elbe, Christian; Schmutzner, Ernst; Kraussler, Alois; Reinhofer-Gubisch, Marion; Pucker, Johanna; Frantes, Bettina (2014): LoadShift: Lastverschiebung in Haushalt, Industrie, Gewerbe und kommunaler Infrastruktur Potenzialanalyse für Smart Grids. Überblick und Zusammenfassung Österreichische Begleitforschung zu Smart Grids. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 7a/2015. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Wien.
- BSI (2012): Leitfaden Informationssicherheit. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Bonn.
- BSI (2017): Schutz Kritischer Infrastrukturen durch IT-Sicherheitsgesetz und UP KRITIS. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Bonn (BSI-KRITIS 17/200).
- BSIG (2017): Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz - BSIG), vom 14.08.2009 (BGBl. I S. 2821), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 23.06.2017 (BGBl. I S1885) geändert worden ist.
- BSI-KritisV (2017): Verordnung zur Bestimmung Kritischer Infrastrukturen nach dem BSI-Gesetz (BSI-Kritisverordnung; BSI-KritisV). BSI-KritisV, vom 22.04.2016 (BGBl. I S. 958), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 21.06.2017 (BGBl. I S. 1903) geändert worden ist.
- Bundesregierung der BRD (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung.
- Bundesregierung der BRD (2018): Ein neuer Aufbruch für Europa - Eine neue Dynamik für Deutschland - Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD 19. Legislaturperiode. Berlin.
- BWB (2014): Daten der berliner Kläranlagen (Stand 2013). Technische Daten der Kläranlagen Schönerlinde, Wansdorf, Ruhleben, Stahnsdorf, Waßmannsdorf, Münchhofe. Entnommen von der Internet Plattform der Berliner Wasserbetriebe. Hg. v. Berliner Wasserbetriebe. Berlin. Online verfügbar unter <http://www.bwb.de/content/language1/html/index.php>, zuletzt geprüft am 07.08.2014.
- Cardoso, Vicelmal; Romao, Betania B.; Silva, Felipe T. M.; Santos, Júlia G.; Batista, Fabiana R. X.; Ferreira, Juliana S. (2014): Hydrogen Production by Dark Fermentation. In: IBIC2014 (Hg.): 4th International Conference on Industrial Biotechnology : 8-11

June 2014, Rome, Italy (Chemical engineering transactions, Volume 38 (2014)), S. 481–486.

- 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.
- Crastan, Valentin (2009): Elektrische Energieversorgung 2. Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik, alternative Stromerzeugung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung. 2. bearb. Aufl. Berlin: Springer (Elektrische Energieversorgung, / Valentin Crastan ; 2). Online verfügbar unter http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3127563&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.
- Dehoust, Günter; Mehlhardt, Georg; Vogt, Regine; Otter, Philipp (2010): Ausgewählte Klimaschutzpotenziale der Abwasserwirtschaft. Wärmepotenzial aus Abwasser, Potenzial der Faulgasnutzung. Hg. v. ifeu und Öko-Institut e.V. Darmstadt/Heidelberg/Berlin.
- DENA (Hg.) (2010): dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick auf 2025. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2011): Strategieplattform Power to Gas Thesenpapier: Technik und Technologieentwicklung. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/fileadmin/user_upload/downloads/Positionen_Thesen/Eckpunkte_Roadmap_Power_to_Gas.pdf.
- DENA (Hg.) (2012a): dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2012b): Handbuch Lastmanagement. Vermarktung flexibler Lasten: Erlöse erwirtschaften - zur Energiewende beitragen. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2013): Power to Gas. Eine innovative Systemlösung auf dem Weg zur Marktreife. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2014): dena-Studie Systemdienstleistungen 2030. Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien - Endbericht. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2016a): Potenzialatlas Power to Gas. Klimaschutz umsetzen, erneuerbare Energien integrieren, regionale Wertschöpfung ermöglichen. Deutsche Energie-Agentur GmbH (DENA). Berlin.
- DENA (Hg.) (2016b): Roadmap Demand Side Management. Industrielles Lastmanagement für ein zukunftsfähiges Energiesystem. Schlussfolgerungen aus dem Pilotprojekt DSM Bayern. 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.
- DESTATIS (2013): Erhebung über die Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas 2012. Fachserie 19 Reihe 2.1. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- DESTATIS (2015): Umwelt - Öffentliche Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung, 2013. Fachserie 19 Reihe 2.1. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- DESTATIS (2018a): Daten zur Klärgasgewinnung 1964 bis 2017. unveröffentlicht, per EMail vom 07.09.2018 von Jörg Kaiser (Destatis) an Michael Schäfer (TU Kaiserslautern). Wiesbaden, 2018.
- DESTATIS (2018b): Erhebung über die Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas 2017. Fachserie 19 Reihe 2.1. Pressemitteilung vom 03. August 2018 - 286/18. Hg. v. Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- DESTATIS & DWA (2015): Abwasser und Klärschlamm in Deutschland – statistische Betrachtungen. Teil 2: Klärschlamm, Klärgas, Rechen- und Sandfanggut. In: *KA - Korrespondenz Abwasser* 2015 (1), S. 46–53.
- Dietrich, Matthias (2016): Sind Gas-Otto-BHKWs für die flexible Fahrweise geeignet? Was sollten Anlagenbetreiber beachten? Vortrag, 10.02.2016. Bad Hersfeld.
- DIN 1343 (1990): DIN 1343:1990-01, Referenzzustand, Normzustand, Normvolumen; Begriffe und Werte. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin (1343:1990-01).
- DOE (2014): The Water-Energy Nexus: Challenges and Opportunities. U.S. Department of Energy (DOE).
- Dohmann, Max; Schröder, Markus (2011): Energie in der Abwasserentsorgung. Rückschau und Ausblick. In: *KA* 58 (6), S. 536–541.
- Dröge, Stefan; Pacan, Benjamin (2017): Erfahrungen mit der Power-to-Gas Pilotanlage im Energiepark Pirmasens-Winzeln. Fachgespräch „Biologische Methanisierung“. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), BMEL. Berlin, 25.04.2017.
- Duden online (2017): Stichwort: Flexibilität. Online verfügbar unter <http://www.duden.de/node/682705/revisions/1620770/view>, zuletzt geprüft am 07.08.2017.
- DVGW (Hg.) (2014): Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten. Abschlussbericht. Unter Mitarbeit von Frank Graf, Manuel Götz, Marco Henel, Tanja Schaaf und Robert Tichler. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- DWA (Hg.) (2006): DWA-M 299 - Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Juni 2006. Hennef: DWA (DWA-Merkblatt, M 299).
- DWA (Hg.) (2008): DWA-M 212 - Technische Ausrüstung von Faulgasanlagen auf Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. April 2008. Hennef: DWA (DWA-Merkblatt, M 212).

-
- DWA (Hg.) (2010a): DWA-M 363 - Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. November 2010, Korrigierte Fassung Januar 2011. Hennef: DWA (DWA-Merkblatt, M 363).
- DWA (Hg.) (2010b): Energiepotenziale in der deutschen Wasserwirtschaft - Schwerpunkt Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. Hennef (DWA-Themen).
- DWA (Hg.) (2011): DWA-A 202 - Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Mai 2011. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 202).
- DWA (2013): DWA-M 366 - Maschinelle Schlammmentwässerung. Februar 2013. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Merkblatt, M 366).
- DWA (Hg.) (2014): DWA-M 368 - Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Juni 2014. Hennef: DWA (DWA-Merkblatt, M 368).
- DWA (Hg.) (2015a): DWA-A 216 - Energiecheck und Energieanalyse. Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Dezember 2015. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 216).
- DWA (Hg.) (2015b): Möglichkeiten der Elimination von anthropogenen Spurenstoffen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). Stand: April 2015. Hennef: DWA (DWA-Themen, 2015,3).
- DWA (Hg.) (2016): DWA-A 203 - Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung (Entwurf). Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Entwurf September 2016. Hennef (DWA-Regelwerk, A 203).
- DWA (Hg.) (2017a): DWA-M 1060 - IT-Sicherheit - Branchenstandard Wasser/Abwasser. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. August 2017. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, M 1060).
- DWA (Hg.) (2017b): DWA-M 229-1 - Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen. Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausführung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. September 2017. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Merkblatt, M 229-1).
- DWA (Hg.) (2017c): DWA-M 229-2 - Systeme zur Belüftung und Durchmischung von Belebungsanlagen. Teil 2: Betrieb. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. September 2017. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (DWA-Merkblatt, M 229-2).
- DWA Bayern (Hg.) (2013): Kanal- und Kläranlagen-Nachbarschaft. DWA Landesverband Bayern.

- DWA HRS (Hg.) (2013): Kläranlagennachbarschaften. Informationen zu den Nachbarschaften, Abfallwirtschaft, Gewässer und Kanal. DWA Landesverband Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland.
- DWA KEK-2 (2017): Mitbehandlung von Co-Substraten auf kommunalen Kläranlagen - Technische und wirtschaftliche Aspekte. Arbeitsbericht des DWA-Fachausschusses KEK-2 und dessen Arbeitsgruppe 2.1. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2017 (12), 1083 - 1092. DOI: 10.3242/kae2017.12.004.
- DWA LV BW (Hg.) (2013): Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften. Ergebnisse des kommunalen Leistungsvergleich 2012. DWA Landesverband Baden-Württemberg.
- DWA Nord (Hg.) (2013): Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften 2013. DWA Landesverband Nord.
- DWA Nordost (Hg.) (2013): Kanal- und Kläranlagennachbarschaft. EDV-Datei zur Verfügung gestellt von DWA Landesverband Nord-Ost. DWA Landesverband Nordost.
- DWA NRW (Hg.) (2014): Nachbarschaften im DWA-Landesverband Nordrhein-Westfalen. DWA Landesverband NRW.
- DWA Sachsen/Thüringen (Hg.) (2014): Kläranlagen- und Kanal-Nachbarschaften. DWA Landesverband Sachsen/Thüringen.
- EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2017). EEG 2017, vom 21.07.2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17.07.2017 (BGBl. I S. 2532) geändert worden ist. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2017.pdf, zuletzt geprüft am 27.04.2018.
- EEX (2017): Regulierter Markt - Börsenordnung der EEX. Hg. v. EEX European Energy Exchange AG. EEX. Leipzig. Online verfügbar unter <https://www.eex.com/de/handel/verordnungen-und-regelwerke/regulierter-markt>, zuletzt aktualisiert am 03.04.2017, zuletzt geprüft am 09.11.2017.
- Eichseder, Helmut; Klell, Manfred (2008): Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden (ATZ-MTZ-Fachbuch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9503-5>.
- Elsner, Peter; Fishedick, Manfred; Sauer, Dirk Uwe (Hg.) (2015): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien - Szenarien - Systemzusammenhänge. München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).
- Engelhart, Markus; Schaum, Christian; Lutze, Robert; Rühl, Johannes; Schebek, Liselotte; Seier, Maximilian; Dornburg, Arthur; Dörner, Frank; Vukovic, Nicola; Klinger, Julia; Jakob, Martin; John, Martin; Gilbert, Eva; Feit, Eva; Schließmann, Ursula; Mohr, Marius; Sievers, Michael; Bormann, Hinnerk; Niedermeiser, Michael; Franck, Jörn; Edens, Gertrud; Wittstock, Ralf; Ansmann, Till; Dierich, Axel; Mohajeri, Sharooz; Westenberg, David (2018): Abwasserbehandlungsanlage der Zukunft – Energiespeicher in der Interaktion mit technischer Infrastruktur im Spannungsfeld von Energieerzeugung und –verbrauch (ESITI). Schlussbericht. Hg. v.

-
- BMBF. Bundesministerium für Bildung und Forschung; Förderkennzeichen: 02WER1322A-I. Darmstadt.
- EPEXspot (2017): EPEX SPOT Marktregeln 2017. EPEX SPOT Exchange Rules. EPEX Spot. Online verfügbar unter <http://www.epexspot.com/de/extras/download-center/dokumentation>, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 13.07.2017.
- EVS (2013): Daten der Kläranlagen im Saarland (Stand 2013). EDV Daten (excel-Format) zur Verfügung gestellt von Tina Vollerthun. Unter Mitarbeit von Tina Vollerthun. Hg. v. Entsorgungsverband Saar.
- EVS (2017): VSE und EVS gründen Virtuelles Kraftwerk. Kooperation saarländischer Unternehmen für Versorgungssicherheit und Gebührenstabilität. Entsorgungsverband Saar. Saarbrücken. Online verfügbar unter <https://www.evs.de/aktuell/meldungen/archiv/meldung/artikel/vse-und-evs-gruenden-virtuelles-kraftwerk/>, zuletzt geprüft am 05.07.2018.
- EWG (1991): Richtlinie 91/271/EWG vom 21.5.1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser. EWG (Europäische Wirtschaftsgemeinschaft). Online verfügbar unter <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=URISERV%3A128008>, zuletzt geprüft am 21.07.2017.
- FfE (2016): Wissenschaftliche Projektbegleitung des Projektes DSM Bayern - Endbericht. Im Auftrag der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena). Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE).
- FfE (2017): Kurzstudie Power-to-X. Ermittlung des Potenzials von PtX-Anwendungen für die Netzplanung der deutschen ÜNB. Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft (FfE). München.
- Gasse, Juliane; Reinhardt, Tobias; Meyer, Carsten; Kolisch, Gerd; Taudien, Yannick; Steinmetz, Heidrun; Morck, Tobias; Baumann, Peter; Poppe, Birgit; Maier, Werner (2017): Energieverbrauch von Teilprozessen auf kommunalen Kläranlagen. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2017 (09), S. 802–808. DOI: 10.3242/kae2017.09.004.
- Gohsen, David; Allelein, Hans-Josef (2015): Development of a Market-based Optimisation Model for a Demand-based and Storable Electricity Production from Biogas. In: *Energy Procedia* 73, S. 79–86. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.565.
- Götz, Philipp; Huneke, Fabian; Lenck, Thorsten; Linkenheil, Carlos Perez (2016): Minimaler Bedarf an langfristiger Flexibilität im Stromsystem bis 2050. Studierenerweiterung. Hg. v. Energy Brainpool. Im Auftrag von Greenpeace Energy eG (GPE). Berlin. Online verfügbar unter http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/pressematerial/fin2016-02-24_EnergyBrainpool_Minimaler_Windgasbedarf_GreenpeaceEnergy.pdf, zuletzt geprüft am 06.11.2017.
- Graeber, Dietmar Richard (2014): Handel mit Strom aus erneuerbaren Energien. Kombination von Prognosen. Zugl.: Hohenheim, Univ., Diss., 2013. Wiesbaden: Springer Gabler (Research).

- 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; Hansen, Joachim; Siekmann, Klaus; Jakob, Jürgen; Schmitt, Theo G. (2011): Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAWaS. Modul 2 - Weitergehende Untersuchungen. Kaiserslautern, zuletzt geprüft am 26.02.2013.
- Grim, Johanna; Nilsson, Daniel; Hansson, Per-Anders; Nordberg, Åke (2015): Demand-Orientated Power Production from Biogas. Modeling and Simulations under Swedish Conditions. In: *Energy Fuels* 29 (7), S. 4066–4075. DOI: 10.1021/ef502778u.
- Gujer, Willi (2007): Siedlungswasserwirtschaft. Mit 84 Tabellen. 3., bearb. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-34330-1>.
- GWP (o.J.): Wasser 4.0. German Water Partnership e. V. (GWP). Berlin. Online verfügbar unter https://www.germanwaterpartnership.de/fileadmin/pdfs/gwp_materialien/gwp_wasser_40.pdf, zuletzt geprüft am 26.09.2018.
- Haag, Tanja; Brahmi, Daniela; Cornelia, Hoen; Kern, Peter; Trauer, Oliver; Bongards, M.; Graner, Martin, Nümm, Hanstheo; Staubach, Martin (2012): Integrierte Optimierung von Kanalsystemen und Kläranlagen mit computational intelligenbce tools. Schlussbericht (KANNST). Köln.
- Hamburg Wasser (2014): Daten der hamburgener Kläranlage Köhlbrandthöft/Dradenau (Stand 2013). entnommen von der Internetplattform Hamburgwasser. Unter Mitarbeit von Hamburg Wasser. Online verfügbar unter <http://www.hamburgwasser.de/home.html>, zuletzt geprüft am 07.08.2014.
- Hansen, Dirk (2011): Nutzung von Notstromanlagen. 25./26.10.2011. DWA-Fachtagung: Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen. DWA. Fulda, 2011.
- Hansen, Joachim; Hien, Sebastian (2016): Verfahrenstechnische Möglichkeiten der Flexibilisierung von Strombedarf und -erzeugung auf kommunalen Kläranlagen. Trier, 2016.
- Hansen, Joachim; Wu, Kai; Kolisch, Gerd; Hobus, Inka; Schirmer, Gitta (2007): Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (mufv). Mainz, zuletzt geprüft am 08.08.2018.
- Hansen, Joachim; Wu, Kai; Schirmer, Gitta; Hobus, Inka; Kolisch, Gerd (2009): Energie- und Kostenoptimierung durch Schaffung von semizentralen Schlammbehandlungszentren. FG Siedlungswasserwirtschaft/ tectraa - Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern.
- hanseWasser (2014): Daten der bremer Kläranlagen Seehausen und Farge (Stand 2013). entnommen von der Internetplattform hansewasser. Hg. v. hanseWasser Bremen GmbH, zuletzt aktualisiert am 07.08.2014.

-
- Henze, Mogens; Gujer, Willi; Mino, Takashi; van Loosdrecht, Mark (2007): Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Reprinted. London: IWA Publ (Scientific and technical report / IWA, 9).
- Hien, Sebastian (2017): Approaches for supportive prediction of biogas production rate and control strategies to provide flexible power production. Dissertation. Luxemburg.
- Hirschl, Bernd; Aretz, Astrid; Prahl, Andreas; Böther, Timo; Heinbach, Katharina (2010): Kommunale Wertschöpfung durch Erneuerbare Energien. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (Schriftenreihe des IÖW, 196).
- HMUELV (2013): Beseitigung von kommunalen Abwässern in Hessen. Lagebericht 2012. Hg. v. Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (HMUELV). Wiesbaden.
- Hobus, Inka; Taudien, Yannick; Pyro, Phillip; Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver (2017): Dynamische Simulation von Regelenergie- und Speicherkonzepten auf Abwasserreinigungsanlagen. 11. DWA-Fachtagung MSR.
- Hunziker, Peter (2005): Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz. Vorreiterrolle der ARA Region Luzern. In: GWA 2005 (4).
- ifak (2014): SIMBA#Biogas. Instituts für Automation und Kommunikation e.V. (ifak). Magdeburg. Online verfügbar unter <https://simba.ifak.eu/de/content/simba-sharp-biogas>, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- Janda, Agnes (2016): Kläranlagen im Virtuellen Kraftwerk - Ein Beitrag zur Systemstabilität Strom. Gelsenwasser AG. Gelsenkirchen (OLEC-Jahrestagung 2016, Vortrag).
- Kahn, Lloyd (2007): The septic system owner's manual. Rev. ed. Bolinas, Calif.: Shelter.
- Keicher, Klaus; Krampe, Jörg; Steinmetz, Heidrun (2007): Untersuchung der Auswirkungen eines längeren Stromausfalles auf die Gewässerbelastung durch abwassertechnische Anlagen (unveröffentlicht). Schlussbericht, Vorhaben-Nr.217/2005. UM Baden-Württemberg. Stuttgart.
- Kielmeier, Stefan; Wagner, Jens (2017): Simulation einer maximalen Belastungssituation bei der Regelenergiebereitstellung mit der Belüftungseinrichtung. DWA. Hennef (11. DWA-Fachtagung MSR).
- Knerr, Henning; Dilly, Timo; Schmitt, Theo G.; Hansen, Joachim; Hien, Sebastian (2016): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in der Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz. Sachstandsbericht. Kaiserslautern.
- Kolisch, Gerd; Taudien, Yannick; Osthoff, Thomas (2014): Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen (Zusatzbericht). Zusatzbericht zum Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz. Forschungsvorhaben im Auftrag des MKULNV-NRW. Wuppertal (AZ IV-7-042 600 003B).

- KOM-M.NRW (Hg.) (2016): Anleitung zur Planung und Dimensionierung von Anlagen zur Mikroschadstoffelimination. 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. ARGE Kompetenzzentrum Mikroschadstoffe.NRW (KOM-M.NRW). Köln.
- Konstantin, Panos (2007): Praxisbuch Energiewirtschaft. Energieumwandlung, -transport und -beschaffung im liberalisierten Markt. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch).
- Kornrumpf, Tobias; Meese, Jan; Zdrallek, Markus; Neusel- Lange, Nils; Roch, Marvin (Hg.) (2016): Entwurf und Simulation eines regionalen Flexibilitätsmarktes auf Verteilnetzebene. Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin. OTTI e.V.
- Kornrumpf, Tobias; Zdrallek, Markus (2017): Kläranlagen als Flexibilitätsoption im Mittelspannungsnetz. In: Theo G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren & Flexibilität wagen. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern (Schriftenreihe des FG Siedlungswasserwirtschaft der Universität Kaiserslautern, 40), S. 97–113.
- Lekov A.; Thompson L.; McKane A.; Song K.; Piette M.A (2009): Opportunities for Energy Efficiency and Open Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California – Phase I Report. Hg. v. Lawrence Berkeley National Laboratory's Demand Response Research Center (DRRC). Berkeley.
- Lensch, Dorothee; Schaum, Christian; Cornel, Peter (2016): Examination of food waste co-digestion to manage the peak in energy demand at wastewater treatment plants. In: *Water Science & Technology* 73 (3), S. 588–596.
- LfU (2013): Umsetzung der EG-Kommunalabwasserrichtlinie in Bayern. Lagebericht 2012. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Augsburg.
- LfU (2014): Kläranlagendaten Bayern. EDV Datei (excel-Format) zur Verfügung gestellt von Andre Pavlovic. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Geologie und Wasserschutz.
- LfW (1995): Ersatzstromversorgung bei Abwasseranlagen. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW). München (Merkblatt Nr 4.4/15).
- LLUR-SH (2013): Beseitigung von kommunalen Abwässern in Schleswig-Holstein. Lagebericht 2012. Hg. v. Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländlicher Raum des Landes Schleswig-Holstein. Kiel.
- LUNG (2013): Kommunale Abwasserbeseitigung in Mecklenburg-Vorpommern. Lagebericht 2013. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Güstrow.
- LUWG (2013): Kläranlagen Nachbarschaften 2012/2013. Fortbildung des Betriebspersonals 2012/2013. EDV Daten zur Verfügung gestellt von Frank Angerbauer. Unter Mitarbeit von Frank Angerbauer. Hg. v. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht.

-
- Mariakakis, Iosif (2013): A two stage process for hydrogen and methane production by the fermentation of molasses. Dissertation. Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaft der Universität Stuttgart (Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, 216).
- Meese, Jan; Dorsemagen, Felix; Neusel- Lange, Nils; Zdrallek, Markus; Völschow, Andy; Neuhaus, Ulrich, Reintzsch, Alexander; Klein, Stephan; Bogatz, Daniel; Stibel, Jochen (2015a): Happy Power Hour - Zeitlich variable Stromtarife zur Anpassung der Stromnachfrage an die Volatilität des Stromangebotes am Beispiel der mittelständischen Industrie im bergischen Städtedreieck. Abschlussbericht. Wuppertal.
- Meese, Jan; Kornrumpf, Tobias; Uhlig, Roman; Zdrallek, Markus; Bruckhaus, Marc-Oliver; Henatsch, Leonard (2016): Charakterisierung von Flexibilitäts Optionen für den Einsatz in unterschiedlichen Marktsegmenten. In: Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. 3. OTTI-Konferenz : Steigenberger Hotel am Kanzleramt, Berlin, 26./27. Januar 2016, Bd. 3. OTTI-Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien; Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut; Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Regensburg, Deutschland: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI).
- Meese, Jan; Neusel- Lange, Nils; Zdrallek, Markus; Winkler, Jan, Antoni, Julia; Stiegler, Martin; Friedrich, Wolfgang (2015b): Flexibilitätsmärkte für die gelbe Ampelphase im intelligenten Stromnetz (ETG Fachtagung).
- Mergelmeyer, Martin; Kolisch, Gerd; Menninger, Ulrich; Steinmetz, Heidrun; Locher, Christian; Helmich, Julian; Brüggemann, Jürgen; Taudien, Yannick; Osthoff, Thomas (2014): Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben Energie und Klimaschutz. Forschungsvorhaben im Auftrag des MKULNV-NRW (AZ IV-7-042 600 003B).
- Mittelstedt, Mathias (2016): Einführung eines Lastmanagements im Klärwerk Münchehof. DWA Energietage. Berliner Wasserbetriebe. DWA. Würzburg, 2016.
- MKULNV (2010): Entwicklung und Stand der Abwasserbeseitigung in Nordrhein-Westfalen. Lagebericht 2013. Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur-und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MLU (2013): Beseitigung von kommunalen Abwasser in Sachsen-Anhalt. Lagebericht 2013. Hg. v. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt.
- Mörs, Friedmann; Götz, Manuel; Grad, Frank; Bär, Katharina (2015): Vergleich von biologischen und katalytischen Methanisierungskonzepten. Förderkennzeichen: G 3/01/13. In: OTTI e.V. (Hg.): Biologische Methanisierung. Tagungsband: Biologische Methanisierung. Regensburg, 11.11.2015. Regensburg, S. 21–30.
- MUGV (2013): Kommunale Abwasserbeseitigung im Land Brandenburg. Lagebericht 2013. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (MUGV). Potsdam.

- MULEWF (2013): Stand der Abwasserbeseitigung in Rheinland-Pfalz. Lagebericht 2012. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz. Mainz.
- Müller, Ernst A.; Graf, Eliane; Kobel, Beat Hrni Andreas; Wenger, René; Frei, Urban; Christen, Curdin; Moser, Ruedi; Frizsche, Cristina; Mathys, Olivier; Kernen, Martin; Fahrni, Joelle (2013): Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung. Bundesamt für Energie. Bern.
- Müller, Ernst A.; Kobel, Beat; Künti, Thomas; Pinnekamp, Johannes; Seibert-Erling, Gerhard; Schaab, Rüdiger; Böcker, Karl (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen. Hg. v. Düsseldorf, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft, NRW. Düsseldorf.
- Müller, Ernst A.; Thommen, Rolf; Stähli, Peter (1994): Energie in ARA. Energiesparmaßnahmen in Abwasserreinigungsanlagen ; Handbuch. Bern/Schweiz: Eidg. Dr.-Sachen- und Materialzentrale.
- Müller, Ernst A.; Vogelsanger; Michèle; Hurni, Andreas; Kobel, Beat; Zaugg, Christian; Radzikhovskaya; Osswald, Rafael (2017): Regelpooling mit Infrastrukturanlagen. Wasserversorgungen und Abwasserreinigungsanlagen. Schlussbericht vom 15.12.2017. Bern.
- MUV (2013): Beseitigung von kommunalem Abwasser im Saarland. Lagebericht 2012. Hg. v. Ministerium für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlands (MUV). Saarbrücken.
- NAV (2006): Niederspannungsanschlussverordnung - Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung. NAV, vom 01.11.2006 (BGBl. I S. 2477), die zuletzt durch Artikel 7 des Gesetzes vom 29.08.2016 (BGBl. I S. 2034) geändert worden ist. Fundstelle: 752-6-6.
- 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.
- NLWKN (2013): Die Beseitigung kommunaler Abwässer in Niedersachsen. Lagebericht 2013. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz. Hannover.
- Nowak, Otto; Enderle, Peter; Schloffer, Martin; Lang, Evelyn. (2015): Elektrische Lastverschiebung in der Abwasserreinigung. Kommunale Kläranlagen als Bestandteil smarter Energiesysteme? TU Wien. Wien (Wiener Mitteilungen, Band 232).
- Ockenfels, Axel; Grimm, Veronika; Zoettl, Gregor (2008): Strommarktdesign - Preisbildungsmechanismus im Auktionsverfahren für Stromstundenkontrakte an der EEX. Gutachten im Auftrag der European Energy Exchange AG zur Vorlage an die Sächsische Börsenaufsicht. Laboratorium für Wirtschaftsforschung an der Universität zu Köln.

-
- Olsen, D.; Goli, S.; Faulkner, D.; McKane, A. (2012): Opportunities for Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California - Southeast Water Pollution Control Plant Case Study. California Energy Commission (CEC-500-2012-XXX).
- OTTI e.V. (Hg.) (2015): Biologische Methanisierung. Tagungsband: Biologische Methanisierung. Regensburg, 11.11.2015. Regensburg.
- Palmowski, Laurence; Pinnekamp, Johannes (2018): Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende (E-Klär). Schlussbericht. Hg. v. BMBF. Bundesministerium für Bildung und Forschung; Förderkennzeichen: 02WER1319 A-J. Aachen.
- Peyer Thomas; Nijssen Rene; Heller Thomas; Reuter Monika (2016): Kläranlagen-Ideal für Power-to-Gas. Swisspower identifiziert 100 Kläranlagen in der Nähe von Gasnetzen. In: *AQUA&GAS* (N° 7/8), S. 42–46.
- Pinnekamp, Johannes; Mousel, D.; Krebber, K.; Palmowski, L.; Bolle, F.-W.; Gredigk-Hoffmann, Sylvia; Miethig, Stefan; Krüger, M.; Eckers, S.; Simsheuser, C.; Lyko, S.; Thöle, D. (2015): Energiebedarf von Verfahren zur Elimination von organischen Spurenstoffen - Phase II. Abschlussbericht. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MULNV).
- Pinnekamp, Johannes; Schröder, Markus; Bolle, Friedrich-Wilhelm; Gramlich, Eric; Gredigk-Hoffmann, Sylvia; Koenen, Stefan; Loderhose, Maximilian; Miethig, Stefan; Ooms, Kristoffer; Riße, Henry; Seibert-Erling, Gerhard; Schmitz, Martin; Wöffen, Bernhard (2018): Energie in Abwasseranlagen. Handbuch NRW. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- Preiß, Stefan (2015): WVE bündelt Klärgasanlagen zu virtuellem Kraftwerk. In: *EUWID Wasser und Abwasser*, 14.10.2015 (WA43), S. 13.
- Pyro, Philipp; Hobus, Inka; Kolisch, Gerd (2017): Ermittlung der Flexibilitätsoptionen für eine Musterkläranlage (150.000 E). Zusatzanhang 11 zum Projektbericht "Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee". Hg. v. BMBF. Bundesministerium für Bildung und Forschung; Förderkennzeichen: 02WER1320A. Wuppertal. Online verfügbar unter www.erwas-arrivee.de.
- Remy, Christian; Diercks, Kristin (2016): Biogas valorization and efficient energy management. D3.1: Best practices for improved sludge digestion. Arbeitsbericht WP 3 des Projektes "Full scale demonstration of energy positive sewage treatment plant concepts towards market penetration ("POWERSTEP)". Berlin.
- Reuter, Monika (2013): Power-to-Gas: Biological methanization; first at a municipal sewage plant. Berlin (8th International Renewable Energy Storage Conference (IRES 2013, 18.-20. November, 2013).

- Riedel Martin, Zander, Wolfgang (Hg.) (2012): Praxishandbuch Energiebeschaffung. Wirtschaftlicher Strom- und Gaseinkauf - Strategien. Konzepte. Lösungen., Strombeschaffung, Kapitel 4.1, Loseblattsammlung. Funktionen und wesentliche Elemente einer Börse. Band 2, Teil 2.
- Roediger, Markus; Loll, Ulrich (2017): Technische Problemstellung bei der Co-Vergärung in Klärschlammfaulungsanlagen. Tagungsband DWA Klärschlammtag. Hennef, S. 72–77.
- Roos, Hermann-Josef (2008): Perspektiven der Co-Vergärung auf Kläranlagen. In: *KA - Korrespondenz Abwasser* (4), S. 364–368.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning (2015a): Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potential Analysis. In: *Energy Procedia* 73, S. 87–93. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning; Hobus, Inka (2015b): Die Kläranlage als Regelbaustein im Energienetz. Das BMBF-Verbundprojekt arrivee: Welchen Beitrag können Kläranlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung im Rahmen der Energiewende leisten? In: *Wasserrwirtschaft Wassertechnik* 65 (6), S. 27–29.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Taudien, Yannick (2017a): Flexibilitätspotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt. In: *wwt - Wasserrwirtschaft Wassertechnik* (3), S. 8–12.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schütz, Stefan; Schuhmann, Enrico; Raabe, Toni. (2016a): The natural gas grid infrastructure as a suitable storage for renewable energy produced by wastewater treatment plants. Düsseldorf (10th International Renewable Energy Storage Conference (IRES), 15.-16. März 2016).
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Theo G. Schmitt (2018a): Sektorkopplung und Speicherung Erneuerbarer Energien durch Kläranlagen. In: *Wasser + Abfall* Oktober 2018, 2018, S. 14–17.
- 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.
- Schäfer, Michael; Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Steinmetz, Heidrun (2018b): Integration of fluctuating Renewable Energies on WWTPs to remove micropollutants due ozonation. Düsseldorf (12th International Renewable Energy Storage Conference - IRES 2018, 13-15. March 2018).
- Schäfer, Michael; Schmitt, Theo G.; Hobus, Inka; Pyro, Philipp; Salomon, Dirk (2018c): Bereitstellung von Flexibilität durch Kläranlagen. Kennzahlen, Restriktionen, Kontrollparameter und deren simulationstechnische und praktische Validierung. In: *KA - Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2018 (3), S. 196–204. DOI: 10.3242/kae2018.03.001.
- Schäfer, Michael; Sinß, Markus; Schmitt, Theo G. (2016b): Die Kläranlage als Regelbaustein im Energienetz. Berlin (3. Konferenz "Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien"; Konferenzbeitrag; 26./27. Januar 2016).

-
- Schaumann, Gunter; Schmitz, Karl W. (2010): Kraft-Wärme-Kopplung. 4. vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schloffer, Martin; Lang Evelyn; Nowak Otto; Enderle Peter; Pregartbauer Reinhard (2015): Loadshift-ARA. Lastverschiebung in der Abwasserreinigung kommunaler Kläranlagen als Bestandteil smarter Energiesysteme. Online verfügbar unter <https://www.energieforschung.at/assets/project/final-report/843860-Loadshift-ARA-Endbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 21.08.2018.
- Schmiedeskamp, Christian (2010): Virtuelle Kraftwerke für Regelleistung. In: *Energy 2.0* (01/2010), S. 52–54. Online verfügbar unter <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=168168>, zuletzt geprüft am 16.06.2010.
- Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Hansen, Joachim; Siekmann, Klaus (2010): Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAWaS. Modul 1 - Grundlegende Untersuchungen. Kaiserslautern.
- Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning; Dilly, Timo; Hansen, Joachim; Hien, Sebastian; Siekmann, Thomas (2018): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in der Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz. Schlussbericht. Kaiserslautern.
- Schmitt, Theo G.; Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Bidlingmaier, Artur; Hanke, Babett; Hobus, Inka; Honeck, Verena; Kornrumpf, Tobias; Pyro, Philipp; Salomon, Dirk; Zdrallek, Markus (2017a): 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.
- Schmitt, Theo G.; Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Knerr, Henning; Hüesker, Frank; Kornrumpf, Tobias; Zdrallek, Markus; Salomon, Dirk; Bidlingmaier, Artur; Simon, Ralf; Hanke, Babett; Honeck, Verena; Langhausen, Tobias; Keil, Alexander; Lentz, Karl-Heinz; Lontzek, Swen; Halver, Robert; Richtarski, Christoph; Roch, Marvin; Kolisch, Gerd; Pyro, Philipp; Taudien, Yannick; Hobus, Inka; Schiebold, Daniel; Charles, Thomas; Siebeck, Jana (2017b): Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Hg. v. BMBF. Bundesministerium für Bildung und Forschung; Förderkennzeichen: 02WER1320A. Kaiserslautern (DOI: 10.2314/GBV:899010695). Online verfügbar unter www.erwas-arrivee.de, zuletzt geprüft am 25.06.2018.
- Schulz, Alexander (2005): Selektive Methanisierung von CO in Anwesenheit von CO₂ zur Reinigung von Wasserstoff unter den Bedingungen einer PEM-Brennstoffzelle.

- Dissertation. Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005. Aachen: Shaker (Berichte aus der Verfahrenstechnik).
- Seyfried, Carl Franz; Kroiss, Helmut; Rosenwinkel, Karl-Heinz; Dichtl, Norbert; Weiland, Peter (Hg.) (2015): Anaerobtechnik. Abwasser-, Schlamm- und Reststoffbehandlung, Biogasgewinnung. 3., neu bearbeitete Auflage. Berlin Germany: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=997049>.
- Siegrist, Hansrüdiger; Vogt, Dea; Garcia-Heras, Jaime L.; Gujer, Willi (2002): Mathematical Model for Meso- and Thermophilic Anaerobic Sewage Sludge Digestion. In: *Environ. Sci. Technol.* 36 (5), S. 1113–1123. DOI: 10.1021/es010139p.
- Sinha, Pallavi; Pandey, Anjana (2011): An evaluative report and challenges for fermentative biohydrogen production. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (13), S. 7460–7478. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.03.077.
- SMUL (2013): Lagebericht 2012 zur kommunalen Abwasserbeseitigung und zur Klärschlamm-sorgung im Freistaat Sachsen. Hg. v. Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft Sachsen. Dresden.
- Stadler, Ingo (2006): Demand response. Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Zugl.: Kassel, Univ., Habilitation, 2006. Berlin: dissertation.de (Habilitation). Online verfügbar unter <http://digitalibubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/digital/2/869.pdf>.
- Stadt Radevormwald (Hg.) (2017): Informationen zur Stadt Radevormwald. Stadtfinfo, Daten/Zahlen/Fakten. Internetauftritt der Stadt Radevormwald. Unter Mitarbeit von Bürgermeister (Johannes Mans). Radevormwald. Online verfügbar unter http://www.radevormwald.de/cms222/stadtfinfo/daten_zahlen_fakten/bevoelkerungszahlen/index.shtml, zuletzt geprüft am 03.08.2017.
- Sterner, Michael (2009): Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems. Dissertation. Kassel (Erneuerbare Energien und Energieeffizienz - Renewable Energies and Energy Efficiency, 14).
- Sterner, Michael; Jentsch, Mareike; Holzhammer, Uwe (2011): Energiewirtschaftliche und ökologische Bewertung eines Windgas-Angebotes. Gutachten. Hg. v. Fraunhofer IWES. Online verfügbar unter http://www.greenpeace-energy.de/fileadmin/docs/sonstiges/Greenpeace_Energy_Gutachten_Windgas_Fraunhofer_Sterner.pdf, zuletzt geprüft am 19.07.2011.
- Sterner, Michael; Saint-Drenan, Yves-Marie; Gerhardt, Norman; Specht, Michael; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich (2010): Erneuerbares Methan. Ein innovatives Konzept zur Speicherung und Integration Erneuerbarer Energien sowie zur regenerativen Vollversorgung. Leibniz Institut LIFIS. Online verfügbar unter http://www.leibniz-institut.de/archiv/sterner_09_07_10.pdf, zuletzt geprüft am 11.02.2013.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2016): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. 2. Auflage 2016. Berlin: Springer Berlin.

-
- Strauss, Karl (2016): Kraftwerkstechnik. Zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen. 7. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53030-6>.
- StromGVV (2016): Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Grundversorgung von Haushaltskunden und die Ersatzversorgung mit Elektrizität aus dem Niederspannungsnetz. StromGVV, vom 26.10.2006 (BGBl. I S. 2391), die zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 29.08.2016 (BGBl. I S. 2034) geändert worden ist.
- StromNZV (2016): Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen. StromNZV, vom 25.07.2005 (BGBl. I S. 2243), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 29.08.2016 (BGBl. I S. 2034) geändert worden ist, zuletzt geprüft am 10.11.2017.
- Styczynski, Zbigniew A.; Sauer, Dirk Uwe (Hg.) (2015): Demand-Side-Management im Strommarkt. Technologiesteckbrief zur Analyse "Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050" (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft).
- Thompson, L.; Lekov, A.; McKane, A.; Piette, M. A. (2010): Opportunities for Open Automated Demand Response in Wastewater Treatment Facilities in California - Phase II Report. San Luis Rey Wastewater Treatment Plant Case Study. Lawrence Berkeley National Laboratory's Demand Response Research Center (DRRC). Berkeley.
- Thompson L.; Song K.; Lekov A.; McKane A. (2008): Automated Demand Response Opportunities in Wastewater Treatment Facilities. Lawrence Berkeley National Laboratory's Demand Response Research Center (DRRC). Berkeley.
- TMLFUN (2013): Beseitigung von kommunalem Abwasser im Freistaat Thüringen. Lagebericht 2013. Hg. v. Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz. Erfurt.
- Töpfer, Johannes; Lehmann, Jochen (Hg.) (2017): Wasserstoff und Brennstoffzelle. Technologien und Marktperspektiven. 2. Aufl. 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-53360-4>.
- UBA (2006): Merkblatt über beste verfügbare Techniken für Großfeuerungsanlagen. BVT-Merkblatt. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau (Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU)).
- UBA (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Texte 11/08).
- UM (2013): Kommunales Abwasser. Lagebericht 2013. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden- Württemberg. Stuttgart.
- UM (Hg.) (2015): Leitfaden Energieeffizienz auf Kläranlagen. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM). Stuttgart.
- VDE (Hg.) (2012): Energiespeicher für die Energiewende. Speicherungsbedarf und Auswirkungen auf das Übertragungsnetz für Szenarien bis 2050. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Frankfurt am Main.

- VDE (Hg.) (2014): Regionale Flexibilitätsmärkte. Marktbasierte Nutzung von regionalen Flexibilitätsoptionen als Baustein zur erfolgreichen Integration von erneuerbaren Energien in die Verteilnetze. Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- VDE/ETG (2012): Demand Side Integration – Lastverschiebungspotenziale in Deutschland. Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik/Energetische Gesellschaft (ETG).
- VDN (2003): TransmissionCode 2003, Anhang D 1. Unterlagen zur Präqualifikation für die Erbringung von Primärregelleistung für die ÜNB (Stand August 2003). Hg. v. Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW (VDN). Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ip/action/static/prequal>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- VDN (2007a): TransmissionCode 2007 - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Unter Mitarbeit von Holger Berndt, Mike Hermann, Horst D. Kreye, Rüdiger Reinisch und Schere, Ulrich, Vanzetta, Joachim. Hg. v. Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW (VDN). Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/.../file/TransmissionCode2007.pdf>, zuletzt geprüft am 13.07.2017.
- VDN (2007b): TransmissionCode 2007, Anhang D 3. Unterlagen zur Präqualifikation für die Erbringung von Minutenreserveleistung (Stand 24.08.2007). Hg. v. Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW (VDN). Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ip/action/static/prequal>, zuletzt geprüft am 04.08.2014.
- VDN (2009): TransmissionCode 2003, Anhang D 2. Teil 1 - Unterlagen zur Präqualifikation von Anbietern zur Erbringung von Sekundärregelleistung für die ÜNB (Stand November 2009). Hg. v. Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW (VDN). Online verfügbar unter <https://www.regelleistung.net/ip/action/static/prequal>, zuletzt geprüft am 07.11.2017.
- Weichgrebe, Dirk (2015): Kompendium Biogas. Hannover (Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, 155).
- Weinrich, Sören (2017): Praxisnahe Modellierung von Biogasanlagen. Systematische Vereinfachung des Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1). Dissertation. Rostock.
- DIN-EN 16323, 2014-04: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik.
- Wupperverband (Hg.) (2005): Klärwerk Odenthal. Anlagenbeschreibung/Flyer. www.wupperverband.de. Wuppertal, zuletzt geprüft am 04.12.2017.
- Wupperverband (Hg.) (2006): Klärwerk Kohlfurt. Anlagenbeschreibung/Flyer. www.wupperverband.de. Wuppertal, zuletzt geprüft am 04.12.2017.
- You, Shi; Træholt, Chresten; Poulsen, Bjarne (2010): Developing Virtual Power Plant for Optimized Distributed Energy Resources Operation and Integration. Dissertation. Dänemark: Technical University of Denmark.

Zutter, Ruedi; Nijssen, René; Peyer, Thomas (2015): Studie Potential zur Effizienzsteigerung in Kläranlagen mittels Einspeisung oder Verstromung des Klärgases. Schlussbericht. Swisspower. Zürich.

Anhang

A 1.	Fließschema der KA Radevormwald.....	202
A 2.	Aggregatliste (Verbrauchermatrix) KA Radevormwald.....	203
A 3.	Anlagenbelastung der Kläranlage Radevormwald.....	207
A 4.	Spezifischer Stromverbrauch der KA Radevormwald im Vergleich mit Literaturdaten.....	208
A 5.	Ausführliche Darstellung der Abschaltversuche sowie Kurzbeschreibungen der KA Odenthal und KA Kohlfurth.....	209
A 6.	Aggregatgruppenbezogener Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen.....	221
A 7.	Integration in ein Virtuelles Kraftwerk.....	222
A 8.	Flexibilitätskennzahlen der Kläranlagen Odenthal und Kohlfurth.....	223
A 9.	Ergänzende Daten/Informationen zu Kapitel 6.4 „Kläranlagen in der Rolle als (Langzeit-)Energiespeicher“.....	225

A 1. Fließschema der KA Radevormwald

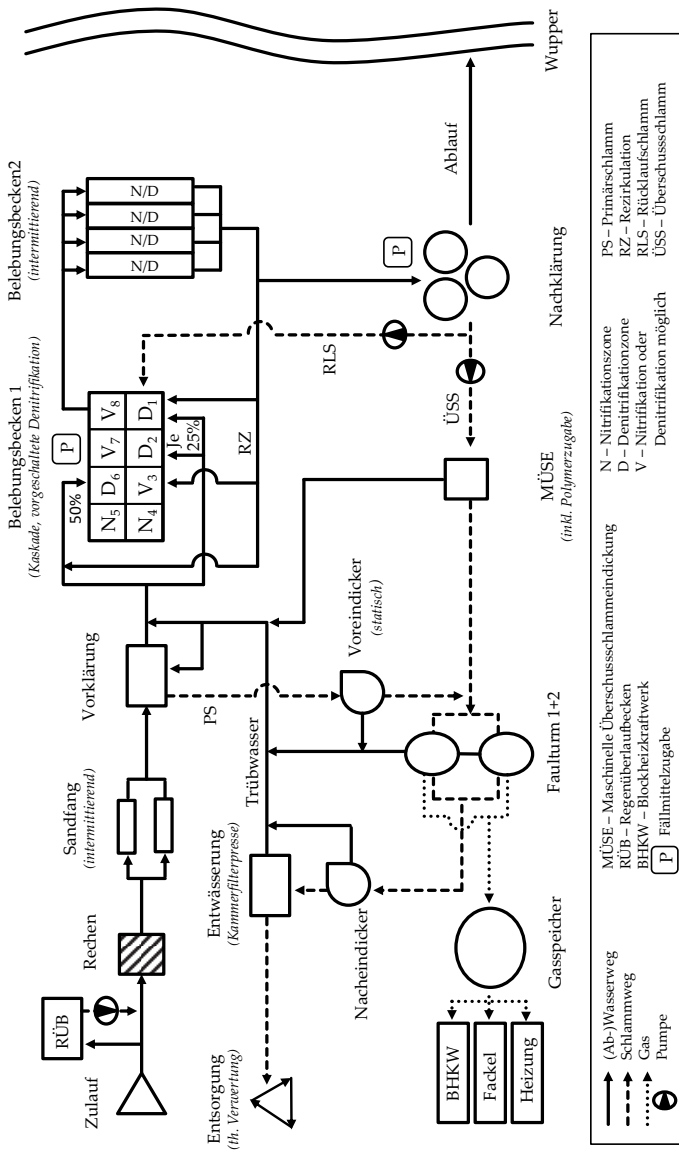


Abbildung A-1: Erweitertes Fließschema der KA Radevormwald

A 2. Aggregatliste (Verbrauchermatrix) KA Radevormwald

Tabelle A- 1: Vollständige Aggregatliste der KA Radevormwald

Verbraucher / Standort	FU	Nennleistung [kW]	maßgebende Leistung [kW _e]	Betriebsstunden 2014 [h/a]	Verbrauch [kWh/a]	Verbrauch je Stufe [kWh/a]
<u>Regenüberlaufbecken:</u>						695
Entleerungspumpe 1	nein	15,00	12,0	0	0	
Entleerungspumpe 2	nein	15,00	12,0	39	468	
Wirbeljet	nein	5,50	4,4	50	220	
Spülpumpe	nein	0,75	0,6	1	1	
Regenrückhaltekanal,	nein	0,37	0,3	10	3	
Drossel 1						
Regenrückhaltekanal,	nein	0,37	0,3	10	3	
Drossel 2						
<u>Rechenhaus:</u>						2.612
Rechen 1	nein	2,00	1,7	238	405	
Rechen 2	nein	2,00	1,7	261	444	
Waschpresse 1	nein	3,60	3,5	209	732	
Waschpresse 2	nein	3,60	3,5	295	1.033	
<u>Sandfang:</u>						19.274
Fahrtrieb 1		0,28	0,2	2.267	508	
Fahrtrieb 2		0,28	0,2	1.896	425	
Sandförderpumpe 1		1,30	1,0	1.124	1.169	
Sandförderpumpe 2		1,30	1,0	1.144	1.190	
Sandförderpumpe 3		1,30	1,0	948	986	
Sandförderpumpe 4		1,30	1,0	949	987	
Sandfanggebläse 1	nein	7,80	2,1	735	1.507	
Sandfanggebläse 2	nein	7,80	2,1	1.472	3.018	
Sandfanggebläse 3	nein	7,80	2,1	2.543	5.213	
Rührwerk Sandwäsche		1,10	0,9	4.945	4.243	
Austragsschnecke Sandwäsche		1,10	0,6	50	30	
<u>VKB - Räumler:</u>						2.372
Räumerantrieb		0,60	0,5	3.582	1.719	
Winde Bodenräumschild		0,37	0,3	100	30	
Winde Schwimmschlamm-schild		0,25	0,2	25	5	
Spülpumpe		3,75	3,0	40	120	
Schwimmschlammpumpe		3,75	3,0	166	498	
<u>Primärschlamm-pumpwerk:</u>						11.831
Primärschlammpumpe 1	ja	17,30	5,8	818	4.744	
Primärschlammpumpe 2	ja	17,30	5,8	728	4.222	
Voreindicker Mazerator 1	nein	2,20	1,4	818	1.145	
Voreindicker Mazerator 2	nein	2,20	1,4	728	1.019	
Rinnenpumpe		1,60	2,7	100	270	
Schwimmschlammpumpe (2 Stück)		5,50	4,3	100	430	
<u>Kalksilo:</u>						11.618

Verbraucher / Standort	FU	Nennleistung [kW]	maßgebende Leistung [kW _e]	Betriebsstunden 2014 [h/a]	Verbrauch [kWh/a]	Verbrauch je Stufe [kWh/a]
Schlauchpumpe 1	ja	0,75	1,1	1.630	1.793	
Schlauchpumpe 2	ja	0,75	1,1	1.990	2.189	
Rührwerk		2,20	0,7	8.654	6.058	
Austragsbehälter		1,10	0,3	513	154	
Zellenradschleuse		0,37	0,3	324	96	
Gebläse		2,20	3,8	347	1.319	
Filterrüttler		0,18	0,1	71	10	
Belebung:						1.156.997
Belüftung:						799.373
Gebläse 1 BB1	ja	90,00	68,2	6.027	411.041	
Gebläse 2 BB1	ja	75,00	40,7	2.036	82.865	
Gebläse 3 BB1	ja	55,00	27,5	3.940	108.350	
Gebläse 1 BB2	ja	75,00	22,0	3.120	68.640	
Gebläse 2 BB2	ja	75,00	22,0	3.049	67.078	
Gebläse 3 BB2	ja	75,00	22,0	2.667	58.674	
Gebläse 4 BB2 (Verteilergerinne)	nein	5,90	5,0	547	2.724	
Umwälzung:						86.678
Rührwerk K1	nein	2,30	1,8	5.715	10.287	
Rührwerk K2	nein	2,30	1,8	7.459	13.575	
Rührwerk K3	nein	2,30	1,8	6.060	10.908	
Rührwerk K6	nein	2,30	1,8	6.045	10.881	
Rührwerk K7	nein	2,30	1,8	8.719	15.694	
Rührwerk K8	nein	2,30	1,8	8.720	15.696	
Probenahmepumpe		1,30	1,1	8.760	9.636	
Rezirkulation:						52.773
Rezirkulationspumpe 1		4,00	4,2	4.460	18.732	
Rezirkulationspumpe 2		4,00	4,2	8.105	34.041	
Rücklaufschlammförderung:						218.174
Rücklaufschlammpumpe 1	ja	30,00	18,0	3.824	68.832	
Rücklaufschlammpumpe 2	ja	30,00	20,0	3.648	72.960	
Rücklaufschlammpumpe 3	ja	30,00	20,0	3.808	76.160	
Blendenregulierschieber 1		0,37	0,3	300	89	
Blendenregulierschieber 2		0,37	0,3	300	89	
Blendenregulierschieber 3		0,37	0,3	150	44	
Faulbehälter:						190.606
Faulraumischer 1		9,70	7,6	8.738	66.409	
Faulraumischer 2		9,70	7,6	7.400	56.240	
Fettpumpe 1		0,18	0,1	8.738	1.132	
Fettpumpe 2		0,18	0,1	7.400	959	
Rohschlammpumpe 1	ja	2,20	1,5	4.593	6.890	
Rohschlammpumpe 2	ja	2,20	2,0	3.233	6.304	
Heizschlammpumpe 1		5,50	6,0	3.725	22.350	
Heizschlammpumpe 2		5,50	6,0	4.947	29.682	
Schaumfalle 1				12		
Schaumfalle 2				81		
Heizungspumpe		1,50	0,8	800	640	
Fälmitteldosierung:						1.782

Verbraucher / Standort	FU	Nennleistung [kW]	maßgebende Leistung [kW _e]	Betriebsstunden 2014 [h/a]	Verbrauch [kWh/a]	Verbrauch je Stufe [kWh/a]
Fällmitteldosierpumpe 1		0,18	0,2	51	10	
Fällmitteldosierpumpe 2		0,18	0,2	8.644	1.772	
Schlammentwässerung:						34.587
Schlammpumpe 1		5,50	2,4	0	0	
Schlammpumpe 2		17,30	4,0	48	192	
Kolbenmembranpumpe 1		22,00	10,0	1.069	10.690	
Kolbenmembranpumpe 2		22,00	10,0	905	9.050	
Polymerpumpe 1	ja	11,00	2,0	1.070	2.140	
Polymerpumpe 2	ja	11,00	2,0	905	1.810	
Polyumfüllpumpe		1,50	0,8	350	280	
Trogkettenförderer 1		9,20	6,6	146	964	
Trogkettenförderer 2		9,20	6,6	112	739	
Querförderer		4,00	6,0	101	606	
Schwenkförderer		3,00	1,0	129	129	
HD-Pumpe		55,00	30,0	95	2.850	
Kompressor		15,00	12,2	357	4.338	
Waschwagenfahrmotor 1		0,75	0,6	500	300	
Waschwagenfahrmotor 2		0,75	0,6	500	300	
Waschwagenhubmotor 1		0,25	0,2	500	100	
Waschwagenhubmotor 2		0,25	0,2	500	100	
Nachklärbecken:						76.484
Räumenantrieb 1		1,20	1,0	8.618	8.833	
Räumenantrieb 2		1,20	1,0	8.743	8.962	
Räumenantrieb 3		1,20	1,0	8.735	8.953	
Schwimmschlammpumpe 1		1,80	1,4	2.630	3.787	
Schwimmschlammpumpe 2		1,80	1,4	3.012	4.337	
Schwimmschlammpumpe 3		1,80	1,4	2.483	3.576	
Probenahmepumpe NK		0,37	0,2	8.760	2.015	
Spritzwasserpumpe 1		1,30	0,9	2.591	2.391	
Spritzwasserpumpe 2		1,30	0,9	2.937	2.711	
Spritzwasserpumpe 3		1,30	0,9	2.256	2.082	
Rinnenreinigung (3 Stück)		2,25	1,8	110	198	
Vakuumpumpe 1		1,50	1,2	100	122	
Vakuumpumpe 2		1,50	1,2	100	122	
Vakuumpumpe 3		1,50	1,2	100	122	
ÜSS-Pumpe 1	ja	4,00	2,7	566	1.500	
ÜSS-Pumpe 2	ja	4,00	2,7	8.461	22.422	
ÜSS-Pumpe 3	ja	4,00	2,7	1.431	3.792	
Fahrbanheizung (3 Stück)		30,00	24,0	23	560	
Grundwasserpumpwerk:						25.238
Pumpe 1		22,00	17,6	504	8.870	
Pumpe 2		22,00	17,6	930	16.368	
Voreindicker:						11.938
Krählwerk VE		0,25	0,2	8.671	1.994	
ÜSS-ED, Seihbandanlage Antrieb		0,55	0,4	1.756	773	

Verbraucher / Standort	FU	Nennleistung [kW]	maßgebende Leistung [kW_e]	Betriebsstunden 2014 [h/a]	Verbrauch [kWh/a]	Verbrauch je Stufe [kWh/a]
ÜSS-ED, Seihbandanlage Spülwasserpumpe		3,45	2,8	1.756	4.847	
ÜSS-ED, Seihbandanlage Austrags-/Dickschlamm-pumpe		4,00	3,2	1.027	3.286	
FHM Dosierpumpe 1		0,37	0,3	1.753	519	
FHM Dosierpumpe 2		0,37	0,3	1.753	519	
<u>Nacheindicker:</u>						1.648
Krählwerk NE		0,37	0,3	4.593	1.148	
Trübwasserpumpe NE		1,60	1,3	388	497	
Winde Trübwasserabzug NE		0,18	0,1	23	3	
<u>Infrastruktur:</u>						97
Schmutzwasserpumpe 1		1,8	1,4	65	94	
Schmutzwasserpumpe 2		1,8	1,4	32	46	
<u>Luftbehandlung:</u>						57.381
Hallenlüfter		0,75	0,6	1.000	600	
Raumluftbehandlung Rechenhaus		1,73	1,4	8.290	11.473	
Raumluftbehandlung Containerraum 1		1,73	1,4	8.575	11.868	
Raumluftbehandlung Containerraum 2		1,73	1,4	8.575	11.868	
Abluftbehandlung Mech. Stufe		2,10	1,7	8.457	14.208	
Abluftbehandlung VE, TW		0,80	0,85	4.534	3.854	
Abluftbehandlung NE		1,30	0,76	4.650	3.511	
<u>Elektroheizung</u>						3.840
Elektroheizung (8 Stück)		20,00	16,0	240	3.840	
<u>Licht</u>						14.400
Außenbeleuchtung (80 Stück)		36,00	28,8	500	14.400	
<u>Gasverteiler:</u>						
Gasfackel				10		
Gasfackel Kondpumpe				85		
<u>Brenner</u>						
Faulgasbrenner		85-580		18		
Ölbrenner		148/296/5		289		
		93				
<u>BHKW:</u>						
Tischkühler				3.832		
BHKW Modul 1		80,0		4.823		
BHKW Modul 2		80,0		4.682		
Netzersatzanlage		540		32		
Gesamtverbrauch (berechnet)						1.623.445

A 3. Anlagenbelastung der Kläranlage Radevormwald

Tabelle A- 2: Zusammengefasste Anlagenbelastung der Kläranlage Radevormwald (Bezugsjahr 2014)

Zulauf Kläranlage		BSB₅	CSB	P_{ges}	N_{ges}	NH₄-N	N_{org}
Mittelwert	B _a [kg/d]	2.431	6.948	98	661	394	267
85-Perzentilwert	B _a [kg/d]	3.567	10.754	139	965	550	415
Mittelwert	c [mg/l]	151	445	6	36	23	-
Belastung über EW (Mittelwert)	[E]	40.524	57.901	54.203	60.098	-	-
spez EW-Fracht (ATV-DVWK 2000)	[kg/(E*d)]	60	120	1,8	11	-	-
Zulaufwassermenge	[m ³ /a]	7.190.634					
Zulauf Belebung		BSB₅	CSB	P_{ges}	N_{ges}	NH₄-N	N_{org}
Mittelwert	B _d [kg/d]	-	3.706	-	596	296	300
85-Perzentilwert	B _d [kg/d]	-	5.641	-	848	373	475
Mittelwert	C [mg/l]	-	213	-	33	19	14
Anzahl	[-]	-	257	-	257	67	-
Belastung über EW (Mittelwert)	[E]	-	41.174	-	59.599	-	-
Belastung über EW (85-Perz.)	[E]	-	62.675	-	84.805	-	-
Spez. EW-Fracht (ATV-DVWK 2000)	[g/(E*d)]	45	90	1,6	10	-	-

A 4. Spezifischer Stromverbrauch der KA Radevormwald im Vergleich mit Literaturdaten

Tabelle A-3: Spezifischer Stromverbrauch der KA Radevormwald im Vergleich

Verfahrensgruppe	Aggregatgruppe	Stromverbrauch Radevormwald			Stromverbrauch* (Median, GK 4)	
		Anteil [%]	absolut [kWh/a]	spezifisch kWh/(E*a)	spezifisch [kWh/(E*a)]	Anteil [%]
RÜB	RÜB	0,0%	695	0,01	-	-
Mechanik	Rechen	0,2%	2.612	0,05	0,14	0,5
	Sandfang	1,2%	19.274	0,33	1,11	3,6
	Vorklärung (inkl. PS-Pumpe)	0,9%	14.203	0,25	0,31	1,0
Biologie	Belüftung	49,2%	799.373	13,81	15,58	49,8
	Umwälzung	5,3%	86.678	1,50	4,06	13,0
	Rezirkulation	3,3%	52.773	0,91	1,45	4,6
	Rücklaufschlamm-förderung	13,4%	218.174	3,77	2,62	8,4
Nachklärung	Nachklärung	4,7%	76.484	1,32	0,94	3,0
Sonstiges	Abwasserhebwerke	0%	0	0,00	-	-
	Filtration	0%	0	0,00	-	-
Kalksilo	Kalksilo	0,7%	11.618	0,20	-	-
Fällmitteldosierung	Fällmitteldosierung	0,1%	1.782	0,03	-	-
Schlammbehandlung	Voreindickung	0,7%	11.938	0,21	-	-
	Fettpumpe	0,2%	2.731	0,05	-	-
	Faulraummischer	7,6%	122.649	2,12	-	-
	Rohschlammpumpe	0,8%	13.194	0,23	-	-
	Heizschlammpumpe	3,2%	52.032	0,90	-	-
	Nacheindickung	0,1%	1.648	0,03	0,16	0,5
	Entwässerung	0,9%	14.847	0,26	1,53	4,9
	Kammerfilterpresse	1,2%	19.740	0,34	-	-
	Sonstiges	0,0%	0	0,00	0,86	2,8
	Infrastruktur	Lüftung	3,5%	57.381	0,99	0,67
Elektroheizung		0,2%	3.840	0,07	0,58	1,9
Allgemein (Licht, o.ä.)		0,9%	14.497	0,25	0,89	2,9
Brauchwasser		1,6%	25.238	0,44	0,36	1,2
Summe		100%	1.623.403	28,04	41,5	100,00

* Datenquelle: Kolisch et al. 2014 (nach Schmitt et al. 2017b)

A 5. Ausführliche Darstellung der Abschaltversuche sowie Kurzbeschreibungen der KA Odenthal und KA Kohlfurth

A 5.1. Abschaltversuche Kläranlage Odenthal

Kurzbeschreibung (Wupperverband 2005; Schmitt et al. 2017b):

Das Klärwerk Odenthal ist eine getrennt anaerob stabilisierende Belebungsanlage mit einer Ausbaugröße von 17.500 EW. Die mechanische Reinigung besteht aus einer einstraßigen Rechenanlage, einem kombinierten Sand- und Fettfang sowie dem Vorklärbecken. Die biologische Stufe besteht aus drei Belebungsbecken, die in Reihe geschaltet sind. Die BB 1 und 2 besitzen je ein Volumen von 1.375 m³ und BB 3 1.000 m. Die Becken werden, über unabhängig steuerbare Plattenbelüfter, intermittierend betrieben. Zur Nachklärung stehen zwei Becken zur Verfügung ($V_{NK1} = 900 \text{ m}^3$; $V_{NK2} = 1.290 \text{ m}^3$), die entsprechend ihrer Volumina aus BB 3 beschickt werden. Der, aus der Vorklärung anfallende, Rohschlamm wird in zwei wechselseitig betriebene Voreindicker mit je 100 m³ Volumen auf einen TS-Gehalt von ca. 3% eingedickt und dem Faulturm zugeführt ($V_{FB} = 800 \text{ m}^3$). Das anfallende Faulgas wird über ein BHKW (35 kW_{el}) verstromt. Der aus dem Nacheindicker kommende Schlamm wird extern entwässert und entsorgt (Wupperverband 2005).

Während der Versuchsdurchführung wurden die Gebläse nach dem Anfahren direkt abgeschaltet, welche durch die aufgezeichneten Daten in 15-Miuten-Inkrementen nicht aufgenommen werden konnten. Durch fehlende Leistungsmessungen an den untersuchten Aggregaten konnte die eingesparte (Wirk-)Leistung ebenfalls nicht erfasst werden und wurde daher grob abgeschätzt. Des Weiteren ergeben sich die langen Abschaltdauern durch anschließende Deni-Phasen nach einer Abschaltung in der Nitri-Phase. Anzumerken ist, dass durch die drei in Reihe geschalteten Belebungsbecken eine Pufferwirkung und damit eine gewisse Sicherheit vorhanden ist entstehende NH₄-N-Spitzen (v.a. in BB 1) in den folgenden Becken abzubauen. Keiner der durchgeführten Abschaltversuche ($n_{\text{Gebläse}} = 9$; $n_{\text{RRLS}} = 2$) führte zu einer signifikanten Verschlechterung der Gesamtablaufwerte in den genutzten Zeitintervallen (Schmitt et al. 2017b).

Versuchsdurchführung Kläranlage Odenthal:

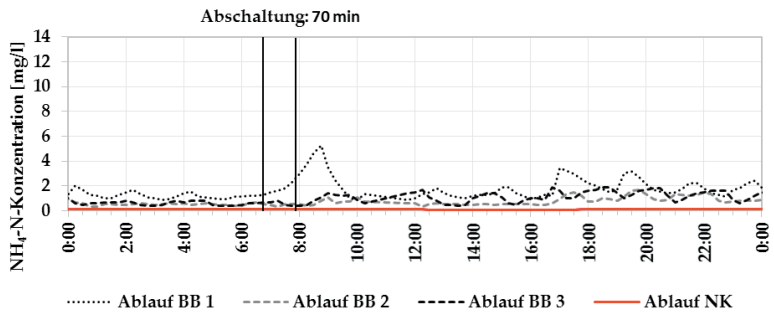


Abbildung A- 2: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 70 min (6:40 Uhr bis 7:50 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

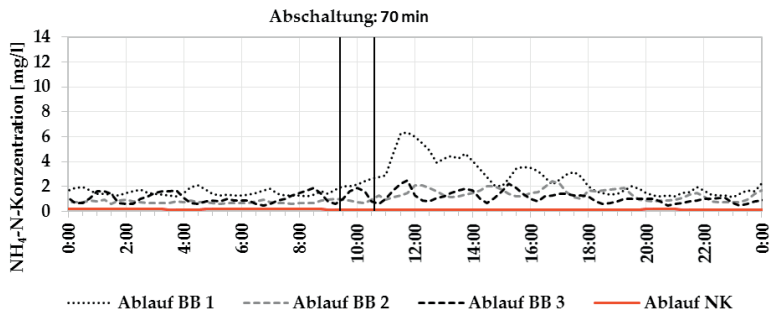


Abbildung A- 3: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 70 min (9:25 Uhr bis 10:35 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

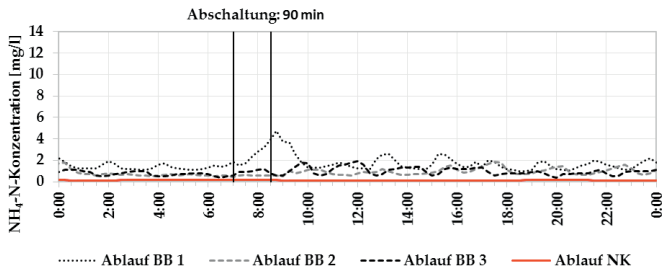


Abbildung A- 4: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 90 min (7:00 Uhr bis 8:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

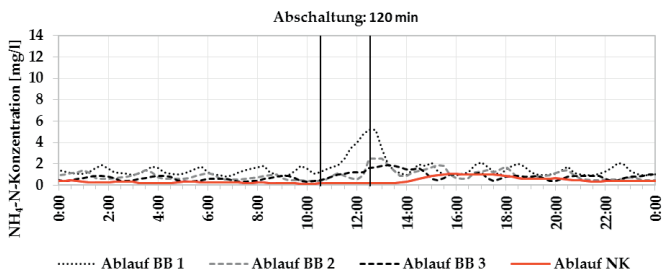


Abbildung A- 5: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 120 min (10:30 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

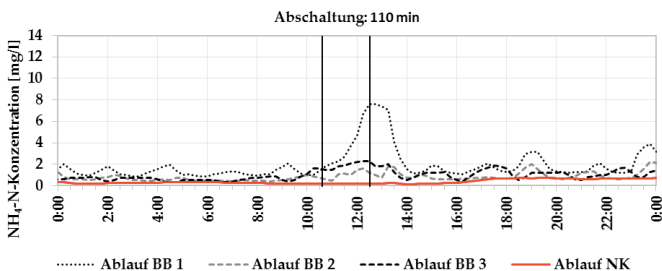


Abbildung A- 6: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 110 min (10:40 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

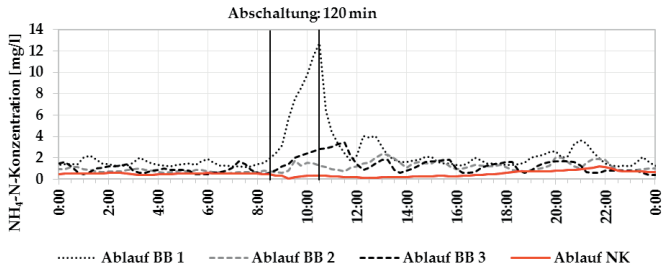


Abbildung A- 7: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 und 3 für 120 min (8:30 Uhr bis 10:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

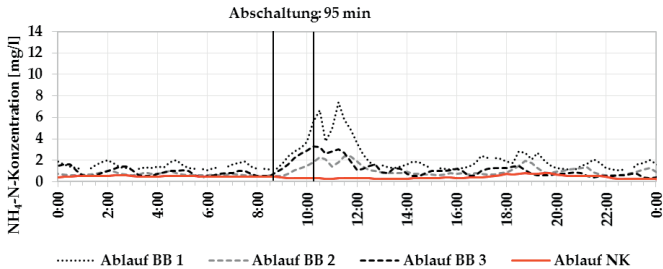


Abbildung A- 8: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 95 min (BB 1 und 3, 8:40 Uhr bis 10:15 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

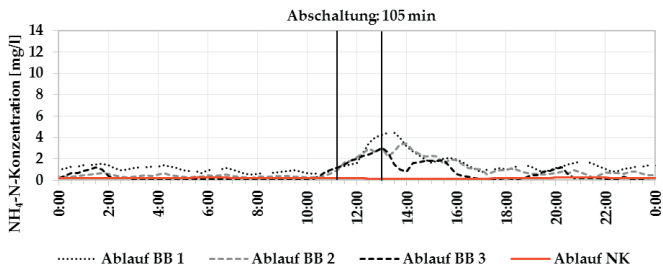


Abbildung A- 9: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 105 min (BB 1 und 3, 11:15 Uhr bis 13:00 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

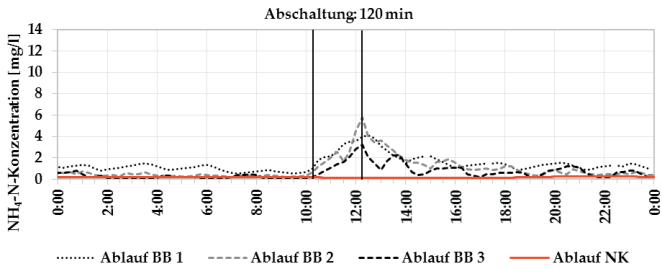


Abbildung A- 10: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 120 min (BB 1 und 3, 10:15 Uhr bis 12:15 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

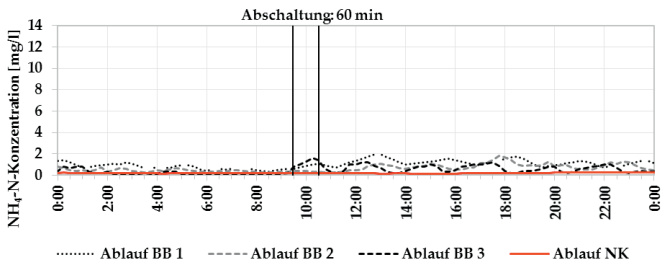


Abbildung A- 11: Abschaltversuch der RLS für 60min (9:30 Uhr bis 10:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

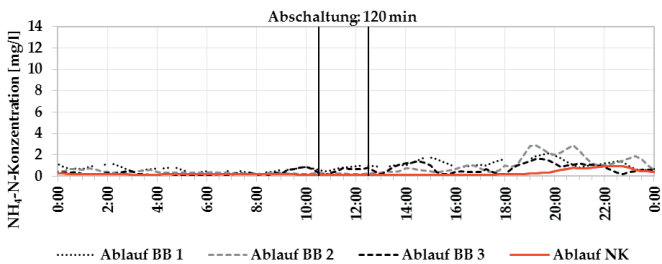


Abbildung A- 12: Abschaltversuch der RLS für 60min (10:30 Uhr bis 12:30 Uhr), KA Odenthal (nach Schmitt et al. 2017b)

A 5.2. Abschaltversuche Kläranlage Kohlfurth

Kurzbeschreibung (Wupperverband 2006; Schmitt et al. 2017b):

Die Kläranlage Kohlfurth besitzt eine Ausbaugröße von 146.000 EW. Die mechanische Reinigungsstufe besteht aus einer zweistraßigen Rechenanlage und einem ebenfalls zweistraßigen Sandfang. Im Anschluss gelangt das Abwasser in zwei parallel betriebenen rechteckige Vorklärbecken. Nach der Vorklärung fließen etwa die Hälfte des dort vorgereinigten Abwassers, zusammen mit dem Rücklaufschlamm aus der Nachklärung und dem Rezirkulationswasser in die erste Kaskadenstufe. Die parallel betriebenen Belebungsbecken 1 und 2 sind unterteilt in einen unbelüfteten Teil zur Denitrifikation und einen belüfteten Teil sowie Vario-Zonen, die je nach Belastungssituation genutzt werden. Die zweite Hälfte des Abwassers fließt zusammen mit dem Abflau aus der ersten in die zweite Kaskadenstufe. Die Belüftung erfolgt in allen vier Bereichen intermittierend. Nachdem das Abwasser die Belebungsbecken durchlaufen hat, wird es auf die insgesamt 3 Nachklärbecken verteilt. Des Weiteren ist zur Behandlung von mit Stickstoff hochbelastetem Prozesswasser eine Membrantrennstufe installiert. Der Primärschlamm aus der Vorklärung wird in einen Primärschlammeindicker gepumpt und danach, zusammen mit dem vorher statisch eingedickten Überschussschlamm, den beiden Faultürmen zugeführt. Die Abwärme, die bei der Verstromung des Klärgases in den BHKW ($3 \times 134 \text{ kW}_{\text{el}}$; $365 \text{ kW}_{\text{el}}$) entsteht, wird zur Beheizung des Faulturms und der Betriebsgebäude genutzt (Wupperverband 2006).

Auf der KA Kohlfurth wurden nur Abschaltversuche an den Belüftungsaggregaten ($n_{\text{Gebläse}} = 7$) durchgeführt, da durch ein Abschalten der RLS-Pumpen ein Schlammabtrieb aus der Nachklärung erwartet wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass bei langen Abschaltdauern von über 60 Minuten im Ablauf des BB 1 z.T. deutliche Erhöhungen auf bis zu $8 \text{ mg/l NH}_4\text{-N}$ zu verzeichnen sind, die sich u.U. zeitverzögernd auf den Ablauf der Nachklärung auswirken können. Hier wäre näher zu untersuchen in wieweit längere Abschaltungen reglementiert werden müssten. Die durchgeführten Versuche zeigen allerdings, dass für begrenzte Zeitintervalle keine größeren Auswirkungen auf die Gesamtablaufwerte der Anlage entstehen und eine Nutzung der Belüftung sowie der RLS-Pumpen möglich ist (Schmitt et al. 2017b).

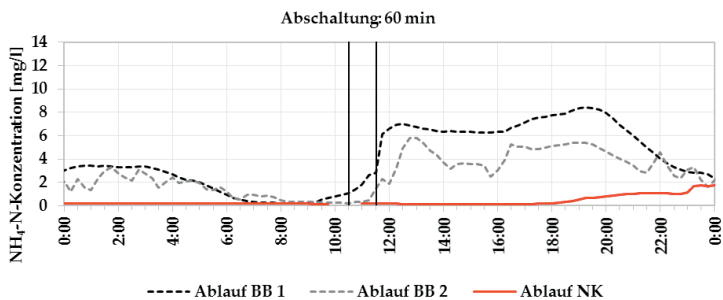
Versuchsdurchführung Kläranlage Kohlfurth:

Abbildung A- 13: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 60 min (10:35 Uhr bis 11:35 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

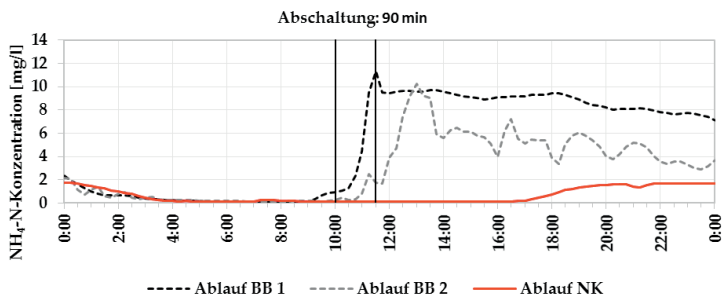


Abbildung A- 14: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 90 min (10:00 Uhr bis 11:30 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

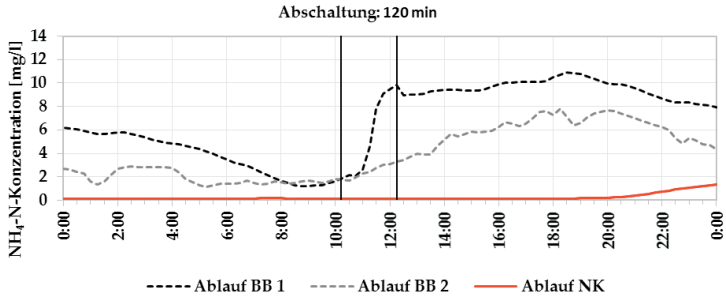


Abbildung A- 15: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 120 min (10:15 Uhr bis 12:15 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

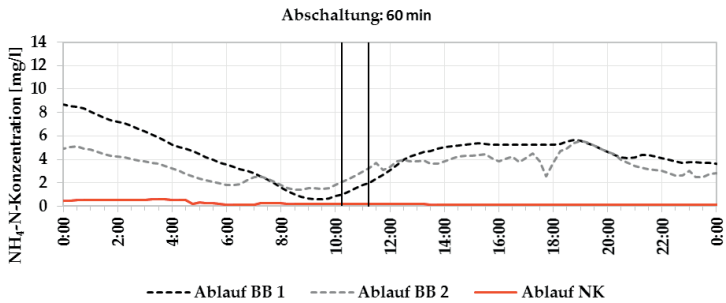


Abbildung A- 16: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 60 min (10:15 Uhr bis 11:15 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

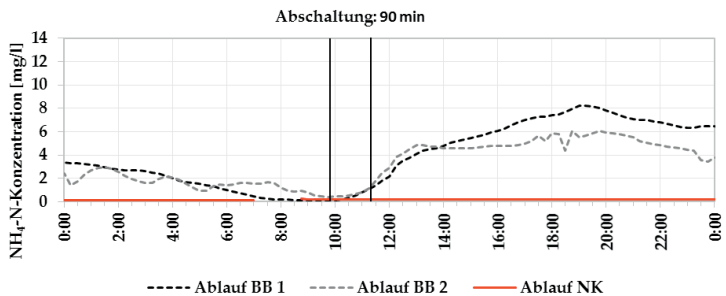


Abbildung A- 17: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 90 min (09:50 Uhr bis 11:20 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

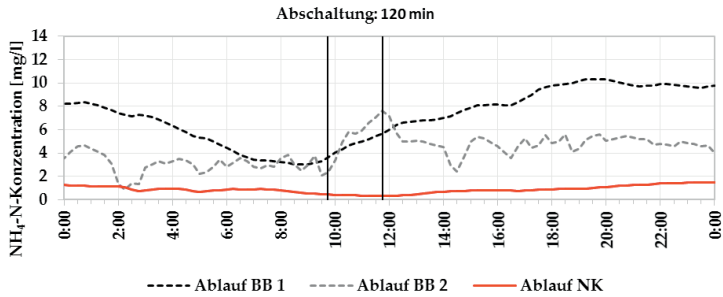


Abbildung A- 18: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 120 min (09:45 Uhr bis 11:45 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

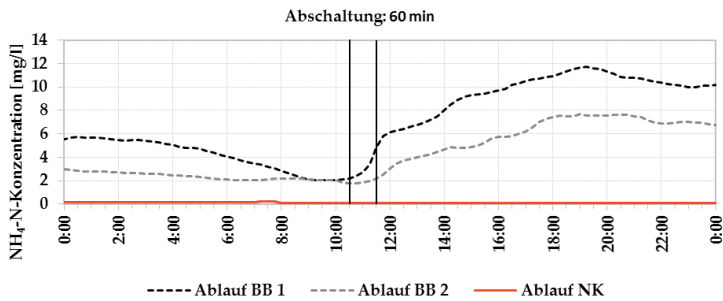


Abbildung A- 19: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 60 min (10:30 Uhr bis 11:30 Uhr), KA Kohlfurth (nach Schmitt et al. 2017b)

A 5.3. Abschaltversuche Kläranlage Radevormwald

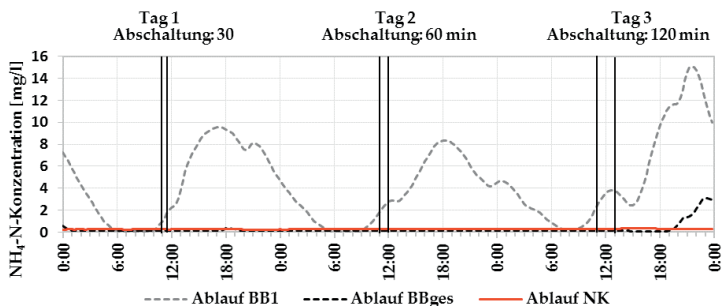


Abbildung A- 20: Abschaltversuche der RLS (30min, 60min, 120min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

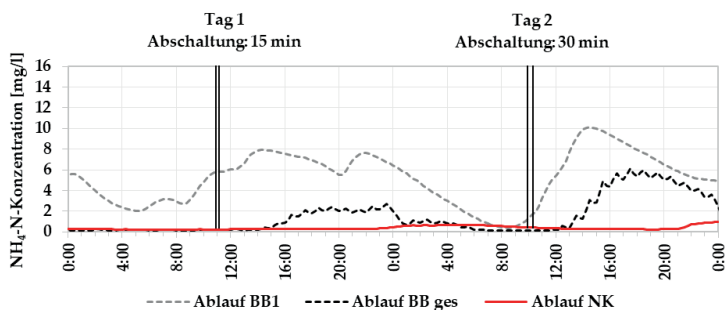


Abbildung A- 21: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 (15 min, 30 min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

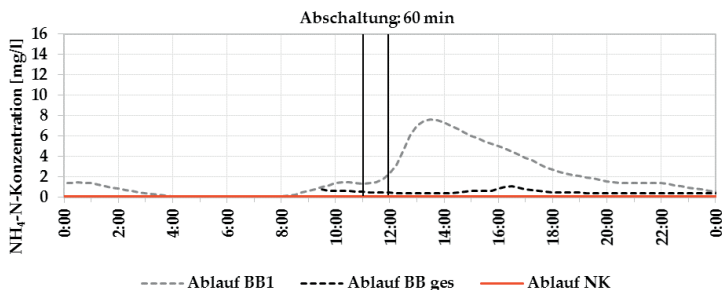


Abbildung A- 22: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 1 für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

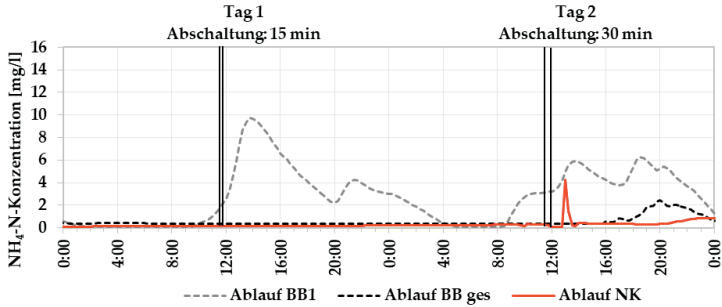


Abbildung A- 23: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 (15 min, 30 min), KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

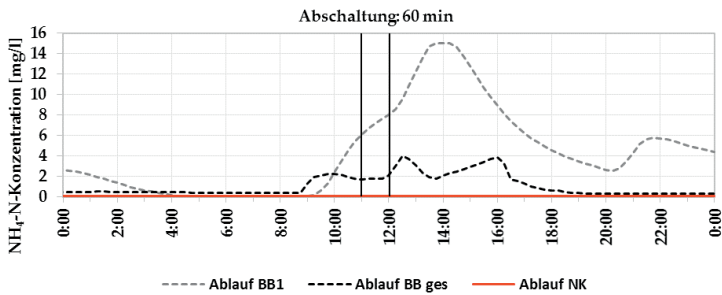


Abbildung A- 24: Abschaltversuch der Belüftungsaggregate im Belebungsbecken 2 für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

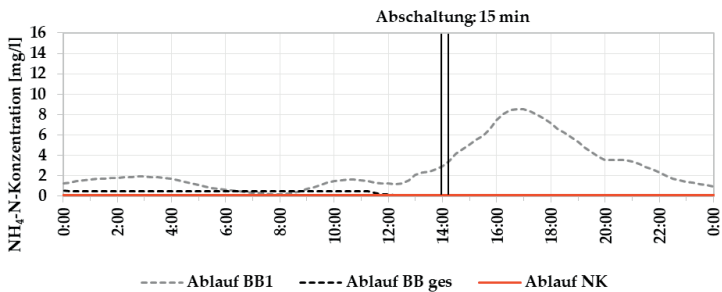


Abbildung A- 25: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 15 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

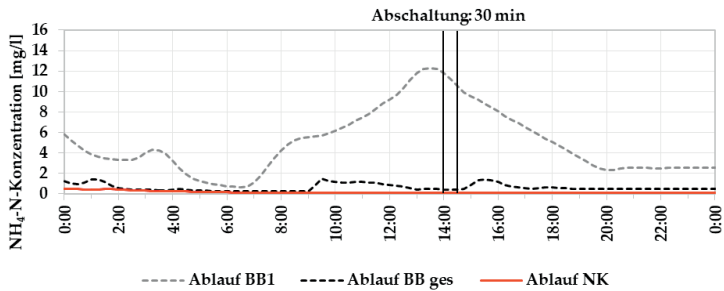


Abbildung A- 26: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 30 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

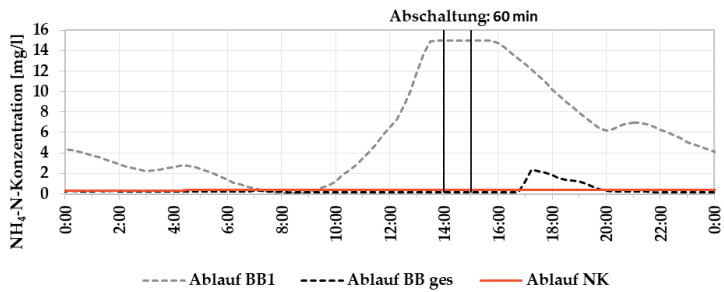


Abbildung A- 27: Abschaltversuch aller Belüftungsaggregate für 60 min, KA Radevormwald (nach Schmitt et al. 2017b)

A 6. Aggregatgruppenbezogener Stromverbrauch auf kommunalen Kläranlagen

Tabelle A-4: Spezifischer Stromverbrauch (Median) und prozentualer Anteil am Gesamtenergieverbrauch kommunaler Kläranlagen (Datenquelle: Kolisch et al. 2014, nach Schmitt et al. 2017b)

Aggregatgruppe	GK 1-3		GK 4		GK 5	
	[kWh/(E*a)]		[kWh/(E*a)]		[kWh/(E*a)]	
Rechen	0,34	0,47%	0,14	0,35%	0,13	0,39%
Sandfang	3,97	5,59%	1,11	2,67%	0,52	1,59%
Vorklärung (inkl. PS-Pumpe)	0,15	0,21%	0,31	0,75%	0,20	0,60%
Belüftung	20,58	28,97%	15,58	37,55%	13,82	42,25%
Umwälzung	8,79	12,37%	4,06	9,78%	2,20	6,74%
Rezirkulation	4,09	5,76%	1,45	3,50%	1,20	3,68%
Rücklaufschlamm- förderung	4,69	6,60%	2,62	6,32%	2,17	6,63%
Abwasser- hebwerke	4,39	6,17%	3,39	8,17%	2,68	8,20%
Nachklärung (nur ÜSS-Pumpe)	0,96	1,34%	0,94	2,27%	0,23	0,69%
Filtration	4,69	6,60%	2,62	6,32%	2,17	6,63%
Voreindickung	0,56	0,78%	0,70	1,69%	0,86	2,62%
Stabilisierung / Faulung	6,82	9,59%	2,67	6,44%	1,60	4,88%
Nacheindickung	0,38	0,54%	0,16	0,39%	0,04	0,13%
Entwässerung	2,34	3,30%	1,53	3,69%	1,54	4,70%
Sonstiges (Schlamm- behandlung)	0,17	0,24%	0,86	2,08%	0,71	2,18%
Lüftung	1,91	2,69%	0,67	1,62%	0,71	2,16%
Elektroheizung	3,45	4,86%	0,58	1,40%	0,62	1,89%
Allgemein (Licht, o.ä.)	0,54	0,76%	0,89	2,15%	0,65	1,98%
Brauchwasser	0,77	1,08%	0,36	0,88%	0,28	0,85%
Sonstiges	1,46	2,06%	0,83	1,99%	0,40	1,21%
Summe Σ	70,7	100%	41,3	100%	32,6	100%

A 7. Integration in ein Virtuelles Kraftwerk

Nachfolgend ist ein Auszug der Versuchsergebnisse aus der Integration der Kläranlage Radevormwald in das virtuelle Kraftwerk dargestellt. Die Versuchsdurchführung erfolgte im Zeitraum vom 16.01.2017 bis 28.03.2017 und ist mit allen aufbereiteten Ergebnissen detailliert in Schmitt et al. (2017b) beschrieben.

Tabelle A- 5: Versuchsergebnisse der TE 1 - 4 im Rahmen der Untersuchungen zur Einbindung der Kläranlage Radevormwald in ein Virtuelles Kraftwerk mit MRL/SRL-Signalen aus dem Jahre 2014 (nach Schmitt et al. 2017b)

	Ver- suchs- tag	Anzahl Abrufe	Abruf- dauer pro Tag	max. mögliche Leistung pro Abruf	max. bereitge- stellte Leistung pro Abruf	mögliche Arbeit pro Tag	bereitgestellte Arbeit pro Tag
		[-]	[min]	[kW _{el}]	[kW _{el}]	[kWh _{el}]	[kWh _{el}]
TE 2-4 (Verbraucher)	MRL-01	2	30	94,0	77,0	47,0	25,5
	MRL-02	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MRL-03	2	65	107,0	52,0	115,9	54,1
	MRL-04	2	45	99,0	41,0	73,8	29,8
	MRL-05	1	45	120,0	120,0	90,0	90,0
	MRL-06	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MRL-07	1	15	163,0	163,0	40,8	40,8
	MRL-08	4	150	156,0	156,0	287,8	287,8
	MRL-09	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MRL-10	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Summe	12				655,3	528,0
TE 1 (Erzeuger)	MRL-11	5	90	40,0	30,0	80,0	80,0
	MRL-12	1	20	0,0	0,0	26,7	13,3
	MRL-13	4	105	140,0	70,0	0,0	0,0
	MRL-14	2	40	53,3	26,7	0,0	0,0
	MRL-15	1	45	60,0	30,0	0,0	0,0
	MRL-16	1	35	46,7	23,3	0,0	0,0
	MRL-17	1	80	0,0	0,0	106,7	106,7
	MRL-18	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MRL-19	1	55	0,0	0,0	73,3	73,3
	MRL-20	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Summe	40				1597,3	1329,3
TE 2-4 (Verbraucher)	SRL-01	3	24	124,0	124,0	51,1	51,1
	SRL-02	12	123	160,0	160,0	201,1	166,8
	SRL-03	7	50	234,0	234,0	178,2	178,2
	SRL-04	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SRL-05	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Summe	102				3625	3054,7

A 8. Flexibilitätskennzahlen der Kläranlagen Odenthal und Kohlfurth

Tabelle A-6: Übersicht der identifizierten Aggregate inkl. Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der Kläranlage Odenthal

Aggregatgruppe	Abschalt- dauer (min./max.) [min]	Zuschalt- dauer (min./max.) [min]	Regenerati- ons zeit [min]	Anfahr- zeit [s]	Abfahr- zeit [s]
Sandfang <i>(intermittierende Belüftung)</i>	5 – 50	5 – 50	15	10	10
Abluftventilator <i>(Rechengebäude)</i>	15 – 360	-	5	10	10
Belebungsbecken <i>(Gebläse)</i>	5 – 120	-	15	10	5
Kalkmilch Rührwerk	5 – 240	-	15	30	30
Heizschlamm-pumpen <i>(Faulturm)</i>	5 – 240	-	15	5	5
Rohschlamm-pumpen <i>(Faulturm)</i>	5 – 15	5 – 15	5	30	30
Schlammumwälz-pumpe <i>(Faulturm)</i>	15 – 60	-	60	60	60
Rücklaufschlamm- pumpen	5 – 120	-	60	60	5
Primärschlamm-pumpen	15 – 50	15 – 50	50	30	30
ÜSS-Pumpen	15 – 90	15 – 90	15	30	30
BHKW	60 – 90	15 – 240	5	180	60

Tabelle A-7: Übersicht der identifizierten Aggregate inkl. Kenngrößen zur Bereitstellung von Flexibilität auf der Kläranlage Odenthal

Aggregatgruppe	Abschalt- dauer (min./max.)	Zuschalt- dauer (min./max.)	Regenerati- onszeit	Anfahr- zeit	Abfahr- zeit
	[min]	[min]	[min]	[s]	[s]
Sandpumpe	5 – 30	5 – 30	15	30	30
Belebungsbecken (Gebläse)	5 – 120	-	15	10	5
Rezirkulationspumpen	5 – 240	-	15	30	30
Schwimmschlamm-räu- mer	3	-	15	30	30
ÜSS-Pumpen	5 – 60	-	15	30	30
BHKW	-	60 – 120	5	300	300
Netzersatzanlage	-	15 – 900	0	30	30

A 9. Ergänzende Daten/Informationen zu Kapitel 6.4 „Kläranlagen in der Rolle als (Langzeit-)Energiespeicher“

Tabelle A- 8: Auszug ausgewählter Literaturstellen im Themenbereich Energiespeicher und Power-to-X-Technologien

Themenfeld	Titel	
Allgemein	Energiespeicher	Sterner und Stadler 2016
	Energiespeicher für die Energiewende	VDE 2012
Power-to-Gas	Technoökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten	DVGW 2014
	Potenzialatlas Power to Gas	DENA 2016a
	Strategieplattform Power to Gas Thesenpapier: Technik und Technologieentwicklung	DENA 2011
	Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Limiting global warming by transforming energy systems	Sterner 2009
	Wasserstoff und Brennstoffzelle	Töpler und Lehmann 2017
	Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung, Band 1: Kompendium Wasserstoff	Bolle et al. 2012a
Methanisierung	Techno-ökonomische Studie zur biologischen Methanisierung bei Power- to- Gas- Konzepten	Graf et al. 2014
	Selektive Methanisierung von CO in Anwesenheit von CO ₂ zur Reinigung von Wasserstoff unter den Bedingungen einer PEM-Brennstoffzelle	Schulz 2005
	Vergleich von biologischen und katalytischen Methanisierungskonzepten	Mörs et al. 2015
	Biologische Methanisierung (Tagungsband)	OTTI e.V. 2015
	Erfahrungen mit der Power-to-Gas Pilotanlage im Energiepark Pirmasens-Winzeln	Dröge und Pacan 2017
Power-to-X	Kurzstudie Power-to-X	FfE 2017
	Einsatz der Wasserstofftechnologie in der Abwasserbeseitigung, Band 2: Methanolsynthese	Bolle et al. 2012b
	Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik	Eichlseder und Klell 2008

Lebenslauf

Dipl.-Ing. Michael Schäfer

Beruflicher Werdegang

Seit Nov. 2013 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet
Siedlungswasserwirtschaft der TU Kaiserslautern

Ausbildung und Studium

Seit Juli 2015 Kollegiat im Helmut Bode-Promotionskolleg an der
Technischen Universität Kaiserslautern

Okt. 2007 bis
Okt. 2013 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen
Universität Kaiserslautern

Juni 2006 Abitur am Wirtschaftsgymnasium in Pirmasens

Schriftenreihe Wasser Infrastruktur Ressourcen

bereits veröffentlicht wurden

- Band 1 **Tagungsband (2018)**
Regenwasser in urbanen Räumen
aqua urbanica trifft RegenwasserTage 2018
ISBN 978-3-95974-086-9
- Band 2 **Dissertation Hürter, Hagen (2018)**
Erarbeitung gebietspezifischer Anwendungsempfehlungen
für bi-direktional gekoppelte 1D-2D-Überflutungsberechnungen
ISBN 978-3-95974-087-6
- Band 3 **Dissertation Baron, Silja (2018)**
Analyse von Transformationspfaden zur Ableitung von Handlungs-
empfehlungen für die Abwasserentsorgung im ländlichen Raum
ISBN 978-3-95974-096-8
- Band 4 **Dissertation Scheid, Christian (2018)**
GIS-basierte Starkregen-Risikoanalyse unter besonderer Berücksichtigung
von Datenerfordernissen und methodischer Aussagefähigkeit
ISBN 978-3-95974-102-6
- Band 5 **Dissertation Schäfer, Michael (2019)**
Ein methodischer Ansatz zur Bereitstellung energetischer Flexibilität durch
einen anpassungsfähigen Kläranlagenbetrieb
ISBN 978-3-95974-108-8
- Band 6 **Festschrift zur Verabschiedung von Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt (2019)**
Siedlungswasserwirtschaft 'from K'Town to KOSMOS'
ISBN 978-3-95974-104-0