

ARRIVEE - ABWASSERREINIGUNGSANLAGEN IN INTELLIGENTEN VERTEILNETZEN MIT ERNEUERBARER ENERGIEERZEUGUNG

Oliver Gretzschel, Michael Schäfer, Theo G. Schmitt, Kaiserslautern
Inka Hobus, Wuppertal

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Der Energiesektor befindet sich in einem Umbauprozess. Erneuerbare Energien haben 2014 in Deutschland erstmals einen Anteil von 25,8 % an der Stromerzeugung erreicht (AEE Energien e.V. 2015). Kurz- und mittelfristig wird der Anteil von dezentralen Energieerzeugern weiter zu- und einen deutlichen Anteil an der Grundlastversorgung einnehmen. Schwankende Energiemengen aus Photovoltaik- und Windkraftanlagen dürfen nicht zu Qualitätseinbußen, d. h. einer Abweichung von der 50 Hz-Frequenz und der Spannungsstabilität, im Stromnetzbetrieb führen. Zum Ausgleich und zur Vermeidung der temporären Abregelung dieser Erzeuger ist ein entsprechendes Potenzial an Regelenergie und in Zukunft auch an Speichermöglichkeiten erforderlich (Sternier und Stadler 2014). Die regionale Wasserwirtschaft in Deutschland kann mit ihren energetischen Speicher- und Erzeugungsmöglichkeiten zur Erreichung der energiepolitischen Ziele beitragen. In diesem Zusammenhang ist als übergeordnetes Ziel die Aufgabe der Abwasserreinigung stets sicherzustellen. Gleichzeitig „sind Abwasseranlagen so zu errichten, zu betreiben und zu benutzen, dass eine energieeffiziente Betriebsweise ermöglicht wird. Die bei der Abwasserbeseitigung entstehenden Energiepotenziale sind, soweit technisch möglich und wirtschaftlich vertretbar, zu nutzen“ (Anhang 1 B AbwVO).

1.2 Projektziele

Übergeordnetes Ziel des Verbundvorhabens *arrivee* ist die Entwicklung einer Systemlösung zur Integration der in Deutschland flächendeckend vorhandenen Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung in ein optimiertes Regelenergie- und Speicherkonzept. Dazu sollen die hervorragenden technischen Voraussetzungen von Faulungsanlagen, i. b. die vorhandenen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK-Anlagen) und die zugehörigen Gasspeicher, gezielt genutzt werden. Mit zu entwickelnden Lösungsansätzen sollen damit System- und Netzdienstleistungen für Verteil- (Spannungshaltung) und Übertragungsnetze (Frequenzhaltung mit Hilfe von

Regelenergie) zur Verfügung gestellt werden, die heute und in Zukunft durch den zunehmenden Ausbau der stark fluktuierend anfallenden erneuerbaren Energien Wind und Sonne erforderlich sind.

Hierzu gilt es, das Klärgas, das auf diesen Anlagen bei der anaeroben Schlammfäulung mit einem Methangehalt von rund 65 % anfällt, nach Zwischenspeicherung nicht allein nach Erfordernissen des Kläranlagenbetriebs zu verwenden. Die Verstromung in KWK-Anlagen mit sogenannten Blockheizkraftwerken (BHKW) dient weitestgehend der Eigendeckung des Stromverbrauchs für die Behandlung des zugeführten Abwassers und des anfallenden Überschussschlammes. Zukünftig könnten Kläranlagen einen sinnvollen Beitrag an der Schnittstelle von Energie- und Wasserwirtschaft leisten. Hierfür werden die Einflüsse externer Eingriffe auf die Kläranlage analysiert und bewertet. Des Weiteren erfolgt eine Überprüfung innovativer Anlagenkomponenten zur optimierten Bereitstellung der benötigten Dienstleistungen des Strommarktes.

2 GRUNDLAGEN NETZSEITIG

2.1 Auswirkung der Energiewende auf das Stromnetz

Der wachsende Anteil volatiler erneuerbarer Energien führt zu zunehmend starken Schwankungen auf der Erzeugerseite, die phasenweise den Bedarf deutlich überschreiten bzw. unterschreiten (vgl. Bild 2.1). Um die Netzstabilität sicherzustellen kommt es zu Abschaltungen von Erzeugern und somit zu Verlusten. Im Jahr 2010 lag die Energieerzeugung aus erneuerbarer Energie überwiegend unter dem Bedarf.

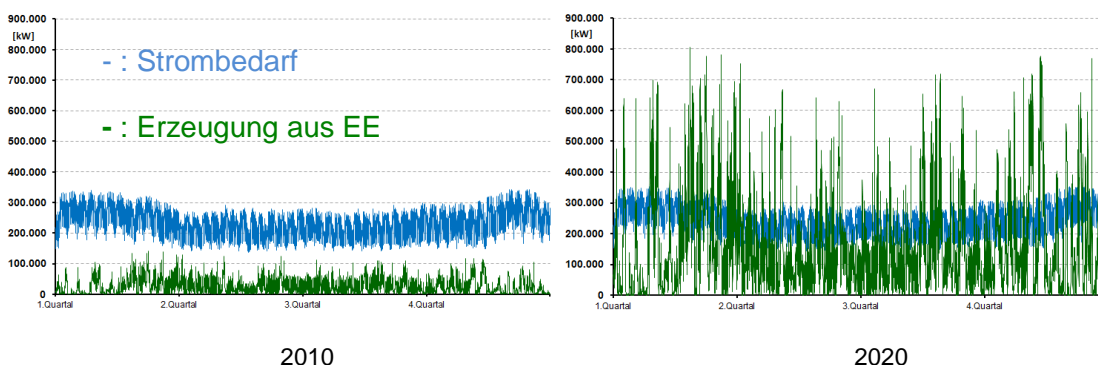


Bild 2.1: Änderungen der Einspeisung Erneuerbarer Energie (EE) in einem Stromnetz im Jahr 2010 und 2020 (Simon 2015)

Für das Jahr 2020 ist jedoch mit deutlichen Erzeugungsüberschüssen zu rechnen, die zu kritischen Systemzuständen führen können. Daraus ergeben sich zwei zentrale Fragestellungen:

- Wie kann die Netzstabilität sowohl im Übertragungsnetz (Frequenzhaltung) als auch im Verteilnetz (Spannungshaltung) auch zukünftig sichergestellt werden?
- Wie können diese Energieüberschüsse sinnvoll verwertet bzw. gespeichert werden?

2.2 Flexibilitätsoptionen und Speicherbedarf

Eine Möglichkeit zur Sicherstellung der Netzstabilität besteht darin gezielt Erzeuger herunterzufahren (z. B. BHKWs) oder Verbraucher hochzufahren. Diese Möglichkeit Stromverbraucher bzw. -erzeuger so zu betreiben, dass sie unter bestimmten Bedingungen (z. B. Strompreis, Netzstabilität) an- oder abgefahren werden können, wird im Zusammenhang mit Netzstabilität und EE-Ausbau als Flexibilitätsoption bezeichnet.

Die durch flexible Fahrweise freiwerdende oder anliegende Last kann als Dienstleistung vermarktet werden. Der auszuwählende Markt richtet sich nach der Anlagencharakteristik, wie z. B. die Geschwindigkeit, mit der eine Anlage an- bzw. abgefahren werden kann.

Ein Beispiel für Flexibilität ist die Bereitstellung von Regelleistung. Dies ist bereits gängige Praxis. Für eine Kläranlage würde dies bedeuten in Abhängigkeit der jeweiligen Netzsituation - Stromüberschuss bzw. -defizit - Erzeuger hoch- bzw. herunterzufahren, siehe Bild 2.2.

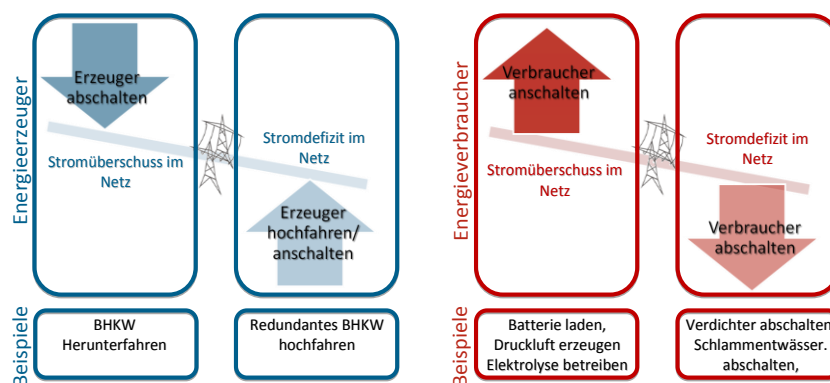


Bild 2.2: Flexibilitätverhalten von Verbrauchern und Erzeugern

Dieses „flexible“ Betreiben von Anlagentechnik kann unterschiedlich für die Sicherung der Netzstabilität eingesetzt werden. Die in Kläranlagen exemplarisch in Betracht kommenden Einsatzmöglichkeiten sind u. a.:

- Netzentgeltoptimierte Bezugsverhalten

- Bilanzkreismanagement
- Regelleistung
- Netzkapazitätsmanagement / lokale Netzdienstleistungen
- Preisschwankungen am Strommarkt nutzen (Arbitrage)

Mittelfristig, d. h. mit weiterem Ausbau der Erneuerbaren und dem Abschalten von großen Kraftwerken (Atom- und Kohlkraftwerke) werden auch Langzeitspeicher eine wichtige Rolle im Stromnetz spielen. Diese werden nach (Sternier und Stadler 2014) jedoch erst ab einem erneuerbaren Energieanteil von 60-70 % erforderlich, der etwa 2025 bis 2030 erreicht sein wird. Ein optimaler Einsatz von Flexibilitätsoptionen kann jedoch den Speicherbedarf in den kommenden Jahren niedrig halten.

3 FLEXIBILITÄTSOPTIONEN UND ANLAGENKONZEPTE

3.1 Im Bestand

Bei der Analyse und Identifikation von Flexibilitätsoptionen auf einer Kläranlage muss zwischen kontinuierlichen und diskontinuierlichen Prozessen unterschieden werden. Dabei sind diese wie folgt definiert:

- **kontinuierliche Prozesse** = Prozesse der Abwasserreinigung (mechanische und biologische Reinigung, ggf. vierte Reinigungsstufe) inkl. aller daran gekoppelten Aggregate
- **diskontinuierliche Prozesse** = Prozesse der Schlammbehandlung und Gasschiene inkl. aller daran gekoppelten Aggregate

Kontinuierliche Prozesse weisen eine geringe zeitliche Flexibilität auf, wohingegen die diskontinuierlichen Prozesse durch eine hohe zeitliche Einsatzverfügbarkeit charakterisiert und somit einfacher zu erschließen sind. Die Aggregate der kontinuierlichen Prozesse sind insbesondere mit Blick auf Sicherstellung der Reinigungsleistung detailliert zu analysieren, bevor diese in ein Flexibilitätskonzept eingebunden werden können (vgl. Bild 3.1).

Aus heutiger Betreibersicht kommt i. b. das BHKW als Flexibilitätsoption in Frage, das ohne großen Aufwand in ein virtuelles Kraftwerk eingebunden werden kann (vgl. Kapitel 6). Ein Beispiel für die Einbindung des Klärgas-BHKW in ein virtuelles Kraftwerk ist die Kläranlage Kaiserslautern (Grüner 2015). Einschränkend wirken in diesem Zusammenhang die Möglichkeit Klärgas zwischenzuspeichern sowie die Sicherstellung des Wärmebedarfs auf der Kläranlage. Diese Aspekte werden bei der Analyse der unterschiedlicher Anlagenkonzeptionen (vgl. Kapitel 3) im Rahmen von *arrivee* näher betrachtet und bewertet.

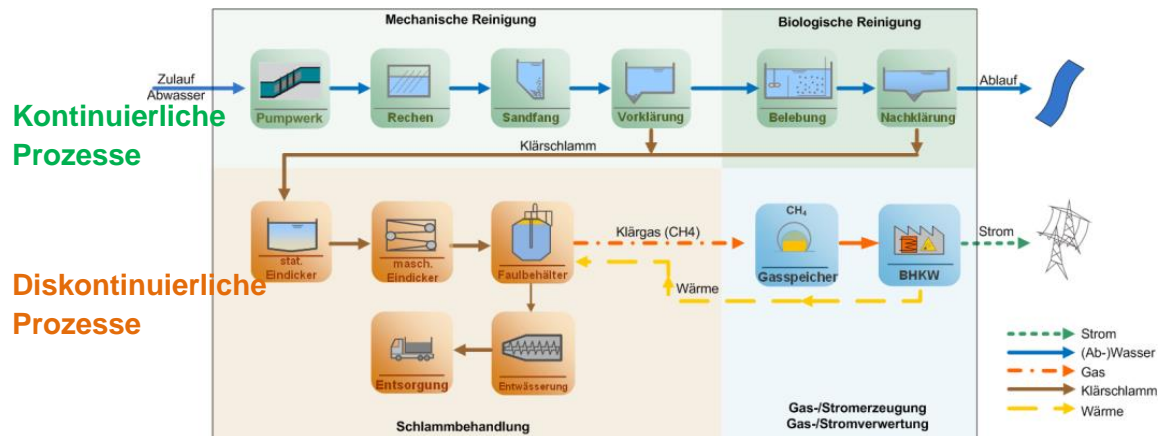


Bild 3.1: Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen im Bestand

3.2 Innovative Anlagentechnik

Faulungsanlagen bieten bestmögliche Voraussetzungen zur Umsetzung der Power-to-Gas-Technologie (PtG-Technologie) und Erweiterung als „Power-to-Gas-to-Power“ (Schäfer et al. 2015b).

Die Umsetzung erfolgt im Falle eines Stromüberschusses in einem ersten Schritt mit Hilfe der **Elektrolyse**, mit der Wasser (H_2O) zu Sauerstoff (O_2) und Wasserstoff (H_2) aufgespalten wird. CO_2 kann sowohl auf chemischen als auch biologischem Wege mit H_2 zu Methan reagieren. Der Prozess wird als Methanisierung bezeichnet. Die Methanisierung des H_2 kann chemisch über den Sabatier-Prozess (Müller-Syring et al. 2011) oder biologisch unter Verwendung spezieller methanproduzierender Bakterien im vorhandenen Faulturn (Schmack 2012) oder einem externen Reaktor umgesetzt werden (Martin et al. 2013). Außerdem besteht die Möglichkeit der Einspeisung von H_2 in das reguläre Erdgasnetz bis zu einer Konzentration von heute 2 % bzw. mittelfristig 5 - 15 % (Müller-Syring et al. 2011).

Neben H_2 wird zur **Methanisierung** Kohlenstoffdioxid (CO_2) benötigt, welches aus internen Quellen der Kläranlage bezogen werden kann. Die am einfachsten zu erschließende Quelle ist das Faulgas selbst. Dieses besteht zu etwa 65 % aus CH_4 und rund 35 % aus CO_2 . Als weitere CO_2 -Quellen können theoretisch die Rauchgase der BHKW-Anlagen oder die Emissionen aus dem Belebungsbecken dienen. Durch biologische Methanisierung kann die Reinheit des Klärgases unter Zugabe von H_2 auf eine einspeisefähige Methankonzentration gesteigert werden (Heller 2015; PFI 2015), das somit zu einem Erdgassubstitut wird (SNG - Synthetic Natural Gas). Damit ist es möglich, die vorhandene Erdgasinfrastruktur als nahezu unbegrenzten Gasspeicher zu nutzen (Specht et al.). Das Erdgasnetz ermöglicht eine Speicherung über mehrere Monate.

Der bei Elektrolyse unter hohem Druck (> 50 bar) anfallende Sauerstoff wird zwischengespeichert und soll ebenfalls als Flexibilitätsoption herangezogen werden. Dieser **Reinsauerstoff** wird im Rahmen von arrivee hinsichtlich seiner Verwendbarkeit zur Belüftung der Belebungsbecken untersucht. In der betrachteten Anlagenkonzeption wird untersucht, wie sich eine Beimischung zu bestimmten Prozentanteilen zur Druckluft auf den Energieverbrauch der Druckluftverdichter auswirkt. So kann z. B. die Beimischung von O₂ ggf. dazu führen, dass eine temporäre Verringerung der Verdichterleistung bei gleicher O₂-Zufuhr möglich ist. Gegenüber anderen PtG-Standorten bietet die Kläranlage somit den Vorteil einer direkten Sauerstoffverwertungsoption der Elektrolyse.

Als weitere Flexibilitätsoption wird die Erzeugung und Speicherung von **Druckluft** (45 bar alternativ 100 bar) betrachtet. Dies umfasst auch die Dimensionierung entsprechender Anlagentechnik. Die Druckluft kann dann zeitversetzt zu entsprechenden Bedarfszeiten zur Belüftung der Belebungsbecken herangezogen werden. Im Rahmen von arrivee wird hinsichtlich der Eigenenergieerzeugung eine Rückverstromung der gespeicherten Energie durch Micro- Turboexpander geprüft.

Weitere Flexibilitätsoptionen können z. B. der Einsatz von **Großbatterien** auf Kläranlagen, aber auch die Implementierung von **Power-to-Heat** in Wärmespeichern darstellen. Diese Optionen werden im Rahmen von arrivee nicht im Detail betrachtet.

Bild 3.2 fasst die betrachteten Flexibilitätsbausteine für Kläranlagen zusammen und führt die entsprechenden Regeloptionen auf.

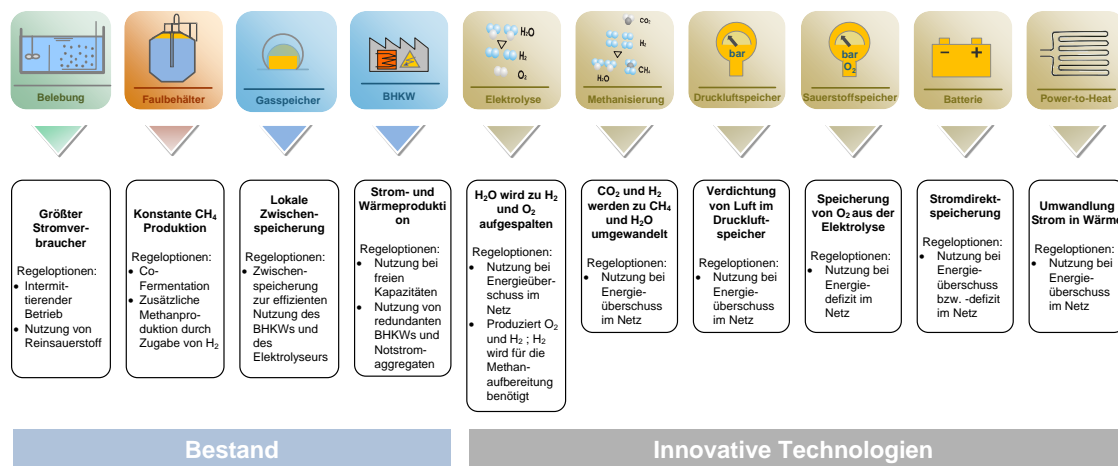


Bild 3.2: Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen durch Bestandsaggregate und Innovative Anlagentechnik

Im Rahmen der Projektbearbeitung werden die in Bild 3.2 dargestellten Varianten mit Ausnahme von ‚Batterie‘ und ‚Power-to-Heat‘ untersucht. Dabei werden die Anlagenkonzeptionen dimensioniert und auf ihre wirtschaftliche Tragfähigkeit unter

heutigen und zukünftigen Rahmenbedingungen analysiert und insbesondere auch Hemmnisse identifiziert, die für eine Marktfähigkeit erforderlich wären bzw. eine Implementierung erleichtern würden.

4 POTENZIALE UND REGELKONZEPT

Im Rahmen des Projektes wurde eine deutschlandweite Bestandsaufnahme aller Faulungsanlagen vorgenommen und das Flexibilitätspotenzial im Bestand für die KWK-Anlagen ermittelt. Bei der Potenzialanalyse wurden untersucht:

- Ausrüstung aller Kläranlagen mit Schlammfaulung mit KWK-Anlagen.
- Umrüstung aller Belebungsanlagen mit einer Anschlussgröße > 10.000 EW auf Schlammfaulungsanlagen mit entsprechenden KWK-Anlagen (vgl. Schmitt et al. 2014).
- Steigerung der Energieausbeute vorhandener Anlagen (Ausreizung innerbetrieblicher Optimierung Schlamm/Faulung, Desintegration des Klärschlammes, Hochlastfaulung, Repowering).
- Ausnutzung von Kapazitätsreserven durch Einrichtung von „Schlammbehandlungszentren“ (vgl. Schmitt et al. 2014) bzw. durch Einbringung externer Substrate.

Bild 4.1 zeigt den Verlauf der Stromproduktion auf Kläranlagen seit 1990. Zu erkennen ist, dass sich in den letzten 22 Jahren die Stromproduktion um den Faktor 1,5 erhöht hat. Die Untersuchungen zeigen allerdings auch, dass noch große Potenziale auf Kläranlagen zu erschließen sind. Erst in den letzten Jahren ist der Fokus der energetischen Optimierung auf Kläranlagen in das Bewusstsein der Betreiber gelangt und es ist davon auszugehen dass in den kommenden Jahren sowohl Energie eingespart als auch mehr Energie durch Umstellung und optimierte Faulgasproduktion erzeugt wird (DWA 2013).

Bundesweit liegt das untersuchte Potenzial eines optimierten Bestandes bei 2,11 bis 2,61 TWh_{el}/a, welches einer Erhöhung der Stromproduktion um den Faktor 2,1 entspricht. Damit stehen bis zu 300 MW_{el} an negativen Flexibilitätspotenzialen zur Verfügung (Schäfer et al. 2015). Dies entspricht etwa 15% des aktuellen Leistungsvolumens an negativer Minutenreserve am Regelenergiemarkt (vgl. Kapitel 6.1).

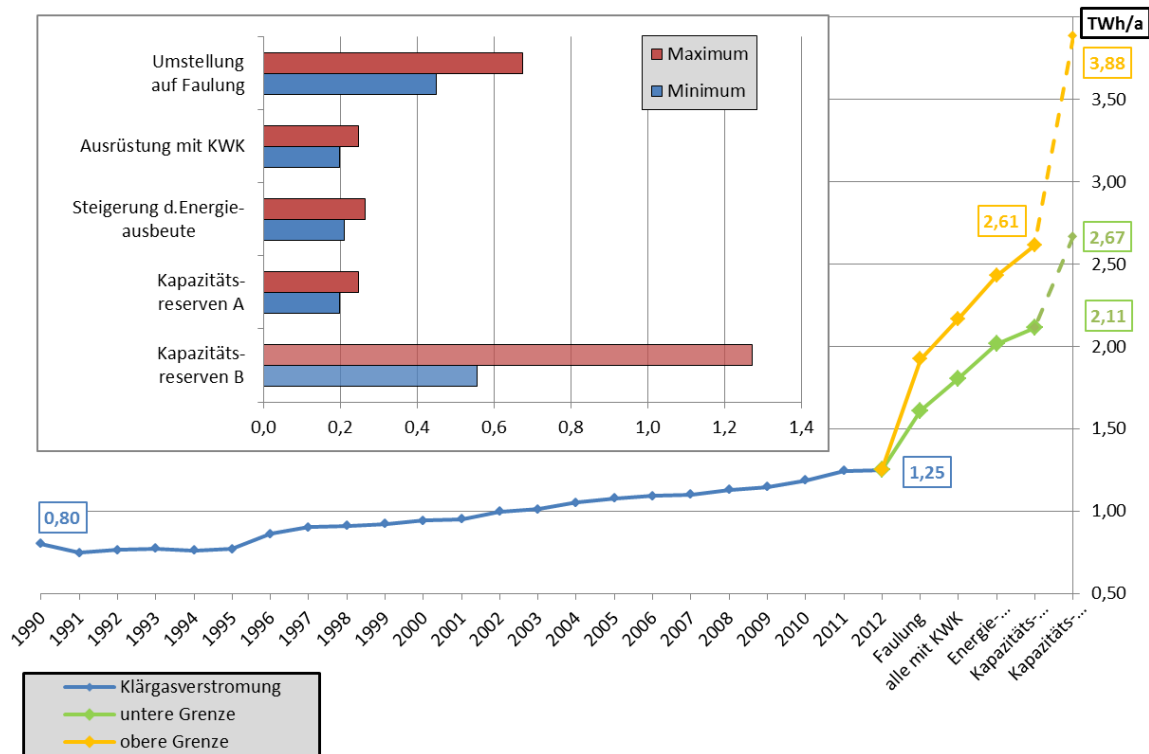


Bild 4.1: Verlauf der Klärgasverstromung in Deutschland (1990 – 2012) und Potenzialabschätzung (Schäfer et al. 2015)

Werden die im Rahmen des Projektes untersuchten innovativen Anlagenkonzepte zur weiteren Betrachtung herangezogen (vgl. Kapitel 3) ergeben sich vielfach höhere Potenziale für Kläranlagen, system- und netzdienlich am Strommarkt agieren zu können. Faulungsanlagen bieten bestmögliche Voraussetzungen zur Umsetzung der PtG-Technologie und zur Erweiterung als „Power-to-Gas-to-Power“. Ein essenzieller Baustein hierbei, sowohl zur Produktion des benötigten H₂, als auch zur Bereitstellung von Flexibilität stellt der Elektrolyseur dar. Erste Ergebnisse zeigen hierbei Potenziale im Leistungsbereich des fünf bis 14-fachen der installierten KWK-Leistung einer Abwasserreinigungsanlage¹.

Der Stromverbrauch von Kläranlagen ist sehr unterschiedlich und variiert nach Art der Abwasserbehandlung, Anlagengröße und lokalen Randbedingungen. Darüber hinaus sind stündliche, tägliche und saisonale Schwankungen gegeben. Mit Hilfe eines mathematischen Modells werden die Auswirkungen externer Regeleinriffe unter verschiedenen Randbedingungen simuliert. Dazu werden verschiedene Prozesse auf der Kläranlage im Detail untersucht und mögliche An und Abschaltdauern analysiert.

¹ Mit einer angenommenen Laufzeit durch überschüssigen EE-Strom von 2.000 – 4.000 Betriebsstunden. Stark abhängig der individuellen Anlagenspezifikation.

Um dieses Potenzial zu bergen wird im Verbundprojekt *arrivee* ein gestuftes Regelkonzept entwickelt. Hierbei werden relevante Verbraucher nach ihrer Abschaltbarkeit beurteilt, bewertet und klassifiziert. Bei einem Abruf aus dem Stromnetz werden die Verbraucher der Anlage kaskadiert geprüft und anschließend ab- bzw. zugeschaltet, um die benötigte Leistungsänderung zur Verfügung zu stellen (vgl. Bild 4.2). Dazu müssen individuelle Regeln für jede Aggregatgruppe entwickelt werden, um die Verfügbarkeit und problemlose Nutzung ohne negative Einflüsse auf den Betrieb der Kläranlage zu gewährleisten. Dies wird sowohl mathematisch modelliert als auch auf der Pilotanlage praktisch erprobt (vgl. Kapitel 5). Aufbauend auf diesen Ergebnissen soll das Regelpotential von Kläranlagen ermittelt und den Anforderungen aus dem Netz gegenübergestellt werden.

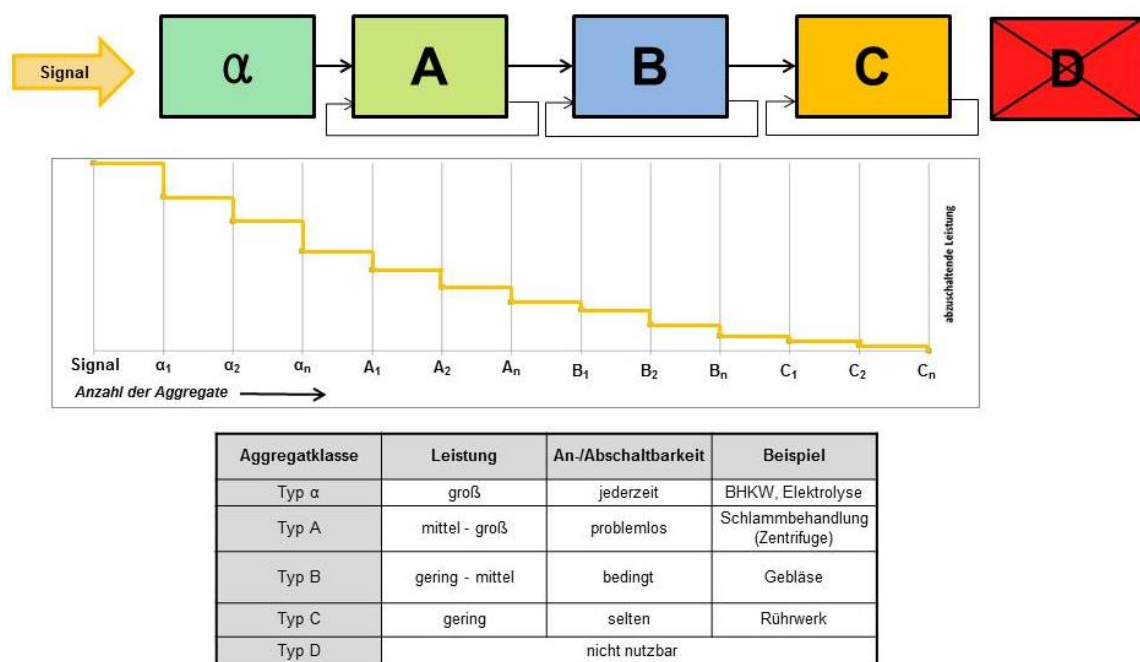


Bild 4.2: Schematische Darstellung des gestuften Regelkonzepts

Der Einsatz neuer Technologien in Kombination mit der vorhandenen Infrastruktur auf Kläranlagen bietet in vielerlei Hinsicht Synergieeffekte und ermöglicht eine optimierte Gas- und damit Stromproduktion als auch Stromverbrauch zur Bereitstellung der benötigten Flexibilitäten für den Strommarkt. Individuelle Anlagenpotenziale ergeben sich damit aus den folgenden drei Komponenten:

- Installierte KWK-Leistung
- Leistung der Elektrolyse
- Nutzbare ab- und zuschaltbare Aggregate auf der Anlage

5 AUSWIRKUNGEN AUF DEN ANLAGENBETRIEB

Der Einsatz der Kläranlage als Speicher und/oder Regelgröße muss im Kontext des standardisierten Betriebsablaufs der Kläranlage detailliert analysiert werden. Die Auswirkungen auf die Prozesse der Abwasserreinigung und der Schlammbehandlung müssen hierbei bewertet werden. (Müller et al., 2013) ermittelte Ausschaltzeiten für die relevanten Verbraucher bei Trockenwetterbedingungen. Die Ausschaltzeiten für die Gebläse der Biologie variieren in Abhängigkeit der Belastung zwischen 30 min und bis zu zwei Stunden (siehe Tabelle 5.1). Unter Berücksichtigung der Ausschaltzeiten aus Tabelle 5.1 ergibt sich für die im Rahmen des Projektes *arrivee* untersuchte Kläranlage Radevormwald ein theoretisches Regelpotential von 122 kW bzw. 2,1 W/E.

Tabelle 5.1: Modellhafte Ausschaltzeiten der relevanten Aggregate im Sommer bei Trockenwetter (nach Müller et al. 2013)

Ausschaltzeiten Aggregate	Tiefe Belastung (Nacht)					Hohe Belastung (Tag)				
	15 min	30 min	1h	2h	>2h	15 min	30 min	1h	2h	>2h
Hebewerk	Orange	Orange	Orange			Orange	Orange			
Sandfang Gebläse	Dark Blue	Dark Blue				Dark Blue				
Biologie Gebläse	Blue	Blue	Blue	Blue		Blue	Blue			
Biologie Rührwerk	Blue	Blue				Blue				
Biologie RLS Pumpen	Blue	Blue	Blue	Blue		Blue	Blue	Blue		
Faulung Rührwerk	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	
Faulung Umwälzpumpen	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green	
Schlammwind. / Entwässerung									Dark Red	Dark Red

Für die Gebläse der biologischen Stufe und die Rücklaufschlammumpen wurden die Auswirkungen auf die Ablaufwerte durch das temporäre Abschalten der Aggregate überprüft. Die Belüftung wurde für 30 min und 60 min und die Rücklaufschlammumpen für 30, 60 und 120 min ausgeschaltet. Das Ausschalten der Gebläse für 60 min während der Tagesspitze bei Trockenwetterbedingungen hat keine Auswirkungen auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentration in der Nachklärung (Bild 5.1). Auch die Rücklaufschlammumpen können über einen Zeitraum von 2 h ohne Auswirkungen auf die Abbauprozesse in der Biologie abgeschaltet werden.

Um das Wegschalten von Aggregaten auf die biologischen Prozesse der Kläranlage Radevormwald bei den stark variierenden Zulauffrachten zu beurteilen, wurde ein Simulationsmodell auf Basis des Activated Sludge Models (ASM 3) aufgebaut. Das Modell wurde anhand der durchgeführten Messungen kalibriert. Mit dem kalibrierten Modell konnte der Einfluss des Zeitpunktes als auch der Zeitdauer und Häufigkeit für das Wegschalten der Aggregate systematisch untersucht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Trockenwetterbedingungen als auch bei Regenwetter die Belüftung auf der Kläranlage Radevormwald über einen Zeitraum von zwei Stunden mit nur geringfügigen Auswirkungen auf die Ablaufwerte ausgeschaltet werden kann (Bild 5.2). Im Modell wurden jedoch die Absetzprozesse in der Belebung nicht dargestellt, so dass

die aktive Biomasse überschätzt wird. Das Wegschalten der Rücklaufschlammumpfen über einen Zeitraum von zwei Stunden hatte im Simulationsmodell keinen Einfluss auf die Ablaufwerte.

Bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Kläranlagen sind als maßgebende Größen die Auslastung der Kläranlage sowie die technischen Randbedingungen zu berücksichtigen. So ist z.B. zu überprüfen, ob die Belüftung für einen intermittierenden Betrieb geeignet ist und ob der abgesetzte Schlamm in der Belebung beim Einschalten der Belüftung wieder remobilisiert werden kann.

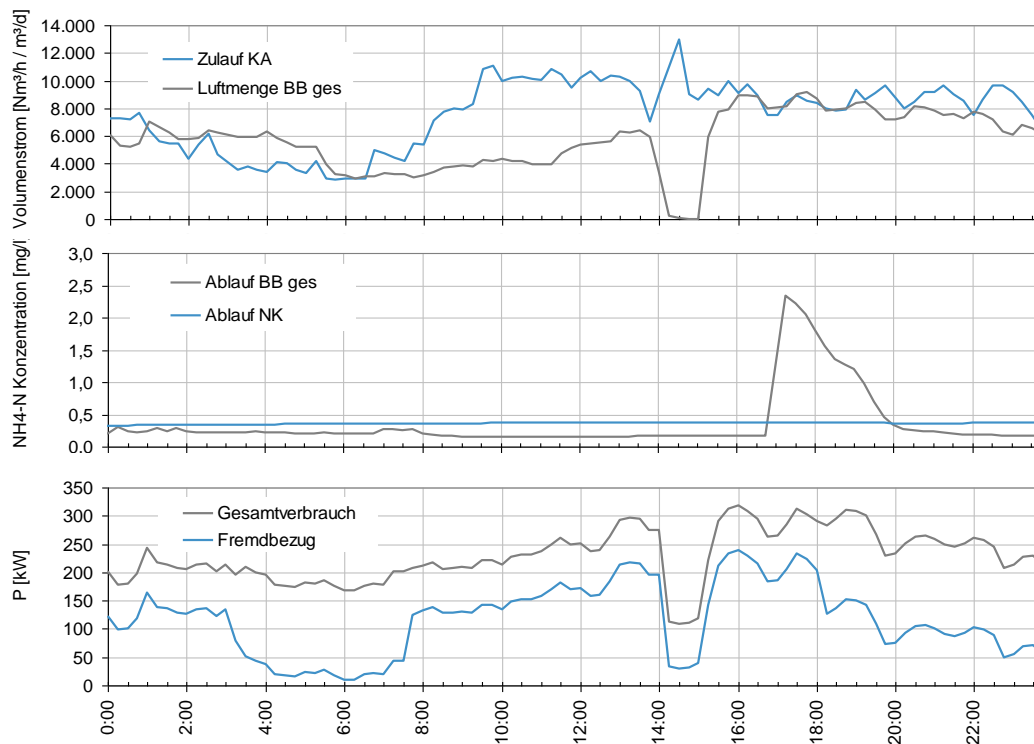


Bild 5.1: Einfluss des Lastabwurfs der Gebläse für eine Stunde auf die $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablaufwerte (Messung)

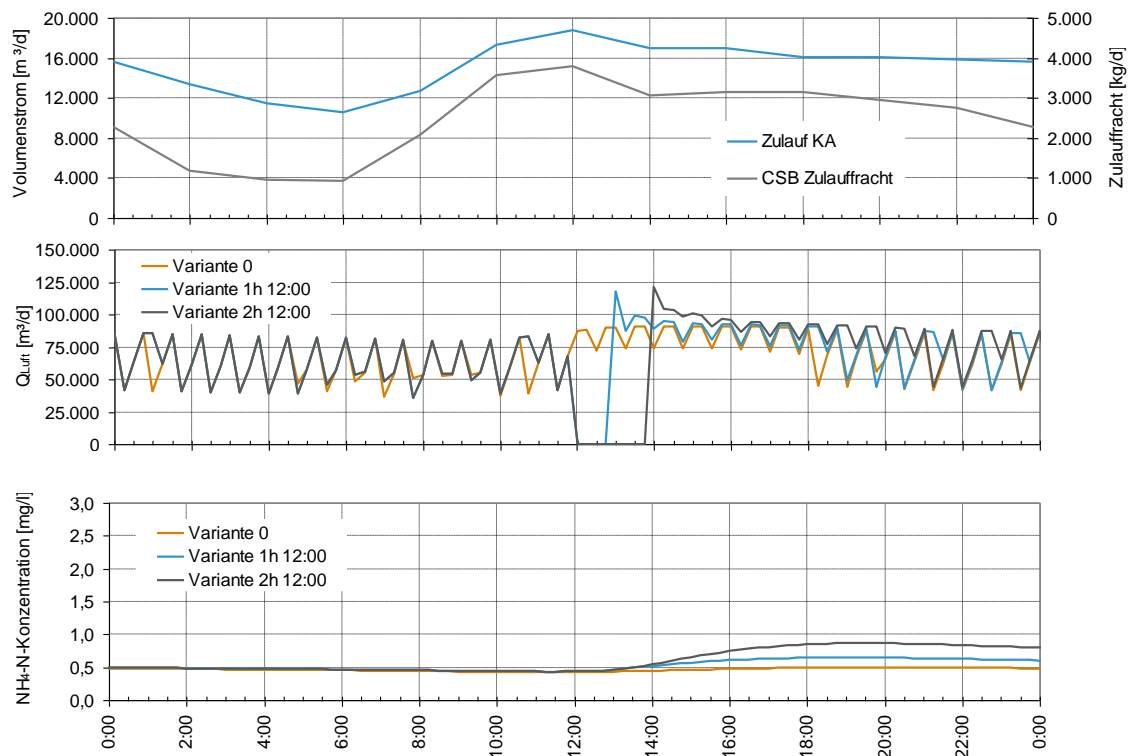


Bild 5.2: Variation der Zeitdauer für den Lastabwurf der Gebläse (Simulation)

6 MÄRKTE FÜR FLEXIBILITÄT

Die in Kapitel 3 erwähnten Anlagenkonzepte werden hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ihrer Flexibilitätspotenziale für unterschiedliche Märkte bewertet. In Abhängigkeit des Verwendungszweckes kann die Flexibilität für die in Bild 6.1 skizzierten Märkte eingesetzt werden.

Eine derzeit bereits weit verbreitete Anwendung ist der Einsatz der Flexibilität zur Frequenzhaltung im Übertragungsnetzbereich, der sogenannte **systemdienliche Einsatz** in Form von Regelenergie.

Neben der Frequenzhaltung spielt auch die Spannungshaltung eine zunehmend wichtige Rolle. Dazu können Flexibilitäten ebenfalls eingesetzt werden. Der entsprechende Anwendungsbereich sind die Verteilnetze. Hier spricht man vom **netzdienlichen Einsatz**.

Der **marktdienliche Einsatz** umfasst die Produkte am Spotmarkt der Strombörse, vornehmlich Day-Ahead und Intraday, für die dynamische Energiebeschaffung. Die fluktuierende Energieerzeugung von Wind- und Solarstrom führt an diesen Märkten zu zeitweise sehr hoher Volatilität der kurzfristigen Preise. Diese kann systematisch

ausgenutzt werden, um mit verbrauchsseitiger Flexibilität einen systematisch niedrigeren Durchschnittspreis beim Energiebezug zu realisieren (Simon 2013).

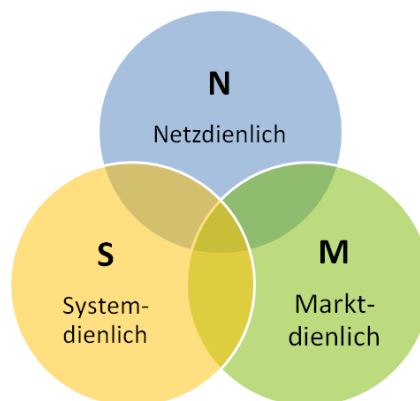


Bild 6.1: Drei Märkte für Flexibilität

6.1 Heutige Märkte

Das Produkt für den systemdienlichen Einsatz ist die **Regelleistung**. Sie wird in drei Kategorien unterteilt. Dies sind die Primärregelleistung, die Sekundärregelleistung (SRL) und die Minutenreserveleistung (MRL). Die Teilnahme an diesen Regelleistungsmärkten ist an bestimmte Anforderungen (Präqualifikationskriterien) gekoppelt. Diese Produkte kommen auf Übertragungsnetzebene zur Anwendung und liegen in der Regelzonenverantwortung des Übertragungsnetzbetreibers. Er ist auch der Signalgeber für einen entsprechenden Abruf. In Tabelle 6.1 sind beispielhaft Preise für Regelenergie sowie Abrufdauern aufgeführt.

Tabelle 6.1: Aufrufcharakteristik sowie Leistungs- und Arbeitspreise für SRL und MRL (Simon 2015)

Jahr 2014	Aufrufe bei einem Grenzarbeitspreis von 500 €/MWh	Gesamt- abrufdauer	Mittler Leistungspreis 2014
	[h/a]	[h/a]	[€/(MW a)]
MR_{neg}	1,5	330	33.300
MR_{pos}	8,5	320	4.800
SRL_{neg}	50,0	4.700	42.200
SRL_{pos}	17,0	4.000	64.300

Um die Flexibilitäten zu vermarkten bedarf es i. d. R. eines virtuellen Kraftwerks. Dieses bündelt die Flexibilitäten unterschiedlicher Anlagenstandorte bzw. Anbieter und bietet diese gebündelt an den Flexibilitätsmärkten an. Der derzeit bekannteste Markt ist der für die negative Minutenreserve. Um daran teilzunehmen muss eine Leistung von 5 MW sichergestellt sein sowie weitere Anforderungen an die Aggregate erfüllt sein (vgl. dazu: www.regelleistung.net). Diesen Anforderungen können Faulungsanlagen mit ihren

KWK-Anlagen alleine nicht gerecht werden. Durch die Bündelung mit anderen Anlagen kann dieses Leistungsziel im Verbund des virtuellen Kraftwerks jedoch problemlos erreicht werden und von diesem vermarktet werden.

6.2 Zukünftige Märkte

Derzeit ist noch kein Markt für dynamische regionale Netzdienstleistungen vorhanden. Dieser kann sich aber auf lokaler Ebene der Verteilnetze in Zukunft entwickeln. Dort spielen mit zunehmendem Ausbau der erneuerbaren Energien Maßnahmen zur Spannungshaltung und zur Reduzierung der Betriebsmittelbelastung eine wichtige Rolle. Auch hier können Kläranlagen, z. B. durch die Integration in SmartGrids einem notwendigen Betriebsmittelausbau (z. B. lokaler Netzausbau) entgegen wirken und mit ihrer Flexibilität der Spannungshaltung dienen (netzdienlicher Einsatz).

Erste Simulationsergebnisse im Rahmen der Projektbearbeitung des der Kläranlage Radevormwald vorgelagerten Verteilnetzes haben gezeigt, dass für das Szenariojahr 2035 und dem darin unterstellten Ausbau von Photovoltaik und Windkraft,

- die Größenordnung der Netzprobleme im Potenzialbereich der Kläranlagenflexibilität liegen und somit die Kläranlage dazu beitragen kann, die Notwendigkeit des Netzausbaus unter bestimmten Voraussetzungen zu vermeiden bzw. zu reduzieren;
- auch Teilbeiträge zur Problemlösung sinnvoll sein können und die Kläranlage ggf. als Bestandteil eines SmartGrids einen Beitrag zur Verteilnetzstabilität leisten kann.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Erste Ergebnisse lassen ein deutliches Potenzial von Faulungsanlagen zur Bereitstellung von Netzsystemdienstleistungen durch Anpassung der vorhandenen Infrastrukturen erkennen. Durch Optimierung und Ausbau der Stromproduktion auf Kläranlagen können diese einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung von Regelernergie leisten. Potenzialabschätzungen zeigen, dass die deutschlandweite Stromproduktion auf Faulungsanlagen von derzeit 1,25 TWh_{el}/a theoretisch auf über 2,6 TWh_{el}/a gesteigert werden könnte. Dies entspricht einer Leistung von nahezu 300 MW_{el} (Schäfer et. al. 2015).

Für die Aktivierung des Regel- und Speicherpotentials der Kläranlage wurde ein gestuftes Regelkonzept entwickelt. Die Auswirkungen des Flexibilitätseinsatzes auf den Betrieb und die Energiebilanz der Kläranlage sowie die Auswirkungen auf das vorgelagerte Verteilnetz wird mit Hilfe von Simulationsmodellen beurteilt. Aufbauend auf

diesen Ergebnissen wird eine detaillierte Auslegung und Bewertung von innovativen Anlagenkonzeptionen erfolgen. Darüber hinaus werden unterschiedliche politische und energierechtliche Randbedingungen für die Umsetzung des Konzeptansatzes bewertet. Abschließend wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und eine Kosten-Nutzen-Analyse auf Basis der Regel- und Systemdienstleistungspotenziale durchgeführt sowie einen Ausblick auf die technische und wirtschaftliche Nutzung der Kläranlage als Regelbaustein in Verteilnetzen geben.

Am Verbundprojekt arrivee sind neben den Institutionen der Autoren sechs weitere Partner aus Forschung und Industrie beteiligt:

- Bergische Universität Wuppertal, Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik
- iGas GmbH
- ITB – Institut für Innovation, Transfer und Beratung gemeinnützige GmbH
- Stadtwerke Radevormwald GmbH
- Wupperverband
- Kanzlei Becker-Büttner-Held

Es wird gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme ERWAS als Teil des Förderschwerpunkts Nachhaltiges Wassermanagement (Rahmenprogramm FONA).

Die Autoren danken dem BMBF für seine finanzielle Unterstützung.

Besuchen Sie uns unter: www.erwas-arrivee.de

Kontakt:

Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel

Dipl.-Ing. Michael Schäfer

Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt

Dr. Inka Hobus

TU Kaiserslautern
Fachgebiet Siwawi
Paul-Ehrlich-Straße, Gebäude 14
67663 Kaiserslautern
Email: oliver.gretzschel@bauing.uni-kl.de

Wupperverbandsgesellschaft
für integrale Wasserwirtschaft mbH
Untere Lichtenplatzer Straße 100
42289 Wuppertal
Email: info@wiwmbh.de

Literaturverzeichnis

- AEE, Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2015): Strommix in Deutschland 2014. Online verfügbar unter <http://www.unendlich-viel-energie.de/strommix-deutschland-2014>, zuletzt geprüft am 16.07.2015.
- DWA (2013): Arbeitsblatt DWA-A 216 (Entwurf) - Energiecheck und Energieanalyse – Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V., Gelbdruck.
- Grüner, Rainer (2015): Von der Erkennung bis zur Umsetzung, Regelenergie bei der Stadtentwässerung Kaiserslautern. Binger Intensivseminar. TSB Transferstelle Bingen. Ingelheim, 17.03.2015.
- Heller, Thomas (2015): Biological methanation - Demoproject at the gas injection biogas plant -Renewable gas formobility. IRES 2015. Eurosolar. Düsseldorf, 10.03.2015.
- Martin, Matthew R.; Fornero, Jeffrey J.; Stark, Rebecca; Mets, Laurens; Angenent, Largus T. (2013): A Single-Culture Bioprocess of Methanothermobacter thermotrophicus to Upgrade Digester Biogas by CO₂-to-CH₄ Conversion with H₂. Hg. v. Archaea (vol. 2013, Article ID 157529, Article ID 157529). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1155/2013/157529>.
- Müller, E. A.; Graf, E.; Kobel, B.; Hurni, A.; Wenger, R.; Frei, U.; Christen, C.; Moser, R.; Fritzsche, C.; Mathys, O.; Kernén, M.; Fahrni, J. (2013): Potential der Schweizer Infrastrukturanlagen zur Lastverschiebung - Schlussbericht 2013. Auftraggeber: Bundesamt für Energie BFE.
- Müller-Syring, G.; Henel, M.; Krause, H.; Rasmusson, H.; Mlaker, H.; Köppel, W. et al. (2011): Power-to-Gas. Entwicklungen von Anlagenkonzepten im Ragmen der DVGW-Innovationsoffensive (11), S. 770–779.
- PFI (2015): PFI weih Power-to-Gas-Pilotanlage ein. Pirmasens. Online verfügbar unter [http://pfi-germany.de/de/news/news/archive/2015/june/eintrag/428.html?tx_ttnews\[day\]=30&cHash=bfdcbac3aa83fc99daadb6327bb0de3](http://pfi-germany.de/de/news/news/archive/2015/june/eintrag/428.html?tx_ttnews[day]=30&cHash=bfdcbac3aa83fc99daadb6327bb0de3), zuletzt geprüft am 20.07.2015.
- Schäfer, M., Gretschel, O.; Schmitt, T.G.; Knerr, H. (2015): Wastewater treatment plants as system service provider for renewable energy storage and control energy in virtual power plants – a potential analysis; Proceedings, 9th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2015); Düsseldorf, 9. – 11. März 2015.
- Schäfer, Michael; Gretschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; 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: Wasserwirtschaft Wassertechnik 65 (6), S. 27–29.

- Schmack, U. (2012): Power to Gas: Biologische Methanisierung; Microb Energy GmbH; In: Otti Seminar: Power to Gas. Seiten: 43 – 49.
- Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Hansen, Joachim; Siekmann, Klaus; Jakob, Jürgen (2014): Umstellung von Kläranlagen auf Schlammfäulung. Energetisches und ökonomisches Optimierungspotenzial. Hg. v. Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz Ministerium für Umwelt (Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft). Online verfügbar unter http://mulewf.rlp.de/fileadmin/mufv/publikationen/Umstellung_von_Klaeranlagen_auf_Schlammfaulung.pdf, zuletzt geprüft am 20.01.2015.
- Simon, Ralf (2013): Vom Energiemanagementsystem zum Smart Grid, Energy 2.0 Kompendium 2013
- Simon, Ralf (2015): Abwasseranlagen als Bestandteil eines virtuellen Kraftwerks. Wertschöpfung für flexible Anlagen in existierenden Strommärkten. 3. LDEW Abwassertag. Landesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, Hessen/Rheinland-Pfalz e.V. Mainz, 2015.
- Specht, Michael; Baumgart, Frank; Feigl, Bastian; Frick, Volkmar; Stürmer, Bernd; Zuberbühler, Ulrich et al. (2009): Speicherung von Bioenergie und erneuerbarem Strom im Erdgasnetz. In: Themen 2009 - Forschen für globale Märkte erneuerbarer Energien, S. 69–78. Online verfügbar unter <http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2009/th2009.pdf>, zuletzt geprüft am 11.02.2013.
- Sterner, Michael; Stadler, Ingo (2014): Energiespeicher. Bedarf, Technologien, Integration: Springer Vieweg.