

Von Effizienz bis Flexibilisierung – ein erfolgreicher Weg mit viel Energie

Michael Schäfer¹; Oliver Gretzschel¹; Joachim Hansen²

¹Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen, TU Kaiserslautern

²FG Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau, Universität Luxembourg

Kurzfassung: Der vorliegende Beitrag blickt auf 14 Jahre Energieforschung für die Praxis auf Kläranlagen am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und tectraa zurück. Beginnend mit der Erarbeitung von Grundlagen im Rahmen des ersten deutschlandweiten Projektes zum Thema Energieeffizienz als Partner des UBA richtete sich in den nachfolgenden Projekten der Fokus regelmäßig auf die Kläranlagen in Rheinland-Pfalz. Wesentliche daraus resultierende Hilfestellungen für die Kläranlagenpraxis waren dabei die Broschüren „Steigerung der Energieeffizienz auf Kläranlagen“ sowie „Umstellung auf Faulung“. Mit dem fortschreitenden Umbau der Energieinfrastruktur im Zuge der Energiewende stellte sich auch die Frage welche Rolle die Kläranlage in einem solchen erweiterten Umfeld einnehmen kann. Dazu wurden im Rahmen von „arrivee“ wesentliche Grundlagen und Handlungsempfehlungen für die Bereitstellung von Flexibilität erarbeitet. Zeitlich parallel wurden im Rahmen von „ZEBRAS“ Checklisten entwickelt, um den Faulungsbetrieb auf Kläranlagen systematisch zu prüfen und zu optimieren und somit den Ertrag an Speichergasen zu steigern. Die sechs in diesem Beitrag vorgestellten Leuchtturmprojekte fanden deutschlandweit Beachtung und leisteten und leisten weiterhin einen wichtigen Beitrag für einen zunehmend (energie-)effizienten Betrieb von Kläranlagen.

Key-Words: Energie auf Kläranlagen, Energieeffizienz, Flexibilität, Anaerobe Stabilisierung

1 Einleitung

Seit nun mehr über 14 Jahren werden am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft unter der Leitung von Theo G. Schmitt Projekte mit hohem Energieinhalt bearbeitet. Neben einer Vielzahl von durchgeführten Energieanalysen, wurden ebenfalls kontinuierlich energetische und verfahrenstechnische Optimierungs- und Machbarkeitsstudien angefertigt, die den Wissenstransfer fortlaufend i. b. in die kommunale Praxis sicherstellten. Die Grundlage dafür bilden die in der nachfolgenden Tabelle 1.1 aufgeführten Leuchtturmprojekte mit landes- und bundesweiter Strahlkraft, deren zeitliche

Abfolge und Bearbeitungszeiträume in Abbildung 1.1 dargestellt sind. Diese thematisch innovativen Projekte werden in diesem Beitrag zusammenfassend dargestellt¹ und in ihren inhaltlichen Zusammenhang gebracht. Der Einstieg in die Energie-Thematik war nicht unbedingt von zielgerichteter Akquise getrieben, aber dennoch ein gelungener Aufschlag zu einer erfolgreichen Serie von Projekten, die auch in Zukunft fortgeführt werden soll.



Abbildung 1.1: Zeitliche Abfolge der betrachteten Energieprojekte

¹ Die nachfolgenden Beschreibungen der Projekte wurden teilweise aus den entsprechenden Projektberichten, unter Einverständnis der Autoren, übernommen.

Tabelle 1.1: Herausragende „Energieprojekte am Fachgebiet“ der letzten 14 Jahre

| Bearbeitung | Projekt | Mittelgeber | Projektpartner |
|-------------|---|-------------|--|
| 2004 - 2005 | UBA-Studie ‚Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen‘ | UBA | <ul style="list-style-type: none"> • iat-Ingenieurberatung für Abwassertechnik, Darmstadt und Stuttgart • Ryser Ingenieure, AG, Bern • Universität Stuttgart |
| 2006 - 2007 | Energieoptimierung auf Kläranlagen (+ Broschüre) | MUEEF | <ul style="list-style-type: none"> • Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft |
| 2008 | SBC - Energie- und Kostenoptimierung durch Schaffung von semizentralen Schlammbehandlungszentren | MUEEF | <ul style="list-style-type: none"> • Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft |
| 2010 - 2014 | NAwaS - Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation (+ Broschüre) | MUEEF | <ul style="list-style-type: none"> • Dr. Siekmann + Partner mbH • Uni Luxembourg |
| 2013 - 2018 | ZEBRAS - Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rhein-land-Pfalz | MUEEF | <ul style="list-style-type: none"> • Uni Luxembourg • Dr. Siekmann + Partner mbH |
| 2014 - 2017 | arrivee - Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung | BMBF | <ul style="list-style-type: none"> • Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft • Wupperverband • Transferstelle Bingen • BBH Becker Büttner Held • iGas energy GmbH • Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik, Uni Wuppertal • Stadtwerke Radevormwald GmbH |

2 UBA-Studie „Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen“

2.1 Ausgangslage und Ziel

Zum ersten Energieprojekt „Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen“ im Auftrag des Umweltbundesamtes (Haberkern et al. 2008) am Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft/tectraa kamen die Beteiligten der TU Kaiserslautern sprichwörtlich wie „die Jungfrau zum Kinde“, lagen doch die bisherigen Kompetenzen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter eher im Bereich der Verfahrenstechnik sowie der Prozessoptimierung von Kläranlagen.

Kurz nach der Jahrtausendwende kam es aufgrund eines erhöhten Bewusstseins für das Thema ‚Energieeinsparung‘, steigende Energiepreise sowie diverse Handlungsanleitung (u. a. das Handbuch ‚Energie in Kläranlagen‘ in Nordrhein-Westfalen) sowie gesetzliche Regelungen (u.a. die IVU-Richtlinie mit ihrer nationalen Umsetzung im

Wasserhaushaltsgesetz mit neuen Vorgaben bzgl. der Energieeffizienz) zu einer ‚Renaissance‘ eines Themas, welches Abwasserexperten bereits 10 bis 15 Jahre zuvor beschäftigte: der Thematik des Energieverbrauchs sowie der Energieerzeugung auf kommunalen Kläranlagen. Zwar sind Kläranlagen nur für ca. 1 % des bundesweiten Energieverbrauchs verantwortlich, in den Kommunen sind sie jedoch mit 20 – 30 % der größte Energieverbraucher.

Zur Konkretisierung der neuen Anforderungen, zur Sensibilisierung der Betroffenen sowie zur politischen Willenserklärung hat das Umweltbundesamt daraufhin im August 2005 das Ingenieurbüro IAT GmbH (Darmstadt und Stuttgart) beauftragt, im Rahmen eines Forschungsprojektes den Stand der Technik zu dieser Thematik zusammenzutragen. Die Idee war dabei, eine begleitende Fachgruppe einzurichten, die Kompetenzen in unterschiedlichen Bereichen aufweist. In diese Fachgruppe, in der sich neben so illustren Mitgliedern wie Dr. Roth von der Universität Stuttgart und Dr. Krampe (jetzt Professor an der TU Wien) auch einer der ‚Energiepäpste‘ aus der Schweiz, Beat Kobel, befand, wurden Heidrun Steinmetz und Joachim Hansen von tectraa ‚berufen‘.

2.2 Methodik

Ausgangspunkte für die Umsetzung der Aufgabenstellung und die hieraus resultierende, gewählte Methodik waren dabei:

- Es lag zwar relativ umfangreiches Datenmaterial zur Energiesituation auf Kläranlagen vor; dieses war jedoch nicht aktuell (stammte im Wesentlichen aus den 90er Jahren), so dass auch neuere Entwicklungen (wie bspw. der Einsatz von Membrananlagen, Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung, etc.) nicht berücksichtigt waren.
- Bei den vorhandenen Daten zeigten sich erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Bundesländern, die z.T. auf die unterschiedliche Verteilung der Kläranlagen auf die einzelnen Größenklassen (GK), zum anderen aber auch auf verwendete Technologien, zurückzuführen waren. Bei den bisherigen Studien wurde dieser Aspekt nur unzureichend berücksichtigt.
- Es existierten deutliche Diskrepanzen zwischen den im Rahmen von Studien ermittelten und den tatsächlich realisierbaren Einsparpotenzialen.
- Die Einführung pauschaler, für alle Kläranlagen einer gegebenen GK anwendbarer, Zielwerte ist aufgrund der unterschiedlichen Standortvoraussetzung nicht zielführend.
- Bei allen Bemühungen zur Energieoptimierung steht das primäre Ziel der Kläranlagen, die Abwasserreinigung, weiterhin im Vordergrund.

Aufgrund der beschriebenen Methodik wurden im Rahmen der Bearbeitung des Projektes daraufhin folgende wesentlichen Arbeitsschritte umgesetzt:

- 1) Auswertung der verfügbaren statistischen Daten zur Häufigkeitsverteilung auf Größenklassen, technische Verfahren sowie spezifischem Energieverbrauch sowie -erzeugung.
- 2) Definition von anlagenspezifischen Energiekennwerten in kWh/(E x a); Differenzierung hierbei zwischen Anlagen mit simultan aerober Schlammstabilisierung sowie Anlagen mit Schlammfäulung.
- 3) Hochrechnung der Energiedaten auf die gesamte Bundesrepublik; Ableitung des Optimierungspotenzials.
- 4) Beschreibung neuer Technologien und deren Energierelevanz; Abschätzen von deren Einfluss auf Gesamtenergiebilanz.
- 5) Definition eines Standes der Technik als Kompromiss zwischen dem technisch Machbaren und den praktischen Einschränkungen.
- 6) Beschreibung repräsentativer Fallbeispiele.

Wesentliche Ergebnisse der durchgeführten Analysen werden nachfolgend beschrieben.

2.3 Ergebnisse und Wirkungen

Die wesentlichen Ergebnisse der Studie können wie folgt zusammengefasst werden:

- In Deutschland wurden zum Zeitpunkt der Untersuchungen (2004) rund 10.200 Kläranlagen betrieben, die einen Gesamtverbrauch von rund 4.400 GWh/a aufweisen und damit zu etwa 0,7 % am bundesweiten Stromverbrauch partizipieren. Bei etwa 126 Mio. angeschlossenen Einwohnerwerten entspricht dies einem mittleren spezifischen Verbrauch von 35 kWh/(E x a). Ca. 86 % des Gesamtverbrauchs entfällt hierbei auf die Kläranlagen der GK 4 und 5.
- In den etwa 1.150 Kläranlagen mit Schlammfäulung wurden rund 684 Mio. m³/a an Faulgas produziert; dies entspricht einer mittleren Produktion von 19,6 l/(E x a). Die Stromproduktion betrug hierbei 865 GWh/a, was einem mittleren Wirkungsgrad von (nur) 30 % entspricht. Hier zeigte sich ein erstes erhebliches Optimierungspotenzial.
- Die wesentlichen Verbraucher auf den Kläranlagen waren die Belüfter mit rund 50 % des Gesamtverbrauchs, gefolgt von Pump- und Rührwerken sowie den Einrichtungen zur Schlammbehandlung.
- Bei optimaler Energieeffizienz waren spezifische Verbrauchswerte von ca. 18 bis 25 kWh/(E x a) möglich, was einem theoretischen Einsparpotenzial von 30 bis 40 % entsprach. Aufgrund der anlagenspezifischen Gegebenheiten wurde das realisierbare Potenzial jedoch geringer eingeschätzt.

- Das Potenzial zur Erhöhung der Eigenstromerzeugung wurde mit +100 % im Vergleich zur Situation im Jahr 2004 als sehr hoch eingeschätzt (Erhöhung der Faulgasmenge, verbesserter Wirkungsgrad bei der Verstromung).

Die Ergebnisse der Studie belegten somit das erhebliche Potenzial für Maßnahmen zur energetischen Optimierung der Kläranlagen in Deutschland. Mit der UBA-Studie wurden vielfältige, z.T. heftige Diskussionen zu Potenzialen, Maßnahmen sowie insbesondere zu den in der Studie definierten Zielwerten angestoßen, aus denen zahlreiche Initiativen, Projekte sowie Aktivitäten im Bereich der DWA erwuchsen.

Die UBA-Studie 'Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen' kann somit als eine der wesentlichen Initialprojekte für die Verbesserung der Energieeffizienz auf den bundesdeutschen Kläranlagen bezeichnet werden, und war nicht zuletzt auch die Initialzündung für zahlreiche Aktivitäten im Bereich 'Energie' im FG Siedlungswasserwirtschaft und tectraa in den darauffolgenden Jahren.

3 Projekt „Energieoptimierung auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz“

3.1 Ausgangslage und Ziel

Die neu erworbenen Kompetenzen sowie die aus dem UBA-Projekt resultierende Motivation, die Energieeffizienz von kommunalen Kläranlagen zu verbessern, mündeten in einem ersten Projekt in Rheinland-Pfalz im Jahr 2006.

Im Rahmen eines Termins zur Promotion des Energiethemas beim damaligen Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (MUFV) Rheinland-Pfalz in Mainz, musste die Kaiserslauterer ‚Delegation‘ erfahren, dass bereits ein anderer Energieexperte wenige Tage zuvor mit dem gleichen Anliegen beim MUFV vorgesprochen hatte. Es handelte sich dabei um keinen geringeren als den Technischen Leiter der Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbH WiW, Dr. Gerd Kolisch, der in den darauffolgenden Jahren ein ausdauernder, kompetenter und gern gesehener Partner am Fachgebiet wurde.

Die vom MUFV aufgetragene ‚Hausaufgabe‘, sich mit Vertretern des WiW abzustimmen, wurde unverzüglich angegangen und in einem Café in der Innenstadt von Mainz ein Konzept für ein auf Rheinland-Pfalz zugeschnittenes Projekt abgestimmt, welches in das Modellprojekt „Energieoptimierung auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz“ (Hansen et al. 2007) mündete.

3.2 Methodik

Im Rahmen des Modellprojektes sollte aufgezeigt werden, welches Potenzial zur Energieeinsparung und zur Energieerzeugung auf den Kläranlagen in Rheinland-Pfalz besteht. Hierzu sollten Untersuchungen an vier ausgewählten Referenzanlagen durchgeführt werden. Das Ziel dieser sollte es dabei sein, die im Rahmen der Untersuchungen auf den Beispielanlagen gewonnenen Erkenntnisse zur Erhöhung der Energieeffizienz auf möglichst viele andere Anlagen in Rheinland-Pfalz zu übertragen.

Zudem sollte das landesweite Potenzial aufgezeigt werden, welches unter der Prämisse der Einhaltung der Überwachungsanforderungen besteht, den Energieverbrauch zu verringern und die Eigenstromerzeugung zu erhöhen.

3.3 Ergebnisse und Wirkungen

In einem ersten Schritt wurde zur Auswahl der Referenzanlagen eine Kriterienliste in enger Abstimmung mit dem MUFV entwickelt und an die zuständigen Regionalstellen weitergeleitet. Auf der Basis der Rückmeldungen der Regionalstellen wurden daraufhin Ortstermine auf potenziell geeigneten Anlagen durchgeführt.

Letztlich wurden vier repräsentative Anlagen ausgewählt und detaillierte Untersuchungen durchgeführt:

- Kläranlage Oberes Fischbachtal (6.800 EW) als typische (kleine bis mittelgroße) Anlage mit simultan aerober Schlammstabilisierung
- Kläranlage Bad Ems (33.000 EW) als typische mittelgroße Anlage mit Schlammfäulung
- Kläranlage Speyer (95.000 EW) als große Anlage mit Schlammfäulung
- Kläranlage Billigheim (42.000 EW) als typische Anlage mit ausgeprägtem (Wein)-Kampagneneinfluss

Auf den genannten Anlagen wurden Energieanalysen in Anlehnung an das Handbuch ‚Energie in Kläranlagen‘ (Müller 1999) durchgeführt. Die ermittelten Energieverbrauchswerte wurden daraufhin mit den Richt- und Idealwerten verglichen, wobei sich bei allen untersuchten Anlagen ein teilweise erhebliches Einsparpotenzial zeigte (vgl. Abbildung 3.1).

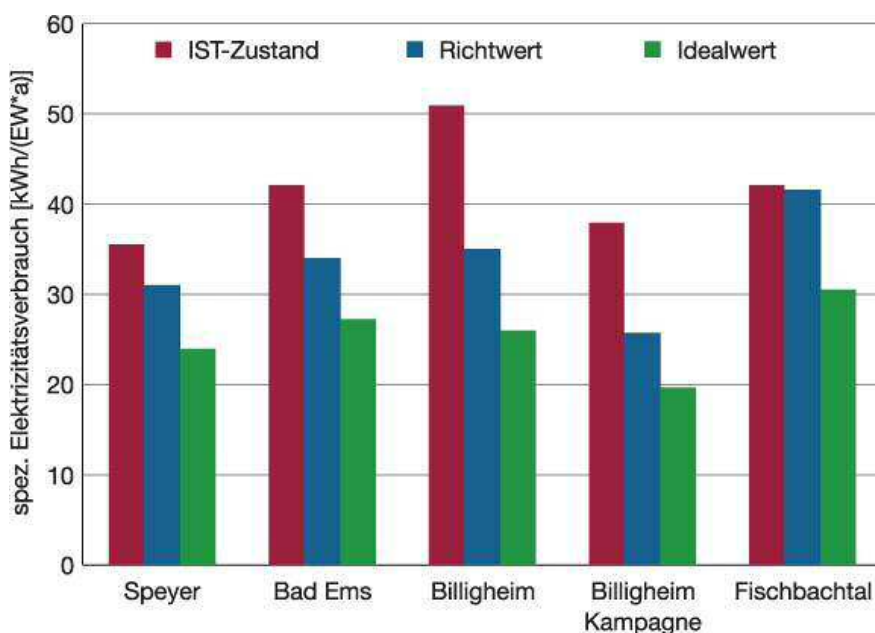


Abbildung 3.1: Spezifischer Energieverbrauch der Referenzanlagen im Vergleich zum Richt- und Idealwert

In einem nächsten Schritt erfolgte eine Differenzierung daraufhin, welcher prozentuale Anteil an Energie in den einzelnen Verfahrensgruppen verbraucht wird, und welche theoretischen Einsparpotenziale hierbei abzuleiten sind (vgl. Abbildung 3.2).

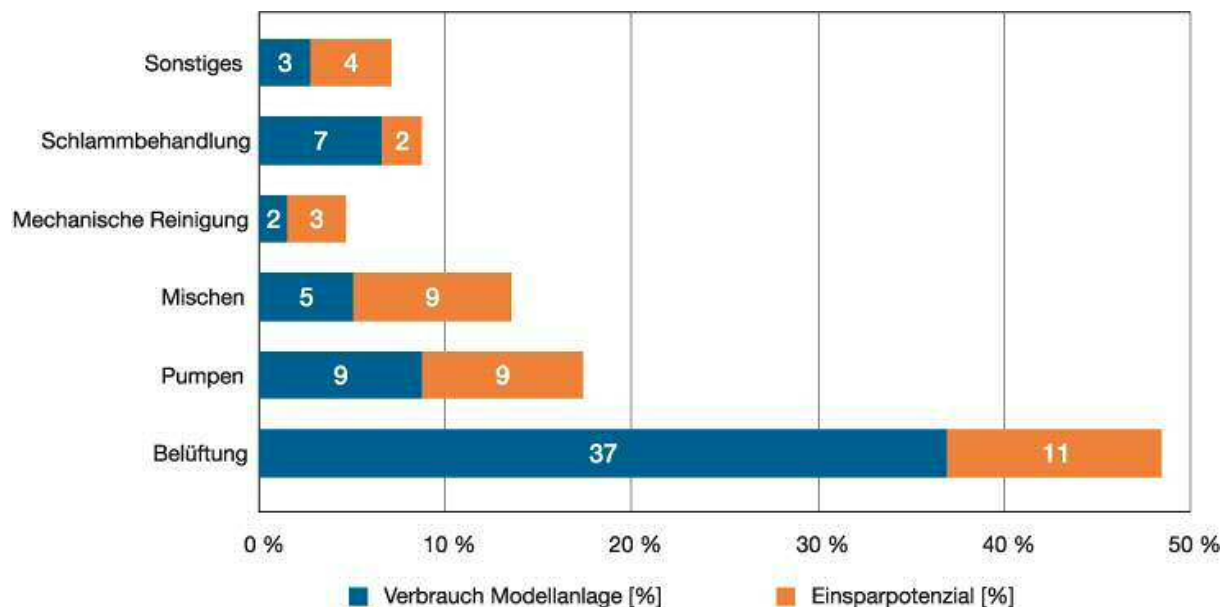


Abbildung 3.2: Anteil einzelner Verfahrensgruppen am Gesamtverbrauch und theoretisches Einsparpotenzial

Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Belüftung mit rund 48 % den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch hatte, hier aber auch mit ca. 11 % im Mittel das höchste Einsparpotenzial bestand. Ein ähnlich hohes Einsparpotenzial bestand bei den Pumpen und den Einrichtungen zum Mischen mit jeweils 9 %. Das gesamte theoretische Einsparpotenzial bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch lag bei den 4 untersuchten Anlagen zwischen 28 und 50 %.

In einem nächsten Schritt wurden dann die erforderlichen Maßnahmen in Sofortmaßnahmen, kurzfristige und abhängige Maßnahmen unterteilt. Hierbei zeigte sich, dass bereits die Umsetzung der Sofortmaßnahmen (also Maßnahmen, die ohne Umbauten der Anlage mit rein betrieblichen Mitteln umzusetzen sind) zu einer sehr deutlichen Reduzierung der Energieverbrauchswerte führen kann.

In einem abschließenden Schritt wurde dann das Gesamteinsparpotenzial für Rheinland-Pfalz bei Umsetzung der Optimierungsmaßnahmen hochgerechnet. Als realistisches Potenzial – erzielbar durch Kopplung diverser Maßnahmen (vgl. Abbildung 3.3) - wurden hierbei ca. 35 % abgeschätzt.

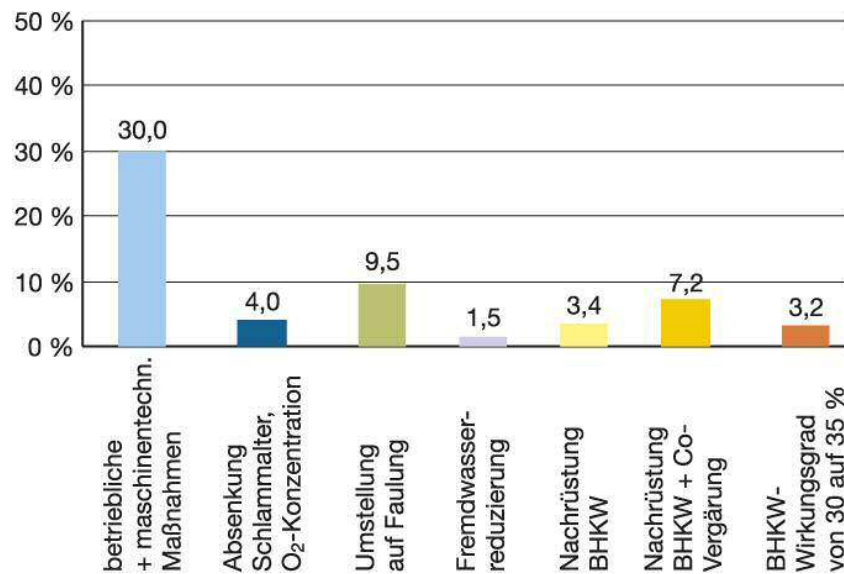


Abbildung 3.3: Einsparpotenziale bei Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen

Die Gesamteinsparpotenziale beliefen sich nach den vorgenannten Abschätzungen auf bis zu 120.000 – 130.000 MWh/a, was dem Energieverbrauch von rund 30.000 4-Personen-Haushalten entspricht.

Das im Jahr 2007 im Rahmen einer Tagung mit fast 150 Teilnehmenden abgeschlossene Projekt „Energieoptimierung auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz“ kann als Leuchtturmprojekt für das Thema Energie auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz bezeichnet werden. Die begleitende Broschüre fand großen Anklang und ist noch heute fester Bestandteil der ‚Fachbibliothek‘ auf zahlreichen Kläranlagen in Rheinland-Pfalz.

Das Projekt kann auch getrost als Signal für zahlreiche Kläranlagenbetreiber gesehen werden, sich mit der Energieeffizienz ihrer Kläranlagen näher zu befassen und es wurden – nicht zuletzt mit Hilfestellung durch tectraa – im Anschluss an das Projekt zahlreiche Energieanalysen auf rheinland-pfälzischen Kläranlagen durchgeführt. Gleichzeitig war das beschriebene Modellprojekt Anlass diverse Folgeprojekte zu initiieren, die nachfolgend beschrieben werden.

4 Projekt: „Energie- und Kostenoptimierung durch Schaffung von semizentralen Schlammbehandlungszentren“ kurz SBC

4.1 Ausgangslage & Ziel

Das Projekt „Energieoptimierung auf Kläranlage“ hat deutlich gemacht, dass im Bereich der Optimierung von Stabilisierungs- und Faulungsanlagen sowie der Eigenstromerzeugung durch Klärgas noch ein erhebliches energetisches Einsparpotenzial besteht. Zudem betrug die mittlere Auslastung der Faulräume in Rheinland-Pfalz im Jahr 2007 nur etwa 84 %, so dass bei einer Gesamtfaulraumkapazität von rund 4,5 Mio. EW ca. 720.000 EW als Reserve (freie ungenutzte Kapazitäten) vorlagen.

Der Umbau aller Stabilisierungsanlagen der Größenklasse 4 in Rheinland-Pfalz hätte zu einer theoretischen Energieeinsparung von rund 25.000 MWh/a (entsprechend ca. 9,5% Reduzierung des Gesamtenergiebedarfes aller Belebungsanlagen) geführt; dem entgegen standen die beträchtlichen finanziellen Aufwendungen, die für den Umbau der insgesamt 82 Anlagen zu tätigen gewesen wären.

Es galt somit modifizierte Ansätze zu entwickeln um einerseits die bestehende Situation der Abwasserbehandlungsanlagen in Rheinland-Pfalz zu berücksichtigen, auf der anderen Seite aber auch die energetischen Vorteile von Faulungsanlagen nutzen zu können.

4.2 Methodik

Im Rahmen dieses Projektes wurden anhand zweier Beispielanlagen in Rhein-Hessen Ansätze entwickelt, um räumlich nahe zueinander liegende aerobe Stabilisierungs- und Faulungsanlagen gemeinsam und übergreifend zu betreiben, um hieraus sowohl betriebliche als auch energetische Vorteile zu gewinnen. Es handelte sich um die Kläranlagen Grolsheim (aerobe Stabilisierungsanlage) und die Kläranlage Welgesheim (Faulungsanlage). Die (ehemals) aeroben Stabilisierungsanlagen werden dann mit geringeren Schlammaltern als sog. ‚Satellitenanlagen‘ mit der alleinigen Aufgabe der Abwasserbehandlung (Kohlenstoff- und Nährstoffelimination) betrieben. Der nicht stabilisierte Schlamm dieser Anlagen wird einer Faulungsanlage mit der entsprechenden Infrastruktur (ausreichend großer Faulbehälter, Verstromung des Gases über BHKW, Wärmenutzung, Schlammmentwässerung, ggf. Vorbehandlung der Prozesswässer etc.) zugeführt, die dann als ‚Semizentrales Schlammbehandlungscenter‘ (SBC) betrieben wird (vgl. Abbildung 4.1).

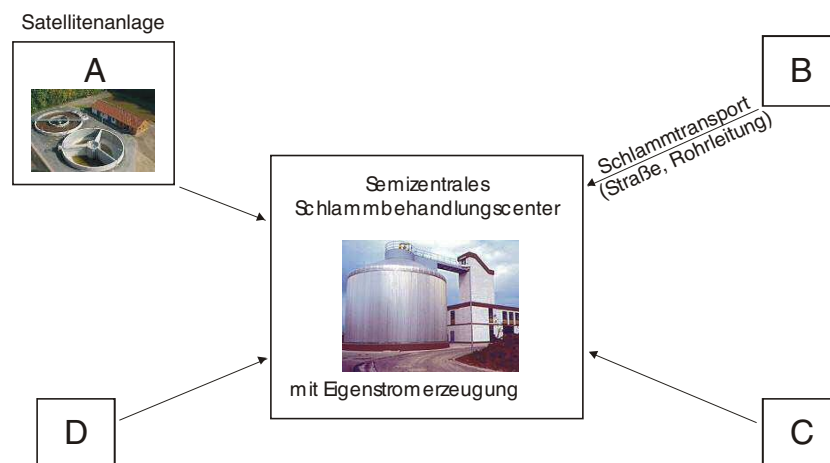


Abbildung 4.1: Prinzipschema eines semizentralen Schlammbehandlungscenters

Die Vorgehensweise im Rahmen des Projektes umfasste die folgenden Punkte:

- Durchführung von Energieanalysen auf den Anlagen zur Ermittlung des damaligen Energiebedarfs und Aufteilung auf die Verbrauchergruppen als Grundlage zur Abschätzung der (energetischen und ökobilanziellen) Auswirkungen der Maßnahmen.
- Entwicklung einer Konzeption zum Betrieb der KA Welgesheim als semizentrales Schlammbehandlungszentrum sowie von Konzepten zum Betrieb der KA Welgesheim als dezentrales Schlammbehandlungszentrum. Die KA Grolsheim würde dann als ‚Satellitenanlage‘ mit vermindertem Schlammgehalt und -alter und einem dann reduzierten Energieverbrauch für die Belüftung betrieben. Hierdurch würden sowohl die Belebungsstufe als auch die Nachklärung entlastet, das ‚freierwappende‘ Beckenvolumen wurde abgeschätzt und könnten ggf. zum Anschluss zusätzlicher EW (z.B. neuer Baugebiete) genutzt werden. Der (nicht ausgefäulte) Schlamm würde – ggf. nach einer maschinellen Eindickung – nach Welgesheim (ca. 7 km über die Straße) transportiert und dort in den Faulbehälter eingebracht. Auf der KA Welgesheim, die damals das anfallende Faulgas nur wärmetechnisch nutzte, würden sich die wirtschaftlichen Voraussetzungen für eine energetische Faulgasnutzung durch ein BHKW verbessern.
- Nachbemessung der Kläranlagen und Neuauslegung für das Schlammbehandlungszentrum: Die Belastungsdaten der Kläranlagen Grolsheim und Welgesheim wurden für den IST-Zustand anhand der statistischen Auswertung der Betriebsstagebücher nach ATV-DVWK A 131 bzw. A 198 erfasst und statistische Kenngrößen für die Belastung ermittelt. Ausgehend von den ermittelten Belastungsdaten wurden die Anlagen statisch nachgerechnet, um Schwachstellen bzw. Potenziale zu ermitteln. Hierbei wurden neben der Größe der biologischen Stufe auch die Nachklärung sowie insbesondere die Einrichtungen zur Schlammbehandlung mit-erfasst. Die sich ergebenden Belastungsänderungen wurden abgeschätzt und die Konsequenzen für den Anlagenbetrieb der beiden Referenzanlagen herausgearbeitet und erforderliche Nachbemessungen vorgenommen.
- Energetische und ökobilanzielle Bewertung der Szenarien: Die vorstehend beschriebenen Szenarien wurden energetisch (d.h. im Rahmen einer Energieanalyse) sowie ökobilanziell (anhand von CO₂-Bilanzen) bewertet. Hierbei wurden die jeweiligen Vor- und Nachteile herausgearbeitet, um ggf. Modifikationen an der Gesamtkonzeption vornehmen zu können. Auch wurde untersucht, welche Einflussfaktoren (wie Transportentfernung, Größe des Faulbehälters, interne Rückbelastungen etc.) limitierend sein könnten.
- Ableitung einer übertragbaren Methodik zur Überprüfung und Umsetzung entsprechender Ansätze: Aus den vorstehend gewonnenen Erkenntnissen wurde eine für andere Anlagen in Rheinland-Pfalz übertragbare Methodik entwickelt, wie entsprechende Ansätze geprüft und in die Praxis umgesetzt werden könnten.

- Einbindung der Ergebnisse in das rheinland-pfälzische Energieprojekt: Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in das rheinland-pfälzische Energieprojekt eingebunden, um die Erkenntnisse insbesondere für die Abschätzung des Potenzials für energetische Optimierungen in Rheinland-Pfalz zu vertiefen.

4.3 Ergebnisse und Wirkungen

Insgesamt ergaben sich in der Gesamtbetrachtung erhebliche energetische Vorteile beim Betrieb der KA Welgesheim als Semizentrales Schlammbehandlungscener. Einem erforderlichen Fremdenergiebezug von ca. 810.000 kWh pro Jahr elektrischer Energie sowie ca. 55.000 kWh an thermischer Energie standen bei der Umstellung der Konzeption einem Fremdenergiebezug von rund 430.000 kWh/a sowie rund 30.000 kWh/a für die Wärmeerzeugung entgegen.

Zur Abschätzung der Gesamtwirtschaftlichkeit wurde eine Kostenvergleichsrechnung durchgeführt, bei der der Jahresnutzen den Jahreskosten gegenübergestellt wurden. Der Jahresnutzen ergab sich aus der Einsparung an elektrischer Energie und Wärmeenergie, dem KKW-Bonus sowie der Einspeisung des überschüssigen Stroms in das Netz; hieraus resultiert ein Nutzen von rund 120.000 €/a. Demgegenüber ergaben sich die Jahreskosten aus dem Transport des Schlammes von Grolsheim nach Welgesheim (8 €/m³), den Kosten für die Anschaffung und den Betrieb des BHKW sowie sonstigen Kosten (Bezug von Strom zur Abdeckung von Stromspitzen vom EVU, erweiterte Schlammbehandlung etc.) zu ca. 140.000 €/a.

Im Falle des hier untersuchten Beispiels ergab sich damit zum Bearbeitungszeitpunkt (vor allem aufgrund des noch recht günstigen Strompreises in der Verbandsgemeinde von knapp 12 Cent/kWh !!!) noch kein Kostenvorteil alleine aufgrund der energetischen Betrachtung. Es war allerdings zu berücksichtigen, dass auf der KA Grolsheim das freie verfügbare Volumen zum Anschluss von Baugebieten (in zwei Ausbaustufen: 1.200 EW/3.000 EW) genutzt werden konnte und somit erhebliche Kosten für die Entsorgung und Behandlung dieser Abwässer eingespart werden konnten.

Zusammenfassend war festzustellen, dass ein gemeinsamer Betrieb von Anlagen im Rahmen einer Konzeption ‚Semizentrales Schlammbehandlungscener‘ eine durchaus lohnenswerte Alternative zum Umbau von aeroben Stabilisierungsanlagen zu Faulungsanlagen darstellen kann, sofern die Rahmenbedingungen auf den betroffenen Anlagen stimmen.

Die Potenziale in Rheinland-Pfalz wurden aufgrund der abwassertechnischen Strukturen als hoch eingeschätzt.

Aus heutiger Sicht wäre die Ausgangslage und Wirtschaftlichkeit neu zu bewerten. Die Rahmenbedingungen haben sich vielfältig geändert: Die Strompreise sind – auch auf Kläranlagen – deutlich höher als die damaligen 12 Ct/kWh, andererseits haben sich die Rahmenbedingungen für den Betrieb von neuen KWK-Anlagen auf Kläranlagen verändert. Gleichzeitig tun sich aber auch neue Handlungsfelder für einen sinn-

vollen und energiewendedenlichen Einsatz von KWK auf Kläranlagen auf, vgl. Kapitel 6. Energiewendedenlich bedeute dabei, dass das Faulgas nicht wie bisher weiterhin i. d. R. üblich kontinuierlich verstromt wird, sondern die Speicherpotenziale dieses regenerativen Gases aktiviert und dazu beitragen das Flexibilitätspotenziale in der regenerativen Energieerzeugung und -verbrauch gehoben werden (Gretzschel 2013).

Andere Projekte in Rheinland-Pfalz haben den Ansatz des SBC aufgenommen, so dass von einem etablierten Begriff gesprochen werden kann. Sie nutzen diesen jedoch nicht automatisch als Standorte für eine dezentrale Ausfäulung von Klärschlämmen, sondern erweitern den Begriff um die Funktionalität der dezentralen Entwässerung als Vorstufe zu einer thermischen Verwertung in einem sogenannten SVC (semizentralen Schlammverwertungscenter) (Kolisch et al. 2017).

An den Standorten der Beispielanlagen konnte sich das SBC-Konzept gegenüber einer zentralen Lösung letztlich jedoch nicht durchsetzen. Seit 2017 laufen die Umbaumaßnahmen am Standort der Kläranlage Unterer Wiesbach (Grolsheim) zur zentralen Abwasserreinigungsanlage Nahetal.

Anders stellt sich die Situation auf der Kläranlage Kaiserslautern dar, die Schlämme mehrerer kleiner umliegender Kläranlagen werden am Standort der Kläranlage Kaiserslautern ausgefäult.

5 Projekt: „Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation“ kurz NAwaS

5.1 Ausgangslage & Ziel

Die mit Anfang des neuen Jahrtausends eingetretenen Entwicklungen - insbesondere die steigenden Energiepreise, veränderte gesetzliche Rahmenbedingungen sowie technische Neuentwicklungen im Zusammenhang mit Biogasanlagen - haben zu einer Verschiebung der bis dato üblichen Einsatzgrenze für die Schlammfäulung (vgl. Abbildung 5.1) geführt und machten somit eine Neubewertung der Einsatzbereiche erforderlich. Dies galt insbesondere für Rheinland-Pfalz, wo ca. 681 Kläranlagen mit Anschlussgrößen < 30.000 EW betrieben werden, davon liegen 440 Anlagen bei einer Anschlussgröße von mehr als 1.000 EW.

Dabei war auch die Fragestellung zu behandeln, wie Anlagen mit Klärschlammfäulung inkl. der erforderlichen Infrastruktur wie Faulbehälter, Gasspeicher, gegebenenfalls Prozesswasserbehandlung usw. im Bereich einer Ausbaugröße von 10.000 bis 30.000 EW kostengünstig, aber dennoch betriebsicher, umgesetzt werden können.

Ziel dieser Studie war es, das in Rheinland-Pfalz tatsächlich vorhandene und nutzbare Optimierungspotenzial bei Umstellung von Kläranlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung auf Anlagen mit anaerober Schlammfäulung im Sinne eines integrativen Ansatzes betreffend Energieeffizienz, Wasserwirtschaft / Gewässer-

schutz (Ablaufqualität), Abfallwirtschaft (Klärschlammmenge) und Wirtschaftlichkeit aufzuzeigen.

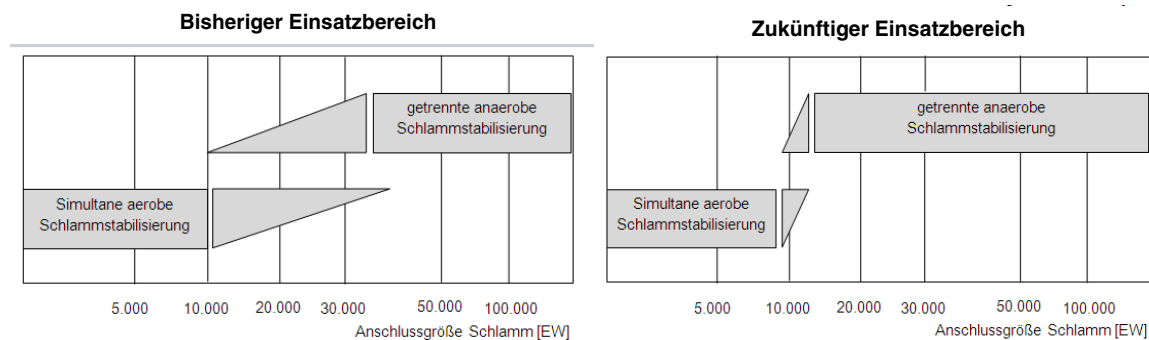


Abbildung 5.1: Einsatz der aeroben Schlammstabilisierung und der Schlammfäulung in Abhängigkeit von der Anlagengröße – bisher und in Zukunft (Jakob und Siekmann 2010)

5.2 Methodik

Die Projektbearbeitung war modular aufgebaut. So wurden in Modul 1 (Schmitt et al. 2010) wesentliche Grundlagenuntersuchungen vorgenommen, die sich den Rahmenbedingungen sowie der Anlagentechnik für eine Umstellung auf Faulung i. b. auf kleineren Kläranlagen gewidmet haben. Dazu gehörten u. a. gesetzliche Rahmenbedingungen sowie eine Anpassung der Klärschlammbehandlung. Des Weiteren wurde eine Vergleichende Betrachtung von aeroben Stabilisierungsanlagen und Faulungsanlagen vorgenommen, die deren i. b. energetischen Vorteile aufzeigt.

Modul 2 (Gretschel et al. 2011) richtete den Fokus auf die Analyse der Rahmenbedingungen der einzelnen Verfahrensstufen auf der Kläranlage sowie der Beschreibung von (Um-)Nutzungsszenarien für freiwerdende Beckenvolumina im Rahmen der Umstellung sowie die Entwicklung von Behandlungstechniken zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Weitere wesentliche Bearbeitungsinhalte des 2. Moduls waren die Entwicklung von Kostenfunktionen zur Prüfung einer Umstellung, die Erarbeitung einer Checkliste zu Prüfung und die Untersuchung einer Modellanlage.

5.3 Ergebnisse und Wirkungen

Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt:

- Kläranlagen mit Faulung können mit einem wesentlich niedrigeren Primärenergiebedarf betrieben werden als Kläranlagen mit aerober Stabilisierung. Darüber hinaus liefern sie durch die **Klärgasverstromung** einen wichtigen Beitrag zur Eigenenergieversorgung des Kläranlagenstandorts (vgl. Abbildung 5.2).
- Die **Rahmenbedingungen**, die für eine Umstellung auf Faulungsbetrieb relevant sind, unterscheiden sich auf Kläranlagen z. T. deutlich, so dass keine Pauschalaussagen möglich sind und jede Kläranlage einer individuellen Betrachtung zu unterziehen ist.

- Bei einer **Verfahrensumstellung** sollte sinnvollerweise eine Reduzierung des zu bewirtschaftenden Belebungsvolumens auf das notwendige Maß durchgeführt werden. Idealerweise kann das freiwerdende Beckenvolumen als Vorklärung genutzt werden. Dies ist jedoch erfahrungsgemäß eher selten der Fall, so dass in der Regel ein neues Vorklärbecken mit einem vorgeschalteten Zwischenpumpwerk gebaut werden muss. Einstraßig ausgeführte Kläranlagen mit Rundbecken bieten eher schlechte Voraussetzungen. Selbst eine mögliche Volumenreduzierung scheitert an der Notwendigkeit der auch in der Umbauphase einzuhaltenen Ablaufwerte, so dass bei diesen Anlagen lediglich eine Anpassung des Schlammalters über die Absenkung des Feststoffgehalts im Belebungsbecken erfolgen kann. Da die Rahmenbedingungen auf jeder Kläranlage jedoch individuell verschieden sind, stellen die notwendigen Arbeiten zur Verfahrensumstellung sowie zur Weiternutzung nicht mehr benötigten Behandlungsvolumens planerische Herausforderungen an die beratenden Ingenieure in jedem Einzelfall dar.
- Am Markt sind für alle Bereiche, die eine Umstellung betreffen **Behandlungstechniken** verfügbar, die die Wirtschaftlichkeit weiter positiv beeinflussen können. Innovative Faulbehälterkonstruktionen weisen einfache kompakte Formen auf, die kostengünstig, auch mehrstufig, betrieben werden können. Für den Bereich der Gasspeicherung haben sich in der Praxis beispielsweise kostengünstige Doppelmembrangasspeicher bewährt. Für die Verstromung stehen sowohl Blockheizkraftwerke als auch zunehmend Mikrogasturbinen zur Verfügung. Die Prozesswasserbehandlung spielt auf kleineren Kläranlagen i. d. R. keine Rolle. Verfahren, wie z. B. die Deammonifikation, sind aber bereits großtechnisch im Einsatz.
- Zur überschlägigen Prüfung der Wirtschaftlichkeit der Verfahrensumstellung auf Faulung wurden **Kostenfunktionen** entwickelt, anhand derer Kläranlagenbetreiber und Planer beurteilen können, ob weitergehende Untersuchungen für ihren speziellen Anwendungsfall grundsätzlich geboten sind.
- Mit dem entwickelten Instrumentarium der „**Checkliste**“ stand erstmals ein Werkzeug bereit, das von Betreibern und Planern genutzt werden konnte, um die Fragestellung nach Umstellung auf Faulung überschlägig beantworten zu können. Neben der wirtschaftlichen Abschätzung einer Umstellung werden auch damit einhergehende Änderungen in der Prozesskette aufgezeigt. Die Checkliste greift auf i. d. R. vorhandene Betriebsdaten zurück. Unter Umständen kann die Erhebung weiterer Daten erforderlich werden.

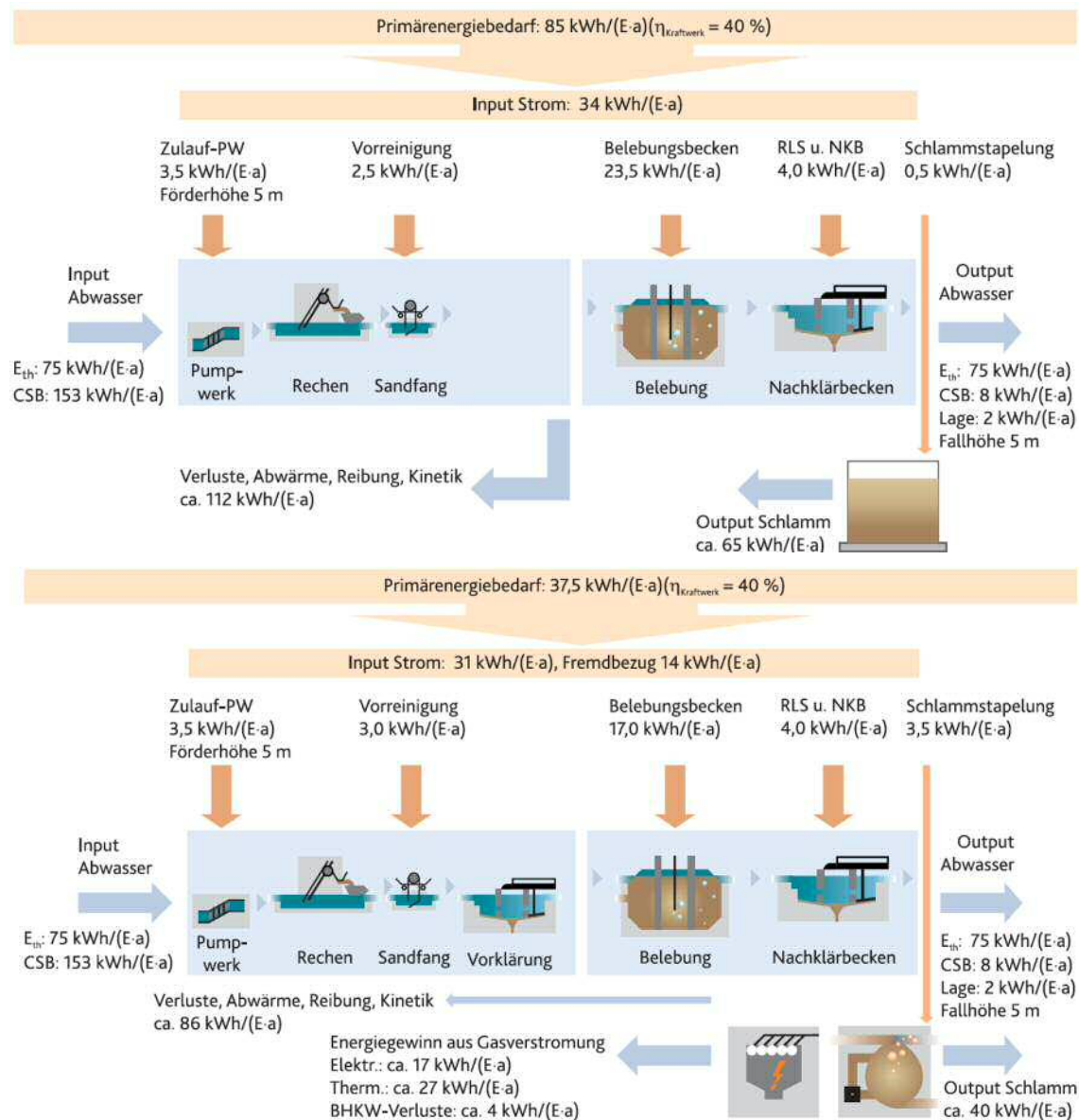


Abbildung 5.2: Energiebilanz einer Kläranlage für 20.000 E mit aerober Stabilisierung (oben) und mit Vorklärung und Schlammfäulung (unten) (Schmitt et al. 2014)

Eine Umstellung der Kläranlagen führt zu mehreren Effekten, die sich positiv auf die Energiewende und den Betrieb einer Kläranlage auswirken. Das **Optimierungspotenzial** stellt sich wie folgt dar:

- Effizienzsteigerung durch Prozessoptimierung und Energieeinsparung
- Erzeugung regenerativer Energie durch die Faulgasverstromung, die vor Ort verbraucht werden kann
- deutliche Reduzierung der zu entsorgenden / verwertenden Klärschlammmenge

Beide Prozesse entlasten die Stromnetze vor Ort. Darüber hinaus ergibt sich eine deutliche Primärenergieeinsparung.

Mit einem gewissen zeitlichen Abstand zum Abschluss des Projektes sowie der bundesweiten Reaktionen aus der Fachwelt kann behauptet werden, dass NAwaS einen wichtigen Grundstein und eine zentrale Hilfestellung für die bundesweit verstärkte Umstellung von Kläranlagen auf Faulung gelegt hat. In Rheinland-Pfalz hat sich die Anzahl der kommunalen Faulungsanlagen seit 2007 bis heute um 24 % erhöht, die Anzahl der Kläranlagen mit BHKW um 72 %, vgl. Abbildung 5.3.

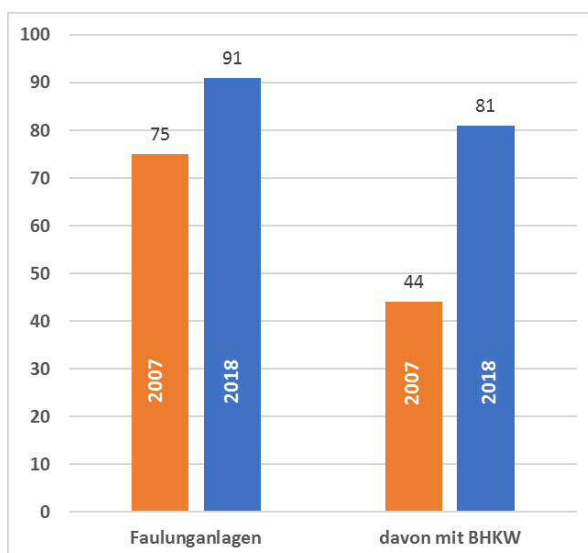


Abbildung 5.3: Entwicklung der Anzahl der Faulungsanlagen (mit BHKW) in Rheinland-Pfalz von 2004 bis heute (Angerbauer und Jung 2018).

Darüber hinaus wurde zu dieser Zeit in der Fachwelt erstmals die Flexibilisierung des energiewendedenlichen BHKW-Betriebs auf Kläranlagen thematisiert (Schmiedeskamp 2008). Somit waren die Projektergebnisse auch eine Voraussetzung um Kläranlagen heute und in Zukunft verstärkt in die Lage zu versetzen sich dem Thema Flexibilität widmen zu können und somit von möglichen Vorteilen, die sich durch eine aktive Einbindung in die Energiemärkte ergeben zu nutzen und auf eine energiewendedenliche Betriebsweise umzustellen.

Die zum Zeitpunkt der Projektbearbeitung sehr günstigen Rahmenbedingungen haben sich in den Folgejahren verschlechtert (z B. Änderung KWKG-Gesetz). Auch an dieser Stelle hat sich gezeigt, dass nichts so stetig ist wie der Wandel, leider auch in der Energiepolitik. Dadurch sind mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Anlagen nicht auf Faulung umgestellt worden oder deren Umstellung verzögert worden. Insgesamt hat die Energiepolitik der letzten Jahre der Abwasserbranche das „Leben nicht leichter“ gemacht.

Die im Rahmen von NAwaS vorgenommenen Recherchen sowie die vorbereitenden Arbeiten zu (Gretzschel 2013) mündeten im Projekt arrivee, das den Schwerpunkt auf die Energiemarktintegration von Kläranlagen setzte.

6 2014 -2017: „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung“ kurz arrivee

6.1 Hintergrund

Das BMBF-Verbundprojekt „Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung – arrivee“ untersuchte in den Jahren 2014 bis 2017 die Integration der in Deutschland flächendeckend vorhandenen Kläranlagen mit Schlammfäulung in ein optimiertes Flexibilitäts- und Speicherkonzept, um damit einen Beitrag zur Energiewende zu leisten. Die Energiewende beschreibt im Wesentlichen den Übergang von fossilen Energieträgern sowie der Kernenergie zu einer nachhaltigen Energieversorgung mittels Erneuerbarer Energien (EE). Durch einen stetig wachsenden Anteil volatiler erneuerbarer Stromerzeuger steigt der Bedarf an Flexibilität am Energiemarkt, da sich die Diskrepanz zwischen Erzeugung und Verbrauch stets im Gleichgewicht befinden muss.



Das Klärgas, das bei der anaeroben Schlammfäulung anfällt, wird üblicherweise mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen (KWK-Anlagen) nach Erfordernissen des Kläranlagenbetriebs weitestgehend zur Eigenversorgung verstromt. Kläranlagen mit Schlammfäulung bieten mit ihren vorhandenen KWK-Anlagen und den zugehörigen Gasspeichern hervorragende technische Voraussetzungen, um diese benötigte Flexibilität zur Verfügung zu stellen. Neben den vorhandenen KWK-Anlagen wurden in arrivee ebenfalls eine Betrachtung zur Einbeziehung weiterer vorhandener Aggregate auf der Kläranlage als auch innovativer neuer Anlagenkomponenten zur Bereitstellung von Flexibilität unter den Aspekten der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit untersucht.

6.2 Projektinhalte und Methodik

Der Stromverbrauch von Kläranlagen ist sehr unterschiedlich und variiert nach Art der Abwasserbehandlung, Anlagengröße, lokalen Randbedingungen und dem Einsatz der KWK-Anlagen zur Stromproduktion. Darüber hinaus sind stündliche, tägliche und saisonale Schwankungen gegeben. Durch die Analyse des Energiebedarfs, der Energieerzeugung und der unterschiedlichen Verfahrensprozesse von Faulungsanlagen wurde das Potenzial zur Bereitstellung von Strom und Flexibilität unter Berücksichtigung der bekannten Aufbereitungsprozesse ohne investiven Aufwand ermittelt (vgl. Tabelle 6.1). Die ermittelten Potenziale zeigen, dass Kläranlagen derzeit mit ihren KWK-Anlagen rund 215 MW_{el} an flexibler Leistung bereitstellen können, die zukünftig auf bis zu 300 MW_{el} ansteigen könnte (Schäfer et al. 2015).

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Flexibilitätspotenziale der bundesweiten Kläranlagen (Schäfer et al. 2017a).

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

Dabei sind die Aggregateleistungen und die Dauer der Leistungserbringung (verschiebbare Energiemenge) die maßgebenden Faktoren. Neben den Stromerzeugungsanlagen können ebenfalls die Stromverbraucher sowie innovative Technologien auf der Kläranlage genutzt werden, vgl. (Schmitt et al. 2017).

Hierzu wurden Konzepte für eine optimierte und energieeffiziente Nutzung des Klärgases in Verbindung mit Überschussstrom aus EE sowie einem flexiblen Betrieb von Kläranlagenaggregaten und innovativer Anlagentechnik entwickelt. In diesem Rahmen erfolgte die Entwicklung des Aggregatemanagements sowie der technischen Anlagenkonzepte (Schäfer et al. 2017b). Zusätzlich wurden die Auswirkungen der sich verändernden Versorgungsaufgabe auf die Verteilungsnetze analysiert und erforderliche Anpassung in den Netzstrukturen bestimmt.

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurde das Zusammenspiel zwischen Markt, Netz und Kläranlage überprüft. Hierfür wurden die entwickelten Flexibilitätskonzepte in ein dynamisches Simulationsmodell eingebunden (Hobus et al. 2017). Das individuelle Flexibilitätspotenzial wurde beispielhaft für die KA Radevormwald ermittelt. Um die Auswirkungen und Rückkopplungen mit dem vorgelagerten Verteilnetz zu bewerten wurde neben dem Kläranlagenmodell auch ein Netzmodell zur zeitreihenbasierten Netzberechnung erstellt. Dadurch war eine Analyse der Regeleingriffe auf der Kläranlage sowie der Wechselwirkungen mit dem Netz möglich. Aufbauend auf den Simulationsergebnissen wurde die Regelsoftware zur Einbindung der Kläranlagenaggregate in ein virtuelles Kraftwerk angepasst. Die Einbindung der Kläranlage Radevormwald in ein virtuelles Kraftwerk wurde im realen Betrieb nachfolgend erfolgreich erprobt (Salomon D. et al. 2017).

Die aus den theoretischen Grundlagen, Simulationen sowie praktischen Erprobungen gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Basis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Wesentliche Punkte hier waren eine Analyse der Märkte sowie eine Kosten-Nutzen-Betrachtung. Dabei wurde untersucht, wie sich die Wirtschaftlichkeit unter derzeitigen Rahmenbedingungen darstellt und welche Bedingungen sich ändern müssten, um bestimmte Konzepte in einen wirtschaftlichen Bereich zu überführen. In diesem Zusammenhang erfolgte ebenfalls eine wirtschaftliche Bewertung des erforderlichen Netzausbaus und möglicher Handlungsalternativen.

Fortlaufend zur Projektbearbeitung wurden die für *arrivee* relevanten politischen wie auch rechtlichen Rahmenbedingungen untersucht. Dazu wurde die zum 31.12.2016 geltenden Rechtsgrundlagen zusammengestellt und bewertet. Des Weiteren wurden als Resultat eines projektinternen Workshops und von zwei Experten-Workshops sozialwissenschaftliche Szenarien entwickelt, um mögliche sowie wünschenswerte Entwicklungen der politischen Rahmenbedingungen in den kommenden zehn Jahren aus Sicht der Kläranlagenbetreiber zu erfassen.

6.3 Ergebnisse und Wirkungen

Die Projektergebnisse von *arrivee* haben u. a. dazu beigetragen zu zeigen, dass Kläranlagen mit geringen Investitionen in die Lage versetzt werden können einen Beitrag zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen leisten. Sie verfügen dazu über ein signifikantes Potenzial. Damit können sie gleichzeitig an neuen Geschäftsmodellen und Produkten der Energieversorgung mit ihren vorhandenen Flexibilitäten teilhaben und davon profitieren. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass Kläranlagen technisch in der Lage sind ihre Betriebsweise temporär aufgrund externer (Strommärkte, Verteilnetze) sowie interner (Lastmanagement) Anforderungen anzupassen, ohne den Klärprozess negativ zu beeinflussen. Auf diese Weise tragen sie zur Kopplung von Sektoren der Ver- und Entsorgung (Schäfer et al. 2018) bei.

Um einerseits die Flexibilitätpotenziale von Kläranlagen für marktorientierte Anwendungen zu heben und andererseits einen system- und netzdienlichen Einsatz zu ermöglichen, müssen allerdings sowohl technische als auch politisch-rechtliche Anpassungen vorgenommen werden. Dazu wurden entsprechende Hinweise und Forderungen an Politik und Gesetzgeber formuliert (Schmitt et al. 2017).

Letztendlich konnte gezeigt werden, dass Kläranlagen Flexibilität im Rahmen unterschiedlicher Konzepte bereitstellen können. In diesem Rahmen sind sie auch in der Lage für die Verteilnetze eine zunehmend bedeutende Rolle zu spielen.

Insgesamt konnte mit dem Verbundvorhaben *arrivee* gezeigt werden, dass

- Kläranlagen ein nicht unerhebliches Potenzial sowohl zur Stromerzeugung als auch zur Bereitstellung von Flexibilität besitzen
- ein flexibler Anlagenbetrieb unter kontrollierten und erprobten Bedingungen möglich ist ohne Auswirkungen auf die Reinigungsleistung
- Flexibilitätsbausteine im Bestand und durch innovative Konzepte sehr gut nutzbar sind, um am Energiemarkt zu agieren und davon zu profitieren
- Kläranlagen einen positiven Beitrag zur Verringerung des Netzausbaus im Verteilnetz leisten können, damit dieser entfallen oder verzögert werden kann
- ein Beitrag zur bedarfsgerechten Entlastung und Stabilisierung von Stromnetzen geleistet werden kann

- Power-to-Gas viele Synergien auf der Kläranlage schafft und diese prädestinierte Standorte zur Kopplung der Sektoren Wasser/Abwasser – Wärme/Strom/Gas darstellen
- aus Ressourcen- und Effizienz- sowie volkswirtschaftlicher Sicht sinnvolle Standorte für Power-to-Gas-Anlagen sind.
- Politische und rechtliche Hemmnisse abgebaut werden müssen, um die vorhandenen Potenziale besser nutzen zu können

Die vielversprechenden Ergebnisse aus *arrivee* werden derzeit im Rahmen einer Machbarkeitsstudie und geplanter weiterer Projekte in die Praxis überführt.

7 2013 - 2018: „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz“ kurz ZEBRAS

7.1 Hintergrund

Im Projekt „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS“ wurden mit Blick auf die sich ändernden gesetzlichen, gesellschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen sowie die spezielle Ausgangssituation der Abwasserreinigung in Rheinland-Pfalz (RLP) nachhaltige Konzepte zur Faulung und Klärgasverwertung entwickelt. Neben einer detaillierten Bestandshebung der Faulungsanlagen wurden die Möglichkeiten und Potenziale zur Steigerung der Stromproduktion im Bestand eruiert. Des Weiteren wurden Ansätze entwickelt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt "Faulung" bei bestehenden Kläranlagen mit anaerober Klärschlammstabilisierung optimiert werden kann. Wesentliche Ziele sind die energetische Optimierung der Anlagen, die Reduzierung der Schlammengen für die Entsorgung und die Sicherstellung der Abwasserreinigung auf einem hohen Niveau.

7.2 Projektinhalte und Methodik

Grundlage des Projektes stellt eine detaillierte Bestandsaufnahme der Basisdaten der Faulungsanlagen in RLP dar, anhand derer die erschließbaren Potenziale zur Steigerung der Faulgaserzeugung und -verwertung im Bestand abgeschätzt wurden (Knerr et al. 2016). Die im Projekt durchgeführte Bestandsanalyse und die Potenzialabschätzungen zur Steigerung der Faulgasproduktion und -verwertung zeigen deutlich, dass bei Faulungsanlagen in RLP erhebliche Optimierungspotenziale vorhanden sind. Das größte Potenzial liegt mit 8,6 GWh_{el}/a bei der Ausnutzung der freien Faulraumkapazitäten vor. Durch Repowering alter KWK-Anlagen könnte die Stromerzeugung um 6,1 GWh_{el}/a gesteigert werden und eine vollständige Verwertung des Klärgases zur Stromerzeugung würde theoretisch eine Steigerung der Stromerzeugung um 6,6 GWh_{el}/a ermöglichen. Für die Maßnahmen Anpassung des Schlammalters, Etablierung einer mehrstufigen Faulung, die Nachrüstung von KWK-Anlagen, die Reduzie-

rung von Fackelverlusten und die Implementierung einer Klärschlammdeintegration oder einer Vorfällung lassen sich Potenziale zwischen 0,5 und 4,4 GWh_{el}/a abschätzen.

Darauf aufbauend wurden verfahrenstechnische Umstellungen, Verbesserungen der Anlagentechnik und Sanierungsmaßnahmen vorgeschlagen, die theoretisch ermittelten Potenziale nutzbar zu machen. Ziel war es Optimierungsstrategien für die Faulung und Faulgasverwertung abzuleiten und aufzuzeigen. Dabei wurden die Auswirkungen der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung sowie die unterschiedlichen Wechselwirkungen berücksichtigt. Als Ergebnis wurden Handlungsempfehlungen in Form von insgesamt 13 Checklisten zum Vorgehen bei der Identifizierung von Optimierungspotenzialen der Faulung und Faulgasverwertung erarbeitet (vgl. Abbildung 7.1).

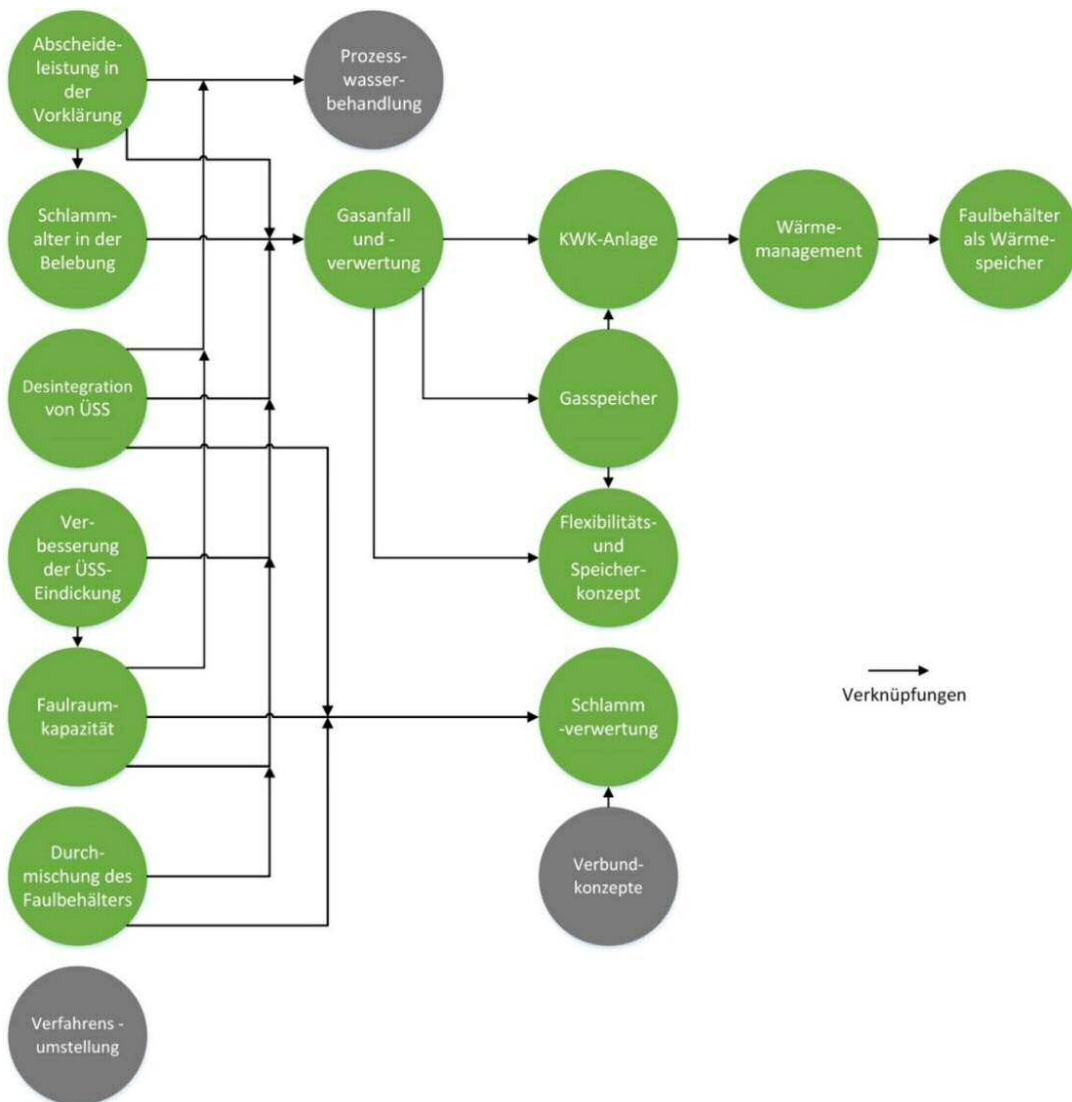


Abbildung 7.1: Übersicht und Verknüpfung der entwickelten Checklisten (Knerr et al. 2018).

Die Adressaten dieser Handlungsempfehlungen sind Kläranlagenbetreiber, Planer und Entscheidungsträger, die mit Hilfe der Checklisten ein individuelles Konzept zur Optimierung erstellen können. Parallel zu dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise wurde die Anwendung der entwickelten Checklisten an Beispielanlagen durchgeführt und dargestellt.

7.3 Ergebnisse und Wirkungen

Im Projekt konnten die Potenziale bestehender Faulungsanlagen bei der Optimierung von Verfahrensschritten der Abwasserreinigung, Schlammfäulung und Faulgasverwertung verdeutlicht werden. Dazu wurden die Prozessschritte der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -entsorgung zusammen betrachtet, die Abhängigkeiten zwischen den Verfahrensstufen aufgezeigt, Optimierungsansätze abgeleitet sowie Vor- und Nachteile von Maßnahmen beschrieben.

Im Wesentlichen konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Potenzialabschätzung für RLP zeigt, dass die Stromproduktion auf den bestehenden Faulungsanlagen deutlich gesteigert werden kann.
- Durch die entwickelten Checklisten können systematisch Ansatzpunkte zur energetischen und verfahrenstechnischen Optimierung der Abwasserreinigung, der Schlammbehandlung und Faulgasverwertung aufgezeigt werden.
- Für bereits optimierte Anlagen (z.B. nach DWA A-216 (DWA 2015)) bieten die Checklisten die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen, da auch Umstellungen der Verfahrensführung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden.
- Die erzielten Ergebnisse stellen eine gute Grundlage zur Umsetzung einer zukunftsfähigen Gestaltung der Schlammbehandlung und -entsorgung sowie Faulgasverwertung dar.

8 Fazit und Ausblick

Nach 14 Jahren „Energieforschung“ kann festgehalten werden, dass durch die gewonnenen Erkenntnisse ein vielfältiges Portfolio an Grundlagen, Arbeitshilfen und Hinweisen für einen energieeffizienten Betrieb von Kläranlagen erarbeitet wurde. Die Ergebnisse wurden auf eigenen sowie externen Fachtagungen, Seminaren und Workshops der Fachwelt präsentiert und vielfältig publiziert. Sie tragen mit vielen anderen Veröffentlichungen und Dokumenten zu diesem Themenkomplex zu einem zunehmend effizienteren Betrieb der Kläranlagen bei.

Die offene Diskussion der Ergebnisse und Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse war immer Teil der Philosophie des Lehrstuhls. Die Entwicklung auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz bezüglich der Umstellung auf Fäulung und Erhöhung der Klärgasproduktion sowie der Stromerzeugung (vgl. Abbildung 8.1) zeigt, dass die Forschungsschwerpunkte dem jeweiligen Trend voraus wichtige Akzente und benötigte Beiträge lieferten.

Der von Theo G. Schmitt und seinem Team eingeschlagene, energiereiche Weg soll in den kommenden Jahren am Institut Wasser-Infrastruktur-Ressourcen WIR weiterhin so erfolgreich fortgeführt werden und die abwasserwirtschaftliche Praxis weiter „am Puls der Zeit“ begleiten.

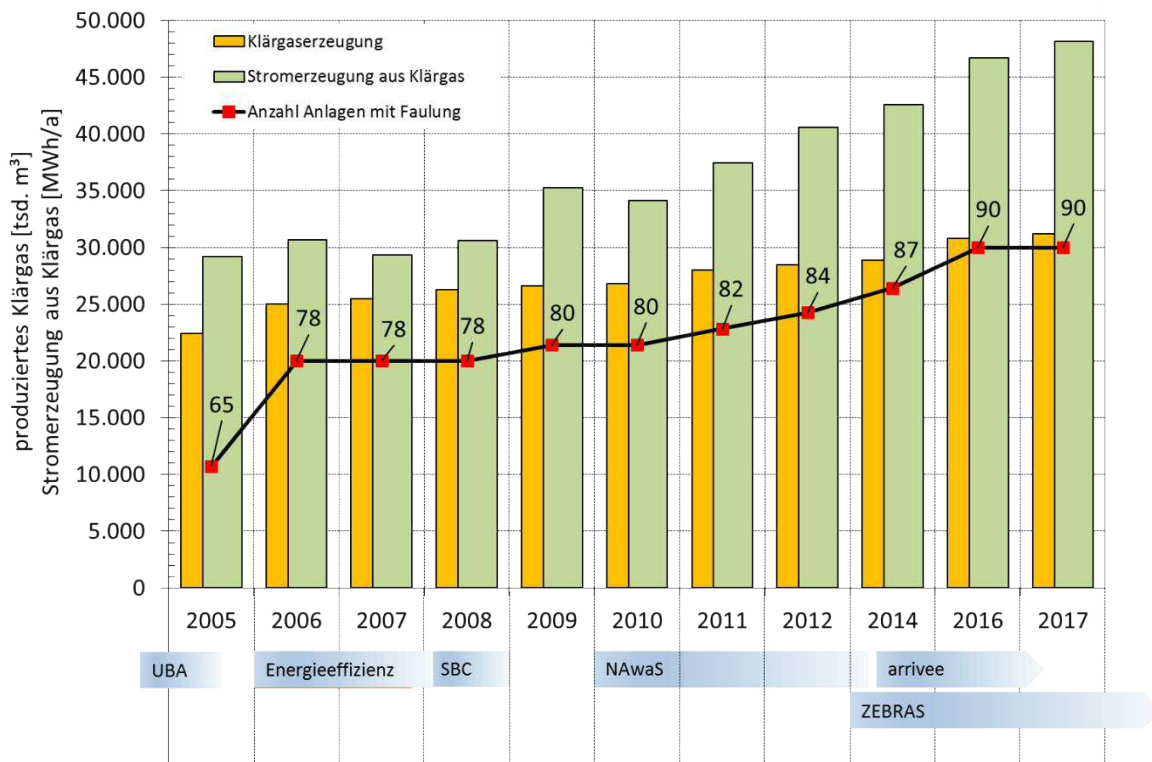


Abbildung 8.1: Entwicklung der Anzahl an Faulgasproduktion und Stromerzeugung auf Kläranlagen in Rheinland-Pfalz (basierend auf Angerbauer und Jung 2018, ergänzt um eigene Angaben).

Erste Schritte hierzu sind geplant bzw. bereits in der Phase der Umsetzung:

- Kombination einer ressourceneffizienten Spurenstoffelimination mit energie-wendenedienlichem Einsatz der Wasserelektrolyse
- Kopplung der Ressourcen Strom-Gas-Wärme zur Schließung der Ressourcenkreisläufe
- Bereitstellung von Flexibilität und einer weitergehenden Interaktion von Kläranlagen mit dem Energiesektor

Unser großer Dank gilt den aktuellen und zukünftigen Mittelgebern, Unterstützern und Partnern des Fachgebiets. Dies gilt in besonderem Maße dem Ministerium für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten Rheinland-Pfalz für die langjährige Unterstützung und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

WIR hoffen, auch in Zukunft auf unsere kompetenten Mitstreiter zählen zu können.

9 Literaturverzeichnis

- Angerbauer, Frank; Jung, Thomas (2018): Daten der Faulungsanlagen und BHKW in Rheinland-Pfalz, 24.10.2018. E-Mail.
- DWA (2015): Energiecheck und Energieanalyse. Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Dezember 2015. Hennef: DWA (DWA-Regelwerk, A 216).
- Gretzschel, Oliver (2013): Power-to-Gas - Visionen zur Stromspeicherung. Vom Wasser zum Strom – Visionen und Beiträge der Wasserwirtschaft. DWA. DWA Landesverband Hessen/Rheinland-Pfalz/Saarland. Mainz, 07.11.2013.
- 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. Online verfügbar unter https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1129/NAWAS_Modul2.pdf?command=downloadContent&filename=NAWAS_Modul2.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- Haberkern, Bernd; Maier, Werner; Schneider, Ursula (2008): Steigerung der Energieeffizienz auf kommunalen Kläranlagen. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (UBA-Texte, 11/08). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/steigerung-energieeffizienz-auf-kommunalen>, zuletzt geprüft am 26.10.2018.
- Hansen, Joachim; Wu, Kai; Kolisch, Gerd; Hobus, Inka; Schirmer, Gitta (2007): Steigerung der Energieeffizienz von Abwasseranlagen. Ökoeffizienz in der Wasserwirtschaft. Hg. v. Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz Ministerium für Umwelt. Mainz, zuletzt geprüft am 03.02.2010.
- Hobus, Inka; Taudien, Yannick; Pyro, Phillip.; Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver (2017): Dynamische Simulation von Regelenergie- und Speicherkonzepten auf Abwasserreinigungsanlagen. In: 11. DWA-Fachtagung MSR, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- Jakob, Jürgen; Siekmann, Klaus (2010): Umrüstung von aeroben Stabilisierungsanlagen in Anlagen mit Schlammfäulung. DWA-Lehrertagung. Stuttgart-Vaihingen, 25.03.2010.

- 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. Hg. v. Zentrum für innovative Abwassertechnologien und Université de Luxembourg. Kaiserslautern.
- Knerr, Henning; Dilly, Timo; Schmitt, Theo G.; Hansen, Joachim; Hien, Sebastian (2018): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz. Schlussbericht, Studie m Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten(MUEEF) des Landes Rheinland-Pfalz. Hg. v. Zentrum für innovative Abwassertechnologien und Université de Luxembourg. Kaiserslautern. Online verfügbar unter <https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1129/Schlussbericht.pdf?command=downloadContent&filename=Schlussbericht.pdf>, zuletzt geprüft am 06.11.2018.
- Kolisch, Gerd; Taudien, Yannick; Berg, Helmut; Pütz, Ralf, Guggemos, Harald (2017): Entwicklung und Bewertung von Szenarien zur Klärschlamm Entsorgung in Regionen – Klärschlammkonzept Region Trier. Online verfügbar unter http://www.bueroberg.de/wp-content/uploads/2017/11/171024_KA-Beitrag_KS-Konzept-Region-Trier_final_korr.pdf, zuletzt geprüft am 26.10.2018.
- Müller, Ernst A. (Hg.) (1999): Handbuch Energie in Kläranlagen. Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt Raumordnung und Landwirtschaft NRW.
- Salomon D.; Schäfer M.; Huesker F. (2017): Kläranlagen als Flexibilitätsanbieter in Stromverteilnetzen. Was ist technisch machbar, ökonomisch sinnvoll und politisch zu steuern? Poster. OTTI-Konferenz Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien. Berlin.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G. (2018): Sektorkopplung und Speicherung Erneuerbarer Energien durch Kläranlagen. In: Wasser und Abfall 20 (10), S. 14–17.
- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Knerr, Henning (2015): Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potential Analysis. In: Energy Procedia 73, S. 87–93. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.566.

- Schäfer, Michael; Gretzschel, Oliver; Schmitt, Theo G.; Taudien, Yannick (2017a): Flexibilitätpotenziale von Kläranlagen am Energiemarkt. Welchen Beitrag können Kläranlagen in Deutschland mit ihrer Stromproduktion leisten? Eine Bestandsaufnahme. In: wwt - Wasserwirtschaft Wassertechnik (3), S. 8–12. Online verfügbar unter http://www.wwt-online.de/sites/default/files/fachartikel/wwt0317-sp-schaefer_0.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- 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.
- Schmiedeskamp, Christian (2008): Gemeinsam abschalten. Klärgas- BHKW ideal zur Bereitstellung negativer Minutenreserve. In: BWK Das Energie-Fachmagazin (12), S. 56–57.
- 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. Online verfügbar unter https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1129/NAWAS_Modul1.pdf?command=downloadContent&filename=NAWAS_Modul1.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- 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 <https://wasser.rlp-umwelt.de/servlet/is/1129/NAWaS.pdf?command=downloadContent&filename=NAWaS.pdf>, zuletzt geprüft am 09.04.2018.
- Schmitt, Theo G.; Gretzschel, Oliver; Schäfer, Michael; Hüesker, Frank; Salomon, Dirk; Bidlingmaier, Artur et al. (2017): Abwasserreinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht arrivee. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern (Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A). Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb17/899010695.pdf>, zuletzt geprüft am 13.12.2017.

Korrespondenz an:

Dipl.-Ing. Michael Schäfer; Dipl.-Ing. Oliver Gretzschel
Technische Universität Kaiserslautern
Institut Wasser Infrastruktur Ressourcen
Paul-Ehrlich-Straße 14, Raum 320
D-67663 Kaiserslautern
Tel.: 0631/205-4643
E-Mail: michael.schaefer@bauing.uni-kl.de