

Optimierung von Kläranlagen mit Faulung – Identifizierung von Potenzialen

Timo C. Dilly, Henning Knerr, Theo G. Schmitt, Joachim Hansen, Thomas Siekmann

Kurzfassung

Im Projekt ZEBRAS wurden Checklisten zur anlagenspezifischen Identifizierung von Optimierungspotenzialen für Kläranlagen mit Faulung entwickelt. Diese berücksichtigen die Abhängigkeiten zwischen Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und Klärgasverwertung auf unterschiedlichen Ebenen. Dieser Beitrag liefert einen Überblick über Ansätze zur Optimierung der Faulung, die entwickelten Checklisten und deren Aufbau sowie Ergebnisse bei der Anwendung.

Einleitung

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Energie, Ernährung und Forsten des Landes Rheinland-Pfalz (MUEEF) wurden im Rahmen des Projektes „Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz - ZEBRAS“ Ansätze entwickelt, wie und unter welchen Rahmenbedingungen der Prozessschritt „Faulung“ bei bestehenden Kläranlagen mit anaerober Klärschlammstabilisierung optimiert werden kann. Grundlage des Projektes stellt eine detaillierte Bestandsaufnahme der Basisdaten der Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz (RLP) dar [1]. Aufbauend auf einer Bestandsanalyse wurde eine Potenzialabschätzung durchgeführt. Diese zeigt deutlich, dass bei Faulungsanlagen in RLP erhebliche Optimierungspotenziale vorhanden sind. Dabei wurden Maßnahmen bei der Vorklärung, die Reduzierung des Schlammalters im Belebungsreaktor, Desintegrationsmaßnahmen, Verfahrensumstellungen, das Repowering von alten KWK-Einheiten und die Ausnutzung von freien Faulraumkapazitäten betrachtet. [2].

Darauf aufbauend wurden im nächsten Arbeitsschritt anhand von „Checklisten“ unterschiedliche Optimierungsstrategien ausgearbeitet, die zum einen die Abhängigkeiten zwischen der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung und zum andern die einzelnen Anlagenkomponenten berücksichtigen. Parallel zu dieser grundsätzlichen Betrachtungsweise wurde anhand von Beispielanlagen die Umsetzbarkeit dieser Strategien betrachtet und detaillierte Konzepte zur Optimierung von Faulungsanlagen erarbeitet.

Dieser Beitrag basiert auf den bei der Fachtagung am 30.11.2017 vorgestellten und im Tagungsband „Faulung optimieren und Flexibilität wagen“ [3] veröffentlichten Projekt-Ergebnissen.

Optimierungsansätze

Generell können Optimierungsansätze in drei Bereichen unterschieden werden (**Bild 1**). Zum einen kann sich eine Anpassung der Abwasserreinigungsprozesse positiv auf die Faulung auswirken, zum andern sind Ansätze direkt bei der Schlammbehandlung zu finden. Diese beiden Ansätze beeinflussen sich gegenseitig, da z. B. Prozesswässer aus der Schlammbehandlung der Abwasserreinigung zugeführt werden und somit ein Kreislauf in der Verfahrenskette entsteht. Die Gasverwertung kann unabhängig davon verbessert werden, muss jedoch an Änderungen bei der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung angepasst werden.

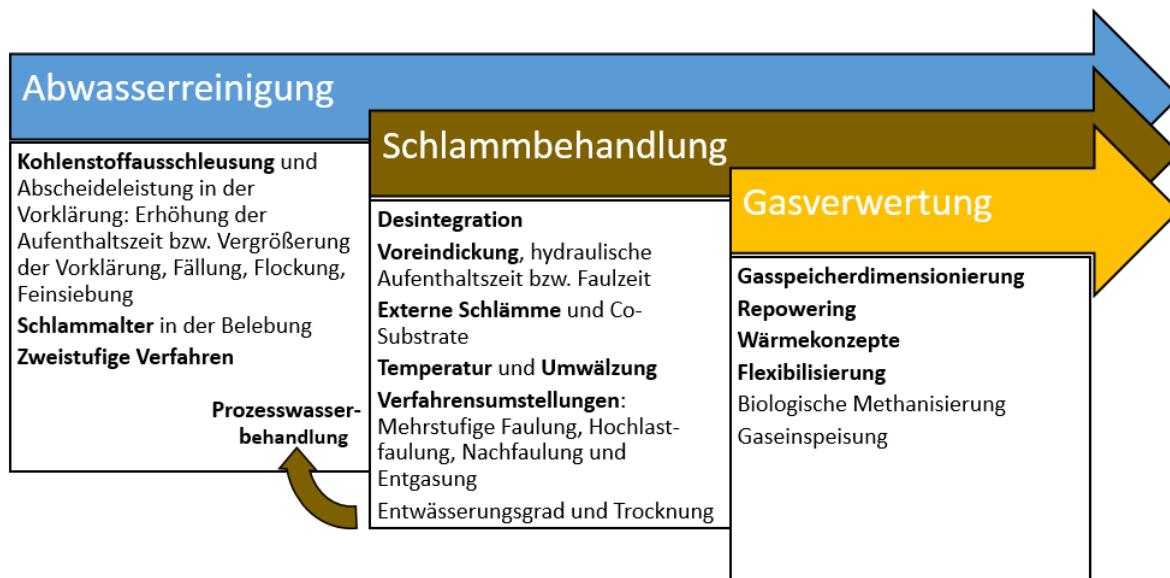


Bild 1: Optimierungsansätze in der Verfahrenskette von Faulungsanlagen [4]

Ansätze zur Optimierung der Abwasserreinigung in Hinblick auf eine Optimierung der Faulung zur Erhöhung der Gasausbeute werden zum Beispiel durch eine Verbesserung der Abscheideleistung in der Vorklärung erreicht. Primärschlamm erzielt einen deutlich höheren Gasertrag als Überschussschlamm. Ein vermehrter Abzug von energiereichem Primärschlamm führt daher zu einer erhöhten Gasproduktion und zu einer Entlastung der Belebungsstufe insbesondere bzgl. der Kohlenstoffbelastung. Die Primärschlammmenge kann durch eine Fällung oder die Kombination von Fällung, Flockung und Mikrosiebung weiter erhöht werden. Da sich die Abscheideleistungen der unterschiedlichen Verfahren bzgl. Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor jedoch stark unterscheiden, müssen immer die für die biologische Abwasserreinigung notwendigen Nährstoffverhältnisse berücksichtigt werden. Ein weiterer Optimierungsansatz in der Abwasserreinigung ist die Senkung des Schlammalters in der Belebung auf das für die Stickstoffelimination mindestens erforderliche Maß, da eine Vielzahl von Faulungsanlagen im Jahresdurchschnitt zu hohe Schlammalter aufweisen. Mit steigendem Schlammalter nimmt der Organikanteil im Schlamm ab und durch den höheren Abbaugrad fällt etwas weniger Überschussschlamm an. Die Einstellung eines niedrigeren Schlammalters führt somit nicht nur zur Einsparung von Belüftungsenergie, sondern auch zur Erhöhung der

Faulgasproduktion. Auch diese Anpassung sollte unter strenger Beachtung der Abwasserreinigungsziele erfolgen.

Die Schlammbehandlung kann man bei Faulungsanlagen in die Schlammvorbehandlung, die Faulung und die Schlammnachbehandlung unterteilen. In Abhängigkeit vom Schlammmverwertungskonzept ist der Übergang zur Schlammmverwertung fließend. Bei der Schlammvorbehandlung ist unter anderem die Installation einer Klärschlammintegration von Bedeutung. Vier der 64 Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz, die bei der ZEBRAS-Befragung erfasst wurden, besitzen bereits Erfahrungen mit dieser Technologie. Bei der Voreindickung kann durch eine Erhöhung des TR-Gehalts die hydraulische Aufenthaltszeit im Faulbehälter (=Faulzeit) erhöht werden. Da bei längeren Aufenthaltszeiten der Abbaugrad höher ist, wird dadurch die Gasproduktion gesteigert. Dies wirkt sich vor allem bei hydraulisch überlasteten Faulbehälter positiv aus. Des Weiteren kann zusätzliches freies Faulraumvolumen generiert werden, welches zur Mitbehandlung von Fremdschlämmen genutzt werden kann. Die Ausnutzung von freiem Faulraumvolumen durch die Mitbehandlung von Fremdschlämmen oder Co-Substraten führt in der Regel in Abhängigkeit von der zugegebenen Substratmenge zu einer signifikanten Steigerung der Gasproduktion. Die Auswertung der ZEBRAS-Befragung hat ergeben, dass 11 der 64 in die Auswertung eingeflossenen Faulungsanlagen in Rheinland-Pfalz bereits Co-Substrate annehmen und 15 der 64 Anlagen Fremdschlämme von anderen Anlagen angeliefert bekommen. Werden diese Schlämme direkt der Faulung zugeführt, ist eine deutliche Steigerung der Gasproduktion möglich. Dieses Konzept wird z. B. auf der Kläranlage Selters umgesetzt [5]. Neben einer Anpassung der Faulzeit bestehen mit einer Verbesserung der Durchmischung und einer Anpassung der Temperatur weitere Ansätze zur Optimierung der Faulung. Vor allem beim Neubau von Faulungsanlagen ist auch die Wahl des Verfahrens entscheidend. So können mehrstufige Faulungsanlagen, hochbelastete Faulungsanlagen oder Faulungsanlagen mit gezielter Biomasseanreicherung (Hochlastfaulungen) mit deutlich geringeren Faulzeiten betrieben werden, wodurch Faulraumvolumen eingespart werden kann. Diese Prinzipien werden in Rheinland-Pfalz z. B. bei der Kompaktfaulung auf der Kläranlage Linz-Unkel [6] oder der hochbelasteten Faulung mit Nachvergärung in Weilerbach [7,8] und der Kläranlage in Edenkoben [9] ausgenutzt. Eine Umstellung von Parallel- auf Reihenbetrieb erscheint daher ebenfalls sinnvoll, da eine günstigere Verweilzeitverteilung in den Reaktoren dazu führt, dass ein besserer Abbau bei gleichem Gesamtvolume erreicht wird bzw. bei gleichem Abbaugrad ein geringeres Volumen erforderlich ist. Wie bereits beschrieben, fallen in der Schlammbehandlung stickstoffreiche Prozesswässer an. Werden diese dem Kläranlagenzulauf zugeführt, wird in der Regel das C:N-Verhältnis in der Belebungsstufe verringert. Dadurch kommt es zu einer Reduktion der Denitrifikationskapazität. Bei einer Trocknung des Klärschlammes am Standort oder einer Mitbehandlung von Fremdschlämmen ist die Belastung durch Prozesswasser besonders zu berücksichtigen. Dabei wird es in einigen Fällen notwendig sein, eine getrennte Prozesswasserbehandlung auf der

Kläranlage zu implementieren. In Rheinland-Pfalz wird auf der Kläranlage Betzdorf in Wallmenroth/Muhlau derzeit eine Prozesswasserbehandlung mittels Deammonifikation in Betrieb genommen.

Offensichtliche Ansätze bei der Gasverwertung sind eine Optimierung des Gasspeichers oder eine Verbesserung des Wirkungsgrades bei der Stromerzeugung. Das sogenannte Repowering bzw. die Erneuerung alter KWK-Anlagen ist dabei meist die erste Option, die zu einer deutlichen Steigerung der Stromerzeugung führt. Weniger bekannt sind hingegen das Umsetzen von Wärmekonzepten oder die Flexibilisierung der Strom- oder auch der Gaserzeugung. Die bedarfsorientierte Stromerzeugung und die Einbindung von Speicherkonzepten sind notwendig, um eine neutrale Energieversorgung der Kläranlage zu erreichen. Die Integration von Faulungsanlagen in Flexibilitäts- und Speicherkonzepte sowie eine Teilnahme am Regelenergiemarkt [10,11] sind dabei Ansätze, welche die Bilanz von Energieeinkauf, Eigenerzeugung und –verbrauch weiter optimieren können. Ansätze hierzu finden sich bspw. im Projekt arrivee [12] wo weitere Zukunftskonzepte, wie die Integration von Power-to-Gas auf Faulungsanlagen, die Aufbereitung des Faulgases durch biologische Methanisierung und die Einspeisung des aufbereiteten Gases ins Erdgasnetz, dargestellt werden.

Identifizierung von Optimierungspotenzialen anhand von Checklisten

Die genannten Ansätze zur Optimierung sind somit weitgehend bekannt und deren Auswirkungen in der Literatur hinreichend beschrieben. Ziel des Projektes war es daher Strategien zur Optimierung einer Kläranlage mit Faulung zu entwickeln und diese in Form von Handlungsempfehlungen Kläranlagenbetreibern, Planern und Entscheidungsträgern zur Verfügung zu stellen. Die Schwierigkeit besteht darin, dass im Regelfall bei unterschiedlichen Kläranlagen auch von unterschiedlichen Voraussetzungen auszugehen ist. So unterscheiden sich je nach Anlage die betriebenen Aggregate, die verfahrenstechnische Umsetzung, die baulichen Gegebenheiten und sonstige Rahmenbedingungen. Eine anlagenbezogene Betrachtungsweise ist daher unabdingbar, um die richtigen Schlussfolgerungen treffen zu können. Für die Entwicklung von übertragbaren Optimierungsstrategien ist es notwendig, die Zusammenhänge allgemeingültig darzustellen. Im Projekt ZEBRAS wurden daher Checklisten entwickelt, die die Vorgehensweise bei der Ermittlung von Optimierungspotenzialen beschreiben und es dem Anwender ermöglichen, die anlagenspezifischen Eigenheiten der jeweiligen Kläranlage zu berücksichtigen.

Die Checklisten sind als Flussdiagramme aufgebaut. Es erfolgt keine konkrete Auslegung von Verfahrensstufen, sondern der Anwender kann die Checklisten in einem ersten Schritt zur Identifizierung von Optimierungspotenzialen verwenden. Im nächsten Schritt werden die Maßnahmen zur Erschließung des Potenzials dargestellt und darauf aufbauend die möglichen Auswirkungen in der Verfahrenskette

beschrieben. Die Vorgehensweise kann in fünf aufeinander aufbauenden Schritten beschrieben werden:

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

Insgesamt wurden 16 Ansätze zur Optimierung betrachtet und 13 Checklisten zur Identifizierung des Optimierungspotenzials erstellt. Die Checklisten sind logisch miteinander in Verbindung gesetzt. Somit werden nicht nur die direkten Auswirkungen auf die Verfahrenskette berücksichtigt, sondern mögliche Änderungen können wiederum Ausgangspunkt für Anpassungen, aber auch Optimierungsmöglichkeiten von nachfolgenden Verfahrensstufen sein.

Tabelle 1: Erstellte Checklisten und betrachtete Ansätze der Optimierung

Abwasserreinigung	Schlammbehandlung	Gasverwertung
Abscheideleistung in der Vorklärung	Desintegration von ÜSS	Gasanfall und -verwertung
Schlammalter in der Belebung	Verbesserung der ÜSS-Eindickung	KWK-Anlage
Prozesswasserbehandlung	Faulraumkapazitäten	Gasspeicher
	Durchmischung des Faulbehälters	Flexibilitäts- und Speicherkonzept
	Schlammverwertung	Wärmemanagement
	Verfahrensumstellung	Faulbehälter als Wärmespeicher
	Verbundkonzepte	

Beginnt man, wie in **Bild 2** dargestellt, beispielsweise mit der Checkliste zur Optimierung der Abscheideleistung in der Vorklärung (I), muss man abgesehen von den Ansätzen zur Prozesswasserbehandlung (II) auch die Checklisten Schlammalter in der Belebung (II) und die Checkliste Gasanfall und -verwertung (II) berücksichtigen. Die Checkliste Gasanfall und -verwertung (II) verweist wiederum auf die Checklisten KWK-Anlagen, Gasspeicher und Flexibilitäts- und Speicherkonzept (III). Von der Checkliste KWK-Anlage (III) besteht eine Verknüpfung zum Wärmemanagement (IV) und zur Ausnutzung des Faulbehälters als Wärmespeicher (V).

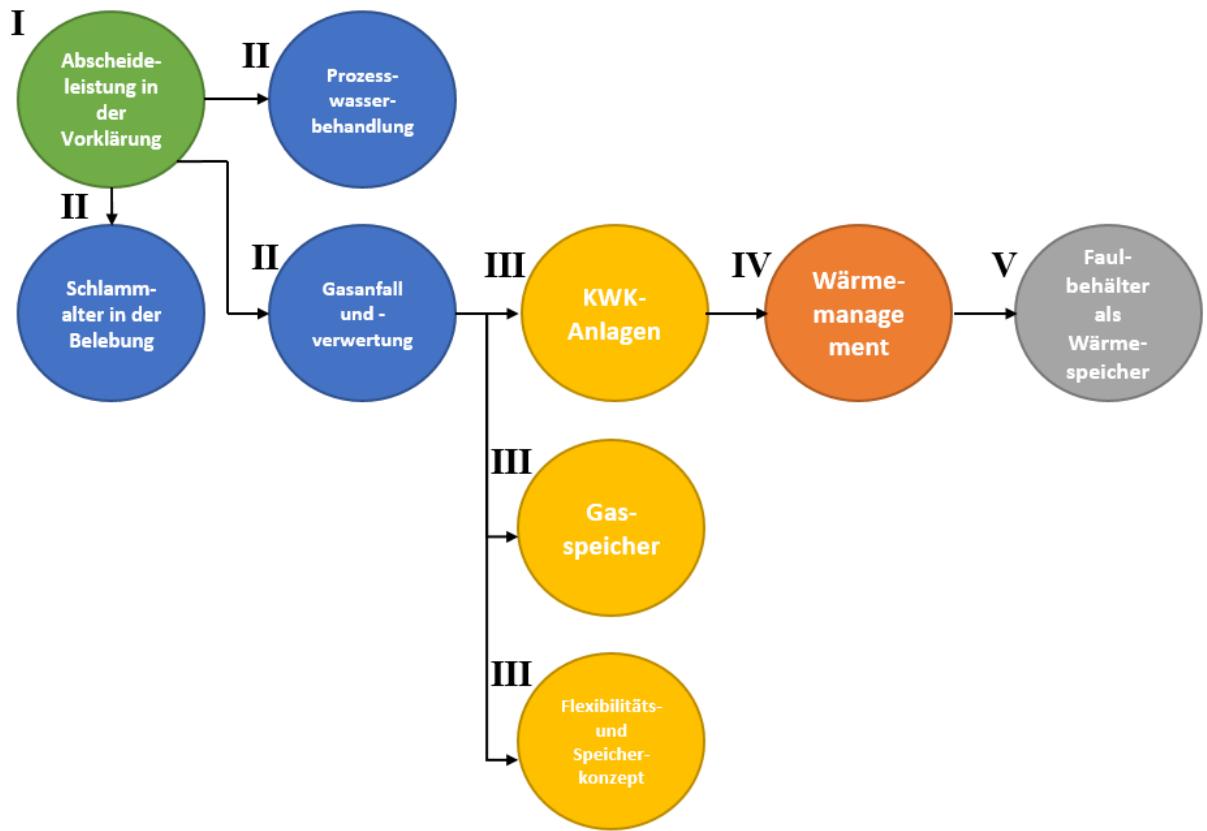


Bild 2: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ und deren Verknüpfungen [4]

Anwendung der Checklisten

Die Checklisten wurden gemeinsam mit den Projektpartnern erstellt und in Rücksprache mit ausgewähltem, am Projekt beteiligten Kläranlagenpersonal evaluiert und für Beispielanlagen angewendet. Im Folgenden wird die grundsätzliche Anwendung der erarbeiteten Checklisten am Beispiel „Abscheideleistung in der Vorklärung“ für eine Musteranlage demonstriert. Diese Checkliste zielt durch Erhöhung des Primärschlammfalls auf eine Erhöhung des Gasanfalls bei gleichzeitiger Reduzierung des Sauerstoffbedarfs in der Belebung durch Reduzierung der organischen Belastung. In Abhängigkeit vom einwohnerspezifischen Primärschlammfall und der Aufenthaltszeit in der Vorklärung werden unterschiedliche Maßnahmen vorgeschlagen. In einem ersten Schritt wird dabei die Erhöhung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung in Betracht gezogen. Es ist zu prüfen, ob derzeit nicht genutzte Vorklärbeckenvolumen vorhanden sind. Sollte dies nicht der Fall sein, wird der Einsatz einer Vorfällung oder einer Feinsiebung und in Ausnahmefällen auch der Neubau einer Vorklärung in Betracht gezogen. Bei den gegebenen Maßnahmen sind fünf unterschiedliche Szenarien möglich:

Szenario 1: Ausgangsszenario 0,75 – 1 h Aufenthaltszeit

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

Szenario 3: Aufenthaltszeit auf über 2,5 h erhöhen

Szenario 4: Vorklärung mit Vorfällung

Szenario 5: Mikrosiebung in Kombination mit Fällung/Flockung

Die Checkliste geht im Besonderem auf die Auswirkungen durch die Maßnahmenumsetzung ein (Bild 3). Diese werden für verschiedene Szenarien berechnet und dabei folgende Punkte berücksichtigt:

- Erhöhung des Primärschlammfall
- Steigerung der Faulgasproduktion in Folge des höheren Primärschlammfall
- Energieeinsparung in der Belebung durch verringerten Sauerstoffbedarf
- Verringerung der Überschussschlammproduktion
- Abnahme der Faulgasproduktion in Folge des geringen Überschussschlammfall

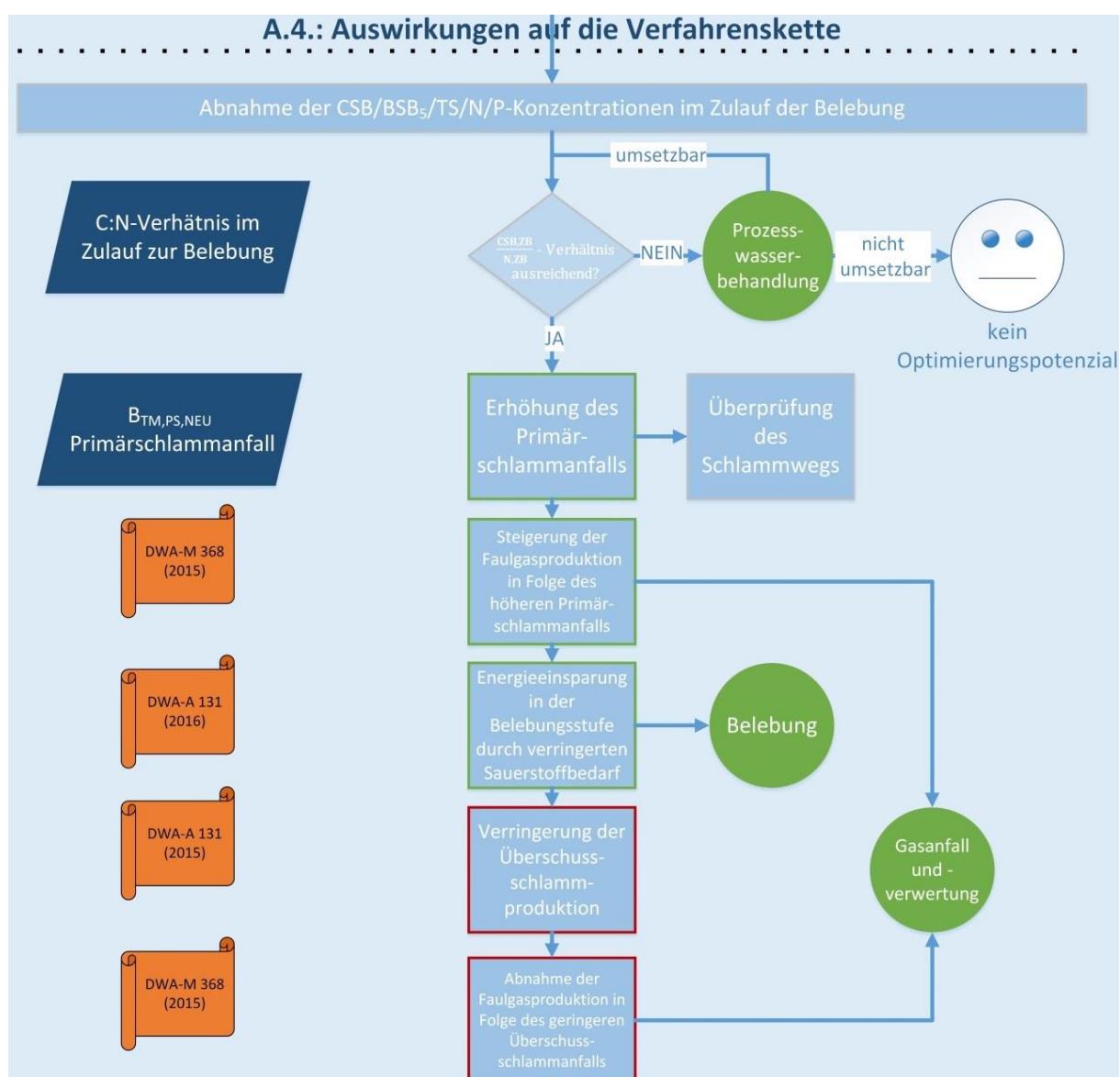


Bild 3: Checkliste „Abscheideleistung in der Vorklärung“ – Auswirkungen auf die Verfahrenskette [4]

Die Ansätze werden für eine Musteranlage mit einwohnerspezifischen Zulauffrachten nach DWA/ATV-Regelwerk [13] dargestellt. Bei der hypothetischen Anlage handelt es sich um eine mechanisch biologische Kläranlage mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung, die mit einer Ausbaugröße von 60 000 EW zur Größenklasse 4 gehört. Die Aufenthaltszeit in der Vorklärung liegt zwischen 0,75 – 1 h, das Schlammalter beträgt im Ausgangsszenario 12,6 d. Für die Auswertung der Szenarien werden in **Bild 4** die einwohnerspezifische Primärschlammproduktion ($b_{TM,E,PS,d}$), die einwohnerspezifische Überschlammproduktion ($b_{TM,E,ÜS,d}$), als Anhaltspunkt für den erforderlichen Energiebedarf in der Belebung der Sauerstoffbedarf (OV_d) und –zur Beurteilung der möglichen Energieeigenproduktion – der einwohnerspezifische Faulgasanfall (e_{FG}) herangezogen und gegenübergestellt.

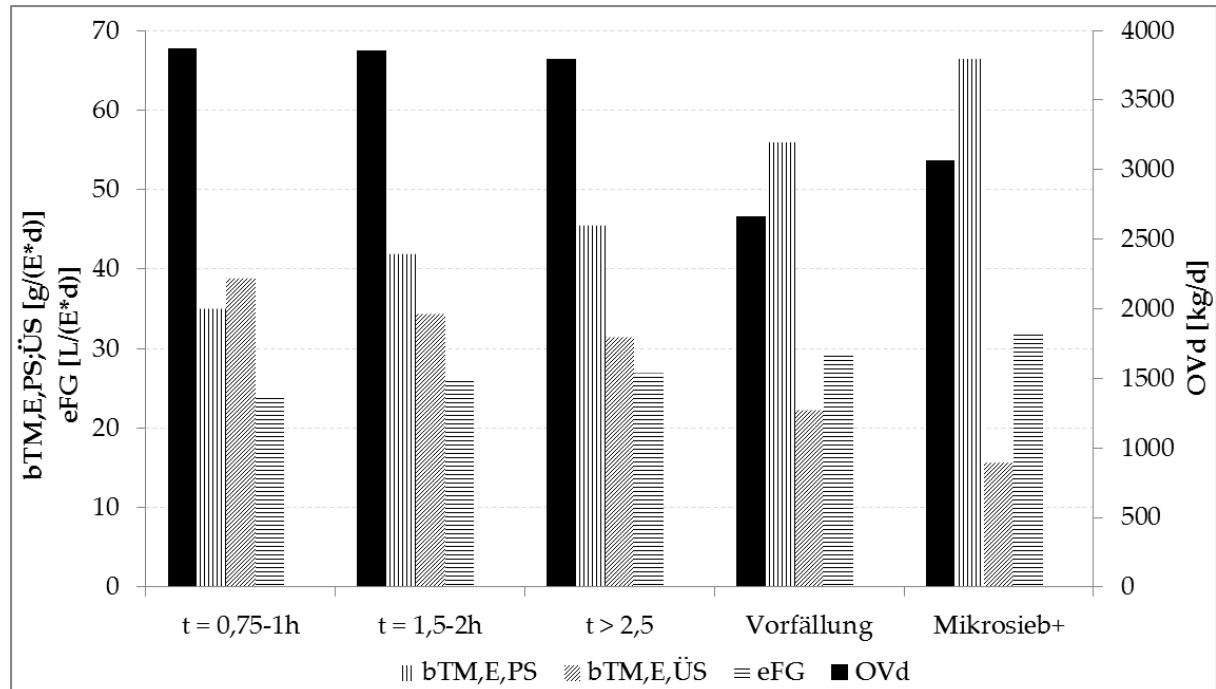


Bild 4: Ergebnisse der Anwendung des Flussdiagramms für eine 60 000 EW Abwasserreinigungsanlage nach DWA-A 131. [14]

Bezogen auf den Faulgasanfall ist somit eine Zunahme von ca. 8 – 32 % möglich. Hierbei ist zu beachten, dass das Schlammalter für das Szenario Vorfällung mit 22 d bereits relativ hoch ist und beim Szenario mit Mikrosiebung auf 31 d ansteigt.

Abgesehen davon, dass in diesem Fall die biologische Stufe optimiert werden kann, gewinnt der Betreiber in einem solchen Fall die Information, dass weiteres Optimierungspotenzial auf seiner Anlage vorhanden ist, welches erschlossen werden kann.

Checklisten im Praxistest

Die Praxistauglichkeit der Checklisten wurde im Rahmen der Erstellung eines Zukunftskonzepts für die Kläranlage Untere Selz überprüft. Dabei zeigen sich Potenziale und Grenzen in der Nutzung der Checklisten. Ziel war die energetische Optimierung der Gesamtanlage unter Berücksichtigung maschinentechnischer und baulicher Randbedingungen. In einem ersten Schritt wurde für die Gesamtanlage sowohl ein Energiecheck als auch eine Energieanalyse gemäß DWA Arbeitsblatt 216 (2015) [15] durchgeführt, anhand dessen ein hohes Optimierungspotenzial für die Kläranlage Untere Selz festgestellt wurde. Die anschließende Anwendung der Checklisten verdeutlichte, dass Optimierungspotenziale bei der Durchmischung der Faulbehälter vorhanden sind und die Erneuerung der KWK-Anlagen angezeigt ist. Außerdem konnte erarbeitet werden, dass ein großes Potenzial bei der Ausnutzung von freien Faulraumvolumen vorhanden ist. Am Beispiel der spezifischen Faulgasproduktion wird vor allem der hohe Einfluss der bereits eingesetzten Co-Substrate ersichtlich. Mit 555 l/kg oTM liegt dieser Kennwert deutlich über dem Erwartungswert von rd. 440 l/(kg oTM) nach DWA Merkblatt 368 [16]. Wohlwissend, dass hier mittlerweile ein Markt geschaffen wurde bzw. Abnahmekonkurrenzen festzustellen sind, kann demnach bei freiem Faulraumvolumen eine Annahme von Co-Substraten sinnvoll sein. Beim Zukunftskonzept wurde von einer Erhöhung der Abscheideleistung in der Vorklärung abgesehen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass bereits ein sehr hoher spezifischer Primärschlammfall vorliegt und das C:N-Verhältnis im Zulauf der biologischen Stufe, auch in Folge einer hohen Prozesswasserrückbelastung, bereits derzeit sehr gering ist. Da im Rahmen des Konzeptes keine Prozesswasserbehandlung vorgesehen ist, wurde daher nicht nur keine Erhöhung der Abscheideleistung, sondern zur Gewährleistung einer ausreichenden Denitrifikation sogar die Außerbetriebnahme einer Vorklärung konzeptionell vorgesehen. Dieser Fall dient als Beispiel dafür, dass trotz lobenswerter energetischer Sanierungsabsichten der Gewässerschutz, als wesentliches Ziel der Abwasserreinigung, stets an erster Stelle stehen muss. Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Checklisten eine schnelle und strukturierte Möglichkeit an die Hand gegeben, um eine Einschätzung zu „seiner“ Anlage und den jeweiligen Optimierungsmöglichkeiten zu bekommen. Der Kontakt zu einem Ingenieurbüro ist jedoch weiterhin unumgänglich, wenn es um die konkrete Planung von Maßnahmenumsetzungen geht. Hierbei sind dann auch aggregatspezifische Besonderheiten der Anlagen zu berücksichtigen.

Schlussfolgerung

Bereits existierende Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen, wie der Energiecheck und die Energieanalyse nach DWA A-216 (2015), werden mit den hier entwickelten Checklisten für Faulungsanlagen um einen weiteren Schritt ergänzt. Im Rahmen der Energieanalyse wird ermöglicht, die Kläranlage im Vergleich zu anderen Anlagen einzurordnen, die Energiekennwerte mit anlagenspezifischen Idealwerten abzugleichen und ein generelles Optimierungspotenzial zu erkennen.

Darauf aufbauend und deutlich darüberhinausgehend zeigen die entwickelten Checklisten direkte Ansatzpunkte zur Optimierung der Abwasserreinigung, der Faulung und Faulgasverwertung mit dem Ziel der Verbesserung der Energieeffizienz bestehender Anlagen auf. Sie können angewendet werden, wenn eine Optimierung der Anlage bereits vorgesehen ist. Für Faulungsanlagen, die beim Energiecheck und der Energieanalyse bereits sehr gut abschneiden, bieten die Checklisten die Möglichkeit, weitere Potenziale zu erkennen und zu heben, da auch eine Verfahrensumstellung und Ergänzungen von Aggregaten berücksichtigt und vorgeschlagen werden. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die Ergebnisse des Vorhabens eine gute Grundlage für die Umsetzung einer zukunftsfähigen Gestaltung der Schlammbehandlung und Faulgasverwertung darstellen, die sich an den neuen gesellschaftlichen, politischen ... Herausforderungen orientieren....

Literaturverzeichnis

- [1] Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Schäfer, M.; Hansen, J.; Siekmann, T. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: Wasser und Abfall 19 (1-2), S. 40–46.
- [2] Schmitt, T. G. (Hg.) (2017): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- [3] Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schäfer, M.; Schmitt, T. G. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- [4] Dilly, T. C.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2017): Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40)
- [5] Jakob, J.; Linder, A.; Siekmann, K. (2013): Zentralisierte Lösung mit zweistufiger Kompaktfaulung. In: Umwelt Magazin Sonderdruck (12).
- [6] Jakob, J.; Siekmann, K. (2012): Energieoptimierte Klärschlammbehandlung durch Umstellung der Verfahrensführung auf der Kläranlage Linz-Unkel mittel 2-stufiger Kompaktfaulung. Thür. Online verfügbar unter <http://www.siekmann-ingenieure.de>, zuletzt geprüft am 14.12.2017.
- [7] Krieger, S.; Blank, A.; Sterr, Y. (2012): Energieautarke GKA Weilerbach. Umstellung einer aeroben Stabilisierungsanlage auf eine Hochlastfaulung. In: E. Hoffmann und J. Homa (Hg.): Zukunftsähige Abwasser- und Schlammbehandlung. Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale. Tagungsband der 26. Karlsruher Flockungstage 2012. Karlsruhe (Bd. 143), S. 109–122.

- [8] Schmitt, T. G.; Valerius, B.; Knerr, H. (2017b): Wissenschaftliche Begleitung der Hochlastfaulung mit Nachvergärung der Kläranlage Weilerbach. Schlussbericht. im Auftrag der Verbandsgemeinde Weilerbach. tectraa- Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern. Online verfügbar unter
https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/weilerbach_schlussber_2017_02_15_m.pdf.
- [9] Sternad, W.; Waelkens, B. (2017): Planung, Konzeptionierung und wissenschaftliche Begleitung des Betriebs der Hochlastfaulung auf der Kläranlage Edenkoben. Schlammmfaulung auf Kläranlagen. Fraunhofer IGB. DWA; BWK. Neustadt an der Weinstraße, 28.06.2017.
- [10] Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hobus, I. (2017): Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- [11] Salomon, D.; Pyro, P. (2017): Flexibilität im Praxistest. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- [12] Schmitt, T. G.; Gretzschel, O.; Schäfer, M.; Hüesker, F.; Salomon, D.; Bildlingmaier, Arthur et al. (2017a): Abwassereinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://erwas-arrivee.de/veroeffentlichungen/schlussbericht-arrivee/#c655176>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.
- [13] ATV-DWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DWK-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.
- [14] Hien, S.; Hansen, J.; Dilly, T. C. (2017): Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammmfaulung an Beispielanlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).
- [15] DWA (2015): Arbeitsblatt DWA-A 216. Energiecheck und Energieanalyse - Instrumente zur Energieoptimierung von Abwasseranlagen. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
- [16] DWA (2014): Merkblatt DWA-M 368. Biologische Stabilisierung von Klärschlamm. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.

Autoren

Dipl.-Ing. Timo C. Dilly, Dr.-Ing. Henning Knerr, Prof. Dr.-Ing. Theo G. Schmitt
tectraa - Zentrum für Innovative AbWassertechnologien an der Technischen Universität Kaiserslautern

Paul-Ehrlich-Str. 14
D-67663 Kaiserslautern
Tel. +49 631 205 4643
E-Mail: timo.dilly@bauing.uni-kl.de

Prof. Dr.-Ing. Joachim Hansen
Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und Wasserbau
Universität Luxembour
L-1359 Luxembourg

Dr.-Ing. Thomas Siekmann
Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH
Segbachstr. 9
D-56743 Thür

Nachfolgende Literatur???

- 1 (Schmitt 2017)
- 2 (Knerr et al. 2016)
- 3 (Knerr et al. 2017)
- 4 (Dilly et al. 2017)(Dilly É Dilly et al. É
- 5 (Jakob et al. 2013)
- 6 (Jakob und Siekmann 2012)
- 7 (Krieger et al. 2012)
- 8 (Schmitt et al. 2017b)
- 9 (Sternad und Waelkens 2017)
- 10 (Schmitt et al. 2017a)
- 11 (Schäfer et al. 2017)
- 12 (Salomon und Pyro 2017)
- 13 (ATV-DVWK 2000)
- 14 (Hien et al. 2017)
- 15 (DWA 2015)
- 16 (DWA 2014)

Literaturverzeichnis

ATV-DVWK (2000): Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: GFA - Gesellschaft zur Förderung der Abwassertechnik e. V.

Dilly, T. C. (2015): Entwicklung von Ansätzen zur Optimierung des Prozessschrittes der Faulung bei kommunalen Abwasserreinigungsanlagen mit getrennter anaerober Schlammbehandlung. Diplomarbeit, Technische Universität Kaiserslautern. Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft.

Dilly, T. C.; Knerr, H.; Schmitt, T. G. (2017): Entwicklung von Optimierungsstrategien anhand von Checklisten. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40), S. 29–50.

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

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

Hien, S.; Hansen, J.; Dilly, T. C. (2017): Anwendung von Strategien zur Optimierung der anaeroben Schlammbauung an Beispielanlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

Jakob, J.; Linder, A.; Siekmann, K. (2013): Zentralisierte Lösung mit zweistufiger Kompaktfaulung. In: *Umwelt Magazin* Sonderdruck (12).

Jakob, J.; Siekmann, K. (2012): Energieoptimierte Klärschlammbehandlung durch Umstellung der Verfahrensführung auf der Kläranlage Linz-Unkel mittel 2-stufiger Kompaktfaulung. Thür. Online verfügbar unter <http://www.siekmann-ingenieure.de>, zuletzt geprüft am 14.03.2015.

Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Hansen, J.; Hien, S. (2016): Zukunftsorientierte Einbindung der Faulung und Faulgasverwertung in die Verfahrenskette der Abwasserreinigung, Schlammbehandlung und -verwertung in Rheinland-Pfalz, ZEBRAS. Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten (MULEWF) des Landes Rheinland-Pfalz. Sachstandsbericht Mai 2016. Zentrum für Innovative Abwassertechnologien; Université du Luxembourg.

Knerr, H.; Dilly, T. C.; Schmitt, T. G.; Schäfer, M.; Hansen, J.; Siekmann, T. (2017): Potenziale der Faulung und Klärgasverwertung in Rheinland-Pfalz. In: *Wasser und Abfall* 19 (1-2), S. 40–46.

Krieger, S.; Blank, A.; Sterr, Y. (2012): Energieautarke GKA Weilerbach. Umstellung einer aeroben Stabilisierungsanlage auf eine Hochlastfaulung. In: E. Hoffmann und J. Homa (Hg.): Zukunftsähige Abwasser- und Schlammbehandlung. Bauliche, verfahrenstechnische und energetische Optimierungspotenziale. Tagungsband der 26. Karlsruher Flockungstage 2012. Karlsruhe (Bd. 143), S. 109–122.

Salomon, D.; Pyro, P. (2017): Flexibilität im Praxistest. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

Schäfer, M.; Gretzschel, O.; Schmitt, T. G.; Hobus, I. (2017): Flexibilitätsoptionen auf Kläranlagen. In: T. G. Schmitt (Hg.): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

Schmitt, T. G. (Hg.) (2017): Kläranlagen in der Energiewende: Faulung optimieren, Flexibilität wagen. (Schriftenreihe des Fachgebietes Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Universität Kaiserslautern, 40).

Schmitt, T. G.; Gretzschel, O.; Schäfer, M.; Hüesker, F.; Salomon, D.; Bildlingmaier, Arthur et al. (2017a): Abwassereinigungsanlagen als Regelbaustein in intelligenten Verteilnetzen mit Erneuerbarer Energieerzeugung - arrivee. Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF: 02WER1320A. Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://erwas-arrivee.de/veroeffentlichungen/schlussbericht-arrivee/#c655176>, zuletzt geprüft am 19.09.2017.

Schmitt, T. G.; Valerius, B.; Knerr, H. (2017b): Wissenschaftliche Begleitung der Hochlastfaulung mit Nachvergärung der Kläranlage Weilerbach. Schlussbericht. im Auftrag der Verbandsgemeinde Weilerbach. tectraa- Zentrum für innovative Abwassertechnologien an der TU Kaiserslautern. Kaiserslautern. Online verfügbar unter https://www.umweltinnovationsprogramm.de/sites/default/files/benutzer/36/dokumente/weilerbach_schlussber_2017_02_15_m.pdf.

Sternad, W.; Waelkens, B. (2017): Planung, Konzeptionierung und wissenschaftliche Begleitung des Betriebs der Hochlastfaulung auf der Kläranlage Edenkoben. Schlammfaulung auf Kläranlagen. Fraunhofer IGB. DWA; BWK. Neustadt an der Weinstraße, 28.06.2017.