01|2023
Jahrgang 164 | ISSN 0016-3651 | B 5399

gwf Wasser + Abwasser

Vulkan-Verlag
www.gwf-wasser.de

SONDERDRUCK

Eine energieautarke oder energiepositive Kläranlage schon ab 10.000 EW

Thomas Paust, Alfred Albert

Nach einem knapp vier Jahre andauernden Praxisversuch in einer Referenzanlage für 35.000 EW und einer positiven Begutachtung durch den TÜV Industrie Service kann das $PEGA_{KA}$ – Verfahren zur Klärschlamm- und Gärrestaufbereitung als etabliertes Verfahren angesehen werden. Der Prozess ist ohne Animpfung unter Einhaltung der im Patent DE 10 2015 118 988 B4 beschriebenen Rahmenbedingungen anzufahren. Der original aus dem Fermenter anfallende, ausgefaulte Schlamm gelangt in den Bioreaktor $PEGA_{BB}$. Unter eingeschränkter Reinsauerstoffzugabe wird, überwacht von etlichen Sensoren, die Zusammensetzung des Belebtschlamms derart aktiviert, dass bei der anschließenden Vergärung des eingedickten Schlamms im Faulturm mehr organische Masse in Biogas umgewandelt wird (in der Referenzanlage 55 %). Als Folge dessen reduziert sich die Organik im Klärschlamm. Zusammen mit dem zu beobachtenden Wasserverlust lässt sich der reduzierte Klärschlamm (Referenzanlage Klärschlamm um 25 %) besser und wirtschaftlicher entwässern. Eine weitere Besonderheit ist, dass die Trübwässer aus der mechanischen Behandlung vollständig mitbehandelt werden. Die biologische Stufe der Kläranlage hat dadurch kaum noch unter der Rückbelastung zu leiden. Insbesondere wird die NH_4-N-Konzentration um ca. 90 % verringert. Aus diesem Prozess resultieren hohe finanzielle Vorteile, nicht zuletzt aus dem möglich erscheinenden energieautarken bzw. energiepositiven Betrieb. Gleichzeitig sinken die Umweltbelastungen durch weniger Treibhausgase wie CO_2.

Einleitung

Das aus Urin, Fäzes und Grauwasser bestehende Abwasser im Zulauf einer Kläranlage kann man aufgrund deren Vorgeschichte als regeneratives Substrat betrachten. Im zufließenden Abwasser ist ein Energiegehalt von 154 kWh/(E·a)[1] an grüner Energie enthalten. Lediglich Kläranlagen mit einer anaeroben Stufe können aus dem einem Faulturm zugeführten Primär- und Überschussschlamm Biogas erzeugen (grünes Gas). Zum überwiegenden Teil haben nur die Kläranlagen der GK4 (10.000 bis 100.000 EW) und GK5 (> 100.000 EW) Faultürme. Daraus erzielen die Anlagen im Median 13,5 kWh/(E·a) GK4 bzw. 18,2 kWh/(E·a) GK5 an Elektrizität, um einen Teil des Stromverbrauchs der Anlage zu decken (eine Autarkie ist selten anzutreffen). Das sind nur etwa 10 % der im Abwasser zugeführten Energie [1, 2] (**Bild 1**).

Verschiedene Arbeitsgruppen gehen davon aus, dass aus dem zugeführten Gemisch aus Primär- und Überschussschlamm eine Umsatzrate zu Klärgas von etwa 50 % möglich ist. Schaum (2013) errechnet bei einem CH_4-Gehalt von 60 % eine spezifische Gasausbeute von 19 NL/(E·d) aus. Andere Arbeitsgruppen kommen ebenfalls zu einer etwa 50 %-igen Umwandlung des dem Faulturm zugeführten CSB (s. Jardin (2012) / Svardal (2014) / DWA M368 „Biologische Stabilisierung von Klärschlamm" / Hartwig et al. (2010) / Fernandez-Arevaldo et al. (2017) / (alle in [1], Seite 35 f).

Die PRO-Entec-Gärrest-Aufbereitung für Kläranlagen, kurz $PEGA_{KA}$-Verfahren genannt (patentiert [3, 4]), ist eine Technologie, um zuvor ausgefaulten Schlamm in einem Seitenstrom zusammen mit Trübwasser aus der mechanischen Schlammentwässerung in einer biologischen Stufe zu behandeln. Durch selektive, restriktive Begasung mit Reinsauerstoff entstehen neue Schlamminhaltsstoffe aus gelösten und partikulären Bestandteilen des ausgefaulten Schlamms. Die Folge: Die wässrige Phase gelangt nahezu unbelastet in die Hauptstrombiologie zurück. Den mechanisch eingedickten $PEGA_{KA}$-Schlamm rezirkuliert man erneut in den Faulturm und das führt durch höhere Umwandlung der Organik (o-TS / GV) zu mehr Klärgas und weniger Klärschlamm. Die 50 %-ige Umwandlung des zugeführten Schlammgemisches in Klärgas verschiebt sich nach oben. Im Jahr 2021 hat der Wert im Mittel 68,3 % ($PEGA_{KA}$) erreicht (**Bild 2**).

Durchführung auf der Kläranlage Schwarzbachtal (seit 04.02.2019)

„Der Faulschlamm wird über das vorhandene Substratannahmepumpwerk (variabel über Selektor) in den SBR-NL gepumpt. Dazu kommt das Trübwasser gepuffert über einen Filtratwasserspeicher aus der Kammerfilterpresse (KFP). Der vorhandene SBR-NL dient in diesem Versuch als $PEGA_{KA}$-Reaktor. Dieser ist in seiner Schrittkette angehalten, sodass er ständig über die vorhandenen Gebläse (kein Reinsauerstoff) belüftet (> 0,5 mg/l) bzw. über das vorhandene Rührwerk umgewälzt wird. Zur Regelung wird die vorhandene Sauerstoffsonde verwendet. Zur Auswertung wurde zusätzlich noch eine Redox-Sonde installiert. Die $PEGA_{KA}$-Biologie wird mit ca. 6 g/l TS_{BB} betrieben.

Aus dem $PEGA_{KA}$-Reaktor wird über die vorhandenen Überschussschlammpumpen täglich in etwa die gleiche Menge an Schlamm abgezogen, wie ihm aus dem Faulbehälter zugeführt wird. Er wird in den Multifunktionsbehälter gepumpt (nur Rührwerk). Der $PEGA_{BB}$-Schlamm vermischt sich hier mit dem Primär- und Überschussschlamm aus der Hauptbiologie. Das Gemisch entwässert ein Bandfilter auf TR-Gehalte zwischen 9–12 % TR. Damit füttert man den Faulturm mit Substrat, in dem ein TR-Gehalt zwischen 4,0–5,5 % aufrechterhalten wird (Umwälzung mit Tauchpumpen)", erklärt der Betriebsleiter der Kläranlage Felix Lohoff.[1]

1 Zitat modifiziert

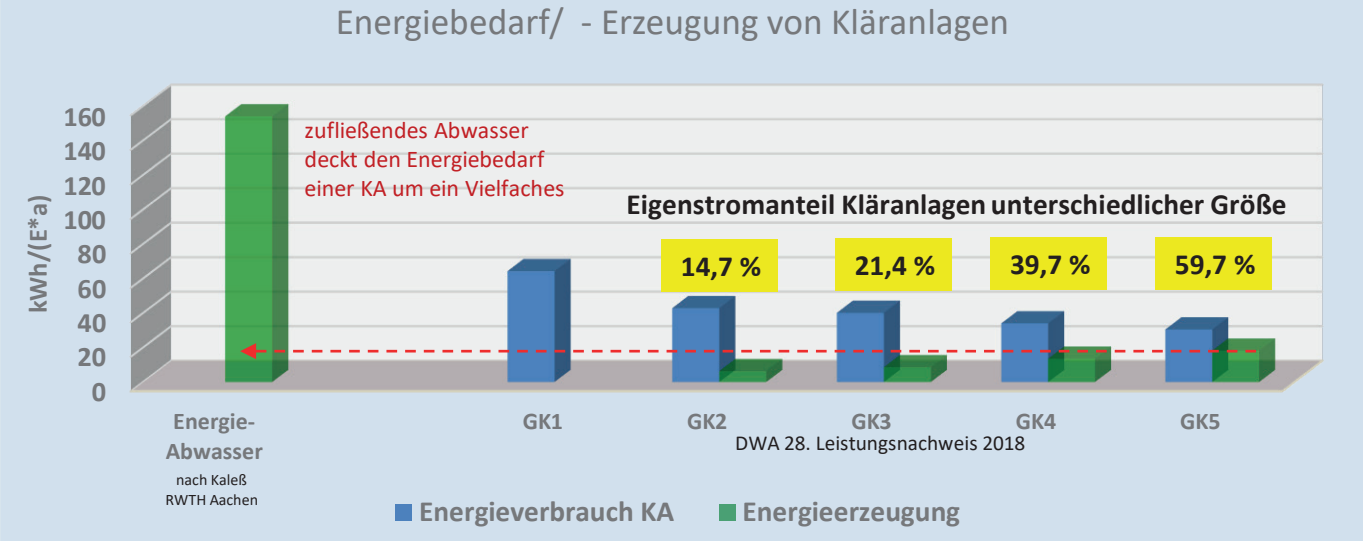

Bild 1: Die im Abwasser enthaltene chemische Energie an Kohlenstoffverbindungen deckt in etwa das Vierfache einer in der Kläranlage benötigten elektrischen Energie ab – bei den Größenklassen 4 bzw. 5 erreicht die Eigenstromerzeugung im Median in etwa nur 10 % der zuströmenden Energie aus organischen Inhaltsstoffen

Es läuft ein seit knapp vier Jahre andauernder Praxisversuch auf der KA Schwarzbachtal mit einem als $PEGA_{BB}$ umgenutzten SBR-Becken. Das ist gut ausgestattetet mit Messtechnik (O_2, Redox, NH_4-N, NO_3-N, TS, pH und Temperaturmessung), die aber bis auf die O_2-Messung nur registrierend eingesetzt sind. In der patentgemäßen Steuerung bzw. Regelung lassen sich die Größen TS-Gehalt, Redoxpotential und insbesondere die Entwicklung von NH_4-N und NO_3-N so beeinflussen, dass es zu besten Messwerten für alle erfassten Parameter für die Kläranlage kommt. Eine Reinsauerstoffbegasung / angepasste Steuerung / Regelung steht momentan immer noch nicht zur Verfügung (gemäß Patent DE 10 2015 118 988 B4). Es wurde bis Ende 2021 versucht, die Beschickung der $PEGA_{BB}$ mit einem Anteil von 50 % im Mittel einzustellen – die andere Hälfte führte man der Kammerfilterpresse zu. Von daher muss man von einem modifizierten $PEGA_{KA}$-Verfahren sprechen.

2.1 Massenbilanz Organik und Volumenstrom Schlammbehandlung

In **Bild 3** sind die Volumenströme in der Schlammbehandlung ohne die Hauptstrombiologie dargestellt. Die Auswertung bezieht sich auf das Jahr 2021. In diesem Jahr entwässerte man zusätzlich den Schlamm aus einem Schönungsteich über die vorhandene Kammerfilterpresse.

Bei dem Sankey-Diagramm wurde darauf verzichtet, die TR (TS)-Fracht abzubilden. Entscheidend für die Bilanz ist der Massenstrom an Organik, der in der Klärgasbildung und der thermischen Entsorgung des Klärschlamms endet (wohlwissend, dass die TS/TR-Bestimmung fehlerbehaftet sein kann). Folgende Schlüsse können daraus gezogen werden:

- Der Bandfilter trennt das aus dem Multifunktionsbehälter stammende Schlammgemisch bezüglich der Organik in etwa 50 % zu 50 % auf. Eine Optimierung beim eingesetzten Filterband

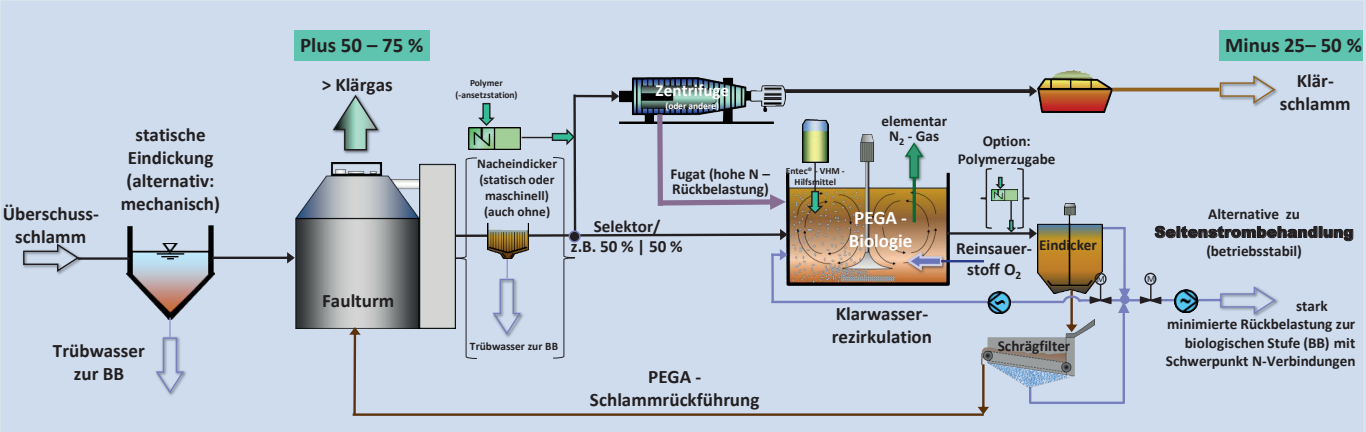

Bild 2: Übersicht der Integration einer $PEGA_{KA}$-Anlage in die bestehende anaerobe Schlammbehandlung einer Kläranlage unter Beibehaltung der mechanischen Entwässerung (aber Trübwasserbehandlung!)

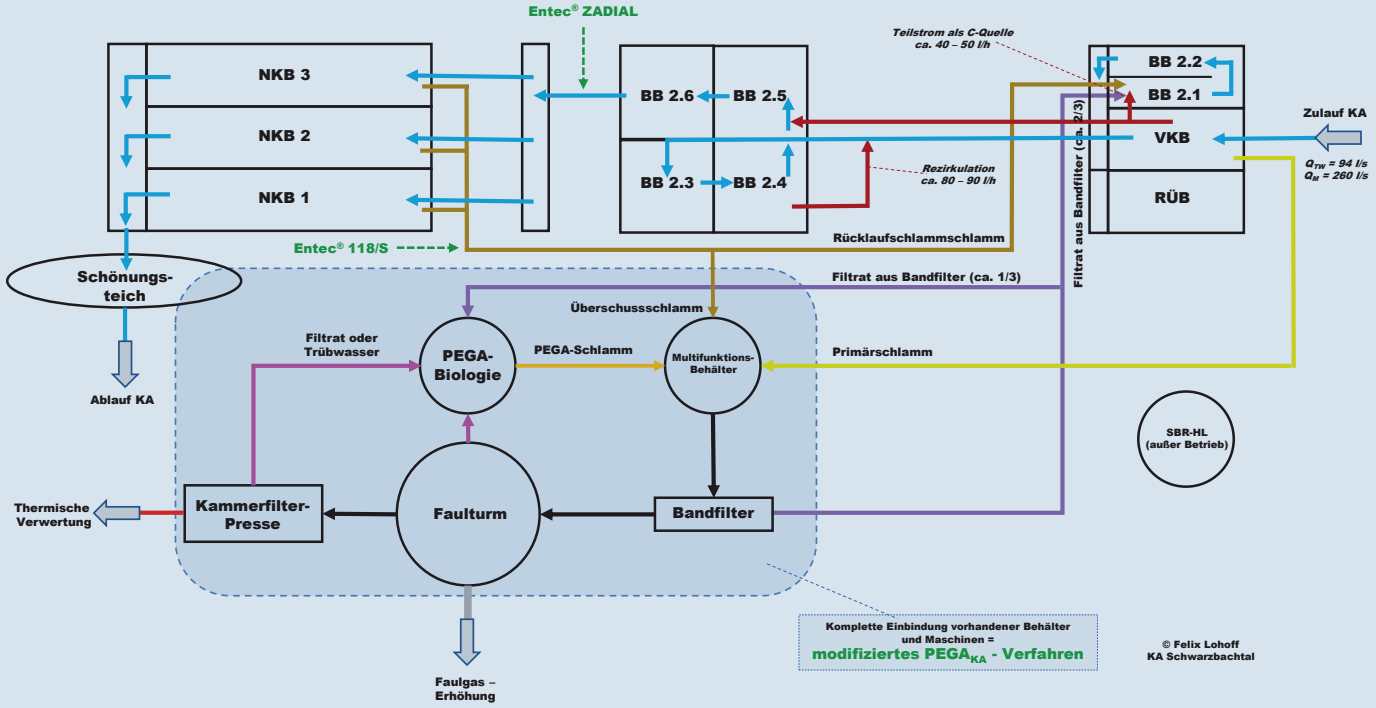

Bild 3: Modifiziertes PEGA$_{KA}$-Verfahren: Die PEGA$_{BB}$ ist hier in den vorhandenen Betriebsablauf integriert (die Stoffströme in der Hauptbiologie wurden am 09. August 2022 wie dargestellten umgestellt / angepasst)

und den verwendeten Polymeren könnte die Beschickung des Faulturms mit Organik erhöhen (höhere Gasausbeuten).

- Das Filtrat aus dem Bandfilter ist stark von NH_4-N und TN um ~ 93 % gegenüber dem Trübwasser aus der Kammerfilterpresse reduziert. Die Biologie im Hauptstrom wird stark entlastet und Belüftungsenergie wird gespart. Damit ist das PEGA$_{KA}$-Verfahren ein gleichwertiger, betriebsstabiler Ersatz für Seitenstromverfahren wie Anammox, Deammonifikation, Nitritation / Denitritation, Sharon etc. [5].
- Die zugeführten Trübwassermengen aus Bandfilter und Kammerfilterpresse „verdünnen" den abgezogen Faulschlamm aus dem Faulturm zu etwa 2/1 – das entspricht annähernd den Forderungen aus dem Patent, den TS$_{BB}$-Wert nach der Befüllung mit ausgefaulten Schlamm auf 5–6 g/l einzuregulieren.
- Das Verhältnis von Beschickung PEGA$_{BB}$ (8.334 m^3/a) und Kammerfilterpresse (9.454 m^3/a) entspricht in etwa den geforderten Verhältnis 50 % zu 50 %.
- Ob der Schlamm aus dem Schönungsteich Organik enthält, kann mangels Messung nicht bilanziert werden. Deshalb kann die ausgewiesene organische Belastung im Faulschlamm höher sein als berechnet – das hat dann Auswirkungen auf den Brennwert des Schlamms.
- Die Klärschlammanalytik vom 14. Januar 2021 ergab H_u = 10.535 kJ/kg TR (ohne Schlamm aus dem Schönungsteich) und vom 09. Juni 2021 H_u = 8.199 kJ/kg TR (mit Schlamm aus dem Schönungsteich). Beide Schlämme wurden thermisch entsorgt.

2.2 Nutzung von Klärgas zur Stromproduktion – Weg zur Autarkie?

Das Angebot des Contraktors, das BHKW auf der Kläranlage Schwarzbachtal zu betreiben, erfolgte erstmals Ende 2002 und wurde 2004 erneuert und angenommen. Gemessen an 2022 müsste das BHKW nun etwa 18 Jahre alt sein. Der erzeugte Strom wird über das EEG vergütet und soll 2024 aus der Förderung fallen. Die Leistungsdaten werden vom Hersteller mit einer elektrischen Leistung von 90 kW und einer thermischen Leistung von 155 kW angegeben. Die Wirkungsgrade lauten $\eta_{el.}$ = 32 % und $\eta_{th.}$ = 55 %. Der Contraktor hat die Verfügbarkeit des BHKWs mit 8.000 Bh/a zugrunde gelegt. Aktuellere Untersuchungen von Aschmann und Effenberger [6] zeigen aber auf, dass man mit 8.490 Bh/a von im Jahr möglichen 8.760 h/a ausgehen kann. Damit ließen sich für beide genannten Betriebsstunden der BHKW bei Volllast 680.000 bzw. 721.650 kWh/a erzeugen.

Das Alter der BHKW-Anlage spielt für die folgenden Betrachtungen durchaus eine Rolle, da ihre tatsächliche Verfügbarkeit und damit die Stromproduktion in dem betrachteten Zeitraum deutlich unter den errechneten Werten lagen. Die Daten lauten:

- 2018: 5.972 Bh/a
- 2019: 6.940 Bh/a
- 2020: 6.377 Bh/a
- 2021: 7.148 Bh/a

Wie beide zitierten Autoren [5] ausführen, kostet der Betrieb bei niedriger Nutzungsdauer eines BHKW höhere Gasmengen, um den Strom zu erzeugen. Gleichfalls haben Untersuchungen gezeigt, dass die elektrische Leistung mit zunehmenden Alter des BHKW immer weiter abnimmt (können bis zu 5 % ausmachen). Das kann durch eine Vollwartung in Teilen wieder gutgemacht werden. Eine entsprechende Wartung wurde Ende 2020 durchgeführt. Das führte dann bis zur Mitte 2021 zu einem erhöhten Gasverbrauch des BHKW´s mit entsprechend höheren Stromproduktion.

Tabelle 1: Veränderungen gegenüber dem Status Quo seit Aufnahme der neuartigen Verfahrenstechnik innerhalb der ersten drei Jahre. Es wird ein Ausblick in das Jahr 2024 gewagt, wenn die Anschaffung eines neuen modernen BHKW mit angepasster Leistung möglich ist

	2018 (klassisch)	2021 (PEGAKA)	Veränderung	2024 (Zukunft?)	Veränderung
Klärschlamm	1.998 t/a	1.505 t/a	-24,67 %		
	12,0 kg TR/ (Ea)	8,3 kg TR/ (Ea)			
Klärgas	270.096 Nm^3/ a	425.044 Nm^3/a	+57,37 %		
	339,1 Nl/ kg oTS	422,4 Nl/ kg oTS			
	15,0 Nl/ (Ed)	20,7 Nl/ (Ed)			
Strom	301.200 kWh/a	475.916 kWh/a	+58,01 %	970.764 kWh/a	+203,98 %
	veraltetes BHKW / Anschaffung 2004			modernes, neues BHKW	
	6,1 kWh/ (Ea)	9,3 kWh/ (Ea)		18,9 kWh/ (Ea)	
CO_2-Einsparung (bei Eigennutzung)	142,8 t/a	225,6 t/a		460,1 t/a	

Der Stromverbrauch der Kläranlage Schwarzbachtal hat sich in den ersten drei Jahren des betrachteten Zeitraums nur wenig verändert. 2021 beobachtet man eine deutliche Zunahme um etwa 300.000 kWh/a. Das ist auf die Inbetriebnahme der SBR-HL als Durchflussanlage zurückzuführen, da die Gefahr einer Überschreitung der Ablaufwerte zu befürchten war (unter anderem durch sehr hohe Lastspitzen im Zulauf).

Das vorhandene BHKW kann trotz der Jahr für Jahr steigenden Gasmenge aus dem Faulturm ab 2019 kaum mehr Strom erzeugen. Erst nach der technischen Generalüberholung der Anlage hat es Ende 2021 eine deutliche Anhebung der Stromquote gegeben. Allerdings ist man weit weg von der theoretischen Spitzenleistung von 721.650 kWh/a (60,5 % Eigenstromerzeugung).

Gerechnet mit einem modernen BHKW mit einem elektrischen Wirkungsgrad von $\eta_{el.}$ = 38 % (Spanne der angebotenen BHKW $\eta_{el.}$ = 35–42 %) reicht die Leistung des bestehenden BHKW´s von 90 kW noch aus. Für die erhöhte Gasmenge und deren Energieinhalt läge die Leistung 2020 schon bei 100 kW und 2021 bei 114 kW elektrische Leistung des BHKW´s. Für 2021 entstünde damit ein elektrischer Deckungsgrad durch Eigenenergie von knapp 65 %.

2021 hat das zuständige Wasserwirtschaftsamt der Kläranlage verschärfte Überwachungswerte für den Ablauf erteilt. Zudem ist die Kläranlage seit Jahren über die Auslegungsgrenze von 35.000 EW (+40,6 % / +15,4 % / +46,6 % / +46,5 %) überlastet und hat mit Fremdwasseraufkommen um die 60 % zu kämpfen. Die Kläranlage wurde 2005 umfassend saniert (2012 ein neuer Faulturm gebaut). Die Steuerung bzw. Regelung der Biologie entsprach den damals innovativen Gesichtspunkten / Flexibilität / Stand der Technik. Siebzehn Jahre später (2022) hat die Steuer-, Regelungs- und Messtechnik mehrere Innovationszyklen hinter sich, die man nutzen kann bzw. sollte. Folgende energieoptimierende Maßnahmen wurden zugrunde gelegt, um den Gesamtenergieverbrauch der Kläranlage nach einer Modernisierung zu senken:

- Optimierung der biologischen Stufe z.B. nach dem C-N-P-Konzept mit verbesserter Steuerung / Regelung und abgesenkten O_2-Gehalt in den belüfteten Zonen (Nitrifikationsphasen): Einsparung von ca. 215.000 kWh/a.

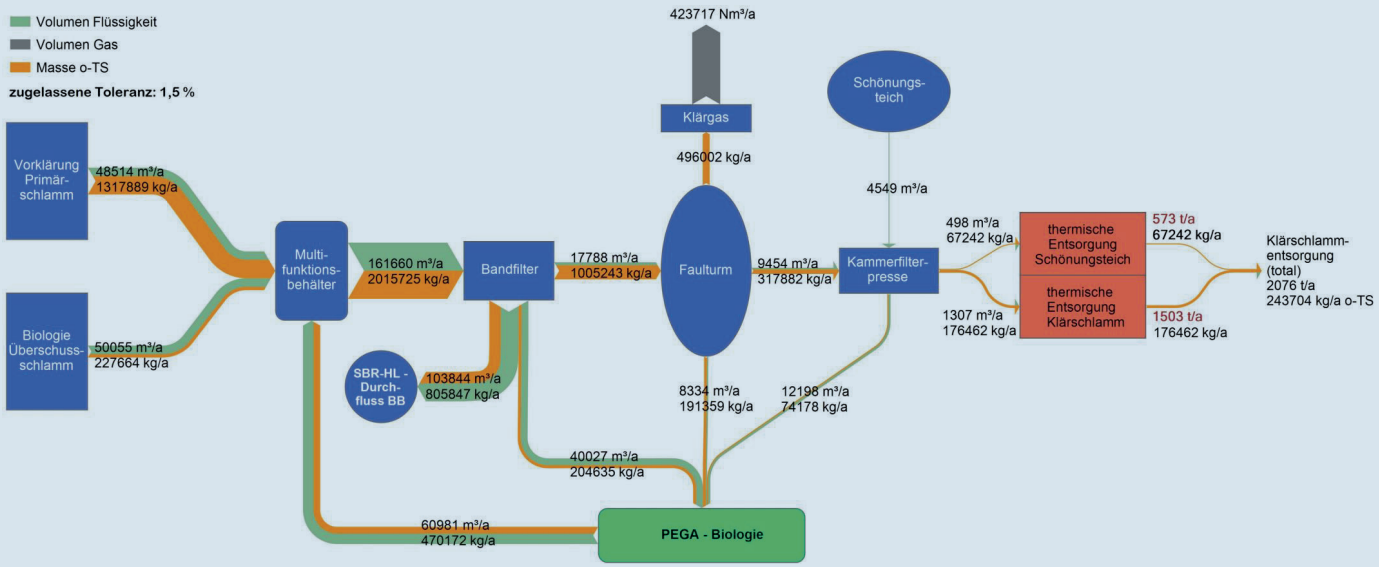

Bild 4: Volumen- und Massenstrom (o-TS bzw. GV) der Schlammbehandlung mit Gasbildung – Sonderbedingung: Zusätzliche Entschlammung eines Schönungsteiches der Kläranlage (insgesamt 4.549 m^3/a)

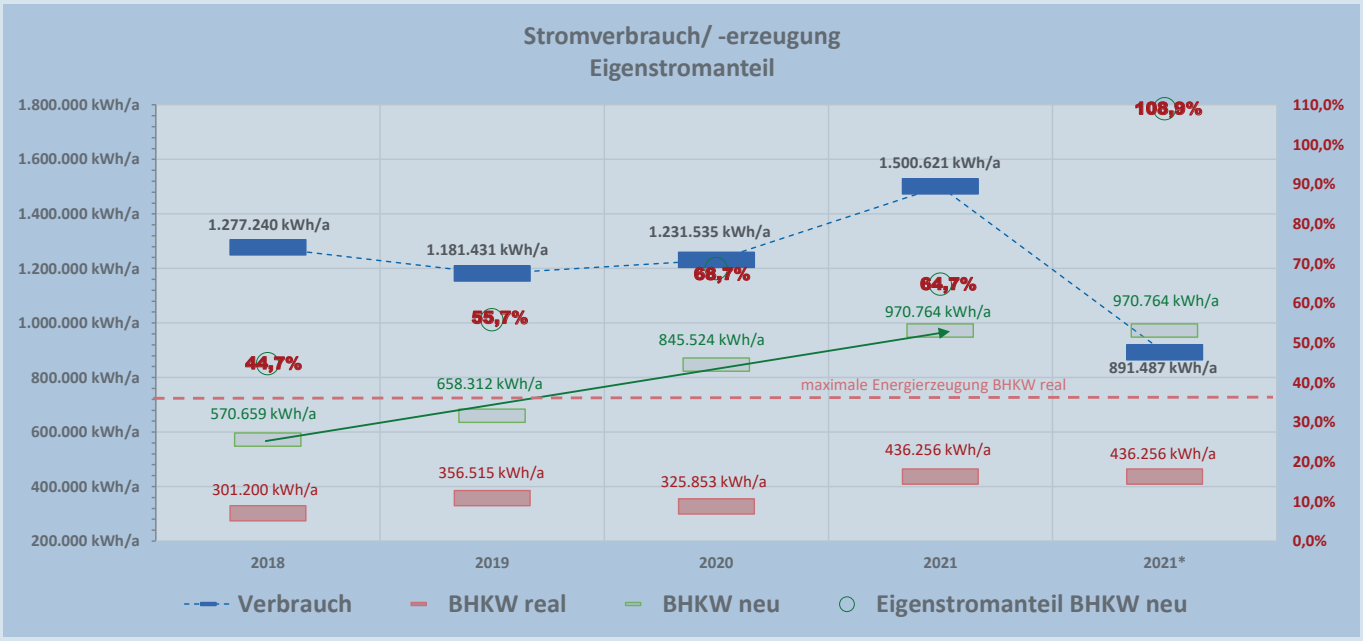

Bild 5: Stromverbrauch der Kläranlage und erzeugte Strommenge über das BHKW. Projiziert wird das aus dem Faulturm erzeugte Methangas und die daraus gewonnene elektrische Energie mit einem optimalen ausgelegten BHKW

- Ausrüstung der $PEGA_{BB}$ mit Reinsauerstoffbegasung und Adaption der Steuerung / Regelung gemäß $PEGA_{KA}$-Patent DE 10 2015 118 988 B4 – momentane Begasung mit Gebläse 46 kW: Einsparung von ca. 165.000 kWh/a.
- Umstellung der $PEGA_{BB}$ auf 60 % Beschickung (nur noch 40 % zur Kammerfilterpresse) – das wird seit Anfang Januar 2022 versucht. Durch mehr Klärgas wurde eine Erhöhung der Gas- und Stromproduktion erreicht: Einsparung von ca. 225.000 kWh/a.

In die Betrachtung nicht mit einbezogen ist die Rücknahme der SBR-HL als Durchflussanlage. Insbesondere die Hebung des gesamten zufließenden Abwassers auf das Niveau des Hochbehälters und die Teilbelüftung des Beckens mit 46 kW-Verdichter sind energieintensiv. Hieraus ergibt ein potentielles Einsparpotential von ca. 300.000 kWh/a.
Bild 5 zeigt auf, dass unter Berücksichtigung von Optimierungspotentialen in den biologischen Stufen mit 108,9 % eine Energieautarkie zu erreichen ist (rechte Spalte 2021*).

2.3 Kläranlagen der Größenordnung 10.000–35.000 EW mit Faulturm und $PEGA_{KA}$-Verfahren

Der DWA Kläranlagen Leistungsvergleich 2020 [7] weist einen energetischen Deckungsgrad von 36 % für Deutschland und für Österreich von 41 % (ÖWAV) durch selbst erzeugten Strom aus. Damit ist Deutschland noch sehr weit weg von einer annähernden Autarkie kommunaler Kläranlagen. „Danach gibt es in Deutschland 3.136 Kläranlagen mit einer Gesamtausbaugröße von 140 Mio. EW, die eigene Faultürme haben", zitiert nach Roos unter Berufung auf das statistische Bundesamt [8]. Eine Leistungssteigerung durch das $PEGA_{KA}$-Verfahren ist vorab angedeutet.
In der Vergangenheit sah man die Ausrüstung von Kläranlagen mit Faultürmen der Ausbaugrößen von ≤ 50.000 EW als nicht wirtschaftlich an (wobei die Grenze fallbezogen beweglich war). Mittlerweile hat sich bedingt durch die stürmische Entwicklung der Biogastechnologie eine Anbieterstruktur gebildet, die kompakte, in Fertigbauweise und schnell zu errichtende Faultürme herstellen und liefern kann. Oftmals sind da schon die Gasspeicher mit integriert. In Deutschland gibt es etwa 1.200 Kläranlagen der Größe 10.000–35.000 EW. Davon haben etwa 400 Anlagen schon Faultürme, die die Gasausbeute durch die $PEGA_{KA}$-Technologie erhöhen könnten. Da verbleiben dann noch 800 Kläranlagen, die Faultürme nachrüsten könnten bzw. sollten. Zusammen mit dem $PEGA_{KA}$-Verfahren besteht die Chance, die Gesamtanlage energieautark oder sogar energiepositiv zu betreiben. Momentan existieren einige Förderprogramme auf EU-, Landes- oder Bundesland-Ebene, die eine hohe Förderquote aufweisen. Eine Finanzierung der Investitionen erleichtert der sehr kurzzeitige Return of Investment (ROI) durch Einsparung von Strombezugskosten und Kosten der Klärschlammentsorgung.
In dem obigen Beispiel wurde das $PEGA_{KA}$-Verfahren unter Einbeziehung der vorhandenen mechanischen Schlammentwässerung beschrieben. Allerdings ist bei unseren zahlreichen Laborversuchen und bei der Untersuchung in einer halbtechnischen Anlage aufgefallen, dass der aus dem Schrägfilter anfallende Schlamm die Eigenschaft besitzt, Wasser zu drainieren / verdunsten. Diese Beobachtung wurde im Labormaßstab nachvollzogen. Kläranlagen in der Größenordnung 10.000–35.000 EW haben bei klassischem Betrieb ohne Faulung per se relativ geringe Klärschlammmengen, die zu entsorgen sind. Durch die Faulung an sich reduziert sich die Menge weiter. Das $PEGA_{KA}$-Verfahren setzt dem noch ein deutlichere Reduktion auf. Für den hohen Wasserverlust des $PEGA_{BB}$-Schlamms bedarf es einer adäquaten Fläche, die eine gute Verdunstung erlaubt und die Entwässerung des Schlamms unterstützt. Da der Schlamm innerhalb von 30 Tagen getrocknet ist, hält sich der Flächenbedarf für eine Drainage-/ Verdunstungsfläche in Grenzen.

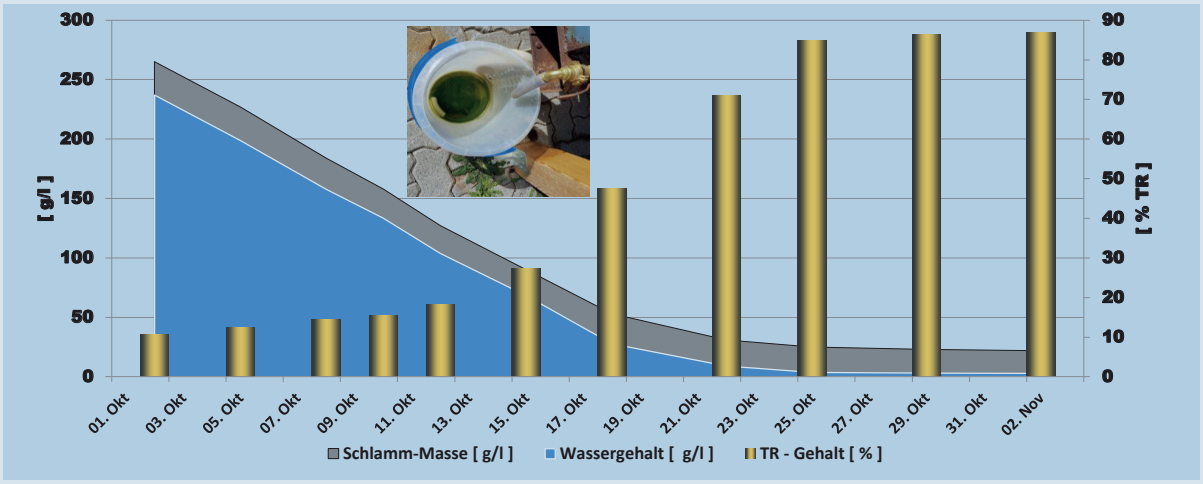

Bild 6: Der statisch entwässerte Schlamm aus der $PEGA_{BB}$ entwässert unter Umgebungsbedingungen von 10,6 % TR innerhalb von 31 Tagen auf einen TR-Gehalt von 86,9 % TR zu einer grobkörnigen Struktur. Während des 9-monatigen Versuches wurde der in der Anlage gesammelte Schlamm in einem Absetzcontainer gestapelt und entwässerte da unter sehr ungünstigen Bedingungen auf immerhin 24,5 % TR (keine Drainage, geringe Oberfläche) (Bild: Drainage aus Schlammcontainer Schrägfilter)

Im Folgenden sei eine Kläranlage als Beispiel genannt, die mit 30.000 EW ausgelegt wurde (1998) und momentan nur noch mit < 20.000 EW belastet ist. Trotzdem ist der Klärschlammanfall mit 1.300 t/a (nach einem Gespräch Ende 2021 mit dem technischen Leiter sind es wohl nun mehr als 1.600 t/a) immer noch sehr hoch. Den zum Betrieb notwendigen Strom kauft man zu aktuellen Preisen der Leipziger Energiebörse ein. Beginnend Mitte 2021 gab es eine bemerkenswerte Erhöhung der Strompreise, die bis heute noch nicht abgeschlossen ist. Eine Projektstudie zur Nachrüstung mit einem Faulturm / Peripherie und dem $PEGA_{KA}$-Verfahren soll technische und wirtschaftliche Lösungen aufzeigen.

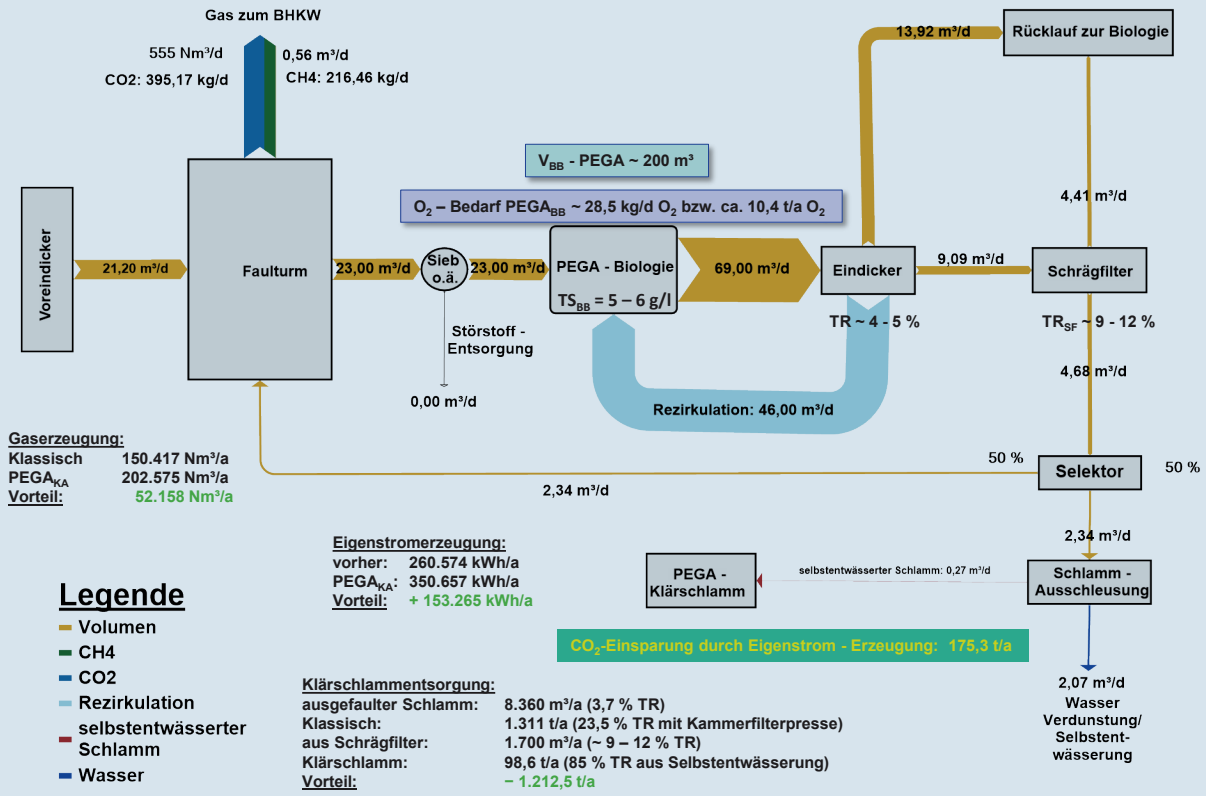

Bild 7: Schlammstrecke der nachgerüsteten Kläranlage mit Gasproduktion und Schlammbehandlung nach dem $PEGA_{KA}$-Verfahren. In dieser Variante nutzt man die Selbstentwässerung des $PEGA_{KA}$-Schlamms aus (daher keine mechanische Schlammentwässerung)

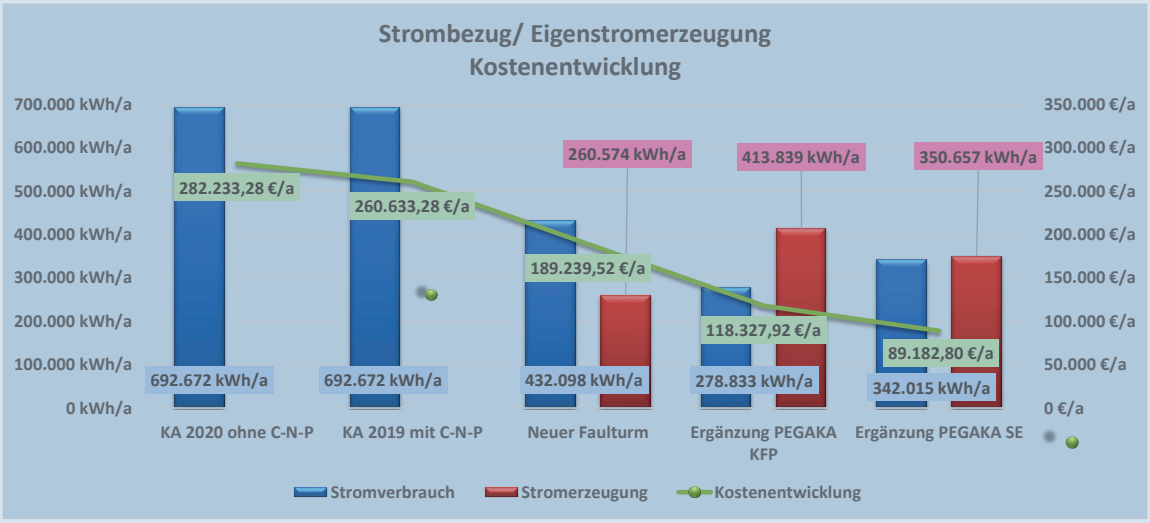

Bild 8: Finanzielle Konsequenzen aus der Umstellung auf aerob/ anaerobe Betriebsweise inklusive $PEGA_{KA}$-Varianten a) mit Nutzung / Einbeziehung der Schlammentwässerung und b) unter Ausnutzung der Selbstentwässerung des $PEGA_{KA}$-Schlamms. Je nach Wirkungsgrad der neu installierten Vorklärung kann die biologische Stufe um etwa 170.000 kWh/a weiter entlastet werden, so dass man dem Ziel Energieautarkie sehr nahe kommt.

Der zu bauende Faulturm soll ein Volumen von 280 m^3 haben. Die theoretische Verweilzeit beträgt 13–15 d. Den Bioreaktor haben wir mit ~ 200 m^3 Beckenvolumen ausgelegt; der theoretische Sauerstoffbedarf ist mit gut 10 t/a sehr niedrig. Die Rezirkulationsquote beträgt hier 2/1. Das sind Standardwerte, die sich nach unseren Erfahrungen im Betrieb weiter optimieren lassen. Die wichtigsten Vorteile gegenüber den jetzt bestehenden aeroben Betrieb der Kläranlage sind:

- Abgesehen davon, dass es vorher überhaupt kein Klärgas gab, gibt es durch die $PEGA_{KA}$-Technologie noch einmal gut 50.000 Nm^3/d mehr an Gas – das ist eine theoretische Steigerung von ca. 35 % (wie oben gezeigt, lässt sich das praktisch auf mindestens 55 % steigern).
- Die Eigenstromerzeugung deckt demnach 50 % des Strombedarfs der Kläranlage. Nicht mit einbezogen ist die Senkung des Strombedarfes der Hauptbiologie, weil die Primärschlammentnahme die Biologie besonders bei den sauerstoffzehrenden Summenparameter CSB / TOC und BSB_5 absenkt und damit den Luftbedarf durch Verdichter absenkt. Die Senkung der Rückbelastung insbesondere mit NH_4-N, die bekanntlich zu höheren Energieverbrauch von etwa 170.000 kWh/a führt, gehört ebenfalls dazu. Zudem muss man kein C-Management zur weitergehenden Stickstoffentfernung mit potentieller Dosierung von C-Quellen betreiben.
- Besonders gravierend wirkt sich die Anwendung des $PEGA_{KA}$-Verfahrens in dieser Variante auf den Klärschlammanfall aus. Aus den bisher bekannten Mengen (2020) von 1.311 t/a mit 23,5 % TR-Gehalt werden dann berechnete knapp 100 t/a mit 85 % TR.
- Die hier gewählte 50 % zu 50 % $PEGA_{KA}$-Variante ließe sich optimieren, so dass die Zahlen für den Gasanfall / Klärschlammentstehung noch günstiger werden.
- Die Umwelt wird bei der Umstellung mit den vorliegenden Zahlen um 175 t/a CO_2 entlastet. Nicht betrachtet bleiben dabei der Transport des Klärschlamms zur weiteren Verwertung (sei es in der Landwirtschaft oder zur thermischen Verwertung).

Abgesehen von den notwendigen Investitionen zur Errichtung einer Faulung und einer $PEGA_{KA}$-Anlage senkt die Umstellung von aeroben auf dann aerob/ anaeroben Betrieb der Kläranlage die Betriebskosten beträchtlich (über Senkung der Investkosten durch Förderung oder Verrechnung mit der Abwasserabgabe siehe weiter oben). Bislang entsorgt die Anlage den Klärschlamm noch in die Landwirtschaft zur bodenbezogenen Nutzung. Aber

Bild 9: Beispiel kleiner Faultürme: KomBio-Reaktor (Faulbehälter und Gasspeicher in einem) mit 200 m^3 Faulvolumen – Lipp GmbH[9] (links), Arequa GmbH [10] (Mitte), Weltec Biopower GmbH [11] (rechts)

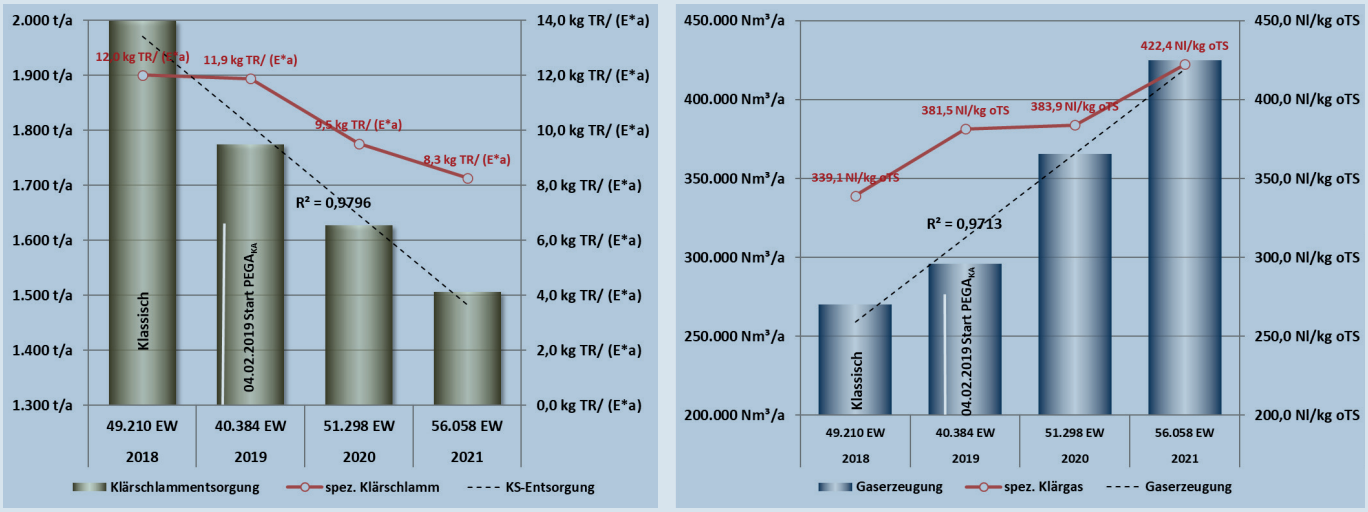

Bild 10: Entwicklung des Klärschlammaufkommens und der Gaserzeugung innerhalb des dreijährigen Versuches zum $PEGA_{KA}$-Verfahren (modifiziert)

spätestens 2032 muss wegen der Verpflichtung zur P-Rückgewinnung der Klärschlamm meist verbrannt werden.

Die Einführung eines Faulturms in das Portfolio der Kläranlage bringt gegenüber dem Betrieb aus dem Jahr eine Reduktion der Betriebskosten um ca. 90.000,- €/a (-33 %). Die $PEGA_{KA}$-Variante unter Einbeziehung der vorhandenen Schlammentwässerung (hier Kammerfilterpresse) senkt die Betriebskosten um ca. 165.000,- €/a (-58 %). In der Variante Abschaffung Schlammentwässerung und Ausnutzung der Selbstentwässerung (SE) sind dann sogar Einsparungen von 193.050,48 €/a (-68 %) möglich. Unberücksichtigt bleiben da die Kosten für den Betrieb der Kammerfilterpresse in Form von Energie (Strom) und Chemikalien zur Schlammentwässerung (Mannkosten).

Aus den Erfahrungen des dreijährigen Betriebs auf der Kläranlage Schwarzbachtal sollte es möglich sein, die mit einem Faulturm und der $PEGA_{KA}$-Technologie zu einem energieautarken oder sogar energiepositiven Betrieb zu optimieren.

Übersicht und Ausblick

Folgende Punkte sprechen für das $PEGA_{KA}$-Verfahren:

- Es wandelt mehr organische Inhaltsstoffe in Klärgas um. Unter dem damit zusätzlichen verbundenen Wasserverlust reduziert sich der Klärschlammanfall deutlich.
- Durch die vollständige Behandlung der Trübwässer aus der mechanischen Schlammentwässerung lassen sich deren Inhaltsstoffe stark reduzieren, insbesondere der NH_4-N um etwa 90 % (TÜV-Gutachten [12]). Das senkt den Energiebedarf der Hauptstrombiologie und spart möglicherweise die notwendige Zugabe von C-Quellen.
- Aus dem erhöhtem Klärgasaufkommen lässt sich mit BHKW / Mikrogasturbinen etc. grüner Strom erzeugen. Das stärkt die Eigenstromquote der Kläranlage. Es besteht die Chance, einen energieautarke bzw. sogar energiepositiven Kläranlagenbetrieb sicherzustellen.
- Die damit verbundenen CO_2-Einsparungen helfen, das auf der COP26 Klimakonferenz in Glasgow 2021 bekräftigte Bekenntnis zur Begrenzung auf < 1,5 °C Erderwärmung zu erreichen.
- Elektropositive Kläranlagen können den Strom für neue Verfahren nutzen, wenn er nicht in das Netz eingespeist wird. So lässt sich der Strom in E-Fahrzeugen der eigenen Fahrzeugflotte nutzen. Ferner kann der Strom zur Erzeugung von grünem Wasserstoff verwendet werden (mit Speicherung und Rückverstromung über Brennstoffzellen). Oder man denkt über die Umsetzung von CO_2 aus dem Faulturm mit grünem Wasserstoff zu Methan nach. Eine Nutzung der erzeugten Wärme aus dem BHKW z. B. im Fernwärmenetz führt zu einer sinnvollen Sektorenkopplung. Die Wege sind individuell zu prüfen und fallbezogen anzuwenden.
- Volkswirtschaftlich betrachtet könnte Deutschland innerhalb von ein bis zwei Jahren durch Nachrüstung aller bestehenden Kläranlagen mit Faulturm durch Ergänzung der beschriebenen Technik eine Reduktion von ≥ 300.000 t/a CO_2 und mehr schaffen ([13, 14]) – die 2021 erzeugte Menge an Strom von etwa 1,5 Mio. MWh ließen sich um weitere ca. 0,75 Mio. MWh aufstocken und so die Netzversorgung entlasten.
- Etwa 800 Kläranlagen in dem Segment 10.000–35.000 EW haben noch keine anaerobe Stufe – da ist noch ein hohes Potential zu erschließen, um den Stromverbrauch und den CO_2-Ausstoß zu senken.
- Für eine potentiell nachzurüstende Kläranlage mit einer Belastung von ca. 20.000 EW (real) ergeben sich exemplarisch in der Kombination Nachrüstung Faulturm / Ergänzung mit $PEGA_{KA}$-Verfahren eine erzeugte Klärgasmenge von 200.000–250.000 Nm^3/a, eine Stromproduktion von 430.000–540.000 kWh/a sowie CO_2-Einsparungen durch Eigenstromproduktion in Höhe von 172–217 t/a – und das beispielhaft für 800 Kläranlagen.

Literatur

[1] Kaleß, M. Kohlenstoffausschleusung zur Verbesserung der Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen. Aachen: Hrsg. Prof. Dr. Ing. J. Pinnekamp GFA, 2018 ISBN 978-3-938996-54-6

[2] 28. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen Stromverbrauch und Stromerzeugung Hrsg. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abwasser e.V. 2018

[3] Albert, A.: Verfahren zum Betreiben einer Biogasanlage. DE 10 2015 118

988 B4 Deutsches Patent- und Markenamt, 24. 05 2018

[4] Albert, A.: Verfahren zum Betreiben einer Bioreaktoranlage. DE 10 2017 109 733 B4 Deutsches Patent- und Markenamt, 25. 4 2019

[5] Beier, M. et al.: (DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.3) Biologische Stickstoffelimination von Schlammwässern der anaeroben Schlammstabilisierung Merkblatt DWA-M 349 Mai 2019

[6] Aschmann, V., Effenberger, M.,:Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer, 2012, Hrsg. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), S. 47–48

[7] 33. Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen – Entwicklung des Stromverbrauchs, Hrsg. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abwasser e.V. 2020

[8] Kapazitätsreserven bei der CO-Vergärung, Klärwerks-Info [online unter: www.klaerwerk.info, Zugriff am: 26. Februar 2022]

[9] Quelle (Überlassung Bildmaterial): Lipp GmbH / Tennhausen Lipp GmbH – Behälterbau – Fermenter – Trinkwasser – Pufferspeicher (lipp-system.de)

[10] Quelle: (Überlassung Bildmaterial): Arequa GmbH / Harztor OT Neustadt Arequa

[11] Quelle (Überlassung Bildmaterial): Weltec Biopower GmbH/ Vechta

[12] Busch, C.: Bewertung der Leistungsdaten einer Containeranlage zur Behandlung von ausgefaultem Klärschlamm im Hinblick auf die Rückbelastung der Kläranlage, die Faulgasausbeute und die zur Entsorgung anfallende Menge an Klärschlamm ($PEGA_{KA}$-Verfahren). Stuttgart, TÜV, 2019

[13] Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas: Deutschland [online unter www.destatis.de, Zugriff am 27. Februar 2022] Verfügbar unter: Statistisches Bundesamt Deutschland – Genesis-Online: Ergebnis 43381-0001

[14] Entwicklung des CO_2-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2020 [online unter: www.statista.de, Zugriff am 27. Februar 2022]

Autoren:

Dr. Thomas Paust
PRO-Entec east GmbH bio engineering
Bergstr. 17
16928 Gerdshagen
Tel.: +49 33986-502290
E-Mail: info@pro-enteceast.de
www.pro-enteceast.de

Alfred Albert
PRO-Entec Gesellschaft für Umweltschutz mbH
Hauptstr. 154
63829 Krombach
Tel.: +49 6024-63920
E-Mail: alfredalbert@pro-entec.de
www.pro-entec.de