

**Abschlussbericht
(Kurzfassung)**

**zum Forschungsvorhaben
Energie und Klimaschutz**

Projekt Nr. 2: Verbesserung der Klärgasnutzung, Steigerung der Energieausbeute auf kommunalen Kläranlagen

AZ IV-7-042 600 003B

Vergabenummer 08/058.3

Projektbezeichnung:

„Optimierung des Energieertrages kommunaler Kläranlagen durch prozess- und standortbezogene Verbundstrategie“

gerichtet an das

**Ministerium für Klimaschutz, Umwelt,
Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz
des Landes Nordrhein-Westfalen**



Worpswede, den 24.4.2014

Bevollmächtigter Vertreter
der Bietergemeinschaft:

Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer

Wuppertal, den 24.4.2014

Technischer Projektleiter:

Dr.-Ing. G. Kolisch

Projektpartner

Projektleitung		Bearbeiter
 john becker ingenieure  WiWmbh	<u>Administrativ:</u> john becker ingenieure <u>Technisch:</u> Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbh	Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer Dr.-Ing. G. Kolisch
 DER AGGERVERBAND	Aggerverband (AV Aggerwasser GmbH) Sonnenstraße 40 51645 Gummersbach Tel.: 02261-36-318 Email: men@aggerverband.de	Ulrich Menninger - Staatl. gepr. Techniker
 iswa	Universität Stuttgart Bandtäle 2 70569 Stuttgart Tel.: 0711-685-63740 Email: heidrun.steinmetz@iswa.uni- stuttgart.de	Prof. Dr.-Ing. H. Steinmetz Dr.-Ing. C. Locher
 john becker ingenieure	john becker ingenieure Am Hörenberg 1 27726 Worpswede Tel.: 04792-9310-55 Email: j.helmich@wirberaten.de	Dipl.-Ing. M. Mergelmeyer Dipl.-Wi.-Ing. J. Helmich Dipl.-Ing. J. Brüggemann
 WiWmbh	Wupperverbandsgesellschaft für integrale Wasserwirtschaft mbh Untere Lichtenplatzer Straße 100 42289 Wuppertal Tel.: 0202-583-287 Email: ytn@wupperverband.de	Dr.-Ing. G. Kolisch Dipl.-Ing. Y. Taudien Dipl.-Ing. T. Osthoff

Inhaltsverzeichnis

Projektpartner	I
Inhaltsverzeichnis	II
Verzeichnis der Abkürzungen	III
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung.....	1
1.2 Energiesituation auf Kläranlagen	2
1.3 Stand der Energieerzeugung auf Kläranlagen in NRW	3
2 Technische Ansätze	6
2.1 Optimierung der Faulgaserzeugung.....	6
2.1.1 Ansatzpunkte zur Optimierung.....	6
2.1.2 Beschreibung der Maßnahmen.....	7
2.1.3 Ergebnisse und Empfehlungen	9
2.2 Verbesserung der Faulgasnutzung.....	10
2.2.1 Vorhandene Gasnutzungstechnologien	10
2.2.2 Wärmeerzeugung oder KWK-Nutzung.....	12
2.2.3 BHKW-Repowering.....	13
2.3 Standortbezogene Verbundkonzepte.....	16
2.3.1 Regenerativverbund.....	16
2.3.2 Schlammverbund.....	17
2.3.3 Wärmeverbund	17
2.3.4 Fazit zu Verbundlösungen	18
3 Bewertung und Potential	19
3.1 Stationäres Bilanzmodell für Betreiber	19
3.1.1 Zielsetzung des Bilanzmodells.....	19
3.1.2 Beschreibung des Programms.....	19
3.2 Potentialabschätzung NRW	21
3.2.1 Ist-Zustand NRW	21
3.2.2 Betrachtete Szenarien	22
4 Zusammenfassung	24
Literaturverzeichnis	26

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung	Einheit
ATV	Abwassertechnische Vereinigung (jetzt DWA)	-
$B_{d,x}$	Tägliche Fracht des Parameters x	[kg/d]
BHKW	Blockheizkraftwerk	-
BSB ₅	Biochemischer Sauerstoffbedarf in 5 Tagen	[mg/l]
C	Kohlenstoff	-
c_x	Konzentration des Parameters x	[mg/l],[kg/m ³],[g/l]
CH ₄	Methan	-
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	-
CSB	Sauerstoffbedarf für eine vollständige chemische Oxidation	[mg/l]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall	-
E_{Abwasser}	Energiepotential Im Abwasser. (hier: chemisch gespeichert)	[kWh _{EP} /(E* <i>a</i>)]
EW_x	Einwohnerwert; EW = EZ+EGW; bezogen auf den Parameter x	[E]
FB	Faulbehälter	-
FG	Faulgas	-
GV	Glühverlust	[%]
GK	Größenklasse	-
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung	-
I_N	Normliter	[l]
\dot{m}_{oTR}	Massenstrom an organischen Substrat (siehe oTR)	[kg oTR/d]
MGT	Mikrogasturbine	-
MKULNV	Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen	-
NRW	Nordrhein-Westfalen	-
ORC	Organic Rankine Cycle	-
oTR	Organischer Trockenrückstand	[g/l]
PE	Primärenergie	-
PW	Prozesswasser	-
PS	Primärschlamm	-
Q_x	Volumenstrom bezogen auf den Parameter x	[m ³ /h]; [l/s]
RS	Rohschlamm (Mischschlamm)	-
t_R t_{FB}	Aufenthaltszeit Faulbehälter / Reaktor (Faulzeit)	[d]
t_{TS}	Schlammalter der Biologie	[d]
t_{VK}	Vorklärzeit	[d]
TR	Trockenrückstand (prozentualer Anteil vom Schlamm)	[%]
TS	Trockensubstanz (Konzentration des Trockenrückstandes)	[g/l]
ÜS	Überschussschlamm	-
VK	Vorklärung	-
\dot{V}_G	Gas-Volumenstrom	[l _N /d]
y_{EP}	Spezifische Energieausbeute	[kWh/(E* <i>a</i>)]
y_G	Spezifische Gasausbeute	l _N /kg oTR _{zu}

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung

Kläranlagen haben aus energetischer Sicht innerhalb einer Kommune einen besonderen Stellenwert. Einerseits sind sie der größte Einzelverbraucher an Energie, andererseits aber auch ein Energieerzeuger, da bei Anlagen mit separater anaerober Schlammstabilisierung Klär- bzw. Faulgas als Nebenprodukt anfällt. Dieses kann für die Eigenproduktion von Strom und Wärme in Anlagen der Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden.

Die weitestgehende Deckung des Energiebedarfs der Abwasserreinigung und Schlammbehandlung durch die Eigenproduktion stellt neben der Reduktion des einwohnerspezifischen Energieverbrauchs die zweite wesentliche Säule zur Steigerung der Energieeffizienz kommunaler Kläranlagen dar. Sie ist aus Gründen der Nachhaltigkeit mit einer Reduktion des standortbezogenen CO₂-Ausstoßes wie auch aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufgrund der weiter steigenden Kosten für fremdbezogene Energie von großer Bedeutung.

Die Untersuchungen des vorliegenden Berichtes zur Steigerung der Energieeigenproduktion auf kommunalen Kläranlagen untergliedern sich in die Steigerung der Energieausbeute und die Verbesserung der Klärgasnutzung. Die maßgeblichen Projektziele stellen sich hierbei wie folgt dar:

- Aufbauend auf einer Datenerhebung bei Betreibern von Kläranlagen mit anaerober Schlammstabilisierung wird der aktuelle Stand der Energieausbeute beschrieben
- Die heute verfügbaren Technologien, die einen möglichst hohen Anteil der Schmutzfracht über eine anaerobe Behandlung in nutzbare Primärenergie überführen, werden beschrieben und der Nutzen zusammengefasst.
- Die Nutzungsmöglichkeiten des Klärgases werden erläutert und in einer Variantenuntersuchung die effektivste Nutzung der verfügbaren Energieträger ermittelt.
- Es wird ein Modellansatz entwickelt, der es Betreibern ermöglicht, für die spezifische Kläranlage die maximal mögliche Energieausbeute abzuschätzen und diese in einer Energiebilanz der real vorhandenen Ausbeute gegenüber zu stellen.
- Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen wird das energetische Optimierungspotential für das Bundesland Nordrhein-Westfalen abgeschätzt.

1.2 Energiesituation auf Kläranlagen

Für die Energienutzung auf kommunalen Kläranlagen ist hauptsächlich die in den gelösten und partikulären organischen Abwasserinhaltsstoffen gespeicherte chemische Energie von Bedeutung. Nur diese Form der Energie wird in diesem Projekt weiter betrachtet. Die Energieausbeute y_E ($\text{yield}_{\text{Energy}}$) gibt an, in welchem Maße die im Abwasser gespeicherte chemische Energie in nutzbare Energie umgewandelt wird.

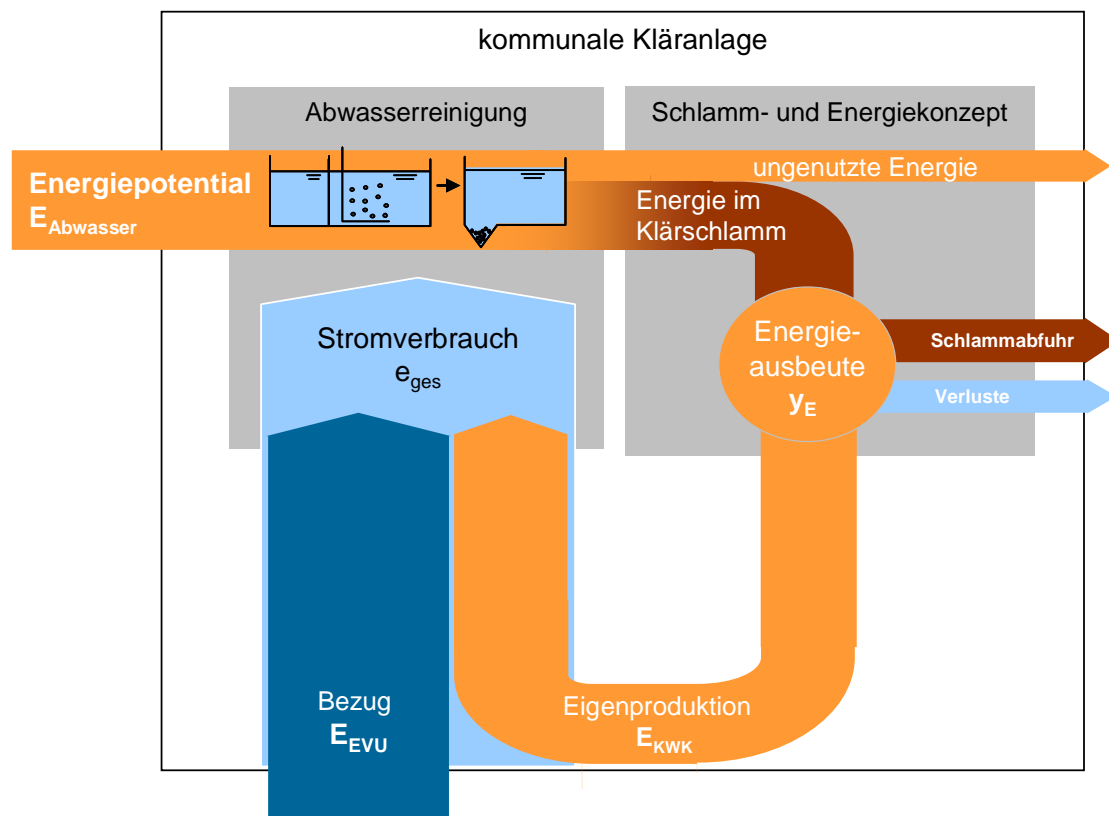


Bild 1.1: Schema zum elektrischen Energiehaushalt der Abwasserreinigung

Ein Maß für das Energiepotential der im Abwasser befindlichen organischen Bestandteile ist der Sauerstoffbedarf für deren vollständige chemische Oxidation (CSB). Auf Basis des CSB berechnet sich ein Energiegehalt von **3,5 kWh/kg CSB**. In der täglichen Schmutzfracht von ca. 120 g CSB/(EW*d) steckt somit in Summe ein Energiegehalt von etwa 0,42 kWh/(EW*d). Das jährliche (Primär-) Energiepotential lässt sich damit zu $y_{\text{EP,max}} = 153 \text{ kWh}_{\text{EP}}/(\text{EW} \cdot \text{a})$ definieren.

Dieses Potenzial ist allerdings naturgemäß weitaus größer als die unter Realbedingungen auf einer Kläranlage erreichbare Energieausbeute. Bezogen auf einen spezifischen Gesamtstromverbrauch kommunaler Kläranlagen von ca. 30 bis 40 kWh/(E*a) ermöglicht diese jedoch eine Stromeigendeckung von etwa 50% sowie eine volle Eigendeckung des Wärmebedarfs der Kläranlage.

1.3 Stand der Energieerzeugung auf Kläranlagen in NRW

Ausgangssituation

In Nordrhein-Westfalen werden 634 kommunale Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von insgesamt 35,0 Mio. EW betrieben (LANUV-NRW, 2013). In Bild 1.2 ist die Verteilung der Anlagen jeweils nach Verfahrensart der Schlammstabilisierung dargestellt. Es zeigt sich dass etwa die Hälfte der Anlagen in NRW über eine Faulstufe verfügen. Da es sich hierbei überwiegend um Anlagen der Größenklassen 4 und 5 handelt, entsprechen diese Anlagen zusammen 31,6 Mio. EW und damit 90 % der gesamten Reinigungskapazität in NRW.

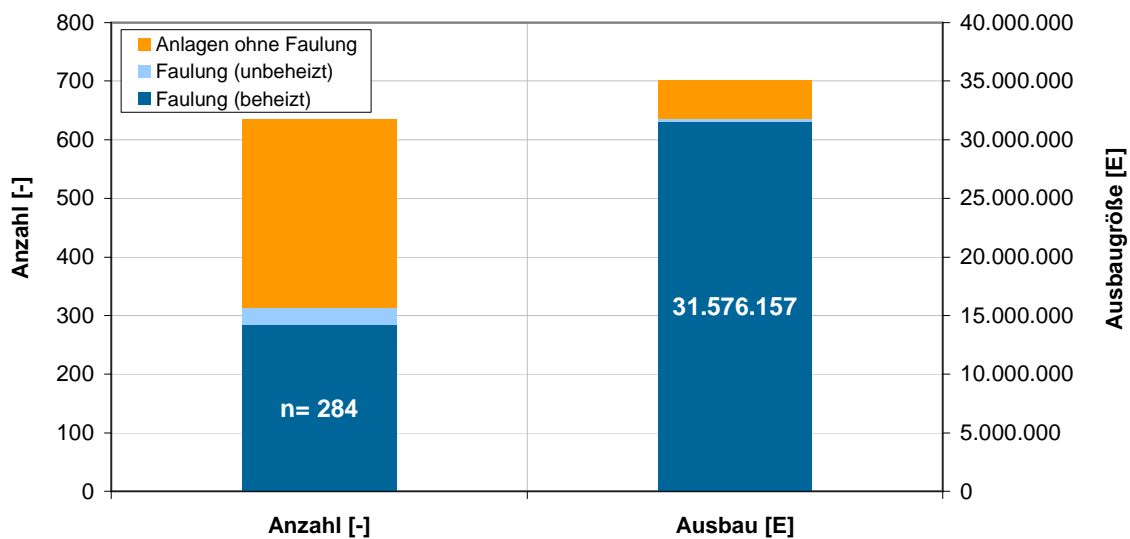


Bild 1.2: Verteilung der Kläranlagen in NRW nach Ausbaugröße (DWA, 2009)

Datengrundlage

Zur Untersuchung der Energieausbeute auf Kläranlagen mit Schlammfaulung, wurde in Abstimmung mit dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz in Nordrhein-Westfalen (MKULNV-NRW) eine Datenabfrage mittels Fragebogen durchgeführt.

Ergänzend wurden abgeschlossene Energieanalysen aus den Jahren 2007 bis 2011 berücksichtigt, die durch das Land NRW über das *Investitionsprogramm Abwasser* (IPA) gefördert wurden. Die Ergebnisse dieser Studien wurden umfassend hinsichtlich zusätzlicher Informationen für das TP 2 ausgewertet. Anhand der Energieanalysen kann nicht nur der energetische Zustand abgeleitet werden, sondern auch vorhandene Optimierungspotentiale aufgezeigt werden.

Als Datengrundlage zur Auswertung der IST-Situation können in Summe 176 verwertbare Datensätze als Rücklauf der Betreiberabfrage und 92 Energieanalysen verwendet werden.

Ergebnisse der Betreiberabfrage

Insgesamt decken die ausgewerteten Kläranlagen mit einer summierten Ausbaugröße von 18,30 Mio. EW etwa 52 % der gesamten Reinigungskapazität aller Kläranlagen in NRW ab. Für eine ausführliche Darstellung aller Ergebnisse, getrennt nach Schlamm- und Gasanfall, Faulgasnutzung sowie energetischen Kennwerten, wird auf die Langfassung dieses Berichtes verwiesen. Einen Überblick über die Ergebnisse liefert die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 1.1: Kennzahlen der Datenabfrage im Überblick (Median nach Anschlussgröße)

	Einheit	Kat. I	Kat. II	Kat. III	Kat. IV
		< 20.000	20.000 - 50.000	50.000 - 100.000	>100.000
Anlagendaten					
Ausbaugröße (EW_{Ausbau})	EW	18.000	48.000	97.800	250.000
Anschlussgröße (EW_{CSB})	EW	14.242	30.415	67.024	173.580
Abwassermenge	m ³ /a	4.227	8.940	17.183	47.835
Volumen Vorklärung	m ³	387	674	1.492	3.450
Vorklärdauer t_{VK}	h	1,2	1,2	1,2	1,8
Schlammfall					
Schlammalter (tTS)	d	19,8	20,0	20,0	17,8
Rohschlammmenge	m ³ /a	10.430	22.047	43.800	133.779
Rohschlammfracht	t TR/a	385	864	1.784	5.711
spez. Rohschlammfall	g TR/(EW*d)	83,6	77,8	65,4	78,7
Faulgasanfall					
Faulvolumen	m ³	900	2.000	3.800	8.250
Raumbelastung Faulstufe	kg oTR/(m ³ *d)	0,7	0,8	0,9	1,1
mittlere Faulzeit	d	41,0	34,6	29,0	27,0
Faulgasproduktion	Nm ³ /a	130.162	298.828	552.183	2.334.616
spez. Faulgasproduktion	l _N /(EW*d)	24,0	23,9	22,0	24,9
Faulgasnutzung					
Anteil Faulgas verstromt	%	62%	74%	76%	79%
elektr. Nennwirkungsgrad	%	31,3	31,5	34,0	35,7
elektr. Wirkungsgrad (ber.)	%	27,8	27,0	30,2	29,8
Energieverbrauchsdaten					
Stromverbrauch gesamt	kWh/a	593.332	1.339.570	2.361.610	5.809.400
spez. Stromverbrauch	kWh/(EW*a)	47,3	43,7	35,1	35,4
Stromproduktion aus FG ¹	kWh/a	238.728	541.976	919.344	3.024.095
Eigenversorgungsgrad-Strom ¹	%	39,9	39,7	43,6	61,0

¹ bezogen auf Anlagen mit Verstromung

Ergebnisse der Energieanalysen

In den 92 ausgewerteten Energieanalysen wurden in Summe 751 Optimierungsmaßnahmen vorgeschlagen. Anzahl, Einsparpotential und Kategorisierung dieser Maßnahmen sind in Bild 1.3 getrennt nach Verfahrensgruppen dargestellt

Nach der biologischen Stufe weist die Schlammbehandlung das nächstgrößte Potential auf. Die Maßnahmen betreffen dabei vorwiegend die Umwälzung des Faulraums, die Schlammvoreindickung, die Entwässerung, das Schlammalter der Biologie und die Faulraumtemperatur. Im Fokus steht dabei die Verringerung des Energieeinsatzes. Eine erhöhte Gasproduktion durch Verbesserung der Faulgasausbeute wird bei Umsetzung der Maßnahmen dagegen kaum erzielt. So beträgt der Median der Faulgasproduktion der untersuchten Anlagen im IST-Zustand $460 \text{ l}_N/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ und nach Umsetzung aller Maßnahmen mit $468 \text{ l}_N/\text{kg oTR}_{\text{zu}}$ nur geringfügig mehr. Dieser Bereich wird im Rahmen der vorliegenden Studie dagegen näher beleuchtet.

Auf die Faulgasnutzung entfallen zwar nur 8 % der Maßnahmen, allerdings weisen diese ein erhebliches Energiepotential auf. Die Maßnahmen unterteilen sich dabei in die Bereiche Repowering, Nachrüstung und Betriebsoptimierungen. Infolge der notwendigen Investitionen für die KWK-Anlagen handelt es sich dabei maßgeblich um abhängige Maßnahmen. Im Ergebnis wird nach Umsetzung die mittlere Gasnutzung der untersuchten Kläranlagen auf 100% gesteigert und zeitgleich der Umwandlungsgrad in Elektrizität von 22 % auf 31 % angehoben.

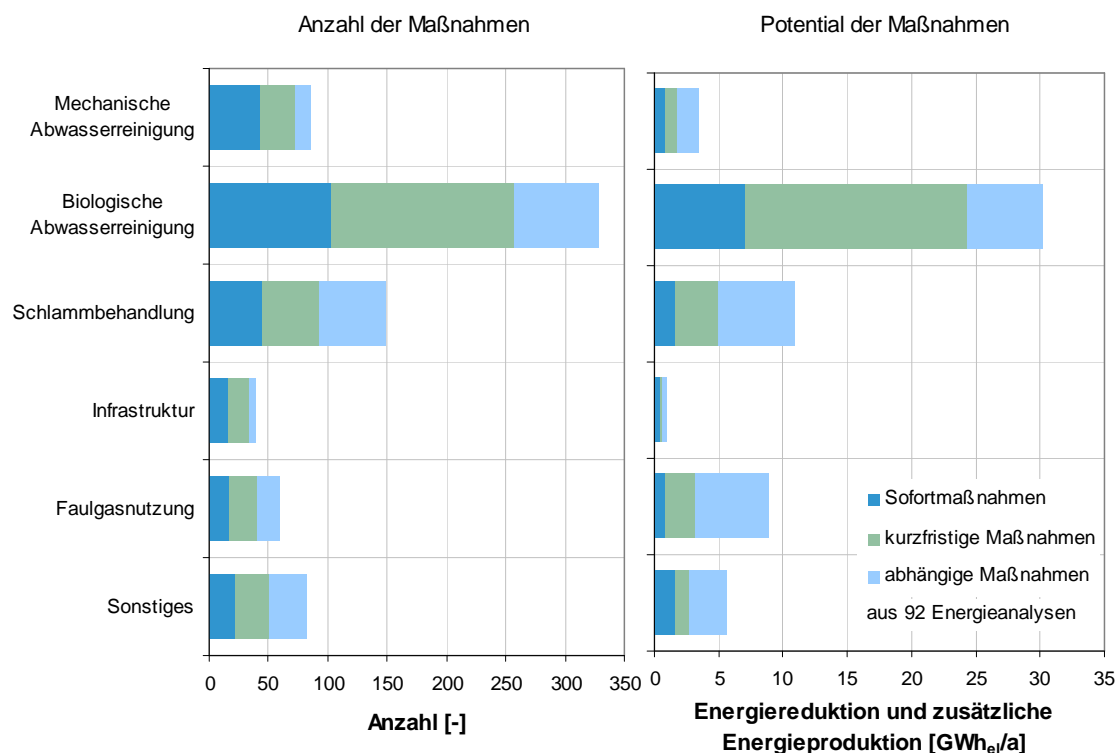


Bild 1.3: Anzahl und Potential der Maßnahmen getrennt nach Verbrauchergruppen

2 Technische Ansätze

2.1 Optimierung der Faulgaserzeugung

Die Faulgaserzeugung hängt von einer Reihe von Faktoren ab. Neben der Betriebsweise des Faulbehälters hat insbesondere das zugeführte Substrat, also der anfallende Klärschlamm, einen Einfluss auf den Gasertrag. Zusammengefasst berechnet sich die erreichbare Faulgaserzeugung (\dot{V}_G) aus dem zugeführten Massenstrom an organischem Substrat ($\dot{m}_{oTR,zu}$) und der spezifischen Gasausbeute (y_G):

$$\dot{V}_G = \dot{m}_{oTR,zu} \cdot y_G$$

mit: \dot{V}_G = Faulgaserzeugung [l_N/d]
 $\dot{m}_{oTR,zu}$ = organische Fracht im Zulauf zur Faulung [kg oTR_{zu}/d]
 y_G = Faulgasausbeute bezogen auf zugeführte Organik [l_N/kg oTR_{zu}]

2.1.1 Ansatzpunkte zur Optimierung

Die organische Fracht und die Faulgasausbeute lassen sich jeweils auf unterschiedliche Art beeinflussen. Die Ansatzpunkte ergeben sich prinzipiell bereits durch die Verfahrensart der Abwasserreinigung, die einen wesentlichen Einfluss auf den Schlammanfall hat. Die Ausbeute an Faulgas hängt dagegen maßgeblich von den Prozessen der Schlammbehandlung ab. Zusammenfassend ergeben sich die in Bild 2.1 dargestellten Teilpunkte.

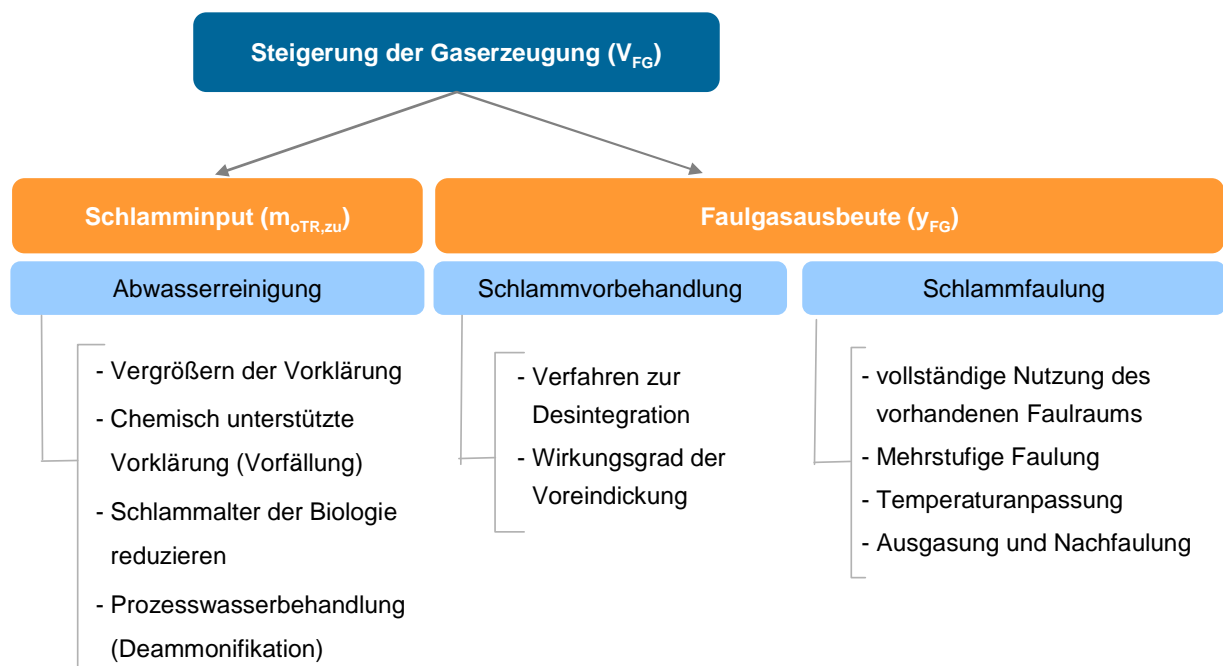


Bild 2.1: Ansatzpunkte zur Steigerung des Faulgasertrags

2.1.2 Beschreibung der Maßnahmen

Die Maßnahmen zur Optimierung der Gasproduktion werden nachfolgend zusammenfassend dargestellt, ergänzende Erläuterungen sind der Langfassung zu entnehmen.

Integrierung einer Schlammfäulung

Die Art der Schlammstabilisierung hat einen erheblichen Einfluss auf den Energiehaushalt einer kommunalen Kläranlage. Im Gegensatz zu einer aeroben Stabilisierung kann die gespeicherte Energie bei einer Schlammfäulung anaerob aufgeschlossen und in nutzbares Faulgas bzw. Methan überführt werden. Die Grenze für einen wirtschaftlichen Einsatz der Schlammfäulung wird heute bereits bei etwa 20.000 EW gesehen (Gretzschel et al., 2011).

Vergrößern der Vorklärung

Die Auswirkungen unterschiedlicher Vorklärzeiten auf den Gasertrag ergeben sich aus der zeitabhängigen Abscheideleistung. Anhand empirisch ermittelter Werte, die im Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 131 (2000) und dem Merkblatt ATV-DVWK-M 368 (2003) genannt werden, berechnen sich die Primärschlammfrachten. Über das Verhältnis von CSB zu oTR kann der Energiegehalt ermittelt werden. Die Faulgasproduktion steigt bei einer Verdopplung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung um etwa 5 %.

Chemisch unterstützte Vorklärung (Vorfällung)

Durch die Zugabe von Fäll- und Flockungsmitteln in die Vorklärung (Vorfällung) wird neben der Phosphorelimination auch die Abscheideleistung in Bezug auf partikuläre organische Abwasserinhaltsstoffe verbessert und der Primärschlammfall erhöht. In der Literatur wird eine erreichbare Eliminationsrate von bis zu 83% angegeben (Kristensen et al., 1992). Damit kann der Gasertrag um bis zu 12 % gesteigert werden.

Reduzierung des Schlammalters

Aus energetischen Gründen sollte das Schlammalter soweit zulässig reduziert werden. Die Absenkung führt zu einem Anstieg des oTR-Gehaltes und damit zu einem potentiell energiereicheren Schlamm. Durch die Absenkung des Schlammalters im Belebungsbecken von 15 auf 10 Tage erhöht sich die Faulgasproduktion um etwa 3,5 %.

Prozesswasserbehandlung / Deammonifikation

Bei Kläranlagen mit ausreichendem C/N-Verhältnis im Zulauf ermöglicht eine Reduzierung der Rückbelastung aus dem Prozesswasser eine Vergrößerung der heute vielfach nur noch als Grobentschlammung betriebenen Vorklärung. Rechnerisch kann die zulässige Vorklärdauer damit von 0,5 auf 1,0 h bzw. von 1,0 auf 2,0 h angehoben werden, womit die Faulgasproduktion um ca. 4,5 - 4,8 % ansteigt.

Verbesserter Wirkungsgrad der Voreindickung

Ein hoher Wirkungsgrad der statischen oder maschinellen Voreindickung des Klärschlammes verringert das Schlammvolumen. Bei gleich bleibendem Faulraumvolumen verlängert sich dadurch die Verweildauer der aufzuschließenden Feststoffe wodurch der Gasertrag je nach Ausgangssituation um 3-7% gesteigert werden kann.

Verfahren zur Desintegration

Durch die Vorschaltung einer Desintegration lässt sich die Hydrolyse beschleunigen, indem die enzymatische Zerstörung durch extern eingebrachte Energie unterstützt wird. Durch die Desintegration wird sowohl die zu entsorgende Klärschlammmenge reduziert als auch die Faulgasproduktion gesteigert. Der stärkere Zellaufschluss ist allerdings mit einer erhöhten Rückbelastung der biologischen Stufe mit Stickstoff und inertem CSB verbunden. Gemäß Literaturangaben kann der Gasertrag je nach Verfahren um 11-30% gesteigert werden.

Vollständige Nutzung des Faulraums

Um eine optimale Faulgasproduktion zu gewährleisten, sollte das gesamte Faulraumvolumen zur Verfügung stehen und vollständig durchmischt werden. Totzonen im Faulraum durch Ablagerungen, Schwimmdecken sowie Kurzschlussströmungen verringern die erreichbare Faulzeit wodurch der Gasertrag rechnerisch um etwa 1 – 9 % reduziert werden kann.

Mehrstufige Faulung / Hochlastfaulung

Generell ist eine mehrstufige bzw. serielle Schaltung mehrerer Faulbehälter möglich, wodurch der technische Abbaugrad verbessert wird. Bei gleichbleibendem Faulvolumen kann der Gasertrag bei zweistufiger Fahrweise um ca. 11 % im Vergleich zum einstufigen Faulbehälter mit 20 d Verweilzeit gesteigert werden

Adaptive Temperaturanpassung der Faulung

Die Faulgaserzeugung ist generell stark temperaturabhängig. Anstatt die Faultemperatur über das ganze Jahr konstant zu halten, ist es auch möglich, die gesamte Wärmeproduktion abzüglich der für die Gebäudebeheizung benötigten Wärme dem Faulbehälter zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise verändert sich die Faultemperatur entsprechend

Ausgasung und Nachfaulung

Kontrollierte Ausgasung des gelösten Methans oder eine Nachfaulung bilden ein Restgaspotential in Höhe von 2,4 bzw. 10 % der normalen Faulgasproduktion.

2.1.3 Ergebnisse und Empfehlungen

Die Auswirkungen der untersuchten Optimierungsmöglichkeiten fallen je nach Maßnahme unterschiedlich hoch aus. Um dennoch einen Vergleich zu ermöglichen, sind die ermittelten prozentualen Verbesserungspotentiale in Bild 2.2 zusammengefasst dargestellt.

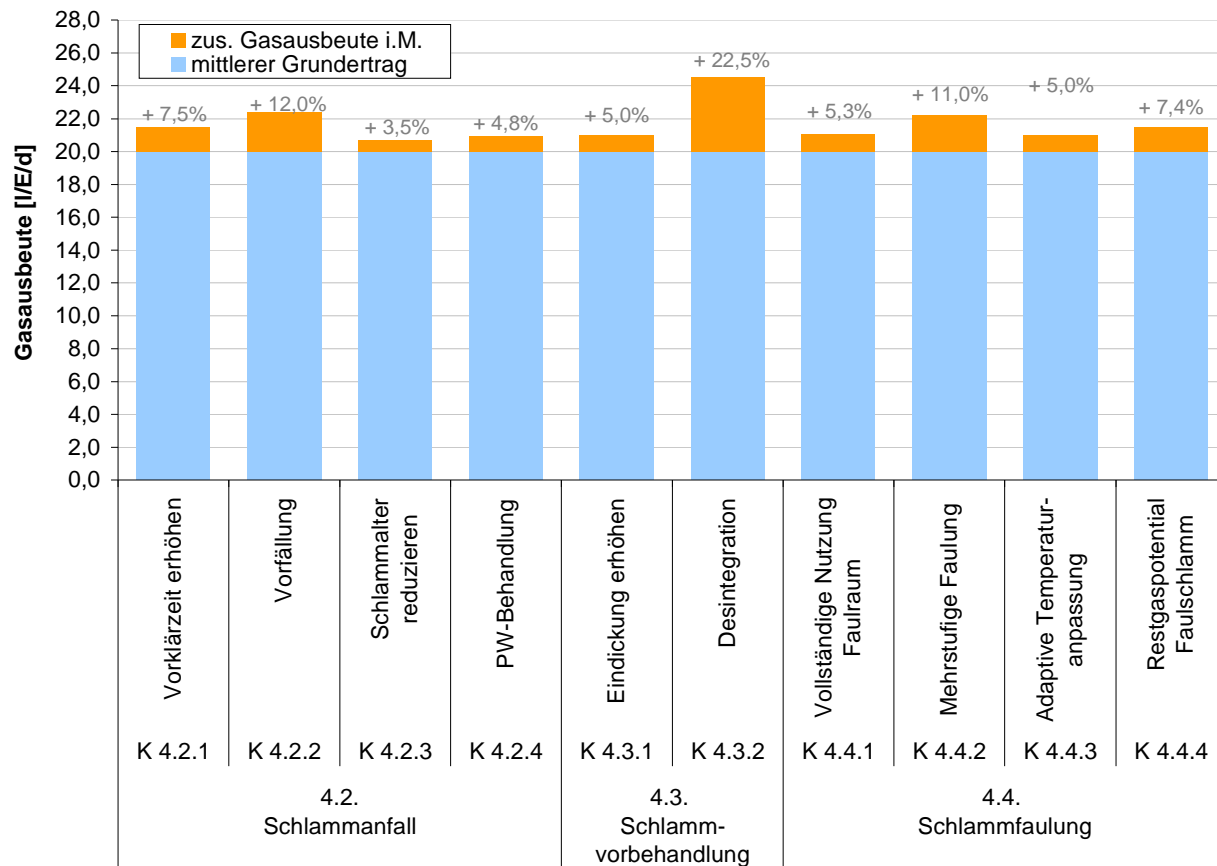


Bild 2.2: Zusammenfassung der Auswirkungen auf den Gasertrag

Ein kumulatives Gesamtpotential kann aus den Maßnahmen nicht abgeleitet werden, da sich die positiven Effekte der Einzelmaßnahmen nur eingeschränkt addieren lassen. So haben diverse Ansätze gleichermaßen eine Verlängerung der Faulzeit und damit der erreichten Abbauleistung zur Folge. Ist jedoch die praktische Faulgrenze bereits erreicht, wird durch weitere Maßnahmen, die auf eine Verlängerung der Faulzeit abzielen, kein weiterer Mehrertrag generiert. Des Weiteren haben beispielsweise Desintegrationsverfahren eine erhöhte Stickstoffrückbelastung aus dem Prozesswasser zur Folge, weswegen im Hinblick auf die Denitrifikationskapazität der biologischen Stufe ohne eine separate Prozesswasserbehandlung nicht mehr die maximale Aufenthaltszeit in der Vorklärung realisierbar ist. Eine Kombination der Maßnahmen ist daher im Einzelfall zu untersuchen.

2.2 Verbesserung der Faulgasnutzung

Die unmittelbare Nutzung des Faulgases auf der Kläranlage ermöglicht die dezentrale Bereitstellung regenerativer Energie für die Abwasserreinigung. Da diese in der Regel unmittelbar auf der Kläranlage verbraucht werden kann, ist eine Weitergabe des Faulgases an Dritte nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Eine detaillierte Betrachtung hierzu findet sich in der Langfassung der Studie. Die Ergebnisse der Datenerhebung zeigen, dass in Nordrhein-Westfalen etwa 76,9 % des Faulgases in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen genutzt werden. Das übrige Faulgas wird vorwiegend zur Wärmeerzeugung (16,6 %) genutzt, Abgefackelt (4,8 %) und teilweise noch zum Antrieb direkt getriebener Verdichter eingesetzt (1,7 %).

2.2.1 Vorhandene Gasnutzungstechnologien

Für die Untersuchung der Möglichkeiten einer Verbesserung der Gasnutzung wurden die Kriterien Wirtschaftlichkeit und vermiedene CO₂-Emissionen herangezogen. Durch die Betrachtung soll die Abschätzung ermöglicht werden, unter welchen Randbedingungen die Faulgasnutzung zur reinen Wärmeerzeugung bzw. in Kraft-Wärme-Kopplung vorteilhafter ist. Ein Vergleich der Bestandsanlagen mit aktuellen Gasnutzungsaggregaten soll zudem aufzeigen unter welchen Bedingungen der Austausch des Bestands-BHKW durch eine neue effizientere Anlage (Repowering-BHKW) sinnvoll ist. Dazu werden die heute verfügbaren Gasnutzungstechnologien (siehe Bild 2.3) zunächst kurz bewertet.

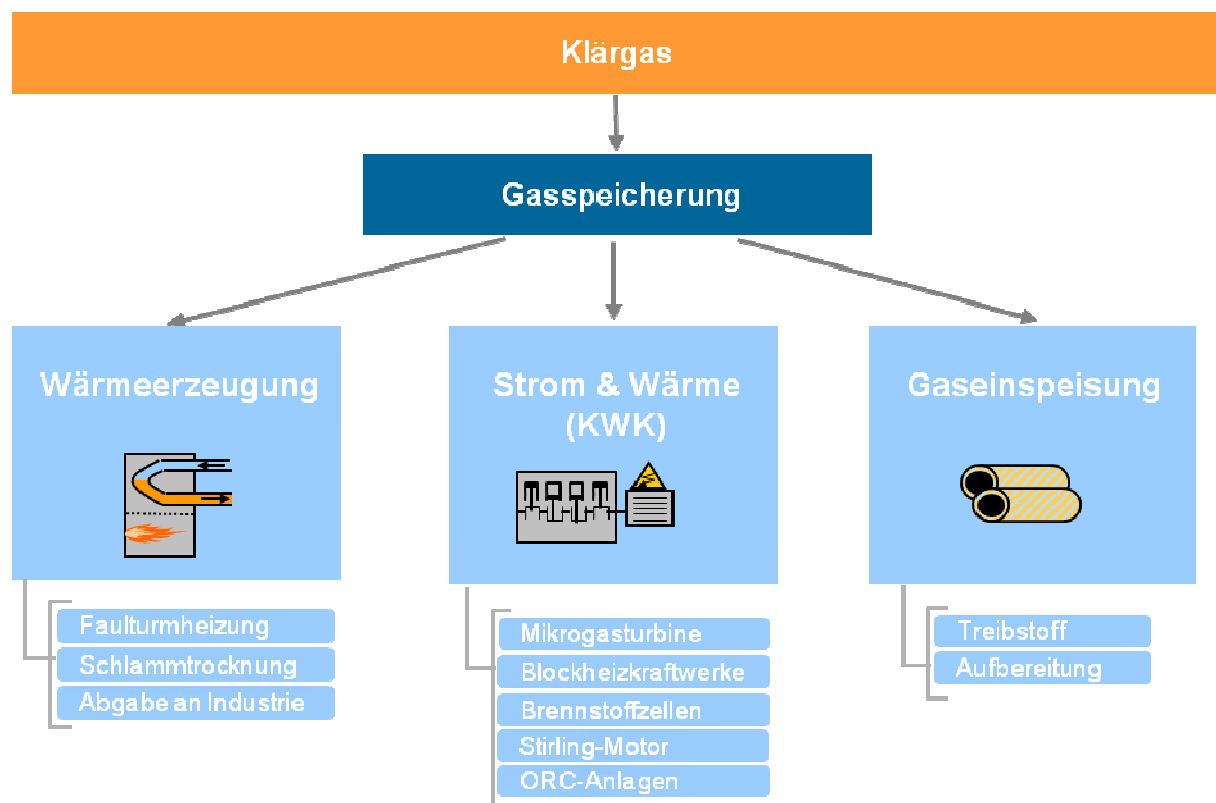


Bild 2.3: Nutzungsmöglichkeiten und Technologien für Faulgas

Für die reine Wärmeerzeugung aus Faulgas stehen, wie für Erdgas, **Gaskessel** mit hohen Wirkungsgraden und vergleichsweise geringen Investitions- und Wartungsaufwendungen zur Verfügung. Kläranlagen sind in der Regel auch beim Einsatz von KWK-Anlagen mit Kesselanlagen ausgestattet, die notfalls den gesamten Wärmebedarf decken können.

Blockheizkraftwerke stellen auf Grundlage der technischen Eigenschaften, der Investitions- und Betriebskosten sowie der umfangreichen betrieblichen Erfahrungen etablierte Gasnutzungstechnologien dar, mit denen Faulgas zuverlässig, wirtschaftlich und effizient in Strom und Wärme umgewandelt werden kann.

Bei **Mikrogasturbinen** bestehen hinsichtlich der Verbreitung, der betrieblichen Erfahrungen und der verfügbaren Leistungsklassen Einschränkungen gegenüber BHKW. Insbesondere die geringen Betriebskosten und ein geringer Wartungsaufwand machen Sie in den entsprechenden Leistungsklassen jedoch zu einer interessanten Alternative zum BHKW.

Insbesondere bei Leistungen über 250 kW_{el} kann das Verhältnis von thermischer und elektrischer Leistung durch den Einsatz von **ORC-Anlagen** über die Nutzung von Motor und Abgaswärme in Richtung einer höheren elektrischen Leistung verschoben werden. Die Auswirkungen auf die Wärmebedarfsdeckung der Kläranlage sind jedoch im Einzelfall zu prüfen.

Trotz vielfältiger Pilot- und Forschungsvorhaben muss der Einsatz von **Brennstoffzellen** auf Kläranlagen auch heute noch als nicht praxistauglich bewertet werden. Dem hohen elektrischen Bruttowirkungsgrad, der theoretisch erreichbar ist, steht ein unverhältnismäßig hoher interner Verbrauch für die Faulgaskonditionierung und Belüftung entgegen, der zu einem Nettowirkungsgrad im Bereich aktueller BHKW führt. Hohe Investitionskosten der Pilotanlagen sowie lange Stillstandzeiten und hohe Wartungsaufwendungen führen dazu, dass Brennstoffzellen auf Kläranlagen derzeit nur in besonders geförderten Forschungsvorhaben eingesetzt werden können.

Allgemeine Aussagen können hier entsprechend nur für den Vergleich von reiner Wärmeerzeugung und KWK getroffen werden. Als derzeit technisch und wirtschaftlich sinnvolle Technologien werden bei den KWK-Anlagen BHKW und Mikrogasturbinen betrachtet.

2.2.2 Wärmeerzeugung oder KWK-Nutzung

Aus der Datenerhebung geht hervor, dass etwa 16,6 % des Faulgases ausschließlich zur Wärmeerzeugung eingesetzt wird. Unter dem Kriterium der Reduktion von CO₂-Emissionen zeigt sich, dass durch die Faulgasnutzung in Kraft-Wärme-Kopplung stets mehr CO₂-Emissionen vermieden werden können, als bei der reinen Wärmeerzeugung. Die Begründung liegt in dem deutlich höheren Emissionsfaktor von Strom.

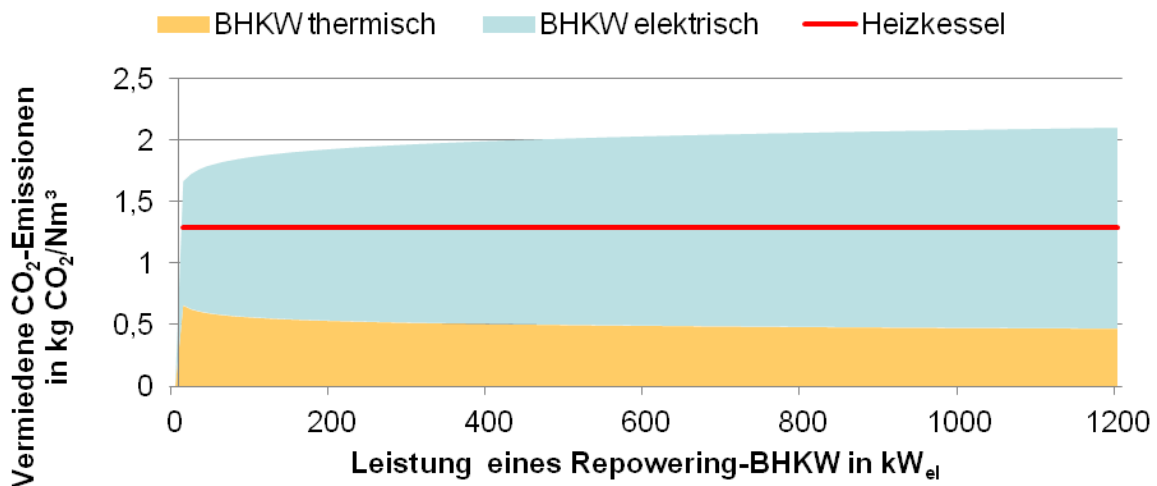


Bild 2.4: Vermiedene CO₂-Emissionen eines neuen BHKW im Vergleich zur reinen Wärmeerzeugung in einem Gaskessel

Unter dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit ist die reine Wärmeerzeugung mit geringen Investitions- und Betriebskosten für den Gaskessel aber auch vergleichsweise geringen vermiedenen Bezugskosten für Erdgas verbunden. Bei der KWK-Nutzung stehen vergleichsweise hohe Investitions- und Betriebskosten hohen Einsparungen durch den vermiedenen Strombezug entgegen. In der Langfassung der Studie wurden dazu die faulgasbezogenen Einsparungen von möglichen BHKW in Abhängigkeit von der Leistung und den erzielbaren Volllaststunden mit den Einsparungen der reinen Wärmeerzeugung in einem Heizkessel verglichen. Unter der Annahme, dass jeweils 80 % der erzeugten Wärme sinnvoll genutzt werden können ergibt sich das Entscheidungsdiagramm in Bild 2.5. Für eine Kombination aus BHKW-Leistung und Vollbenutzungsstunden lässt sich so bestimmen welche Gasnutzung wirtschaftlicher ist. Im Grenzbereich hängt die Wirtschaftlichkeit von den Netto-Strombezugskosten ab.

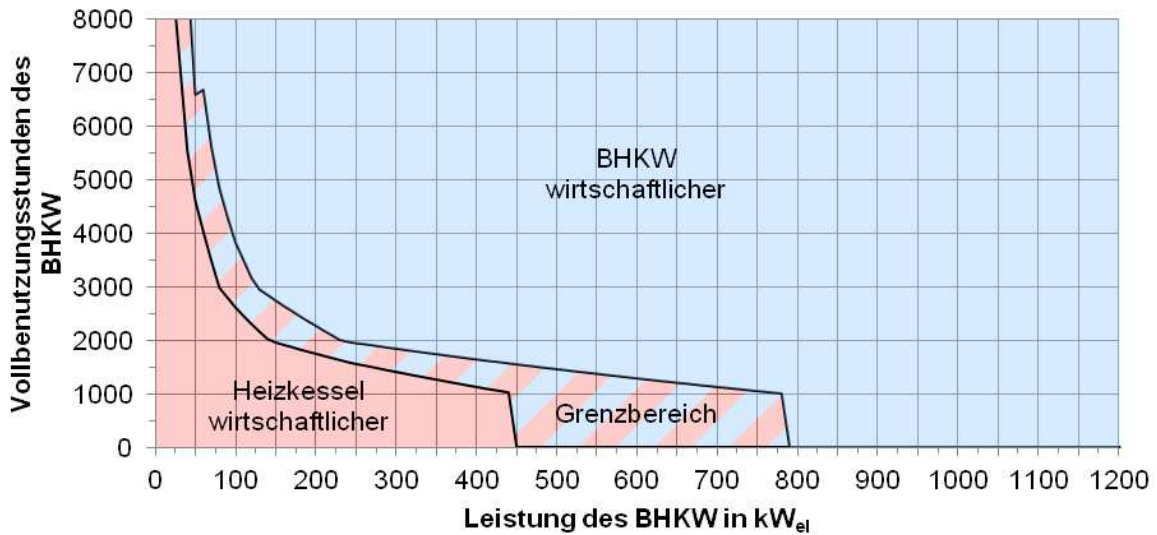


Bild 2.5: Entscheidung zwischen Heizkessel und Repowering-BHKW in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung und den Vollbenutzungsstunden bei mittleren Strombezugskosten zwischen 14 ct/kWh und 18 ct/kWh und 80 % sinnvoller Wärmezeugung aus Faulgas

2.2.3 BHKW-Repowering

Ein Vergleich der KWK-Anlagen aus der Datenerhebung mit Marktanalysen (ASUE 2005, ASUE 2011) zeigt, dass die Bestandsanlagen im Vergleich zu modernen BHKW (Repowering-BHKW) einen deutlich geringeren elektrischen Wirkungsgrad aufweisen. Die Betrachtung der mittleren Wirkungsgrade (Trendfunktionen) lässt den Schluss zu, dass die Bestandsanlagen im Mittel älter als 8 Jahre und damit nahe an der üblichen Nutzungsdauer von 10 Jahren sind (siehe Bild 2.6).

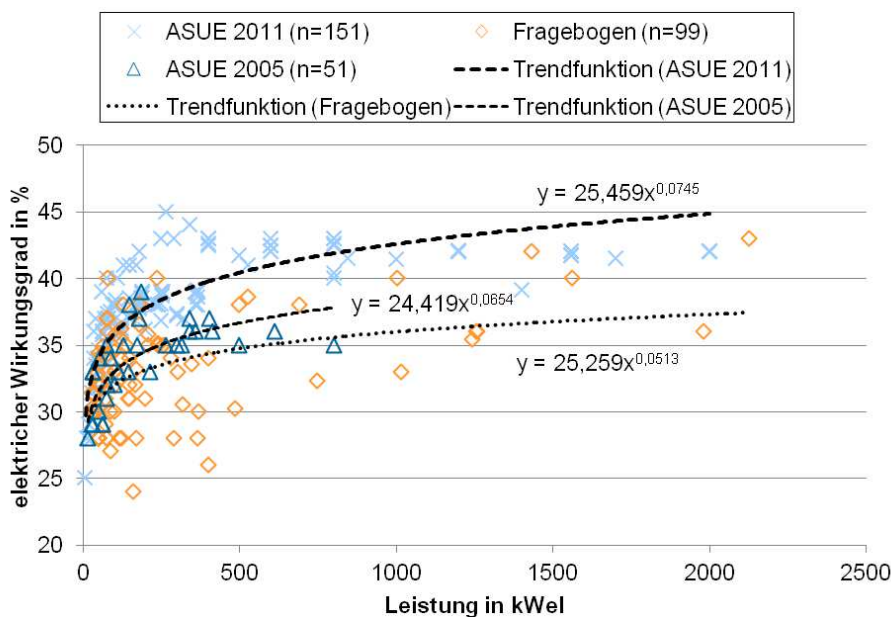


Bild 2.6: Elektrischen Nennwirkungsgrade der Bestandsanlagen verglichen mit Marktanalysen aus den Jahren 2005 und 2011 (ASUE 2005, ASUE 2011)

Durch den höheren elektrischen Wirkungsgrad aktueller BHKW im Vergleich zu Bestands-BHKW ergibt sich unter dem Kriterium der vermiedenen CO₂-Emissionen stets ein leichter Vorteil für das Repowering (siehe Bild 2.7). Durch ihren etwas geringeren elektrischen Wirkungsgrad liegen Mikrogasturbinen jeweils im Bereich zwischen den Bestands-BHKW und den Repowering BHKW.

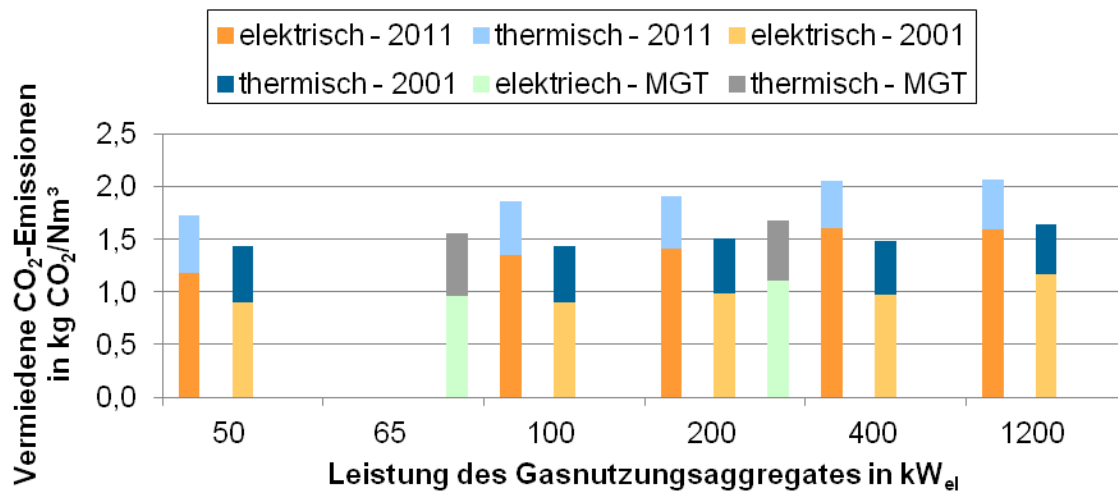


Bild 2.7: Vermiedene CO₂-Emissionen durch Bestands-BHKW, Repowering-BHKW und Mikrogasturbinen

Unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches wurden die faulgasbezogenen Einsparungen der Bestands-BHKW mit denen von Repowering-BHKW verglichen. Bei Bestands-BHKW ergeben sich die Einsparungen dabei aus den vermiedenen Energiebezugskosten abzüglich der Aufwendungen für die Wartung und Instandhaltung. Da das Bestands-BHKW über die übliche Nutzungsdauer betrieben wird, werden die Investitionskosten nicht berücksichtigt, auch ein Anspruch auf den KWK-Zuschlag besteht nicht mehr. Im Gegensatz dazu sind bei den Repowering-BHKW die Investitionskosten und der entsprechende KWK-Zuschlag berücksichtigt. Eine ausführliche Darstellung ist der Langfassung der Studie zu entnehmen. Bild 2.8 ermöglicht anhand der Leistung und dem elektrischen Nennwirkungsgrad des Bestands-BHKW die Abschätzung, ob ein Austausch des BHKW durch ein Repowering-BHKW wirtschaftlich ist. Dabei wird unterschieden ob ein Austausch allein auf Grundlage der Wirkungsgraddifferenz (Austausch „ohne KWK-Zuschlag“ wirtschaftlich) oder erst durch den erneuten Anspruch auf den KWK-Zuschlag wirtschaftlich wird. Bei der Darstellung wurde dabei zunächst unterstellt, dass das Bestands-BHKW durch die bisherige Nutzung keinen verschleißbedingten Wirkungsgradverlust aufweist. In der Praxis sind verschleißbedingte Wirkungsgradverluste zwischen 5 und 15 % des Nennwirkungsgrades am Ende der üblichen Nutzungsdauer jedoch die Regel. Dies wurde in Bild 2.9 berücksichtigt. Innerhalb der schraffierten Flächen ergibt sich die

Wirtschaftlichkeit so jeweils in Abhängigkeit vom verschleißbedingten Verlust des Bestands-BHKW.

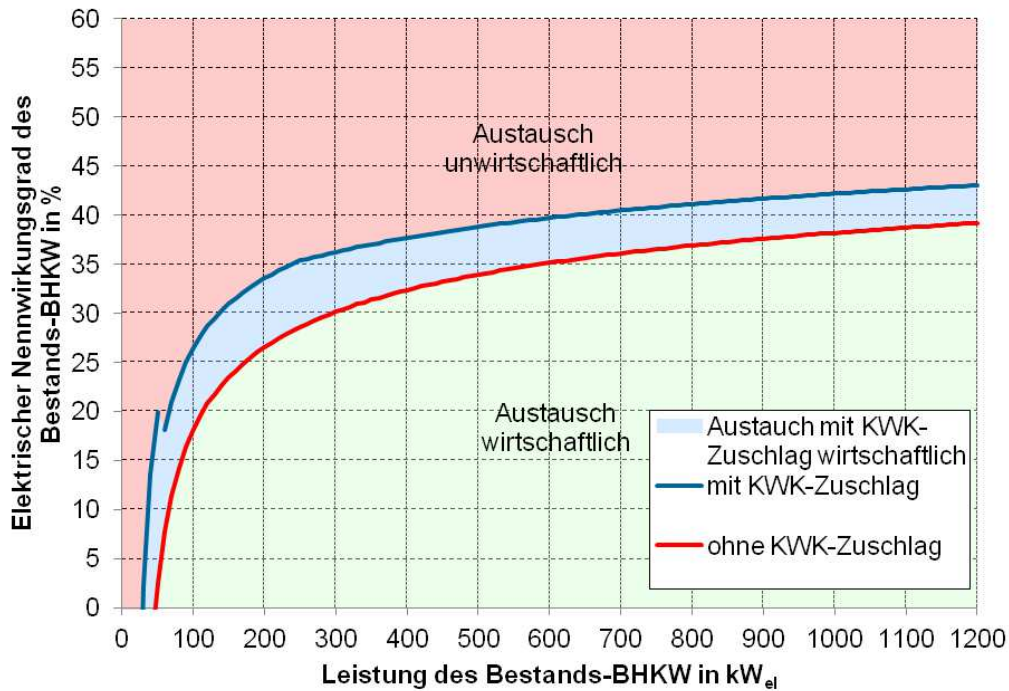


Bild 2.8: Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh und mit 0 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

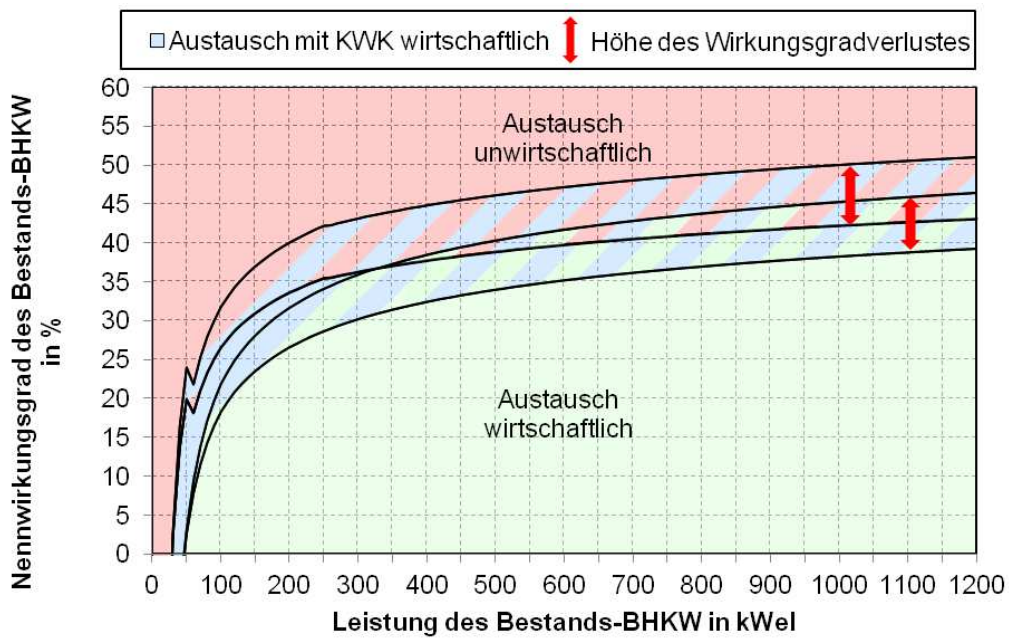


Bild 2.9: Bewertungsdiagramm zur Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches bei 7.000 VBh im Bereich zwischen 0 % mit 15 % verschleißbedingtem Wirkungsgradverlust

2.3 Standortbezogene Verbundkonzepte

Auch unter Berücksichtigung aller Maßnahmen zur Steigerung der Gasausbeute und Verbesserung der Gasnutzung kann die Energieautarke Kläranlage allein auf Basis der eigenen Faulgasproduktion heute nur in Ausnahmefällen erreicht werden. Insbesondere in den Sommermonaten besteht jedoch häufig ein Wärmeüberschuss. Im Rahmen dreier standortbezogener Verbundkonzepte wurde beispielhaft untersucht, wie auf einer Kläranlage weitere Erzeugungskapazitäten erschlossen und Wärmeüberschüsse von dritten genutzt werden können. Dazu wurden die dargestellten Verbundkonzepte entwickelt und anhand einer Musteranlage die Auswirkungen auf den Eigenversorgungsgrad, die Wirtschaftlichkeit und die Vermeidung von CO₂-Emissionen betrachtet.

2.3.1 Regenerativverbund

Beim Regenerativverbund wird die Installation von zusätzlichen regenerativen Erzeugungsanlagen (hier Photovoltaik) auf dem Gelände der Kläranlage und die Integration der elektrischen Energie in das Netz der Kläranlage untersucht. Durch die Integration kann direkt und durch die Speicher- und Regelfähigkeit der Faulgasnutzung Fremdstrombezug substituiert werden. Durch die, im Vergleich zu den Strombezugskosten niedrigen Stromgestehungskosten der regenerativen Erzeugungsanlagen und den unmittelbaren Verbrauch auf der Kläranlage werden Einsparungen erzielt und CO₂-Emissionen vermieden.

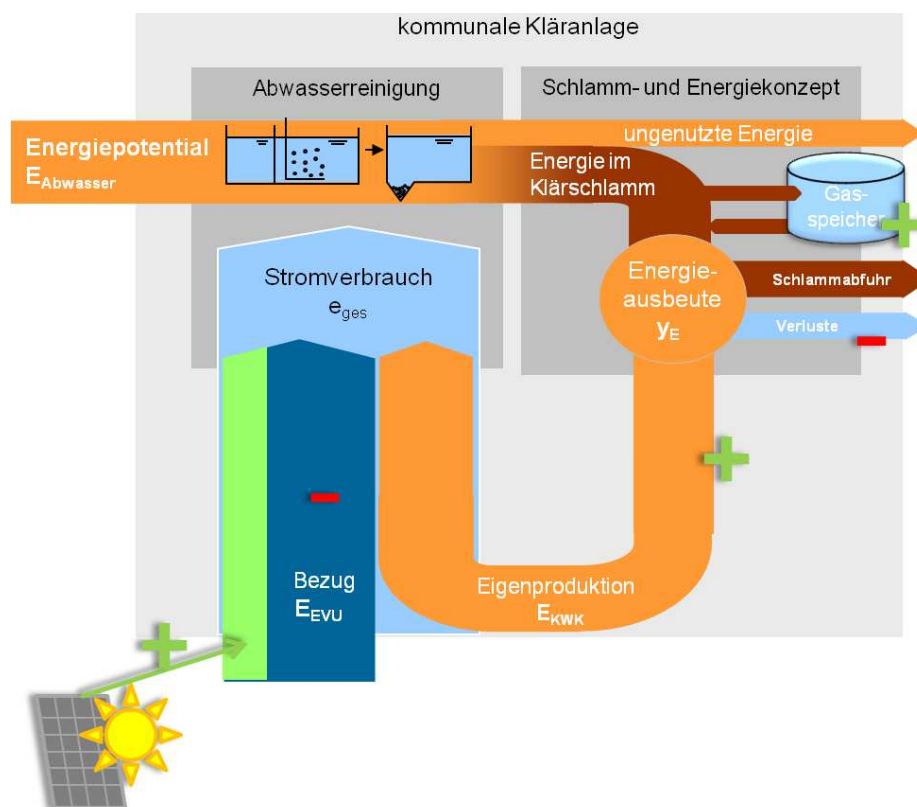


Bild 2.10: Schema zum Regenerativverbund

2.3.2 Schlammverbund

Beim Schlammverbund wird die Annahme von Fremdschlamm von anderen (aeroben) Kläranlagen in der Umgebung einer Faulungsanlage betrachtet. Die erhöhten Schlammengen führen zu einer erhöhten Faulgasausbeute und damit zu einem erhöhten Eigenversorgungsgrad der Kläranlage. Die so erzielten Einsparungen müssen jedoch die Aufwendungen für den Transport des Fremdschlammes rechtfertigen. In Abhängigkeit vom Grad der Eindickung und Stabilisierung des Schlammes ergeben sich nur vergleichsweise geringe Transportentfernungen unterhalb von 10 km. Unter dem Aspekt der vermiedenen CO₂-Emissionen können hingegen Transportentfernungen von mehr als 200 km gerechtfertigt werden.

Für einen Schlammverbund sind die rechtlichen Anforderungen an die Schlammbehandlung und -entsorgung zu beachten und das Schlammverbundkonzept ist mit den zuständigen Behörden abzustimmen.

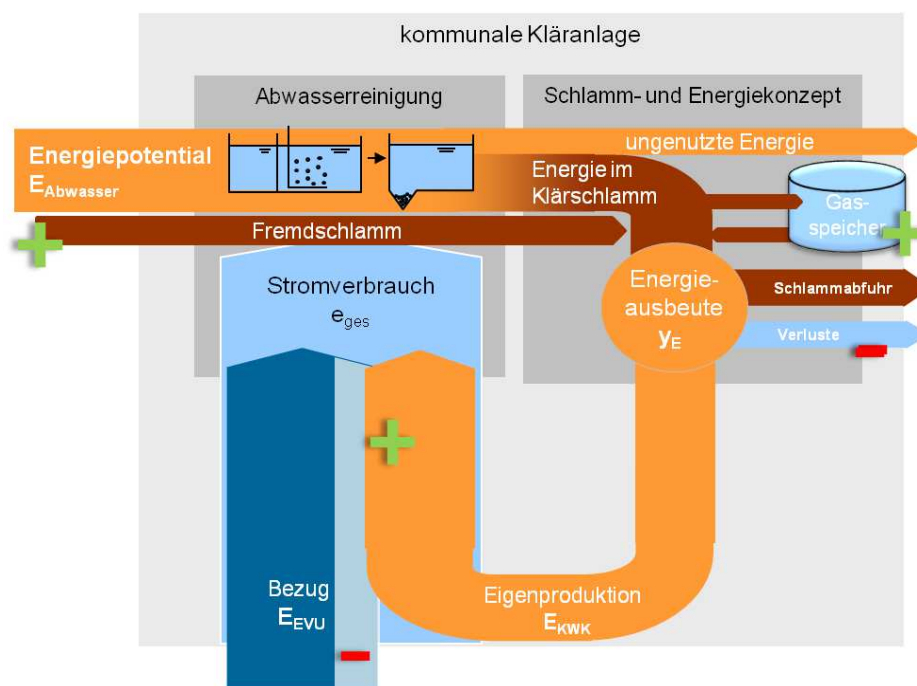


Bild 2.11: Schema zum Schlammverbund

2.3.3 Wärmeverbund

Der vielfach vorhandene Wärmeüberschuss einer Kläranlage in den Sommermonaten eignet sich insbesondere zur teilweisen Deckung von Prozesswärmebedarfen nahegelegener Unternehmen (z. B. aus der Lebensmittelindustrie). Die erzielbaren Erlöse liegen im Bereich der konventionellen Bezugskosten für Wärme am betrachteten Standort. Erlöse aus der Abgabe der Wärme an Dritte müssen dabei die Investitions- und Betriebskosten für den Betrieb eines Wärmenetzes decken. Aus dem Vergleich ergeben sich, in Abhängigkeit von

der durchgeleiteten Wärmemenge, Transportentfernungen im Bereich von etwa 500 m - 1.000 m. Es werden CO₂-Emissionen in Höhe der substituierten Wärmemenge multipliziert mit dem spezifischen Emissionsfaktor erzielt.

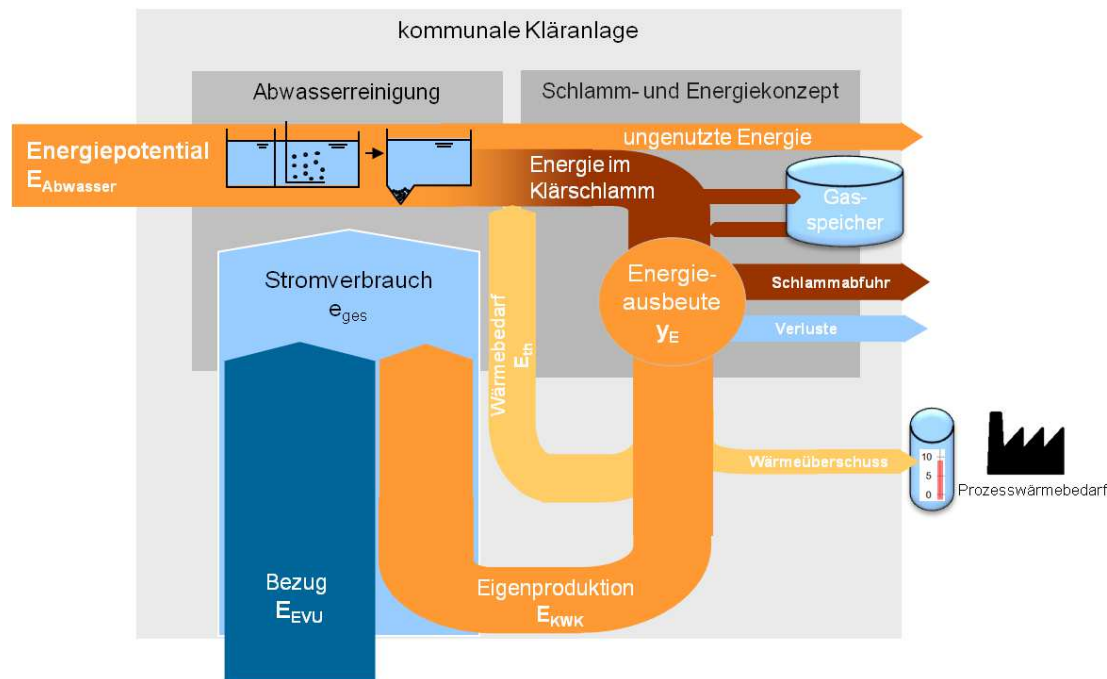


Bild 2.12: Schema zum Wärmeverbund

2.3.4 Fazit zu Verbundlösungen

Bei allen untersuchten Verbundkonzepten konnte eine Steigerung des Eigenversorgungsgrades und/oder des Energienutzungsgrades festgestellt werden.

Während durch den Regenerativverbund deutliche wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können, müssen beim Schlamm- und Wärmeverbund kurze Transportentfernungen bzw. Leitungslängen erreicht werden um eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen. Der Regenerativverbund kann zudem, in unterschiedlich starker Ausprägung, an fast jedem Anlagenstandort umgesetzt werden.

Für den Schlamm- und Wärmeverbund müssen stets die entsprechenden Voraussetzungen, d. h. Kläranlagen mit aerober Stabilisierung oder ein passender Prozesswärmebedarf vorhanden sein. Dies dürfte nur in Ausnahmefällen erfüllt sein.

In jedem Fall kann durch die beschriebenen Verbundkonzepte eine erhebliche Menge an CO₂-Emissionen vermieden werden.

3 Bewertung und Potential

3.1 Stationäres Bilanzmodell für Betreiber

Um den Betreibern kommunaler Kläranlagen die Möglichkeit zu geben, die beschriebenen Maßnahmen bzw. die veränderten Randbedingungen für ihre Anlage beurteilen zu können, wurde ein auf MS-Excel basierendes Programm entwickelt, welches ein stationäres Bilanzmodell der zu untersuchenden Kläranlage liefert.

Das Programm eignet sich dazu einen „groben“ Überblick über die energetische Situation einer Kläranlage zu erhalten. An dieser Stelle wird jedoch darauf hingewiesen, dass die Berechnungen des Modells nicht exakt die Realität abbilden, da das Programm eine Reihe von Vereinfachungen und Annahmen enthält. Für eine exakte Betrachtung der energetischen Situation einer Kläranlage sind weitere Berechnungen erforderlich.

3.1.1 Zielsetzung des Bilanzmodells

In Abhängigkeit der jeweiligen Ausgangssituation der Kläranlage werden mit dem Programm folgende Ziele verfolgt:

- Darstellung einer stationären CSB-Bilanz unter Berücksichtigung der vorhandenen Verfahrenstechnik der jeweiligen Kläranlage.
- Berechnung wichtiger Kenngrößen der Kläranlage und visuelle Darstellung
- Ermittlung und Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher verfahrenstechnischer und betrieblicher Randbedingungen auf die Kenngrößen der Kläranlage.
- Zur Vereinfachung möglichst große Anzahl an vorgegebenen Auswahlmöglichkeiten.
- Vergleich der anhand von Messwerten ermittelten Kennwerte mit den rechnerisch unter Verwendung gängiger Regelwerke ermittelten Referenzwerten.

3.1.2 Beschreibung des Programms

Das Programm ist in vier verschiedene Excel-Arbeitsblätter unterteilt (Eingabe, Ausgabe, Variantenvergleich und ein ausgeblendetes Berechnungsblatt). Eine Kurzanleitung ist der Installationsdatei angefügt, zudem wird in der Langfassung des Berichtes ein Berechnungsvergleich anhand von drei realen Beispielanlagen dargestellt. Es folgt daher nur eine Kurzbeschreibung der wichtigsten Funktionen.

Auf der linken Seite des Arbeitsblattes „**Eingabe**“ werden für die Berechnung notwendige oder ergänzende Parameter abgefragt. Durch Eingabe der ergänzenden Parameter kann die Anzahl der durch das Modell getroffenen Annahmen verringert werden. Auf der rechten Seite des Arbeitsblattes werden die „Parameter bezüglich Verfahrens- und Betriebstechnik“ der

Kläranlage abgefragt (vgl. Bild 3.1). Neben der Abbildung des Ist-Zustandes besteht die Möglichkeit, die Randbedingungen der Kläranlage in den Varianten 1 bis 5 zu variieren.

Die von der Software durchgeführten Berechnungen werden in einem eigenen, für den Anwender nicht ersichtlichen Arbeitsblatt „**Berechnungen**“ durchgeführt. Nach Betätigung der entsprechenden Schaltfläche im Arbeitsblatt „Eingabe“ werden die jeweiligen wichtigsten Ergebnisse durch VBA im Arbeitsblatt „**Ausgabe**“ dargestellt. Im Arbeitsblatt „**Variantevergleich**“ werden die berechneten Kenngrößen der einzelnen Varianten und des Ist-Zustands vergleichend gegenübergestellt. Somit können Auswirkungen verschiedener Randbedingungen der Varianten „auf einen Blick“ ersichtlich gemacht werden.

Parameter bezüglich Verfahrens- und Betriebstechnik			Varianten					
			Ist-Zustand	1	2	3	4	5
Verfahrenstechnik								
einstufige Belebung	ja/nein		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
zweistufige Belebung (z.B. A/B-Anlage)	ja/nein		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Vorklärung								
Aufenthaltszeit	ja/nein		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Volumen	h							
	m³		400					
Biologie								
Schlammalter (nur für einstufige Anlagen)	Tage		15					
Sauerstoffgehalt Belebungsbecken*	mg/l		1,5					
Alpha-Wert*								
Sauerstofffertrag*	kg [O ₂]/kWh							
Reinigungsziel (Kohlenstoff/Nährstoffelimination)			Kohlenstoffelim. und Stickstoffelim.					
Temperatur Belebung*	°C		121					
Anaerobe Schlammstabilisierung								
	ja/nein		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Volumen Faulbehälter gesamt	m³		4500					
Temperatur Faulbehälter*	°C		35					
Trübwasserbehandlung								
Anteil Stickstofffracht Trübwasser an Stickstofffracht im Zulauf*	%							
klassisches SBR-Verfahren (Nitrifikation/Denitrifikation)	ja/nein		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stickstoffelimination*	%		12					
Deammonifikation	ja/nein		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Stickstoffelimination*	%							
Desintegration	ja/nein		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verbesserung der spezifischen anaeroben Abbaubarkeit	%							
Eindickung								
TS Gehalt Rohschlamm Zulauf Faulturn (nach evtl. Eindickung)	%		4,5					
Co-Vergärung								
Art 1	ja/nein		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Menge 1	m³/d		3					
TS Gehalt 1*	%							
Art 2								
Menge 2	m³/d							
TS Gehalt 2*	%							
Gasnutzungstechnologie								
Wirkungsgrad elektrisch	%		32					
Wirkungsgrad thermisch	%							
* wenn möglich mitangeben. Bei Nicht-Angabe werden Annahmen getroffen.								
Alle Varianten berechnen			Ist-Zustand berechnen	Variante 1 berechnen	Variante 2 berechnen	Variante 3 berechnen	Variante 4 berechnen	Variante 5 berechnen
Alle Varianten löschen			Ist-Zustand löschen	Variante 1 löschen	Variante 2 löschen	Variante 3 löschen	Variante 4 löschen	Variante 5 löschen
Variantevergleich löschen			Variantenvergleich					

Bild 3.1: Rechte Seite des Arbeitsblatts „Eingabe“

3.2 Potentialabschätzung NRW

Aufbauend auf den aus der Datenabfrage abgeleiteten Referenzwerten für Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung wird das Optimierungspotential der beschriebenen Maßnahmen zur Steigerung der Energieausbeute für ganz Nordrhein-Westfalen abgeschätzt. In einem ersten Schritt wird der Ist-Zustand NRW berechnet. Anschließend werden sechs verschiedene Szenarien betrachtet, für die das jeweilige Optimierungspotential den notwendigen Investitionen gegenübergestellt wird.

3.2.1 Ist-Zustand NRW

Für den Ist-Zustand der anaeroben Schlammstabilisierung in NRW werden die ausgewerteten Daten auf die Gesamtausbaugröße im Bundesland hochgerechnet. Die Hochrechnung wurde für jede der vier EW-Kategorien in Abhängigkeit des jeweiligen Verhältnisses von ausgewerteten zu in NRW vorhandenen Kläranlagen mit Faulung durchgeführt. Die Daten sind in der nachfolgenden Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Tabelle 3.1: Ist-Zustand Faulgasanfall und Faulgasnutzung in NRW (Hochrechnung)

Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung		[EW]	Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Gesamt I-IV
			< 20.000	20.000-50.000	50.000-100.000	> 100.000	
ausgewertete Kläranlagen	Anzahl	[-]	57	62	31	26	176
	Ausbaugröße	[EW]	1.165.448	3.198.274	3.077.070	10.867.100	18.307.892
Verhältnis ausgew./NRW	$f_{\text{ausgewertet/NRW}}$	[-]	0,69	0,66	0,51	0,57	0,58
Kläranlagen in NRW mit separater anaerober Stabilisierung	Anzahl	[-]	80	100	60	44	284
	Ausbaugröße	[EW]	1.677.079	4.868.605	6.023.373	19.007.100	31.576.157
	Stromverbrauch Kläranlagen	[MWh/a]	52.612	135.470	149.939	466.171	804.191
	Stromproduktion aus Faulgas	[MWh/a]	18.768	47.914	63.730	267.200	397.612
	Strombezug Kläranlagen	[MWh/a]	33.844	87.555	86.209	198.971	406.579
	verfügbares Faulbehältervolumen	[m ³]	97.900	217.400	241.600	594.600	1.151.500
	Faulgasanfall auf Kläranlagen	[Nm ³ /a]	11.309.000	28.697.000	41.589.000	132.413.000	214.008.000
	Aggregate zur Stromerzeugung	[-]	55	100	90	121	366
	Gesamtleistung der Stromerzeuger	[kW _e]	2.637	8.056	11.258	43.367	65.318

Über alle Kategorien ergibt sich für Nordrhein-Westfalen, dass jährlich rund 218 Mio. Nm³ Faulgas auf Kläranlagen anfallen, die in insgesamt 370 Aggregaten zur Stromerzeugung (überwiegend BHKW) zu rund 340 GWh/a verstromt werden. Mit dieser Strommenge können rund 41 % des Stromverbrauchs der Kläranlagen mit anaerober Stabilisierung (816 GWh/a) gedeckt werden.

3.2.2 Betrachtete Szenarien

Basierend auf den technischen Optimierungsmaßnahmen wurden sechs verschiedene Szenarien betrachtet (Tabelle 3.2). Neben den jeweiligen Auswirkungen auf den Faulgasanfall und die Energiesituation wurden überschlägig die Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen berechnet und die Wirtschaftlichkeit abgeschätzt. Die Ergebnisse der Szenarien sind für alle vier EW-Kategorien zusammengefasst in Bild 3.2 einander gegenübergestellt.

Tabelle 3.2: Betrachtete Szenarien

Szenario	Stichwort	Beschreibung
Szenario 1	Faulung	Umstellen von simultaner aerober auf getrennte anaerobe Stabilisierung
Szenario 2	Primärschlamm	PS-Entnahme durch vergrößerte Vorklärung oder Vorfällung steigern
Szenario 3	Schlammalter	Schlammalter in der Belebung senken, um aerobe Stabilisierung zu begrenzen
Szenario 4	Nachrüsten	Auf Kläranlagen ohne Faulgasverstromung KWK-Aggregat nachrüsten
Szenario 5	Repowering	Durch Modernisierung die Wirkungsgrade der KWK-Aggregate erhöhen
Szenario 6	Verbund	Freie Kapazitäten für Ausfaltung ext. Schlämme/Co-Substrate nutzen

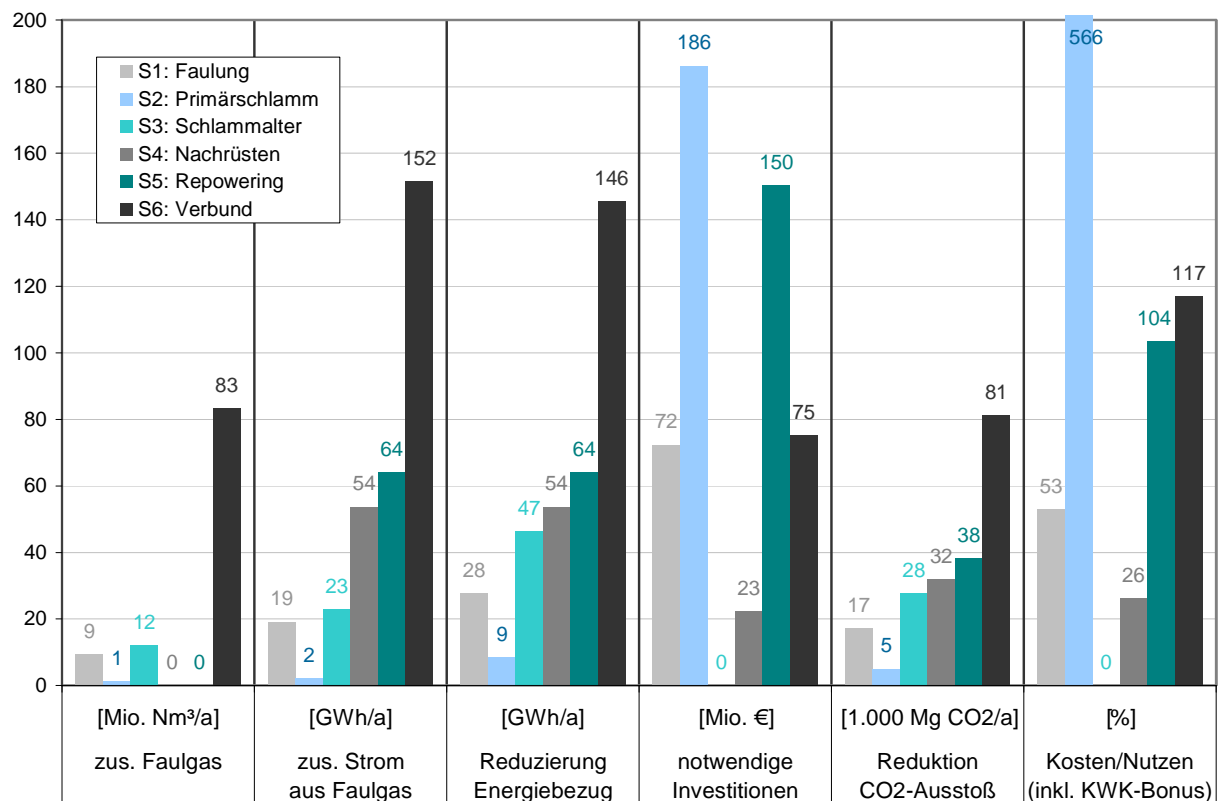


Bild 3.2: Vergleich der verschiedenen Szenarien

Es zeigt sich, dass das größte Potential zur Steigerung des Faulgasanfalls und der Energieproduktion in der **Nutzung der freien Faulbehälterkapazitäten** (Szenario 6) liegt, dies aber allein durch Schlammverbundkonzepte auf Grund der hohen Transportaufwendungen nicht wirtschaftlich auszuschöpfen ist.

Durch **Nachrüstung und Modernisierung von KWK-Aggregaten** (Szenarien 4 und 5) lässt sich die Umwandlung des vorhandenen Faulgases in Elektrizität um ca. 30 % steigern. Die notwendigen Investitionen können dabei weitestgehend von Einsparungen des Strombezuges abgedeckt werden.

Durch die **Reduzierung des Schlammalters** (Szenario 3) auf den Kläranlagen mit anaerober Faulung kann sowohl die Stromproduktion gesteigert als auch der Stromverbrauch der Kläranlage deutlich reduziert werden. Da dieser Maßnahme nur geringe Kosten gegenüberstehen, stellt sie die wirtschaftlichste Option dar, die kurzfristig umgesetzt werden kann.

Die **Verfahrensumstellung** (Szenario 1) von aerober auf anaerobe Schlammstabilisierung bei Anlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 20.000 EW ist zwar wirtschaftlich, besitzt im Vergleich jedoch ein geringeres Optimierungspotential, da in Nordrhein-Westfalen bereits die meisten großen Kläranlagen (> 80 % der Ausbaugröße) über eine Faulstufe verfügen.

Das geringste Optimierungspotential besitzt das Szenario einer **gesteigerten Primärschlammmentnahme** (Szenario 2) durch Verlängerung der Aufenthaltszeit in der Vorklärung. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Kläranlagen mit Faulung in NRW schon heute im Mittel Aufenthaltszeiten von 1,2 bis 1,8 Stunden in der Vorklärung aufweisen.

Die Wirtschaftlichkeit aller betrachteten Szenarien ist wesentlich von den Preisen für den Stromfremdbezug abhängig. Eine Sensitivitätsanalyse ergab, dass das Szenario 6 (Verbund) die größte Sensitivität gegenüber dem Strompreis aufweist. Hiernach wäre ab einem Strompreis von 30 bis 35 Ct/kWh ein Schlammverbund unter den getroffenen Annahmen (siehe Langfassung des Berichtes) wirtschaftlich, vorausgesetzt die Kosten, vor allem für den Klärschlammtransport, blieben unverändert. Für die anderen Szenarien sinkt zwar mit steigendem Strompreis das Kosten/Nutzenverhältnis, die Wirtschaftlichkeitsgrenze ($K/N=1$) wird aber in dem betrachteten Bereich (Strompreis 10 bis 40 Ct/kWh) nur vereinzelt überschritten.

4 Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Anstrengungen unternommen, den Energieverbrauch der kommunalen Kläranlagen zu minimieren. In Nordrhein-Westfalen werden hierzu seit 1999 und bis heute Energieanalysen für kommunale Kläranlagen durch das Umweltministerium öffentlich gefördert. Neben einer Verbesserung der Energieeffizienz bei der Maschinen- und der Verfahrenstechnik, gehört zu den Teilschritten einer energetischen Optimierung auch die Steigerung der Klärgasproduktion und die Verbesserung der Eigenstromerzeugung. Anhand einer Betreiberabfrage und der Auswertung von durchgeführten Energieanalysen wurde der IST-Zustand in NRW ermittelt. Die entsprechenden Kennwerte zur Energieausbeute variieren dabei zum Teil erheblich und es ist davon auszugehen, dass für viele Kläranlagen nachwievor Optimierungspotential im Hinblick auf die Ausbeute an nutzbarer Energie besteht.

Die in dem Projekt hierzu aufbereiteten Ansatzpunkte sind vorrangig eine breite Informationsbasis für Betreiber von Faulungsanlagen aller Größenklassen. Es werden Hinweise zu betrieblich und technisch notwendigen Anpassungen für die Umsetzung gegeben wie auch energetische Potenziale und zugehörige Kosten aufgezeigt. Das im Rahmen des Projektes entwickelte stationäre Bilanzmodell ermöglicht dem Betreiber eine erste energetische Einordnung und Potenzialabschätzung seiner Kläranlage.

Für eine optimale Faulgasausbeute und -produktion ist ein energiereicher, im Feststoffgehalt konzentrierter Rohschlamm erforderlich, der in der Schlammfäulung soweit möglich aufzuschließen ist. Unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen von Abwasserreinigung und Schlammbehandlung ist bei der Entnahme des energiereichen Primärschlammes die Optimierung des C/N-Verhältnis im Zulauf der biologischen Stufe von großer Bedeutung. Die gezielte Rohschlammmentnahme in Verbindung mit einer Deammonifikation von Prozesswässern der Schlammwässerung, stellt hierfür einen der technisch umsetzbaren Verfahrensansätze dar. Der weitergehende Aufschluss der erzeugten organischen Schlammstruktur durch Integration einer Desintegration kann die Klärgasproduktion signifikant steigern, ist aber mit einem zusätzlichen verfahrensabhängigen Energieeigenverbrauch und einer erhöhten Rückbelastung verbunden. Hier ist weiterer Forschungsbedarf vorhanden. Im Bereich der Schlammfäulung bietet die Umstellung auf eine zweistufige Hochlastfäulung das größte Potential zur Steigerung der Faulgaserzeugung.

Für die Verstromung des produzierten Faulgases in KWK-Anlagen stehen heute Aggregate mit einem gesteigerten elektrischen Wirkungsgrad zur Verfügung. Dieser hängt allerdings stark von der Leistungsgröße ab und erschwert damit insbesondere bei kleineren Anlagengrößen die Wirtschaftlichkeit einer aus energetischer Sicht wünschenswerten

Erneuerung. Die Wirtschaftlichkeit wird in großem Maße durch anlagenspezifische Randbedingungen bestimmt, wodurch in der Praxis nur selten alle theoretischen Annahmen zu Benutzungsstunden und verschleißbedingten Verlusten exakt zutreffen. Die in dieser Studie aufgezeigten Betrachtungen bieten dennoch die Möglichkeit, den Einsatz einer KWK-Anlage oder die Wirtschaftlichkeit eines BHKW-Austausches für spezifische Anlagensituationen zu bewerten und eine Grundlage der Entscheidungsfindung zu liefern.

Die auf lange Ausbauhorizonte ausgelegten Faulbehälter weisen Reservekapazitäten auf, die in Verbundkonzepten zur zusätzlichen Klärgaserzeugung genutzt werden könnten. Der Wärmeüberschuss, der bei den meisten Anlagen während der Sommermonate besteht, wird hierdurch in der Regel vergrößert. Verbundkonzepte, mit denen sowohl das Eingangssubstrat „Fremdschlamm“ auf die Faulraumkapazitäten optimiert als auch Wärme- und mögliche Stromüberschüsse an externe Nutzer abgegeben werden können, werden maßgeblich durch die Transportaufwendungen, die erforderlichen Leitungsanschlüsse und die erzielbaren Einspeisevergütungen beeinflusst. Durch die mengenmäßige wie auch die zeitliche begrenzte Verfügbarkeit sind sie nur im Einzelfall wirtschaftlich.

Das größte Steigerungspotenzial ergibt sich als wesentliches Ergebnis der Studie bei den bereits bestehenden Faulungsanlagen. Die zu betrachtenden Maßnahmen betreffen dabei die Optimierung der Schlammbereitstellung und verfahrenstechnischen Prozesse. Bei Kläranlagen mit simultaner aerober Schlammstabilisierung hat sich daneben die Grenze für die Wirtschaftlichkeit einer Umstellung auf separate Schlammfäulung in den letzten Jahren deutlich auf etwa 20.000 EW verschoben und eröffnet zusätzliches Potenzial für eine Steigerung der Klärgasproduktion. Schließlich besteht im Land Nordrhein-Westfalen ein nicht unerhebliches Nachrüstungspotenzial bei größeren Kläranlagen, die bisher noch nicht über eine Schlammfäulung bzw. eine Faulgasverstromung verfügen

Literaturverzeichnis

- ASUE (2005): BHKW-Kenndaten 2005. Module, Anbieter, Kosten. ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) und Energiereferat der Stadt Frankfurt, Kaiserslautern und Frankfurt.
- ASUE (2011): BHKW-Kenndaten 2011. Module, Anbieter, Kosten. ASUE (Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V.) und Energiereferat der Stadt Frankfurt, Kaiserslautern und Frankfurt.
- ATV-DVWK (2000): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, Arbeitsblatt 131, Hennef
- ATV-DVWK (2003): Merkblatt ATV-DVWK-M 368, Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, ATV-DVWK-Regelwerk
- DWA (2009): Merkblatt DWA-M 380, Co-Vergärung in kommunalen Klärschlamm faulbehältern, Abfallvergärungsanlagen und landwirtschaftlichen Biogasanlagen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, e.V.,
- Gretzschel, O.; Hansen, J.; Siekmann, K.; Jakob, J.; Schmitt, T.G. (2011): Neuberwertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz - NAWaS. Modul 2 - Weitergehende Untersuchungen. Kaiserslautern.
- LANUV-NRW (2013): Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV). Datenquellen: NIKLAS-KOM (kommunales Kläranlagenkataster) und ELWAS (elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem). Datenstand 2012
- Kristensen G. H., Jörgensen P. E., Strube R., Henze M. (1992): Combined Pre-Precipitation, biological Sludge Hydrolysis and Nitrogen Reduction – a Pilot Demonstration of integrated nutrient removal. In: War. Sci. tech. Vol. 26, No: 5-6, S 1067 – 1066.