

Klärschlammstabilisierung bei kleinen Anlagen

Prof. Dr.-Ing. Oliver Christ, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf

Dipl.-Ing. Detlef Wedi, ATM Abwassertechnik

Einleitung

Abwasser wird auch heute noch, trotz Energiewende, in der öffentlichen Diskussion kaum als Wertstoff sondern vielmehr als zu entsorgender Abfallstoff wahrgenommen. Dabei enthält Abwasser einen hohen Gehalt an Energie in Form von Strom und Wärme sowie einen nennenswerten Teil der für die Landwirtschaft notwendigen Nährstoffe. Vorzugsweise ist daher zunächst das Potenzial des Abwassers zu nutzen anstatt in den Naturhaushalt beispielsweise durch den Anbau von Energiepflanzen einzugreifen.

Derzeit entspricht der Strombezug der rund 3.000 bayerischen Kläranlagen dem von rund 180.000 Haushalten oder 630 GWh. Dafür werden die Abwässer der rund 12 Mio. Einwohner Bayerns zumeist in Anlagen nach dem Belebtschlammverfahren gereinigt. Während – bis auf sehr wenige Ausnahmen – für größere Anlagen ab 30.000 EW eine Faulung zur anaeroben Stabilisierung des Schlammes nahezu obligatorisch ist, erfolgt der Stabilisierungsschritt bei Anlagen unter 20.000 EW in der Regel energieintensiv durch die Zuführung von Luftsauerstoff zum Schlamm. Im Bereich zwischen 20.000 und 30.000 EW ist keine eindeutige technische Lösung anzutreffen.

Grund für diese verfahrenstechnischen Unterschiede in Abhängigkeit von der Ausbaugröße der Kläranlagen ist, dass simultan aerobe Schlammstabilisierungsverfahren gerade für kleinere Anlagen deutlich einfacher zu betreiben sind und die investitionsintensiven Anlagen zur Vorklärung, für die Anaerobbehandlung wie Faulbehälter, Faulgasaufbereitung und -verwertung entfallen.

Bei den größeren Anlagen hat sich die externe Faulung als Verfahren zur Schlammstabilisierung durchgesetzt, da hierbei die Belebungsbecken kleiner ausgeführt werden können und der Energiegehalt des anfallenden Schlammes genutzt werden kann. Zudem verringern sich der Sauerstoffbedarf und der Schlammfall dieser Anlagen deutlich, so dass sich vielfältige Vorteile für diese Verfahrenstechnik ergeben.

Aufgrund der Erreichung der Ziele zur Energiewende und nicht zuletzt auch wegen der steigenden Energiepreise und neu entwickelter technischer Anlagen sind die Grenzen der bisherigen Verfahrensdifferenzierung

- » Faulung des Klärschlammes ab einer Kläranlagengröße von 25.000 EW und
- » Aerobe Stabilisierung des Klärschlammes unterhalb einer Kläranlagengröße von 25.000 EW

neu zu hinterfragen.

Ziel ist somit die Beantwortung der Frage, unter welchen Randbedingungen die Umrüstung von der in Abb. 1 dargestellten Verfahrenstechnik auf die in Abb. 2 dargestellte unter energetischen, verfahrenstechnischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll ist.

Um das an einem konkreten Projekt zu demonstrieren, wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit ein Pilotprojekt unter fachlicher Leitung des Bayerischen Landesamts für Umwelt mit wissenschaftlicher Begleitung am Beispiel der Kläranlage Bad Abbach initiiert.

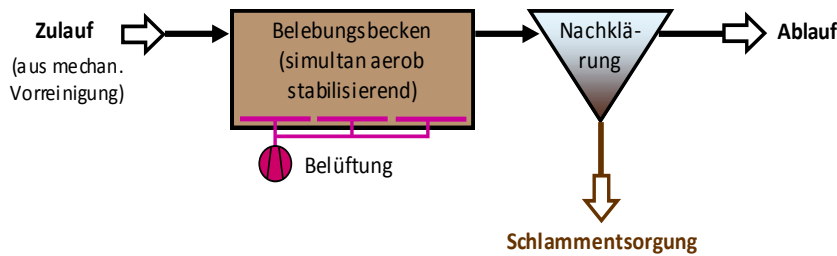


Abb. 1: Simultan aerobe Schlammstabilisierungsanlage, die derzeit insbesondere bis 25.000 EW eingesetzt wird

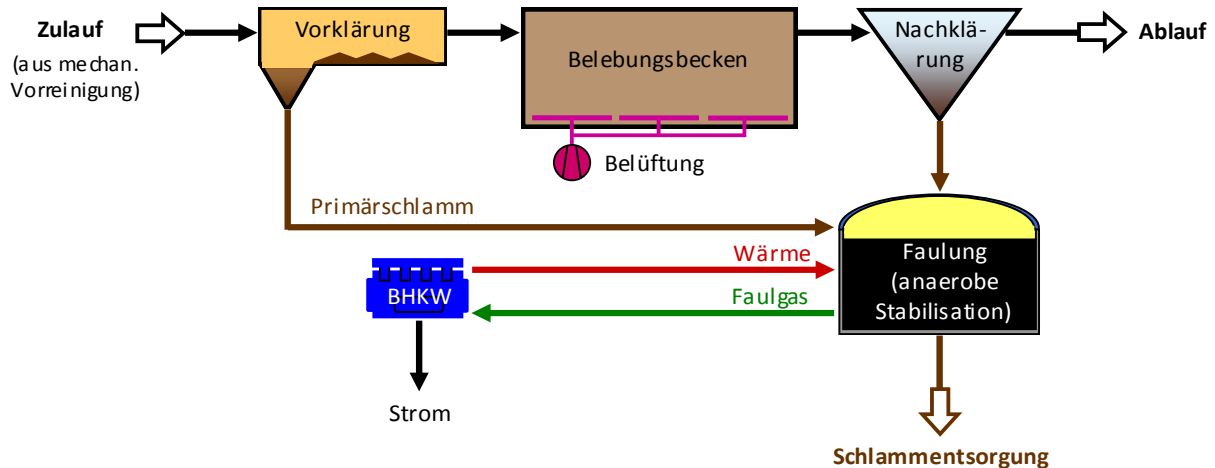


Abb. 2: Externe anaerobe Schlammstabilisierungsanlage (Faulung), die derzeit insbesondere ab 25.000 EW eingesetzt wird

Potenziale der Umrüstung zur anaeroben Stabilisierung

Aus der Tabelle 1 ist für den Bereich 10.000 bis 30.000 Einwohnerwerte ersichtlich, dass eine Kläranlage mit einer Faulung idealerweise zwischen 26 und 30 kWh an Strom pro Jahr und angeschlossenem Einwohnerwert verbraucht. Im Vergleich dazu benötigen Anlagen mit simultaner aerober Stabilisierung zwischen 31 und 35 kWh/(EW·Jahr).

Der Stromverbrauch liegt somit unvermeidbar um rund 18 % bei aerob stabilisierenden Anlagen höher als bei denen mit Faulung. Für eine Kläranlage mit einem mittleren Anschluss von 15.000 EW bedeutet das einen jährlichen Mehrverbrauch von rund 75.000 kWh oder von 15.000 € bei einem Strompreis von nur 0,20 €/kWh.

Dieser Mehrverbrauch von im Mittel 5 kWh/(EW·Jahr) setzt sich nach DWA-A 131 zusammen aus

- » dem höheren Schlammalter, das anstatt 10 bis 15 Tagen bei einer Faulung, im Fall der aeroben Stabilisierung 25 Tage beträgt und zu einem höheren Sauerstoffbedarf von rund 15 % führt
- » der fehlenden Vorklä-rung, so dass bei der Variante mit Faulung 25 bis 30 % weniger organischer Kohlenstoff (BSB₅) in der Belebungsanlage oxidiert werden muss.

Aus Tabelle 1 wird auch ersichtlich, dass der Strombezug noch weitaus stärker zu Gunsten der Anlage mit Faulung differiert, da diese über eine Eigenstromerzeugung durch die Nutzung des Faulgases verfügt. So haben Kläranlagen mit Faulung in der Größe zwischen 10.000 und 30.000 EW einen Strombezug zwischen 9 und 15 kWh/(EW·Jahr), während aerob stabilisierende Anlagen keine eigenen Stromerzeugung haben.

Belebtschlammanlagen mit Faulung produzieren gemäß Tabelle 1 zwischen 15 und 17 kWh/(EW·Jahr) Eigenstrom. Das entspricht einem spezifischen Faulgasanfall von rund 20 l/(EW d). Die Jahreskostensparnis durch die Eigenstromerzeugung beträgt für eine Modellanlage mit einer mittleren Belastung von 15.000 EW somit etwa 48.000 €/Jahr.

Tabelle 1: Idealwerte von Belebtschlammanlagen [nach: Handbuch „Energie in Kläranlagen“, 1999]

	Kläranlagengröße in EW				
	bis 5.000	bis 10.000	bis 30.000	bis 100.000	über 100.000
gesamter Strom-Verbrauch					
C + N-Elimination mit Faulung kWh/EW/a	-	30	26	23	20
C + N-Elimination mit simultaner Schlammstabilisierung kWh/EW/a	41	35	31	-	-
Strom-Bezug					
C + N-Elimination mit Faulung kWh/EW/a	-	15	9	5	2
C + N-Elimination mit simultaner Schlammstabilisierung kWh/EW/a	41	35	31	-	-

Neben der Stromkostensparnis lassen sich auch die Kosten für die Schlamm Entsorgung reduzieren, da durch eine Faulung weitaus mehr Feststoffe abgebaut werden als bei der aeroben Stabilisierung. Zudem wird bei der Entwässerung von ausgefaulten Schlämmen ein höherer Feststoffgehalt im Auszug erzielt.

In Tabelle 2 ist die Schlamm Bilanz für beide Verfahrensvarianten dargestellt. Es wird deutlich, dass bei einer Modellanlage (15.000 EW) mit Faulung etwa 15.600 € im Jahr an Schlamm Entsorgungskosten eingespart werden können.

Tabelle 2: Schlammparameter in Abhängigkeit der Reinigungsverfahren [berechnet nach ATV-DVGW-M 368, 2003]

	aerobe simultane Stabilisierung $t_{TS} = 25$ Tage	vor Faulung $t_{TS} = 15$ Tage $t_{VKB} = 1$ Stunde	nach Faulung $t_{R,FB} = 20$ Tage $\eta_{oTR} = 0,5$
TR-Fracht [g/E·Tag]	56,2	72 (PS + ÜS = 35 + 37)	47
Glühverlust [%]	65	70	54
TR nach Entwässerung [%]	26	-	28
$Q_{Schlamm}$ nach Entwässerung bei 15.000 EW [m ³ /Jahr]	1.180	-	920
spez. Entsorgungskosten [€/m ³]	60	-	60
Schlamm Entsorgungskosten [€/Jahr]	70.800	-	55.200

Insgesamt ergibt sich ein Kosteneinsparpotenzial für eine Modellanlage bei einem mittleren Anschluss von 15.000 EW bestehend aus

- » Verringerung des Stromverbrauchs durch die Feststoffentnahme der Vorklärung und der Reduzierung des Schlammalters (- 15.000 €/Jahr),
- » Substitution des Strombezugs durch die Eigenstromerzeugung (- 48.000 €/Jahr),
- » Reduzierung der Entsorgungskosten infolge der verringerten Schlammengen (- 15.600 €/Jahr)

von ca. 78.600 € im Jahr durch die Umrüstung von einer aerob simultan Schlammstabilisierungsanlage auf eine Belebungsanlage mit externer Faulung.

Bezogen auf den Energieverbrauch betragen die Stromeinsparung und die Stromsubstitution insgesamt 315.000 kWh/Jahr. Das entspricht auf Basis des deutschen Strommix' für das Jahr 2012 von rund 576 gCO₂/kWh [UBA, 2013] gut 180 Tonnen CO₂ im Jahr. Alternativ können für diese Ersparnis auch rund 100 Haushalte mit Strom versorgt werden obwohl an diese Kläranlage im Mittel nur knapp 7.000 Haushalte angeschlossen sind (2,2 Personen/Haushalt gem. Mikrozensus Bayern 2011)

Insgesamt kann an diesem Beispiel bereits abgeleitet werden, dass die Einsparungen an Kosten und Emissionen bei der Umstellung der Verfahrenstechnik auf eine Faulung bei einer mittleren Belastung von 15.000 EW erheblich sein können.

Die einwohnerspezifischen Einsparungen wurden aus diesem Beispiel in Tabelle 3 berechnet.

Tabelle 3: Mittlere jährliche einwohnerspezifische Einsparungen (mittel EW₆₀) durch die Umrüstung einer aerob simultanen Schlammstabilisierung auf eine Belebungsanlage mit Faulung (Basis: Strompreis 0,20 €/kWh; Schlamm Entsorgung 60 €/m³; CO₂-Äquivalent deutscher Strommix 576 gCO₂/kWh)

Maßnahme	Senkung Stromverbrauch	Reduzierung CO ₂ -Emission	Kosteneinsparung
BSB₅-Fracht-Reduzierung durch Vorklärung und Senkung von t_{TS} auf 15 Tage	5,0 kWh/EW·Jahr	2,9 kgCO ₂ /EW·Jahr	1,00 €/EW·Jahr
Eigenstromerzeugung durch Faulung	16,0 kWh/EW·Jahr	9,2 kgCO ₂ /EW·Jahr	3,20 €/EW·Jahr
Reduzierung der Schlammmenge	0,15* kWh/EW·Jahr	0,09* kgCO ₂ /EW·Jahr	1,04 €/EW·Jahr
Gesamt	21,15 kWh/EW·Jahr	12,19 kgCO₂/EW·Jahr	5,24 €/EW·Jahr

* Einsparung durch verringerte Transport-Emissionen von 104,4 gCO₂/(t·km) [Kolodziej, 2009] bei einer Transportentfernung von 50 km

Bezogen auf eine Anlagennutzungsdauer von n=20 Jahren, einem Realzins von i=3 % p.a. und einer Preissteigerungsrate inkl. Inflation (Strom- und Schlamm Entsorgungskosten) von r=2 % p.a. ergibt sich gemäß Kostenvergleichsrechnung nach LAWA, 2005 ein Diskontierungsfaktor der progressiv steigenden Kostenreihe von

$$DFAKRP(n=20a; i=3\%; r=2\%) = 18,0812$$

Damit ergibt sich ein Barwert für diese Kosteneinsparung von

$$BW = 5,24 \text{ €}/(\text{EW·Jahr}) \times 18,0812 = 94,75 \text{ €}/\text{EW} \text{ (Preissteigerung 2 \% p.a.)}$$

Bei einer angenommenen jährlichen Preissteigerung inkl. Inflation von 5 % p.a. ergäbe sich ein Barwert von

$$BW = 5,24 \text{ €}/(\text{EW} \cdot \text{Jahr}) \times 26,6260 = 139,52 \text{ €}/\text{EW} \quad (\text{Preissteigerung } 5 \% \text{ p.a.})$$

Damit die Umbaumaßnahme wirtschaftlich ist, dürfen die erforderlichen Investitionen der verfahrenstechnischen Umrüstung abzüglich des Barwerts von ohnehin fälligen Reinvestitionen für Instandhaltung und Leistungsanpassung dann maximal dem Barwert (BW) der Einsparungen entsprechen, so dass gelten muss:

$$(\text{BW der Investitionen} - \text{BW fällige Reinvestitionen}) \leq \text{Barwert der Einsparungen} \times \text{EW}_{60}$$

Erforderliche verfahrenstechnische Umrüstungen

Generell erfordert die Umstellung eines Belebtschlammverfahrens von einer simultanen, aeroben Schlammstabilisierung zu einem Verfahren mit Faulung zwingend die Errichtung

- » einer Vorklärung,
- » eines anaeroben Reaktors,
- » einer Gasverwertung,
- » einer Anlage zur Eindickung mindestens des Überschussschlammes sowie
- » Räumlichkeiten zur Aufnahme der erforderlichen Infrastruktur.

Bauliche und maschinelle Einrichtungen zur Klärschlammeindickung und -entwässerung sind in der Regel projektunabhängig zu betrachten und stellen keine speziellen Anforderungen für Anlagen mit Faulung dar. Da die künftigen Randbedingungen für eine geordnete Klärschlammverwertung, wie der Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung und der langfristig angelegten Nährstoffrückgewinnung, nahezu ausnahmslos eine weitgehende Entwässerung bedingen, werden auch kleinere Kläranlagen zunehmend mit entsprechend einfacheren Einrichtungen ausgerüstet.

Da sich in den meisten Fällen mit einer stationären Entwässerung wirtschaftliche Vorteile abzeichnen und Emissionen aus der Schlamm Lagerung erheblich minimiert werden, sollte dieses Anlagenteil bei der Umrüstung integriert werden. Dieser gilt aber nicht als generell kennzeichnendes Anlagenteil für die Umrüstung des Verfahrens.

Die Vorklärung kann konventionell in Form eines Absatzbeckens mit Schild- oder Saugräumer ausgeführt werden oder alternativ über eine dem Rechen nachgeschaltete Feinstsiebanlage, die nahezu die gleichen Leistungen zum Rückhalt von organischem Kohlenstoff liefert.

Der Überschussschlamm ist vor der Faulung auf etwa 4 bis 6 % einzudicken, um dessen Volumen zu reduzieren. Bei zu geringen Feststoffkonzentrationen steigt der thermische Energiebedarf, so dass die Anlage – zumindest im Winter – nicht wärmeautark betrieben werden kann. Hier empfehlen sich einfache Aggregate zur maschinellen Überschussschlammeindickung.

Besonderes Augenmerk bei der Anlagenumrüstung ist auf die Faulung zu richten. Konventionelle Faulbehälter sind in der Regel zu kostenintensiv, so dass nach alternativen Lösungen gesucht werden muss. So ergeben sich bei der Gestaltung des anaeroben Reaktors und der Gasaufbereitung sowie -verwertung erhebliche Kosteneinsparpotenziale, da in den vergangenen Jahren durch den Boom von Biogasanlagen zur Energiegewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen Systemanlagen auf den Markt gekommen sind. Diese Anlagen sind einerseits kostengünstiger, andererseits erfüllen sie nicht in je-

Die Gasspeicherung erfolgt wie bei der konventionellen Schlammfäulung in externen Gasbehältern, die in der Regel als Niederdrucksystem betrieben werden. Eine nennenswerte Gasspeicherung innerhalb der Faulbehälter ist aufgrund der starren Behälterbauweise und der damit eingeschränkten Flexibilität gegenüber Druckschwankungen nicht möglich.

Biogasanlagen zur anaeroben Klärschlammbehandlung

Landwirtschaftliche Biogasanlagen zur Vergärung von Gülle oder nachwachsender Rohstoffe wurden durch die attraktiven Stromeinspeisevergütungen nach dem EEG in den vergangenen Jahren verstärkt errichtet. Aufgrund der hohen Stückzahl dieser Anlagen und der vergleichsweise einfachen Bauart werden diese von einer Vielzahl von Anbietern zu vergleichsweise günstigen Konditionen standardisiert angeboten.

Diese Anlagen unterscheiden sich im Wesentlichen von der Art der Durchmischung, dem Eintrag der Wärme sowie der Konstruktion des Reaktors.

Biogasanlagen mit integriertem Biogasspeicher bilden die Mehrzahl der Anlagen. Hierbei kann auf einen externen Gasspeicher gänzlich verzichtet werden, so dass die Gasverwertungsanlage direkt aus dem Reaktor gespeist werden kann.

Bei diesem Reaktortyp handelt es sich grundsätzlich um isolierte, runde Behälter mit flacher Sohle aus Beton oder Stahl. Das Dach dieses Reaktors bildet eine elastische Folie, die an einer Stahl- oder Holzstützkonstruktion befestigt ist (Abb. 4). Ebenfalls finden sich Systeme auf dem Markt, bei denen anstatt der Außenfolie ein Metaldach eingesetzt wird.

Als Dachkonstruktion sind drei unterschiedliche Verfahren marktbeherrschend:

Einfache Folienabdeckung: der Behälter wird mit einer gasdichten, meist vorgespannten Folie abgedeckt. Der Druck im Gasraum stellt sich je nach Entnahme und Produktion von Biogas ein. Da insbesondere BHKW's mit einem konstanten Vordruck betrieben werden sollten, eignen sich diese Dachsysteme weniger, wenn auf eine separate Druckreglungsanlage verzichtet werden soll.

Doppelmembranen: unter der gasdichten Außenfolie wird eine weitere Folie abgehängt. Diese schließt den dazwischen liegenden Raum mit Umgebungsdruck ein. Der Druck im Faulgasraum ist somit weitgehend unabhängig vom Gasvolumen im Reaktor.

Tragluftdach: unter der gasdichten Außenfolie wird eine weitere Folie abgehängt. Der Raum zwischen den beiden Folien wird durch ein Gebläse mit einem Überdruck beaufschlagt. In der Folge steigt der Gasvordruck im Faulraum, der über die Gebläseleistung steuerbar ist.

Grundsätzlich sind die Reaktoren mit einer Wärmedämmung mit daran anschließender Außenverkleidung versehen. Die Durchmischung des Reaktorinhaltes erfolgt oftmals durch Propeller- oder Paddelrührwerke (Abb. 5).



Abb. 4: Behälter mit Doppelmembrandach

Die Beheizung erfolgt in der Regel mit innenliegenden Wärmeübertragern. Diese werden bei Betonbehältern direkt als Leitung an der Innenwand angebracht (Abb. 6) oder bei Stahlbehältern flächig ausgeführt, indem die Wärmeübertragungsleitungen die Stahlausenwand umschließen.



Abb. 5: Tauchmotorrührwerk (links) und Langachsenrührwerk (rechts)

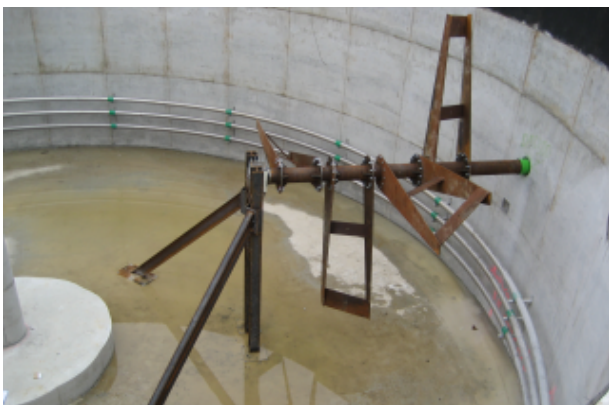


Abb. 6: Rührwerk System Schrack, 7,5 kW mit innenliegender Rohrheizung (Volumen Faulbehälter: 1.000 m³)



Als Nachteile für den Einsatz dieser Systeme als Faulbehälter auf Kläranlagen sind zu nennen:

- » unzureichende Durchmischung aufgrund der hydraulisch ungünstigen eher flachen Siloform des Reaktors mit den Folgen eines spezifisch geringeren Gasertrages sowie der Bildung von Toträumen.
- » unzureichende Wärmeübertragung durch die innenliegenden Übertragungsflächen/-leitungen mit den Folgen einer vollständigen oder lokalen Untertemperierung des Reaktorinhaltes sowie einem stetig abnehmenden Wärmeübergang aufgrund von Verkrustungen der Übertragungsflächen/-leitungen.
- » erhöhte Methanemissionen und Gasverluste aufgrund von Gasdiffusion über die Folie und durch Undichtigkeiten an den Folienanschlüssen
- » geringere Nutzungsdauer und damit kürzere Abschreibungszeiträume
- » höherer Überwachungs- Reparatur- und Instandhaltungsaufwand für das Betriebspersonal durch die anfälligere Bau- und Maschinenteknik

Insgesamt kann festgehalten werden, dass dieser Reaktortyp trotz eventueller Nachteile mit verfahrenstechnischen Modifikationen wie

- » einer hydraulisch optimierten sowie einer von Außen zugänglichen, energieminierten Umwälzung und
- » einem Volumenaufschlag für die Berücksichtigung von Toträumen und Schaumentwicklung

für einen Einsatz auf einer kommunalen Kläranlage als Faulbehälter ~~durchaus~~ in Betracht zu ziehen ist.

Zwingend notwendig erscheint es, dass die Umwälzeinrichtungen von Außen zugänglich sind, so dass die Wartung und Instandsetzung dieser für eine leistungsfähige Faulung essentiellen Aggregate auch ohne prozessrelevante Außerbetriebnahme des Reaktors erfolgen kann.

Verwertung von Faulgas

Grundsätzlich stehen für die Faulgasverwertung die folgenden Verfahren mit unterschiedlichen Leistungsdaten und Einsatzbedingungen auf dem Markt zur Verfügung:

- » Verbrennungsmotoren – Block-Heizkraft-Werke (BHKW)
- » Stirlingmotoren
- » Mikrogasturbinen
- » Brennstoffzellen

Von Bedeutung für die eher kleinen Faulbehälter, die mit einem spezifischen Gasanfall von rund 30 Litern pro Einwohnerwert und Tag zu bemessen sind, kommen hierbei derzeit nur Block-Heizkraftwerke (BHKW) und Mikrogasturbinen in Frage.

Gas-BHKW's sind dabei die am meisten eingesetzte Verstromungstechnik im Biogasbereich. Es handelt sich hierbei meist um Viertakt-Motoren nach dem Gas-Otto-Prinzip. Die Zündung erfolgt mittels Zündkerzen. Das Leistungsspektrum reicht von ca. 15 kW_{el.} bis zu mehreren MW_{el.} Gas-BHKW zeichnen sich durch relativ lange Standzeiten und einen hohen Gesamtwirkungsgrad, bei eingeschränktem Teillastverhalten aus [Aschmann, 2011].



Leistungsdaten eines konventionellen Gas-Otto-Motors:

- » mechanische Energie an der Kurbelwelle: ca. 40 % bezogen auf den Energieeinsatz (ca. 25 - 45 % elektrische Leistung bezogen auf den Energieeinsatz)
- » Wärmeenergie aus Motorkühlung: ca. 25 %
- » Wärmeenergie aus Abgas: ca. 30 %
- » Abstrahlungswärme (Verluste): ca. 5 %
- » Gesamtwirkungsgrad: bis zu 90 %

Trotz der zahlreichen Anbieter dieser Aggregate liegen bisher kaum systematische Erfahrungen mit dem Betrieb kleiner BHKW im Bereich unter 30 kW_{el} auf Kläranlagen vor.

Die Mikrogasturbinen hingegen stellen eine relativ neue Technik bei der Verstromung von Biogas dar. Die Verbrennung des Brennstoffes erfolgt in einer Brennkammer, wodurch ein Turbinenrad angetrieben wird. Das Leistungsspektrum liegt im Bereich von 30 kW_{el} bis 200 kW_{el}. Der große Vorteil dieser Technik liegt in den relativ geringen Emissionswerten im Abgas und den langen Wartungsintervallen. Nachteilig sind die nach wie vor hohen Investitionen und der relativ geringe elektrische Wirkungsgrad (< 30 %) [Aschmann, 2011]. Noch wenige Erfahrungen liegen über die erforderlichen Intervalle zum Tausch der Turbine o.Ä. vor.

Vorteile einer Mikrogasturbine

- » kostengünstige Wartung (Intervall 8.000 Bh, 0,6 bis 1,0 Ct/kWh el.)
- » Mindestgehalt an Methan bei 35 %
- » gutes Teillastverhalten
- » niedrige Emissionswerte

Wesentliche Nachteile einer Mikrogasturbine

- » Gasvordruck von 4 bar erforderlich
- » geringer elektrischer Wirkungsgrad < 30%

Pilotprojekt Bad Abbach

Für eine fundierte Entscheidung zum Umbau zu einer Belebungsanlage mit Faulung, ergeben sich bezüglich der dargestellten Berechnungen und der zu erwartenden Kosten des Umbaus noch zahlreiche offene Fragen, die im Rahmen eines Pilotprojekts beantwortet werden sollen:

- » Lässt sich das in Tabelle 3 dargestellte theoretische Einsparpotenzial in der Praxis realisieren?
- » Sind die Kosten des Umbaus wirtschaftlich darstellbar?
- » Wo liegt unter welchen Randbedingungen die Grenze der Umrüstung?

Um unter anderem diese Fragen zu beantworten, hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG) In einem Verfahren wurde die Kläranlage Bad Abbach als Pilotanlage ausgewählt, an der beispielhaft die genannten Fragen zu beantworten sind.

Die Kläranlage Bad Abbach

Die im Jahr 1992 in Betrieb genommene Kläranlage Bad Abbach (Abb. 7) behandelt häusliches und gewerbliches Abwasser aus Bad Abbach und 6 weiteren Ortsteilen.

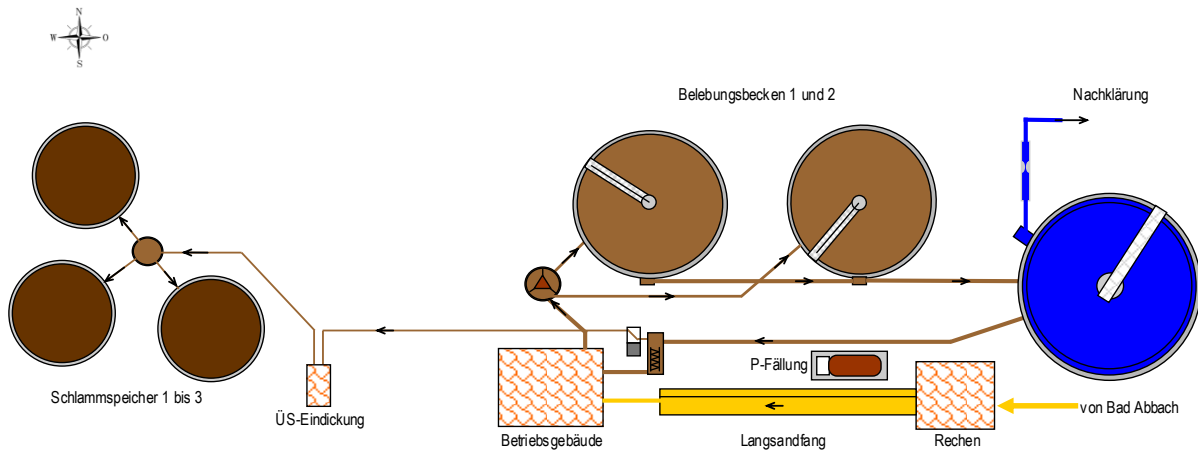


Abb. 7: Lageplan der Kläranlage Bad Abbach im IST-Zustand

Die mechanisch-biologische Kläranlage wurde für eine Ausbaugröße von 10.000 EW ausgelegt. In den nächsten 20 Jahren wird von einem Bevölkerungszuwachs in den angeschlossenen Gemeinden ausgegangen, so dass die künftige Größe der Kläranlage auf insgesamt 17.000 EW ausgebaut werden soll.

Neben der mechanischen Abwasservorbehandlung – bestehend aus Rechen und Sandfang – setzt sich der biologische Teil der Kläranlage Bad Abbach aus der Belebungsanlage mit intermittierender Nitrifikation/Denitrifikation und der Nachklärung zusammen.

Insgesamt ist die Kläranlage Bad Abbach aufgrund ihrer Größe, der Ausbaunotwendigkeiten und der energetischen Vergleichsmöglichkeiten für eine Pilotanlage zur Klärung der genannten Fragestellungen prädestiniert.

Da das Volumen der Belebungsanlage zur aeroben simultanen Schlammstabilisierung künftig nicht mehr ausreicht, müsste dieses von 3.000 m³ auf bis zu 6.500 m³ vergrößert werden. Hierfür ergäbe sich eine Investition von geschätzten 1,2 Mio. Euro. Diese ohnehin fällige Investition bei Beibehaltung der bisherigen Verfahrenstechnik, kann aber beim Umbau auf eine Belebungsanlage mit externer anaerober Schlammstabilisierung vollständig entfallen, da das Volumen der Belebungsbecken dann ausreichend ist.

Somit ist es bei der Kläranlage Bad Abbach mit begrenztem Kostenrahmen möglich, wertvolle Erfahrungen zu Kostenstrukturen, Betrieb und Einsparpotenzialen bei der Umrüstung zu gewinnen und diese für vergleichbare Projekte zu verallgemeinern.

Um eine Basis für den Energiebedarf für die noch vorhandene Verfahrenstechnik zu erstellen, wurde eine Energieanalyse als Referenz erstellt. Diese wird nach erfolgtem Probetrieb fortgeschrieben und vergleichend bewertet.

Erwartungsgemäß zeigt sich bei der Referenzanalyse, dass der wesentliche Anteil des Energieverbrauchs auf die biologische Reinigung – und hierbei besonders auf die Sauerstoffversorgung der Belebungsbecken – entfällt. Durch den Einbau einer neuen Druckbelüftungsanlage im Rahmen des Pilotprojekts sank der spezifische Energieverbrauch von 45 kWh/(EW·a) auf nunmehr nur noch 29 kWh/(EW·a). Dieser neue Energieverbrauchswert ist für den Verfahrensvergleich die zu verwendende Basis, die sich gut mit den Idealwerten der Tabelle 1 deckt.

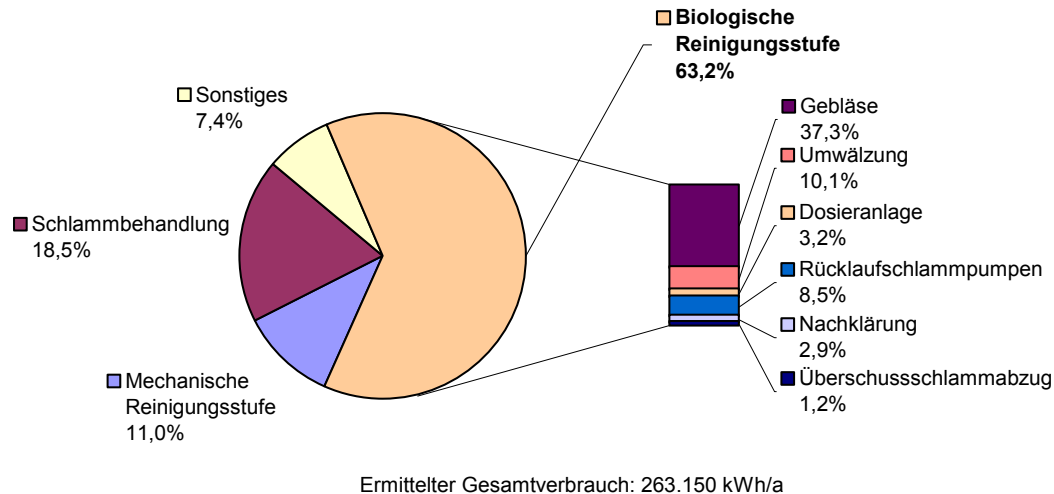


Abb. 8: Verteilung des Energieverbrauchs im IST-Zustand mit Fokus auf die biologische Reinigung (Stand März 2013)

Künftige Verfahrenstechnik

Im Jahr 2013 wird die Kläranlage Bad Abbach (Abb. 9) um eine Vorklärung, eine anaerob-mesophile Klärschlammfäulung sowie eine anlageneigene Schlammmentwässerung erweitert werden.

Das anfallende Klärgas wird in einem im Faulbehälter integrierten Gasspeicher mit einem Nutzvolumen von rund 230 m³ bei Bedarf zwischengespeichert mit einem Blockheizkraftwerk energetisch verwertet. Die Inbetriebnahme ist für den Herbst 2013 geplant.

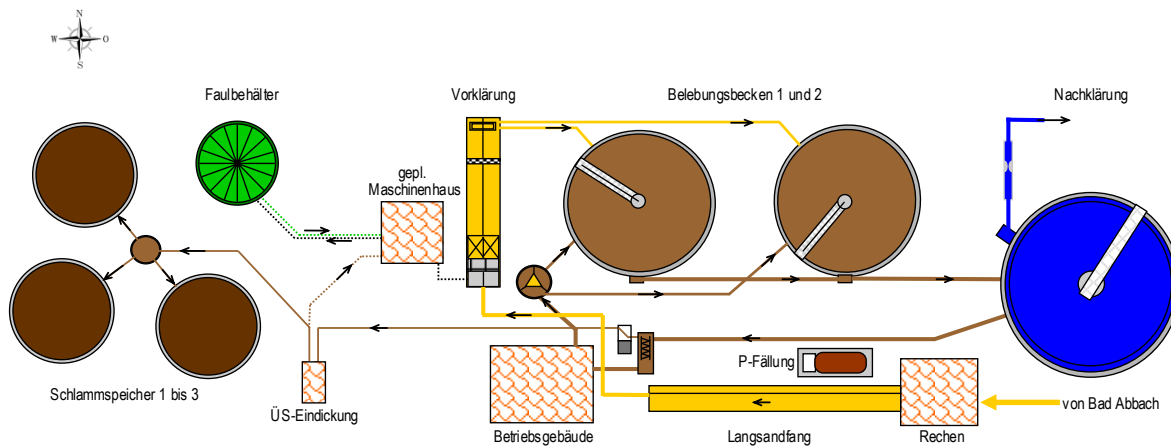


Abb. 9: Lageplan der Kläranlage Bad Abbach im SOLL-Zustand

Wirtschaftlichkeit der Umrüstung

Investitionen

Aus den Ausschreibungsergebnissen wurden diejenigen Kosten bewertet, die zur grundsätzlichen Umstellung des Verfahrens im Sinne des Pilotprojektes erforderlich sind. Da einzelne Gewerke, wie das Betriebsgebäude, nur anteilig und die Belüftungsanlage nicht anzurechnen sind, die Überschussschlamm eindickung jedoch schon vorhanden war, wurden für eine erste verallgemeinerte Betrachtung folgende Annahmen getroffen:

Eine entsprechende Anlage zur Eindickung des Überschussschlammes würde eine Investition von netto etwa 80.000 € erfordern.

Das Betriebsgebäude nur zur Aufnahme der Infrastruktur und der besonderen Einrichtungen wie Gasaufbereitung, BHKW, Eindickung, Pumpen und Schaltanlage erfordert eine Fläche von 100 m² oder ein anzurechnendes Gebäudevolumen von 500 m³. Das in Bad Abbach geplante Betriebsgebäude umfasst noch zusätzliche Funktionen und wird daher nur anteilig berücksichtigt.

Trotz der derzeit ungewöhnlich hohen Baupreise wurde für die Vorklärung der volle Angebotspreis inkl. Baumeisteranteile von 160.000 € zu Grunde gelegt, auch wenn die Ausführung in Bad Abbach durch die pilotprojektbedingte Zweiteilung des Beckens aufwendiger ist als für einstraßige Vorklärbecken.

Bei den Angebotspreisen für die Gasverwertung ergaben sich mit Summen von 45.000 bis 90.000 € erhebliche Unterschiede für das betriebsfertige BHKW mit Schaltanlage. Dies deutet darauf hin, dass diese Größenordnung für BHKW noch nicht als Standard gelten kann. Berücksichtigt wird im Folgenden die anteilige Vergabesumme von 45.000 € für das betriebsfertige BHKW.

Die Kosten zur Schlammfäulung setzen sich aus dem vergebenen Systempreis des Anaerobreaktors, der Sohlplatte, den Pumpen und Verrohrungen sowie der anteiligen Schaltanlage zusammen und folgen hier dem Ausschreibungsergebnis.

Neben der Mehrwertsteuer von 19% wurde für die gesamten Nebenkosten auf die hier beschriebenen Beträge ein Aufschlag von 15% hinzugerechnet. Daraus ermittelt sich für die geplante, nominelle Ausbaugröße von 17.000 EW eine Summe in Höhe von insgesamt 1,30 Mio. €, die sich anteilig gemäß Abb. 10 aufteilt.

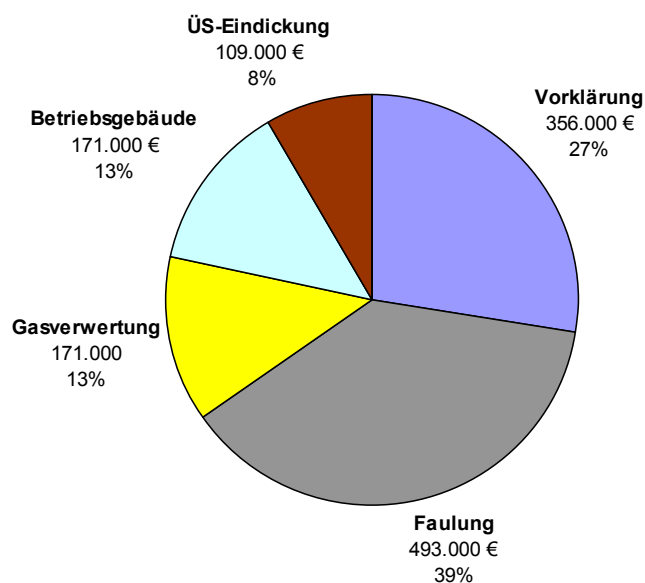


Abb. 10: Investitionen zur Verfahrensumstellung (Σ: 1,3 Mio. €) bei der Kläranlage Bad Abbach

Der Anteil der Maschinenteknik an den Investitionen beträgt 640.000 € bzw. knapp 50 %.

Betriebskosten

Durch die Verfahrensumstellung werden insbesondere die in Tabelle 4 dargestellten Parameter der laufenden Kosten beeinflusst. Hierbei wurde die positive Kostenbeeinflussung bereits in Tabelle 3 berücksichtigt. Hierzu wurden Standardwerte aus der Literatur angesetzt, die durch die Ergebnisse aus dem Pilotprojekt Bad Abbach verifiziert werden müssen.

Tabelle 4: Beeinflussung der Betriebskosten durch die Verfahrensumstellung

Positiv	Negativ
Erzeugung von Strom und Abwärme	zusätzlicher Energiebedarf für die erweiterten Anlagenteile
verringerte Menge des Überschussschlammes	steigende Servicekosten, insb. für die Gasverwertung
verringertes Bedarf an Polymeren für Eindickung und Entwässerung	steigender Personalbedarf
verringertes Schlammanfall	
geringerer Energiebedarf für den biologischen Teil	

Nachdem sich die negativ auswirkenden Betriebskosten für die umgestellte Verfahrenstechnik nur bedingt prognostizieren lassen, wird zunächst ein Ansatz von jährlich 1,0 % bezogen auf die Maschinenteknik in Höhe von 6.400 €/a veranschlagt. Noch nicht berücksichtigt ist ein ggf. erforderlicher, zusätzlicher Personalbedarf, der sich aus der Zunahme der verfahrenstechnischen Teilprozesse ergeben könnte. Sobald hierzu gesicherte Kenntnisse aus dem Anlagenbetrieb vorliegen, werden diese Kosten bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einbezogen.

Vergleich der Kostenbarwerte

Um einen Kostenbarwert für die Umrüstung zu berechnen, wird wiederum von einem realen Zinssatz von 3 % p.a. und einem vergleichsweise kurzen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ausgegangen. Der sonst übliche Zeitraum von 40 Jahren für Bautechnik in Massivbauweise wird für die eingesetzten Systemanlagen halbiert, so dass die Kostenbetrachtung eher konservativ ausfällt. Unter anderem ist die realistische Einschätzung der Nutzungszeiträume für die angepasste Bau- und Maschinenteknik ein Ergebnis, das durch das Pilotprojekt Bad Abbach gewonnen werden soll.

Für die abzuschätzenden Reinvestitionen werden zunächst nach 10 Jahren Kosten von einem Drittel der Aufwendungen für die Maschinenteknik angesetzt, somit also 213.000 €.

Der Barwertfaktor

$$BW = DFAKE(3\%, 10a) * AFAKE(0\%, 10a))$$

für die Reinvestition beträgt somit 0,7441, so dass sich ein Barwert von 159.00 € errechnet.

Bezogen auf die laufenden zusätzlichen Kosten von jährlich 6.400 € ergibt sich ein Barwert von 95.000 € (DFAKRP = 14,8775) über den Zeitraum von 20 Jahren.

Insgesamt berechnet sich der Projektkostenbarwert somit zu:

Investition	1.300.000 €
Reinvestition	159.000 €
laufende Kosten	95.000 €
Summe	1.554.000 €

In Abb. 11 dargestellt ist die Abhängigkeit der Barwerte der Einsparungen bezogen auf die angeschlossenen Einwohner sowie der Projektkostenbarwert der Umrüstung, der vereinfachend als konstant zu o. g. 1.553 Mio. € angenommen wurde. Die Barwerte der Einsparungen wurden aus der Tabelle 3 bereits zu 94,75 €/EW bei 2 % bzw. 139,52 €/EW bei 5 % Preissteigerungsrate abgeleitet.

Aus Abb. 11 ist ersichtlich, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Umrüstungsmaßnahme in Abhängigkeit von der Preissteigerungsrate bei den Strom- und Schlammensorgungskosten angeben lässt.

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die prognostizierten Kosteneinsparungen auf Standardwerten beruhen, die im Verlauf des Pilotprojekts zu verifizieren sind.

Die Wirtschaftlichkeit einer Umrüstung ist gemäß Abb. 11 basierend auf dem jetzigen Kenntnisstand gegeben bei folgenden mittleren angeschlossenen Einwohnerwerten:

11.000 EW bei einer Preissteigerungsrate von 5 % p. a.

16.000 EW bei einer Preissteigerungsrate von 2 % p. a.

20.000 EW ohne Berücksichtigung einer Preissteigerungsrate

Diese mittleren Anschlussgrößen setzen voraus, dass keine Investitionen in den biologischen Teil der bestehenden Anlage erforderlich sind.

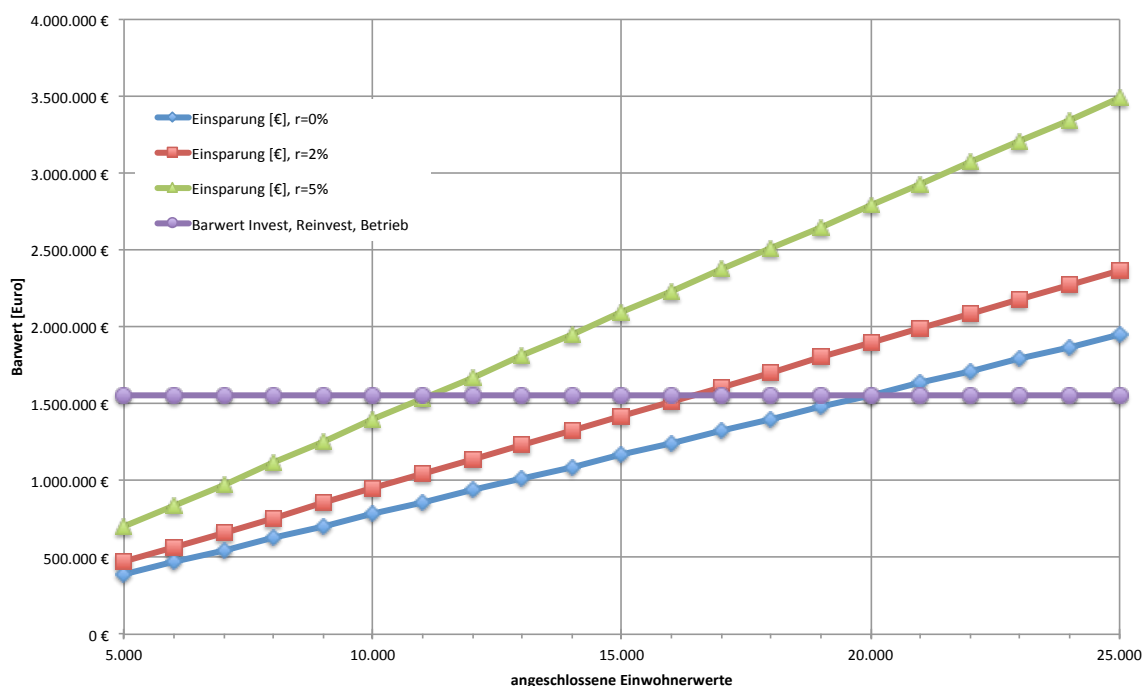


Abb. 11: Projektkostenbarwerte der Einsparungen durch die Umrüstung zu den Ausgaben in Abhängigkeit von den angeschlossenen Einwohnerwerten und der Preissteigerung r für die Kosten von Strom und Schlammentsorgung

Für das Pilotprojekt Bad Abbach zeichnet sich somit ab, dass die Umrüstung eine wirtschaftliche Maßnahme darstellt. Die zu erwartende CO₂-Einsparung unterstreicht diese Entscheidung zudem.



Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung der Energiewende kann dabei nur durch einen Energie-Drei-Sprung gelingen, der sich zusammensetzt aus

1. **Energieeinsparung** zum Beispiel durch das Abschalten nicht zwingend für die Reinigungsleistung benötigter Aggregate
2. **Energieeffizienzsteigerung** zum Beispiel durch den Austausch veralteter Aggregate, durch eine angepasste Verfahrenstechnik und durch eine belastungsabhängige Anlagenregelung
3. **Nutzung regenerativer Energiequellen** wie zum Beispiel den Klärschlamm, von Co-Substraten aber auch den Wärmegehalt des Abwassers

Insbesondere Kläranlagen ab einer mittleren Belastung von rund 10.000 Einwohnerwerten, die über eine aerobe, simultane Schlammstabilisierung verfügen, sind aufgerufen über einen Umbau zu einer Belebungsanlage mit Klärschlammfäulung zur Energieerzeugung nachzudenken.

Selbst wenn keine bautechnische Erweiterung der bestehenden aeroben Verfahrenstechnik erforderlich ist, empfiehlt sich ab 10.000 EW die Beauftragung einer individuellen Wirtschaftlichkeitsstudie.

Besonders vorteilhaft ist es zudem, wenn in der Region Co-Substrate wie Fette verfügbar sind, mit denen der Faulgasertrag und damit die Eigenstromerzeugung in der neu zu errichtenden Faulung gesteigert werden kann. Hier ist dann jedoch die Leistungsfähigkeit der Kläranlage insgesamt zu überrechnen.

Für Anlagen, bei denen sich keine direkten wirtschaftlichen Vorteile der Umrüstung ergeben, sind aber grundsätzliche Überlegungen nach einem regionalen Schlammbehandlungskonzept anzustellen.

Insgesamt ist es auch auf kleineren Kläranlagen zu vermeiden, dass energiereicher organischer Kohlenstoff im Abwasser durch Oxidation – also durch die energieintensive Zuführung von Luftsauerstoff – stabilisiert wird und dieser Energiegehalt in der Faulung oder in der thermischen Verwertung verloren geht.

Um der dargestellten Umrüstung den Weg für weitere Kläranlagen zu bereiten, hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit die Anlage in Bad Abbach als Pilotanlage zur Demonstration der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit ausgewählt. Zudem werden die Betriebsparameter vor und nach der Umrüstung durch eine wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens aufgenommen und bewertet.

Erfreulicherweise ist festzuhalten, dass dieses Pilotprojekt von den Anbietern entsprechender Ausrüstung interessiert aufgenommen und verfolgt wurde. Vor allem für den Anaerobreaktor und der Gasverwertung wurde durch das Projekt ein neues Marktumfeld aufgezeigt. Trotz der im Vergleich zu rein landwirtschaftlich genutzten Biogasreaktoren erhöhten Anforderungen, insbesondere an die Sicherheitsausrüstung und die Redundanz, konnte ein sehr günstiger Angebotspreis erzielt werden. Es ist damit zu rechnen, dass weitere Hersteller diese Anlagengrößen standardmäßig anbieten werden und sich so dauerhaft ein günstiges Preis-Leistungsverhältnis ergeben wird. Gleiches gilt für den Markt kleinerer BHKW, der sich durch die allgemeinen Tendenzen zur dezentralen Energieerzeugung noch vergrößern wird.

Es bleibt zu hoffen, dass noch viele Kläranlagenbetreiber dem Beispiel von Bad Abbach folgen, um ihren Beitrag zur Energiewende zu leisten.

Danksagung

Viele der hier aufgeführten Daten und Diskussionen sind dem laufenden Pilotprojekt Bad Abbach entlehnt. Ein solches Projekt wird naturgemäß durch viele Personen und Institutionen getragen. Für die ausgezeichnete fachliche Unterstützung, die engagierte Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Anregungen auch beim Verfassen dieses Beitrags danken die Autoren den Projektbeteiligten:

Herrn Ersten Bürgermeister Wachs, Markt Bad Abbach
Herrn Brunner, Markt Bad Abbach
Herrn Holzhauser, Markt Bad Abbach
Herrn Krückl, Markt Bad Abbach
Herrn Fiedler, Markt Bad Abbach
Herrn LMR Dipl.-Ing. Englmann, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
Herrn LChemD Dr. Beck, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit
Herrn BOR Dipl.-Ing. Bleisteiner, Bayerisches Landesamt für Umwelt
Frau Dipl.-Ing. Reutelshöfer, Bayerisches Landesamt für Umwelt
Herrn Dipl.-Ing. Haberl, Wasserwirtschaftsamt Landshut
Herrn Dr.-Ing. Weigel, BBI Bauer Beratende Ingenieure GmbH
Herrn Dipl.-Ing. Christensen, BBI Bauer Beratende Ingenieure GmbH

Literatur

1. und 2. Zwischenbericht zum Pilotvorhaben „Energetische Optimierung von Kläranlagendurch Nachrüstung einer anaeroben Klärschlammbehandlung“; Wissenschaftlich-ingenieurtechnische Begleitung der Optimierung der Kläranlage Bad Abbach durch das Ingenieurbüro ATM Abwassertechnik und die Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Braunschweig/Triesdorf vom 12/2011 und 11/2012
- Aschmann, V., Effenberger, M., 2011: Marktübersicht BHKW; Arbeitsgruppe IV im Biogas Forum Bayern; C.A.R.M.E.N. e. V., Nr. IV -9/2011
- ATV-DVGW-M 368, 2003: Biologische Stabilisierung von Klärschlamm, ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.; Merkblatt ATV-DVWK-M 368; ISBN 3-924063-52-4; Hennef, April 2003
- DWA-A 131, 2000: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2000): Arbeitsblatt A 131, Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen, ISBN 3-933707-41-2
- Handbuch Energie auf Kläranlagen, 1999: Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen
- Kolodziej, Andrea, 2009: Daten zum Verkehr, Ausgabe 2009, Umweltbundesamt, Download vom 20.05.2013, 13:20 Uhr: <http://energiewende-oberland.de/download/C5b0132ddX1384d2710f7XY3dc3/DatensammlungVerkehr.pdf>
- LAWA, 2005: Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen (KVR-Leitlinien), Wirtschaftlichkeitsfragen in der Wasserwirtschaft, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser LAWA, 2005
- Schmitt et al., 2011: „Neubewertung von Abwasserreinigungsanlagen mit anaerober Schlammbehandlung vor dem Hintergrund der energetischen Rahmenbedingungen und der abwassertechnischen Situation in Rheinland-Pfalz“, Studie des Zentrums für innovative Abwasserreinigung an der Universität Kaiserslautern tectraa, Schlussbericht Dezember 2011



UBA, 2013: Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2011 und erste Schätzungen 2012, Umweltbundesamt, Download vom 20.05.2013, 12:30 Uhr: http://www.umweltdaten.de/publikationen/weitere_infos/4488-0.pdf

Anschriften der Autoren

Prof. Dr.-Ing. Oliver Christ
Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Steingruberstraße 2
91746 Weidenbach
Telefon: 09826/654-229
Email: oliver.christ@hswt.de

Dipl.-Ing. Detlef Wedi
ATM Abwassertechnik
Friedrich-Seele-Str. 1b
38122 Braunschweig
Telefon: 0531 / 57 33 43
Email: dw@ib-wedi.de