

Stirling-Motor zur Verstromung von Biogas mit nur geringem Heizwert und problematischen Inhaltsstoffen im großtechnischen Einsatz auf einer Kläranlage

Teil 2: Aufbau des Stirling-Motor-BHKW, Betriebsergebnisse, Fazit und Ausblick^{*)}

Karin Heinrich (Berlin), Steffen Heinrich (Niederfrohna), Mirko Knoth und Peter Philipp (Burgstädt)

Zusammenfassung

Der Zweckverband Frohnbach erprobt seit dem Jahr 2010 in Niederfrohna (Sachsen) ein leistungsstarkes Stirling-Motor-Blockheizkraftwerk (BHKW) zur Verstromung von Klärgas als Alternative zum Otto-Motor-BHKW. Einer aufwendigen Entfernung von Siloxanen aus dem Klärgas sowie regelmäßiger und besonderer Wartungsmaßnahmen bedarf es bei einer solchen Maschine nicht, denn die Verbrennung findet außerhalb des Motors statt. Das Aggregat hat weder Zündkerzen noch Ventile und kommt zudem ohne Schmiersystem aus. Es ist für mehr als 100 000 Betriebsstunden konstruiert. Einmaliger jährlicher Service (Inspektion) reicht aus. Betriebskosten und Personalaufwand sind vergleichsweise gering.

Im Volllast-Betrieb hat das Stirling-Motor-BHKW eine maximale elektrische Leistung von rund 38 kW bei einer thermischen Nutzleistung von rund 120 kW gezeigt. Der thermische Wirkungsgrad liegt sowohl im Teillastbereich als auch unter Volllast bei nahezu gleichbleibend etwa 70 Prozent. Es sind elektrische Wirkungsgrade von fast 30 Prozent und Gesamtwirkungsgrade von über 90 Prozent erreichbar. Der maximale Durchsatz an Klärgas beträgt etwa $27 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$.

Bislang läuft das Stirling-Aggregat problemlos. Die im Stirling-Motor-BHKW verwirklichte kontinuierliche äußere Verbrennung mit interner Luftvorwärmung lässt sich mittels Lambdasonde gut regeln und führt zu sehr geringen Abgasemissionen. Somit liegt der Einsatz des Stirling-BHKW auch für die Verstromung diesbezüglich wesentlich problematischerer und in der Zusammensetzung weitaus stärker schwankender Brennstoffe, wie Synthese-, Fackel- bzw. Deponie- sowie Schwachgase etwa aus der Biogasaufbereitung nahe. Für entsprechende Anwendungen sind die Versuchsbedingungen der durchgeführten Erprobung, die technischen Daten und die gefundenen Kennwerte ausführlich beschrieben.

Schlagwörter: Abwasserreinigung, kommunal, Klärgas, Brennstoff, Abfallprodukt, Industrie, Elektrizitätserzeugung, Stirling-Motor, Stand der Technik, Pilotanlage, Erfahrungsbericht

DOI: 10.3242/kae2014.04.004

Abstract

Stirling Engine for the Conversion into Electricity of Biogas with a Small Heating Value only and Problematic Contents in Full Scale Employment in a Wastewater Treatment Plant
Part 2: Construction of the Stirling engine CHP, operating results, conclusion and outlook

Since 2010, in Niederfrohna (Sachsen,) the Frohnbach special purpose association has been testing a high-performance Stirling engine combined heat and power plant (CHP – German BHKW) as an alternative to the gasoline engine CHP for the conversion into electricity of digester gas. A complex removal of siloxanes from the digester gas as well as the regular and special maintenance measures are not required with such a machine because the combustion takes place outside the engine. The unit has neither spark plugs nor valves and, in addition, manages without a lubrication system. It is designed for more than 100,000 operating hours. A single annual inspection suffices. Operating costs and expenditure for personnel are comparatively small.

In full-load operation the Stirling engine CHP has produced maximum electrical power of ca. 38 kW with an effective thermal output of some 120 kW. The thermal efficiency both in the partial-load operational range and also under full load is very nearly constant at ca. 70 percent. Electrical efficiency of almost 30 percent and overall efficiency of over 90 percent can be achieved. The maximum throughput of digester gas is ca. $27 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{h}$.

To date the Stirling unit has been without problem. The continuous external combustion with internal air preheating achieved in the Stirling engine CHP can be easily regulated by means of lambda oxygen sensors and leads to very small exhaust gas emissions. Consequently, the employment of the Stirling engine CHP is justified even for the conversion into electricity of significantly more problematic and, in their contents, by far more fluctuating fuels such as synthetic gas, flare or landfill gas, and lean gases, for example, from the processing of biogas. The test conditions of the trials carried out, the technical data and the characteristic values determined are explained in detail for appropriate applications.

Key words: wastewater treatment, municipal, digester gas, fuel, waste product, industry, electricity generation, Stirling engine, state of the art, pilot plant, field report

^{*)} Teil 1 ist erschienen in KA 2014, 61 (3), 210–216

1 Beschreibung der Anlage

Das Stirling-Motor-BHKW besteht aus den Hauptbaugruppen Gasbrenner, Brennkammer, Stirling-Motor mit Generator und Abgaswärmeüberträger. Hinzu kommen die bedarfsgerecht regelbare Verbrennungsluftzuführung mittels Lambda-Sonde und Radialgebläses sowie die Abgasabführung, bestehend aus Schornstein und aufgesetztem Axial-Saugzuggebläse, ebenfalls stufenlos drehzahlgesteuert.

Als Brenner ist ein Flammenbrenner installiert. Er wird mittels Zündelektrode gestartet. Ein UV-Sensor überwacht die Flamme. Die Brennerleistung lässt sich über die Klärgaszufuhr mit einem elektrisch angetriebenen Regelventil stufenlos einstellen.

Der im Innern der zylinderförmigen Brennkammer liegende Brennraum wird aus einer mehrere Zentimeter dicken Auskleidung aus feuerfestem Beton (Schamotte) gebildet. Das Material vermag den hohen Temperaturen im Brennraum, die fast 900 °C erreichen können, auf Dauer zu widerstehen und bewirkt des Weiteren eine Speicherung und Vergleichmäßigung der zugeführten Wärme. Dabei spielt auch die Umsetzung von Strahlungswärme eine Rolle. Die Auskleidung ist bis zum stäh-



Abb. 1: Blick in die Brennkammer auf den frontseitig montierten Gasbrenner

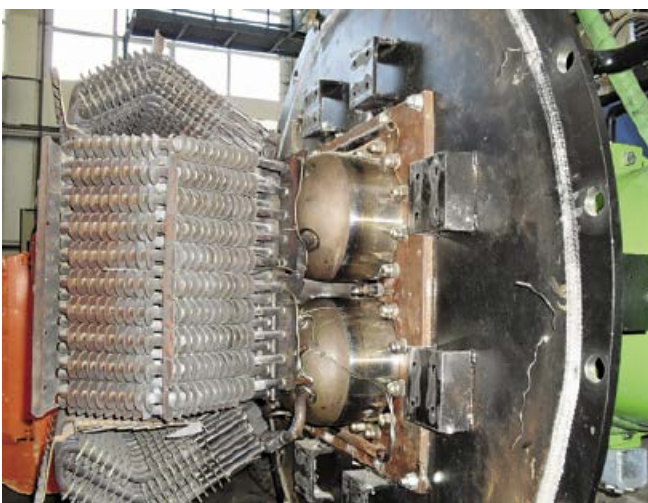


Abb. 2: Blick auf die Wärmeüberträger (Heizer) und die Zylinderköpfe

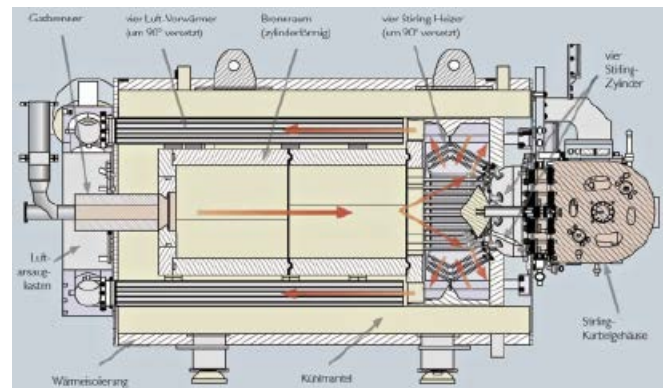


Abb. 3: Längsschnitt durch das Stirling-Motor-BHKW

lernen Außenmantel von einer Steinwolle-Isolierung umhüllt. Sie dient dessen Schutz. Aus demselben Grund ist der Stahlmantel doppelwandig ausgeführt und wassergefüllt (Mantelkühlung). Nach außen hin gibt es eine weitere Wärmeisolierung aus Mineralwolle. Abbildung 1 lässt den beschriebenen schichtenweisen Aufbau der Brennkammer erkennen.

Der Stirling-Motor ist zusammen mit einer massiven, mit einem Hitzeschild bewehrten Stahlscheibe an die Rückseite der Brennkammer angeflanscht und verschließt damit die Brennkammer nach außen. Nur seine vier Zylinderköpfe nebst den vier Wärmeüberträgern (Heizer) – siehe in Abbildung 2 mit demontiertem Hitzeschild – ragen in den Verbrennungsraum. Sie werden von den heißen Verbrennungsgasen umströmt und geben einen großen Teil der Wärme über die gut wärmeleitenden metallischen Wandungen an das Arbeitsgas Helium weiter. Das Arbeitsgas kann dort Temperaturen von mehr als 750 °C erreichen. Ein Stoffübergang von Bestandteilen der Verbrennungsgase aus der Brennkammer ins Innere des unter hohem Druck stehenden Stirling-Motors ist ausgeschlossen.

Sowohl die Brennkammer als auch die Rippenrohrbündel der vier Wärmeüberträger (Heizer) sind hinsichtlich ihrer Gestaltung derart aufeinander abgestimmt, dass sich für den Wärmeübergang optimale Strömungsverhältnisse ergeben. So weisen beispielsweise die vier um 90° versetzten Taschen, welche die Heizer aufnehmen, außen Schikanen auf. Diese Strömungshindernisse aus dem hellen feuerfesten Material sind in Abbildung 1 gut zu erkennen. Sie verdecken im Bild jeweils einen Teil der im Querschnitt eigentlich als vier volle dunkle Kreise erscheinenden Kanäle für die Abgasabführung. Zusammen mit den geknickten Rippenrohrbündeln der Heizer bewirken solche Schikanen und Prallflächen einen thermodynamisch günstigen mehrfachen Kreuzstrom [1]. Abbildung 3 veranschaulicht die beschriebene Umströmung der Wärmeüberträgerflächen.

Abbildung 3 lässt auch erkennen, dass die innerhalb der Brennkammer liegenden Kanäle für die Abgasabführung jeweils mit glatten Wärmeüberträger-Rohren versehen sind. Es handelt sich um vier parallelgeschaltete Gas-Gas-Wärmetauscher (Gegenstrom). Deren Edelstahlrohre werden außen von der kalten Verbrennungsluft (Frischlufte mit Umgebungstemperatur) umströmt, wodurch sich das im Rohrrinnern geführte Abgas auf rund 450 °C abkühlt. Dabei erhitzt sich die Luft auf eine Temperatur von etwa 400 °C, bevor sie über den Brenner ins Innere der Brennkammer gelangt. Eine solche Luft-Vorwärmung ist wesentliche Voraussetzung dafür, die sehr hohen Brennraumtemperaturen zu erreichen, denn so wird eine beträchtliche Kühlung des Brennraumes durch kal-

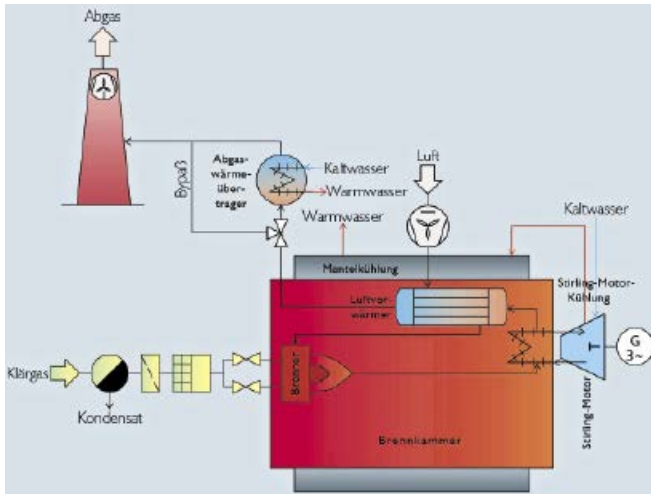


Abb. 4: Prozessfließbild des Stirling-Motor-BHKW

te Verbrennungsluft vermieden. Der sonst abkühlende und den Wirkungsgrad des Stirling-Motors herabsetzende Effekt wäre erheblich, denn der Volumenstrom der Verbrennungsluft macht immerhin etwa das Zehnfache des Brenngases aus. Durch die Anordnung der Luftvorwärmer innerhalb der Brennkammer werden Wärmeverluste nach außen vermieden. Zudem bleiben die Wege für die Zufuhr der heißen Luft zur Verbrennung kurz.

Das Prozessfließbild (Abbildung 4) zeigt alle Maschinen, Apparate und wesentlichen peripheren Aggregate sowie die Stoff- und Energieströme im Gesamtzusammenhang. Der Stirling-Motor samt Generator wird wassergekühlt. Motor- und Brennkammer-Mantelkühlung sind in Reihe geschaltet. Die im Abgas mit einer Temperatur von etwa 450 °C schließlich noch enthaltene nutzbare Wärme wird mittels Gas-Wasser-Wärmeübertragers (Rippenrohrbündel im Kreuzstrom) weitgehend entnommen, wobei sich das Abgas bis auf etwa 100 °C abkühlt. Bei weitergehender Kühlung wäre die Bildung von Kondensat

möglich, was vermieden werden sollte (Korrosion). Die Wasserkühlung des Abgas-Wärmeübertragers kann grundsätzlich in denselben Kühlkreislauf eingebunden werden. Günstiger ist es vielleicht (wie dargestellt), wenn die Abgaskühlung mit einem gesonderten Kühlkreislauf erfolgt. So lassen sich etwa spezielle Wärmebedarfe (zum Beispiel Speisung eines längeren Fernheizungssystems, Betrieb eines Trockners) mit der hier anfallenden höhergradigen Nutzwärme von immerhin mehr als 30 kW Leistung gesondert und besonders effizient decken.

Ist angesichts der gegebenen Verbraucher hin und wieder mit sehr plötzlichem und hohem Wärmebedarf zu rechnen, kann dem mit einem Pufferspeicherbehälter entsprochen werden. Vorteilhaft ist ein Schichtenspeicher, aus dessen unterliegendem kühlerem Teil der Rücklauf für die Stirling-Motor-Kühlung gezogen wird. Heißer Vorlauf speist den oberen Teil des Speichers. In Zeiten mit nur geringem Wärmebedarf lässt sich Wärme im Pufferspeicher zwischenspeichern. Die beschriebene Anlage verfügt über einen Schichtenspeicher mit einem Volumen von 5 m³.

Die Steuerung des Brennerbetriebes erledigt eine für die Erfordernisse speziell eingerichtete Standard-Regeleinheit für Industriebrenner (Fa. Elster-Kromschroder GmbH, Osnabrück). Für die elektronische Steuerung des Stirling-Motors sorgt eine speicherprogrammierbare Steuerung (Siemens Simatic S7300). Alle Bestandteile des Stirling-Motor-BHKW sind über die Standard-Feldbus-Kommunikation PROFIBUS in das Prozessleitsystem der Kläranlage eingebettet. Das BHKW läuft vollautomatisch. Sämtliche Parameter und Betriebszustände können aber auch über ein Operatorpanel vor Ort abgelesen und von Hand geändert werden.

2 Ergebnisse und Diskussion

Ab Oktober 2011 waren eine Vierfach-Temperatursonde in der Brennkammer installiert worden und zudem die charakteristischen Heizer- und Zylinderkopftemperaturen verfügbar. Es wurde ein Anfahr- und Aufheizversuch mit Klärgas bis zum Er-

Komponenten für die Abwasser- und Schlammbehandlung



WASTEMASTER® TSF
Kompaktanlagen



GRITSEP® FGC
Sandklassierer



SSC
Spiralförderer



WASTEMASTER® FTR
Siebtrommeln



SPECO®

WAM GmbH
SPECO® Division
Dornierstraße 10
D - 68804 Altlußheim

Tel.: +49 (0) 62 05 39 49-0
Fax: +49 (0) 62 05 39 49 49

wam@wamgmbh.de
www.wamgmbh.de/speco



WAMGROUP®

Besuchen Sie uns auf der **IFAT 2014: Halle A2, Stand 405**

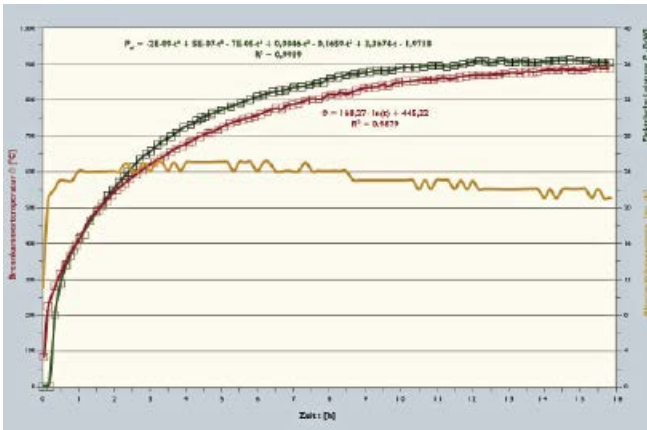


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf von Brennkammertemperatur und erzeugter elektrischer Leistung nach dem Kaltstart des Stirling-Motor-BHKW

reichen der Maximalleistung gefahren. Abbildung 5 gibt die charakteristischen zeitlichen Verläufe von Brennkammertemperatur und erzeugter elektrischer Leistung wieder.

Rund 16 Stunden nach dem Kaltstart erreicht das Stirling-Motor-BHKW bei einer recht gleichmäßigen Klärgaszufuhr von etwa 23 m³_N/h (untere Linie) eine Brennraumtemperatur von 884 °C (mittlere Kurve) und eine elektrische Höchstleistung von etwa 36 kW (obere Kurve).

Während des Dauerbetriebes mit dem eingefahrenen Motor wurden zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit entsprechende Messungen durchgeführt. Die Ergebnisse zweier solcher Messungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Messungen zeigen bei praktisch gleicher Brennstoffleistung (bzw. Klärgasvolumenstrom, Methangehalt) den steigenden Einfluss von Brennraum-, Heizer- und Zylinderwandtemperaturen auf die elektrischen Kennwerte. Mit steigenden Temperaturen nimmt der elektrische Wirkungsgrad zu. Außerdem weisen die Ergebnisse darauf hin, dass mit dem Stirling-Motor-BHKW im Dauerbetrieb und unter den gegebenen Bedingungen elektrische Wirkungsgrade von fast 30 % erreichbar sind. Über einen entsprechenden Befund hatte unlängst auch der Motorenhersteller berichtet. Im Dauerbetrieb mit Holzgas waren von ihm unter Vollast über einen Messzeitraum von 9

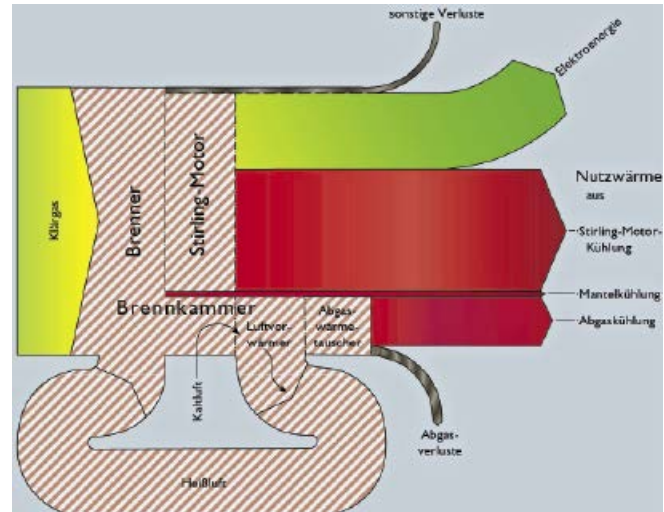


Abb. 6: SANKEY-Diagramm des mit Klärgas befeuerten Stirling-Motor-BHKW im Dauerbetrieb

Stunden 35 kW an elektrischer Leistung bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 29,4 % gemessen worden [2].

Anhand der durchgeführten Messreihen lässt sich die Energiebilanz für das untersuchte Stirling-Motor-BHKW aufstellen. Sie wird im Energieflussdiagramm – auch SANKEY-Diagramm genannt – (Abbildung 6) graphisch veranschaulicht. Bilanzgebiet ist das Stirling-Motor-BHKW nebst dem Abgaswärmeüberträger. Die Bilanzgrenze bildet also die unmittelbare Umgebung beider Einheiten.

Im SANKEY-Diagramm wird von links nach rechts die Wandlung der Energie gezeigt. Die Breite der jeweiligen Balken ist ein Maß für den energetischen Anteil. Die mit dem Klärgas zugeführte chemische Energie (gelber Balken) findet sich verschiedentlich als Nutzwärme (rotgefärbte Balken) und als Elektroenergie (grüner Balken) wieder. Einbußen (graue Balken) sind einerseits auf die mit dem Abgas abgeführte Restwärme („Abgasverluste“) und andererseits auf vor allem im Motor entstehende Reibungsverluste sowie Wärmeverluste infolge Wärmeleitung und -abstrahlung vom gesamten Stirling-Motor-BHKW nebst Abgaswärmeüberträger („sonstige Verluste“) zurückzuführen. Bei den sonstigen Ver-

Parameter	26. Oktober 2011, 19.00 Uhr	21. November 2011, 19.00 Uhr
Klärgaszufuhr	23 m ³ _N /h	23 m ³ _N /h
Methangehalt	54,6 Vol.-%	54,9 Vol.-%
Kohlendioxidgehalt	29,9 Vol.-%	26,6 Vol.-%
Sauerstoffgehalt	2,4 Vol.-%	1,2 Vol.-%
Raumtemperatur	19,3 °C	19,2 °C
Verbrennungsluftzufuhr	213 m ³ _N /h	221 m ³ _N /h
Außentemperatur	13,5 °C	9,5 °C
Brennkammertemperatur	844 °C	860 °C
Heizer-Temperaturen (4)	728 ... 758 °C	752 ... 784 °C
Zylinderkopf-Temperaturen (4)	726 ... 756 °C	752 ... 784 °C
Druck (Arbeitsgas)	28,7 bar	28,6 bar
elektrische Nutzleistung	33 kW	35,6 kW
Brennstoffleistung (Aufwand)	124,8 kW	125,5 kW
elektrischer Wirkungsgrad	26,4 %	28,4 %

Tabelle 1: Ergebnisse von Messungen im Dauerbetrieb

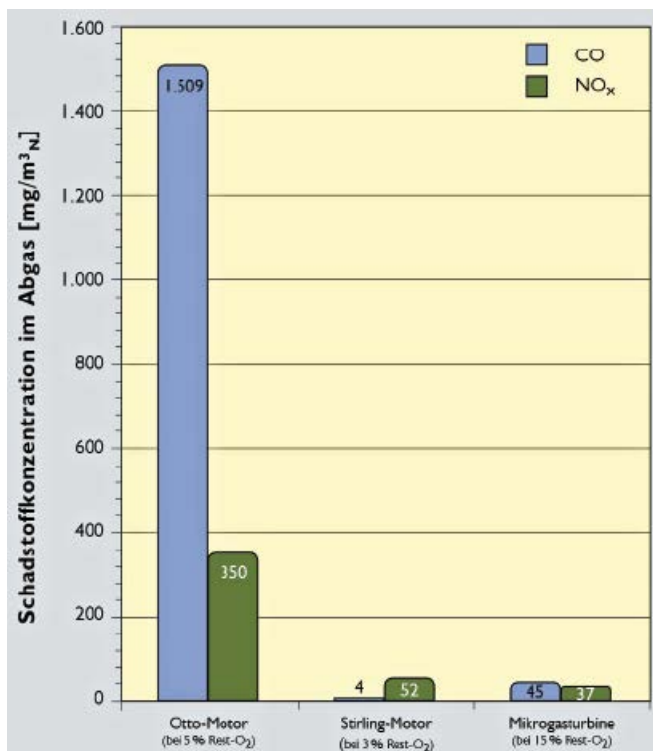


Abb. 7: Abgaskonzentration an Schadstoffen im Vergleich

lusten handelt es sich aber im Grunde um keine echten Einbußen. Denn die resultierende Wärme wird in das Gebäude abgegeben, in dem das BHKW aufgestellt ist. Insofern trägt sie auf direktem Wege zu dessen Beheizung bei und wird folglich zumindest während der kalten Jahreszeit genutzt. So gesehen stellt also in erster Linie die aus dem Abgas theoretisch bis zum Erreichen des Temperaturniveaus der Umgebung noch entnehmbare Restwärme („Abgasverlust“) einen praktisch relevanten Energieverlust dar.

Hinsichtlich der Schadstoffe im Abgas gibt es für die immissionsschutzrechtlich in Deutschland nicht genehmigungspflichtigen kleinen Blockheizkraftwerke mit weniger als 1000 kW an Brennstoffleistung zwar keine verbindlich einzuhaltenden Begrenzungen. Jedoch sind die Emissionsgrenzwerte nach der sogenannten TA Luft [3] durchaus als anzustrebende Richt- und Zielwerte anzusehen. Danach darf bzw. soll bei Otto-Motor-BHKW ein Normkubikmeter Abgas bei einem Restsauerstoffgehalt von 5 Volumenprozent nicht mehr als 1000 mg Kohlenmonoxid (CO) und 500 mg Stickoxide (NO_x) enthalten. Dabei handelt es sich um die beiden gebräuchlichsten Hauptparameter zur Charakterisierung der Qualität von Verbrennungsprozessen hinsichtlich des Umweltschutzes. Die erstgenannte Verbindung ist bekanntermaßen ein Blutgift. Stickoxide gelten als stark lungengiftig. Zudem sind sie auf vielfältige Art und Weise umweltschädlich.

In Abbildung 7 sind die für alle BHKW ermittelten Schadstoffkonzentrationen gegenübergestellt. Die Werte wurden auf den nach den Bestimmungen der TA Luft für die jeweilige Verbrennungsart maßgebenden Restsauerstoffgehalt im Abgas normiert.

Die Konzentrationen an CO und NO_x im Abgas des Stirling-Motor-BHKW sind während des Volllast-Betriebs mit Klärgas im Kamin (Schornstein) gemessen worden, und zwar unmittelbar am Ausgang des Abgas-Wärmeüberträgers.

Die Vergleichswerte für den Otto-Motor sind am eigenen Otto-Motor-BHKW – es verfügt nicht über eine Abgasreinigung mittels Katalysators – unter denselben äußeren Bedingungen und ebenfalls im Volllast-Betrieb (80 kW) gemessen worden. Der λ-Wert hatte bei der Messung 1,54 betragen.

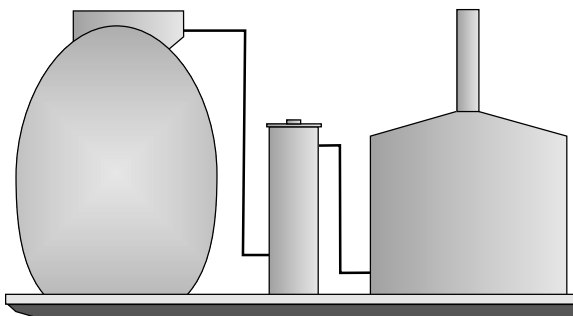
Für die Mikrogasturbine ist auf mitgeteilte Messwerte einer benachbarten Kläranlage zurückgegriffen worden [4]. Dort wird eine übliche Turbine mit 30 kW elektrischer Nennleistung ebenfalls zur Verstromung von Klärgas eingesetzt, allerdings nicht ohne vorhergehende Vollreinigung des Brenngases (Aktivkohle-Adsorption).

Die Gegenüberstellung in der Abbildung 6 zeigt die hinsichtlich der Schadstoffemissionen bekanntermaßen ungünstigen Verhältnisse beim Otto-Motor wegen des diskontinuierlichen, extrem schnellen und mit hohen Temperaturspitzen verbundenen Verbrennungsverlaufs bei jedem Arbeitstakt. Weitergehende Abhilfe schafft letztlich nur eine Abgasreinigung mittels Katalysators im Abgasstrom. Er ist für Otto-Motor-BHKW mit hoher Leistung auch gesetzlich vorgeschrieben. Jedoch macht sich hier ein größerer Reinigungsaufwand vor allem bezüglich des Schwefels im Brenngas erforderlich, weil bereits kleinste Mengen davon im Abgas als „Katalysatorgift“ wirken.

Demgegenüber liefern die Mikrogasturbine und das Stirling-Motor-BHKW bezüglich der Schadstoffkonzentrationen hervorragende Abgaswerte. Sie liegen auf etwa demselben Niveau. Das verwundert nicht, erfolgt doch die Verbrennung in beiden Maschinen kontinuierlich und jeweils bei recht gleichbleibender Temperatur im Bereich um 850 °C. Bei der Turbine kommt hin-

EISENBAU HEILBRONN

E-mail: info@eisenbau-heilbronn.de
 Homepage: www.eisenbau-heilbronn.de
 Fon: +497131/1589-0
 Fax: +497131/1589-29



Faulbehälter	Entschwefler	Gasbehälter
Ganzstahl -oder Verbundkonstruktion in allen Bauformen und Größen	H ₂ S Reinigung Einturmanlagen Zweiturmanlagen Kompaktanlagen	Trockengasbehälter stehende Ausführung liegende Ausführung Nassgasbehälter

Sonderkonstruktionen, Engineering, Wartung nach
DWA, Sanierungen an Eigen- und Fremdbeholdern

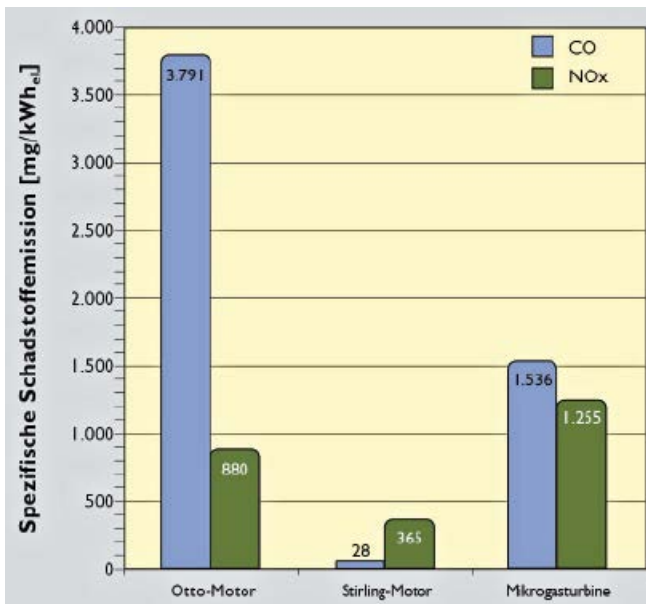


Abb. 8: Spezifische Schadstoffemissionen im Vergleich

zu, dass sie technisch bedingt mit sehr hohem Luftüberschuss, also stark überstöchiometrisch gefahren wird ($\lambda \approx 6$ bis 8), was zu fast vollständiger Verbrennung führt. Folglich gehen die CO-Konzentrationen gegen Null, und die Restgehalte an Sauerstoff im Abgas von Gasturbinen betragen immerhin noch etwa 18 Vol.-%. Demgegenüber lässt sich das Stirling-Motor-BHKW mit einem Lambda-Wert um 1,2 bei Sauerstoffkonzentrationen von nicht viel mehr als 2 bis 3 Volumenprozent betreiben. Aus alledem ergibt sich, dass die absolute Schadstoffemission, also der Massestrom an CO und NO_x (ausgedrückt in mg/h oder in mg/kWh_e) bei Gasturbinen vergleichsweise höher ausfällt. Denn die äußerst geringen Konzentrationen (in mg je m³ Abgas) ergeben sich dort auch durch erhebliche Verdünnung wegen des enormen Luftüberschusses. Anders ausgedrückt: Bei einer Gasturbine fällt bei gleichem Durchsatz an Brenngas je Zeiteinheit wesentlich mehr schwach belastetes Abgas an als beim Stirling-Motor-BHKW. Abbildung 8 veranschaulicht den Zusammenhang. Dargestellt sind die auf die erzeugte Kilowattstunde Elektroenergie bezogenen Schadstoffausstöße.

Ferner sind beim Zweckverband auch Messungen zur Lärmentwicklung des Stirling-Motor-BHKW durchgeführt worden, und zwar im Betrieb unter Vollast. Dieser Betriebszustand stellt für die Schallemissionen den ungünstigsten Fall dar. Wie üblich ist der Schalldruck nach der geltenden Norm in einem Abstand vom freiliegenden, also ungedämmten Motor von einem Meter in einer Höhe von 1,2 m gemessen worden, zudem außerhalb des die Maschine umhüllenden Gebäudes im Abstand von einem Meter in Haupt-Immissionsrichtung. In Abbildung 9 sind die gewonnenen Ergebnisse den unter denselben Betriebsbedingungen am verbandseigenen Otto-Motor-BHKW entsprechend gemessenen Schallpegeln gegenübergestellt, überdies der Vollständigkeit halber dem vom bereits erwähnten benachbarten Klärwerksbetreiber an seiner allerdings lärmschutztechnisch gekapselten Mikrogasturbine festgestellten Wert [4].

Das Säulendiagramm zeigt erwartungsgemäß für das Stirling-Motor-BHKW gegenüber dem Otto-Motor-BHKW eine erheblich geringere Lärmentwicklung (Vergleich der beiden hinteren Säulen). Unmittelbar am Motor lässt sich durchaus noch ein Gespräch führen, was wohl auch für die (schalldämmte)

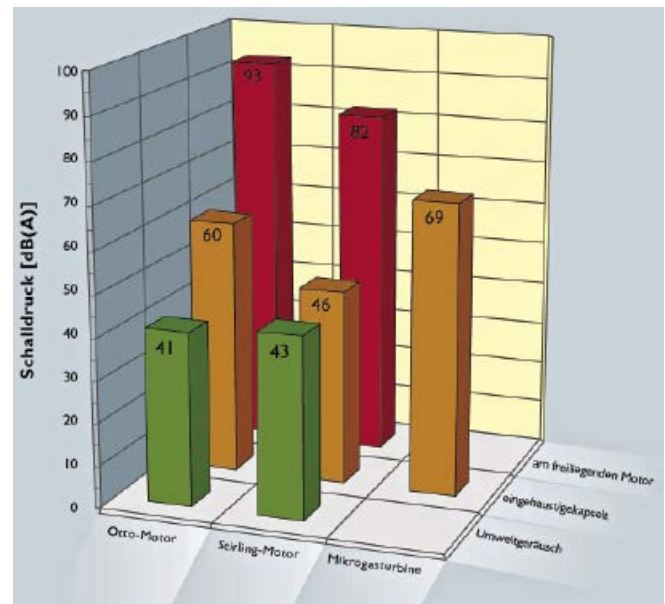


Abb. 9: Schallemissionswerte im Vergleich

Gasturbine mit ihrem eher hochfrequenten, „pfeifenden“ Geräusch gilt. Demgegenüber ist der Aufenthalt am Otto-Motor-BHKW ohne Gehörschutz physisch praktisch nicht möglich. Der Lärm lässt sich mit dem eines startenden Düsenflugzeugs vergleichen. Auch in einer Entfernung von einem Meter von der Gebäudehülle (mittlere Säulen) ist das Otto-Motor-BHKW noch deutlich lauter als das Stirling-Motor-BHKW. Die vorderen Säulen repräsentieren den tagsüber jeweils am selben Messort nach Abschaltung des entsprechenden Motors festzustellen gewesenen natürlichen Lärmpegel (weitere Informationen: [5]).

3 Fazit

Das auf der zentralen Kläranlage Niederfrohna anfallende Klärgas ist derzeit nicht sehr mit Problemstoffen belastet. Insofern sprechen bis auf weiteres keine technischen Gründe gegen die energetische Verwertung des Gases mit dem vorhandenen Otto-Motor-BHKW. Bekanntlich hängen Verschleiß und Betriebskosten des Otto-Motors in erster Linie von der Zahl der absolvierten Betriebsstunden ab. Der Grad der Belastung spielt dabei eine vernachlässigbar kleine Rolle, denn die für die Abnutzung maßgebende Kurbelwellendrehzahl bleibt unabhängig von der Laststufe stets dieselbe, weil der Generator getriebeelos angeflanscht ist (Asynchrongenerator). Er gibt die erforderliche Drehzahl vor. Gelegentliches Ein- und Ausschalten schaden dem Motor nicht. Deshalb wird das Otto-Motor-BHKW täglich für etwa 10 bis 14 Stunden während der verbrauchsintensiven Zeit des Klärwerks (Hochtarif) durchgehend und ausschließlich unter Vollast betrieben, um die im Gasspeicher vorgehaltene Tagesproduktion an Klärgas zu verarbeiten. Der stündliche Klärgasverbrauch beträgt dabei etwa 37 m³_N und entspricht einer zugeführten Brennstoffleistung von rund 218 kW. Damit erzeugt das BHKW die maximale elektrische Nennleistung von 80 kW bei seinem höchstmöglichen elektrischen Wirkungsgrad von 36,7 Prozent [6]. Zudem fallen rund 120 kW an Nutzwärme an. Der thermische Wirkungsgrad beträgt also rund 55 Prozent.

Nun verhält es sich auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland so, dass die mit Otto-Motor-BHKW allein aus der Verstromung des Klärgases erzeugte Nutzwärme in der kalten Jahres-

zeit in der Regel nicht ausreicht, den Bedarf an Prozesswärme etwa für die Temperierung des Faulreaktors zu decken. Der mittlere winterliche Fehlbetrag liegt im Allgemeinen bei rund einem Fünftel. Auf der zentralen Kläranlage Niederfrohna ist es so, dass etwa 13,5 Prozent der jährlich anfallenden Klärgasmenge in einem vorhandenen Gas-Heizkessel verfeuert werden, um ohne anderweitige Energieträger über die Runden zu kommen. Das Otto-Motor-BHKW in Abhängigkeit vom Wärmebedarf moduliert im Teillastbereich zu fahren und es somit in der Übergangszeit als mehr oder weniger wirksame Heizungsanlage zu benutzen, scheidet wegen Unwirtschaftlichkeit aus. In der nach den Angaben des Motorenherstellers niedrigsten Teillaststufe, gegenüber Volllast etwa halber zugeführter Brennstoffleistung (108 kW), wird eine elektrische Leistung von lediglich noch 30 kW_{el} mit einem durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad von 28 Prozent gewonnen [6]. Die dabei erzeugte Wärmeleistung von rund 63 kW beruht auf einer Brennstoffausnutzung von nicht mehr als rund 58 Prozent. Demgegenüber erreicht der bestehende Niedertemperatur-Gaskessel durchweg einen thermischen Wirkungsgrad von etwa 95 Prozent.

Mit dem Stirling-Motor-BHKW lässt sich die gesamte Lücke in eleganter Weise füllen, denn es kann als robuste, aber in jedem Fall stromproduzierende Heizung über die fünf bis sechs Monate hinweg für hinreichend Wärme sorgen. Auch sind das Temperaturniveau des Vorlaufs von etwa 70 °C und die Rücklaufumtemperatur von nicht viel mehr als 55 °C für die meisten Bedarfe völlig ausreichend. Demgegenüber käme in den übrigen Monaten mit milder oder warmer Witterung das Otto-Motor-

BHKW mit seinem um rund ein Fünftel höheren elektrischen Wirkungsgrad zum Zuge. Dies passt auch gut zu den Erfordernissen des Klärwerksbetriebs, weil im Sommer der den Gesamtverbrauch dominierende Energiebedarf für die Belüftung der Belebungsbecken deutlich höher ist. Denn mit zunehmender Temperatur wird die Dichte der Luft geringer und außerdem vermindert sich die Löslichkeit des Luftsauerstoffs in Wasser. Zugleich können die Jahresbetriebsstunden des vergleichsweise empfindlichen Otto-Motors etwa halbiert werden, was zur Verdopplung seiner normativen Lebensdauer und zur Einsparung von Betriebskosten führt. Immerhin benötigt das Otto-Motor-BHKW als „Rennpferd“ für Wartung und Betrieb etwa 4,56 Euro je Betriebsstunde, während der „Ackergaul“ (Stirling-Motor-BHKW) wohl mit etwa 96 Cent je Stunde auskommt [5].

Alle diese Gründe sprechen unter den derzeit gegebenen Bedingungen für den beschriebenen kombinierten Betrieb des Stirling-Motor-BHKW und des Otto-Motor-BHKW. Sollte es infolge sich verändernder Abwasserhältnisse zur Verschlechterung der Klärgasqualität kommen, würde die Jahreseinsatzzeit des diesbezüglich völlig unempfindlichen Stirling-Motor-BHKW entsprechend erhöht. Jedenfalls bedarf es des Heizkessels für den regulären Betrieb nicht mehr.

Es sei bemerkt, dass für jede Anlage die Redundanz der Gasverwertungsmaschine eigentlich genauso unverzichtbar ist wie beispielsweise die als selbstverständlich geltende Doppelung betriebswichtiger Pumpen. Die Notfackel ist genehmigungsrechtlich allein für den Störfall vorgesehen und stellt keine zulässige Reserve dar. Dennoch gibt es sehr viele Klärwerke, die ihren Klär-

TAGUNG 10.-11. September 2014, Bremen



EnergieTage



Energiewende – Gestaltungsanspruch und Betriebsalltag

Themenschwerpunkte

Die diesjährigen Energietage beschäftigen sich mit der Rolle der Wasserwirtschaft im Rahmen der Energiewende und deren Einbindung in energiepolitische Konzepte, denn ohne Wasser keine Energie.

Im Mittelpunkt stehen das EEG, die Veränderungen der politischen Rahmenbedingungen und die Auswirkungen auf den Betrieb wasserwirtschaftlicher Anlagen.

Zielgruppe

Betreiber, Planer, Mitarbeiter zuständiger Behörden ebenso wie Fachvertreter von Firmen, Hochschulen, Verbänden und Sachverständigenorganisationen, die mit Aufgaben im Bereich Wasser und Energie befasst sind.

Veranstaltungsort

Maritim Hotel & Congress
Centrum Bremen
Hollerallee 99
28215 Bremen
Telefon: + 49 (0) 421 3789-0
Fax: + 49 (0) 421 3789-600

Zimmerkontingent bis 27. Juli 2014, danach nach Verfügbarkeit, 115,-/Nacht inkl. Frühstück

Teilnahmegebühren

Dauerkarte: 460,-*/530,-
Tageskarte: 320,-*/390,-
*) Für DWA-Mitglieder

jetzt
vormerken!

Information

DWA · Barbara Sundermeyer-Kirstein · Tel.: + 49 (0) 2242 872-181 · Fax: + 49 (0) 2242 872-135
E-Mail: sundermeyer-kirstein@dwa.de · www.dwa.de



gasüberschuss monatelang über die Fackel verfeuern, weil der Heizkessel dem geringen Wärmebedarf entsprechend mit gedrosselter Leistung gefahren wird oder weil das Otto-Motor-BHKW defekt bzw. in der Grundüberholung ist. Bei solchen Anlagen bleiben etwa 20 (im Winter) bis 50 Prozent (im Sommer) des anfallenden Klärgases ungenutzt [7]. Dies lässt sich aus energieökonomischer und klimapolitischer Sicht kaum vertreten.

4 Ausblick

Das Klärwerk in Niederfrohna hat einen spezifischen Verbrauch an Elektroenergie von rund 23 kWh je „angeschlossenem“ Einwohnerwert (EW) und Jahr. Als Idealwert gelten 18 kWh/(EW · a). Der deutschlandweite Mittelwert dürfte etwa doppelt so hoch sein. Derzeit werden rund 38 Prozent des Elektroenergiebedarfes des Klärwerks mit dem in der beschriebenen Art und Weise selbst erzeugten Klärgas-Strom gedeckt. Das erspart den Einkauf von jährlich rund 300 000 kWh an Elektroenergie, und Erdgas für Heizzwecke braucht man praktisch nicht. Mit der geplanten zusätzlichen Gasproduktion durch Hinzunahme von Fettsäureinhalten im Winterhalbjahr und von Grasschnitt im Sommerhalbjahr (Co-Fermentation) kann die Eigenversorgung auf etwa 66 Prozent gesteigert werden, wenn man das Otto- und das Stirling-Motor-BHKW im Kombibetrieb arbeiten lässt. Zudem ergäbe sich ein nennenswerter ganzjähriger Wärmeüberschuss.

Unabhängig davon drängen sich angesichts der gerade beschlossenen Verschärfung der bundesgesetzlichen Anforderungen für die Nutzung von Klärschlamm in der Landwirtschaft (als Dünger) und im Landbau (als Substrat) und der damit verbundenen drastischen Steigerung des Entsorgungspreises (Verbrennung) weitergehende Gedanken auf. So könnte der anfallende Faulschlamm künftig mit Heizungsunterstützung vor allem aus dem Stirling-Prozess einer kontinuierlichen (solaren oder etwa über Lochboden geführten) Trocknung unterzogen werden. Das so erzeugte energiereiche Klärschlammgranulat ließe sich im Wege der Vergasung (z. B. Festbettvergaser) zu Prozessgas umwandeln. Ein solches vielfältig zusammengesetztes Brenngas gilt als schwer verwertbar. Im Stirling-Motor-BHKW dürfte dessen Verstromung jedoch gelingen. Dafür sprechen auch die mit Holzgas gemachten Erfahrungen des Herstellers. Die bei der Vergasung übrigbleibende Asche ist sehr reich an Phosphor, der einen sich weltweit verknappenden und unverzichtbaren Rohstoff darstellt. Alles in allem ergäbe sich ein nahezu ideales System von stofflichen und energetischen Verwertungen und Kraft-Wärme-Kopplungen unmittelbar vor Ort. Dabei blieben jährlich mindestens 15 000 Kilometer für Klärschlammtransporte per Lastkraftwagen mit einem Einsatz an Dieselkraftstoff von etwa 6000 Litern erspart.

Das Stirling-Motor-BHKW wird wohl ebenso für zahlreiche ähnliche Anwendungen, etwa mit Deponiegas oder mit Schwachgasen aus der Biogasaufbereitung, Interesse finden,

und sei es vielleicht auch nur, wie im hier beschriebenen Fall, für die Verstromung eines Teiles der jeweils anfallenden Gase¹⁾.

Literatur

- [1] Elsner, N.: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*, 6. Aufl., Akademie-Verlag, Berlin, 1985
- [2] Marinitsch, G.: Biomass CHP plants based on updraft gasification and Stirling engines – Technology and operating experience, Central European Biomass Conference, Graz, 26. bis 29. Januar 2011
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: *Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionschutzgesetz, Technische Anleitung zur Einhaltung der Luft (TA Luft)*, 24. Juli 2001
- [4] Persönliche Mitteilung von Timo Dittrich am 6. Februar 2012 (Steinle Ingenieure GmbH, Niederlassung Freiberg)
- [5] Heinrich, K., Heinrich, S.: *Stromgewinnung mit Klärgas. Das Stirling-Kraftwerk*, 2. Aufl., Mironde Verlag, Niederfrohna, 2013
- [6] Kott, S.: *Vergleichende Untersuchungen zum großtechnischen Einsatz eines Stirling-Motors zur Verstromung von Klärgas*, Diplomarbeit, Hochschule Mittweida, 2011
- [7] Pöhl, S.: Was wird aus unserem Biogas? – Möglichkeiten zur Gasverwertung auf Kläranlagen, Lehrer-Obmann-Tag 2011 der DWA-Kläranlagen-Nachbarschaften des Landesverbands Sachsen/Thüringen, Jena, 22./23. März 2011

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Karin Heinrich
Beuth Hochschule für Technik Berlin
Fachbereich V – Life Sciences and Technology
Lebensmittelverfahrenstechnik
Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin

Dr.-Ing. Steffen Heinrich
Zweckverband Frohnbach
Limbacher Straße 23, 09243 Niederfrohna (Sachsen)

Dipl.-Ing (FH) Mirko Knoth
INFRAPLAN Ingenieure GmbH
Neugasse 5–9, 09217 Burgstädt (Sachsen)

E-Mail: kontakt@infraplan-ingenieure.de

Dipl.-Ing. (FH) Peter Philipp
WUDAG Westsächsische Umweltdienste AG
Heiersdorfer Straße 46, 09217 Burgstädt (Sachsen)

E-Mail: kontakt@wudag.de

KA

¹⁾ Die Errichtung des Stirling-Motor-BHKW zur Verstromung von Klärgas auf der zentralen Kläranlage Niederfrohna ist aus Mitteln der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der regionalen Wirtschaftsstruktur“ durch den Freistaat Sachsen gefördert worden.

Beilagenhinweis

Bitte beachten Sie die Beilagen in der April-Ausgabe der KA – *Korrespondenz Abwasser, Abfall*

DWA, 53773 Hennef
– 11. Kanalbautage
– Regenwassertage

ekochem Deutschland GmbH, 51371 Leverkusen
Eisen-/Aluminiumsalze

Technische Akademie Esslingen, 73760 Ostfildern
Instandsetzen von Abwasserkanälen und –bauwerken
(Teilbeilage Landesverbände NRW, Nord, Nord-Ost)