

# Abtrennung von Siloxanen aus biogenen Gasen mittels Festbettadsorbern

Dipl.-Ing. Wolfgang Doczyck, SILOXA AG, Essen

## Inhalt:

1	Problemstellung .....	1
2	Nutzungsmöglichkeiten für Faulgase .....	2
3	Gaszusammensetzung .....	2
3.1	Hauptkomponenten des Klärgases .....	2
3.2	Störstoffe im Klärgas .....	3
3.3	Organische Siliziumverbindungen .....	4
3.4	Anforderungen der BHKW Motorenhersteller .....	5
4	Gasreinigung als Maßnahme zur Vermeidung von Motorschäden .....	5
4.1	Aktivkohleadsorption als bewährtes Verfahren zur Gasreinigung .....	6
4.2	Gasreinigungssysteme mit Aktivkohle-Festbettadsorbern .....	7
5	Gaskühlung .....	11
6	Betriebsergebnisse .....	11
6.1	Analyseergebnisse .....	12
6.1.1	Ölanalysen .....	12
6.1.2	Gasanalysen .....	13
6.2	Betriebskostenvergleich .....	13
7	Zusammenfassung .....	14

## 1 Problemstellung

Betreiber von Faulgasanlagen (Deponien, Klär- und Biogasanlagen) beobachten zunehmend, dass Wartungs- und Reparaturarbeiten an Motoren der Blockheizkraftwerke (BHKW) in deutlich kürzeren Zeitabständen erfolgen müssen, als ursprünglich geplant und erwartet.

Wesentliche Gründe hierfür sind die im Faulgas enthaltenen Begleit- und Spurenstoffe, die in modernen Gasmotoren zu massiven Problemen führen. Insbesondere organische Siliziumverbindungen (Siloxane) im Gas führen zu erhöhtem Verschleiß im Verbrennungsraum, der zusätzliche Reparaturen mit längeren Stillstandszeiten verursachen sowie im schlimmsten Fall zu Totalschäden des Motors führen kann.

Dagegen steht das Bestreben der Anlagenbetreiber nach optimalen Wirkungsgraden der BHKW und größtmöglicher Verfügbarkeit, so dass die Wirtschaftlichkeit der Gasverwertung nicht in Frage gestellt wird.

Der stärker werdende Kostendruck durch stetig steigende Betriebskosten, bedingt durch Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten, Stillstandszeiten und Betriebslogistik sowie nicht zuletzt durch steigende Versicherungsprämien für Maschinenbruch- und Produktionsausfallversicherungen, führt zum Einsatz von zeitgemäßen Gasreinigungstechnologien. Muss das Abgas des Motors zur Einhaltung der gesetzlichen Abgasgrenzwerte z.B. mit einem Kataly-

sator gereinigt werden, ist eine Gasreinigung für das Faulgas in nahezu allen Fällen obligatorisch. Insbesondere die Gasreinigung mittels Aktivkohle oder aber in Kombination mit weiteren Reinigungsprozessstufen liefert Ergebnisse, die eine nachhaltige Senkung der Betriebskosten nach sich zieht.

## 2 Nutzungsmöglichkeiten für Faulgase

Sinnvollerweise wird das entstandene Faulgas direkt auf der Anlage verwertet. Dies geschieht in der Regel durch den Betrieb von BHKW und durch die Verbrennung in Heizkesseln. Der dabei produzierte Strom wird direkt verwertet bzw. ins Stromnetz eingespeist. Die entstandene Wärme dient der Fermenter- sowie Gebäudebeheizung. In jüngster Zeit wird das Gas aus Biogasanlagen auch in Mikrogasnetze eingespeist, wobei das BHKW dann an Wärmesenken betrieben wird.

## 3 Gaszusammensetzung

### 3.1 Hauptkomponenten des Klärgases

In der Abwasserbehandlung wird Biogas bei der anaeroben Stabilisierung des Klärschlammes in Faultürmen gebildet. Das bei der Klärschlammvergärung in der Regel energetisch genutzte Biogas (Klärgas) liefert bis zu 2,5 kWh/m<sup>3</sup> Strom und 3,3 kWh/m<sup>3</sup> Wärme, welche energetisch umgesetzt werden können.

Nachfolgende Tabelle zeigt die typische Gaszusammensetzung verschiedener Kläranlagen:

	Hauptkomponenten			
[Vol.-%]	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Mittelwert	62,7	34,4	0,6	2,4
Anzahl der Proben	179	177	276	177
Minimum	45,1	11,8	0,0	0,1
Maximum	85,2	43,4	5,9	22,2

Quelle: Umweltanalytik RUK GmbH, Longuich

Von der Zusammensetzung hängt die Effektivität der energetischen Verwertung ab. Die physikalischen Eigenschaften von Biogas sind:

- Dichte: 1,2 kg/m<sup>3</sup>
- Zündtemperatur: 700 °C
- Zündkonzentration: Gasgehalt 6-12 %
- Relative Feuchte: 100 %

### 3.2 Störstoffe im Klärgas

Klärgase führen grundsätzlich aus dem Abwasser stammende Schadstofffrachten an flüchtigen, organischen Silizium- sowie Schwefel- und Halogenverbindungen mit. Diese Frachten führen zu starkem Verschleiß, hohem Wartungsaufwand sowie Schäden an den Gasmotoren oder -turbinen (Abbildung 1). Aufgrund dessen ist das Gas vor der Nutzung entsprechend aufzubereiten (Abbildung 2).



Abbildung 1: Siliziumoxid-Ablagerungen auf einem Gasmotor-Kolben.

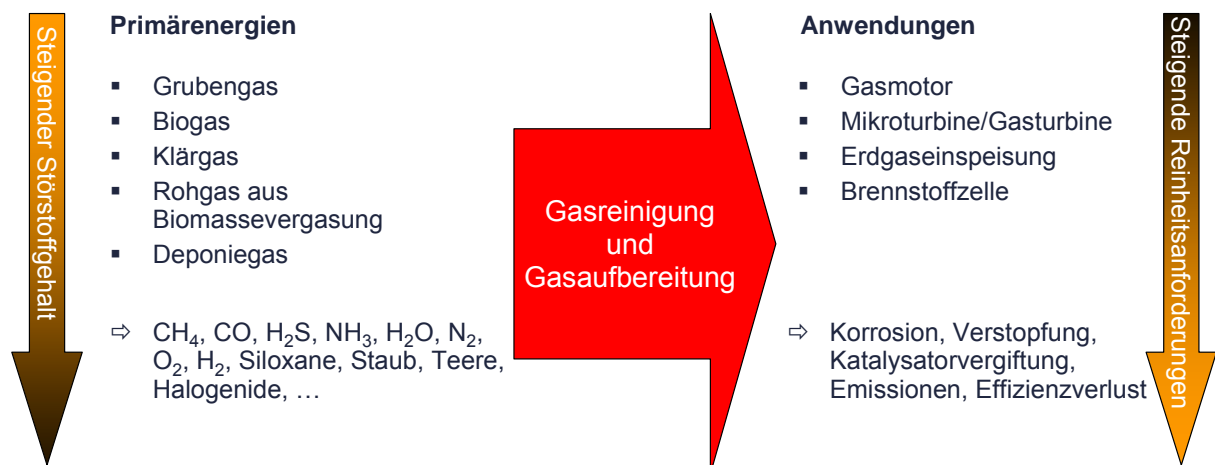


Abbildung 2: Störstoffe mit Einfluss auf die Gasmotoren.

Folgende Tabelle zeigt die wesentlichen, typischen Störstoffe im Klärgas. Insbesondere Schwefelwasserstoff und organische Siliziumverbindungen schädigen massiv und nachhaltig die Gasmotoren:

	Anorganische Spurengase	BTEX		Kohlenwasserstoffe		
[mg/m <sup>3</sup> ]	H <sub>2</sub> S	Benzol	Toluol	C6 bis C10	> C10	Summe org. Si-Verb.
Mittelwert	433,6	0,2	31,0	103,7	161,7	14,9
Anzahl	172	126	122	111	110	308
Minimum	0,0	0,0	0,0	3,0	2,0	0,0
Maximum	4240,0	5,0	924,0	967,0	783,0	317,4

Quelle: Umweltanalytik RUK GmbH, Longuich

### 3.3 Organische Siliziumverbindungen

Aus der Gruppe der organischen Siliziumverbindungen werden in Klär- und Deponiegasen überwiegend die so genannten Siloxane mit der allgemeinen chemischen Formel H<sub>3</sub>Si – (O-SiH<sub>2</sub>) – O-SiH<sub>3</sub> und deren Abbauprodukte wie z.B. Trimethylsilanol vorgefunden. Die allgemein bekannte Produktbezeichnung der Siloxanverbindungen ist Silikon.

Silikone und Siloxane werden hinsichtlich ihrer Toxizität und ihres Umweltgefährdungspotenzials als weitgehend ungefährlich eingestuft.

In den letzten Jahren ist die Verwendung von siliziumorganischen Stoffen sprunghaft angestiegen. Gründe hierfür liegen in den chemisch physikalischen Eigenschaften, die sie für unterschiedliche Anwendungen geeignet machen. Siloxane sind wasserabweisend, deshalb eignen sie sich als Wasser abstoßendes Mittel für Textilien und Papier, Farben und Lacke sowie als Zusätze zur Imprägnierung von Baustoffen. Siloxane sind extrem temperaturbeständig, daher können langkettige Verbindungen als Motorenschmiermittel verwendet werden.

Des Weiteren zeigen sie ein kunststoffartiges Verhalten, d. h., sie können sich einerseits als Flüssigkeiten, andererseits als verformbare oder plastisch elastische Massen verhalten und verarbeiten lassen. Wegen dieser Eigenschaften finden sie Verwendung als Entschäumer bei Wasch- und Reinigungsmitteln, Klebstoffen, Dichtungen, Beschichtungen und Formmassen.

Kurzkettige Siloxane werden wegen ihrer Hautverträglichkeit als Vaselineersatz in Cremes und Kosmetika eingesetzt. Silikone zählen zu den Kunststoffen mit der höchsten Isolierfähigkeit und sind weitgehend temperaturunabhängig. Sie eignen sich somit auch als Starkstromisolatoren.

Durch den täglichen Gebrauch und ihre weite Verbreitung gelangen Polysiloxane in Abwässer und damit in den Abfallkreislauf, in Deponien, in Kläranlagen und auch in co-fermentierende Biogasanlagen. Dort treten während der Faulung die Siloxane (i.d.R. die zyklischen Siloxane D4 & D5) in die Gasphase über. Innerhalb von Deponiekörpern entstehen auch relevante Konzentrationen an Hexamethyldisiloxan und Trimethylsilanol.

Bei der thermischen Verwertung von Faulgasen in Gasmotoren werden siliziumorganische Verbindungen zu mikrokristallinem Siliziumdioxid (Quarz) oxidiert. Dieses verursacht wie ein Schleifmittel Verschleißerscheinungen an Zylinderlaufflächen und Motoren (siehe Abb. 1).

Die Problematik, ausgelöst durch die ständig steigende wirtschaftliche Nutzung von Siloxanen und dem damit verbundenen Eintrag in die Umwelt, ist erst neueren Datums.

In den letzten Jahren hat sich die weltweite Produktion der verschiedensten Silikonarten vervielfacht. Die Industrie gibt eine jährliche Steigerung von 7% an.

### 3.4 Anforderungen der BHKW Motorenhersteller

Nachfolgende Tabelle zeigt am Beispiel eines Gasmotorenherstellers die vorgegebenen Parameter für die Gasqualität. Im Vergleich zu den o.g. Schadstoffkonzentrationen im Rohgas zeigt sich deutlich die Notwendigkeit für die Gasreinigung, wenn nachhaltig Schäden an den Motoren vermieden werden sollen.

Parameter	Symbol	Grenzwert	Einheit
Methanzahl	MZ	< 80	kWh/m <sup>3</sup> <sub>N</sub>
Heizwert	Hu,N	< 5	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Chlorgehalt	Cl	< 100	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Fluorgehalt	F	< 50	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Gesamt Chlor/Fluor	Σ(Cl,F)	< 100	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Staubgehalt	< 5 µm	< 10	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Öldampf		< 400	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Siliziumgehalt	Si	< 5	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Schwefelgehalt	S	< 300	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	< 200	ppm
Ammoniakgehalt	NH <sub>3</sub>	< 50	mg/m <sup>3</sup> <sub>N CH4</sub>
Relative Feuchte	φ	< 60	%

## 4 Gasreinigung als Maßnahme zur Vermeidung von Motorschäden

Begegnen lässt sich der Vermeidung von Schäden an den Gasmotoren und einer nachhaltigen Verbesserung der Maschinenverfügbarkeit nur durch den Einsatz vorgeschalteter Gasreinigungssysteme.

Für Klärgas werden entsprechende Systeme heute technisch und wirtschaftlich vorteilhaft eingesetzt. In Deutschland zählt die Siloxa Engineering AG zu den Marktführern für Gasreinigungssysteme.

Im Bereich der Klär- und Biogasanlagen hat sich zur Abtrennung der organischen Siliziumverbindungen ein Verfahrensprinzip aus Aktivkohleadsorption in Verbindung mit einer vorgeschalteten Gastrocknung als sehr erfolgreich durchgesetzt.

Voraussetzung für den Einsatz von Gasreinigungen ist die Wirtschaftlichkeit dieser Gasreinigungsprozesse. Insofern müssen die Betriebskosten für die Gasreinigung geringer sein als die siliziumbedingten Zusatzkosten für Wartung, Instandhaltung, Maschinenbruch oder Produktionsausfall.

#### **4.1 Aktivkohleadsorption als bewährtes Verfahren zur Gasreinigung**

Aktivkohle hat die Eigenschaft, organische Verbindungen zu adsorbieren. Mit Anlagen, die nach dem Prinzip der Aktivkohleadsorption arbeiten, werden Reingasqualitäten von  $< 1\text{ mg Siloxane/m}^3_{\text{Klärgas}}$  erzielt.

Die Adsorption in einem Festbett mit Austausch der Aktivkohle ist ein einfaches, sehr effektives und sicheres Verfahren. Mit einer optimalen Konditionierung des Gases und bei einer entsprechenden Auslegung der Anlage können die spezifischen Kosten für den Aktivkohleaustausch optimiert bzw. signifikant reduziert werden.

Die beladene Aktivkohle wird beim Hersteller der Aktivkohle oder einem Dienstleister regeneriert. Der Verbrauch an Betriebsmitteln und damit die Kosten werden maßgeblich durch die Gasqualität und die quantitative und qualitative Schadstofffracht bestimmt.

Die Adsorptionseigenschaften von Aktivkohle können durch verschiedene physikalische Parameter optimiert werden. So hat die Feuchtigkeit des Gases einen wesentlichen Einfluss auf die Beladungskapazität. Je höher die relative Feuchte, umso geringer ist die Beladungskapazität der Aktivkohle. Daher ist verfahrenstechnisch eine möglichst geringe Feuchte im gesamten Adsorber einzustellen. Insofern muss grundsätzlich das Gas vor der Aktivkohleadsorption getrocknet werden.

## 4.2 Gasreinigungssysteme mit Aktivkohle-Festbettadsorbern

Prinzipiell besteht die Verfahrenstechnik aus zwei Behandlungsstufen.

Für den Adsorptionsprozess ist es notwendig, dass das zu reinigende Klärgas eine geringe relative Gasfeuchte aufweist. Insofern verfügt das SILOXA- Gasreinigungssystem mindestens über einen Rohrbündelwärmetauscher, in dem das feuchtegesättigte Gas vor Eintritt in die Aktivkohlefilter erwärmt wird, um eine relative Gasfeuchte von  $\leq 50\%$  rel. einzustellen (Stufe 1). In der zweiten Stufe wird das Klärgas mittels Aktivkohleadsorption gereinigt.

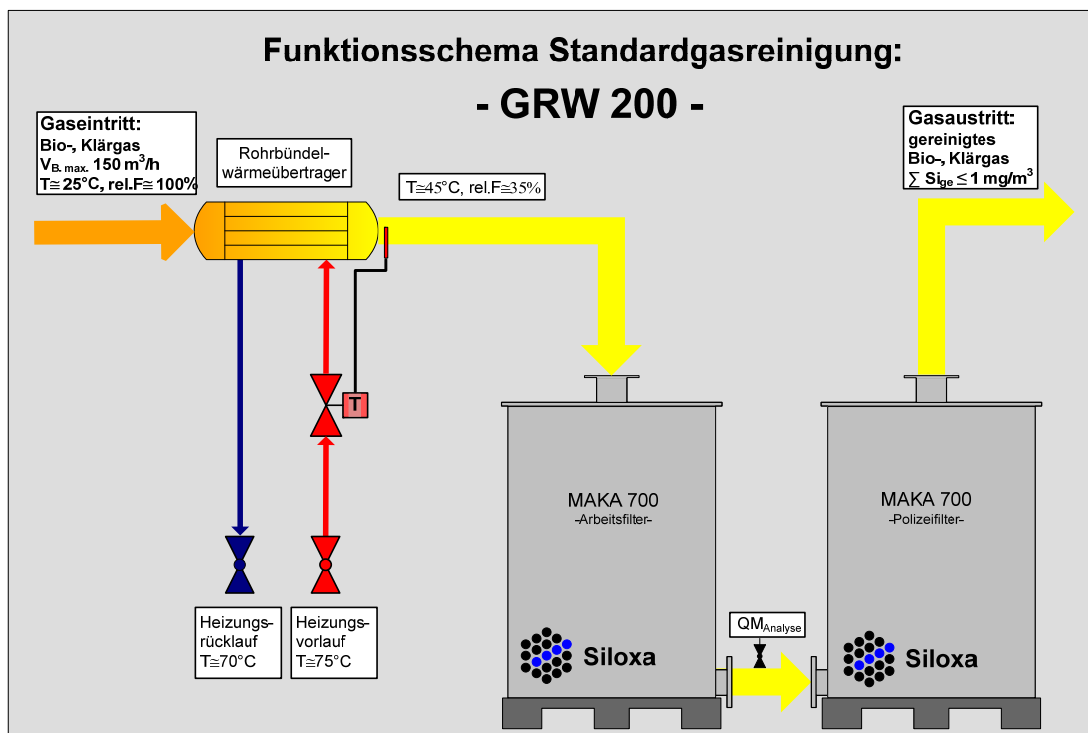


Abbildung 2: Verfahrensschema zur Gasreinigung.

Das System verfügt über zwei Aktivkohlefilter, die nacheinander (Reihenschaltung) durchströmt werden. Die Gasreinigung erfolgt im ersten Aktivkohlefilter (Arbeitsfilter). Der zweite Filter ist ein Sicherheitsfilter (Polizeifilter), der nur dann Schadstoffe abscheidet, wenn die Aufnahmekapazität des Arbeitsfilters erschöpft ist und der Durchbruch des Filters nicht rechtzeitig erkannt wird. Die Überprüfung des Beladungszustandes erfolgt durch regelmäßige Gasprobenuntersuchungen des Reingases. Die manuelle Probennahme erfolgt dabei hinter dem Arbeitsfilter.

Die Reihenschaltung ist bedingt durch die Tatsache, dass keine wirtschaftliche Technik verfügbar ist, die Siloxankonzentration nach der Aktivkohle online zu messen. Periodische Messungen sind daher der Stand der Technik. Da die Einlaufkonzentrationen in den Filter teils

signifikant schwanken, können keine festen Auswechselintervalle vorgegeben werden. Zudem ist zu berücksichtigen, dass durch den Desorbitionseffekt im Abstrom des Aktivkohlefilters - bei Erschöpfung der Aufnahmekapazität - signifikant höhere Siloxankonzentrationen auftreten als im Zustrom des Filters. Um erhebliche Schäden am Gasmotor auszuschließen, muss ein Durchbruch der Siloxane verhindert werden. Zur Abtrennung von Siloxanen wird von der SILOXA daher ausschließlich die Reihenschaltung (Arbeitsfilter/Polizeifilter) eingesetzt.

Die Aktivkohlefilter werden von der Siloxa bis zu einem Gasvolumenstrom von ca. 200 m<sup>3</sup>/h sinnvoll als Wechselfilter (mobil und für geringe Gasvolumenströme [ca. 200 m<sup>3</sup>/h]) oder als stationäre Filtersysteme (große Volumenströme) ausgeführt.



Abbildung 3: SILOXA-Wechselfiltersystem MAK 100.

Zur Wiederherstellung der Reinigungsleistung wird der komplette (erschöpfte) Arbeitsfilter durch einen Austauschfilter mit neuer Aktivkohle ersetzt. Dabei kann der vorbeladene Polizeifilter jetzt als Arbeitsfilter gefahren werden und der frische neue Filter als Sicherheitsfilter. Diese Betriebsweise ermöglicht die nahezu vollständige Ausnutzung der Aktivkohle und trägt somit wesentlich zur hohen Wirtschaftlichkeit der Aktivkohlegasreinigung bei. Der Austausch der Filter erfordert nur wenige Handgriffe und ist schnell ohne lange Betriebsunterbrechungen ausgeführt.





Abbildung 4: SILOXA-Gasreinigungssystem FAKA 3.000 K2E und TWIN FAKA K2E.

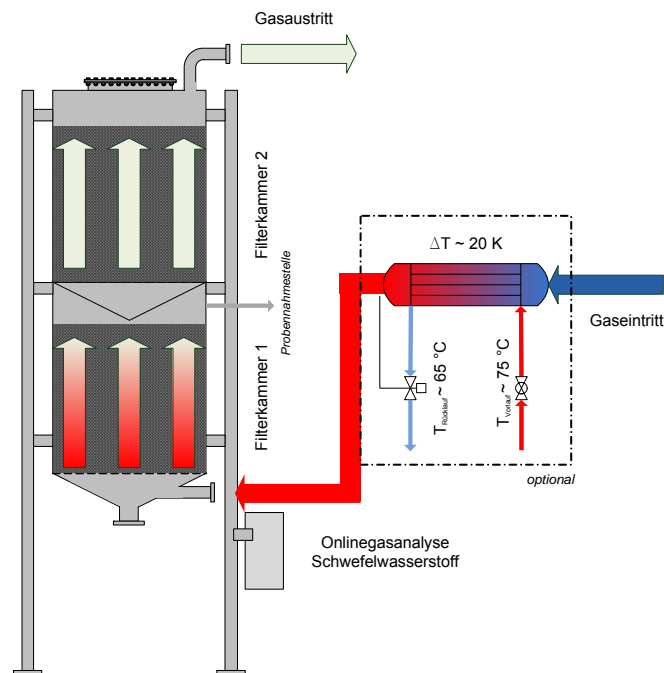
Alternative Gasreinigungssysteme für Volumenströme  $> 200 \text{ m}^3/\text{h}$  –  $1500 \text{ m}^3/\text{h}$  werden als stationäre Filteranlagen Typ FAKA ausgeführt (vertikale Aktivkohlefilter).

Der Aktivkohlebehälter wird in einer Dreiständerkonstruktion aufgehängt. Zur Erleichterung des Aktivkohleaustausches ist der Behälterboden als Konus ausgeführt (Entleerung) und das Kopfteil zur begehbaren Arbeitsfläche ausgebaut (Neubefüllung).

Das System verfügt über einen Zugang zur Arbeitsbühne (Aufstiegsleiter oder Treppe) sowie einen Elektrokettenzug mit Kranausleger für den Befüllvorgang mittels Big-Bag-Gebinden.

Zur Reinigung durchströmt das Deponiegas den Filter von unten nach oben, in dem die Aktivkohle in Form einer losen Schüttung auf einem Siebboden lagert. Der FAKA ist in zwei Kammern geteilt. Die erste Kammer entspricht dem Arbeitsfilter in der Reihenschaltung. Wird nach der ersten Kammer ein Durchbruch der Siloxane durch periodische Gasanalysen festgestellt, kann die Aktivkohle durch die Entleerung in ein Big-Bag abgelassen werden. Über ein Ventil zwischen der 1. und 2. Kammer wird dann die Kohle aus der 2. Kammer in die 1. Kammer selbstständig überführt. Somit wird der teilbeladene Polizeifilter zum Arbeitsfilter – Analog zur Reihenschaltung. Die frische Kohle wird dann in den Polizeifilter (2. Kammer) eingefüllt.

### Siloxa Aktivkohleadsorber / TYP FAKA 2-Kammer



Durch die 2-Kammer-Technik ist eine aufwendige Verrohrung beim FAKA-System nicht notwendig. Dies macht diese Technik sehr wirtschaftlich. Bei größeren Gasvolumenströmen oder hohen Schadstofffrachten können sogenannte Twin-FAKA's eingesetzt oder individuell geplante Filteranlage mit bis zu 80.000 l Aktivkohlevolumen geplant werden.



Abbildung 5: SILOXA-Gasreinigung Kläranlage Moskau 5.000 m<sup>3</sup>/h.

## **5 Gaskühlung**

Gas hat grundsätzlich die Eigenschaft, abhängig von der Temperatur, unterschiedliche Mengen an Wasser (-dampf) aufzunehmen. Je wärmer ein Gas ist, umso mehr dehnt es sich aus und umso mehr Wasser kann es aufnehmen. Ein Faulgas mit einer Temperatur von 40°C kann bei einer relativen Feuchte von 100% (feuchtigkeitsgesättigt) ca. 50 g Wasser pro Kubikmeter aufnehmen. Bei 45°C Gastemperatur sind es bereits 64 g/m<sup>3</sup>. Wenn das Gas nun abgekühlt wird, verringert sich das Gasvolumen und damit die Aufnahmekapazität gegenüber Wasser. Kühlt das Gas beispielsweise auf 10°C ab, kann es nur noch rund 9 g/m<sup>3</sup> Wasser aufnehmen. Das restliche Wasser muss aufgrund der geringeren Aufnahmekapazität auskondensieren.

Dieser Prozess wird im allgemeinen Gastrocknung genannt, was aber im technischen Sinne nicht korrekt ist, da das Gas nach dem Abkühlen weiterhin 100% feuchtigkeitsgesättigt ist. Erst wenn es wärmer wird, sinkt die relative Feuchte und es kann als getrocknet bezeichnet werden. Vor der Aktivkohle muss das Gas daher auch bei vorgeschalteter Gaskühlung noch erwärmt werden, um die notwendige 50% relative Feuchte zu erreichen.

Positiver Nebeneffekt der Gaskühlung: Durch die Reduktion des Anteils an Wasser(-dampf) verringert sich das Gasvolumen erheblich. So hat der Wasserdampf in einem gesättigten Biogas bei 40°C ein Volumen von 7,3%, nach der Abkühlung auf 3 °C jedoch nur noch 0,7%. Dadurch steigt der Methananteil im Gas prozentual deutlich an. In Bezug auf die Schadstoffkonzentration der Siloxane und Kohlenwasserstoffe > C<sub>5</sub> kann bei einer Abkühlung auf 3-5°C festgestellt werden, dass ca. 20-30% dieser Verbindungen mit auskondensiert werden. Dies führt zu einer entsprechenden Entlastung der Aktivkohle und zu einem geringeren Verbrauch. Insbesondere bei größeren Volumenströmen und höheren Schadstofffrachten kann eine Gaskühlung die Wirtschaftlichkeit einer Aktivkohlegasreinigung weiter verbessern.

## **6 Betriebsergebnisse**

Am Beispiel der Betriebsdaten der Heidelberger Versorgungs- u. Verkehrsbetriebe GmbH (HVV), Heidelberg, wird im Folgenden die Wirtschaftlichkeit der Gasreinigungssysteme aufgezeigt.

Die HVV betreiben an 6 Kläranlagenstandorten Gasmotoren mit vorgeschalteten Gasreinigungsanlagen der SILOXA Engineering AG.

<b>Kläranlage</b>	<b>Gasmotoren</b>	<b>IBN</b>	<b>IBN der SILOXA-Gasreinigung</b>
AZV Heidelberg	2 x MDE, 294 kW, ca. 8.200 h/a	27.06.2000	15.10.2002
AZV Hollmuth	1 x Köhler & Ziegler, 75 kW, ca. 7.000 h/a	14.10.2002	15.07.2003
AZV Medesheimer Cent	1 x Köhler & Ziegler, 75 kW, ca. 7.750 h/a	06.11.2002	24.07.2003
Klärwerk Sinsheim	1 x G.A.S., 120 kW, 3 x G.A.S., 50 kW, 1.000 bis 6.500 h/a	3x in 1995 1x in 2000	18.08.2004
AZV Untere Hardt	1 x Köhler & Ziegler, 185 kW, ca. 7.000 h/a	09.01.2005	08.11.2006
AZV Schwarzbach	1 x Köhler & Ziegler, 90 kW, ca. 7.000 h/a	12.05.2005	17.08.2005

## 6.1 Analyseergebnisse

### 6.1.1 Ölanalysen

Exemplarisch zeigt die Analyse des Motorenöls zweier Module die Wirkungsweise der SILOXA-Gasreinigung. Durch den Einsatz der Gasreinigungsanlage konnte die Konzentration signifikant reduziert werden.

<b>Siloxanbelastung im Motorenöl</b>	<b>Modul 1</b>		<b>Modul 2</b>	
	<b>Vor Einbau der Gasreinigung</b> [mg/kg]	<b>Nach Einbau der Gasreinigung</b> [mg/kg]	<b>Vor Einbau der Gasreinigung</b> [mg/kg]	<b>Nach Einbau der Gasreinigung</b> [mg/kg]
Anzahl der Proben	6	4	6	4
Durchschnittswert	105	5	103	5
Minimalwert	70	7	63	7
Maximalwert	156	3	162	3

### 6.1.2 Gasanalysen

Exemplarisch sind in nachfolgender Tabelle die Analyseergebnisse des Rohgases sowie diejenigen nach Filter 1 (Arbeitsfilter) aufgeführt. Das Ergebnis zeigt die Siloxanabreinigung auf Werte unter 1 mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub>.

<b>Summe organische Silizium-Verbindungen (ber.)</b>	<b>Rohgas</b> [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]	<b>nach Filter 1</b> [mg/m <sup>3</sup> <sub>N</sub> ]
AZV Schwarzbachtal	77,9	0,4 (nach 1.055 Bh)
AZV Untere Hardt	18,4	0,4 (IBN)

### 6.2 Betriebskostenvergleich

In der nachfolgenden Gegenüberstellung werden die Kosten pro Gasmotor verglichen. Die Tabelle zeigt die jährlichen Kosten, und zwar vor dem Einsatz der Gasreinigung und nach der Installation des SILOXA- Gasreinigungssystems auf der Kläranlage AZV Heidelberg (2 x 294 kW, MDE). Die Betriebsdaten sind vom Kläranlagenpersonal für das interne Benchmarking erfasst worden.

<b>Installation der SILOXA-Gasreinigung</b>	<b>vorher</b>	<b>nachher</b>
	Kosten [€/a]	Kosten [€/a]
<b>Ölwechsel und Zusatzarbeiten</b>	alle 500 h	alle 1.000 h
200 l, 2 €/l	6.400	3.200
12 Kerzen, 40 €/St	7.680	3.840
8 h, 50 €/h	6.400	-
<b>Überholung der Zylinderköpfe</b>	10.000	
<b>Summe I (2 x 294 kW, MDE)</b>	<b>60.960</b>	<b>14.080</b>
<b>Störungsbeseitigung (zusätzlich)</b>		
40 h, 50 €/h	2.000	-
<b>Aktivkohle (Fullservice)</b>		5.850
<b>AfA (7 a)</b>		5.086
<b>Summe II</b>	<b>62.960</b>	<b>25.016</b>

Die Gegenüberstellung der Betriebskosten zeigt eindrucksvoll die signifikante Kosteneinsparung von 37.933.- €/a (in 7 Jahren entsprechend 265.608.- €) durch den Einsatz von Gasreinigungssystemen zur Entfernung von organischen Siliziumverbindungen aus dem Klärgas vor der energetischen Nutzung. Insofern amortisiert sich am Beispiel dieser Kläranlage die Investition bereits nach einem Jahr.

## 7 Zusammenfassung

Gasaufbereitungssysteme für Biogas als Vorschaltanlagen für die energetische Gasnutzung sind Stand der Technik. Sie schützen wirkungsvoll vor Schäden durch den Eintrag von insbesondere Siloxanen aber auch vor weiteren Störstoffen ( $H_2S$ ).

Auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik zur Eliminierung von Siloxanen aus Klär- und Biogas ist SILOXA Marktführer. Die SILOXA Anlagen zeichnen sich durch bedarfsgerechte, modular aufgebaute Systeme aus. Sie lassen sich schlüsselfertig - komplett verdrahtet, verschaltet und verrohrt - in den Gaspfad einfügen. Die Module sind sowohl für eine Innen- als auch für eine Außenaufstellung geeignet. Sie gewährleisten eine sichere Betriebsführung und sind besonders wirtschaftlich.

Betriebsergebnisse realisierter Anlagen belegen eindrucksvoll folgende, generelle Erkenntnisse:

- Verbesserung der Gasqualität
- Vermeidung von Motorschäden
- Steigerung der Gasmotorenverfügbarkeit
- Reduzierung der Wartungseinsätze und Einsätze zur Störungsbeseitigung
- Signifikante Betriebskostensparnis