

# STAND UND TRENDS BEI DER FAULGASVERWERTUNG AUF KLÄRANLAGEN

W. Frey

Abwassertechnische Ausbildung und Beratung

**Abstract:** Faulgas ist ein wertvoller Energieträger. Im ersten Abschnitt werden der Faulgasanfall und die Faulgaszusammensetzung besprochen. Ein wesentlicher Punkt ist die erforderliche Gasreinigung und Gasaufbereitung. Die Möglichkeiten der Nutzung des Faulgases in Verbrennungsmotoren und Gasturbinen sowie ein Seitenblick auf alte/neue Entwicklungen bilden den Hauptteil des Beitrages. Zum Abschluss werden die Emissionen der Verfahren diskutiert.

**Key Words:** Faulgas, Faulgasnutzung, Entschwefelung, Methananreicherung, Blockheizkraftwerk, Ottomotor, Mikrogasturbine, Stirlingmotor, Organic Rankine Cycle, Luftschadstoffe, Emissionsgrenzwerte

## 1 Einleitung

Die beheizte anaerobe Schlammfäulung ist ein etablierter Prozess zur Schlammstabilisierung auf Kläranlagen. Die daraus resultierende Faulgasproduktion war und ist ein positiver Nebeneffekt zur Energiegewinnung aus den Rückständen der Abwasserreinigung.

Auf Grund des steigenden Kostenbewusstseins sind Kläranlagenbetreiber bemüht, einerseits den Energiebedarf zu senken und andererseits die Eigenproduktion zu steigern.

Der vorliegende Vortrag versucht einen Überblick über verfügbare Methoden der Faulgasverwertung auf Kläranlagen zu geben. Neben den eigentlichen Verwertungsmethoden werden auch, aus den jeweiligen Verfahren, resultierende Anforderungen an die Gasaufbereitung und Emissionsfragen behandelt.

## 2 Faulgaszusammensetzung und Faulgasanfall

Im Rahmen dieses Vortrages wird auf Gas aus Klärschlammfaulanlagen, aus vorwiegend mit kommunalem Abwasser beschickten Kläranlagen, eingegangen. Detaillierte Angaben zu anderen Biogasen findet man z. B. im DWA Merkblatt 363 [1].

Bei der anaeroben Stabilisierung von Klärschlamm entsteht Faulgas. Es besteht im Wesentlichen aus ca. 65 Vol.% Methan ( $\text{CH}_4$ ) und ca. 35 Vol.% Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ). Es sind auch geringe Anteile von Schwefelwasserstoff (typischer Wert 0,1 Vol.%,  $\text{H}_2\text{S}$ ) und Spuren von z.B. Stickstoff ( $\text{N}_2$ ) enthalten.

Die Menge an gebildetem Faulgas ist abhängig von der Menge an abbaubaren organischen Stoffen und somit vom Stabilisierungsgrad der eingebrachten Schlamm Trockensubstanz. Zusätzlich wird die Gasbildung von der Temperatur und der Aufenthaltszeit im Faulbehälter beeinflusst.

Pro kg abgebauter organischer Trockensubstanz entstehen ca. 500 Liter Methan. Der Faulgasanfall schwankt auf kommunalen Kläranlagen zwischen 15-20 Liter pro Einwohner und Tag. Bei einer hoch belasteten Kläranlage wird wesentlich mehr faulfähiges Material in den Faulbehälter eingebracht als bei einer Schwachlastbelegung zur vollständigen Nitrifikation und Denitrifikation. Auch ist bei Anlagen mit Vorklärung ein höherer Gasanfall zu erwarten als bei Anlagen ohne Vorklärung.

Sind im Schlamm durch die Entsorgung von Speiseresten oder die Zugabe von Co-Substraten viele organische Stoffe enthalten, so kann der Gasanfall beträchtlich höher sein. Problematisch ist dann aber auch häufig, dass organisches Material in ungelöster Form nicht vollständig stabilisiert wird und im ausgefaulten Schlamm (Faulzeiten > 25 - 30 Tage) immer noch fäulnisfähige Stoffe enthalten sind und somit der Schlamm zum Anfaulen neigt. In jedem Fall muss die ausreichende Stabilisierung Vorrang vor erhöhtem Gasgewinn haben!

Reines Methangas enthält pro  $\text{m}_\text{N}^3$  etwa 36.000 kJ. Diese Energiemenge entspricht umgerechnet 10 kWh/ $\text{m}_\text{N}^3$ . Berücksichtigt man, dass Faulgas zu etwa zwei Drittel aus Methan und zu einem Drittel aus Kohlendioxid besteht, so berechnet sich ein Energieinhalt des Faulgases von 24.000 kJ/ $\text{m}_\text{N}^3$  oder 6,5 kWh/ $\text{m}_\text{N}^3$ .

Der Explosionsbereich von reinem Methan in Mischung mit Luft liegt zwischen 4,4 Vol.% Methan (untere Explosionsgrenze) und 16,5 Vol.% Methan (obere Explosionsgrenze).

### **3 Faulgasaufbereitung**

Die Art und der Umfang der Faulgasaufbereitung muss sich im Einzelfall an der Art der Gasverwertung orientieren. Häufig ergeben sich aus Vorschriften zur Reduktion von Abgasemissionen zusätzliche Forderungen an die Gasaufbereitung.

Bei der Nutzung des Faulgases auf der Kläranlage sind im Wesentlichen

- Partikel (z.B. Schaum) und Wasserdampf
- Schwefelwasserstoff
- Siliziumverbindungen

zu entfernen. Je nach Art der Nutzung können weitere, zum Teil aufwändige, Schritte notwendig sein. Soll das Faulgas in ein Gasnetz eingespeist werden ist eine Methananreicherung erforderlich. Häufig ist auch eine Druckerhöhungsanlage und eine Gasregelstrecke notwendig.

Auf weitere Gasinhaltsstoffe, wie sie in Biogasen anderer Herkunft enthalten sein können, wird im Rahmen dieses Vortrages nicht eingegangen. Eine detaillierte Ausarbeitung zu diesen Punkten findet man z.B. im DWA Merkblatt 361 „Aufbereitung von Biogas“ [2].

#### **3.1 Entfeuchtung**

Biogas ist nach der Entstehung in der anaeroben Schlammbehandlung zu 100 % mit Wasserdampf gesättigt. Ein hoher Wasserdampfanteil im Faulgas ist in Verbindung mit hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen schädlich für die nachgeschalteten Anlagenkomponenten, da durch Kondensation Wasser ausfallen und es zur Bildung von schwefeliger Säure kommen kann. Daher erfordern die meisten Gasnutzungseinrichtungen möglichst trockenes Gas.

### 3.1.1 Methoden der Entfeuchtung

Im praktischen Betrieb erfolgt die Abtrennung von Wasserdampf häufig im Kiesfilter und durch Nutzung der Kondensationsprozesse in den Rohrleitungen sowie im Gasspeicher. An den kühlen Wänden wird der Taupunkt unterschritten und es fällt Kondensat aus. Wichtig für die Funktion der Wasserabtrennung sind entsprechend angeordnete Kondensatablässe. Eine zusätzliche Absenkung der relativen Feuchte des Faulgases wird durch eine Wiedererwärmung, auf dem Transportweg vom Gasspeicher zu den Verbrauchern, erzielt.

Eine Entfeuchtung durch Kühlaggregate, Verdichtung oder Adsorptionseinrichtungen findet man auf kommunalen Kläranlagen eher selten.

## 3.2 Entschwefelung

Aus den im Abwasser enthaltenen Schwefelverbindungen (z.B. Sulfat) entsteht unter anaeroben Bedingungen im Faulturn Schwefelwasserstoff. Im Faulgas ist Schwefelwasserstoff in der Größenordnung von etwa 0,1 Vol.%  $H_2S$  enthalten.

Hinweis zur Umrechnung von Konzentrationsangaben von Schwefelwasserstoff:

$$0,1 \text{ Vol.}\% \text{ entspricht } 1000 \text{ ppm} \text{ entspricht } 1530 \text{ mg/m}_N^3$$

Schwefelwasserstoff im Faulgas bewirkt:

- Bei der Verbrennung des  $H_2S$  entsteht Schwefeldioxid. Bei der Kondensation des Wasserdampfes im Abgas bildet sich Schwefelsäure. Diese führt zu Korrosion in den Abgasanlagen.
- Schwefeldioxid im Abgas
- Schmieröl verliert durch  $H_2S$  seine Schmierwirkung, wodurch es zu Motorschäden kommen kann. Es gibt spezielle Schmiermittel für mit Faulgas betriebene Motoren.

### 3.2.1 Technische Maßnahmen zur Entschwefelung

Im Folgenden werden die häufigsten auf Kläranlagen anzutreffenden Verfahren beschrieben.

### Zugabe von Eisen

Auf Anlagen, auf denen Eisensalze zur Phosphat-Entfernung zugegeben werden, enthält das Faulgas nur mehr wenig H<sub>2</sub>S. Bei der Phosphorfällung wird Eisen im Überschuss (z.B.  $\beta = 1,5$ ) zugegeben und es entsteht Eisenhydroxid. In der Faulung reagiert das Eisen mit dem Schwefel und führt ihn in eine unlösliche Form (Eisensulfid) über. Das heißt der Schwefel wird im Faulschlamm gebunden und es entsteht nur sehr wenig Schwefelwasserstoff. Im Faulgas von Anlagen, die mit Phosphorfällung betrieben werden, findet man in der Regel Schwefelwasserstoffgehalte von ca. 0,01 Vol.%. Eine externe Entschwefelung kann dadurch unter Umständen entfallen bzw. wird kaum belastet. In Sonderfällen (bei relativ niedrigen H<sub>2</sub>S-Gehalten im Faulgas) ist es möglich, eine Fällung gezielt zur H<sub>2</sub>S-Entfernung aus dem Faulgas zu betreiben.

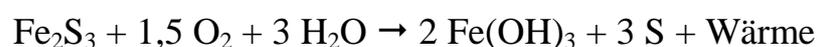
Werden Aluminiumsalze zur P-Fällung eingesetzt, kommt es zu keiner Reduktion des H<sub>2</sub>S-Gehaltes im Faulgas. In der Praxis werden daher manchmal Mischprodukte, die auch Eisen enthalten, zur Phosphorfällung eingesetzt. Weitere Hinweise zu diesem Thema findet man z.B. im DWA Arbeitsblatt 202 „Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser“ [3].

### Trockengasentschwefler

Häufig wird die sogenannte Trockengasentschwefelung (Adsorptionsverfahren) eingesetzt. Die Anlagen bestehen aus einem oder zwei Behältern, die mit einem Adsorptionsmittel (Raseneisenerz; Fe(OH)<sub>3</sub>) gefüllt sind. Beim Durchströmen des Faulgases lagert sich der Schwefelwasserstoff, nach folgender Reaktionsgleichung, an der Füllmasse an.



Zur Regeneration des Füllmaterials wird Luft statt Faulgas durchgeleitet, wodurch der angelagerte Schwefelwasserstoff in elementaren Schwefel umgewandelt wird. (Vorsicht: starke Wärmeentwicklung). Es gilt folgende Reaktionsgleichung:



Raseneisenerz ist körniges Schüttgut (Korngröße über 10 mm) mit einer Schüttdichte von ca. 850 kg/m<sup>3</sup>. Pro m<sup>3</sup> Füllmasse können ca. 120 kg H<sub>2</sub>S aus dem Gas entfernt werden. Der Wirkungsgrad des Verfahrens wird mit ca. 95 % (bei einer Rohgaskonzentration von 500 ppm) angegeben.

Neuere Anlagen haben Einturmentschwefler. Bei diesen erfolgt die Regeneration simultan. Dazu wird im laufenden Betrieb zum Faulgas eine geringe Menge (2 – 3 Vol%) Luft beigemischt. Hier ist eine zuverlässige exakte Regelung der Luftbeimischung erforderlich, um zündfähige Gemische von Faulgas und Luft zu vermeiden.

### **Biologische Entschwefelung**

Die biologische H<sub>2</sub>S-Oxidation im wässrigen Milieu durch aerobe Schwefelbakterien ist allgemein bekannt. Es gibt zwei Möglichkeiten der technischen Umsetzung:

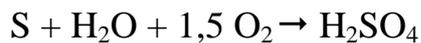
- Tropfkörper oder Rieselbettreaktor
- Einblasen von Luft in den Bioreaktor (Faulturm)

Auf Kläranlagen kommt vereinzelt das Verfahren mit Tropfkörper bzw. Rieselbettreaktor zum Einsatz.

Die Anlage besteht aus einem Behälter in dem sich Füllkörper befinden. Die Oberfläche ist mit speziellen Mikroorganismen bewachsen die die Oxidation des Schwefelwasserstoffs bewirken. Die Mikroorganismen müssen mit Nährstoffen und Spurenelementen versorgt werden. Dies erfolgt z.B. durch die Zugabe von verdünntem Klärschlamm.

Das Faulgas tritt unten in den Reaktor ein und strömt nach oben. Die Mikroorganismensuspension wird stetig im Kreislauf gepumpt, sodass der Schwefelwasserstoff von der flüssigen Phase aufgenommen werden kann. Über die Kreislaufleitung werden die Oxidationsprodukte (Schwefel und/oder Sulfat) ausgeschleust. Es werden z. B. Mikroorganismen der Gattung Thiobacillus (Thiooxidans/Ferrooxidans) eingesetzt. Diese Bakterien nutzen die Schwefelverbindungen und als Kohlenstoffquelle Kohlendioxid für ihren Stoffwechsel. Sie sind in der Lage, unter aeroben Bedingungen Schwefelwasserstoff zu

Schwefel bzw. zu Sulfat zu oxidieren. Ihr Stoffwechsel lässt sich ganz allgemein mit folgenden Gleichungen darstellen:



Der Sauerstoffbedarf wird durch Zufuhr von Umgebungsluft, welche mit einem regelbaren Gebläse zugeführt wird, gedeckt. Als Steuergröße wird der Biogasvolumenstrom oder die  $\text{O}_2$ -Konzentration im Biogas nach dem Tropfkörper verwendet. Ein wichtiger Betriebsparameter ist die Temperatur, diese wird mittels Heizung eingestellt und geregelt.

### 3.3 Siloxanentfernung

Siloxane sind organische Siliziumverbindungen. Sie werden synthetisch hergestellt und kommen in der Natur nicht vor. Siloxane sind z. B. in Shampoos, Kosmetikas und Waschmitteln enthalten. Über kommunale Abwässer findet der Eintrag ins Biogas statt. Bei der Verbrennung des Biogases in Gasmotoren entstehen glasharte, siliziumhaltige Ablagerungen, welche zu verstärktem Verschleiß und Schäden an Zylindern und Kolben der Motoren führen. Das Problem ist seit den 90-Jahren bekannt und wurde anfänglich mit häufigeren Ölwechseln bekämpft. Von Motorenherstellern werden Grenzwerte von ca.  $5 \text{ mg/m}_\text{N}^3$  gefordert. Bei Betrieb mit Oxidationskatalysatoren liegen die Grenzwerte deutlich niedriger.

Als Verfahren stehen z. B. die

- Aktivkohleabsorption
- Taupunktkühlung
- Tiefkühlung und
- Wäsche

zur Verfügung. Details findet man in DWA M361 [2].

### 3.3.1 Aktivkohleadsorption

Aktivkohle kann prinzipiell Siloxane binden, hat jedoch eine begrenzte Beladungskapazität. Es können Reingaswerte im Bereich der Nachweisgenauigkeit ( $0,1 \text{ mg/m}^3$ ) erreicht werden. Die Adsorption der Siloxane steht dabei in Konkurrenz zu anderen Gasbegleitstoffen (z. B. Halogene). Die Regeneration siloxanbelasteter Aktivkohle ist aufwändig. Aktivkohle wird für die Siloxanentfernung bei relativ geringen Konzentrationen eingesetzt.

### 3.3.2 Taupunktkühlung

Die Kühlung stellt kein gezieltes Verfahren zur Siloxanentfernung dar. Durch Kühlung können als Nebeneffekt kondensierbare Siloxanverbindungen abgeschieden werden. Grenzwerte von  $5 \text{ mg/m}^3$  können in der Regel nicht gesichert eingehalten werden. Um die Standzeit eines Aktivkohlefilters zu verlängern, können Kühlverfahren als Vorstufe sinnvoll sein.

## 3.4 Methananreicherung

Auf Kläranlagen existieren einige wenige solcher Anreicherungsanlagen. Es werden Adsorptions-, Absorptionsverfahren und Membranverfahren unterschieden.

### 3.4.1 Druckwechseladsorption

Als Adsorbentien werden z.B. Aktivkohle oder Zeolithe eingesetzt. Das Verfahren beruht auf der reversiblen Anlagerung von  $\text{CO}_2$  an die Adsorbentien. Mit dem Verfahren kann je nach Füllmaterial auch eine Rückhaltung anderer Gasbestandteile (z.B.  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Siliziumverbindungen) erreicht werden. Für einen effektiven Betrieb ist Wasserdampf und  $\text{H}_2\text{S}$  vor Eintritt des zu reinigenden Gases in die Adsorptionskolonne zu entfernen.

Das zu reinigende Gas wird mit 4 - 7 bar in die Adsorptionskolonne geleitet. Methan passiert die Trenneinrichtung fast vollständig, andere Gasinhaltsstoffe werden weitgehend zurückgehalten. Die Regeneration der Trennkolonnen erfolgt durch Druckabsenkung. Durch entsprechende Betriebsführung kann eine hohe Trennleistung erreicht werden. Da im Schwachgasstrom noch geringe Anteile

an  $\text{CH}_4$  enthalten sind ist eine Nachbehandlung erforderlich. Nach DWA 361 liegt der Methangehalte im Produktgas  $> 96 \%$ . Der elektrische Energiebedarf der Aufbereitung beträgt ca.  $0,25 \text{ kWh/m}^3$ .

#### 3.4.2 Druckwasserwäsche

Das Verfahren der Druckwasserwäsche ist ein absorptives Verfahren. Als Waschflüssigkeit kommt ausschließlich Wasser zum Einsatz. Das Verfahren beruht auf der guten Löslichkeit von  $\text{CO}_2$  in Wasser.

Das Rohgas wird auf a. 7 bar bis 10 bar verdichtet und in die Waschkolonnen geleitet. Das Kohlendioxid und andere Gaskomponenten werden im Waschwasser gelöst. Das mit  $\text{CH}_4$  angereicherte Produktgas verlässt die Trennkolonne am Kopfende. Durch entsprechende Prozessführung wird die Trennleistung gesteigert. Da im Schwachgasstrom noch geringe Anteile an  $\text{CH}_4$  enthalten sind ist eine Nachbehandlung erforderlich. Nach DWA 361 liegt der Methangehalte im Produktgas  $> 97 \%$ . Der elektrische Energiebedarf der Aufbereitung beträgt bis zu  $0,25 \text{ kWh/m}^3$ .

#### 3.4.3 Membranverfahren

Durch ein vom BM für Verkehr, Innovation und Technologie gefördertes Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien (Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften; Abbildung 1) sowie der Firma Axiom eine Biogas-Aufbereitungs-technologie mit Membrantechnik entwickelt.

Das Rohgas wird entschwefelt, komprimiert, von Ammoniak und einem Teil des Wassers befreit und dann in eine zweistufige Membrananlage geleitet. In der Membranstufe wird das Kohlendioxid und Wasserdampf abgetrennt. Schlüsseltechnologie ist dabei die so genannte Gaspermeation, eine Membrantechnologie, bei der halbdurchlässige Membranen eingesetzt werden, die selektiv durchlässig für Kohlendioxid und Wasserdampf sind, jedoch nicht für Methan (siehe Abbildung 1).

In Österreich wurden bereits Anlagen mit einem Durchsatz von  $100\text{-}150 \text{ m}^3/\text{h}$  errichtet.

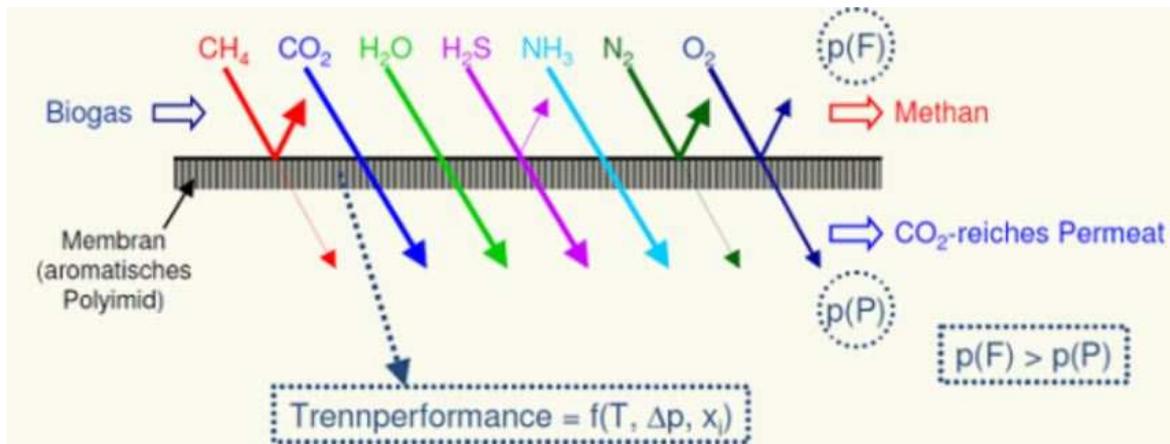


Abbildung 1: Funktionsprinzip einer halbdurchlässigen Membran

## 4 Methoden der Faulgasverwertung

Häufig auf Kläranlagen anzutreffen sind Heizkessel, Verbrennungsmotoren und in letzter Zeit auch Mikrogasturbinen. Eine umfangreiche Auflistung möglicher Verfahren findet man z.B. in WIFO 2005: Kraft-Wärme-Kopplung in Österreich Österreich [4] und BMVIT 2010 [5]. Im Rahmen dieses Vortrages wird auszugsweise auf die folgenden Verfahren eingegangen:

- Heizkessel
- Verbrennungsmotor (Ottomotor, Zündstrahlmotor)
- Mikrogasturbine
- Brennstoffzelle
- Stirlingmotor
- Organic Rankine Cycle (ORC)
- Einspeisung in Gasnetz

Zur Abschätzung der Größe eines Blockheizkraftwerkes in Abhängigkeit des Gasanfalls und der Anlagengröße kann die Abbildung 2 eine Hilfestellung bieten. Aus dem Diagramm ist ableitbar, dass z.B. bei einem Gasanfall von  $18 \text{ L}/(\text{EW}_{120} \cdot \text{d})$  erst ab einer Anlagengröße von  $30.000 \text{ EW}_{120}$  ein Aggregat mit  $50 \text{ kW}_{\text{el}}$  im Dauerbetrieb betrieben werden kann

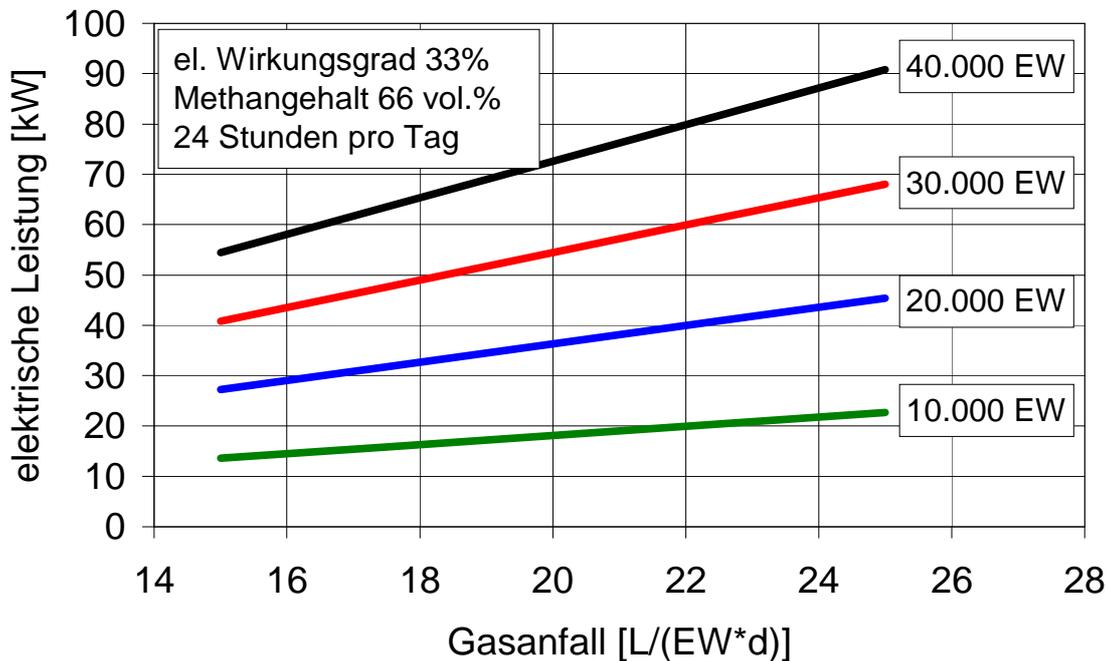


Abbildung 2: Elektrische Leistung in Abhängigkeit des Gasanfalls und der Anlagengröße

#### 4.1 Heizkessel

Auf Kläranlagen mit beheizter anaerober Schlammfäulung wird Wärme zur Heizung des Faulturmes benötigt. Auf kleineren Anlagen (bis ca. 20.000 EW) werden häufig Heizkessel zur Erzeugung der Wärmeenergie eingesetzt. Zum Einsatz kommen in der Regel Brennwertkessel, die die im Faulgas enthaltene chemische Energie fast vollständig in thermische Energie umwandeln.

Der Mindestmethangehalt des Biogases für Brenner liegt bei ca. 50 %.

#### 4.2 Verbrennungsmotor

Es kann nach Ottomotor (Fremdzündung) und Dieselmotor (Zündstrahlmotor, Selbstzündung) unterschieden werden. Auf Kläranlagen kommen fast ausschließlich Ottomotoren mit Zündkerzen zum Einsatz.

#### 4.2.1 Anforderungen an das Faulgas

Die maximale Biogastemperatur sollte 40 °C nicht übersteigen, um die Lebensdauer der Membranen der Gasregelstrecke nicht zu beeinflussen und die Temperatur des Gas/Luftgemisches und somit die Motorleistung nicht zu beeinträchtigen. Der untere Heizwert sollte zwischen 4,3 kWh/m<sub>N</sub><sup>3</sup> und 7 kWh/m<sub>N</sub><sup>3</sup> (45 % bis 70 % CH<sub>4</sub>, Rest CO<sub>2</sub>) liegen und es können Heizwertschwankungen von ± 1 %/30 s (abhängig vom Hersteller) regelungsseitig kompensiert werden. Bei langsameren Heizwertänderungen des Biogases sind auch größere Schwankungen im Rahmen des oben angegebenen Bandes zulässig. Das Biogas sollte eine relative Feuchte von 80 % nicht überschreiten, um einen ausreichenden Abstand vom Taupunkt zu gewährleisten. Besonders wichtig ist der Taupunkt-Abstand im Bereich der Gasregelstrecke, um dort das Auskondensieren zu vermeiden. Kondensat muss vor Eintritt in die Gasregelstrecke bzw. den vorgelagerten Gasverdichter vollständig entfernt werden. Des Weiteren bestehen noch Begrenzungen für:

- Schwefelwasserstoff < 200 ppm (< 8 ppm bei Katalysatorbetrieb)
- Silizium (aus Siloxanen) < 5 mg/ m<sub>N</sub><sup>3</sup> (mit Katalysator an der Nachweisgrenze)

Details können dem DWA M361 [2] entnommen werden.

Der erforderliche Gasdruck vor der Regelstrecke beträgt in Abhängigkeit der Druckverluste der Gasregelstrecke 20 hPa bis 80 hPa. Durch die Wahl einer ausreichend groß dimensionierten Gasregelstrecke kann in vielen Fällen auf eine Druckerhöhung hinter einem Niederdruckgasbehälter verzichtet werden. Druckschwankungen sind zu begrenzen z.B. auf 10 hPa/s bei 80 hPa Vordruck.

#### 4.2.2 Funktionsprinzip

Der Generator wandelt die an der Motorwelle erzeugte mechanische Arbeit in elektrische Energie um. Die bei der Stromerzeugung durch Verbrennung entstehende Wärme wird für die Bereitstellung von Prozesswärme oder zu Heizzwecken genutzt. Als Wärmequellen dienen die Verbrennungsabgase und das Motorkühlwasser.

Die Maschinen sind in der Regel als Blockheizkraftwerk aufgebaut. Das bedeutet, dass die bei der Stromerzeugung anfallende Wärme ebenfalls als Nutzenergie zur Verfügung gestellt wird (Abbildung 3).

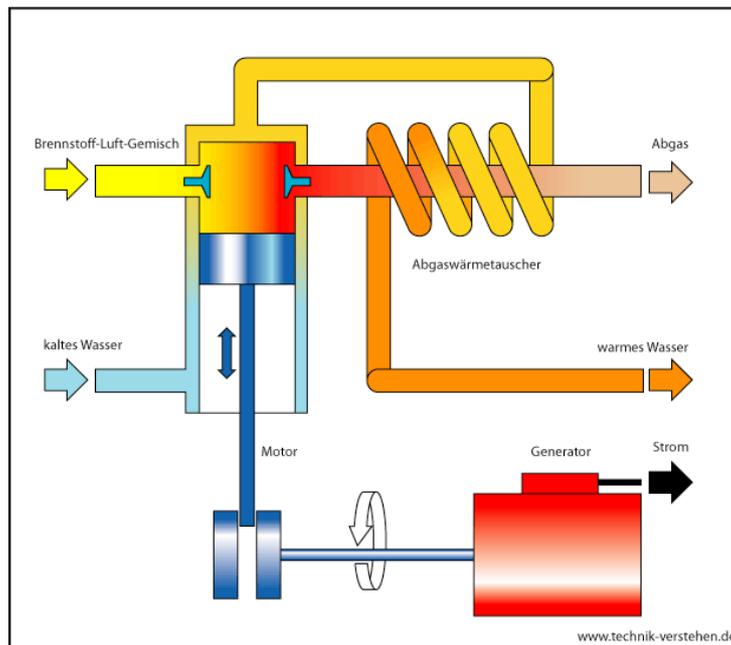


Abbildung 3: Schema Blockheizkraftwerk

Die im Faulgas enthaltene Energie wird in einem BHKW zu ca. 30-40% in elektrische und zu ca. 40-50% in thermische Energie umgewandelt. Der Rest sind Verluste. In der Abbildung 4 ist der Energiefluss in einem BHKW dargestellt.

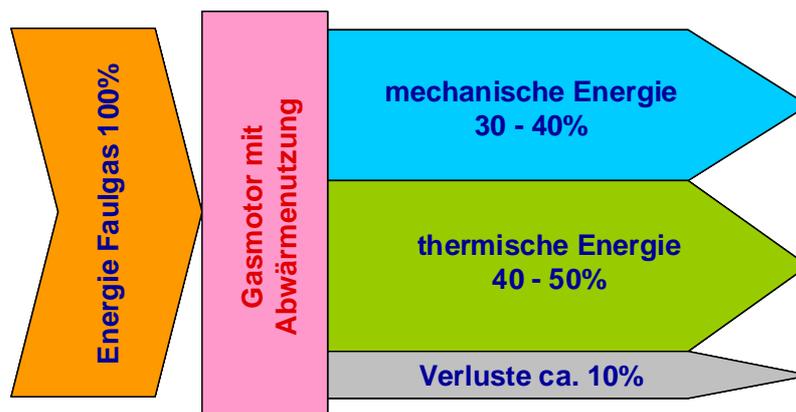


Abbildung 4: Energieflussdiagramm BHKW

Im Normalbetrieb können mit einem BHKW bis zu 90% der im Faulgas enthaltenen Energie nutzbar gemacht werden. Wird die thermische Energie nicht benötigt oder wird das BHKW im Notkühlbetrieb gefahren, geht der Anteil der thermischen Energie verloren.

### Stärken von Gasmotoren

- Elektrischer Wirkungsgrad bei Vollast bis 40 %, bei Teillast weniger z.B. 32%
- Geringe Leistungsverluste durch Nebenaggregate (ca. 2 % bis max. 5% bei Notkühlung)
- Energieautark und daher notstromtauglich (Starterbatterie)
- Gasvordruck ca. 50 hPa (= 50 mbar)
- Unempfindlich gegen Druck- und Temperaturschwankungen
- Abwärmenutzung über Kühlwasser und Abhitzeessel
- Ausgereifte Maschinenteknik > 100.000 Betriebsstunden
- Investitionskosten tendenziell gering

### Schwächen von Gasmotoren

- Hoher Methangehalt notwendig (Methananteil min. 45 %)
- Notkühlung erforderlich, wenn keine Abwärmenutzung erfolgt
- Hohe Lärmentwicklung
- Empfindlich auf Schwefelwasserstoff
- Betriebsphasen möglichst lang, 4 bis 6 Stunden.
- Teillastbetrieb gleiche Kosten pro Betriebsstunde → weniger Strom → spezifisch teurer
- Betriebskosten tendenziell hoch (Service + Öl + Kerzen)
- Abgaswerte hoch

## **4.3 Mikrogasturbine**

### 4.3.1 Anforderungen an das Faulgas

Die maximale Biogastemperatur sollte 50 °C nicht übersteigen und muss mit dem jeweiligen Heizwert und somit vom Methangehalt abhängigem Druck an der MGT bereitgestellt werden, um eine konstante Feuerungsleistung zu erhalten. Der Brennwert sollte zwischen 3,8 kWh/m<sub>N</sub><sup>3</sup> und 8,3 kWh/m<sub>N</sub><sup>3</sup> liegen und es können Heizwertvariationen von ± 10 % des jeweiligen Heizwertes verarbei-

tet werden. Dementsprechend kann das Biogas bei einem Methangehalt von 35 % bis 75 % und einer Variation des Gehaltes von  $\pm 5$  % in der MGT verwertet werden. Das Biogas darf einen maximalen Wassergehalt von 3 Vol.% haben. Kondensat muss vor Eintritt in die MGT vollständig entfernt werden. Weitere Begrenzungen sind z. B. für Staub, Partikelgröße ( $< 10 \mu\text{m}$ , 20 ppm Gewicht) und Siloxane (5 ppb Vol.) gegeben. Mikrogasturbinen sind unempfindlich in Bezug auf erhöhte Schwefelwasserstoffkonzentrationen, für Verdichter und Abgasanlage der Turbine ist jedoch ein Grenzwert von 200 ppm  $\text{H}_2\text{S}$  im Hinblick auf die Abgasqualität zu empfehlen. Details können dem DWA M361 [2] entnommen werden.

#### 4.3.2 Funktionsprinzip

Mikrogasturbinen sind kleine Hochgeschwindigkeitsturbinen, bei denen Turbine, Verdichter und Generator auf einer Welle sitzen. Durch die Verbrennung des Faulgases wird die Turbine angetrieben und Strom erzeugt. Die Abgaswärme wird zur Vorwärmung des Brenngases genutzt.

Der prinzipielle Aufbau einer Mikrogasturbine ist in der Abbildung 5 zu sehen.

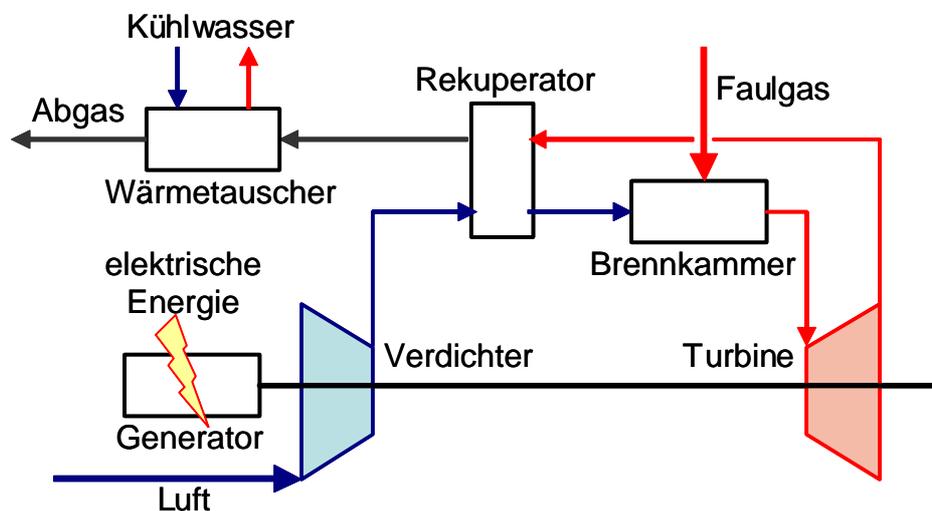


Abbildung 5: Schema Mikrogasturbine

Die Verbrennungsluft strömt beim Eintritt am Generator vorbei, wodurch dieser gekühlt wird. Anschließend wird sie auf 4- 6 bar verdichtet. Die verdichtete Luft wird über einen Rekuperator geleitet und mit der Abgaswärme auf ca.  $500^\circ\text{C}$  erhitzt. In der Brennkammer wird der Brennstoff mit der Verbrennungsluft gemischt und verbrannt. In der Turbine wird das Verbrennungsgas ent-

spannt, und dadurch mechanische Energie erzeugt. Die noch heißen Abgase (ca. 300 °C) werden nach dem Rekuperator über den Wärmetauscher des Kühlkreislaufes geleitet.

Der Strom wird dabei über einen Generator mittels Permanentmagneten erzeugt. Der Magnet des Generators sitzt dabei direkt auf der Antriebswelle der Turbine. Damit hat der Generator dieselbe Drehzahl wie die Turbine (ca. 60.000 bis 100.000 U/min). Auf diese Weise wird ein hochfrequenter Wechselstrom mit einer Frequenz von 1.600 Hz erzeugt. Der erzeugte Strom wird zunächst gleichgerichtet und im Anschluss in Wechselstrom mit 50 Hz und 400 V Spannung umgewandelt. (Bayer. Landesamt für Umwelt, 2007; [6])

Beim Start der Turbine fungiert der Generator als Motor, welcher die Welle auf Drehzahl bringt. Danach kann die Turbine gezündet werden und die Last wird vom Generator übernommen.

Bei dieser Art der Turbine werden Luftlager eingesetzt. Dies erübrigt den Aufwand von Schmiermitteln.

Im Gegensatz zu Gasmotoren gibt es in der Brennkammer einen Überschuss an Luft und die Temperatur ist um 800 C° geringer. Dies hat zur Folge, dass die Bildung von Stickoxiden sehr gering ist. Die überschüssige Luft ermöglicht es dem Methan komplett zu verbrennen und das Abgas enthält somit weniger Kohlenmonoxid. Diese Gegebenheiten machen es leicht möglich, die Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren einzuhalten und sogar zu unterschreiten. (BMW 2007 [7])

Um den elektrischen Wirkungsgrad trotz niedriger Verbrennungstemperatur zu erhöhen, wird in der Regel ein Wärmetauscher zur Verbrennungsluftvorwärmung (Rekuperator) eingesetzt. Durch wegschalten des Rekuperators kann die abgegebene Prozesswärme bei Bedarf auf Kosten des elektrischen Wirkungsgrades erhöht werden. Dies ermöglicht eine sehr gute Anpassung an variablen Wärmebedarf.

In der Abbildung 6 ist der Energiefluss in einer Mikrogasturbine dargestellt. Die elektrische Energie ist direkt nutzbar, ca. 5% werden für die Verdichtung des Faulgases benötigt. Die thermische Energie wird zum Teil in den Prozess der Turbine rückgeführt (Rekuperator). Die entstehenden Verluste ergeben sich aus Wärmestrahlung und ungenutztem Abgas.

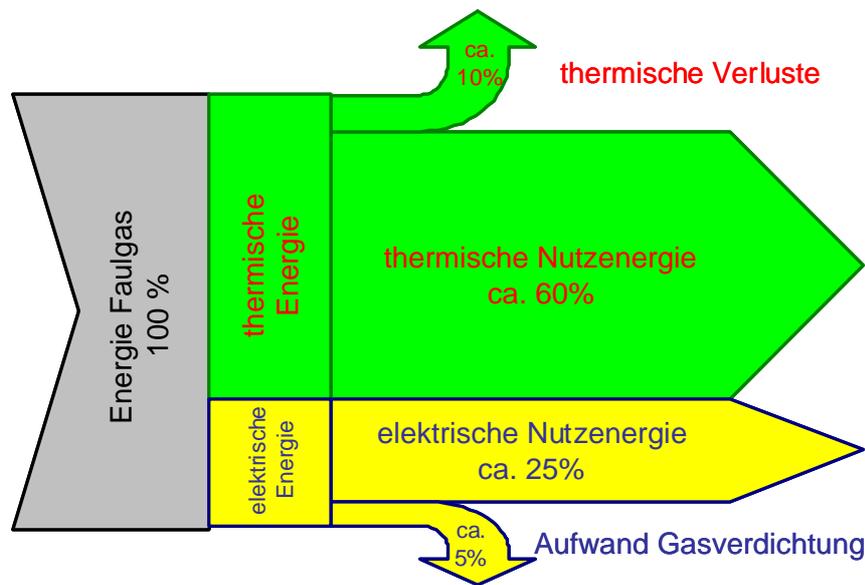


Abbildung 6: Energieflussdiagramm Mikrogasturbine (mit Rekuperator)

### Stärke der Mikrogasturbine

- Bessere Verträglichkeit bei Schwankungen der Gasqualität
- Für geringe Methangehalte geeignet
- Unempfindlich auf Schwefelwasserstoff
- Niedrige Abgasemissionen
- Abwärmenutzung über Abgaswärmetauscher
- Geringer Verschleiß; Luftgelagertes Turbinenrad
- Geringer Wartungsaufwand; kein Öl (ausgenommen Gasverdichter)
- Abgaswärmetauscher mit Umgehung, keine Notkühlung erforderlich
- Aufstellung auch im Freien möglich
- Kompakte Bauweise
- Geringe Betriebskosten Wartungsvertrag - Heißgasteiltausch ca. 40.000 Betriebsstunden
- Geringe Schallemissionen und keine Vibrationen.
- Fast gleichbleibender Wirkungsgrad bei breiten Lastbereichen

- Gute Teillastfähigkeit bis 50 %
- Keine Synchronisationseinrichtung notwendig
- Konstante Temperatur der Abwärme

#### Schwächen der Mikrogasturbine

- Hohe spezifische Investitionskosten
- Niedriger elektrischer Wirkungsgrad ca. 26 – 33 % (ohne Eigenbedarf), daher größerer Gasbedarf und kleinere Energieproduktion als mit einem Gasmotor
- Ein Teil der elektrischen Leistung wird für die Gasaufbereitung benötigt
- Gasaufbereitung und Verdichtung erforderlich
- Absinken des Wirkungsgrades bei steigender Ansaugtemperatur der Verbrennungsluft
- Fremdenergie für Start- und für Gasverdichtung
- Notstrombetrieb nur mit Zusatzeinrichtungen
- Anzahl der Starts begrenzen typisch 1 Start/Tag

#### **4.4 Brennstoffzelle**

Das Prinzip der Brennstoffzelle wurde bereits 1839 entdeckt. Man unterscheidet verschiedene Brennstoffzellentypen nach dem Elektrolyt und der Betriebstemperatur. Details zu Brennstoffzellen können dem DWA M-299 „Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen“ 2006 [8] und dem Schlussbericht „Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg“ [9] entnommen werden.

##### 4.4.1 Anforderungen an das Faulgas

Brennstoffzellen stellen deutlich höhere Anforderungen an die Reinheit des Brenngases als Gasmotoren. Brennstoffzellen benötigen Wasserstoff ( $H_2$ ) als Brennstoff.  $H_2$  kann durch „Reformierung“ mit anschließender „Shift-Reaktion“ aus Biogas erzeugt werden (bei Temperaturen über  $600\text{ °C}$  entsteht aus Methan und Wasserdampf ein Synthesegas aus  $H_2$ ,  $CO$  und  $CO_2$ ).

Informationen zu verschiedenen Aufbereitungsverfahren mit dem Fokus der Faulgasverwertung in Brennstoffzellen sind dem Merkblatt DWA-M 299 „Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen“ [8] zu entnehmen.

#### 4.4.2 Funktionsprinzip

Die Brennstoffzelle ist ein elektrochemischer Wandler, in dem sich Wasserstoff mit Sauerstoff in einem kontrollierten elektrochemischen Prozess (im Gegensatz zur Verbrennung oder Explosion) verbindet und dabei direkt elektrischer Strom und Wärme erzeugt werden (Umkehrprozess der Elektrolyse). Die technische Realisierung stellt jedoch einen aufwendigen Prozess mit diversen Hilfsaggregaten dar. Die Abgase einer Brennstoffzelle enthalten im Gegensatz zu denen eines Gasmotors nahezu keine Schadstoffe (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, CO, NO<sub>x</sub>).

In der Abbildung 7 ist das Funktionsprinzip einer Brennstoffzelle zu sehen.

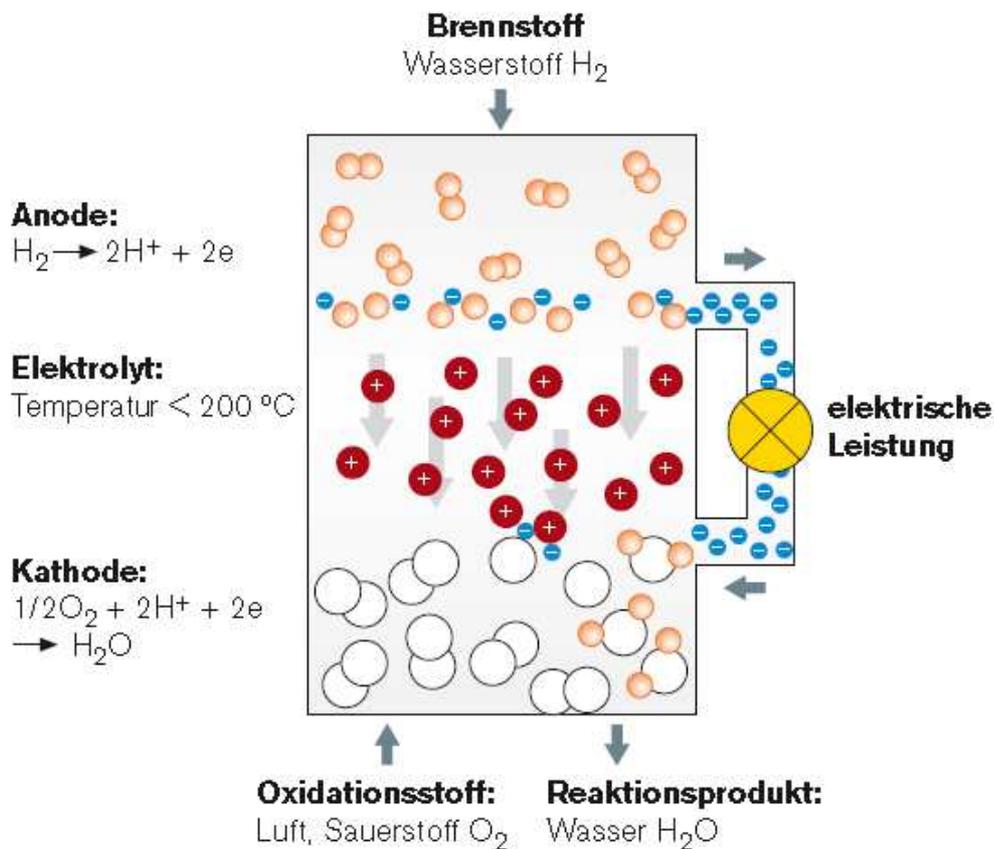


Abbildung 7: Funktionsprinzip einer Phosphorsäure Brennstoffzelle (Phosphoric Acid Fuel Cell), Quelle: Schmid-Schmieder 2008 [10])

Je nach Brennstoffzellentyp wurden in Pilotprojekten elektrische Wirkungsgrade von 38 – 50 % erreicht. Bisher können Brennstoffzellen-BHKW wirtschaftlich mit Gasmotor-BHKW oder Gasturbinen-BHKW nicht konkurrieren. Dies kann sich ändern, falls in einigen Jahren Brennstoffzellen-BHKW in Großserie produziert werden sollten.

#### Stärken der Brennstoffzelle

- Theoretisch hohe elektrische Wirkungsgrade möglich
- Sehr gutes Teillastverhalten
- Praktisch keine Abgasemissionen

#### Schwächen der Brennstoffzelle

- Aufwändige Gasaufbereitung
- Nur Pilotprojekte, nicht marktreif
- Hohe Sicherheitstechnische Anforderungen (Wasserstoff!)
- Sehr hohe Investitionskosten

### **4.5 Stirlingmotor (Heißluftmotor)**

Der Stirlingmotor ist nach der Dampfmaschine die 2. älteste Wärmekraftmaschine. Er wandelt Wärmeenergie in mechanische Energie um. Vom Prinzip her hat der Stirlingmotor einen höheren Wirkungsgrad als die Dampfmaschine oder ein Benzin- bzw. Dieselmotor. Im Stirlingmotor wird Wärmeenergie in mechanische Arbeit umgesetzt. Das Interessante dabei ist, dass diese Wärmeenergie von außen an den Motor herangeführt werden muss. Er ist also nicht wie der Benzin- oder Dieselmotor auf die "innere" Verbrennung eines Kraftstoffes angewiesen, sondern kann mit beliebigen Wärmequellen arbeiten. (Quelle: <http://home.germany.net/101-276996>)

Stirlingmotoren sind verschleiß- und wartungsarm und weisen ein gleichmäßiges Drehmoment auf. Stirlingmotoren weisen ein günstiges Anpassungsvermögen an wechselnde Leistungsanforderungen auf. Es werden nach der Kolbenanordnung verschiedene Bauausführungen unterschieden.

#### 4.5.1 Anforderungen an das Faulgas

Da die Erzeugung der Nutzwärme getrennt erfolgt gelten keine besonderen Vorschriften. Es gelten grundsätzlich die gleichen Anforderungen wie bei der Nutzung in Heizkesseln (siehe Punkt 4.1).

#### 4.5.2 Funktionsprinzip

Durch gezieltes Erwärmen und Abkühlen ändert das Arbeitsmedium in den Zylindern sein Volumen und es wird Arbeit verrichtet. Diese Arbeit kann über einen Kurbeltrieb und einen Generator in elektrische Energie umgewandelt werden. Als Arbeitsmedium kommen Luft, Stickstoff, Helium oder Wasserstoff in Frage.

Die Wärme wird durch Verbrennen von Faulgas in einem Brennraum erzeugt. Das heiße Rauchgas strömt durch einen Erhitzer-Wärmetauscher und gibt dabei Wärme an das Arbeitsmedium im Motor ab. Beim Überströmen des Arbeitsmediums vom Arbeitszylinder in den Kompressionszylinder wird es zuerst über einen Regenerator geleitet. Der Regenerator hat die Aufgabe Wärmeenergie zwischenspeichern und beim Rückströmen des Arbeitsmediums vom Kompressionszylinder in den Arbeitszylinder das Arbeitsmedium wieder zu erwärmen. Durch den Kühler kann die Restwärme des Abgases an das Kühlwasser abgegeben werden. Die vom Motor abgeführte Wärme kann damit, z.B. für Heizzwecke oder Warmwasserbereitung genutzt werden. In der Abbildung 8 ist das Schema eines Stirlingmotors zu sehen.

#### Stärken des Stirlingmotors

- Stufenlos modulierbar ohne nennenswerte Wirkungsgrad-Verluste
- Im Teillastbetrieb keine Veränderung der Emissionen
- Die Schadstoffemissionen von Stirling-Brennern entsprechen den Werten moderner Gasbrennwert-Technik und liegen deutlich unter Gas-Ottomotoren mit Katalysator.
- Hoher Gesamtwirkungsgrad durch moderne Brennwerttechnik
- Leise, nur Brennergeräusche
- Kein Ölverbrauch



so dass thermische Energie bei niedriger Temperatur genutzt werden kann. Der Name des Verfahrens geht auf einen schottisch-britischen Physiker und Ingenieur, William J. M. Rankine, zurück.

Das Fluid wird mittels einer Speisepumpe auf einen Betriebsdruck gebracht, im Vorwärmer auf Siedetemperatur erhitzt und im Verdampfer verdampft. Der Sattdampf wird auf eine Turbomaschine geleitet und dort abgearbeitet. Die mechanische Energie der Turbine treibt einen Generator der elektrische Energie erzeugt. Nach der Entspannung wird das Gas über einen Rekuperator (zur Vorwärmung vor der Verdampfung) zum Kondensator geleitet. Nach der Kondensation des Fluids schließt sich der Kreislauf mit dem Eintritt in die Speisepumpe. In der Abbildung 9 ist das Schema des ORC dargestellt.

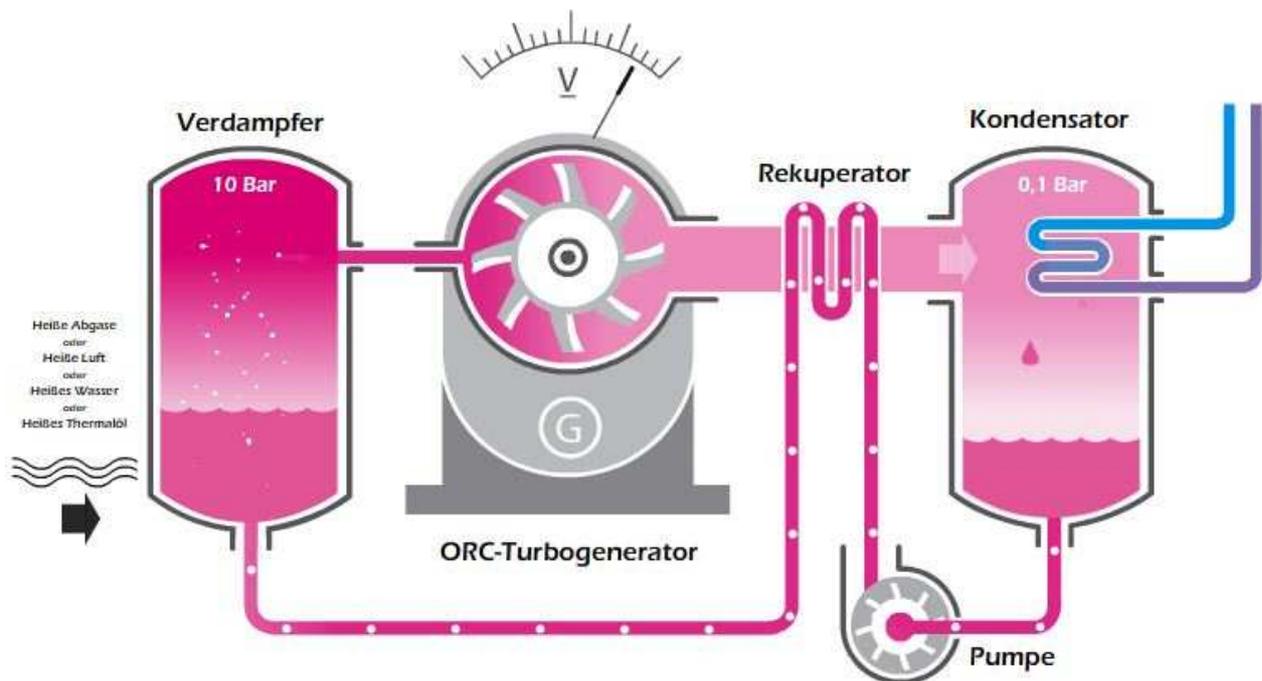


Abbildung 9: Schema Organic Rankine Cycle  
(Quelle: <http://www.gmk.info>)

### Stärken des ORC

- Nutzung von thermischer Energie auf niedrigem Temperaturniveau
- Verstromung der Abwärme von BHKW oder MGT theoretisch möglich

### Schwächen des ORC

- Großer Entwicklungsaufwand
- Optimierung des Arbeitsmittels für den jeweiligen Anwendungsfall erforderlich
- Haupteinsatzgebiet ab 200 kW(elektrisch)
- Wirkungsgrad der Verstromung derzeit kleiner 15%

### **4.7 Einspeisung in das Gasnetz**

Aufgrund politischer und volkswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (z.B. Ökostromverordnung, CO<sub>2</sub>-Problematik) wird die Einspeisung von Bio-Methan aus Kläranlagen in Gasversorgungsnetze überlegt.

Projekte zur Einspeisung von Bio-Methan in Gasnetze sind auch durch die Richtlinie 2009/28/EG für Erneuerbare Energien beeinflusst. Nach dieser Richtlinie soll sich der Anteil der Erneuerbaren Energien von derzeit 29% bis zum Jahr 2020 auf 34% erhöhen.

An technischen Aufgaben sind unter Anderem zu lösen:

- Gasaufbereitung (im Besonderen Entschwefelung und Methananreicherung)
- Druckerhöhung
- Sicherstellung des einzuspeisenden Gasvolumenstroms

Neben diesen Fragestellungen sind eine Fülle von rechtlichen und kaufmännischen Problemen zu lösen. Die Behandlung dieser Bereiche würden den Rahmen des Vortrages bei weitem übersteigen und werden daher nicht weiter behandelt.

## **5 Luftschadstoffe**

Bei Nutzung von Biogas in einem Verbrennungsmotor entstehen Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenstoffmonoxid (CO), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) und es werden unverbrannte Kohlenwasserstoffe emittiert. Bei den unverbrannten Kohlenwasser-

stoffen handelt es sich in erster Linie um Methan ( $\text{CH}_4$ ) bzw. um die Produkte unvollständiger Verbrennung mit der Leitkomponente Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ ). Bei Einsatz von Zündstrahlmotoren ist auch mit relevanten Staubemissionen (Ruß) zu rechnen.

Grundsätzlich werden die einzuhaltenden Grenzwerte nach folgenden Kriterien unterschieden

- Leistung der Anlage (z.B. Brennstoffwärme- oder mechanische Leistung)
- Art des Motors (z.B. Ottomotor, Dieselmotor, Zündstrahlmotor)
- Art des eingesetzten Brennstoffes

In den folgenden Kapiteln werden nur die Werte für Fremdzündungs-Ottomotoren mit Faulgas als Brennstoff behandelt.

## 5.1 Abgasgrenzwerte

Die einzuhaltenden Emissionsgrenzwerte werden im Bewilligungsverfahren festgelegt. Die einzuhaltenden Grenzwerte sind länderspezifisch geregelt. Die Vorgangsweise der Länder und die Bescheidwerte sind nicht immer einheitlich!

Folgende Regelwerke werden in der Praxis zur Beurteilung der maximal zulässigen Emissionswerte herangezogen. Problematisch sind die nicht durchgängig definierten Anwendungsbereiche sowie die Unterscheidung von Biogas, Klär- gas, Faulgas, Deponiegas, Flüssiggas, etc..

- BMWA Richtlinie 2001: Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren [11]
- BMWA Richtlinie 2003: Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen [12]
- BMWA Richtlinie 2007: Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen [13]
- BMWFJ 2010: Ergänzungspapier zur Technischen Grundlage für die Beurteilung von Stationärmotoren [14]

- Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz; Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft; vom 24. Juli 2002 [15]

### **BMWFJ 2010:**

*„... Es obliegt daher dem Technischen Amtssachverständigen im gewerbebehördlichen Genehmigungsverfahren, den jeweils konkret vorliegenden Sachverhalt nach den Erfordernissen des Einzelfalles zu beurteilen. Der Technischen Grundlage kommt kein verbindlicher Charakter zu. ....“*

In diesem Dokument werden BHKW's explizit im „Nicht-Anwendungsbereich“ genannt. Für Emissionsgrenzwerte von BHKW's wird auf die „Vereinbarung gemäß Art. 15a B-VG über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken, Art. 15 „Blockheizkraftwerke“ verwiesen.

Tabelle 1: Empfohlene Emissionsgrenzwerte nach Art. 15a Vereinbarung; Brennstoff Klärgas; Werte bezogen auf 0 °C, 1013 hPa und 5 % O<sub>2</sub>

|                                    | < 250 kW BWL           | > 250 kW BWL          |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ) | 1000 mg/m <sup>3</sup> | 500 mg/m <sup>3</sup> |
| Kohlenmonoxid (CO)                 | 1000 mg/m <sup>3</sup> | 400 mg/m <sup>3</sup> |
| NMHC (Nicht-Methan-KW)             | -                      | 150 mg/m <sup>3</sup> |
| Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )  | k.A.                   | k.A.                  |
| Staub                              | k.A.                   | k.A.,                 |

### **TA-Luft 2002:**

Im Abschnitte 5.4.1.4 „Anlagen der Nummer 1.4: Verbrennungsmotoranlagen (einschließlich Verbrennungsmotoranlagen der Nummern 1.1 und 1.2)“ sind für Ottomotoren folgende Werte angegeben.

Die empfohlenen Emissionsgrenzwerte stellen in der Regel Halbstundenmittelwerte dar.

Tabelle 2: Empfohlene Emissionsgrenzwerte nach TA-Luft; Brennstoff Klärgas; Werte bezogen auf 0 °C, 1013 hPa und 5 % O<sub>2</sub>

|                                    | < 3000 kW BWL          | > 3000 kW BWL         |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Stickstoffoxide (NO <sub>x</sub> ) | 500 mg/m <sup>3</sup>  | 500 mg/m <sup>3</sup> |
| Kohlenmonoxid (CO)                 | 1000 mg/m <sup>3</sup> | 650 mg/m <sup>3</sup> |
| NMHC (Nicht-Methan-KW)             | k.A.                   | k.A.                  |
| Schwefeldioxid (SO <sub>2</sub> )  | 310 mg/m <sup>3</sup>  | 310 mg/m <sup>3</sup> |
| Staub                              | 20 mg/m <sup>3</sup>   | 20 mg/m <sup>3</sup>  |
| Formaldehyd (CH <sub>2</sub> O)    | 60 mg/m <sup>3</sup>   | 60 mg/m <sup>3</sup>  |

Derzeit werden hauptsächlich Ottomotoren mit Magermotoreinstellung eingesetzt. Dadurch wird der Gehalt an Stickoxyden reduziert, aber es treten höhere Formaldehydkonzentrationen auf (derzeitiger Grenzwert 60 Milligramm pro Kubikmeter, Reduktion auf 40 Milligramm pro Kubikmeter im Gespräch). In der Abbildung 10 sind die Abgaswerte eines Gasmotors in Abhängigkeit der Einstellung zu sehen.

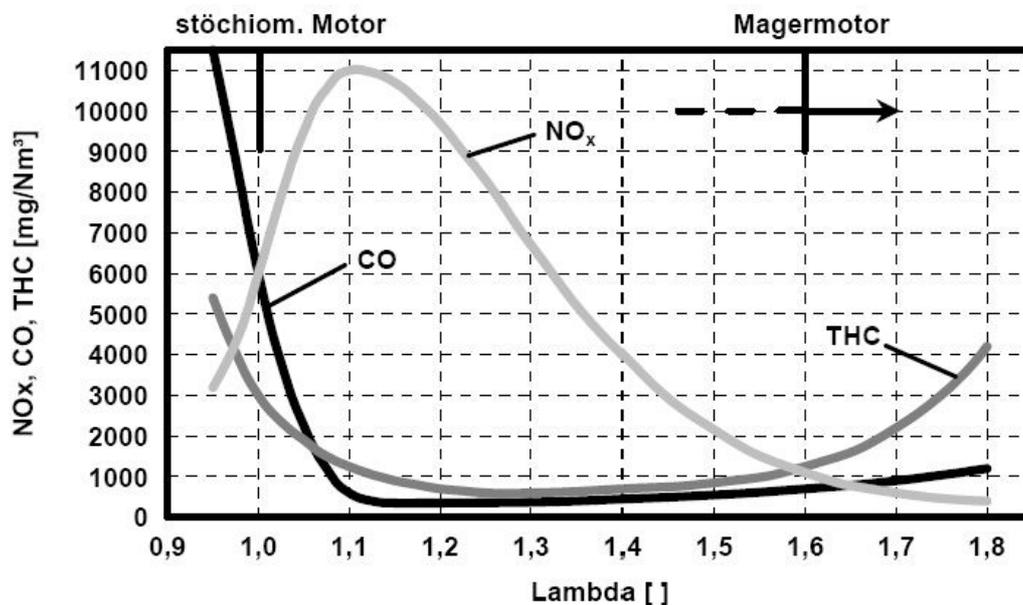


Abbildung 10: Abgaswerte eines Gasmotors in Abhängigkeit der Einstellung

Um alle Werte (speziell CO und NO<sub>x</sub>) einhalten zu können, ist ein Katalysator notwendig. Daher ist auch eine Gasreinigung erforderlich. Um den dadurch entstehenden Druckverlust auszugleichen benötigt man aber auch einen Gasver-

dichter. Diese Maßnahmen sind kostenintensiv und haben maßgeblichen Einfluss auf Projektentscheidungen.

Seitens der Betreiber von Faulgasnutzungsanlagen ist zu fordern, dass österreichische Bewilligungsbehörden einheitlich vorgehen und die Grenzwerte auch im Einklang mit der in Europa maßgeblich angewendeten TA-Luft 2002 [15] stehen.

## 6 Literatur

- [1] DWA Merkblatt 363: Herkunft, Aufbereitung und Verwertung von Biogasen, November 2010
- [2] DWA Merkblatt 361: Aufbereitung von Biogas, Oktober 2011
- [3] DWA Arbeitsblatt 202: Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser, Mai 2011
- [4] WIFO (2005): Kraft-Wärme-Kopplung in Österreich, Mai 2005 (Download: [http://www.wifo.ac.at/www/jsp/index.jsp?fid=23923&id=25646&typeid=8&display\\_mode=2](http://www.wifo.ac.at/www/jsp/index.jsp?fid=23923&id=25646&typeid=8&display_mode=2))
- [5] BMVIT (2010): Technologie Portrait, Kraft-Wärme-Kopplung, Institute for Thermal Turbomachinery and Machine Dynamics, Graz University of Technology, Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 34/2010; Downloadmöglichkeit: <http://www.nachhaltigwirtschaften.at/>
- [6] Bayrisches Landesamt für Umwelt (Hrsg) (2007): Klimaschutz durch effiziente Energienutzung – Einsatzmöglichkeiten der Mikrogasturbine in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen, Augsburg; Downloadmöglichkeit: [http://www.lfu.bayern.de/energie/co2\\_minderung/doc/mikrogas.pdf](http://www.lfu.bayern.de/energie/co2_minderung/doc/mikrogas.pdf)
- [7] BMWA (2007): Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen; <http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Biogasanlagen.pdf>
- [8] DWA M-299 (2006): „Einsatz von Brennstoffzellen auf Kläranlagen“, Juni 2006
- [9] BWI (2006): Schlussbericht „Systemintegration von Brennstoffzellen auf Kläranlagen – Potenzialabschätzung für Baden-Württemberg“ (Download: [http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/2149/pdf/Schlussbericht\\_BWI22006.pdf](http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2004/2149/pdf/Schlussbericht_BWI22006.pdf))
- [10] Schmid-Schmieder V. (2008): wwt, Brennstoffzellen auf Kläranlagen, 4/2008; Quelle: <http://www.wwt-online.de/brennstoffzellen-auf-klaeranlagen>

- [11] BMWA (2001): Technische Grundlage für die Beurteilung von Emissionen aus Stationärmotoren; <http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Emissionen%20aus%20Stationaermotoren.pdf>
- [12] BMWA (2003): Technische Grundlage für die Beurteilung von Biogasanlagen; <http://www.biogas-netzeinspeisung.at/downloads/beurteilung-biogasanlagen.pdf>
- [14] BMWFJ (2010): Ergänzungspapier zur Technischen Grundlage für die Beurteilung von Stationärmotoren; [http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Emissionen %20von%20Stationaermotoren%20Ergaenzung.pdf](http://www.bmwfj.gv.at/Unternehmen/gewerbetechnik/Documents/Emissionen%20von%20Stationaermotoren%20Ergaenzung.pdf)
- [15] TA Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz; Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft; vom 24. Juli 2002

Dipl.-Ing. Dr. Wilhelm Frey  
Ingenieurkonsulent für Maschinenbau  
**A**bwassertechnische **A**usbildung und **B**eratung  
Leobendorf / Hofgartenstraße 4/2  
A-2100 Korneuburg  
Mail: [aab.frey@aon.at](mailto:aab.frey@aon.at)  
Internet: [www.aabfrey.com](http://www.aabfrey.com)