



UCL UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

*Compatibilité du biogaz avec les moteurs de cogénération*

**Pépin Tchouate Héteu  
Joseph Martin**

*Texte original octobre 2004, révisé février 2007*

Unité de Thermodynamique, Turbomachines et Mécanique des fluides  
2, place du Levant  
1348 Louvain-la-neuve  
Tel. 0032 10 47 2200  
Email : [secret@term.ucl.ac.be](mailto:secret@term.ucl.ac.be)

## **Introduction**

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du projet BIOCOGEN financé par la Région Wallonne (Appel PIMENT). Ce document est extrait d'un rapport plus global, réalisé à l'unité de thermodynamique de l'Université catholique de Louvain sous la responsabilité du Professeur MARTIN. Il traite essentiellement de l'évaluation de la compatibilité du biogaz obtenu en laboratoire avec les exigences des groupes de cogénération disponibles sur le marché. Il est structuré en deux parties :

- l'analyse de la littérature et des pratiques industrielles sur la caractérisation des combustibles gazeux et les méthodes d'épuration du biogaz ;
- quelques résultats de l'enquête menée auprès des motoristes et packagers sur les exigences sur la qualité du combustible gazeux et les conditions de maintien de la garantie.

## **Caractérisation des combustibles gazeux**

Les facteurs permettant de qualifier les mélanges gazeux quant à leur convenance à la combustion dans les moteurs à gaz sont : la composition, le pouvoir calorifique et l'indice de méthane.

L'indice de méthane indique la capacité du mélange gazeux à résister au cliquetis. L'indice 100 correspond au méthane alors que l'indice 0 correspond à l'hydrogène qui est un gaz très explosif (détonateur). Les gaz ou mélanges gazeux avec un faible indice de méthane présentent un risque de détonation (cliquetis) et par conséquent un risque élevé de fatigue thermique et mécanique pouvant mener à des dégâts importants. L'indice de méthane d'un mélange gazeux dépend de plusieurs facteurs dont les principaux sont :

- le méthane : principal constituant du combustible destiné aux moteurs à gaz
- l'hydrogène qui contribue à la réduction significative de l'indice de méthane
- les composés hydrocarbonés, principalement les  $C_nH_m$  avec  $n>1$  et  $m>4$ , favorisent l'instabilité et la tendance au cliquetis
- l'azote inerte et le  $CO_2$  qui ne prennent pas activement part au processus de combustion, mais font accroître l'indice de méthane, l'effet du  $CO_2$  étant trois fois celui du  $N_2$ .

Certains polluants tels les minéraux, métaux, métaux lourds, halogènes, etc. n'influencent pas principalement le processus de combustion mais en fonction de leur teneur, ils peuvent gêner un fonctionnement fiable des installations.

Plus particulièrement, la qualité du biogaz dépendra d'un certain nombre de paramètres qui influencent le rendement, la durée de vie, la sécurité d'exploitation et les émissions du groupe de cogénération. Ces paramètres sont : le rapport  $CH_4$  sur  $CO_2$  et les polluants.

1. Le rapport  $CH_4$  sur  $CO_2$  est une mesure de la résistance au cliquetis et la vitesse de propagation du biogaz dans le moteur. Par exemple, un gaz de composition (65%  $CH_4$  et 35%  $CO_2$ ) a une vitesse de propagation de la combustion (27 cm/s, laminaire) plus élevée et un indice de méthane moindre, donc résiste mieux aux cliquetis qu'un gaz composé de 50% de  $CH_4$  et 50% de  $CO_2$ , qui va présenter une vitesse de propagation de la combustion de 20 cm/s et un indice de méthane de 150. Le rapport biogaz sur air

est en perpétuelle variation et le moteur ne peut être réglé à un point précis d'où le rendement plus faible et des facteurs d'émissions plus élevés.

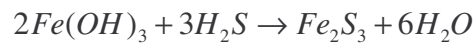
2.  $\text{NH}_3$  : la présence du  $\text{NH}_3$  dans le biogaz accélère et amplifie la combustion entraînant des contraintes thermiques pouvant entraîner la fonte des pistons et un échauffement des injecteurs, surtout à des valeurs de pH supérieures à 8,3. La solution souvent apportée est une meilleure conception de l'installation, le contrôle du pH dans le digesteur, le filtrage du gaz par du charbon actif. En refroidissant le biogaz, les condensats entraînent le  $\text{NH}_3$ .
3. Le Méthanol s'évapore dans le gazomètre. Son point de rosée est compris entre  $30^\circ\text{C}$  et  $63^\circ\text{C}$ . Il faut être particulièrement attentif lors de la digestion des alcools car comme le  $\text{NH}_3$ , il entraîne une faible résistance au cliquetis et favorise l'auto-inflammation aux endroits chauds de la chambre de combustion.
4.  $\text{H}_2\text{O}$  : A la sortie, le biogaz est saturé de vapeur d'eau et la quantité d'eau augmente avec la température du gaz. Les problèmes prévisibles sont : la vapeur d'eau réagit avec le  $\text{H}_2\text{S}$  pour former les acides sulfureux (nuisibles pour les vannes), la formation des poches d'eau dans les conduites de gaz, l'augmentation des pertes de charge au niveau du filtre, une baisse du rendement du moteur due à la compression de l'eau contenue dans le biogaz. La solution consiste à refroidir le gaz via les conduites souterraines et souvent lors du stockage.
5.  $\text{H}_2\text{S}$  : le biogaz contient toujours de l' $\text{H}_2\text{S}$  dont la proportion peut atteindre en fonction du substrat les valeurs de 20 000 ppm. La production de  $\text{H}_2\text{S}$  n'est pas continue. Il ne faut donc pas effectuer les mesures à la même heure quotidiennement. Les problèmes liés au  $\text{H}_2\text{S}$  sont la corrosion des conduites et des échangeurs de chaleur sur les fumées, l'oxydation des conduites de gaz d'échappement, l'augmentation de la fréquence des vidanges d'huile, la contamination des « Oxi-Kat », les pluies acides et la pollution, les odeurs aux conduites d'échappement. Les solutions consistent à désulfurer le gaz soit par voie biologique ou par réaction avec l'hydroxyde de fer, ou encore par filtration sur du charbon actif. On conseille aussi d'agiter continuellement le substrat dans le digesteur et de disposer les conduites de gaz en série entre le digesteur et le local de post-digestion.

### **Conditionnement du biogaz<sup>1</sup>**

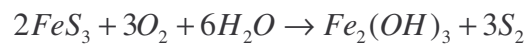
A la sortie du digesteur, le biogaz est difficilement valorisable dans sa forme brute. En plus du méthane et du gaz carbonique, il contient des matières volatiles, du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ) et est saturé en vapeur d'eau. Le gaz humide circule dans des conduites vers le ballon de stockage. Sur ce trajet, le biogaz se refroidit et une partie de la vapeur d'eau qu'il contient se condense. Afin que l'eau de condensation puisse couler vers un bac de récupération ou le digesteur, les conduites devront être légèrement inclinées et protégées contre le gel. Le gaz ainsi séché est mieux indiqué dans les moteurs de cogénération.

La désulfuration du biogaz est une étape nécessaire en vue de limiter la corrosion. En général, le biogaz contient 0,1% à 3% de  $\text{H}_2\text{S}$  (% sur volume) qui provoque les émissions de  $\text{H}_2\text{S}$  et par ricochet les problèmes de corrosion. En plus, les traces de soufre se retrouvent dans les huiles de moteurs et y provoquent une acidification qui a pour conséquence une augmentation de la fréquence des vidanges. Les méthodes les plus utilisées pour la désulfuration sont présentées ci-dessous :

Dans la première méthode, le biogaz passe à travers un *filtre contenant des pailles d'hydroxyde de fer* et la réaction produit du sulfure de fer selon l'équation :



Le lit du filtre peut théoriquement être régénéré au contact de l'oxygène et de l'eau, mais ce processus ne peut être répété indéfiniment et un renouvellement du lit est nécessaire après un certain temps, après un maximum de dix régénérations selon Schneider<sup>ii</sup>. Dans la pratique, cette méthode comporte un risque d'incendie parce que les exploitants oublient le plus souvent de régénérer et de changer le filtre. Pour garantir un fonctionnement continu, deux filtres branchés en parallèle sont nécessaires, ce qui implique un surcoût en investissement et en frais d'exploitation.

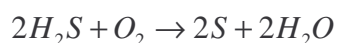


Il arrive que pour fixer le soufre, du fer soit *directement mélangé au substrat*. Le sulfure de fer ainsi formé est stable et reste dans le digestat. Cette méthode permet une réduction du taux de H<sub>2</sub>S de l'ordre de 200 à 500 ppm.

La bonne solubilité du H<sub>2</sub>S dans l'eau a favorisé le développement du traitement du biogaz par les *scrubbers* à des pressions supérieures à 6 bar. Lors de ce processus, le H<sub>2</sub>S et le CO<sub>2</sub> sont dissous dans l'eau et une détente permet l'extraction du biogaz épuré. Cette méthode est efficace mais très énergivore, car nécessite environ 10% de l'électricité produite à partir du biogaz.

Les *tamis moléculaires* permettent la séparation de grosses molécules telles le CO<sub>2</sub>, le H<sub>2</sub>S ou le H<sub>2</sub>O. Ils fonctionnent aussi en haute pression (10 bar) et consomment beaucoup d'énergie. En outre, ils entraînent une perte d'environ 10% de CH<sub>4</sub>.

La méthode qui s'est généralisée est le *traitement biologique* parce qu'elle est simple à réaliser et moins coûteuse que la filtration à l'hydroxyde de fer. L'introduction d'une faible quantité d'air dans la partie du digesteur où le biogaz s'accumule favorise sous l'action des microorganismes la réduction du H<sub>2</sub>S en soufre élémentaire et de l'eau selon l'équation :



La quantité d'air nécessaire dépend de la stœchiométrie des réactions de digestion. En pratique, l'apport d'air correspondant à 3 à 8% en volume de la production journalière du biogaz permet d'éliminer 95 à 99% de H<sub>2</sub>S du biogaz (57, 58). Le soufre ainsi extrait peut être utilisé comme amendement en agriculture et la culture des microorganismes est non nuisible. Cette méthode présente l'avantage de ne pas induire de déchets et une exploitation aisée des unités de biométhanisation. L'inconvénient majeur est la baisse de la production de méthane étant donnée que la digestion anaérobie n'est plus complète si l'on ajoute de l'air directement dans le digesteur. Pour palier ce problème, Schneider et al ont développé un filtre biologique séparé du digesteur dans lequel circule le biogaz dès sa sortie du digesteur et dans lequel il est possible de créer des conditions optimales (pH, température et concentration d'oxygène) pour

la décomposition du H<sub>2</sub>S. Pendant les quatre premières semaines d'utilisation, ce filtre biologique a permis 'éliminer la totalité de H<sub>2</sub>S contenue dans le biogaz (200 à 2000 ppm). Après, la capacité de réduction était limitée à 60% à cause d'une baisse du pH dans le lit du filtre qui entraîne la mort des bactéries fixatrices de soufre. En maintenant le pH au dessus de 6,5 et la température dans le filtre au dessus de 20°C on retrouve des capacités de réduction de H<sub>2</sub>S supérieures à 90%.

Köhler & Ziegler (2003) utilisent dans leurs installations de puissance comprise entre 25 m<sup>3</sup>/heure et 350 m<sup>3</sup>/heure le système BioSulfex®, basé sur cette méthode biologique, qui réduit le taux de H<sub>2</sub>S jusqu'à moins de 100 ppm à partir d'un biogaz de concentration de 1500 à 3000 ppm de H<sub>2</sub>S, avec une consommation propre de 1 kW<sup>iii</sup>.

Le Biorieselbettreaktor „de l'entreprise SH-Umwelt“ fonctionne sur le même principe avec un lit bactérien fixant le soufre et ses composés. Par ajout contrôlé d'oxygène, le H<sub>2</sub>S ou le soufre carboné contenu dans le biogaz est oxydé en soufre ou en sulfate.

Les avantages de ce système pour la désulfuration sont :

- La possibilité de régler la valeur du PH de façon exacte.
- L'isolation du digesteur permet un meilleur transfert de chaleur pour la microbiologie de digestion.
- L'optimisation du processus de dégradation en fonction des saisons.
- Tous les paramètres du procédé sont surveillés, réglés et au besoin commandés.
- Faibles coûts d'exploitation.
- Moins d'entretien.

L'entreprise autrichienne ENTEC spécialisée dans le conditionnement du biogaz propose aussi bien la désulfuration par voie biologique que chimique. Sans donner les détails sur leur système, elle affirme que la désulfuration biologique est indiquée pour le biogaz contenant jusqu'à 1,5 vol% (15 000 ppm) de H<sub>2</sub>S alors que la variante chimique peut traiter les gaz contenant jusqu'à 4 vol% (40 000 ppm) de H<sub>2</sub>S. Selon elle toujours, les moteurs de cogénération exigent une épuration du biogaz jusqu'à une contamination par le H<sub>2</sub>S comprise entre 200 et 1000 ppm, valeurs pour lesquelles la plupart de motoristes maintiennent leur garantie. Néanmoins, l'objectif d'épuration doit être fixé en tenant compte des coûts d'exploitation liés à la consommation éventuelle d'huile de moteur de manière à garantir la rentabilité de l'exploitation. Un compromis est donc nécessaire, ainsi qu'une négociation avec le motoriste.

### **Analyse des exigences sur la qualité du gaz du point de vue des fabricants de moteurs**

Un questionnaire a été envoyé par courrier électronique à une vingtaine de motoristes proposant des groupes de cogénération fonctionnant au biogaz. Il consiste de connaître les exigences sur la qualité du biogaz afin qu'il permette un fonctionnement fiable et régulier et surtout pour que la garantie soit assurée. Il ressort des résultats obtenus que les fournisseurs d'équipements semblent présenter une certaine flexibilité et peuvent à partir des données d'analyse du gaz adapter la construction du groupe tout en limitant les marges de fluctuation de différentes molécules. Ci-dessous la synthèse des 8 réponses obtenues.

## Moteurs Wärtsilä<sup>iv</sup>

■ Lower Heating Value	>=	' 24 MJ/m <sup>3</sup> '
■ H <sub>2</sub> S	<=	0.05 vol %
■ Water (liquid)	<=	0.005 vol %
■ Ammonia	<=	25 mg/m <sup>3</sup>
■ Halogens	<=	50 mg/m <sup>3</sup>
■ Particles/solids	<=	50 mg/m <sup>3</sup>
■ Hydrogen	<=	..... (knock, backfire)

*Exigences sur la qualité du biogaz pour l'alimentation de la microturbine Capstone*

PCS : 13 – 28 MJ/Nm<sup>3</sup>

Specific gravity relative to air : 0,8 – 1,10

Wobbe index: 12,45 – 31,65

PCS, Specific gravity et Wobbe Index dans les conditions T = 15 °C et p = 101,33 kPa

H<sub>2</sub>S: 5 – 70000 ppm

La température du gaz doit être inférieure à 50°C mais la température minimale doit être supérieure de –20°C à 10°C par rapport à la température du point de rosée (dew point T°) du biogaz à la pression maximale.

Pression : elle dépend du Pouvoir calorifique (tableau suivant)

PCS max MJ/m <sup>3</sup>	PCS min MJ/m <sup>3</sup>	Pression max kPa Gauge	Pression min kPa Gauge
42	26	379	345
26	22	414	345
22	19	448	379
19	17	483	414
17	15	517	448
15	13	552	483

### Autres polluants :

Siloxanes : < 5 ppb vol

Sodium et Potassium : < 0,51 ppm masse

Vanadium, Calcium, Plomb : < 0,5 ppm masse

Chlore: < 1500 ppm masse

Particules solides: < 20 ppm masse et les dimensions doivent être inférieures à 10 microns.

H<sub>2</sub>O (liquide): zéro

Huile de lubrification : < 2 ppm masse

En présence d'autres polluants à une proportion supérieure à 0,5 ppm (masse), Capstone devra être informé afin que cela soit pris en compte.

## Energiewerkstatt GLIZIE GmbH

1. Exigences sur la composition du biogaz afin de protéger le moteur à gaz et la rampe de conditionnement du gaz

H<sub>2</sub>S max. 30 mg/Nm<sup>3</sup> (environ 22 ppm) - Désulfuration nécessaire

HCl max. 12 mg/Nm<sup>3</sup>

HF max. 5 mg/Nm<sup>3</sup>

P max. mg/Nm<sup>3</sup>

As, Pb max. 5 mg/Nm<sup>3</sup>

Indice de méthane : min. 65

Taux d'Humidité du gaz : < 100 % à l'entrée de la rampe de conditionnement du gaz, éventuellement sécher le gaz ou égoutter .

**Particules** : filtrage du gaz en amont

Il est conseillé de ne pas utiliser le catalyseur d'oxydation parce qu'il est très rapidement endommagé par les faibles quantités de H<sub>2</sub>S dans le biogaz. En plus, les motoristes l'excluent de la clause de garantie.

2. Pression du gaz à l'entrée du cogénérateur : 5 à 20 mbar

3. Protection contre les détonations : Il est conseillé de prévoir une sécurité contre les explosions (détonation) munie d'un limiteur de flamme du côté de la conduite de gaz.

4. Température de l'eau de retour au cogénérateur : L'eau du circuit de retour doit avoir une température minimale de 65°C afin d'éviter de descendre en dessous du point de rosée dans l'échangeur de chaleur sur les gaz d'échappement.

5. **Intervalle de vidange:** Selon la composition du biogaz, la vidange a lieu après 500 à 800 heures de fonctionnement (valeurs d'expérience) avec l'huile minérale

## KraftWerK Kraft-Wärme-Kopplung GmbH : moteurs MAN<sup>1</sup>

Indice de méthane : >80 - Pour les valeurs plus basses, consulter MAN

Pouvoir calorifique : > 5 kWh / Nm<sup>3</sup>

Chlore <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Fluor (F) < 50 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

---

<sup>1</sup> Communication de Manuela Lütke de l'entreprise

Total Chlore + Fluor Somme (Cl, F) <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>  
 Poussières (< 5 µm) : <10 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>  
 Vapeur d'huile d'amenée du gaz <400 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> - Pas de condensation dans la rampe  
 Silicium x1 (Si) <5 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> – En cas de concentration élevée, contacter MAN  
 Soufre (S) <2000 mg / Nm<sup>3</sup>  
 H<sub>2</sub>S : <200 ppm  
 Ammoniac (NH<sub>3</sub>) <50 ppm  
 Humidité relative <60 % - Pas de condensation dans le „Gemischstrecke“  
 Température du mélange gazeux après le carburateur (TG) 10 <TG <30 °C

### **SOKRATHERM**

Indice de méthane : >80

Pour les valeurs plus basses, consulter le constructeur afin qu'il adapte l'avance à l'allumage et la puissance. Exceptionnellement, les modules FG 72 peuvent être alimentés avec du gaz ayant un indice de méthane jusqu'à 34.

H<sub>2</sub>S : <120 mg/Nm<sup>3</sup>

Sur une petite période le moteur peut tolérer jusqu'à 150 mg/Nm<sup>3</sup>.

Humidité relative < 80 %

Température du mélange gazeux après le carburateur (TG) TG <30 °C

La présence de Silicium dans du biogaz peut entraîner la fixation des couches et par conséquent les dégâts au moteur. Ces dégâts dus au Silicium sont exclus de la garantie.

Dr Kampmann<sup>v</sup> donne quelques indications sur le choix du type du moteur de cogénération: dérivé du moteur à étincelles (ME) ou à allumage spontané (MAS). Les principaux critères de décision sont la taille de l'installation et le rendement (tableau XX).

Taille [m <sup>3</sup> /h]	V < 20	20 < V < 50	50 < V < 200	V > 200
Type de moteur	MAS	Diesel ME	Diesel ME	Gas MAS
Rendement mécanique	< 30%	> 30%	> 40%	~40%

Tableau

La présence du CO<sub>2</sub> permet d'augmenter le taux de compression à 12,5 comme pour les moteur à propane, ce qui permet une augmentation du rendement de 1 à 2%. La valeur de lambda est comprise entre 1,3 et 1,6. Les exigences sur le biogaz sont :

CH<sub>4</sub> : env. 60%

CO<sub>2</sub> : env. 40%

S: < 2,2 g/Nm<sup>3</sup> ou H<sub>2</sub>S: < 0,15 vol. %

Humidité : < 60 – 80%



**Précautions:** protéger les parties du moteur pouvant être en contact avec le soufre (cuivre, chrome) et éventuellement les remplacer ou les changer régulièrement.

**Microturbine TURBEC LTM 100: puissance nominale 95 kWe(extrait du document de commercialisation de Pro2)**

Les données ci-dessous se rapportent à un gaz dans les conditions normales (298K, 1,013 bar, 60% d'humidité de l'air).

PCI : > 60%vol de CH<sub>4</sub>

Chlore <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Fluor (F) < 50 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Total Chlore + Fluor Somme (Cl, F) <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Poussières (< 5 µm) : <10 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Vapeur d'huile (>C5) <400 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> - Pas de condensation dans le „Gemischstrecke“

Silicium x1 (Si) < 10 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> – En cas de concentration élevée, contacter MAN

Souffre (S) <2200 mg / Nm<sup>3</sup>

H<sub>2</sub>S : < 0,15%vol

Humidité relative < 90 % - Pas de condensation dans la rampe d'amenée du gaz

Température du mélange gazeux après le carburateur (TG) 10 <TG <50 °C

**Moteurs Caterpillar**

La qualité du gaz a une grande influence sur le bon fonctionnement du moteur.

Les caractéristiques à respecter pour le biogaz sont les suivantes :

- Taux de CH<sub>4</sub> : 15,7 à 23,6 MJ/Nm<sup>3</sup> (45 à 65%) (1)
- Pression de gaz : 100 mbars
- H<sub>2</sub>S : < 57 mg/MJ
- Halides (Cl + F) : < 19 mg/MJ
- Huile : < 1,19 mg/MJ
- Particules : < 0,8 mg/MJ
- Dimension des particules : 1 micron
- Silicones : < 0,56 mg/MJ
- Ammoniac : < 2,81 mg/MJ

La température du gaz est idéale entre 10°C et 60°C.

Toute condensation dans l'amenée de gaz est à éviter. Il est nécessaire de limiter l'humidité relative à 80% à la température minimale du gaz.

La fluctuation dans la pression de gaz avant le régulateur est inférieure à 1,7 kPa.

Les valeurs indiquées ci-dessus sont les valeurs déterminées par CATERPILLAR pour un usage sans problème majeur.

**Deutz (Technical circular 0199 99 3017 EN)**

PCI : > 4 kWh/Nm<sup>3</sup> avec une variation acceptable inférieure à 5% par rapport au minimum

Rapport CO<sub>2</sub>/PCI : < 10 vol%/ kWh/Nm<sup>3</sup>

Chlore <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Fluor (F) < 50 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Total Chlore + Fluor Somme (Cl, F) <100 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

NH<sub>3</sub> : < 50 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Poussières (3 - 10 µm) : <10 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Vapeur d'huile (>C5) <400 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub> - Pas de condensation dans la rampe d'amenée du gaz

Silicium x1 (Si) < 10 mg / Nm<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>

Souffre (S) < 2200 mg / Nm<sup>3</sup>

H<sub>2</sub>S : < 0,15% vol (limité par les risques de corrosion dans le moteur)

Humidité relative < 80 % - à la température minimale de l'air

Température du mélange gazeux après le carburateur (TG) 10 <TG <50 °C

## Liste des références

---

- <sup>i</sup> Maurer (1999). Ermittlung des Investitionsbedarfs und der Verfahrenskosten von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Universität Hohenheim
- <sup>ii</sup> Schneider R., Pechtl S., Winter H., Quicker P.: Mikrobiologische Reduktion des H<sub>2</sub>S-Gehaltes von Biogas, ATZ EVUS, Kropfersrichterstr. 6, 92237 Sulzbach-Rosenberg.
- <sup>iii</sup> Köhler & Ziegler (2003). BioSulfex, Biogas-Entschwefelung ohne Abfall. Energie Ideal, Ausgabe 8/2003
- <sup>iv</sup> Jakob Kimstra, Gasification and gas engines. Gasnet meeting 28-29/1/2004, Västerås, Sweden
- <sup>v</sup> Kampmann H-J., (2002) Gas-Otto-Motor oder Zündstrahl-Gas-Motor für Nutzungsmöglichkeiten und deren Einordnung. Anlagen- und Antriebstechnik Nordhausen GmbH