

Schlussbericht vom Dezember 2005

BHKW-Optimierung und SCR-Katalysator Kompaktbiogasanlage Küssnacht

Projekt Nr. 46598

Vertrag Nr. 86716

Ausgearbeitet durch

Genesys GmbH

Verfasser: Daniel Ruch

Im Auftrag des

Bundesamtes für Energie

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE, 3003 Bern

Auftragnehmer:

Genesys GmbH, Balierestrasse 29, 8500 Frauenfeld

Autor:

Daniel Ruch

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Energie und Umwelt“ des Bundesamts für Energie BFE erstellt. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Bezugsquelle: www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	4
2	Abstract.....	4
3	Ausgangslage.....	5
4	Ziel der Arbeit	5
5	Lösungsweg	5
6	Hauptergebnisse	6
6.1	Phase 1: Katalysatorwaben Vorversuche	6
6.2	Phase 2: Pilotanlage mit Ammoniakeindüsung	6
6.3	Phase 3: Pilotanlage mit Harnstoffeindüsung	8
6.4	Phase 4: Standardisierung des Katalysators auf Biogasanlagen	10
7	Nationale Zusammenarbeit	11
8	Bewertung 2004/05 und Ausblick 2006.....	12

1 Zusammenfassung

Damit weiterhin die hocheffizienten Zündstrahlmotoren zur Nutzung des Biogases auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt werden können, müssen die Abgase nachbehandelt werden, um die gesetzlichen Grenzwerte einhalten zu können. Die Stickoxidfracht schwankt wegen der ständig ändernden Biogasqualität (Methangehalt) sehr stark. Es wurde ein Abgasreinigungskatalysator entwickelt, der mit diesen Anforderungen und den einzigartigen Rahmenbedingungen auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen umgehen kann. Es gab kein solches Produkt auf dem Markt und es musste zusammen mit einer Spezialfirma entwickelt werden.

Die Katalysatorentwicklung wurde im September 2004 abgeschlossen. Es gelang, einen standardisierten Katalysator auf SCR-Basis zu entwickeln, der alle Schwankungen im Abgas von BHKWs in Biogasanlagen auszugleichen vermag. Die Werte der Luftreinhalteverordnung (LRV) werden mit dem neuen System problemlos eingehalten. Sollten sich in Zukunft die Abgasgrenzwerte weiter verschärfen, so kann der Katalysator entsprechend ausgebaut werden. Bis zum April 2005 wurden fünf Katalysatoren auf verschiedenen Biogasanlagen in der Schweiz eingebaut.

Das oberste Ziel der Forschung und Entwicklung, nämlich den Zündstrahlmotor weiterhin auf Biogasanlagen einsetzen zu können, wurde erreicht. Nur der Zündstrahlmotor mit seinem hohen elektrischen Wirkungsgrad ermöglicht in der Schweiz einen kostendeckenden Betrieb von landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Ein Fehlschlagen der Entwicklung hätte den gerade einsetzenden Bauboom wieder massiv abgeschwächt.

2 Abstract

So that furthermore the very efficient igniting beam engines can be used for the use of the biogas at agricultural biogas plants, the waste gases must be after treated to be able to keep the legal limiting values. The nitric oxide freight sways very strongly because of the biogas quality (methane content) permanently changing. A purification of exhaust gases catalyst was developed which can handle these requirements and the unique framework conditions at agricultural biogas plants. There was no such product on the market and it had to be developed together with a special company.

The catalyst development was completed in June 2004. It turned out well to develop a standardized catalyst on SCR basis which is able to compensate for all fluctuations in the waste gas of CHP's in biogas plants. The values of the air pure hold ordinance are kept without problems with the new system. If, in future, the waste gas limiting values should further intensify, then the catalyst can be removed correspondingly. Until April 2005 five catalysts were installed in Switzerland at different biogas plants.

The topmost goal of the research and development of being able to use the igniting beam engine on biogas plants namely furthermore was accomplished. Only the igniting beam engine with its high electrical degree of effectiveness makes a cost-effective operation of agricultural biogas plants possible in Switzerland.

3 Ausgangslage

In landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird vor allem der Zündstrahlmotor eingesetzt. Diese Motoren haben einen hohen elektrischen Wirkungsgrad, sind sehr zuverlässig und haben tiefe Service- und Unterhaltskosten. Der Motor beruht auf dem Dieselp Prinzip. Es wird genauso viel Diesel- oder Pflanzenöl in den Verbrennungsraum eingespritzt (8-10%), damit der Motor selbst zünden kann. Um die Nennleistung zu erreichen wird dann die benötigte Biogasmenge über einen Regler der Ansaugluft zugemischt. Trotz unregelmässiger Gasqualität und harten Rahmenbedingungen erreichen die damit eingesetzten BHKWs einen gemessenen und garantierten elektrischen Wirkungsgrad von 39% (100 kW_{el}). Ein vergleichbarer Otto-Biogasmotor kommt höchstens auf 34% elektrischen Wirkungsgrad. Das heisst, dass der Zündstrahlmotor aus der gleichen Menge Biogas entscheidend mehr Ökostrom produziert. Da in der Schweiz eine grosse Nachfrage an Ökostrom herrscht und dies der Hauptertrag des Biogasanlagenbetreibers ist, würden in der Landwirtschaft ohne diese Hochleistungsmotoren praktisch keine Biogasanlagen mehr gebaut.

Ein gewichtiger Nachteil, welcher der Zündstrahlmotor gegenüber dem reinen Gasmotor hat, ist seine höhere Schadstoffkonzentration im Abgas. Dieselmotoren können nicht wie Gasmotoren mit stöchiometrischem Verbrennungsluftverhältnis betrieben werden. Durch den massiven Luftüberschuss im Verbrennungsraum entstehen relativ hohe Verbrennungstemperaturen. Dadurch werden im Abgas grosse Mengen an Stickoxiden produziert, die bei starker Sonneneinstrahlung die Bildung von schädlichem Ozon fördern und als Dünger und saurer Regen in den Boden gelangen. Der Einsatz eines konventionellen 3-Wege-Katalysators zur Minderung der NO_x Emissionen ist wegen dem Luftüberschuss nicht möglich. Ohne nachgeschaltete Abgasbehandlung können aber die gesetzlich festgelegten Schadstoffwerte für CO und NO_x nicht eingehalten werden. Der SCR-Katalysator kann die einzige technische Lösung sein.

Die Luftreinhalteverordnung schreibt für Biogas-BHKW einen Abgasgrenzwert von 400 mg/Nm³ für NO_x und 650 mg/Nm³ für CO (bezogen auf 5% Restsauerstoff) vor. Ein typisches 100 kW_{el} Zündstrahl-BHKW emittiert aber rund 1'100 mg/Nm³ NO_x und 800 mg/Nm³ CO. Mit einem SCR-Katalysator, speziell für Biogasmotoren entwickelt, sollen diese Werte deutlich unter die LRV-Grenzwerte gedrückt werden.

4 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines **Standardkatalysator** für Biogas-BHKWs.

5 Lösungsweg

Das Forschungsprojekt wird in vier Teilprojekte eingeteilt. Im ersten Teil werden **Katalysatorwaben Vorversuche** durchgeführt. Tauchen keine Katgifte im Abgas auf, welche die Waben inaktiv machen könnten, so wird auf der Biogasanlage Küssnacht ein **Pilotkatalysator mit Ammoniak-eindüsung** ausgetestet. Ist dieser erfolgreich, so soll ein Standardkatalysator für Biogas-BHKWs definiert werden und auf einer Neuanlage eingesetzt werden. Schlagen die Ammoniakversuche fehl, so soll das weniger anfällige, aber teurere **Harnstoffsystem** ausgetestet werden. Ist dieses erfolgreich, so soll ein **Standardkatalysator für Biogas-BHKWs** definiert werden und auf der Biogasanlage Küssnacht eingesetzt werden.

6 Hauptergebnisse

6.1 Phase 1: Katalysatorwaben Vorversuche

Damit das Entwicklungsprojekt überhaupt Sinn machte, musste im Vorfeld abgeklärt werden, ob der Katalysator deaktiviert wird, wenn er Abgasen aus einem Biogas-BHKW ausgesetzt ist. Es ist bekannt, dass Siloxane, zum Beispiel aus Klärschlamm in Kläranlagen, Katalysatoren vergiften und deaktivieren. Deshalb wurde während 600 Betriebsstunden eine Katalysatorwabe in eine Abgasleitung eines repräsentativen Biogas-BHKW's (siehe Fig.1) eingebaut und nachher im Labor der Firma HUG Engineering ausgetestet. Der Katalysator war noch voll leistungsfähig. Zwar werden unterschiedliche organische Stoffe in landwirtschaftlichen Biogasanlagen verarbeitet. Da es sich aber meistens um unbehandelte und natürliche Stoffe handelt, im Gegensatz etwa zu Klärschlamm aus Industrie und Haushaltabwässern, ist nicht mit einer Vergiftung der Waben zu rechnen.



Fig. 1 Versuchskatalysatorwaben auf der Biogasanlage Dietlikon ZH

6.2 Phase 2: Pilotanlage mit Ammoniak eindüsung

Im BHKW der neu erstellten Biogasanlage Ott (siehe Fig.2) in Küssnacht wurde ein erster Prototyp eines SCR-Katalysators eingebaut. Als Reaktionsmittel diente Ammoniak aus Gasdruckflaschen. Diese Technik der Eindüsung ist sehr einfach und kostengünstig. Das Ammoniak wurde direkt nach dem Turbolader in das Abgasrohr eingedüst (siehe Fig.3). Die Anlage erwies sich aber als untauglich. Zum einen war der Katalysator falsch ausgelegt, da die Motorenparameter vom Hersteller zu ungenau waren, andererseits ist die Ammoniaktechnik anfällig auf Hitze und Schmutz, was ein ständiges Nachrüsten der technischen Ausrüstung erforderte. Es wurden aber wichtige Erfahrungen gewonnen, die es ermöglichten, einen funktionierenden SCR-Katalysator auf Harnstoffbasis zu entwickeln. Die Katalysatoranlage in Küssnacht wird im September 2004 durch einen Harnstoff SCR-Katalysator ersetzt. Die Waben waren auch nach 2'000 h Abgasbetrieb voll funktionsfähig.



Fig. 2 Erstes 100 kWel BHKW in der Schweiz, eingebaut im Februar 2003



Fig. 3 Ammoniakkeindüßrohr in Abgasleitung nach Turbolader. Im Kreis sichtbar ist das Taktventil zur Dosierung des Ammoniaks.



Fig. 4 Katalysatorgehäuse mit Waben

Der Vorteil der Ammoniak eindüsung ist, dass die Mischstrecke im Abgasrohr sehr kurz gehalten werden kann. Die bestehenden Wärmetauscher mussten nicht versetzt werden. Das Katalysatorgehäuse kann kompakt im bestehenden Rahmen des BHKWs integriert werden. Trotzdem überwiegen die Nachteile der Ammoniaktechnik gegenüber der Harnstofftechnik.

6.3 Phase 3: Pilotanlage mit Harnstoffeindüsung

Die Biogasanlage Neukomm in Thayngen ist seit 25 Jahren in Betrieb. Sie ist eine der letzten erfolgreich betriebenen Anlagen aus den späten 1970er Jahren, als die Schweiz als Pionierland im Biogasbereich galt. Unterdessen hat die Schweiz den Anschluss an die Weltspitze längst verloren. Dank Landwirten wie Herrn Neukomm, die unermüdlich und auf eigene Kosten ihre Anlagen immer weiterentwickelten, ist die Biogasszene in der Schweiz zum Glück nie ganz zum Erliegen gekommen. Die Anlage Neukomm zeichnet sich durch eine ausgezeichnete Gasqualität und eine sehr konstante Gaszusammensetzung aus. Die Anlage ist ideal für Katalysatorversuche geeignet.

Mit den Erkenntnissen aus Phase 2 wurde ein neues 100 kWel BHKW mit eingebautem SCR-Katalysator aufgestellt. Da das Harnstoffsystem eine Eindüsstrecke benötigt, mussten die bestehenden Abgaswärmetauscher auf dem BHKW ausgebaut werden. Das Katalysatorgehäuse (siehe Fig.5) musste nun optimal in den freien Raum integriert werden.



Fig. 5 SCR Katalysator

Der SCR-Katalysator besteht aus der Eindüsstrecke (siehe Fig. 5, vorne, rund) und dem Gehäuse mit den Katalysatorwaben. Die Einheit ist kompakt und passt genau in den Rahmen des BHKWs.

Der Katalysator kann seitlich zu Servicezwecken geöffnet werden. Er hat zwei eingebaute Wabenreihen. Die erste Reihe ist der eigentliche SCR-Teil. Hier wird das NO_x zum harmlosen N₂ reduziert. Die zweite Wabenreihe besteht aus Edelmetallelementen. Sie oxidieren CO zu CO₂. Da der Zündstrahlmotor nur 4 mg/Nm³ Russ hat (Grenzwert 50 mg), verschmutzen die feinen Wabenkanäle nicht.

Zur Kontrolle des Katalysators wurde während einem Tag der Wirkungsgrad des Motors, die Biogasqualität und die Abgaswerte im Roh- und Reingas gemessen.

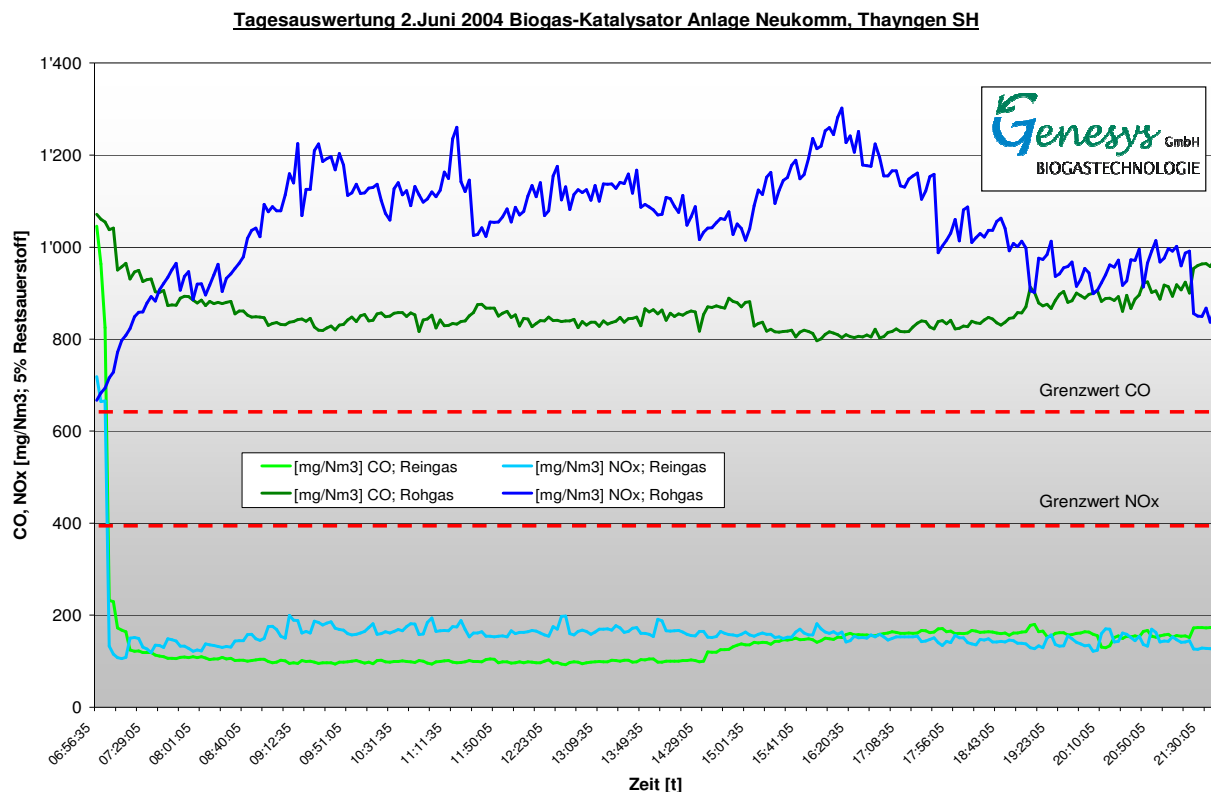


Fig. 6 Diagramm Abgaswerte

Die NO_x-Konzentration im Rohgas steigt am Anfang kontinuierlich an, bleibt dann auf einem konstanten Mittelwert und erreicht einen Höhepunkt um ca. 16:30h (siehe Fig. 6). Der Anstieg geht auf die Aufwärmphase des Motors zurück. Je wärmer der Motor wird, desto mehr molekularer Stickstoff aus der Verbrennungsluft wird oxidiert. Auffallend ist der unruhige Verlauf der Stickoxidkurve. Dies scheint auf den Zündstrahlbetrieb zurückzuführen zu sein. 90% der Energie werden dem Brennraum vom Biogas zugeführt. Das Biogas ist aber alles andere als ein normierter Treibstoff. Der schwankende CH₄-Gehalt, Spurengase, insbesondere das leichtflüchtige Ammoniak, Feuchtigkeit und wechselnde Temperaturen und Druckverhältnisse im Gasspeicher beeinflussen die Verbrennung. Dies war zu erwarten gewesen und die technische Herausforderung lag darin, die Harnstoffregelung so zu konzipieren, dass die Schwankungen aufgefangen werden können. Tatsächlich zeigt die Reingaskurve des NO_x einen konstanten Verlauf. Die Grafik zeigt auch deutlich, wie der Katalysator sich nach dem Start des BHKWs einregelt und die vorprogrammierten Reingaswerte trotz Schwankungen im Rohgas einhält.

Die gesetzlichen Grenzwerte von CO und NO_x werden nach dem Katalysator problemlos eingehalten.

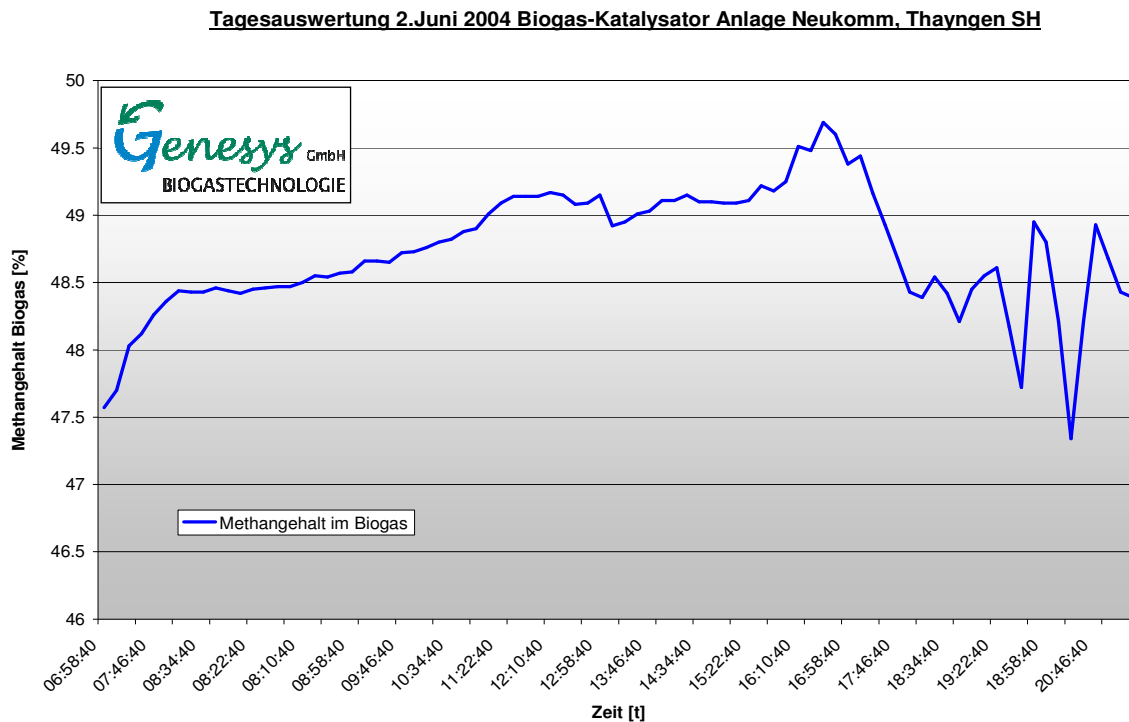


Fig. 7 Diagramm Biogaswerte

Der Methangehalt im Biogas schwankt zwischen 47.5% und 49.75% im Tagesverlauf (siehe Fig. 7). Auffallend ist, dass der Kurvenverlauf ähnlich mit dem Verlauf der NO_x-Konzentration im Rohgas ist, mit demselben Höhepunkt um 16:30h. Steigt der Methangehalt im Brenngas, so regelt der Motor die Biogasmenge zurück. Die Einmischung des Biogases erfolgt in einem Venturirohr. Dadurch wird bei höherem Methangehalt mehr Luft angesaugt, die Verbrennung wird heisser und es wird mehr NO_x gebildet.

Die Schwankungen im Biogas sind als moderat einzustufen. Die Anlage Neukomm vergärt nur Schweinegülle und Getreideabgang. Die meisten anderen landwirtschaftlichen Biogasanlagen haben eine grosse Vielfalt an organischen Stoffen und deshalb auch grössere Methanschwankungen. Diese sollten aber dem Regler des Katalysators nach den gewonnenen Erfahrungen auf der Anlage Neukomm keine Probleme bereiten.

6.4 Phase 4: Standardisierung des Katalysators auf Biogasanlagen

Aus der Phase 3 wurden weitere Erkenntnisse gewonnen, die es ermöglichten, den Katalysator zu optimieren und als Standard auf der Biogasanlage Küssnacht einzusetzen. Die kantonalen Abgasmessungen (siehe Fig. 8) bestätigten die guten Forschungsergebnisse. Mit 42 mg/Nm³ CO wurde der LRV Grenzwert von 650 mg/Nm³ massiv unterschritten. Auch beim NO_x wurde der Grenzwert von 400 mg/Nm³ mit 183 mg/Nm³ unterschritten. Die Grenzwerte von Staub und Ammoniak wurden je um 90% unterschritten.

Tino Wehrli
Emissionsmessungen

BHKW

09.11.04 / BHKWHE04

off.kue/2949

Datenblatt Abgasmessung BHKW 1

Anlageadresse:		Messdatum	29.09.04	Kanton:	SZ
Name	Off Josef				
	Viehhandel u. Transport				
Strasse	Brüschhalde	Teil-/Fax-Nummer	041 250 21 36		
		Sachbearbeiter/in	Heri	Off	
PLZ/Ort	8403 Küssnacht am Rigi				

BHKW	Fabrikat	Hans Jürgen Schell	Typ	1003 TLPS	Baujahr	2002
	Fabr.-Nr.	1003441	Wärmeträger	Wasser	Temp. (°C)	80
Brennstoffleistung [kW]	305	Steuerung	0			
Zusatzinstallationen		0 Wärmeleistung	120kW	El Leistung	100kW	

Brennstoffe		Gas	
HEL	Zähler	38299 l	5649 h

Messergebnisse

Messmethoden: Empfehlungen über die Emissionsmessungen von Luftschadstoffen bei stationären Anlagen vom 22.1.1996

Messstelle: EMPA-Stutzen am Rauchrohr

Abgaskanal:	Rund	Durchmesser/Gefälle [m]	0.12	0.00	Fläche [m ²]	0.01131
Probenahme:	innen/legend	Punktmessung			Basis [mbar]	954
Messung Nr.	1	2				
Lastangabe [%]	100	100				
Start Messung	13:15	13:50				
Ende Messung	13:45	14:20				
O ₂ [%]	7.1	7.3				
Temp. Rauchgas [°C]	124	125				
Geschw. [m/s]	16.8	17.0				
Abgasstrom, tr. [m ³ /h]	389	394				
Feuerungswärmeleistung [kW]	337±49	337±49				
Abgasverlust [%]	5.3±0.5	5.4±1.0				
Resultate bez. 5% O₂, 0°C, 1013 mbar, trocken,						
Stundenmittelwerte						
Staub (N) [mg/m³]						
	5.3	4.3				
CO (N) [mg/m³]						
	44	39				
NO_x als NO₂ (N) [mg/m³]						
	184	182				
NH₃-Wert trocken [mg/m³]						
	3.9	3.1				
Abgasstrom, tr. [m³/h]						
	337	337				
Stundenmittelwerte Massenstrom [g/h]						
Abgasstrom, tr. [m³/h]						
	337					
Staub-Wert trocken [g/h]						
	2					
CO-Wert trocken [g/h]						
	14					
NO_x-Wert trocken [g/h]						
	62					
NH₃-Wert trocken [g/h]						
	1					
Höchster Stundenmittelwert						
Grenzwerte						
Prov. Beurteilung						
Staub-Wert trocken [mg/m ³]	5±1	50				eingehalten
CO-Wert trocken [mg/m ³]	42±5	650				eingehalten
NO _x -Wert trocken [mg/m ³]	183±18	400				eingehalten
NH ₃ -Wert trocken [mg/m ³]	3±1	30				eingehalten
Besonderheiten: Brennstoff: ca. 50 m ³ /h Biogas mit 58% CH ₄ , entspricht 30.5 m ³ /h Erdgas + 3.2 l/h HEL						

09.11.04

Messverantwortlicher:

Tino Wehrli

Fig. 8 Kantonale Abgasmessung am BHKW mit standardisiertem Harnstoff-Kat der Biogasanlage Küssnacht

7 Nationale Zusammenarbeit

Die Zusammenarbeit mit der Firma HUG Engineering klappte einwandfrei. Da dem Biogasmarkt in der Schweiz eine grosse Zukunft vorausgesagt wird, ist das Interesse der Privatwirtschaft in diesem Umfeld sehr gross.

8 Bewertung 2004/05 und Ausblick 2006

Die Pilotanlage mit der Ammoniakeindüsung war ein Misserfolg. Zwar funktionierte das Prinzip, aber das System war zu anfällig auf Störungen. Das System mit Harnstoffeindüsung ist dagegen ein voller Erfolg. Die Abgasgrenzwerte können problemlos eingehalten werden. Weiteren Verschärfungen der Luftreinhalteverordnung können gelassen entgegengesehen werden. Einziger Wermutstropfen bleibt der relativ hohe Katalysatorpreis.



Fig. 9 Technikraum Biogasanlage Graltshausen

Im Juni 2004 ging in Graltshausen die erste Biogasneuanlage mit Katalysator in Betrieb (siehe Fig. 9). Sie besticht durch höchste Effizienz, Kompaktheit und saubere Abgase. Bis April 2005 sind insgesamt 5 Biogasanlagen mit Katalysator in Betrieb gegangen. Obschon absehbar ist, dass in Zukunft moderne Gasmotoren die Zündstrahlmotoren verdrängen werden, hat in einer wichtigen Aufschwunghase der Schweizer Biogasszene der Zündstrahlmotor weiterhin eingesetzt werden können.

Bundesamt für Energie BFE

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen · Postadresse: CH-3003 Bern
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 · office@bfe.admin.ch · www.admin.ch/bfe

Vertrieb: ENET, Egnacherstrasse 69, CH-9320 Arbon
Tel. 071 440 02 55 · Tel. 021 312 05 55 · Fax 071 440 02 56
enet@temas.ch · www.energieforschung.ch · www.energie-schweiz.ch