

Harald Stressler

Stefan Aigenbauer

## Messbericht Schwachgasversuch Betrieb eines Stirlingmotors mit Biogas

Datum 14. Oktober 2019

Nummer 916 TR N101340

Projektleitung Stefan Aigenbauer  
stefan.aigenbauer@bioenergy2020.eu

Mitarbeit Harald Stressler  
harald.stressler@bioenergy2020.eu

Firmenpartner Frauscher Thermal Motors GmbH



Projektnummer N101340 Schwachgas BHKW 3

Projektlaufzeit 01. Oktober 2018 - 31. Jänner 2020

Mit Unterstützung von der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im FFG-Basisprogrammprojekt: Problemgas-BHKW



### BIOENERGY 2020+ GmbH

#### Standort Wieselburg

Gewerbepark Haag 3  
A 3250 Wieselburg-Land  
T +43 (0) 7416 52238-10  
F +43 (0) 7416 52238-99  
office@bioenergy2020.eu  
www.bioenergy2020.eu

#### Firmensitz Graz

Inffeldgasse 21b, A 8010 Graz  
FN 232244k  
Landesgericht für ZRS Graz  
UID-Nr. ATU 56877044





Bericht

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
1.1	Emissionsgrenzwerte von Blockheizkraftwerken	5
<b>2</b>	<b>Material und Methode</b>	<b>7</b>
2.1	Motor	7
2.2	Versuchsdurchführung	8
2.3	Auswertungsmethode	10
<b>3</b>	<b>Auswertung und Diskussion</b>	<b>11</b>
3.1	Heiz- und Brennwert	11
3.2	Auswertephasen	11
3.3	Zusatzmessungen	12
3.4	Fazit	12

## 1 Einleitung

Dieser Messbericht beschreibt die Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse an einem Stirlingmotor, der mit Biogas (Schwachgas) an der Biogasanlage in Utzenaich betrieben wurde. Das Stirling-Blockheizkraftwerk war über sieben Wochen vom 04. September 2019 bis zum 24. Oktober 2019 bei der Biogasanlage im Einsatz. Das Stirling-BHKW ist mobil auf einem Trailer installiert. Der Biogasanschluss sowie der Stromanschluss erfolgten mittels Schlauch- und Kabelverbindungen zwischen Trailer und Biogasanlage. In Abbildung 1 ist der installierte Trailer neben dem Fermenter der Biogasanlage abgebildet.



Abbildung 1: Trailer von Frauscher Thermal Motors vor dem Fermenter der Biogasanlage in Utzenaich

Der in diesem Bericht beschriebene Versuch wurde am 02.10.2019 bei der Ökoenergie Utzenaich GmbH in Weilbolden 17 in 4972 Utzenaich durchgeführt.

Der Versuch wurde an einem Stirlingmotor der Serie alphagamma® G600i der Fa. Frauscher Thermal Motors GmbH durchgeführt um die technischen Spezifikationen des BHKWs beim Betrieb mit Biogas zu ermitteln. Hierzu zählen vor allem der elektrische Wirkungsgrad sowie die Emissionen im Abgas.

## 1.1 Emissionsgrenzwerte von Blockheizkraftwerken

Die maximalen Emissionen beim Betrieb eines Blockheizkraftwerkes sind national geregelt. In Österreich gilt das Verfassungsgesetz *Art 15a B VG<sup>1</sup> über das Inverkehrbringen von Kleinf Feuerungen und die Überprüfung von Feuerungsanlagen und Blockheizkraftwerken*. Die Grenzwerte sind in Tabelle 1 dargestellt.

Verordnung	Brennstoff	Brennstoff-wärmeleistung	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NOx [mg/m <sup>3</sup> ]	NMHC <sup>2</sup> [mg/m <sup>3</sup> ]
Art. 15aB VG, 2013	Erdgas, Flüssiggas	bis 2,5 MW	200	250	150
Art. 15aB VG, 2013	Klärgas, Bioas, Holzgas, Deponiegas	bis 0,25 MW	1000	1000	-

Tabelle 1: Österreichische Grenzwerte von BHKWs. Emissionen bezogen auf 5% Restsauerstoff im Abgas

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, liegen die Grenzwerte in Österreich für den Betrieb eines BHKWs mit Klär- und Biogas jeweils bei 1000mg/Nm<sup>3</sup>, bezogen auf 5% Restsauerstoff für Kohlenmonoxid und Stickoxide.

In Deutschland gilt die *Technische Anleitung zur Regelung der Luft (TA Luft)* für das Inverkehrbringen von Blockheizkraftwerken bzw. Gasmotoren. Die Grenzwerte der TA Luft<sup>3</sup> sind in Tabelle 2 dargestellt.

Verordnung	Brennstoff	Brennstoff-wärmeleistung	CO [mg/m <sup>3</sup> ]	NOx [mg/m <sup>3</sup> ]	CH <sub>2</sub> O [mg/m <sup>3</sup> ]
TA Luft, 2002	Erdgas	bis 50MW	300 (S+F)	250 (andere 4-Takt Otto)	60
TA Luft, 2002	Biogas, Klärgas	bis 50MW	1000 (F) <3MW	1000 (ZS) <3MW, 500 (MM, andere 4-Takt Otto)	60

Tabelle 2: Grenzwerte für Verbrennungsmotoren in Deutschland nach der TA Luft 2002, Emissionen auf 5% Restsauerstoff im Abgas bezogen, S = Selbstzündung, F = Fremdzündung, ZS = Zündstrahl, MM = Magergasmotoren

<sup>1</sup>Quelle: Rechtsinformationssystem des Bundes  
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrSbg&Gesetzesnummer=20000826>

<sup>2</sup> NMHC = Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe

<sup>3</sup> Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit;  
[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Luft/taluft.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft.pdf)

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, liegen die Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) für Fremdzündungsmotoren und für Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) für Zündstrahlmotoren in Deutschland für Biogas und Klärgas bei 1000mg/Nm<sup>3</sup>, bezogen auf 5% Restsauerstoff. Die Grenzwerte für Stickoxide für Magergasmotoren und andere 4-Takt Otto Motoren liegen bei 500mg/Nm<sup>3</sup>. Der Formaldehydgrenzwert (CH<sub>2</sub>O) liegt bei 60mg/Nm<sup>3</sup>.

Der Betrieb von Blockheizkraftwerken bis 1 MW Leistung ist nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (4. BImSchV) in Deutschland nicht genehmigungspflichtig. Dennoch werden die Emissionsgrenzwerte der verwendeten Technologie als Stand-der-Technik vorausgesetzt. Aus diesem Grund sollte bei der Installation auf die Einhaltung der Grenzwerte, wie in Tabelle 2 ersichtlich, geachtet werden. Stirlingmotoren sollen sich dabei an diesen Grenzwerten orientieren.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Quelle: Bernd Thomas: Mini-Blockheizkraftwerke. Vogel Buchverlag, 2011, S.86.

## 2 Material und Methode

### 2.1 Motor

Der Stirlingmotor nach dem alphagamma® Verfahren ist eine Neuentwicklung der Fa. Frauscher Thermal Motors GmbH und stellt eine Kombination einer Alpha- und einer Gammamaschine dar. Bei dieser neuartigen Stirlingmotorenentwicklung werden die Vorteile beider Maschinen kombiniert und gleichzeitig die Nachteile minimiert.

*„Die alphagamma® Technologie reduziert die Arbeit des Expansionskolbens um etwa die Hälfte im Vergleich zum Alpha-Typ und um ca. 30 % im Vergleich zum Beta- und Gamma-Typ. Beide Kolben leisten positive Arbeit. Einhergehend sinken die Kolbenkräfte, die Kolbenreibung und die Lagerbelastung bei den Pleuel- und Kurbelwellenhauptlagern. Die neue Technologie bietet daher die Voraussetzung, trotz schmierölfreiem Betrieb, höchste Lebensdauererwartungen an die Wälzlager zu setzen und insbesondere höhere Wirkungsgrade infolge geringerer Reibungskräfte zu erreichen.“<sup>5</sup>*

Der vermessene Motor des Typs G600i hat folgende Spezifikationen:

- Seriennummer: 101
- Hubraum: 600ccm
- Im Pufferraum integrierter Generator

Der Messaufbau mit Stirlingmotor, Schwachgasbrenner mit Luftvorwärmer und Generator wurde in einem Trailer realisiert. Dieser Trailer ist in Abbildung 2 dargestellt. Da der Vordruck des Biogases in der Versorgungsleitung zu gering war, musste bei dieser Feldmessung noch ein Seitenkanalverdichter zur Drucksteigerung des Biogases installiert werden. Der gelbe Seitenkanalverdichter ist in Abbildung 2 ersichtlich.

---

<sup>5</sup> Frauscher Thermal Motors GmbH, Quelle: <https://www.frauscher-motors.com/prototypen/alphagamma@-motoren.html>



Abbildung 2: Messaufbau inkl. dem Stirling-BHKW im Trailer

## 2.2 Versuchsdurchführung

Der Frauscher alphagamma® Stirling G600i wurde mit Biogas als Brennstoff betrieben. Ziel war es, die Funktionstüchtigkeit bzw. die technischen Spezifikationen bei einem sogenannten „Schwachgasbetrieb“ zu ermitteln. Der Anschluss an die Biogasversorgung wurde von der Biogasanlage in Utzenaich zur Verfügung gestellt. Die Zusammensetzung des Biogases wurde nicht beeinflusst. Es wurden während des Versuchstages mehrerer Proben vom Biogas für die Analyse im Labor bei BIOENERGY 2020+ GmbH gezogen.

Das Stirlingmotor-BHKW wurde nach dem Restsauerstoffgehalt im Abgas geregelt. Dieser wird über eine Lambdasonde im feuchten Abgas gemessen.

Zusätzlich zur Messung mit einer Lambdasonde im feuchten Abgas wurden auch die Emissionen über das Analysegerät Horiba PG350 gemessen. Dieses Analysegerät entnimmt einen Teilabgasstrom (Abgasprobe) und trocknet diesen vor der Messung. Für die Auswertungen der Emissionen wurde der mittels Analysegerät Horiba PG350 gemessene Sauerstoffwert herangezogen. Neben der Messung der gasförmigen Emissionen Kohlenmonoxid und Stickoxide durch das Analysegerät wurden bei dieser Feldmessung mittels anderer Messgeräte und Methoden auch weitere Gasbestandteile gemessen.

Es wurden zusätzlich folgende Komponenten im Abgas ermittelt:

- Organische Gesamtkohlenwasserstoffe (orgC) mittels Flammenionisationsdetektor
- Methangehalt ( $\text{CH}_4$ ) mittels Gaschromatographen
- Formaldehyd ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) mittels dem Acetylaceton-Verfahren
- Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) mit Photometer

Die organischen Gesamtkohlenwasserstoffe wurden durch einen Flammenionisationsdetektor des Types M&A Thermo FID ermittelt.

Der Methangehalt wurde durch Gasproben, welche dem Abgas entnommen wurden, im Labor in Graz bei BIOENERGY 2020+ GmbH ermittelt. Der verwendete Gaschromatograph war der Typ Agilent 490 Micro GC (verwendete Säule: Molsieve 5A).

Die Formaldehydemissionen sowie die Ammoniakemissionen wurden über eine Waschflaschenprobennahme gesammelt und ebenfalls im Labor ausgewertet. Hierzu wurde ein definierter Teilstrom des Abgases durch eine gekühlte Lösung in Waschflaschen durchgeleitet. Durch Absorption wurden die Gasbestandteile ausgewaschen. Die Lösung für die Bestimmung des Formaldehydwertes wurde danach mittels Küvetten nach dem Acetylaceton-Verfahren analysiert. Das verwendete Messgerät war ein Spektralphotometer DR 5000 von Hach. Die Bestimmung des Ammoniak-Wertes erfolgte ebenfalls photometrisch nach DIN 38406 – E5-1.

Um die Motorwärme des Stirlingmotors abzuführen wurde ein Luft/Wasserwärmetauscher, welcher am Trailer aufgebaut ist, in Betrieb genommen.

Der Motor wurde während dem Versuchstag konstant auf einen definierten Restsauerstoffwert im Abgas zwischen 7% und 8% geregelt. Es wurden zwei Phasen mit je einer Stunde im stationären Betrieb ausgewertet.

## 2.3 Auswertungsmethode

Für die Ermittlung der unterschiedlichen Leistungen und Wirkungsgrade des Stirling-BHKWs ist die Bestimmung des Heiz- und Brennwertes des Biogases entscheidend. Die Proben für die Bestimmung der Biogas-Hauptbestandteile wurden direkt von der Biogas-Versorgungsleitung im Anhänger gezogen. Es wurde eine Probe am Tag des Aufbaus (01.10.2019) und eine Probe am Tag des Versuches (02.10.2019) in Gasbeuteln mit einem Inhalt von etwa 4 Liter entnommen. Diese Proben wurden im Labor bei BIOENERGY 2020+ GmbH analysiert. Die Ergebnisse der trockenen Gaszusammensetzung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Probe	Datum	Uhrzeit	Menge [l]	H2 [%]	O2 [%]	N2 [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	H2S [%]	Summe [%]
1	01.10.2019	16:30	4	0,0	0,0	0,0	54,7	47,9	0,0	100,9
2	02.10.2019	16:00	4	0,0	0,0	0,0	54,1	47,9	0,0	100,9
Mittelwert				0,0	0,0	0,0	54,4	47,9	0,0	100,9
Mittelwert bezogen auf 100%				0,0	0,0	0,0	53,9	47,5	0,0	100,0

Tabelle 3: Gaszusammensetzung der Klärgasproben sowie Berechnung eines Mittelwertes

Da die Summe durch Messtoleranzen geringfügig über 100% liegt, wurden die Mittelwerte auf 100% bezogen.

Während den beiden Versuchstagen waren die Methankonzentration sowie die Kohlenstoffdioxidkonzentration sehr ähnlich.

Die Feuchte des Rohgases wurde vor Ort mit einem Feuchtsensor bestimmt (EE31 von E+E Elektronik). Die absolute Feuchte lag bei  $<15\text{g/m}^3$ . Die entspricht rund einem Massenprozent am Abgas. Aufgrund des niedrigen Feuchtegehaltes wurde diese später bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die Bestimmung des oberen und unteren Heizwertes erfolgte nach den Analysedaten im trockenen Zustand nach Tabelle 3.

Die Gesamtauswertung der zwei Auswertephasen erfolgte für folgende Parameter:

- Klemmenleistung Generator
- Unterer Heizwert des Brennstoffes je  $\text{m}^3$
- Oberer Heizwert (Brennwert) des Brennstoffes je  $\text{m}^3$
- Wirkungsgrade (Klemmenleistung und Gesamtleistung bezogen auf  $H_u$  und  $H_o$ )
- Gasmenge und Gasleistung
- Emissionen
  - $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , orgC,  $\text{CH}_2\text{O}$  und  $\text{NH}_3$  bezogen auf 5% Restsauerstoffgehalt lt. Grenzwert)
  - $\text{CH}_4$  in Vol%

## 3 Auswertung und Diskussion

### 3.1 Heiz- und Brennwert

Anhand der Gaszusammensetzung in Tabelle 3 wurde der Heiz- und Brennwert des Klärgases bestimmt. Es wurden die Mittelwerte von CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>S, bezogen auf 100%, für die Berechnung herangezogen. Daraus ergeben sich folgende Brennstoffspezifikationen:

- Hu: 5,31 kWh/Nm<sup>3</sup>
- Ho: 5,89 kWh/Nm<sup>3</sup>

### 3.2 Auswertephasen

Die Mittelwerte des stationären Versuches am 02.10.2019 von Phase 1 (10:30 bis 11:30) und Phase 2 (13:00 – 14:00) sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Parameter	Phase 1	Phase 2	Einheit
Restsauerstoffgehalt	7,7	7,7	Vol.%
Stündliche Gasmenge*	4,10	4,07	m <sup>3</sup> /h
Leistung Gasbrenner bez. auf Hu	21,71	21,60	kW
Leistung Gasbrenner bez. auf Ho	24,09	23,95	kW
elektrische Leistung (Generator-Klemme)	6,10	6,13	kW
Gesamtkühlleistung	10,46	10,42	kW
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Hu)	28,1	28,4	%
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Ho)	25,3	25,6	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Hu	76,3	76,6	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Ho	68,7	69,1	%
CO	132	130	mg/Nm <sup>3</sup> , bez. 5% O <sub>2</sub>
NOx	257	256	mg/Nm <sup>3</sup> , bez. 5% O <sub>2</sub>
orgC	~2	~2	mg/Nm <sup>3</sup> , bez. 5% O <sub>2</sub>

\*bezogen auf Standarddruck und Standardtemperatur

Der Motorwirkungsgrad wurde aus dem Verhältnis von Gesamtkühlleistung plus elektrischer Leistung zum jeweiligen Heizwert ermittelt.

Die Messungen zeigen, dass die Kohlenmonoxidemissionen bei rund 130mg/Nm<sup>3</sup> und die Stickoxidemissionen bei rund 260mg/Nm<sup>3</sup> lagen. Die organischen Kohlenwasserstoffe waren mit rund 2mg/Nm<sup>3</sup> sehr niedrig.

Der elektrische Wirkungsgrad lag bei knapp über 28% (Klemme zu Hu)

### 3.3 Zusatzmessungen

Die Zusatzmessungen zur Bestimmung von Formaldehyd, Ammoniak und Methan wurden aufgrund des höheren Aufwandes und längeren Vorbereitungsaufwandes während des Versuchsstages durchgeführt und nicht direkt in Phase 1 oder Phase 2. Da allerdings immer ein stationärer Betrieb herrschte können die Ergebnisse miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Es wurden jeweils zwei Waschflaschenmessungen je Parameter (Formaldehyd, Ammoniak) durchgeführt.

Die Mittelwerte der Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Parameter	Wert	Einheit
Formaldehyd	<0,5	mg/Nm <sup>3</sup> , bez. 5% O <sub>2</sub>
Ammoniak	<1,5	mg/Nm <sup>3</sup> , bez. 5% O <sub>2</sub>
Methan	≤0,003	Vol.%

Der Messwert der Formaldehydmessung lag unterhalb des Messbereiches von 0,5 mg/Nm<sup>3</sup> (bez. auf 5% O<sub>2</sub>). Der Ammoniakwert lag unter 1,5 mg/Nm<sup>3</sup> (bez. auf 5% O<sub>2</sub>). Der Methangehalt im Abgas lag ebenfalls unterhalb des Messbereichs von 0,003 Vol%.

### 3.4 Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass der Stirlingmotor des Typs G600i mit der Seriennummer 101 für einen Schwachgasbetrieb mit Biogas geeignet ist. Es wurden elektrische Wirkungsgrade (Generator-Klemme zu unterem Heizwert) von über 28% erreicht. Die Kohlenmonoxidemissionen von rund 130 mg/Nm<sup>3</sup> (bez. auf 5% O<sub>2</sub>) sowie die Stickoxidemissionen von rund 260 mg/Nm<sup>3</sup> (bez. auf 5% O<sub>2</sub>) beim gewählten Restsauerstoffgehalt im Abgas von 7,7% lagen unter den geltenden Grenzwerten für Blockheizkraftwerke in Österreich bzw. Verbrennungsmotoren in Deutschland.

Bei der Zusatzmessung der gasförmigen Emissionen konnten sehr niedrige Werte erreicht werden. Die organischen Kohlenwasserstoffe lagen bei rund 2 mg/Nm<sup>3</sup>. Die Methanemissionen mit ≤0,003 Vol% und die Formaldehydemissionen mit <0,5 mg/Nm<sup>3</sup> lagen beide unterhalb des Messbereichs. Die Ammoniakemissionen waren mit <1,5 mg/Nm<sup>3</sup> ebenfalls sehr niedrig. Alle Emissionswerte in mg/Nm<sup>3</sup> wurden auf 5% Restsauerstoffgehalt bezogen.

Die elektrische Leistung lag konstant bei über 6 kW Klemmenleistung.