

Harald Stressler

Stefan Aigenbauer

Messbericht Schwachgasversuch Betrieb eines Stirlingmotors mit Klärgas

Datum 19. September 2019

Nummer 915 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 - 30. September 2019

Mit Unterstützung von der österreichischen Forschungsförderungs-
gesellschaft (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

1	Einleitung	4
1.1	Emissionsgrenzwerte von Blockheizkraftwerken	5
2	Material und Methode	7
2.1	Motor	7
2.2	Versuchsdurchführung	8
2.3	Auswertungsmethode	10
3	Auswertung und Diskussion	11
3.1	Heiz- und Brennwert	11
3.2	Betriebspunkt 1: 6,9% O ₂	11
3.3	Betriebspunkt 2: 5,5% O ₂	12
3.4	Ermittlung einer charakteristischen Kennkurve	12
3.5	Fazit	14

1 Einleitung

Dieser Messbericht beschreibt die Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse an einem Stirlingmotor, betrieben mit Klärgas (Schwachgas) im Klärwerk Schärding. Das Stirling-Blockheizkraftwerk wurde über 4 Wochen vom 15. Juli 2019 bis zum 13. August 2019 betrieben. Das BHKW ist mobil auf einen Trailer installiert. Der Klärgasanschluss, der Stromanschluss und der Heizungsanschluss (Vor- und Rücklaufleitung) erfolgte mittels Schlauch- und Kabelverbindungen zwischen Trailer und Kläranlage. In Abbildung 1 ist der installierte Trailer beim Klärwerk abgebildet.



Abbildung 1: Installierter Trailer beim Klärwerk in Schärding

Der in diesem Bericht beschriebene Versuch wurde am 23.07.2019 beim Reinhaltverband Schärding und Umgebung in der Passauerstraße 33 in 4780 Schärding 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 Klärgas 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 VG¹ 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 ³]	NOx [mg/m ³]	NMHC [mg/m ³]
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/Nm³, 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 Luft² sind in Tabelle 2 dargestellt.

Verordnung	Brennstoff	Brennstoff-wärmeleistung	CO [mg/m ³]	NOx [mg/m ³]	CH ₂ O [mg/m ³]
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

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

²Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit;
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 Stickoxiden (NO_x) für Zündstrahlmotoren in Deutschland für Biogas und Klärgas bei 1000mg/Nm³, bezogen auf 5% Restsauerstoff. Die Grenzwerte für Stickoxide liegen bei 500mg/Nm³ für Magergasmotoren und andere 4-Takt Otto Motoren. Der Formaldehydgrenzwert (CH₂O) liegt bei 60mg/Nm³.

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.

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 Stirlingmotorentwicklung 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.“³

Der vermessene Motor des Typs G600i hat folgende Spezifikationen:

- 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.

³ 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 Klärgas als Brennstoff betrieben. Ziel war es, die Funktionstüchtigkeit bzw. die technischen Spezifikationen bei einem sogenannten „Schwachgasbetrieb“ zu ermitteln. Der Anschluss an das Klärgas wurde von der Kläranlage in Schärding zur Verfügung gestellt. Die Zusammensetzung des Klärgases wurde nicht beeinflusst. Es wurden während des Versuchstages mehrerer Proben vom Klärgas für die Analyse im Labor bei BIOENERGY 2020+ GmbH gezogen.

Die Maschine wurde nach dem Restsauerstoffgehalt im Abgas geregelt. Dieser wird über eine Lambdasonde im feuchten Abgas gemessen. Durch die Variation der Verbrennungsluft kann der Restsauerstoffgehalt im Abgas verändert werden. Dies führt zu einer direkten Auswirkung auf die Emissionen sowie auf den Wirkungsgrad. Durch die Ermittlung von zwei verschiedenen Betriebspunkten soll die Auswirkung des Sauerstoffs auf die Leistung und auf die Emissionen analysiert werden.

Zusätzlich zur Messung mit einer Lambdasonde im feuchten Abgas wurden auch die Emissionen über ein 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.

Um niedrige Rücklauftemperaturen für den Betrieb des Stirlingmotors sicherzustellen, wurde zusätzlich zur Wärmesenke im Klärwerk ein Luft/Wasserwärmetauscher, welcher am Trailer aufgebaut ist, in Betrieb genommen. Die Rücklauftemperatur für die Beheizung des Fermenters (Wärmesenke im Klärwerk Schärding) wäre für einen effizienten Betrieb des Stirlingmotors zu hoch.

Der Auswertzeitraum der jeweiligen zwei Phasen betrug eine Stunde im stationären Betrieb. Der erste Betriebspunkt wurde bei einem Restsauerstoffwert im Abgas von 6,9% durchgeführt. Der zweite Betriebspunkt wurde bei einem Restsauerstoffwert im Abgas von 5,5% durchgeführt. Während des ersten Betriebspunktes wurde eine 15-minütige Staubmessung mit dem Wöhler SM500 durchgeführt.

Nach der stationären Messung wurde eine Messung im instationären Betrieb durchgeführt. Hierzu wurde der Sauerstoffwert im Minutentakt verändert um charakteristische Kurven der Emissionswerte und der elektrischen Leistungen in Bezug auf den Restsauerstoffgehalt im Abgas sowie der Prozessgastemperatur zu erhalten.

2.3 Auswertungsmethode

Für die Ermittlung der unterschiedlichen Leistungen und Wirkungsgrade ist die Bestimmung des Heiz- und Brennwertes des Klärgases entscheidend. Die Proben für die Bestimmung der Klärgas-Hauptbestandteile wurden direkt vor der Gasuhr im Anhänger gezogen. Es wurden Gasbeutel mit einem Inhalt von etwa 4 Liter verwendet. Die gezogenen Proben wurden im Labor bei BIOENERGY 2020+ GmbH analysiert. Die Ergebnisse der Gaszusammensetzung sind in Tabelle 3 dargestellt.

Probe	Datum	Uhrzeit	Megne [l]	O2 [%]	N2 [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	H2S [%]	Summe [%]
1	23.07.2019	10:22	4	0,5	1,6	60,5	38,3	0,1	100,9
2	23.07.2019	10:25	4	0,1	0,3	61,6	39,0	0,1	100,9
3	23.07.2019	15:52	4	0,1	0,5	62,1	39,0	0,1	101,8
4	23.07.2019	15:55	4	0,1	0,3	61,3	39,1	0,1	100,9
Mittelwert (Probe 2-4)				0,1	0,4	61,7	39,0	0,1	101,2
Mittelwert bezogen auf 100% (Probe 2-4)				0,1	0,4	60,9	38,6	0,1	100,0

Tabelle 3: Gaszusammensetzung der Klärgasproben sowie Berechnung eines Mittelwertes

Da die Summe durch Messtoleranzen über 100% liegt, wurden die Mittelwerte auf 100% bezogen. Der hohe O₂-Gehalt in Messprobe 1 scheint durch die Probennahme in die Probe gekommen zu sein, da dieser Wert stark von den anderen Proben abweicht. Deshalb wurden die Proben 2-4 für die Bestimmung des unteren und oberen Heizwertes im Labor verwendet.

Während des Versuchstages lag somit die Methankonzentrationen zwischen 61,3 und 62,1%. Die Kohlenstoffdioxidkonzentration lag zwischen 39,0 und 39,1%.

Aufgrund der langen Zuleitung und der nachgeschalteten Gasregelstrecke im Trailer wird davon ausgegangen, dass das Rohgas beim Eintritt in den Brenner entfeuchtet war.

Die Gesamtauswertung der zwei Betriebsphasen erfolgte für folgende Parameter:

- Klemmenleistung Generator
- Unterer Heizwert des Brennstoffes je m³
- Oberer Heizwert (Brennwert) des Brennstoffes je m³
- Wirkungsgrade (Klemmenleistung und Gesamtleistung bezogen auf Hu und Ho)
- Gasmenge und Gasleistung
- Emissionen (CO und NO_x bezogen auf 5% Restsauerstoffgehalt lt. Grenzwert)

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 CH₄ und H₂S, bezogen auf 100%, für die Berechnung herangezogen. Daraus ergibt sich folgende Brennstoffspezifikation:

- Hu: 6,08 kWh/Nm³
- Ho: 6,74 kWh/Nm³

3.2 Betriebspunkt 1: 6,9% O₂

Die Mittelwerte des stationären Versuches am 23.07.2019 von 10:30 bis 11:30 mit dem Restsauerstoffgehalt von 6,9% O₂ im trockenen Abgas sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Parameter	Wert	Einheit
Stündliche Gasmenge*	3,22	m ³
Leistung Gasbrenner bez. auf Hu	19,55	kW
Leistung Gasbrenner bez. auf Ho	21,69	kW
elektrische Leistung (Generator-Klemme)	6,04	kW
Gesamtkühlleistung	10,59	kW
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Hu)	30,9	%
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Ho)	27,9	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Hu	85,1	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Ho	76,7	%
CO	224	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂
NO _x	391	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂

*bezogen auf Standarddruck und Standardtemperatur

Der Motorwirkungsgrad wurde aus dem Verhältnis von Gesamtkühlleistung und elektrische Leistung zum jeweiligen Heizwert bezogen.

Die 15-minütige Staubmessung während des ersten Betriebspunktes ergab einen Gesamtstaubwert von 8 mg/Nm³, bezogen auf 5% O₂.

3.3 Betriebspunkt 2: 5,5% O₂

Die Mittelwerte des stationären Versuches am 23.07.2019 von 12:15 bis 13:15 mit dem Restsauerstoffgehalt von 5,5% O₂ im trockenen Abgas sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Parameter	Wert	Einheit
Stündliche Gasmenge*	3,21	m ³
Leistung Gasbrenner bez. auf Hu	19,49	kW
Leistung Gasbrenner bez. auf Ho	21,62	kW
elektrische Leistung (Klemme)	6,06	kW
Gesamtkühlleistung	10,67	kW
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Hu)	31,1	%
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Ho)	28,0	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Hu	85,9	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Ho	77,4	%
CO	306	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂
NO _x	497	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂

Der Motorwirkungsgrad wurde aus dem Verhältnis von Gesamtkühlleistung und elektrischer Leistung zum jeweiligen Heizwert bezogen.

3.4 Ermittlung einer charakteristischen Kennkurve

Während der instationären Messphase wurden Kennkurven ermittelt, welche den Zusammenhang von Kohlenmonoxid, Stickoxid und der elektrischen Leistung mit dem Restsauerstoffgehalt sowie der Prozessgastemperatur darstellen. In Abbildung 3 sind die Kurven der Emissionen in Bezug auf den Restsauerstoffgehalt aus dieser Messphase dargestellt. Die im Sekundenabstand gemessenen Emissionswerte wurden auf die Einheit mg/Nm³, bezogen auf 5% Restsauerstoff, umgerechnet. Es ist ersichtlich, dass sowohl die Kohlenmonoxidemissionen sowie die Stickoxidemissionen mit steigendem Restsauerstoffgehalt abnehmen.

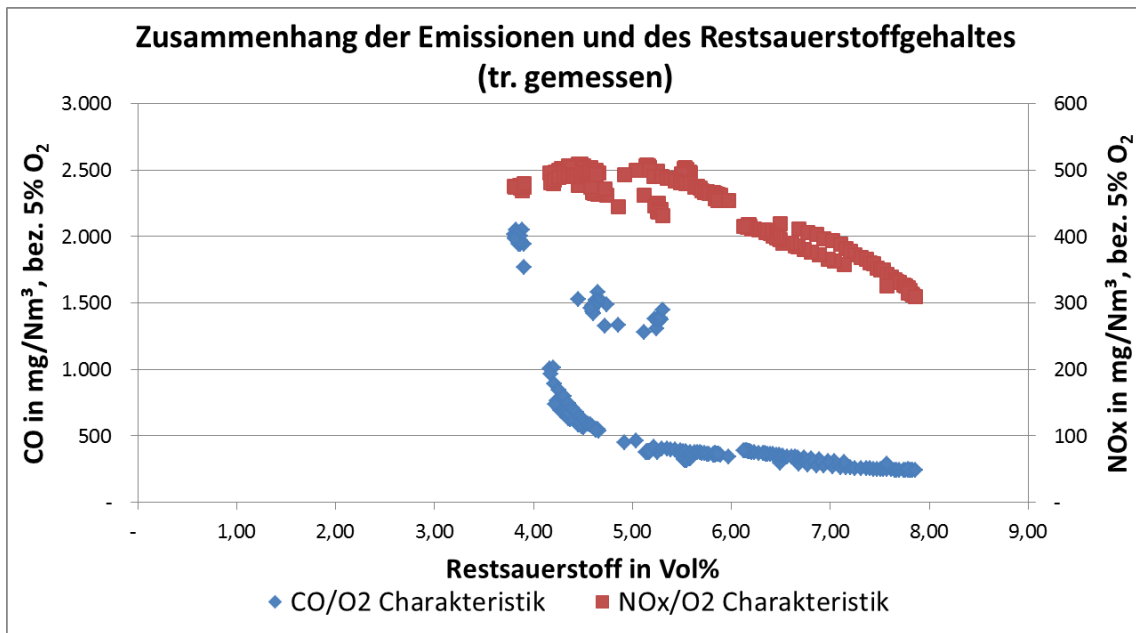


Abbildung 3: Zusammenhang der Emissionen und des Restsauerstoffgehaltes

In Abbildung 4 ist der Zusammenhang der Prozessgastemperatur mit der elektrischen Leistung dargestellt. Es ist ersichtlich, dass bei steigender Prozessgastemperatur auch die elektrische Leistung steigt. Zusätzlich zu dieser Kennkurve wurden auch noch zwei weitere Kennkurven hinzugefügt um die Ursache für die Änderung der Prozessgastemperatur darzustellen. Bei höherem Restsauerstoffgehalt durch Anhebung der Zuluftmenge (ersichtlich in der Zuluftgeschwindigkeit v) wird die Prozessgastemperatur gesenkt.

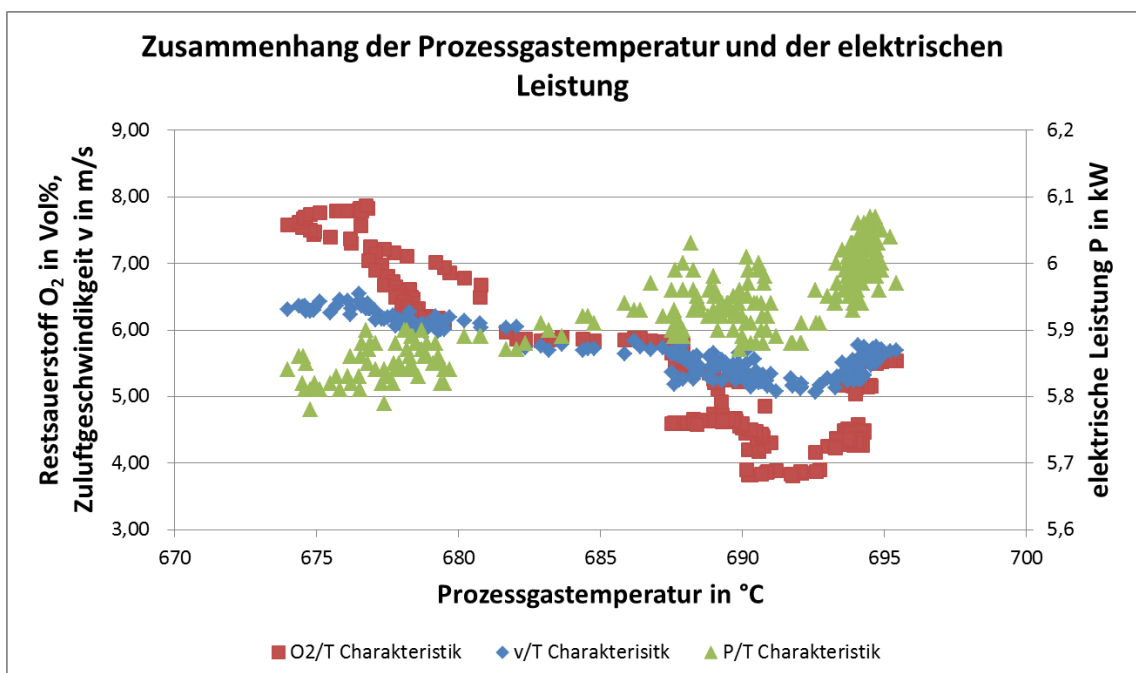


Abbildung 4: Zusammenhang der Prozessgastemperatur und der elektrischen Leistung

3.5 Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass der Stirlingmotor des Typs G600i für einen Schwachgasbetrieb mit Klärgas geeignet ist. Es wurden elektrische Wirkungsgrade (Generator-Klemme zu unterem Heizwert) von über 30% erreicht. Die Emissionswerte sind von den Verbrennungsbedingungen (Restsauerstoffgehalt) abhängig. Bei einem zu niedrigem Restsauerstoffgehalt im Abgas bewegt sich der Stickoxid-Grenzwert nahe an den Grenzwert der TA Luft für Magergasmotoren bzw. andere 4-Takt Otto Motoren (als normale Fremdzündungsmotoren) beim Betrieb mit Klär- und Biogas. Bei entsprechender Justierung werden die geltenden Grenzwerte für Blockheizkraftwerke in Österreich bzw. Verbrennungsmotoren in Deutschland eingehalten.

Die elektrische Leistung lag konstant bei über 6 kW Klemmenleistung.