

Harald Stressler

Stefan Aigenbauer

Messbericht Schwachgasversuch

Betrieb eines Stirlingmotors mit
Deponiegas

Datum 28. Februar 2020

Nummer 927 TR N101340

Projektleitung **Stefan Aigenbauer**
stefan.aigenbauer@best-research.eu

Mitarbeit **Harald Stressler**
harald.stressler@best-research.eu

Firmenpartner **Frauscher Thermal Motors GmbH**



Projektnummer N101340 Schwachgas BHKW 3

Projektlaufzeit 01. Oktober 2018 - 01. Jänner 2020

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



BEST - Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

office@best-research.eu
www.best-research.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	9
3	Auswertung und Diskussion	11
3.1	Heiz- und Brennwert	11
3.2	Auswertephasen	11
3.3	Fazit	12

1 Einleitung

Dieser Messbericht beschreibt die Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse an einem Stirlingmotor, der mit Deponiegas (Schwachgas) an der Mülldeponieanlage in Ort im Innkreis¹ am 5. Februar 2020 betrieben wurde. Die gesamte Feldmessung mit Stirlingmotoren von Frauscher Thermal Motors erfolgte über vier Wochen vom 8. Jänner 2020 bis zum 5. Februar 2020 bei der Mülldeponie. Das Stirling-BHKW ist mobil auf einem Trailer installiert worden. Der Deponiegasanschluss sowie der Stromanschluss erfolgten mittels Schlauch- und Kabelverbindungen zwischen Trailer und einem nahegelegenen Technikcontainer. Im Container ist für den Normalbetrieb eine Gasdrucksteigerungsanlage installiert, die das Gas für die weitere Verbrennung in einem Gasmotor verdichtet. Diese Gasdrucksteigerungsanlage war aber während des Versuchsbetriebes mit dem Stirling-BHKW nicht in Betrieb. Die Deponiegasversorgung erfolgte direkt vom Gasspeicher. Für den Versuchsbetrieb wurde die Abwärme des Stirlingmotors über einen am Trailer fix installierten Rückkühler an die Umgebung abgegeben. In Abbildung 1 ist der installierte Trailer neben dem Gastank der Deponie abgebildet.



Abbildung 1: Trailer von Frauscher Thermal Motors vor dem Deponiegasspeicher in Ort im Innkreis

¹ Müllverwertungs- und Mülldeponiebetriebs GesmbH; Aichberg 4; 4974 Ort im Innkreis

Der in diesem Bericht beschriebene Versuch wurde am 05.02.2020 bei der Müllverwertungs- und Mülldeponiebetriebs GesmbH in Aichberg 4 in 4974 Ort im Innkreis 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 Deponiegas 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 VG² 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 ³ [mg/m ³]
Art. 15aB VG, 2013	Erdgas, Flüssiggas	bis 2,5 MW	200	250	150
Art. 15aB VG, 2013	Klärgas, Biogas, 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-, Bio-, Holz-, und Deponiegas jeweils bei 1000 mg/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 Luft⁴ sind in Tabelle 2 dargestellt.

²Quelle: Rechtsinformationssystem des Bundes
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrSbg&Gesetzesnummer=20000826>

³ NMHC = Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe

⁴ Quelle: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit;
https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Luft/taluft.pdf

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

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, liegen die Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) für Fremdzündungsmotoren und für Stickoxide (NOx) für Zündstrahlmotoren in Deutschland für Biogas und Klärgas bei 1000 mg/Nm³, bezogen auf 5% Restsauerstoff. Die Grenzwerte für Stickoxide für Magergasmotoren und andere 4-Takt Otto Motoren liegen bei 500 mg/Nm³. Der Formaldehydgrenzwert (CH₂O) liegt bei 60mg/Nm³.

Der Betrieb von Blockheizkraftwerken bis 1 MW Feuerungswärmeleistung 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 diese Grenzwerte orientieren.⁵

⁵ 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.“⁶

Der am 5. Februar vermessene Motor des Typ G600i hat folgende Spezifikationen:

- Seriennummer: 100
- Hubraum: 600ccm
- Generator ist im Pufferraum integriert

Der Versuchsaufbau mit Stirlingmotor, Schwachgasbrenner, Luftvorwärmer, Generator und Wärmeabnahme wurde gemeinsam mit dem Messaufbau in einem Trailer realisiert. Dieser Trailer ist in Abbildung 2 dargestellt. Da der Vordruck des Deponiegases in der Versorgungsleitung zu gering war, wurde ein Seitenkanalverdichter zur Drucksteigerung des Deponiegases eingesetzt. Der gelbe Seitenkanalverdichter ist ebenfalls in Abbildung 2 ersichtlich.

⁶ Frauscher Thermal Motors GmbH, Quelle: <https://www.frauscher-motors.com/prototypen/alphagamma@-motoren.html>



Abbildung 2: Messaufbau inkl. Stirling-BHKW im Trailer

2.2 Versuchsdurchführung

Der Frascher alphagamma® Stirling G600i wurde mit Deponiegas als Brennstoff betrieben. Ziel war es, die Funktionstüchtigkeit bzw. die technischen Spezifikationen bei einem sogenannten „Schwachgasbetrieb“ zu ermitteln. Der Anschluss an die Deponiegasversorgung wurde von der Deponieanlage in Ort im Innkreis zur Verfügung gestellt. Die Zusammensetzung des Deponiegases wurde nicht beeinflusst. Es wurden während des Versuchstages mehrere Proben vom Deponiegas für die Analyse im Labor bei BEST GmbH gezogen. Der verwendete Gaschromatograph war vom Typ Agilent 490 Mirco GC (verwendete Säule: Molsieve 5A).

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 auch die organischen Gesamtkohlenwasserstoffe mit einem Flammenionisationsdetektor des Types M&A Thermo FID bestimmt. Eine Bestimmung des Methangehaltes im Abgas erfolgte durch Gasproben, welche dem Abgas entnommen wurden

und im Labor in Graz bei BEST GmbH ermittelt wurden. Der verwendete Gaschromatograph war der Typ Agilent 490 Micro GC (verwendete Säule: Molsieve 5A).

Auf die Zusatzmessung von Formaldehyd und Ammoniak, welche bei der Biogasanlage⁷ in Utzenaich durchgeführt wurden, wurde bei diesem Versuchsbetrieb verzichtet. Da die Verbrennungsbedingungen des Stirlingmotor-BHKWs, unabhängig vom verwendeten Schwachgas, kontinuierlich sind, kann davon ausgegangen werden, dass auch mit Deponiegas ähnlich niedrige Werte wie an der Biogasanlage erreicht werden können. Die Werte bei der Biogasanlage lagen für Formaldehyd unterhalb des Messbereiches von 0,5 mg/Nm³ (bez. auf 5% O₂) und für Ammoniak unter 1,5 mg/Nm³ (bez. auf 5% O₂). Niedrigste Formaldehydwerte im Abgas aufgrund der kontinuierlichen Verbrennung bei Stirlingmotoren-BHKW wird auch in dem Forschungsbericht FZKA-BWPLUS auf Seite 164 der Hochschule Reutlingen durch eine Messung des LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) bestätigt. Zitat aus dem Forschungsbericht FZKA-BWPLUS⁸ auf Seite 98: *„Die konstante Flamme im Stirlingmotor verbrennt das Klärgas kontinuierlich. Dies kann eine Erklärung dafür sein, dass keine Belastung mit Formaldehyd oder anderen Aldehyden auftritt, da diese Stoffe Zwischenprodukte der Verbrennung sind.“*

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

Der Motor wurde während dem Versuchstag konstant auf einen definierten Restsauerstoffwert im Abgas zwischen 6% und 8% geregelt. Es wurden zwei Phasen mit je einer halben Stunde im stationären Betrieb ausgewertet. Im Anschluss der zweiten Betriebsphase wurde eine 15-minütige Staubmessung mit dem Wöhler SM500 durchgeführt.

2.3 Auswertungsmethode

Für die Ermittlung der unterschiedlichen Leistungen und Wirkungsgrade des Stirling-BHKWs ist die Bestimmung des Heiz- und Brennwertes des Deponiegases entscheidend. Die Proben für die Bestimmung der Deponiegas-Hauptbestandteile wurden direkt von der Deponiegas-Versorgungsleitung im Anhänger gezogen. Es wurden zwei Proben am Tag des Versuches (05.02.2020) in Gasbeuteln mit einem Inhalt von etwa 3 Liter entnommen. Diese Proben wurden im Labor bei BEST GmbH analysiert. Die Ergebnisse der trockenen Gaszusammensetzung sind in Tabelle 3 dargestellt.

⁷ Messbericht Schwachgasversuch, Betrieb eines Stirlingmotors mit Biogas vom 14.10.2019: https://www.frauscher-motors.com/wp-content/uploads/2019/10/N101340_Biogasversuche_20191002.pdf

⁸ Bernd T., etal; Forschungsbericht FZKA-BWPLUS: Gekoppelte Produktion von Kraft und Wärme aus Bio-, Klär- und Deponiegas in kleinen, dezentralen Stirling-Motor Blockheizkraftwerken; Förderkennzeichen: BWK 25008 – 25010; Hochschule Reutlingen; März 2009

Probe	Datum	Uhrzeit	Menge [l]	O2 [%]	N2 [%]	CH4 [%]	CO2 [%]	Summe [%]
1	05.02.2020	12:25	3	0,5	23,4	55,1	20,9	100,0
2	05.02.2020	14:10	3	0,8	23,7	55,4	20,1	100,0
Mittelwert				0,7	23,6	55,3	20,5	100,0

Tabelle 3: trockene Gaszusammensetzung der Deponiegasproben sowie Berechnung eines Mittelwertes (die Analysenwerte wurden auf die Summe von 100% hochgerechnet)

Die Bestimmung des oberen und unteren Heizwertes erfolgte nach den Analysedaten im trockenen Zustand entsprechend Tabelle 3.

Die Gesamtauswertung der zwei Auswertephasen 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, NO_x, orgC, auf 5% Restsauerstoffgehalt lt. Grenzwert
 - CH₄ in Vol%

3 Auswertung und Diskussion

3.1 Heiz- und Brennwert

Anhand der Gaszusammensetzung in Tabelle 3 wurde der Heiz- und Brennwert des Deponiegases bestimmt. Es wurden die Mittelwerte von CH₄, H₂ und H₂S, bezogen auf 100%, für die Berechnung herangezogen. Daraus ergeben sich folgende Brennstoffspezifikationen:

- Hu: 5,52 kWh/Nm³
- Ho: 6,12 kWh/Nm³

3.2 Auswertephasen

Die Mittelwerte des stationären Versuches am 05.02.2020 von Phase 1 (11:55 bis 12:25) und Phase 2 (13:40 – 14:10) sind in nachfolgender Tabelle 4 dargestellt:

Parameter	Phase 1	Phase 2	Einheit
Restsauerstoffgehalt	6,7	7,3	Vol.%
Stündliche Gasmenge*	3,82	3,99	m ³ /h
Leistung Gasbrenner bez. auf Hu	21,09	22,01	kW
Leistung Gasbrenner bez. auf Ho	23,38	24,40	kW
elektrische Leistung (Generator-Klemme)	6,32	6,60	kW
Gesamtkühlleistung	8,82	8,89	kW
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Hu)	30,0	29,9	%
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Ho)	27,0	27,0	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Hu	71,8	70,3	%
Motorwirkungsgrad bez. auf Ho	64,8	63,4	%
CO	310	224	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂
NO _x	270	287	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂
orgC	~2	~4	mg/Nm ³ , bez. 5% O ₂

*bezogen auf Standarddruck und Standardtemperatur

Tabelle 4: Versuchsauswertung

Die 15-minütige Staubmessung nach dem zweiten Betriebspunkt mit dem Wöhler SM500 ergab einen Gesamtstaubwert von 9 mg/Nm³, bezogen auf 5% O₂.

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

Die Messungen zeigen, dass die Kohlenmonoxid-Emissionen bei 310 mg/Nm^3 und die Stickoxidemissionen bei 270 mg/Nm^3 für Phase 1 lagen. Die organischen Kohlenwasserstoffe waren mit rund 2 mg/Nm^3 sehr niedrig.

In Phase 2 lagen die die Kohlenmonoxid-Emissionen bei 224 mg/Nm^3 und die Stickoxidemissionen bei 287 mg/Nm^3 . Die organischen Kohlenwasserstoffe waren mit rund 4 mg/Nm^3 ebenfalls sehr niedrig.

Der Methangehalt im Abgas lag sowohl für Phase 1, als auch für Phase 2 unterhalb des Messbereichs des Gaschromatographen und konnte aufgrund der niedrigen Konzentration nicht erfasst werden.

Der elektrische Wirkungsgrad lag bei rund 30% (Klemmenleistung zu Hu).

3.3 Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass der Stirlingmotor des Typs G600i mit der Seriennummer 100 für einen Schwachgasbetrieb mit Deponiegas geeignet ist. Es wurden elektrische Wirkungsgrade (Generator-Klemmenleistung zu unterem Heizwert) von 30% erreicht. Die Kohlenmonoxid-Emissionen lagen bei rund 310 mg/Nm^3 in Phase 1 und bei 220 mg/Nm^3 in Phase 2 (bez. auf 5% O_2). Die Stickoxidemissionen bei rund 270 bzw. 290 mg/Nm^3 (bez. auf 5% O_2). Die Emissionen unterschreiten somit die geltenden Grenzwerte für Blockheizkraftwerke in Österreich bzw. Verbrennungsmotoren in Deutschland.

Die Staubemission in Phase 2 betrug knapp 9 mg/Nm^3 (bez. auf 5% O_2).

Bei der Zusatzmessung der gasförmigen Emissionen konnten sehr niedrige Werte erreicht werden. Die organischen Kohlenwasserstoffe lagen unter 5 mg/Nm^3 . Der Methangehalt im Abgas lag sowohl für Phase 1, als auch für Phase 2 unterhalb des Messbereichs des Gaschromatographen und konnte aufgrund der niedrigen Konzentration nicht erfasst werden.

Die elektrische Leistung lag konstant bei über $6,3 \text{ kW}$ bzw. $6,6 \text{ kW}$ Klemmenleistung.