

Harald Stressler

Stefan Aigenbauer

Messbericht Schwachgasversuch Simuliertes Magergas im Technikum

Datum 19. September 2019

Nummer 914 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	4
2	Material und Methode	6
2.1	Motor	6
2.2	Versuchsdurchführung	6
2.3	Auswertungsmethode	7
3	Auswertung und Diskussion	9
3.1	Gesamtergebnisse	9
3.2	Emissionen	13
3.3	Fazit	13

1 Einleitung

Dieser Messbericht beschreibt die Versuchsdurchführung sowie die Ergebnisse an einem Stirlingmotor, betrieben mit simuliertem Schwachgas.

Der Versuch wurde an einem Stirlingmotor der Serie alphagamma® G600i im Technikum der Fa. Frauscher Thermal Motors GmbH am 08.08.2019 durchgeführt. Der Stirlingmotor wurde mit synthetischem Schwachgas (mit Stickstoff verdünntem Erdgas) betrieben. Der Erdgasgehalt wurde schrittweise gesenkt, um so bei einem sehr niedrigen Methangehalt im Schwachgas die technischen Spezifikationen des BHKWs zu ermitteln.

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, 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- 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.

¹ Quelle: 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

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

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, liegen die Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO) für Fremdzündungsmotoren und Stickoxiden (NOx) für Zündstrahlmotoren in Deutschland für Biogas und Klärgas bei 1000mg/Nm³, bezogen auf 5% Restsauerstoff. Bei Magergasmotoren und anderen 4-Takt Otto Motoren liegen die Grenzwerte für Stickoxide bei 500mg/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 diesen Grenzwerten orientieren.

2 Material und Methode

2.1 Motor

Der Stirlingmotor G600 nach dem alphagamma® Verfahren ist eine Neuentwicklung der Fa. Frauscher Thermal Motors GmbH und stellt eine Kombination einer Alpha- und einer Gammamaschine dar. Laut dem Unternehmen 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 der Serie alphagamma® G600i hat folgende Spezifikationen:

- Hubraum: 600ccm
- Im Pufferraum integrierter Generator

2.2 Versuchsdurchführung

Der Frauscher alphagamma® Stirlingmotor wurde mit verdünntem Erdgas als Brennstoff betrieben. Zum Erdgas wurde schrittweise Stickstoff als inertes Gas beigemischt, um den Methangehalt im verdünnten Erdgas kontinuierlich zu senken und die Funktionstüchtigkeit bzw. die technischen Spezifikationen bei einem sogenannten „Schwachgasbetrieb“ zu ermitteln.

Es wurden verschiedene Schwachgasstufen simuliert. Vor dem Versuch lief der Motor über Nacht bei konstanten Bedingungen und reinem Erdgasbetrieb durch, um die Schwachgasversuche mit betriebswarmen Motor starten zu können. Am nächsten Morgen wurde ein zehnmütiges Intervall bei reinem Erdgasbetrieb aufgezeichnet. Dieses Intervall dient als Referenzwert zu den nachfolgenden Schwachgasversuchen.

Danach wurde der Motor bei zwei unterschiedlichen Schwachgasmischungen betrieben (21,4% und 17,4% Erdgas). Die Dauer des Messintervalls betrug jeweils 30 Minuten. Vor dem jeweiligen Messintervall wurde der Motor auf konstante Betriebsbedingungen gebracht. Nach der

³ Frauscher Thermal Motors GmbH, Quelle: <https://www.frauscher-motors.com/prototypen/alphagamma@motoren.html>

Einstellung des Schwachgaswertes betrug die Zeit bis zu einem stationären Betrieb bzw. bis sich alle Temperaturen im Motor stabilisiert hatten, etwa eine halbe Stunde.

Nach dem Vermessen der zwei Schachgas-Betriebspunkte wurde der Erdgas-Gehalt weiter gesenkt. Ziel war es den Minimalwert, bei dem der Brenner des Motors noch funktioniert, zu ermitteln. Es wurden nach den zwei stationären Phasen noch insgesamt drei weitere Phasen mit einer Messdauer von je 10 Minuten ermittelt und ausgewertet.

Die Messung der weiteren Betriebspunkte erfolgte ohne das Einstellen stationärer Betriebsphasen. Die Betriebspunkte zeigten jedoch keine hohen Schwankungen bezüglich Temperatur und Druck.

Die Regelung des Motors erfolgte nach dem Sollwert der Prozessgastemperatur im Pufferraum des Stirlingmotors von 700°C. Bei diesem Betriebspunkt bleibt die elektrische Klemmenleistung sehr konstant. Bei der Reduzierung des Erdgasgehaltes stieg der Volumenstrom durch die Zugabe von immer mehr Stickstoff deutlich an, was zu einem höheren Gasvolumenstrom und dadurch höheren Druckverlust im Brenner sowie in der Regelstrecke führte.

2.3 Auswertungsmethode

Es wurden folgende Parameter der einzelnen Intervalle ermittelt:

- Klemmenleitung Generator
- Einspeiseleistung der gesamten Maschine
- Oberer Heizwert des Brennstoffes
- Unterer Heizwert des Brennstoffes
- Wirkungsgrade (Klemmenleistung bzw. eingespeiste Leistung bezogen auf Heiz- und Brennwert)
- Gasmengen
- Emissionen

Als Brennstoff wurde Erdgas aus dem oberösterreichischen Erdgasnetz bezogen. Für die Berechnungen wurde der Mittelwert des unteren Heizwertes (Heizwert) sowie des oberen Heizwertes (Brennwert) der letzten sechs Erdgasanalysen herangezogen. Die Erdgasanalysen werden halbjährlich durchgeführt und von der Netz Oberösterreich GmbH zur Verfügung gestellt. In Tabelle 3 sind die Mittelwerte dieser Analysen dargestellt. Die Mittelwerte umfassen die sechs Analysen vom 11.01.2017 bis zum 02.07.2019.

Parameter	Einheit	Mittelwerte
CO ₂	mol%	0,47
N ₂	mol%	0,53
CH ₄	mol%	95,72
C ₂ H ₆	mol%	2,79
C ₃ H ₈	mol%	0,34
i-C ₄ H ₁₀	mol%	0,06
n-C ₄ H ₁₀	mol%	0,05
i-C ₅ H ₁₂	mol%	0,02
n-C ₅ H ₁₂	mol%	0,01
C ₆ +	mol%	0,03
rel. Dichte		0,58
Wo	kWh/Nm ³	14,81
Brennwert	kWh/Nm ³	11,29
Heizwert	kWh/Nm ³	10,19

Tabelle 3: Mittelwerte der Brennstoffzusammensetzung lt. Netz Oberösterreich GmbH

3 Auswertung und Diskussion

3.1 Gesamtergebnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Versuchsintervalle sind in Tabelle 4 ersichtlich:

Versuchsnummer	-	Referenz	1	2	3	4	5
Maschine	-	G600i	G600i	G600i	G600i	G600i	G600i
Stickstoffmenge	Nm ³ /h	0	8,15	10,95	12,7	13,5	14,5
Erdgasgehalt	Vol%	100,0%	21,4%	17,4%	15,5%	15,1%	14,1%
Datum	dd.mm.yy	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019
Uhrzeit Start	hh:mm:ss	09:05:00	12:16:00	13:43:00	14:37:00	14:55:00	15:20:00
Uhrzeit Stopp	hh:mm:ss	09:19:00	12:46:00	14:13:00	14:47:00	15:05:00	15:30:00
Gasmenge	Nm ³ /h	2,001	2,218	2,314	2,338	2,395	2,388
Leistung Gasbrenner bezogen auf Ho	kW	22,60	25,05	26,13	26,41	27,05	26,97
Leistung Gasbrenner bezogen auf Hu	kW	20,39	22,60	23,58	23,83	24,41	24,33
elektrische Klemmenleistung	kW	6,215	6,238	6,248	6,215	6,330	6,248
Einspeiseleistung	kW	5,832	5,772	5,776	5,727	5,819	5,743
Gesamtkühlleistung	kW	10,67	10,68	10,70	10,68	10,69	10,68
Brennerdruck	Pa	576	1809	2570	3113	3388	3613
Abgastemperatur	°C	153	226	246	257	263	268
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Ho)	%	27,5%	24,9%	23,9%	23,5%	23,4%	23,2%
elektrischer Wirkungsgrad (Klemme zu Hu)	%	30,5%	27,6%	26,5%	26,1%	25,9%	25,7%
elektrischer Wirkungsgrad (Einspeiseleistung zu Ho)	%	25,8%	23,0%	22,1%	21,7%	21,5%	21,3%
elektrischer Wirkungsgrad (Einspeiseleistung zu Hu)	%	28,6%	25,5%	24,5%	24,0%	23,8%	23,6%
Gesamtwirkungsgrad (Kühlleistung + Klemmenl.) bez. auf Ho	%	74,7%	67,5%	64,8%	64,0%	62,9%	62,8%
Gesamtwirkungsgrad (Kühlleistung + Klemmenl.) bez. auf Hu	%	82,8%	74,9%	71,9%	70,9%	69,7%	69,6%
Gesamtwirkungsgrad (Kühlleistung + Einspeisel.) bez. auf Ho	%	73,0%	65,7%	63,0%	62,1%	61,0%	60,9%
Gesamtwirkungsgrad (Kühlleistung + Einspeisel.) bez. auf Hu	%	81,0%	72,8%	69,9%	68,9%	67,6%	67,5%
CO	ppm	571	149	123	119	108	113
NOx	ppm	757	45	26	18	18	14
O ₂	Vol%	6,0	5,8	5,7	5,7	5,7	5,8
CO bez. auf 5% O ₂	mg/Nm ³	762	196	161	156	142	148
NOx bez. auf 5% O ₂	mg/Nm ³	1662	97	57	39	38	30

Tabelle 4: Ergebnisse der unterschiedlichen Versuchsintervalle

Die elektrische Klemmenleistung war bei jedem Versuchsintervall sehr konstant. Der elektrische Wirkungsgrad erreichte im Referenzbetrieb mit Erdgas über 30% (Klemme zu Hu). Beim Schwachgasbetrieb sank dieser Wirkungsgrad um ca. 3 bis 5 Prozentpunkte.

Durch den höheren Volumenstrom bei der Zugabe von Stickstoff wurde der Druckverlust im System deutlich erhöht. Um diesen Druckverlust zu kompensieren musste auch der Druck in der Erdgasleitung erhöht werden. Bei konstant geregelter Temperatur des Pufferraums von 700°C führte dies im Schwachgasbetrieb zu einer etwas höheren Brennerleistung. Bei gleichbleibender elektrischer Klemmenleistung errechnet sich ein niedrigerer elektrischer Wirkungsgrad im Schwachgasbetrieb.

Charakteristische Kennlinien:

Die steigende Brenngasleistung im Schwachgasbetrieb durch Änderung der Druckverhältnisse (wie oben beschrieben), bei gleichbleibender Temperatur des Pufferraums führte zu einem sinkenden elektrischen Wirkungsgrad. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 1 dargestellt.

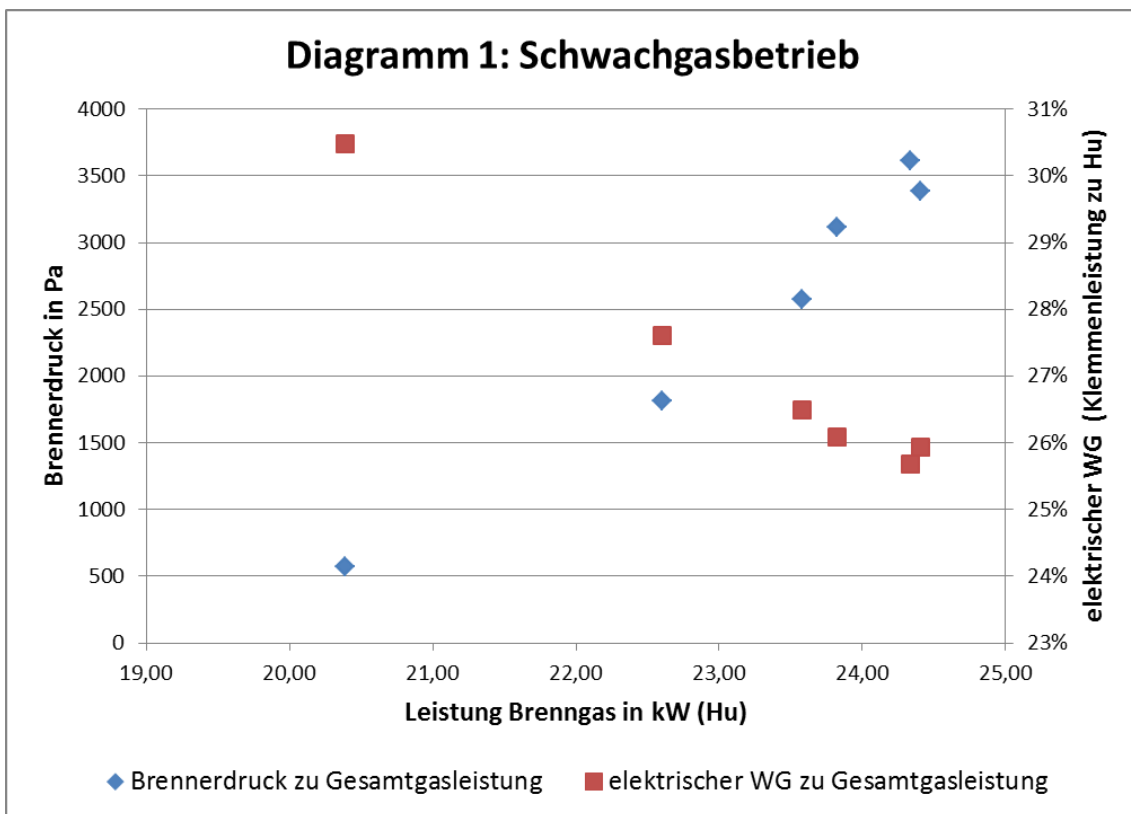


Abbildung 1: Zusammenhang Brennerdruck und elektrischer Wirkungsgrad zur Gesamtleistung

Der Motor wurde immer im selben Betriebspunkt hinsichtlich der Prozesstemperatur (Sollwert=700°C) betrieben. Die Klemmenleistungen der unterschiedlichen Intervalle ist in Abbildung 2 dargestellt.

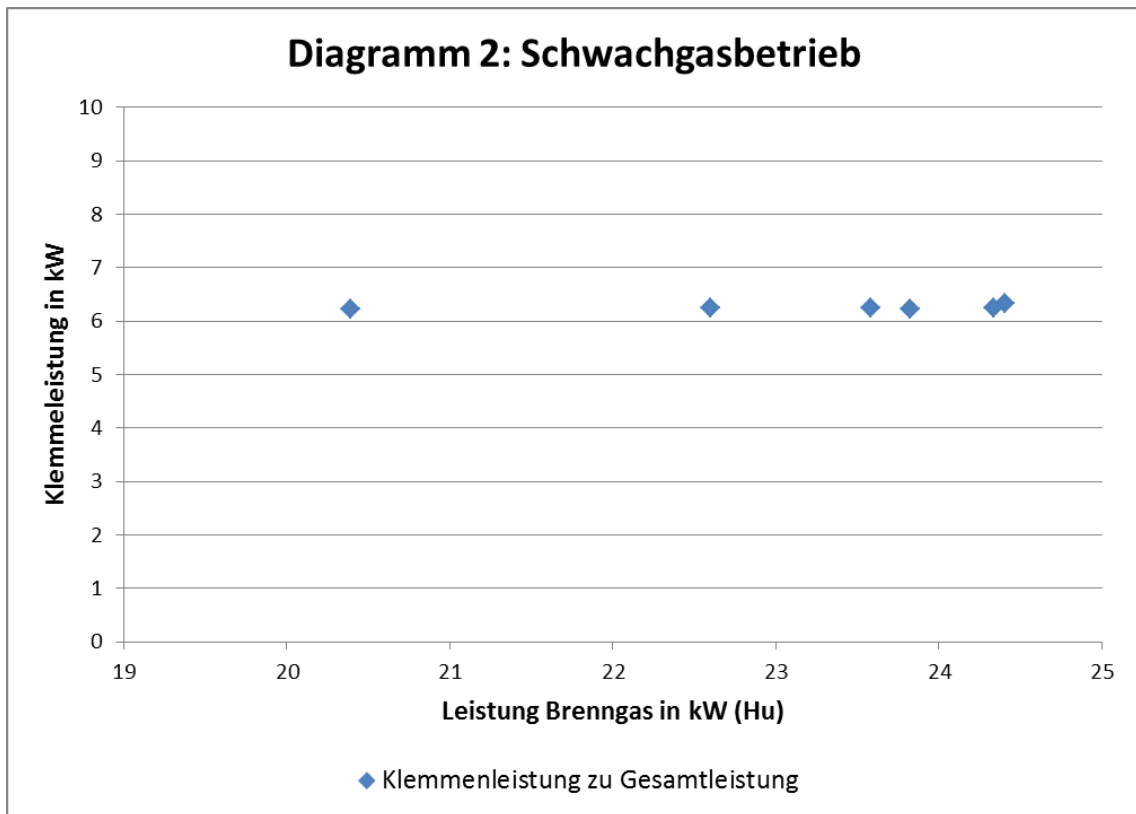


Abbildung 2: Zusammenhang Klemmenleistung zu Gesamtleistung

Der Schwachgasbetrieb konnte bis zu einem Erdgasgehalt von 14,1% im Brenngas durchgeführt werden.

Der elektrische Wirkungsgrad bezogen auf den Erdgasgehalt im Brenngas ist in Abbildung 3 dargestellt. In dieser Abbildung ist ersichtlich, dass der elektrische Wirkungsgrad (Klemmenwirkungsgrad) mit sinkendem Erdgasgehalt etwas abnimmt. Im Schwachgasbetrieb wird mehr Erdgas bzw. eine höhere Brennstoffwärmeleistung benötigt, um die erforderliche Solltemperatur von 700°C im Pufferraum zu erreichen. Durch den höheren Abgasmassenstrom und die höheren Abgastemperaturen werden die Verluste erhöht, was auch eine Verringerung des Gesamtwirkungsgrades zur Folge hat.

In Tabelle 5 sind die Leistungen sowie die unterschiedlichen Verluste der einzelnen Versuche dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Abgasverluste aufgrund des höheren Abgasmassenstromes und der höheren Abgastemperaturen stiegen. Die Abgasleistung stieg vom Erdgasbetrieb mit 1,27kW bis auf 4,57kW beim letzten Schwachgasbetrieb (Erdgasgehalt: 14,1%) an.

Die sonstige Verlustleistung, welche sich aus Verlusten durch Abstrahlung, Wärmeleitung und Konvektion zusammensetzen, blieb bei den Schwachgasversuchen relativ konstant. Diese sonstigen Verlustleistungen lagen zwischen 2,23kW und 3,03kW.

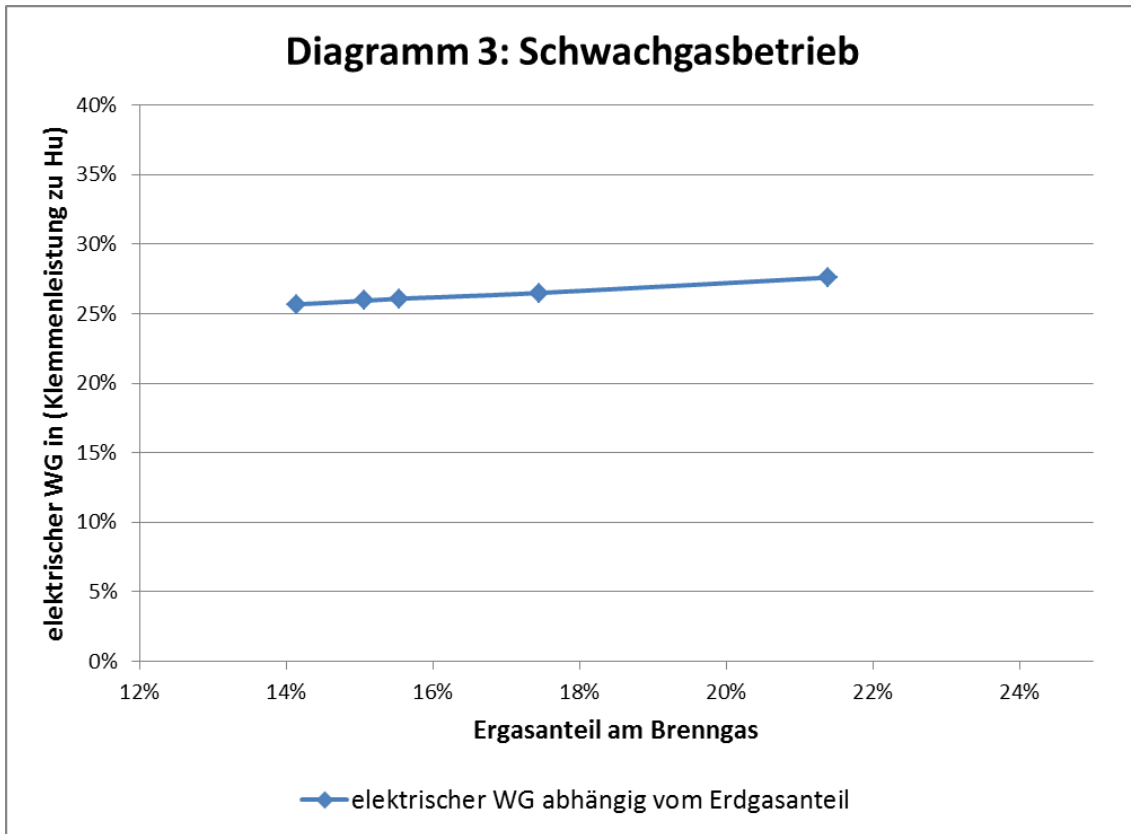


Abbildung 3: Zusammenhang elektrischer Wirkungsgrad zum Erdgasanteil

Versuchsnummer	-	Referenz	1	2	3	4	5
Maschine	-	G600i	G600i	G600i	G600i	G600i	G600i
Stickstoffmenge	Nm ³ /h	0	8,15	10,95	12,7	13,5	14,5
Erdgasgehalt	Vol%	100,0%	21,4%	17,4%	15,5%	15,1%	14,1%
Datum	dd.mm.yy	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019	08.08.2019
Uhrzeit Start	hh:mm:ss	09:05:00	12:16:00	13:43:00	14:37:00	14:55:00	15:20:00
Uhrzeit Stopp	hh:mm:ss	09:19:00	12:46:00	14:13:00	14:47:00	15:05:00	15:30:00
Gasmenge	Nm ³ /h	2,001	2,218	2,314	2,338	2,395	2,388
Leistung Gasbrenner bezogen auf Hu	kW	20,39	22,60	23,58	23,83	24,41	24,33
elektrische Klemmenleistung	kW	6,215	6,238	6,248	6,215	6,330	6,248
Gesamtkühlleistung	kW	10,67	10,68	10,70	10,68	10,69	10,68
Gesamtleistung	kW	16,89	16,92	16,95	16,90	17,02	16,93
Gesamtwirkungsgrad	%	82,84	74,87	71,87	70,92	69,73	69,57
Verluste	kW	3,50	5,68	6,63	6,93	7,39	7,41
Temperatur Abgas	°C	152,82	225,70	246,37	256,84	262,67	268,44
Massenstrom Abgas	kg/h	36,83	54,17	61,03	64,66	67,04	68,72
Abgasverluste	kW	1,27	2,95	3,68	4,10	4,36	4,57
Sonstige Verluste	kW	2,23	2,73	2,95	2,83	3,03	2,84

Tabelle 5: Aufteilung der Verluste der unterschiedlichen Versuche

3.2 Emissionen

Die Kohlenmonoxid- sowie die Stickoxidemissionen sind im Schwachgasbetrieb deutlich unter den Grenzwerten der TA Luft für Verbrennungsmotoren die mit Klärgas oder Biogas betrieben werden, geblieben. Die Emissionen sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Grenzwerte liegen für Kohlenmonoxid bei 1000mg/Nm³ und für Stickoxide bei 500 mg/Nm³, beides bezogen auf 5% Restsauerstoffgehalt.

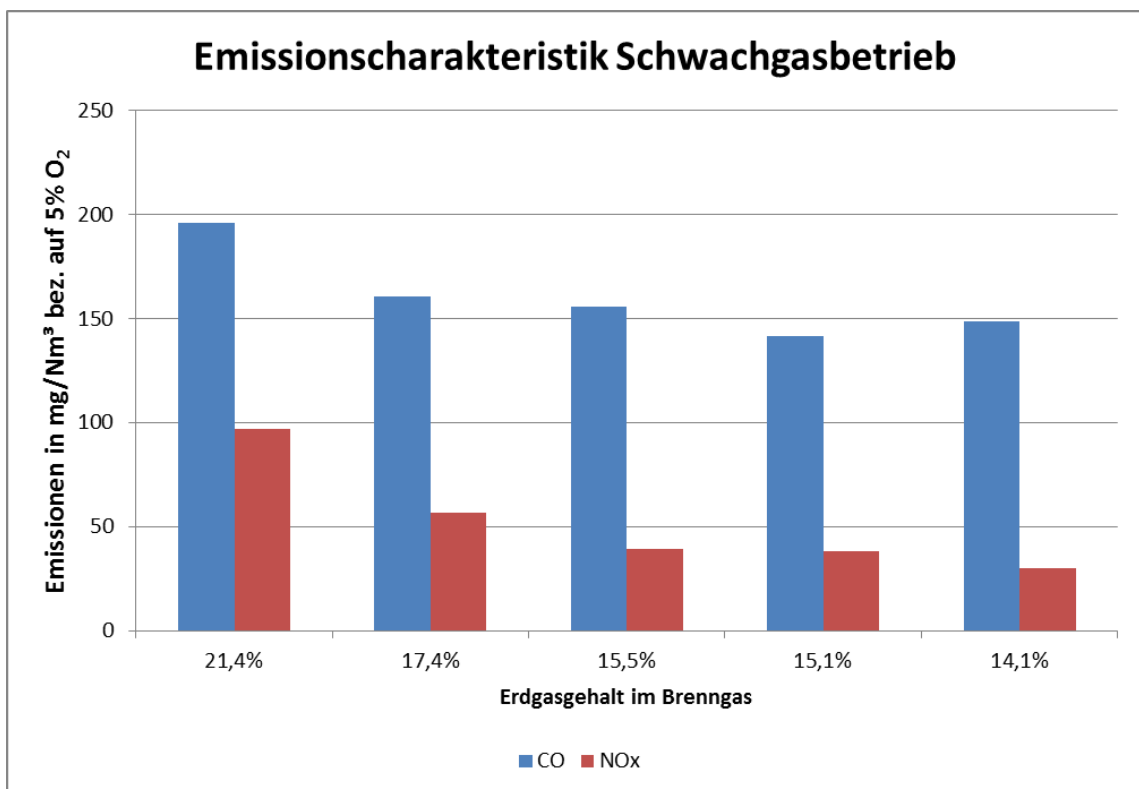


Abbildung 4: Emissionscharakteristik Schwachgasbetrieb

3.3 Fazit

Die Versuche haben gezeigt, dass der Stirlingmotor G600i der Fa. Frauscher Thermal Motors GmbH für den Schwachgasbetrieb mit niedrigstem Erdgasgehalt im betriebswarmen Zustand geeignet ist. In weiteren Versuchen wird auch der Kaltstart mit Schwachgas noch untersucht werden.

Der Erdgasgehalt im Brenngas konnte bis zu einem Wert von 14,1% gesenkt werden. Eine weitere Reduktion des Erdgasgehaltes im Brenngas könnte durch die Verringerung des Druckverlustes bzw. durch ein Verdichten des Brenngases erfolgen (Verdichter in der

Brenngasstrecke). Um den Motor in einem optimalen Betriebspunkt bei weiteren Schwachgasanwendungen zu betreiben, ist eine Aufbereitung des Schwachgases hinsichtlich des erforderlichen Leitungsdruckes erforderlich.

Der Motor erreichte bei reinem Erdgasbetrieb einen elektrischen Wirkungsgrad von über 30% (Klemme zu Hu). Der Wirkungsgrad bei einem Erdgasgehalt von 14,1% sank auf knapp 26%.

Die Emissionen in Hinblick auf die Grenzwerte der §15a Verordnung in Österreich bzw. der TA Luft Verordnung in Deutschland für BHKW-Anlagen bzw. Verbrennungsmotoren wurden eingehalten. Die Emissionswerte im Schwachgasbetrieb lagen zwischen 150 und 200 mg/Nm³ Kohlenmonoxid und 30 und 100 mg/Nm³ für Stickoxide.