



Energetische Effizienz und Emissionen der Biogasverwertung



Abschlussbericht

Simon Juan Tappen Volker Aschmann Mathias Effenberger

Abschlussbericht zum Forschungshaben

Energetische Effizienz und Emissionen der Biogasverwertung

Auftraggeber:	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie 80525 München
Auftragsdatum:	07.05.2012
Förderkennzeichen:	BE/14/14
Projektleitung:	DrIng. Mathias Effenberger
Bearbeiter:	M. Sc. Simon Tappen DiplIng. (FH) Volker Aschmann
Berichtsabschluss:	08.07.2016
Berichtsumfang:	96 Seiten

Inhaltsverzeichnis

		Seite
Zusami	nenfassung	13
1	Einleitung	15
2	Zielsetzung	16
3	Stand der Technik	17
3.1	Technologien zur Stromerzeugung aus Biogas	17
3.1.1	Verbrennungsmotoren und Gasturbinen	17
3.1.2	Technologien zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von Kolbenmotoren	17
3.2	Technologien zur Abgasbehandlung	18
3.2.1	Oxidationskatalysator	18
3.2.2	Thermische Nachverbrennung	19
3.3	Motoreinstellung und Abgasverhalten	20
3.4	Bisherige Arbeiten	23
4	Untersuchungsobjekte	24
4.1	BHKW-Aggregate und Abgastechnologien	24
4.1.1	BHKW 1: 75 kW Gas-Otto-Motor (GOM 75)	25
4.1.2	BHKW 2: 190 kW Gas-Otto-Motor (GOM 190)	26
4.1.3	BHKW 3: 250 kW Gas-Otto-Motor (GOM 250)	27
4.1.4	BHKW 4: 250 kW Gas-Otto-Motor (GOM 250 BR)	
4.1.5	BHKW 5: 360 kW Gas-Otto-Motor (GOM 360)	29
4.1.6	BHKW 6: 530 kW Gas-Otto-Motor (GOM 530)	30
4.1.7	BHKW 7: 549 kW Gas-Otto-Motor (GOM 549)	31
4.1.8	BHKW 8: 265 kW Zündstrahlmotor mit Abgasturbine (ZSM 265)	32
4.1.9	BHKW 9: 30 kW Mikrogasturbine (MGT 30)	
4.1.10	BHKW 10: 65 kW Mikrogasturbine (MGT 65)	34
4.2	Hilfseinrichtungen/Nebenaggregate	35
5	Methodik	37
5.1	Konzeption und Durchführung des Messprogramms	37
5.2	Anwendung der Messinstrumente	
5.3	Auswertung der Messdaten	41
5.3.1	Elektrischer Wirkungsgrad	41
5.3.2	Emissionskonzentrationen	42
5.3.3	Methanschlupf	43

5.3.4	Ermittlung des Lambda-Wertes	.44
6	Ergebnisse	.45
6.1	Messergebnisse für den elektrischen Wirkungsgrad	.45
6.2	Abgaszusammensetzung und Methanschlupf	.47
6.2.1	Emissionen des GOM 75 (ohne Abgasbehandlung)	.47
6.2.2	Emissionen des GOM 190 (ohne Abgasbehandlung)	.49
6.2.3	Emissionen des GOM 250 kW (mit Oxidationskatalysator)	.52
6.2.4	Emissionen des GOM 250 BR (mit Oxidationskatalysator)	.54
6.2.5	Emissionen des GOM 360 (mit Oxidationskatalysator)	.56
6.2.6	Emissionen des GOM 530 (ohne Abgasbehandlung)	.58
6.2.7	Emissionen des GOM 549 (mit thermischer Nachverbrennung)	.60
6.2.8	Emissionen des ZSM 265 (mit Oxidationskatalysator)	.62
6.2.9	Emissionen der MGT 30	.64
6.2.10	Emissionen der MGT 65	.66
6.2.11	Korrelation zwischen Kohlenwasserstoff- und Stickoxid-Konzentrationen im Abgas	.67
6.2.12	Methanschlupf	.69
6.2.13	Anteil von Methan an den Gesamtkohlenwasserstoffen	.70
6.2.14	Start-Stopp-Betrieb	.73
6.3	Untersuchung verschiedener Abgasbehandlungsverfahren	.77
6.3.1	Alterung von Oxidationskatalysatoren	.77
6.3.2	Bewertung der thermischen Nachverbrennung	.79
6.3.3	Vergleich unterschiedlicher Strategien zur Reduzierung der Schadstoffemissionen von Biogas-BHKW	.80
7	Diskussion	.82
7.1	Bewertung der Ergebnisse für die Kolbenmotoren	.82
7.2	Bewertung der Ergebnisse für die Mikrogasturbinen	.84
7.3	Beurteilung der flexiblen Fahrweise von BHKW in der Praxis	.85
7.4	Formaldehyd-Emissionen	.85
7.5	Immissionsschutzrechtliche Rahmenbedingungen für Biogas-BHKW	.85
8	Schlussfolgerungen	.88
9	Ausblick	.89
10	Vorträge und Veröffentlichungen aus dem Projekt	.90
11	Literaturverzeichnis	.95
Anhang		.96

Abbildungsverzeichnis

		0	Seite
Abb.	1:	Illustration der Funktionsweise einer Turbocompound-Turbine (Quelle: Scania Deutschland GmbH)	18
Abb.	2:	Ansicht eines Oxidationskatalysators für Schnell Motoren (Bild: Emission	10
Abb.	3:	Partner GmbH & Co. KG) Schematische Darstellung der thermischen Nachverbrennung CLAIR [®] der Eirma Jenbacher (Bild: GE Jenbacher GmbH & Co. OG)	19
Abb.	4:	Qualitative Darstellung der Abhängigkeit des Konzentrationsniveaus von NO. CO und THC im Abgas eines Verbrennungsmotors in Abhängigkeit	20
	~	vom Lambda-Wert (Luftüberschuss)	21
Abb.	Э :	Betriebspunkten ($\lambda = 1,7$ bzw. 1,85) gemessen an einem Versuchsmotor	
Abb.	6:	mit synthetischem Biogas (Quelle: Prager et al., 2015: S. 92) Ansicht des 75 kW Gas-Otto-Motors vor Ort	22
Abb.	7:	Ansicht des 190 kW Gas-Otto-Motors vor Ort	26
Abb.	8:	Ansicht des 250 kW Gas-Otto-Motors vor Ort	27
Abb.	9:	Ansicht des 250 kW Gas-Otto-Motors (BR) vor Ort	28
Abb.	10:	Ansicht des 360 kW Gas-Otto-Motors vor Ort	29
Abb.	11:	Ansicht des 530 kW Gas-Otto-Motors vor Ort	30
Abb.	12:	Ansicht der Container mit dem 549 kW Gas-Otto-Motor (siehe Teilbild	
		rechts oben) und der thermischen Nachverbrennungseinheit CLAIR®	
		(links oben)	31
Abb.	13:	Ansicht des 265 kW Zündstrahlmotors vor Ort	32
Abb.	14:	Ansicht der 30 kW Mikrogasturbine	33
Abb.	15:	Ansicht der 65 kW Mikrogasturbine vor Ort	34
Abb.	16:	Fließschema des Methan Cutters Model 900 (Bild: J.U.M. Engineering	
		GmbH)	40
Abb.	17:	Skizze zum Messaufbau	40
Abb.	18:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75 unter Voll- und Teillast	47
Abb.	19:	Gemessene NO_x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75 unter Voll und Teillast	18
Abb.	20:	Tatsächlicher Verlauf der Lastkurve (blau; gleitender Mittelwert:	40
Abb.	21:	schwarz) von GOM 75 während der ersten Messung Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75	48
		unter Voll- und Teillast	49
Abb.	22:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190 unter Voll- und Teillast	50
Abb.	23:	Gemessene NO _x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190 unter Voll- und Teillast	51
Abb.	24:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190	
		unter Voll- und Teillast	51
Abb.	25:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Voll- und Teillast	52
Abb.	26:	Gemessene NO _x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Voll- und Teillast	53
Abb.	27:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Voll- und Teillast	55

Abb.	28:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 – GOM 250 BR unter Voll und Teillast	54
Abb.	29:	Gemessene NO _x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 – GOM	94
		250 BR unter Voll- und Teillast	55
Abb.	30:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 - GOM	
	21	250 BR unter Voll- und Teillast	55
ADD.	31:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 – GOM 300 unter Voll- und Teillast	56
Abb.	32:	Gemessene NO_x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 – GOM 360	
		unter Voll- und Teillast	57
Abb.	33:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 - GOM 360	
	24	unter Voll- und Teillast	57
Abb.	34:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 – GOM 530 unter Voll und Teillast	58
Abb.	35:	Gemessene NO_x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 – GOM 530	
11001		unter Voll- und Teillast	59
Abb.	36:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 - GOM 530	
		unter Voll- und Teillast	59
Abb.	37:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549	
		Abgase	60
Abb.	38:	Gemessene NO _x -Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549	00
		unter Voll- und Teillast mit/ohne thermische Nachverbrennung der	
		Abgase	61
Abb.	39:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549	
		unter Voll- und Teillast mit/ohne thermische Nachverbrennung der	62
Abb	$40 \cdot$	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 – ZSM 265	02
1100.	10.	unter Voll- und Teillast	63
Abb.	41:	Gemessene NOx-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 - ZSM 265	
		unter Voll- und Teillast	63
Abb.	42:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 – ZSM 265	64
Abb	<u>4</u> 3.	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 9 – MGT 30	04
A00.	τJ.	unter Voll- und Teillast	65
Abb.	44:	Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 9 - MGT 30	
		unter Voll- und Teillast	65
Abb.	45:	Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 10 – MGT 65	
1 hh	16.	Compagence THC Konzentrationen im Abase von PHKW 10 MCT 65	66
ADD.	40:	unter Voll- und Teillast	67
Abb.	47:	Korrelation der mittleren gemessenen NO _x - und THC-Konzentration im	07
		Abgas der zehn BHKW klassifiziert nach Lambda-Wert	68
Abb.	48	: Mittelwerte des (näherungsweise) gemessenen Methanschlupfs aller	_
A 1-1	40	BHKW-Aggregate unter Volllast und Teillast	70
ADD.	49:	Startvorgangs der MGT 65	71
		Surr. 01201160 001 1101 05	

Abb. 50: Gemessener Verlauf verschiedener Abgasparameter und der elektrischen	
Leistung des GOM 549 (ohne Abgasbehandlung) während eines	
kurzfristigen Abschaltvorgangs	75
Abb. 51: Erste Messung verschiedener Abgasparameter und der elektrischen	
Leistung des GOM 530 kW während eines Abschaltvorgangs	76
Abb. 52: Zweite Messung verschiedener Abgasparameter und der elektrischen	
Leistung des GOM 530 während eines Abschaltvorgangs	76
Abb. 53: Anstieg der CO-Konzentrationen im Abgas des GOM 250 BR und des	
GOM 360 nach dem Oxi-Kat unter Voll- und Teillast	77
Abb. 54: Ausgebauter Oxi-Kat am ZSM 265 mit Lochbrand in der Füllschicht	78
Abb. 55: Gegenüberstellung der Messwerte für CO, NO _x und THC im Abgas des	
ZSM 265 mit Oxi-Kat vom ersten und zweiten Messtermin	79
Abb. 56: Gemessene Schadstoffkonzentrationen und berechneter Methanschlupf im	
Abgas des 549 kW Gas-Otto-Aggregats nach thermischer	
Nachverbrennung unter Volllast und 80 % Last	80
Abb. 57: Gemessene Konzentrationen von CO, NO _x und THC im Abgas zweier	
Kolbenmotoren mit Abgasbehandlung und einer Mikrogasturbine ohne	
Abgasbehandlung unter Volllast und 80 % Last im Vergleich mit den	
geltenden Grenzwerten nach TA Luft 2002	81
Abb. 58: Korrelation der mittleren gemessenen NO _x - und THC-Konzentration im	
Abgas der zehn BHKW klassifiziert nach Lambda-Wert vor dem	
Hintergrund der geltenden bzw. zu erwartenden Emissionsgrenzwerte	
nach TA Luft	87

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über die Vergütungsmöglichkeiten und Erlöschancen für Strom aus Biogasanlagen (Ouelle: Aschmann et al., 2015)	15
Tab 2.	Übersicht der untersuchten Motoren	24
Tab 3.	Herstellerangaben zum 75 kW Gas-Otto-Motor	25
Tab. J .	Herstellerangaben zum 100 kW Gas-Otto-Motor	25
Tab. 4 .	Herstellerengeben zum 250 kW Ges Otto Motor	20
Tab. J.	Herstelleren sehen zum 250 kW Gas-Olio-Woloi	
1 ad. o:	Technologie	28
Tab. 7:	Herstellerangaben zum 360 kW Gas-Otto-Motor	29
Tab. 8:	Herstellerangaben zum 530 kW Gas-Otto-Motor	30
Tab. 9:	Herstellerangaben zum 549 kW Gas-Otto-Motor	31
Tab 10.	Herstellerangaben zum 265 kW Zündstrahlmotor	32
Tab. 11.	Herstellerangaben zur 30 kW Mikrogasturbine (für Erdgas)	33
Tab. 12. Tab. $12 \cdot$	Herstellerangaben zur 65 kW Mikrogasturbine (für Erdgas)	
Tab. 12.	Übersicht über die gemassene Leistungsoufnehme und den	
1a0. 15.	Eigenbedarfsanteil der BHKW-Hilfseinrichtungen	35
Tab. 14:	Messtermine und Betriebsstunden (Bstd.) bei Beginn der jeweiligen	
	Messung	37
Tab. 15:	Verwendete Messinstrumente und erhobene Messgrößen zur Ermittlung	
	des elektrischen Wirkungsgrades	38
Tab. 16:	An den BHKW installierte Messinstrumente zur Erfassung der	
	Biogasmenge	39
Tab. 17:	Messinstrumente zur Analyse der BHKW-Abgase	39
Tab. 18:	Verwendete Werte der molaren Masse und Normdichte für die zu	
	bewertenden Schadstoffe im BHKW-Abgas	42
Tab. 19:	Während der Messungen ermittelte Lambda-Werte der zehn BHKW-	
	Aggregate für Vollast (100°) und Teillast (80°/60°)	44
Tab 20.	Vor Ort gemessene elektrische Wirkungsgrade der zehn BHKW-	
140.20.	Aggregate für Volllast ("100") und Teillast ("80"/"60")	45
Tab. 21:	Mittlere gemessene elektrische Wirkungsgrade der BHKW unter Volllast	
	und absolute Wirkungsgradabnahme unter Teillast	46
Tab. 22:	Näherungsweise ermittelter Methanschlupf der untersuchten BHKW-	
	Aggregate unter Voll- und Teillast in %	69
Tab. 23:	Anteil von Methan an den gesamten Kohlenwasserstoffen. Methanschlupf	
1401 201	und resultierender Fehler bei der näherungsweisen Bestimmung des	
	Methanschlunfs auf Basis der THC (alle Werte aus der vierten Messreihe)	71
Tab 24.	SWOT-Analyse des Einsatzes von Mikrogasturhinen im Biogassektor	8/
Tab. 24 .	Schadstoffgranzwarte für Kolbenmotoren nach verschiedenen Bichtlinien	
1 a0. 23.	Schadstonglehzweite für Koloelinotoren hach verschiedenen Kichtinnen (alla Konzantrationawarta in ma m^{-3} und für einen Dazwagaawartaffachalt	
	(alle Konzentrationswerte in mg m) und für einen Bezugssauerstoffgehalt	06
T 1 0 C	$\operatorname{von}(5\%)$	86
Tab. 26	: Schadstoffgrenzwerte für (Mikro-)Gasturbinen nach verschiedenen	
	Richtlinien (alle Konzentrationswerte in mg m ³ und für einen	_
	Bezugssauerstoffgehalt von 15 %)	86
Tab. 27:	Gemessene Volumenkonzentrationen von Methan, Kohlendioxid und	
	Sauerstoff im Biogas vor dem BHKW während der Messtermine	
	(Minimum, Mittelwert und Maximum)	96

Abkürzungsverzeichnis

BR	BlueRail®
Bstd.	Betriebsstunden
€	Euro
€ct	Eurocent
%	Prozent
Л	Lambda-Wert
el.	elektrisch
Bstd.	Betriebsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissions-Schutz-Gesetz
°C	Grad Celsius
CH ₄	Methan
СО	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
Ε	Massenkonzentration
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
GO/GOM	Gas-Otto(-Motor)
g	Gramm
GPS	Ganzpflanzensilage
ha	Hektar
hPa	Hectopascal
CH ₂ O	Formaldehyd
H ₂ O	Wasser
H_2S	Schwefelwasserstoff
Κ	Kelvin
k.A.	keine Angaben
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
1	Liter
1 h ⁻¹	Liter pro Stunde
m ³	Kubikmeter

$m^3 h^{-1}$	Kubikmeter pro Stunde
mbar	Millibar
mg m ⁻³	Milligramm pro Kubikmeter
М	Messung
MGT	Mikrogasturbine
MJ	Megajoule
mg	Milligramm
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stickoxide
n.v.	nicht vorhanden
O ₂	Sauerstoff
Oxi-Kat	Oxidations-Katalysator
р	Druck
Р	Leistung
ppm	parts per million
Stk.	Stk.
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TA Lärm	Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm
Т	Temperatur
THC	Total Hydrocarbons (Gesamt-Kohlenwasserstoffe)
v. E.	(Abweichung) vom Endwert
v. M.	(Abweichung) vom Messwert
V_N	Normvolumen
V	Volumen
ZS(M)	Zündstrahl (Motor)

Zusammenfassung

Seit der Reform des Erneuerbare Energien Gesetzes (EEG) im Jahr 2014 stellt die geförderte Direktvermarktung den Regelfall für den Absatz von Strom aus EE dar. Biogasanlagen können nach entsprechender Ertüchtigung Regelleistung erbringen oder bedarfsorientiert zu vereinbarten Zeiten Strom erzeugen, um die Erlöschancen zu verbessern. Eine flexiblere Fahrweise von mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) erfordert nicht nur eine entsprechende Auslegung der Gasspeicher, sondern verändert auch die Belastung des Motors und gegebenenfalls der Abgasbehandlung.

Im vorliegenden Projekt wurden daher moderne Biogas-BHKW vor Ort auf ihre Effizienz und Abgasemissionen geprüft. Vorrangiges Ziel war es, hierdurch erste fundierte Antworten auf folgende Fragen geben zu können: Wie wirken sich unterschiedliche Lastniveaus auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen von Biogas-Aggregaten aus? Lassen sich Zusammenhänge zwischen den Emissionen und dem el. Wirkungsgrad ableiten? Wie wirksam sind die von verschiedenen Herstellern angebotenen modernen Technologien zur Steigerung des el. Wirkungsgrades der Motoren? Wie ist die Wirksamkeit und Tauglichkeit verschiedener Abgasreinigungstechnologien für Biogasmotoren bei wechselnder Last?

Die Messungen fanden vor Ort an zehn verschiedenen Anlagen in Bayern statt: an sieben Gas-Otto-Motoren mit einer elektrischen Nennleistung von 75 bis 549 kW, an einem Zündstrahlmotor mit 265 kW el. Nennleistung und an zwei Mikrogasturbinen mit 30 bzw. 65 kW el. Nennleistung. Während die Kolbenmotoren auf Biogasanlagen betrieben wurden, standen die Mikrogasturbinen auf kommunalen Kläranlagen. Als hauptsächliche Parameter wurden der elektrische Wirkungsgrad der Aggregate sowie die Konzentrationen von Kohlenmonoxid (CO), Stickoxiden (NO_x) und Kohlenwasserstoffen (THC) im Abgas bestimmt. Außerdem wurde der Methanschlupf betrachtet. Obwohl nicht alle untersuchten Aggregate unter die Genehmigungspflicht nach Bundes-Immissionschutzgesetzes fielen, wurden die Ergebnisse im Lichte der Regelungen der TA Luft bewertet. Diese wird derzeit überarbeitet. Es wird erwartet, dass die entsprechenden Grenzwerte und deren Überwachung in diesem Zuge deutlich verschärft werden.

Alle Aggregate wurden innerhalb von zweieinhalb Jahren an vier bis fünf Terminen jeweils unter Volllast und Teillast gemessen, wobei die Teillaststufen weitestgehend auf 60 % und 80 % der Volllast vereinheitlicht wurden. Darüber hinaus wurden an einzelnen Aggregaten Messungen während des Hoch- und Herunterfahrens getätigt.

Der maximale elektrische Wirkungsgrad wurde an allen Aggregaten bei Volllast ermittelt. Bei den Kolbenmotoren lag der Volllast-Wirkungsgrad im Bereich von 29 bis 43 %. Die höchsten Werte erzielten hierbei ein 250 kW Gas-Otto-Motor mit Direkteinspritzung und Turbocompound-Technologie sowie ein 265 kW Zündstrahlmotor mit Abgasturbine. Die Nennleistung war also nicht alleine maßgeblich. Die Mikrogasturbinen erreichten mit Werten von ca. 22 bis 25 % prinzipiell einen deutlich geringeren el. Wirkungsgrad als die Kolbenmotoren.

Unter Teillast fiel bei allen Aggregaten der el. Wirkungsgrad ab: bei 80 % Last im Mittel um 1,5 %-Punkte (1,0 bis 2,6 %-Punkte), bei 60 % Last im Mittel um 3,8 %-Punkte (2,7 bis 6,1 %-Punkte) – jeweils gegenüber Volllast. Die große Streubreite der Werte deutete darauf hin, dass einzelnen Motoren bereits auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad auch unter Teillast getrimmt wurden. Bei der Auswahl eines BHKW, das unter flexiblen Lastbedingungen betrieben werden soll, sollten diesbezügliche Informationen von den Herstellern angefordert werden.

Bei den Kolbenmotoren variierte das Abgasverhalten in Abhängigkeit vom Motorkonzept und der Motoreinstellung. Die NO_x- und THC-Konzentrationen im unbehandelten Abgas waren stark von der Sauerstoffzahl (Lambda-Werte, λ) abhängig. Bei steigendem λ unter Teillast sank die NO_x-Konzentration, während die THC-Konzentration und somit der Methanschlupf anstiegen. Wurde λ unter Teillast verkleinert, konnte dieser Effekt teilweise aufgehoben werden. Die CO-Konzentrationen im unbehandelten Abgas der Motoren zeigten hinsichtlich des Teillastbetriebs kein eindeutiges Verhalten. Meist änderten sich diese kaum, in manchen Fällen stiegen sie leicht an.

Eine übergreifende Korrelation des el. Wirkungsgrades und der Abgaszusammensetzung konnte aus den Messergebnissen nicht abgeleitet werden. Teilweise deuteten auffallend hohe oder während der Messung stark streuende Abgaskonzentrationen auf Probleme bei der Verbrennung im Motor hin, die jedoch nicht im Detail aufgeklärt werden konnten.

Die an den Motoren untersuchten Oxidationskatalysatoren zeigten im neuen Zustand eine sehr gute Wirksamkeit für CO. Unter Teillast sanken die CO-Konzentrationen im gereinigten Abgas weiter, was auf den geringeren Abgasdurchfluss und damit die höhere Aufenthaltszeit im Oxi-Kat zurückgeführt wurde. Die Messergebnisse zeigen aber auch, dass Oxi-Kats einem deutlichen Alterungsprozess unterliegen und durch thermische Belastung geschädigt werden können. Die an einem Aggregat untersuchte thermische Nachverbrennungseinheit eliminierte Kohlenwasserstoffe aus dem Abgas praktisch vollständig und war auch für CO wirksam.

Ob häufigere Stillstandszeiten und Betriebszeiten unter Teillast den Verschleiß von BHKW beeinflussen, kann auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse nicht beurteilt werden, da der Teillastbetrieb nur während der Messtermine simuliert wurde. Zu diesem Zweck müssten Flex-BHKW über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Die während des Herunter- und Wieder-Hochfahrens an einzelnen Aggregaten gemessenen COund NO_x-Konzentrationsspitzen sind für das gesamte Emissionsgeschehen eines BHKW nicht ausschlaggebend, da diese Betriebsphasen zeitlich eng begrenzt sind. Soll ein Motor regelmäßig in Intervallen betrieben werden, ist eine Zusatzheizung zu installieren, um Kaltstarts zu vermeiden. Was die Abgasbehandlung angeht, so kommt eine thermische Nachverbrennung für den Intervallbetrieb nicht in Frage, da dieses System bis zur vollen Wirksamkeit eine Aufwärmphase von ca. vier Stunden benötigt.

Während der Messungen wurde der geltende Grenzwert der TA Luft für NO_x von mehreren BImSchV-pflichtigen Anlagen nicht eingehalten. In der für 2017 angekündigten überarbeiteten der TA Luft sollen die bestehenden Emissionsgrenzwerte verschärft werden und ein Grenzwert für THC hinzukommen. Hierdurch würden bei Kolbenmaschinen erheblich höhere Anforderungen an die Motor- und Abgasbehandlungstechnik gestellt. Zur Begrenzung der CO-Emissionen könnte auf eine Abgasbehandlung nicht mehr verzichtet werden. Innermotorische Maßnahmen zur Begrenzung der NO_x- und der THC-Emissionen limitieren gleichzeitig den elektrischen Wirkungsgrad. Es müssen daher wirtschaftlich darstellbare Lösungen zur Emissionsbegrenzung an Biogas-BHKW gefunden werden. Im Sinne der Technikfolgenabschätzung wäre darüber hinaus zu prüfen, ob eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte unter dem Strich überhaupt ökologisch und ökonomisch effizient ("ökoeffizient") ist.

1 Einleitung

Der Biogas-Boom der 2000er Jahre hat sich in der Landwirtschaft zuletzt weiter abgeschwächt. Nachdem in der Novelle des Erneuerbare Energien Gesetzes 2012 die Fördervoraussetzungen für die Biogaserzeugung aus Energiepflanzen bereits deutlich verschärft worden waren, wurde mit dem Gesetz zur grundlegenden Reform des EEG in 2014 die Einspeisevergütung für elektrische (el.) Energie aus Biogas nochmals stark eingeschränkt. Eine kostendeckende Einspeisevergütung wird nur noch bei der Vor-Ort-Verstromung von Biogas aus der Vergärung von Gülle oder Mist (außer von Geflügel) in Anlagen mit höchstens 75 kW installierter el. Leistung gewährt. Die geförderte Direktvermarktung stellt nun den Regelfall für den Absatz von Strom aus EE dar. Auf diese Weise soll die Bereitstellung von Regelleistung durch mit Biogas betriebene Blockheizkraftwerke vorangebracht werden. Den Biogasbetreibern bieten sich verschiedene Möglichkeiten, am Strommarkt teilzunehmen. Durch die Teilnahme an der Direktvermarktung sind zusätzliche Erlöse für den Betreiber möglich (vgl. Tab. 1).

Tab. 1:Übersicht über die Vergütungsmöglichkeiten und Erlöschancen für Strom aus
Biogasanlagen (Quelle: Aschmann et al., 2015)

				Erlöse aus bedarfsgerech- ter Stromvermarktung
eu				Erlöse aus Vermarktung von Regelleistung
chkeit			Erlöse aus Vermarktung	Flexibilitätsprämie
5			von Regelleistung	
ě.		Managementprämie	Managementprämie	Managementprämie
gütungsm	Feste EEG-Vergütung	Marktprämie	Marktprämie	Marktprämie
Ver		Monatsmittelwert Börse	Monatsmittelwert Börse	Monatsmittelwert Börse
	EEG VERGÜTUNG	MARKTPRÄMIE	REGELENERGIE	Flexible Energieerzeugung

Erster Schritt ist die Teilnahme am Marktprämienmodell, wobei sich die technischen Vorgaben auf die Mitteilung der Ist-Einspeisung und die Steuerbarkeit der Anlage beschränken. Wesentlich anspruchsvoller, aber auch mit höheren Erlöschancen verbunden ist die Bereitstellung von Regelleistung ("Regelenergie"). Die größten Anforderungen an die Technik und das Management der Anlage stellt die flexible, bedarfsorientierte Stromerzeugung zu vereinbarten Tageszeiten während erhöhter Nachfrage. Die veränderte Fahrweise erfordert nicht nur eine entsprechende Auslegung der Gasspeicher, sondern wirkt sich auch auf die Belastung des Motors und die Abgasemissionen aus. Dies betrifft auch die Abgasbehandlung. Möglicherweise werden durch die geänderten Anforderungen alternative Technologien zu Hubkolbenmotoren, z. B. Mikrogasturbinen, zu einer attraktiveren Option.

2 Zielsetzung

In diesem Forschungsprojekt wurden BHKW neuester Technik auf ihre Effizienz und Abgasemissionen geprüft. Der Schwerpunkt lag bei den Gas-Otto-Motoren, da diese mittlerweile mit Abstand am häufigsten auf dem Markt vertreten sind. Zusätzlich wurden ein Zündstrahlmotor und zwei Mikrogasturbinen in das Messprogramm aufgenommen.

Zur außermotorischen Verringerung der Emissionen werden zunehmend Oxidations-Katalysatoren eingesetzt. Diese sind in der Lage, Formaldehyd, Kohlenmonoxid und teilweise Kohlenwasserstoffe aus den Abgasen zu entfernen. Vier der untersuchten Motoren waren mit dieser Technologie ausgerüstet.

Ein Verfahren, mit welchem auch Kohlenwasserstoffe vollständige aus dem Abgas eliminieren werden können, ist die thermische Nachverbrennung. Deren Wirksamkeit wurde an einem Aggregat untersucht.

Mit der Forderung nach einer flexibleren, bedarfsorientierten Stromerzeugung aus Biogas verändern sich Auslastung und Betriebszeiten der BHKW. Diese beeinflussen wiederum die Belastung des Motors, den el. Wirkungsgrad und das Abgasverhalten. Vorrangiges Ziel des Projekts war es, dazu erste fundierte Aussagen zu treffen.

Der vorliegende ausführliche Abschlussbericht soll auf der Grundlage mehrjähriger Messungen an Praxisanlagen Antworten auf folgende Fragen zur el. Effizienz und den Abgasemissionen der Verstromung von Biogas in Blockheizkraftwerken geben:

- Wie entwickeln sich die el. Effizienz und die Abgasemissionen von Biogas-Aggregaten über die Standzeit?
- Wie wirken sich unterschiedliche Lastniveaus auf den el. Wirkungsgrad und die Abgasemissionen von Biogas-Aggregaten aus? Gibt es Unterschiede bei den verschiedenen Motoren unter Teillast?
- Wie wirksam sind die von verschiedenen Herstellern angebotenen modernen Technologien zur Steigerung des el. Wirkungsgrades der Motoren?
- Lassen sich Zusammenhänge zwischen den Emissionen und dem el. Wirkungsgrad ableiten?
- Wie stark erhöht ein dauerhafter Intervall-/Start-Stopp-Betrieb den Verschleiß des Motors und der Abgasbehandlungseinrichtung?
- Sind Mikrogasturbinen für die Praxis im Biogassektor einsetzbar und besitzen diese Vorteile für eine flexible Fahrweise?
- Wie ist die Wirksamkeit und Tauglichkeit verschiedener Abgasreinigungstechnologien für Biogasmotoren bei wechselnder Last?
- Welche Anforderungen kommen durch die TA Luft 2017 auf die BHKW-Aggregate zu?

3 Stand der Technik

3.1 Technologien zur Stromerzeugung aus Biogas

3.1.1 Verbrennungsmotoren und Gasturbinen

Für die Stromerzeugung aus Biogas werden hauptsächlich Kolbenmotoren eingesetzt, welche im Magermodus betrieben werden. Den Hauptanteil machen dabei die Vier-Takt Gas-Otto-Motoren mit Fremdzündung aus. Die alternative Variante der Kolbenmotoren stellt der Zündstrahlmotor dar, in welchem durch Beimischung eines Kraftstoffs mit guter Zündwilligkeit und eine entsprechend hohe Kompression das Gemisch von selbst zündet. Man spricht hier von einem Zweistoffmotor. In dem Biogasbereich dürfen Altanlagen bzw. Bestandsanlagen noch mit Heizöl betrieben werden. In mit Biogas betriebenen Zündstrahlmotoren, die nach 2007 in Betrieb gingen, darf nur Zündöl aus regenerativen Quellen eingesetzt werden. Andernfalls erlischt der Vergütungsanspruch für den erzeugten Strom nach EEG. Zündstrahlmotoren haben prinzipiell einen etwas höheren elektrischen Wirkungsgrad als Gas-Otto-Motoren, sind in den Anschaffungs- und Betriebskosten jedoch tendenziell teurer.

Aufgrund ihres relativ geringen el. Wirkungsgrad ist die (Mikro-)Gasturbine in der Biogasbranche kaum vertreten. Das Wirkungsprinzip unterscheidet sich von dem der Kolbenmotorik. Die Schaufelräder der Turbine sind über eine luftgelagerte Welle mit dem Generator verbunden und erreichen eine Drehzahl von bis zu 96.000 min⁻¹. Aufgrund des Luftlagers werden keine Kühl- und Schmiermittel benötigt und es tritt ein sehr geringer mechanischer Verschleiß auf. Ein Rekuperator nutzt die Wärmeenergie aus den Abgasen, um die Zuluft für die Brennkammer zu erhitzen. Im Vergleich zu Kolbenmotoren ist das Abgas von Mikrogasturbinen auch ohne weitere Behandlung sehr schadstoffarm und weist höhere Sauerstoffgehalte (bis zu 18 %) auf.

3.1.2 Technologien zur Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades von Kolbenmotoren

Aufgrund der komplexen Eigenschaften der mager betriebenen Motoren suchen Hersteller neben der Justierung der Motorparameter (z.B. hohe Verdichtung des Biogases) nach Alternativen, um den el. Wirkungsgrad zu erhöhen. Eine ältere Technologie ist die Abgasturbine. Die Abgasturbine wird extern im Abgasstrom des BHKW betrieben und generiert durch die dabei entstehende Drehbewegung an einem separaten Generator zusätzliche el. Energie. Hierdurch entsteht im Abgasstrom ein Gegendruck, so dass der Motor leicht gedrosselt wird. Im Gesamtsystem werden jedoch el. Leistung und Wirkungsgrad gesteigert. Da die Abgasturbinen die Vorgaben der Mittelspannungsrichtlinie nicht erfüllen, werden diese nicht mehr verkauft. Bestehende Anlagen genießen jedoch Bestandschutz.

Ein weiteres Verfahren ist die BlueRail®-Einspritzung bei Gas-Otto-Motoren. Hierbei wird ein kleiner Teilstrom des Biogases getrennt in eine Vorkammer geleitet und gezündet. Der entstehende Flammenstrahl zündet das im Brennraum befindliche Gas-Luft-Gemisch. Damit wird der Gas-Otto-Motor mit den Eigenschaften eines Zündstrahl-Motors kombiniert, um so den el. Wirkungsgrad anzuheben.

Mit der Turbocompound-Technologie der Fa. SCANIA wird überschüssige Abgasenergie intern genutzt, um das Drehmoment im Motor zu erhöhen und so den Verbrauch zu senken. Abb. 1 zeigt eine Illustration zur Funktionsweise.



Abb. 1: Illustration der Funktionsweise einer Turbocompound-Turbine (Quelle: Scania Deutschland GmbH)

Die Kolbenabgase werden nach dem Krümmer zunächst genutzt, um die erste Turbine (siehe Skizze: [1]) für den Turbolader anzutreiben und damit dessen Leistung und Drehmoment zu steigern. Anschließend fließt das leicht abgekühlte Abgas [2] weiter zur Turbocompound-Turbine [3], die auf bis zu 55.000 min⁻¹ beschleunigt wird. Über ein mechanisches Getriebe [5] und eine Hydraulikkupplung [4] wird die Drehzahl der Turbocompound-Turbine auf eine Umdrehungszahl der Kurbelwelle von ca. 1.900 min⁻¹ untersetzt. Das Drehmoment des Schwungrads [6] wird hierdurch erhöht und dieses dreht sich stabiler und gleichmäßiger. Dies führt zu einer Entlastung der Kolben und einem geringeren Verbrauch bei gleicher Leistungsabgabe.

3.2 Technologien zur Abgasbehandlung

3.2.1 Oxidationskatalysator

Der Oxidationskatalysator (Oxi-Kat; vgl. Abb. 2) kann in den Abgasstrang eingebaut werden, um bestimmte Emissionsgrenzwerte einzuhalten. Der Oxi-Kat ist insbesondere wirksam für Kohlenmonoxid (CO) und Formaldehyd. Mit einem gut funktionierenden und korrekt dimensionierten Oxi-Kat kann der Grenzwert für Formaldehyd von 40 mg m⁻³ eingehalten werden, so dass der Formaldehyd-Bonus nach EEG 2009 realisiert werden kann. Die Haltbarkeit des Oxi-Kats ist im Biogasbetrieb in der Regel auf maximal zwei Jahre begrenzt, da der Katalysatorkörper vor allem durch Schwefelverbindungen im Abgas angegriffen wird.



Abb. 2: Ansicht eines Oxidationskatalysators für Schnell Motoren (Bild: Emission Partner GmbH & Co. KG)

Wichtig ist, dass der Oxi-Kat nicht zu kalt oder zu heiß gefahren wird. Dies ist insbesondere im Intervallbetrieb zu beachten. Ein dauerhafter Betrieb unter 300 °C kann zur Blockade durch die Anlagerung von Verbrennungsrückständen führen, während Temperaturen oberhalb von 500 °C den Verlust von aktiver Oberfläche durch beispielsweise Verdampfung bewirken können. Adäquate Betriebstemperaturen sowie die Vermeidung von katalysatorschädigenden Verbindungen sind Voraussetzung für eine dauerhafte Katalysatoraktivität (Sklorz et al., 2004, S.7f).

3.2.2 Thermische Nachverbrennung

Durch das Verfahren der thermischen Nachverbrennung – auch Regeneratives Thermisches Oxidationssystem (RTO) genannt – kann im Gegensatz zum Oxi-Kat neben CO und Formaldehyd auch Methan aus dem Abgas eliminiert werden. Die thermische Nachverbrennung der Motorabgase beruht in diesem Falle auf der autokatalytischen Oxidation von Restmethan (sowie im Abgas enthaltener teiloxidierter Verbindungen wie Formaldehyd) bei einer Temperatur von mindestens 600 °C. Um den Oxidationsprozess aufrecht zu erhalten, ist jedoch ein hoher Methanschlupf erforderlich. Während der Aufwärmphase von bis zu vier Stunden Dauer wird eine zusätzliche el. Heizung ($P \approx 35$ kW) benötigt, um die Reaktionskammern auf die erforderliche Temperatur zu bringen. Anschließend genügt die frei werdende Reaktionsenthalpie, um den Verbrennungsprozess aufrecht zu erhalten. Daher findet die thermische Nachverbrennung nur bei kontinuierlicher Stromerzeugung Verwendung, da der Strombedarf für die Aufwärmphase zu hoch ist und die gesamte Effizienz beeinträchtigt wird. Um eine dauerhafte Oxidationsleistung zu gewährleisten, wird zwischen zwei Kammern hin und her geschaltet, so dass jeweils eine Kammer mit Sauerstoff durchspült wird, während die andere in Betrieb ist (vgl. Abb. 3).

Im vorliegenden Projekt wurden Messungen an einer thermischen Nachverbrennungsanlage nach dem CLAIR®-System der Firma GE Jenbacher GmbH & Co. OG vorgenommen. Die Anlage ist an dem BHKW,,GOM 549 kW" installiert und verfügt über zwei Keramikkammern, die wechselseitig als Brennkammer genutzt bzw. durch Spülung mit Sauerstoff regeneriert werden.



Abb. 3: Schematische Darstellung der thermischen Nachverbrennung CLAIR[®] der Firma Jenbacher (Bild: GE Jenbacher GmbH & Co OG)

3.3 Motoreinstellung und Abgasverhalten

Die Motoreinstellung wirkt sich entscheidend auf den el. Wirkungsgrad und die Abgasemissionen aus. Hierbei besteht teilweise ein Zielkonflikt zwischen einem möglichst hohen Wirkungsgrad und möglichst geringen Schadgaskonzentrationen im Abgas. Während die NO_x-Konzentration im Abgas bei $\lambda \approx 1,1$ am höchsten ist, da unter leichtem Luftüberschuss die höchsten Verbrennungstemperaturen herrschen, steigen mit zunehmend magerem Gemisch die Kohlenwasserstoff-Konzentrationen an. Grund ist die geringere Verbrennungstemperatur, die zum Abkühlen der Brennwände führt, so dass die Flammen in der Brennkammer leichter erlöschen. Um die Emissionen an Stickoxiden (NO_x), CO und THC allesamt zu minimieren, sollte der Lambda-Wert im Bereich von 1,5 bis 1,7 liegen (vgl. Abb. 4). Die CO-Konzentration bleibt im Magerbetrieb niedrig. Ein hoher Lambdawert respektive Sauerstoffgehalt im Abgas ist der Grund für die geringen Emissionswerte bei Mikrogasturbinen. Insbesondere die Begrenzung der NO_x-Emissionen engt bei Kolbenmotoren den Spielraum ein, durch eine hohe Verdichtung des Biogases den el. Wirkungsgrad zu steigern.



Abb. 4: Qualitative Darstellung der Abhängigkeit des Konzentrationsniveaus von NO_x, CO und THC im Abgas eines Verbrennungsmotors in Abhängigkeit vom Lambda-Wert (Luftüberschuss)

Die Bildung von Stickoxiden hängt von der Temperatur und der Sauerstoffkonzentration bei der Verbrennung ab. Kohlenmonoxide entstehen normalerweise, wenn ein Sauerstoffmangel vorherrscht. Durch das höhere Luftverhältnis (im Magerbetrieb) wird die Aldehyd-Konzentration eher niedrig gehalten (Grohe et al., 1996, S. 122). Es ist mehr Sauerstoff zur Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid vorhanden.

Betrachtet man das magere Gemisch bei Gasmotoren, so wird die Menge an Kohlenwasserstoffen – d. h. nicht verbranntem Brennstoff – im Abgas durch die Funkendauer beeinflusst. Bei einer längeren Funkendauer gelangen weniger nicht verbrannte Kohlenwasserstoffe ins Abgas. Zudem hat die Lage des Zündungszeitpunkts einen Einfluss auf die Kohlenwasserstoff- und Stickoxidemissionen. Der Ausstoß dieser Schadstoffe kann durch eine späte Zündung reduziert werden. Bei mageren Kraftstoff-Luft-Gemischen sind Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen tendenziell niedriger. Gleichzeitig sind die Anforderungen an die Zündanlagen bezüglich Zündspannung, Zündfunkendauer und Zündfunkenenergie höher. Der Zündzeitpunkt ist früher zu wählen (Grohe et al., 1996, S. 68). Maßnahmen für eine optimierte Verbrennung umfassen die Zündung, die Brennraumgeometrie, das Luftverhältnis, Schadraumreduzierung und die Nachoxidation u. a. in Abhängigkeit von der Abgastemperatur (Prager et al., 2015).

In diesem Projekt konnten zur Interpretation der Abgaswerte nur die Parameter wie Abgastemperatur, Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt sowie der Sauerstoffüberschuss (Lambda-Wert) hinzugezogen werden. Zusätzlich wurden technische Zustände der Motoren (z. B. Zündaussetzer) mit dokumentiert.

Im Rahmen von Abgasmessungen an einem Versuchsmotor, der mit synthetischem Biogas betrieben wurde, stellten Prager et al. (2015) fest, dass die Kohlenwasserstoffe im Motorabgas zu ca. 90 % aus Methan bestanden. Weitere Bestandteile waren v. a. Ethan / Ethen und Formaldehyd (Abb. 5).



Abb. 5: Aufteilung der THC-Rohemission in die einzelnen Komponenten an zwei Betriebspunkten ($\lambda = 1,7$ bzw. 1,85) gemessen an einem Versuchsmotor mit synthetischem Biogas (Quelle: Prager et al., 2015: S. 92)

Biogas besteht aus den beiden Hauptkomponenten Methan (CH₄) mit ca. 50 bis 60 % Volumenanteil und Kohlenstoffdioxid (CO₂) mit ca. 40 bis 45 % Volumenanteil. Während CH₄ ein Brennstoff ist, wirkt CO₂ als Löschmittel. Ein höherer CO₂-Anteil im Biogas führt daher zu einer langsameren Verbrennung, was durch ein geringeres Verbrennungsluftverhältnis, λ kompensiert werden muss. Wird λ bei steigendem CO₂-Anteil konstant gehalten, sinken die Kohlenwasserstoffemissionen und zugleich der Wirkungsgrad des Motors (Prager et al. 2015, S.94).

3.4 Bisherige Arbeiten

Ausgangspunkt für die im vorliegenden Bericht dokumentierten Arbeiten waren vorausgegangene Forschungsarbeiten am ILT zur Effizienz und zum Abgasverhalten von Biogas-BHKW, die an dieser Stelle kurz rekapituliert werden sollen. Das vom Bayerischen Landesamt für Umwelt finanzierte Projekt (FKZ: 1325) "Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung" umfasste Emissions- und Wirkungsgradmessungen an insgesamt zehn BHKW, davon jeweils fünf Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren mit einer el. Nennleistung von 30 bis 340 kW und einer Laufzeit von maximal 7.250 Bstd. zu Beginn der Messungen. Diese BHKW wurden wiederholt in drei verschiedenen Betriebszuständen – nicht gewartet/nach Betreiberwartung/nach Herstellerwartung – gemessen. Hierbei wurde insbesondere festgestellt, dass eine Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nur bei regelmäßiger Motorwartung und gleichzeitiger Emissionsmessung bei der Motoreinstellung gewährleistet werden konnte. Zudem deuteten die Messergebnisse darauf hin, dass die angegebenen elektrischen Wirkungsgrade der Motoren in der Praxis nicht zu erreichen sein würden (siehe Aschmann et al., 2006).

Der vor Ort zu messende elektrische Wirkungsgrad von Biogas-BHKW und dessen Verlauf über die Standzeit standen daher im Vordergrund des Forschungsinteresses in dem durch das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (StMELF) geförderten Projekt "Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer" (FKZ: K/08/01). Zu diesem Zweck wurden an sechs Biogas-BHKW mit einer el. Nennleistung von 30 bis 324 kW über einen Beobachtungszeitraum von 10.200 bis 46.700 Bstd. wiederholte Messungen des elektrischen Wirkungsgrades ohne anlassbezogene Wartungsmaßnahmen vorgenommen. Hierbei wurde ein Rückgang des elektrischen Wirkungsgrads um 1,2 bis 4,7 Prozentpunkte beobachtet. Die absolute Differenz zwischen den mittleren Werten für den el. Wirkungsgrad über die Beobachtungsdauer aus den Messungen vor Ort und den Herstellerangaben bewegte sich im Bereich von 2,9 bis 3,8 %-Punkten (Aschmann et al., 2012). Damit wurde eine wertvolle Kalkulationsgrundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung von Biogasanlagen geschaffen.

Nachdem im Rahmen der vorgenannten Messungen bereits Wechselwirkungen zwischen Leistungsabgabe/elektrischem Wirkungsgrad und Abgasverhalten beobachtet worden waren, sollten diese im Rahmen des Projekts "Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motoreinstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromversorgung" (Fördermittelgeber: Bayerisches Staatsministerium für Umwelt. Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung) näher untersucht werden. Dazu erfolgten wiederholte Messungen in einem zeitlichen Abstand von 2.500 bis 5.000 Bstd. an jeweils drei Zündstrahlmotoren (el. Nennleistung: 110/250/265 kW) und drei Gas-Otto-Motoren (el. Nennleistung: 190/324/526 kW). Die Messergebnisse bestätigten, dass eine Motoreinstellung mit dem Ziel der Maximierung der Leistungsabgabe des Ofteren eine Uberschreitung der NO_x-Grenzwerte nach TA-Luft im Abgas zur Folge hatte. Wurde die Motortrimmung geändert, konnte zwar der NO_x-Grenzwert eingehalten werden, dies jedoch nur unter Inkaufnahme von Wirkungsgradeinbußen und gleichzeitiger Erhöhung der Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas (siehe Aschmann et al., 2007).

4 Untersuchungsobjekte

Im Folgenden werden die untersuchten Aggregate zur Stromerzeugung aus Biogas mit ihren technischen Daten vorgestellt. In einem separaten Unterkapitel werden die Nebenaggregate behandelt, deren Strombedarf für die Bestimmung des el. Wirkungsgrades der Blockheizkraftwerke erfasst werden muss.

4.1 BHKW-Aggregate und Abgastechnologien

Die zehn untersuchten BHKW-Motoren und gegebenenfalls die installierte Abgasbehandlungstechnik sind in der Übersicht in Tab. 2 dargestellt. Die Auswahl der Untersuchungsobjekte erfolgte durch Kontaktaufnahme mit Herstellerfirmen und Anlagenbetreibern. Eines der Aggregate (Nr. 6) wurde aus dem Vorgängerprojekt übernommen, ein weiteres (Nr. 1) befindet sich auf der <u>Biogasanlage der LfL-Versuchsstation in Grub</u>.

Тур	Nr.	El.	Packager	Abgasbehandlung
		Nennleistung, kW		
	1	75	AVS Aggregatebau, Ehingen	n.v.
	2	190	Kuntschar Energieer- zeugung, Wolfhagen	n.v.
Gas-Otto-Motor	3	250	Elektro Hagl, Geisen- feld	Oxi-Kat
(GOM)	4	250 (BlueRail®, BR)	SCHNELL Motoren, Amtzell	Oxi-Kat
	5	360	2G Energy, Heek	Oxi-Kat
	6	530	Bayern BHKW, Dorfen	n.v.
	7	549	GE Jenbacher, Jenbach	Thermische Nachverbrennung
Zündstrahlmotor (ZSM)	8	265 (mit Abgasturbine)	SCHNELL Motoren, Amtzell	Oxi-Kat
Mikrogasturbine	9	30	Capstone, Chatsworth, USA	n.v.
(MGT)	10	65	Capstone, Chatsworth, USA	n.v.

Tab. 2: Übersicht der untersuchten Motoren

Sieben der acht untersuchten Hubkolbenmotoren sind vom Typ Gas-Otto. Auch wenn sich Gas-Otto-Motoren in der Biogasbranche durchgesetzt haben, ist dieser Motortyp damit in der Auswahl der Untersuchungsobjekte gegenüber dem einen Zündstrahlmotor (BHKW Nr. 8) überrepräsentiert. Zusätzlich wurden als alternative Technologie zwei Mikrogasturbinen gemessen. Diese werden auf Kläranlagen betrieben. Geeignete Untersuchungsobjekte auf Biogasanlagen konnten im Rahmen des Projekts nicht gefunden werden.

4.1.1 BHKW 1: 75 kW Gas-Otto-Motor (GOM 75)



Abb. 6: Ansicht des 75 kW Gas-Otto-Motors vor Ort

Das 75 kW Gas-Otto-BHKW (Abb. 6 und Tab. 3) befindet sich auf der Biogasanlage der Versuchsstation der LfL in Grub. Das BHKW wird auf der für Forschungszwecke ausgerichteten Biogasanlage (Einsatzstoffe: > 90 % Gülle und Mist) durchgängig betrieben. Die erste Messung fand bereits relativ früh nach der Inbetriebnahme bei einem Zählerstand von 2.249 Betriebsstunden statt.

1 ab. 5. Herstellerangaben zum 75 kw Gas Olio molo	Tab. 3:	Herstelleran	ngaben zum	1 75 kW	Gas-Otto-Moto
--	---------	--------------	------------	---------	---------------

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	GW75MAO836TE (S)
Hubraum	1	6,87
Zylinder	Stk.	6
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	35
el. Leistung	kW	75
thermische Leistung	kW	104
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	210
el.r Wirkungsgrad	%	35,7
thermischer Wirkungsgrad	%	49,5
Gesamtwirkungsgrad	%	85,2
Abgasbehandlung	-	n.v.

n.v.: nicht vorhanden



4.1.2 BHKW 2: 190 kW Gas-Otto-Motor (GOM 190)

Abb. 7: Ansicht des 190 kW Gas-Otto-Motors vor Ort

Das Gas-Otto-Aggregat mit 190 kW el. Leistung (Abb. 7 und Tab. 4) ist eines von zwei BHKW-Motoren auf einem ökologisch bewirtschafteten Betrieb (Einsatzstoffe: ca. 65 % Kleegras, 30 % Mist, 5 % Getreideschrot) und wird kontinuierlich betrieben. Praktisch die gesamte BHKW-Wärme wird in ein Nahwärmenetz eingespeist.

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	GTK 190 B - MAN E2876 LE 302
Hubraum	1	k.A.
Zylinder	Stk.	6
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	k.A.
el. Leistung	kW	190
thermische Leistung	kW	244
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	493
el. Wirkungsgrad	%	38,5
thermischer Wirkungsgrad	%	49,5
Gesamtwirkungsgrad	%	88,0
Abgasbehandlung	-	n.v.
k.A.: keine Angabe	_	

Tab. 4: Herstellerangaben zum 190 kW Gas-Otto-Motor

4.1.3 BHKW 3: 250 kW Gas-Otto-Motor (GOM 250)



Abb. 8: Ansicht des 250 kW Gas-Otto-Motors vor Ort

Dieses Aggregat wird neben BHKW Nr. 2 betrieben und ist das ältere der beiden. Es besitzt gegenüber seinem Nachbarn einen Oxi-Kat.

<i>Tab.</i> 5:	Herstellerangaben	zum 250 kW	Gas-Otto-Motor
----------------	-------------------	------------	----------------

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	E 2848 LE 322
Hubraum	1	14,62
Zylinder	Stk.	8
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	k.A.
el. Leistung	kW	250
thermische Leistung	kW	274
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	657
el. Wirkungsgrad	%	39
thermischer Wirkungsgrad	%	41,7
Gesamtwirkungsgrad	%	80,7
Abgasbehandlung	-	Oxi-Kat



4.1.4 BHKW 4: 250 kW Gas-Otto-Motor (GOM 250 BR)

Abb. 9: Ansicht des 250 kW Gas-Otto-Motors (BR) vor Ort

Dieser Gas-Otto-Motor des Packagers SCHNELL Motoren AG, Amtzell (Abb. 9 und Tab. 6) weist laut Herstellerangabe den höchsten gemessenen el. Wirkungsgrad in seiner Leistungsklasse auf. Dies wird durch die Vorkammertechnik (sogenannte Blue-Rail®-Technologie) sowie eine Turbocompound-Turbine erreicht (siehe Kap. 3.1.2). Das Aggregat wird zusammen mit drei Zündstrahlmotoren auf einer Biogasanlage mit Einsatz von ca. 43 % Grassilage, 40 % Maissilage, 16 % GPS und 1,5 % Getreide betrieben. Zusammen erreichen die Motoren bei Volllast eine el. Gesamtleistung von 1 MW.

-		
Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller ¹
Typbezeichnung	-	SCHNELL agrogen 6R20.1BO (BlueRail®)
Hubraum	1	11,7
Zylinder	Stk.	6
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	112
el. Leistung	kW	250
thermische Leistung	kW	219
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	469
el. Wirkungsgrad	%	43,1
thermischer Wirkungsgrad	%	k.A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k.A.
Abgasbehandlung	-	Oxi-Kat

Tab. 6: Herstellerangaben zum 250 kW Gas-Otto-Motor mit BlueRail®-Technologie

¹ nach DLG-Prüfbericht 6133 F

4.1.5 BHKW 5: 360 kW Gas-Otto-Motor (GOM 360)



Abb. 10: Ansicht des 360 kW Gas-Otto-Motors vor Ort

Die auf 510 kW el. Leistung ausgelegte Biogasanlage umfasst einen 250 kW Gas-Otto-Motor und einen 360 kW Gas-Otto-Motor, welcher in das Messprogramm aufgenommen wurde (Abb. 10, Tab. 7). Zu der Standardausstattung des kontinuierlich durchlaufenden Aggregates gehört ein Oxidationskatalysator. Bekannt ist dieser Motor aufgrund seiner relativ geringeren Verluste des el. Wirkungsgrades im Teillastbereich. Die Biogasanlage selbst ist auf eine kontinuierliche Stromproduktion ausgelegt und wird mit GPS, Getreide und Zuckerrübenschnitzel gefüttert.

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	agenitor 408
Hubraum	1	k.A.
Zylinder	Stk.	8
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	170
el. Leistung	kW	360
thermische Leistung	kW	345
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	705
el. Wirkungsgrad	%	42,5
thermischer Wirkungsgrad	%	40,7
Gesamtwirkungsgrad	%	83,2
Abgasbehandlung	-	Oxi-Kat

 Tab. 7:
 Herstellerangaben zum 360 kW Gas-Otto-Motor



4.1.6 BHKW 6: 530 kW Gas-Otto-Motor (GOM 530)

Abb. 11: Ansicht des 530 kW Gas-Otto-Motors vor Ort

Dieses Aggregat wird neben dem kontinuierlich laufenden Zündstrahlmotor-BHKW Nr. 8 als Flex-BHKW für vier bis sechs Stunden täglich zur morgendlichen Stoßzeit betrieben. Der während des Betriebs beider BHKW deutlich erhöhte Gasbedarf wird aus dem Gasspeichersack gedeckt, bis dieser entleert ist.

Tab. 8:	Herstellerans	gaben zum	530 kW	Gas-Otto-	Motor
100.01	1101 5101101 0117	5000011 20011	0001011	000 000	110000

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	MNW 530BG MAN
Hubraum	1	25,8
Zylinder	Stk.	12
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	k.A.
el. Leistung	kW	550 (530)
thermische Leistung	kW	bis 655
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k.A.
el. Wirkungsgrad	%	39,1
thermischer Wirkungsgrad	%	k.A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k.A.
Abgasbehandlung	-	n.v.

4.1.7 BHKW 7: 549 kW Gas-Otto-Motor (GOM 549)



Abb. 12: Ansicht der Container mit dem 549 kW Gas-Otto-Motor (siehe Teilbild rechts oben) und der thermischen Nachverbrennungseinheit CLAIR® (links oben)

Dieses BHKW läuft im Dauerbetrieb mit Biogas aus Maissilage und Zuckerrüben. Die thermische Nachverbrennungseinheit (siehe Kap. 3.2.2) eliminiert CH₄ im Abgas.

Tab. 9: Herstellerangaben zum 549 kW Gas-Otto-Motor²

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	GE Jenbacher JMS 312
Hubraum	1	29,2
Zylinder	Stk.	12
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	$m^{3} h^{-1}$	260
el. Leistung	kW	526 (544 nach ISO-Standard)
thermische Leistung	kW	558
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	1.301
el. Wirkungsgrad	%	40,4
thermischer Wirkungsgrad	%	42,9
Gesamtwirkungsgrad	%	83,3
Abgasbehandlung	-	Thermische Nachverbrennung CLAIR®

² Angaben zum selben Motor, ausgelegt für 526 kW.



4.1.8 BHKW 8: 265 kW Zündstrahlmotor mit Abgasturbine (ZSM 265)

Abb. 13: Ansicht des 265 kW Zündstrahlmotors vor Ort

Dieser einzige gemessene Zündstrahlmotor (Abb. 13 und Tab. 10) verfügt über eine nachgeschaltete Abgasturbine mit Generator und wird im Dauerbetrieb gefahren. Das Aggregat erzielt laut Herstellerangabe den höchsten el. Wirkungsgrad unter den gemessenen Motoren. Dieses Objekt wurde aus dem Vorgängerprojekt übernommen. Auf der Biogasanlage (Einsatzstoffe: Kleegras, Maissilage und Hühnerkot) läuft als weiterer Motor das Aggregat Nr. 6 (siehe Kap. 4.1.6) im Intervallbetrieb.

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	ZS265GT-V5
Hubraum	1	11,7
Zylinder	Stk.	6 (Reihenmotor)
Nenn-Gasverbrauch bei 50 % CH ₄	m ³ h ⁻¹	108 (Biodiesel als Zündöl)/104 (Pflanzenöl als Zündöl)
el. Leistung	kW	265 (davon 30 Gasturbine)
thermische Leistung	kW	192
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k.A.
el. Wirkungsgrad	%	46,3 (Korrektur für Aufstellbedingungen, ohne Kraftstoffkorrektur)
thermischer Wirkungsgrad	%	k.A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k.A.
Abgasbehandlung	-	Oxi-Kat

Tab. 10: Herstellerangaben zum 265 kW Zündstrahlmotor

4.1.9 BHKW 9: 30 kW Mikrogasturbine (MGT 30)



Als Vorteile von Mikrogasturbinen gegenüber Hubkolbenmotoren werden der geringe Verschleiß und die niedrigen Emissionswerte genannt. Wegen des vergleichsweise schlechten el. Wirkungsgrades finden Mikrogasturbinen in der Biogasbranche bisher jedoch kaum Verwendung und so konnte kein geeignetes Untersuchungsobjekt auf einer Biogasanlage gefunden werden.

Diese 30 kW Mikrogasturbine (Foto links) wird auf einer kommunalen Kläranlage betrieben, welche das Abwasser von ungefähr 11.800 Haushalten behandelt (Kapazität 18.000 Haushalte). Im Vergleich zu Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen weist das Klärgas mit 60 bis 65 % einen deutlich höheren Methangehalt auf.

Abb. 14: Ansicht der 30 kW Mikrogasturbine

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	CAPSTONE C-30
Nenn-Gasverbrauch	$m^{3} h^{-1}$	k.A.
el. Leistung	kW	30 (28 mit Verdichter)
thermische Leistung	kW	68
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	210
el. Wirkungsgrad	%	26 (24 mit Verdichter)
thermischer Wirkungsgrad	%	k.A.
Gesamtwirkungsgrad	%	85 (83,4 mit Verdichter)
Abgasbehandlung	-	n.v.

 Tab. 11: Herstellerangaben zur 30 kW Mikrogasturbine (für Erdgas)



4.1.10 BHKW 10: 65 kW Mikrogasturbine (MGT 65)

Abb. 15: Ansicht der 65 kW Mikrogasturbine vor Ort

Die Kläranlage in Dachau ist im Vergleich zu der Anlage in Ebersberg (siehe Kap. 4.1.9) größer dimensioniert und behandelt bei einer maximalen Kapazität von 90.000 Einwohner-Gleichwerten derzeit das Abwasser von ca. 60.000 Haushalten. Neben einem Heizkessel sind drei Mikrogasturbinen mit jeweils 65 kW elektrischer Leistung installiert, die bei Bedarf zu-/abgeschaltet werden. Der Eigenbedarf an Wärme kann somit vollständig gedeckt werden, während bei Volllast aller Aggregate sogar ein kleiner Teil an Überschussstrom ins Netz eingespeist wird. Im Projekt wurde eine der drei Mikrogasturbinen gemessen (Abb. 15, Tab. 12).

Kennwert	Einheit	Angaben nach Hersteller
Typbezeichnung	-	CAPSTONE C-65
Nenn-Gasverbrauch	$m^{3} h^{-1}$	k.A.
el. Leistung	kW	65 (61 mit Verdichter)
thermische Leistung	kW	126
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k.A.
el. Wirkungsgrad	%	29 (27 mit Verdichter)
thermischer Wirkungsgrad	%	k.A.
Gesamtwirkungsgrad	%	85 (83,4 mit Verdichter)
Abgasbehandlung	-	n.v.

Tab. 12: Herstellerangaben zur 65 kW Mikrogasturbine (für Erdgas)

4.2 Hilfseinrichtungen/Nebenaggregate

Für die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades ist nach DIN 3046-1 die erzeugte elektrische Energie um den Strombedarf der Hilfseinrichtungen zu korrigieren, welche für den dauernden oder wiederholten Betrieb des Motors notwendig sind. Als Hilfseinrichtungen in diesem Sinne wurden die folgenden Aggregate betrachtet:

- Gasverdichter,
- Motorkühlkreispumpe und
- Gemischkühlpumpe.

Nicht als Hilfseinrichtungen gelten mechanisch angebundene Ausrüstungsteile wie Turbolader, ohne die der Motor seine angegebene Leistung nicht erbringen kann. Ebenfalls nicht betrachtet werden Nebenaggregate wie Raumlüfter und Notkühler, da diese keine durchgängige Verwendung haben und nicht für den Erhalt des Wirkungsgrades maßgeblich sind.

Um den el. Energiebedarf der Hilfseinrichtungen zu ermitteln, wurden verschiedene Herangehensweisen gewählt. Wenn möglich wurde der Strombedarf der Hilfseinrichtungen im Schaltschrank des BHKW abgegriffen. Falls ein Stromzähler vorhanden war, wurde dieser zum Vergleich abgelesen. Im Gegensatz zu den Kolbenmotoren hatten die Mikrogasturbinen einen Nettostromausgang, in dem alle Hilfseinrichtungen außer dem Gasverdichter bereits berücksichtigt waren.

Bei den Messungen wurde festgestellt, dass Teillast bei den Kolbenmotoren keine nennenswerte Auswirkung auf die Leistungsaufnahme der Hilfseinrichtungen hatte (Tab. 13). Bei den Mikrogasturbinen hingegen konnten im Teillastbereich diesbezüglich deutliche Unterschiede festgestellt werden, wobei keine einheitliche Tendenz erkennbar war.

Nr.	Motortyp	El. Nennleistung, kW		Anteil Eigenverbrauch, % bei x % Last		
		Aggregat	Hilfsaggregate	100	80	60
1		75	4,10	5,5	6,8	9,1
2		190	6,30	3,3	4,1	5,5
3		250	7,20	2,9	3,6	4,8
4	Gas-Otto-Motor	250 (BR)	3,14	1,3	1,6	2,1
5		360	9,37	2,6	3,3	4,3
6		530	7,19	1,4	1,7	2,3
7		549	6,12	1,1	1,4	1,9
8	Zündstrahlmotor	265	4,81	1,8	2,3	3,0
9	Mikrogasturbine	30	7,78/4,03/3,29*	25,9	16,8	18,3
10		65	4,55/2,24/2,69*	7,0	4,3	6,9

Tab. 13: Übersicht über die gemessene Leistungsaufnahme und den Eigenbedarfsanteilder BHKW-Hilfseinrichtungen

*) bei Volllast/80 % Last/60 % Last

Leistungsschwächere Aggregate wiesen tendenziell einen höheren Eigenstrombedarf auf. Die Leistungsaufnahme der Hilfseinrichtungen unterschied sich auch bei ähnlicher BHKW-Nennleistung, da manche Hilfsaggregate mechanisch angetrieben oder großzügiger ausgelegt wurden. Insgesamt lag die tatsächliche Leistungsaufnahme der Hilfseinrichtungen knapp unterhalb der Nennwerte in den Schaltplänen. Die Ausnahme stellte die Motorkühlkreispumpe des GOM 360 dar, welche offenbar größer dimensioniert wurde als im Schaltplan angegeben. Der Hersteller wurde dahingehend informiert und hat reagiert: Aufgrund dieser Feststellung erfolgte eine Umrüstung der Pumpe vom Typ TP65-340/2 auf die neue Variante TP-65-210/2 mit einer um 2,6 kW geringeren Leistungsaufnahme. Dies wird zukünftig zu einer Erhöhung des el. Wirkungsgrades führen.
5 Methodik

Im Folgenden wird die Durchführung und Auswertung der Messungen an den in Kap. 4 beschriebenen Untersuchungsobjekten erläutert. Alle Untersuchungsobjekte befanden sich auf Biogas- bzw. Klärgasanlagen in Bayern.

5.1 Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Das hier beschriebene Messprogramm wurde seit Herbst 2014 halbjährlich durchgeführt. Damit liegen für alle Aggregate Ergebnisse von vier Messkampagnen vor. Zur Beginn jeder Messung wurden die Betriebsstunden des Aggregates sowie das Datum notiert, wie in Tab. 14 aufgelistet. Die Mikrogasturbinen sowie GOM 530 weisen für den Beobachtungszeitraum weniger Betriebsstunden als die übrigen Aggregate auf, da diese nicht im Dauerbetrieb liefen.

Messtermine:	1. Messung (M1)		2. Messu	ing (M2)	3. Messu	ung (M3)	4. Messung (M4)		
	Bstd.	Datum	Bstd.	Datum	Bstd.	Datum	Bstd.	Datum	
GOM 75	2.249	13.10.2014	7.809	03.06.2015	11.829	19.11.2015	16.254	24.05.2015	
GOM 190	13.467	15.10.2014	19.063	17.06.2015	22.489	18.11.2015	28.986	31.03.2016	
GOM 250	51.295	13.01.2015	54.070	13.05.2015	57.039	16.09.2015	61.705	30.03.2016	
GOM 250 BR	13.467	15.10.2014	19.063	17.06.2015	22.489	18.11.2015	26.695	25.05.2016	
GOM 360	10.165	12.11.2014	15.936	15.07.2015	19.021	25.11.2015	21.903	29.03.2016	
GOM 530	1.810	30.03.2015	2.204	26.05.2015	3.762	09.12.2015	4.830	15.04.2016	
GOM 549 ¹	2.659	26.11.2014	6.177	22.04.2015	7.016	27.05.2015	10.511	21.10.2015	
ZSM 265 ²	37.653	27.10.2015	40.096	21.07.2015	42.720	08.12.2015	45.380	15.04.2016	
MGT 30	22.935	27.10.2014	25.518	18.03.2015	28.141	17.11.2015	30.122	10.05.2016	
MGT 65	5.256	17.11.2014	7.701	09.03.2015	11.524	14.10.2015	15.865	12.05.2016	

Tab. 14: Messtermine und Betriebsstunden (Bstd.) bei Beginn der jeweiligen Messung

¹) zusätzliche Messung bei 14.875 Betriebsstunden (Datum: 20.04.2016); ²) vorausgegangene Messungen in 2012 bei 16.480 und 17.520 Betriebsstunden

Grundsätzlich wurden alle Motoren auf verschiedenen Laststufen gemessen. Diese waren in der Regel: 100 % Last (Volllast), 80 % und 60 % Last (Teillast). In Einzelfällen wurden abweichende Teillaststufen gemessen, die individuell realisiert wurden oder bestimmte Grenzwerte aufzeigen sollten. Nach Aufbau und Vorbereitung der Messinstrumente wurde jede Laststufe jeweils für eine Stunde gemessen. Sofern dies von Seiten des Betreibers und der Betriebsbedingungen möglich war, wurde zudem das BHKW kurzzeitig abgeschaltet und wieder hochgefahren, um den Start-Stopp-Betrieb auswerten zu können.

5.2 Anwendung der Messinstrumente

Im Folgenden wird die im Rahmen des Projekts verwendete Messtechnik beschrieben. Tab. 15 gibt eine Übersicht über die Messinstrumente für die Ermittlung des el. Wirkungsgrades.

Tab. 15: Verwendete Messinstrumente und erhobene Messgrößen zur Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrades

Messgerät (Hersteller)	Messgröße	Messein- heit	Genauigkeit (Herstelleran- gaben)	Zustrom / Abstrom
AWIFLEX (Awite Bioenergie GmbH, Langenbach)	Volumenkonzent- ration von CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2S im Biogas	%	± 0.02 % (CH ₄)	Zustrom
Drucksensor Typ PTB 100 A (ATP – Messtechnik GmbH, Kappel- Grafenhausen)	Druck in der Bio- gasleitung	mbar	± 0.3 hPa bei 20 °C; ± 1 hPa bei 0 bis +60 °C; ± 2 hPa bei -20 bis +60 °C	Zustrom
Temperaturfühler PT 100 (FühlerSysteme eNET International GmbH, Nürnberg)	Biogastemperatur	°C	$\pm (1/3 \cdot (0,30 \ ^{\circ}\text{C} + 0,005 \ \text{T}))$	Zustrom
Multimess Netzanalysa- tor ³ (KBR GmbH, Schwabach)	Leistung/ Produzierte Strommenge	kW/kWh	± 0.5 %	Abstrom
C.A. 8335 (Chavaux Arnoux, Paris)	Produzierte Strommenge	kW/kWh	± 0.5 %	Abstrom

Für die Erfassung der Biogasmengen wurden die vor Ort installierten Gaszähler verwendet (Tab. 16). Soweit möglich wurde die Gasmenge unter Betriebsbedingungen abgelesen und mittels eigener Messungen auf Normbedingungen umgerechnet. Es gab jedoch Ausnahmen bei Gaszählern (z.B. thermischer Gaszähler), welche durch eigene Rechenweise nur den Gasverbrauch unter Normgasbedingungen angeben können. In diesem Fall wurden die Angaben unter Normgasbedingungen direkt übernommen.

³ (Baujahr 1995) – keine Modellbezeichnung

	Messprinzip	Messgerätbezeichnung (Hersteller)	Genauigkeit (Herstel- lerangaben)
GOM 75	Thermischer Massestrom- messer	COMBIMASS® GA-S (Binder GmbH, Ulm)	$\leq \pm 1,0 \%$ v. M. (bei 50 Vol.%)
GOM 190	Oszillation	GD 100 Fluidistor-Durchflussmesser (Elster GmbH, Mainz)	± 1,5 % v. M.
GOM 250	Drall-Durch- flussmesser	Trio-Wirl-ST 4 (ABB Automation Products GmbH, München)	$\leq \pm 0,5 \%$ v. M.
GOM 250 BR	Wirbelstrom- Durchfluss- messer	Trio-Wirl-VT 4 (ABB Automation Products GmbH, München)	$\leq \pm 1,0 \%$ v. M.
GOM 360	Wirbelstrom- Durchfluss- messer	Trio-Wirl-VT 4 (ABB Automation Products GmbH, München)	$\leq \pm 1,0$ % v. M.
GOM 530	Wirbelstrom- Durchfluss- messer	Vortex Strömungssensor VA40 (Höntzsch GmbH, Waiblingen)	< 1,0 % v. M. + 0.03 m·s ⁻¹ v. E.
GOM 549	Thermischer Massestrom- messer	COMBIMASS® Eco (Binder GmbH, Ulm)	$\leq \pm 1,0 \% v. M. + 0,1 \%$ v.E.
ZSM 265	Wirbelstrom- Durchfluss- messer	Trio-Wirl-VT 4 (ABB Automation Products GmbH, München)	$\leq \pm 1,0 \%$ v. M.
MGT 30	Turbinenrad- gaszähler	MZ 50 (Itron Holding Germany GmbH, Karlsruhe)	$\leq \pm 1,5 \%$ v. M.
MGT 65	Wirbelstrom- Durchfluss- messer	Vortex Strömungssensor, VA DI 100 (Höntzsch GmbH, Waiblingen)	$\leq \pm 1,0 \% v. M. + 0,3 \%$ v. E.

Tab. 16: An den BHKW installierte Messinstrumente zur Erfassung der Biogasmenge

Für die Analyse der BHKW-Abgase wurden die in Tab. 17 genannten Messinstrumente eingesetzt. Da mit dem Flammenionisationsdetektor (FID) nur die Gesamtheit der im Abgas enthaltenen Kohlenwasserstoffe erfasst werden kann, wurde zur direkten Bestimmung des Methanschlupfs ein Methan Cutter der Firma JUM Engineering GmbH, Karlsfeld beschafft und in der letzten Messkampagne eingesetzt. Der Methan Cutter verfügt über Katalysatoren, die nur das Methan durchlassen, so dass dieses anschließend im Abgas des Methan Cutters mit dem FID gemessen werden kann (Abb. 16).

Tab. 17: Messinstrumente zur Analyse der BHKW-Abgase

Messgerätbezeichnung (Hersteller)	Messwert	Mess- einheit	Genauigkeit (Herstellerangaben)
ecom-J2KN-pro (rbr Messtechnik GmbH, Iserlohn)	Volumenkonzentration von CO, CO ₂ , O ₂ , NO _{x;} Temperatur	mg m ^{-3/} %; °C	± 2 %
Flammenionisationsdetektor (JUM Engineering GmbH, Karlsfeld)	Gesamtheit der Kohlenwas- serstoffe	mg m ⁻³	< ± 1 ppm



Abb. 16: Fließschema des Methan Cutters Model 900 (Bild: J.U.M. Engineering GmbH)

In Abb. 17 ist der gesamte Messaufbau skizziert. Der Zustrom des Biogases zum BHKW wurde nach der Kühlung gemessen. Für die Umrechnung der Gas-/Methanmenge auf Normbedingungen wurden der Gasdruck, die Gastemperatur sowie der volumetrische Gehalt von Methan im Biogas gemessen. Da der Gasanalysator über einen eigenen Kühler verfügt, wurde der Wassergehalt im Biogas nachträglich berechnet.



Abb. 17: Skizze zum Messaufbau

5.3 Auswertung der Messdaten

5.3.1 Elektrischer Wirkungsgrad

Im Gegensatz zum Hersteller, welcher den Wirkungsgrad am Motorprüfstand ermittelt, wurden im Projekt ausschließlich Vor-Ort Messungen an BHKW-Aggregaten in der Praxis durchgeführt. Bei diesen Messungen ist man den gegenwärtigen Umgebungsbedingungen sowie den gegebenen Motoreinstellungen ausgesetzt. Hinzu kommt, dass die DIN ISO 3046-1 vorgibt, "dass die obere Grenzabweichung für den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei Nennleistung 5 % beträgt, wenn es nicht anders angegeben ist". Diese Anpassung ermöglicht es dem Hersteller, den spezifischen Kraftstoffverbrauch um fünf Prozentpunkte nach unten zu korrigieren, was den el. Nenn-Wirkungsgrad um bis zu zwei Prozentpunkte erhöhen kann. Dies muss für den Vergleich von Praxiswerten und Herstellerangaben berücksichtigt werden.

Der el. Wirkungsgrad in Prozent wurde aus dem Verhältnis zwischen der erzeugten und der eingesetzten Energiemenge nach folgender Formel berechnet:

 $\frac{W_{el,Generator} - W_{el,Eigenbedarf}}{V_N \cdot Methangehalt \cdot unterer \ Heizwert(Methan)}$

Die zu ermittelnde Nettostromabgabe errechnet sich aus der Differenz des Generatorstroms, $W_{el,Generator}$ und des Strombedarfs der Hilfseinrichtungen, $W_{el,Eigenbedarf}$. Die eingesetzte Energiemenge berechnet sich aus dem zugeführten Biogasvolumen unter Normbedingungen, V_N mal Methangehalt mal unterer Heizwert von Methan (= 9,97 kWh m⁻³). Die Umrechnung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Biogasmenge auf Normbedingungen erfolgte nach der allgemeinen Gasgleichung:

$$V_N = \frac{V_M \cdot p_M \cdot T_N}{T_M \cdot p_N}$$

Mit: V_M = gemessenes Gasvolumen (Betriebsbedingungen), m³

 p_M = gemessener Gasdruck (Betriebsbedingungen), hPa

 T_M = gemessene Gastemperatur (Betriebsbedingungen), K

 V_N = Gasvolumen unter Normbedingungen, m³

 p_N = Normdruck = 1013,25 hPa

 T_N = Normtemperatur = 273,15 K.

Je nach Aufstellungsort herrschen unterschiedliche äußere Bedingungen. Damit die Ergebnisse aller Motoren miteinander vergleichbar sind, ist eine Umrechnung auf Normbezugsbedingungen durchzuführen. Diese werden in der DIN ISO 3046-1 wie folgt angegeben:

- Luftdruck, p_0 : 1.000 hPa
- Temperatur, T_0 : 298 K
- relative Luftfeuchte: 30 %
- Ladeluftkühlmitteltemperatur: 298 K.

Aus diesen Werten wird nach folgender Formel je nach Motortyp ein k-Wert generiert, um das Verhältnis der induzierten Leistung zu ermitteln.

$$k = (R_1)^m \cdot (R_2)^n \cdot (R_3)^s = \left(\frac{p_x}{p_r}\right)^m \cdot \left(\frac{T_r}{T_x}\right)^n \cdot \left(\frac{T_{cr}}{T_{ex}}\right)^s$$

Mit: $p_x =$ Umgebungsdruck am Aufstellungsort in hPa

 T_r = Normbezugs-Umgebungslufttemperatur in K

 T_x = Umgebungslufttemperatur am Aufstellungsort in K

 T_{ex} = Umgebungs-Ladelufttemperatur am Aufstellungsort in K

m, n, s = Konstanten nach DIN 3046-1 (Verhältnisse für Gesamtdruck, Umgebungslufttemperatur und Ladeluft-Temperatur).

Mit dem errechneten k-Wert kann wiederum über eine Tabelle der Umrechnungsfaktor β bestimmt werden, um den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit vom mechanischen Wirkungsgrad zu korrigieren. Wenn im Zweifelsfall keine relative Luftfeuchte ermittelt werden kann, kann diese gemäß DIN 3046-1 auch vernachlässigt werden.

5.3.2 Emissionskonzentrationen

Die Konzentrationen der zu bewertenden Schadstoffe im Abgas wurden von den Messgeräten in der Einheit "ppm" = 10^{-6} ausgegeben und in Massenkonzentrationen in der Einheit mg m⁻³ umgerechnet. Die Massenkonzentration (mg m⁻³) ergibt sich aus der Volumenkonzentration durch Multiplikation mit der Dichte (g m⁻³) mal 1000. Für die Umrechnung wurde das molare Volumen unter Normbedingungen ("Normvolumen") für ideale Gase mit 22,4 m³ mol⁻¹ angenommen.

Der FID misst nur Kohlenstoffatome aus organischen Verbindungen und wurde zunächst mit Propan kalibriert. Für die Verwendung des Methan Cutters erfolgte später eine Kalibrierung mit Methan. Tab. 18 dokumentiert die verwendeten Werte für die molare Masse und die resultierende Dichte.

Stoff	Molare Masse, g mol ⁻¹	Normdichte, mg m ⁻³				
СО	28,01	1,250				
NO _x	46,01	2,054				
C ₃ H ₈	36,03 (C-Atome)	$1,607^4$				
CH ₄	12,01 (C-Atome)	$0,54^{3}$				

Tab. 18: Verwendete Werte der molaren Masse und Normdichte für die zu bewertenden
Schadstoffe im BHKW-Abgas

⁴ Umrechnung nach der idealen Gaskonstante

Gemäß TA Luft ist die Massenkonzentration auf Normbedingungen (1013,25 hPa/273,15 K), trockenes Gas und einen Bezugssauerstoffgehalt umzurechnen. Bei der CO- und NO_x-Messung wird das Wasser in einer Kühlstrecke für die Messung auskondensiert und die Umrechnung auf Normbedingungen und den Bezugssauerstoffgehalt erfolgt im Messgerät. Bei der Messung der THC mit dem FID waren keine Normierung und Korrektur für den Wassergehalt im Gas möglich. Die Umrechnung auf den Bezugssauerstoffgehalt erfolgte nach folgender Formel:

$$E_{BZS} = E_M \cdot \frac{21 - O_{BZS}}{21 - O_M}$$

Mit: E_{BZS} = Massenkonzentration bei Bezugssauerstoffgehalt, mg m⁻³

 E_M = gemessene Massenkonzentration (Betriebsbedingungen), mg m⁻³

 O_{BZS} = Bezugssauerstoffgehalt (= 5% für Kolbenmotoren, 15 % für Mikrogasturbinen)

 O_M = gemessener Sauerstoffgehalt im Abgas, %.

5.3.3 Methanschlupf

Der Methanschlupf von BHKW-Aggregaten ist definiert als das Verhältnis der mit dem Abgas freigesetzten, also nicht verbrannten Methanmenge zu der dem Motor zugeführten Methanmenge. Methan hat je nach Zeithorizont ein Treibhausgaspotenzial von 28 (über 100 Jahre) bis 84 (über 20 Jahre) und beeinflusst daher die THG-Bilanz der Energiebereitstellung aus Biogas in hohem Maße. Zudem stellt der Methanschlupf einen ökonomischen Verlust dar. Der Methanschlupf wurde nach folgender Formel berechnet:

$$Methanschlupf, \% = \frac{CH_4 \ bzw. THC \ im \ Abgas \cdot V_{Abgas}}{CH_4 \ im \ Biogas \cdot V_N} \cdot 100$$

Wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben, wurde die Biogasmenge auf Normbedingungen umgerechnet und mit dem Methananteil im Biogas multipliziert. Die Abgasmenge wurde über den Lambdawert und die Verbrennungsgleichung von Methan zurückgerechnet.

Der Restmethan-Gehalt im Abgas wurde mit dem FID bestimmt: während der ersten drei Messkampagnen näherungsweise als Gesamt-Kohlenwasserstoffe (THC), bei der vierten und letzten Messkampagne, als der Methan Cutter zur Verfügung stand, direkt als Methan.

5.3.4 Ermittlung des Lambda-Wertes

Mit dem Abgas-Messgerät ecom-J2KN-pro wurde neben den Analytkonzentrationen im Abgasstrom auch der Lambda-Wert ermittelt. Der Lambda-Wert repräsentiert das Verhältnis der zugeführten Sauerstoffmenge zu der für die stöchiometrische Verbrennung benötigten Sauerstoffmenge. Die mittleren Lambda-Werte lagen für die Kolbenmotoren insgesamt im Bereich von 1,3 bis 1,9, für die Mikrogasturbinen deutlich über 5.

Tab. 19: Während der Messungen ermittelte Lambda-Werte der zehn BHKW-Aggregate für Volllast ("100") und Teillast ("80"/"60")

	M1 ⁻¹	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4	M1	M2	M3	M4
	100	100	100	100	00	80	00	00	00	00	00	00
GOM 75	1,30	1,30	1,31	1,30	1,33	1,33	1,33	1,32	1,36	1,33	1,35	1,35
GOM 190	1,35	1,28	1,33	1,35	1,37	1,31	1,39	1,24	1,32	1,29	1,30	1,24
GOM 250	1,31	1,28	1,24	1,27	1,34	1,31	1,27	1,28	1,35	1,32	1,29	1,30
GOM 250 BR	1,67	1,63	1,68	1,66	1,63	1,64	1,67	1,65	1,62	1,65	1,63	1,62
GOM 360	1,60	1,64	1,66	1,67	1,57	1,59	1,62	1,63	1,54	1,57	1,59	1,60
GOM 530	1,37;	1,36;	n.v.;	n.v.;	1,42	1,43	1,41	1,42	1,42	1,42	1,43	1,43
	1,39 -	1,41 -	1,36	1,36								
GOM 549	1,51	1,50	1,53	1,59;	n.v.	1,47	1,49	1,57 ³	1,45	n.v.	n.v.	1,46
(th. Nachv.)				1,59 ³								
GOM 549	1,54	1,53	1,58	1,64;	n.v.	1,51	1,53	$1,62^{3}$	1,50	n.v.	n.v.	1,51
				1,64 °								
ZSM 265	1,45	1,30	1,54	1,55	1,62	1,46	1,67	1,64	1,84	1,67	1,87	1,86
MGT 30	7,40	7,37	7,55	7,87	7,37	7,53	7,75	7,87	8,40	8,26	8,45	8,45
MGT 65	5,70	5,59	5,71	5,54	6,64	5,99	5,82	5,75	6,09	6,36	6,24	6,33

¹) M1/2/3/4 = 1./2./3./4. Messung; ²) zusätzliche Messung bei 94 % Last; ³) zusätzlicher Messtermin; n.v. = nicht verfügbar (keine Messung); th. Nachv. = Messung mit Betrieb der thermischen Nachverbrennungseinheit

6 Ergebnisse

Zunächst werden die ermittelten Werte für den elektrischen Wirkungsgrad in der Gesamtschau vorgestellt, anschließend die Messergebnisse für die Abgaszusammensetzung einzeln für jedes BHKW-Aggregat. Die Messungen an einzelnen Abgasbehandlungseinrichtungen werden in einem gesonderten Kapitel dokumentiert.

6.1 Messergebnisse für den elektrischen Wirkungsgrad

Zur Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades wurden bei allen Anlagen auf den definierten Laststufen Messdaten zu den Energieströmen und den Emissionskonzentrationen erhoben. Die Konzentrationen der Hauptbestandteile des Biogases wurden während der Messungen an den BHKW mehrfach analysiert und schwankten in der Regel nur geringfügig (Für eine Zusammenfassung der Messwerte siehe Tab. 27 im Anhang). Tab. 20 fasst die gesamten Ergebnisse für den mittleren elektrischen Wirkungsgrad der BHKW unter Voll- und Teillast an den einzelnen Messterminen zusammen.

Tab. 20: Vor Ort gemessene elektrische Wirkungsgrade der zehn BHKW-Aggregate für Volllast ("100") und Teillast ("80"/"60")

	M1 ¹ 100	M2 100	M3 100	M4 100	M1 80	M2 80	M3 80	M4 80	M1 60	M2 60	M3 60	M4 60
GOM 75 ²	30,9	29,1	31,3	33,4	29,5	27,0	27,0	30,8	28,0	24,7	25,5	25,5
GOM 190	35,7	36,0	35,7	35,6	33,5	35,1	33,5	34,6	33,0	32,6	31,9	32,4
GOM 250	35,9	36,5	38,4	37,3	35,4	35,1	37,2	35,9	34,6	33,3	35,6	33,9
GOM 250 BR	42,1	43,0	42,0	43,2	39,9	41,7	40,8	41,6	37,1	39,7	38,9	38,8
GOM 360	38,4	38,3	38,0	38,1	37,3	37,2	36,6	37,4	35,2	35,6	35,2	35,7
GOM 530	37,6	36,8	36,9	35,8	35,2	35,3	35,3	33,5	32,8	32,4	32,5	31,4
GOM 549	39,6	36,5	36,7	37,9; 37,1 ³	n.v.	35,9	36,4	n.v.; 36,6 ³	37,5	n.v.	n.v.	35,1
ZSM 265 ⁴	43,2	41,3	42,4	42,5	41,4	40,4	41,7	41,9	35,8	37,3	35,9	35,9
MGT 30	21,5	22,8	21,5	18,5	19,7	22,4	20,3	18,3	18,6	20,5	18,8	16,5
MGT 65	25,4	25,8	22,3	20,4	21,6	25,2	21,5	19,4	21,6	22,2	19,4	16,5

¹) M1/2/3/4 = 1./2./3./4. Messung; ²) Bei der ersten Messung wurde statt bei 80 % bei 75 % sowie statt bei 60 % bei 50 % Last gemessen; ³) zusätzlicher Messtermin; n.v. = nicht verfügbar (keine Messung); ⁴) Vorausgegangene Messungen in 2012 ergaben unter Volllast einen el. Wirkungsgrad von 42,8 % (16.480 Betriebsstunden) bzw. 40,5 % (17.520 Betriebsstunden).

Teilweise wurden zwischen den einzelnen Messkampagnen vom Hersteller Wartungsmaßnahmen durchgeführt. Beispielsweise wurden beim GOM 250 BR vor der zweiten und vierten Messung die Vorkammern und weitere Einzelteile ausgetauscht und die Motoreinstellungen verändert. Zwischen der zweiten und dritten Messung wurden beim GOM 250 die Ventile ausgetauscht und Routine-Einstellungen vorgenommen. Vergleicht man hierzu die NO_x-Konzentration in Abb. 26, so lässt sich bei einem erhöhten el. Wirkungsgrad zeitgleich eine Erhöhung der NO_x-Konzentration feststellen. Beim ZSM 265 wurde zwischen der dritten und vierten Messung der Turbolader ausgetauscht. Als weiterer bedeutender Einflussfaktor auf die Messergebnisse ist die Umgebungstemperatur zu betrachten. Eine hohe Temperatur der Ansaugluft hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung und folglich den el. Wirkungsgrad insbesondere von Mikrogasturbinen.

Auffällig waren die Ergebnisse von Motoren mit eingebautem thermischem Massestromzähler. Bei der zweiten und dritten Messung der GOM 75 und GOM 549 wurde an wärmeren Tagen gemessen und ein erhöhter Gasverbrauch / ein geringerer Wirkungsgrad festgestellt. Im Gegensatz zu den mechanischen Gaszählern kann daher auf eine Sensibilität dieser Messtechnik für wärmere Umgebungstemperaturen aufgrund veränderter Gasfeuchte geschlossen werden. In Tab. 21 wurden die el. Wirkungsgrade unter Volllast sowie die jeweiligen Verluste unter Teillast in Mittelwerten zusammengefasst.

	Volllast: $\eta_{el}, \%$	80 % Last vs. Volllast: absolute Veränderung η_{el} , %-Punkte	60 % Last vs. Volllast: absolute Veränderung η_{el} , %-Punkte
GOM 75	31,2	-2,6	-5,3
GOM 190	35,8	-1,6	-3,3
GOM 250	37,1	-1,2	-2,7
GOM 250 BR	42,6	-1,6	-3,9
GOM 360	38,2	-1,1	-2,8
GOM 530	36,8	-2,0	-4,5
GOM 549	37,6	-1,2	n.a.
ZSM 265	42,3	-1,0	-6,1
MGT 30	21,1	-0,9	-2,5
MGT 65	23,5	-1,5	-3,5

Tab. 21: Mittlere gemessene elektrische Wirkungsgrade der BHKW unter Volllast und absolute Wirkungsgradabnahme unter Teillast

Aufgrund der Anforderungen in der Praxis waren BHKW-Aggregate bisher in der Regel so ausgelegt, dass sie unter Volllast ihren optimalen Betriebspunkt und höchstmöglichen el. Wirkungsgrad erreichten. Bei einer Drosselung der Leistung (Teillast) nimmt der el. Wirkungsgrad ab, was zu einem Anstieg des spezifischen Kraftstoffverbrauchs führt. Unter Volllast wurde für die untersuchten Kolbenmotoren mit einer el. Nennleistung von 190 bis 549 kW ein mittlerer maximaler el. Wirkungsgrad von 35,8 bis 42,3 % ermittelt. Mit el. Wirkungsgraden unter Volllast von über 42 % heben sich zwei Aggregate aus den Untersuchungsobjekten heraus: der GOM 250 BR und der ZSM 265. Die Mikrogasturbinen mit $P_{el} = 30$ kW bzw. $P_{el} = 65$ kW erreichten im Durchschnitt einen el. Wirkungsgrad von maximal 21,1 % bzw. 23,5 %.

Mit abnehmender Last gingen die gemessenen el. Wirkungsgrade in allen Fällen zurück: bei 80 % Last um 0,9 bis 2,6 Prozentpunkte, bei 60 % Last um 2,5 bis 6,1 Prozentpunkte. Unter den Kolbenmotoren zeigten der GOM 250 mit -2,7 Prozentpunkten und der GOM 360 mit -2,8 Prozentpunkten den vergleichsweise geringsten Wirkungsgradrückgang unter 60 % Last. Der ZSM 250 zeigte unter allen gemessenen Aggregaten den höchsten Wirkungsgradabfall zwischen 100 und 60 % Last (Tab. 21).

6.2 Abgaszusammensetzung und Methanschlupf

Die gemessenen Stoffkonzentrationen im Abgas unter Voll- und Teillast wurden für die Auswertung in die Einheit mg m⁻³ umgerechnet. Die zusammenfassende Darstellung der Messwerte je Motor und Messtermin erfolgt in Form jeweils eines Boxplots. Im Boxplot sind dargestellt: der Median sowie die zweiten und dritten Quartile der Messwerte als Rechtecke; der Mittelwert als Kreuz; die ersten und vierten Quartile als Whisker.

6.2.1 Emissionen des GOM 75 (ohne Abgasbehandlung)

Während der ersten Messung an dem 75 kW Gas-Otto-Motor wurde neben der Volllast zusätzlich 90 % Last gemessen. Zudem wurde die Teillast bei 75 % statt 80 % bzw. 50 % statt 60 % gemessen, ehe für die weiteren Messtermine die Laststufen vereinheitlicht wurden. Die gemessenen CO-Konzentrationen im Abgas dieses Motors stiegen von Messtermin zu Messtermin, also mit zunehmendem Alter des Motors an. Der Einfluss der Last auf die CO-Konzentrationen war hingegen wenig ausgeprägt (Abb. 18).



Abb. 18: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75 unter Vollund Teillast

Unter Volllast zeigte dieser Motor hohe NO_x -Konzentrationen im Abgas (Abb. 19). Unter Teillast gingen diese erwartungsgemäß deutlich zurück, da hierbei die Verbrennungstemperatur sank (erkennbar an der gemessenen geringeren Abgastemperatur). Der zweite Messtermin sticht durch eine sehr große Streuung der NO_x -Messwerte heraus. Bei dieser Messung traten deutliche Lastschwankungen auf, die sich unter Teillast noch verstärkten (Abb. 20). Grund dafür war eine Funktionsstörung des Turboladers (Drosselklappe).



Abb. 19: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75 unter Vollund Teillast



Abb. 20: Tatsächlicher Verlauf der Lastkurve (blau; gleitender Mittelwert: schwarz) von GOM 75 während der ersten Messung

Wie Abb. 21 zeigt, führten diese Lastschwankungen auch zu einer großen Streuung der THC-Konzentrationen. Die Kohlenwassserstoff-Emissionen stiegen mit abnehmender Last an. Entgegen dem steigenden Trend der ersten drei Messungen sanken die THC-Konzentrationen am vierten Messtermin auf allen Laststufen wieder ab.



Abb. 21: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 1 – GOM 75 unter Vollund Teillast

Wie die ersten Messung zeigte, war bei 50 % Teillast die Grenze erreicht, unterhalb derer der Motor nicht mehr unter optimalen Bedingungen lief: die THC-Konzentrationen im Abgas nahmen bei dieser Messung deutlich zu und schwankten stark.

6.2.2 Emissionen des GOM 190 (ohne Abgasbehandlung)

Auch bei diesem Aggregat stiegen die im Abgas gemessenen CO-Konzentrationen von Messtermin zu Messtermin und mit abnehmender Last an. Bei der vierten Messung war allerdings auf allen Laststufen ein deutlicher zusätzlicher Sprung zu verzeichnen (Abb. 22).

Bei den NO_x -Messwerten fallen zwei Messungen durch das sehr hohe Niveau und die extreme Streuung auf: der zweite Messtermin unter Volllast sowie der vierte Messtermin unter 60 % Last (Abb. 23). Am zweiten Messtermin erreichte die Maschine trotz Volllasteinstellung nur ca. 90 % Last, wobei die Motorleistung deutlich schwankte. Des Weiteren wurde ein etwas fetteres Gemisch (geringer Lambdawert) gefahren. Während der letzten Messung unter 60 % Last wurde der Motor ebenfalls bei niedrigem Lambdawert (1,24) betrieben. Bei den THC-Konzentrationen traten an den ersten drei Messterminen auffallend häufig Ausschläge nach oben auf. Auffällig war zudem die starke Streuung der Messwerte unter 80 % Teillast bei der ersten und dritten Messung. Abgesehen von diesen beiden Messungen war der Einfluss der Laststufe auf die THC-Konzentrationen wenig ausgeprägt. Am vierten Messtermin streuten die Messwerte deutlich weniger (Abb. 24).



Abb. 22: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190 unter Vollund Teillast



Abb. 23: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190 unter Voll- und Teillast



Abb. 24: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 2 – GOM 190 unter Voll- und Teillast

6.2.3 Emissionen des GOM 250 kW (mit Oxidationskatalysator)

Der 250 kW Gas-Otto-Motor mit Oxi-Kat erreichte unter Volllast CO-Werte um die 100 mg m⁻³ (Abb. 25). Ein eindeutiger Einfluss der Teillast auf die CO-Konzentrationen war nicht zu erkennen. Bei der dritten Messung war gegenüber der zweiten ein deutlicher Sprung der CO-Konzentrationen nach oben zu verzeichnen, bei der vierten Messung sanken diese hingegen wieder leicht ab.

Die an diesem Motor gemessenen NO_x -Werte waren generell auf sehr hohem Niveau, wobei für die dritte Messung wiederum ein zusätzlicher Sprung nach oben zu verzeichnen war (Abb. 26). Grund hierfür ist das sehr magere Gemisch. Mit steigendem Lambda-Wert unter Teillast sank dementsprechend das Niveau der NO_x-Konzentrationen deutlich ab.

Für die THC-Konzentration wurden wie bei GOM 190 während der ersten drei Messungen häufige Ausschläge nach oben festgestellt (Abb. 27). Insgesamt war das Konzentrationsniveau demjenigen des GOM 190 sehr ähnlich.



Abb. 25: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Vollund Teillast



Abb. 26: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Voll- und Teillast



Abb. 27: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 3 – GOM 250 unter Voll- und Teillast

6.2.4 Emissionen des GOM 250 BR (mit Oxidationskatalysator)

Beim 250 kW Gas-Otto-Motor mit BlueRail®-Technologie konnte auf niedrigem Konzentrationsniveau die Alterung des Oxi-Kats anhand der CO-Emissionen beobachtet werden. Die gemessenen CO-Werte im Abgas stiegen jeweils zwischen der ersten und zweiten bzw. der dritten und vierten Messung auf allen Laststufen ungefähr um den Faktor 5 an (Abb. 28). Zwischen der zweiten und dritten Messung wurde der Oxi-Kat erneuert. In Kapitel 6.3.1 werden diese Ergebnisse genauer erläutert. Teillast führte bei diesem Aggregat zu erkennbar geringeren CO-Konzentrationen an den einzelnen Messterminen.

Die NO_x -Werte sanken unter Teillast bei geringerem Lambda-Wert kaum (Abb. 29). In der dritten Messung war unter 60 % Teillast sogar ein deutlicher Anstieg zu vermerken. Im zeitlichen Verlauf stiegen die NO_x -Konzentrationen bis zur dritten Messung an, fielen in der vierten Messung jedoch deutlich ab. Bei der zweiten Messung traten unter Volllast und 80 % Last extreme Schwankungen der NO_x -Konzentration auf. Grund hierfür waren ungeeignete Zündkerzen, welche nicht mit den neu eingebauten Vorkammern harmonisierten, so dass häufige Zündaussetzer auftraten.

Die THC-Konzentrationen verhielten sich uneinheitlich, teils mit starken Ausschlägen nach oben oder nach unten (Abb. 29). Einem Anstieg der THC-Emissionen unter Teillast wurde durch einen veränderten Lambda-Wert entgegengewirkt.

Insgesamt zeigte dieser Motor bei Lambda-Werten zwischen 1,6 und 1,7 vergleichsweise hohe Kohlenwasserstoff-Emissionen, wohingegen die Stickoxid-Emissionen relativ gering waren. Die Messwerte für die BHKW 1 bis 3, die mit fetterem Gemisch betrieben wurden, lagen für NO_x deutlich höher und für Kohlenwasserstoffe niedriger.



Abb. 28: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 – GOM 250 BR unter Voll- und Teillast



Abb. 29: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 – GOM 250 BR unter Voll- und Teillast



Abb. 30: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 4 – GOM 250 BR unter Voll- und Teillast

6.2.5 Emissionen des GOM 360 (mit Oxidationskatalysator)

Der 360 kW Gas-Otto-Motor ist ebenfalls mit einem Oxi-Kat ausgestattet. Auch hier war anhand der steigenden CO-Konzentrationen ein Alterungseffekt des Katalysators erkennbar, allerdings schwächer ausgeprägt als beim GOM 250 BR (vgl. Abb. 31 und Abb. 28; für Details siehe Kapitel 6.3.1). Wie beim GOM 250 BR waren die CO-Konzentrationen im Abgas unter Teillast an allen Messterminen deutlich geringer. Mit Ausnahme der vierten Messung unter Volllast streuten die CO-Werte bei diesem Aggregat kaum.

Bei den gemessenen NO_x -Konzentrationen fiel der starke Abfall von der ersten zur zweiten Messung auf. Dieser konnte auf eine veränderte Motoreinstellung durch den Hersteller zurückgeführt werden. Im weiteren Verlauf stiegen die NO_x -Konzentrationen einheitlich an (Abb. 32). Unter Teillast und damit bei kleinerem Lambda-Wert konnten nur für die 60 % Laststufe signifikant niedrigere NO_x -Werte beobachtet werden. Der Lambda-Wert bewegte sich zwischen 1,5 und 1,7.

Die THC-Konzentrationen streuten bei diesem Motor relativ gleichförmig. Ein eindeutiger Einfluss der Last war nicht erkennbar (Abb. 33). Wie für BHKW 4 bereits festgestellt wurde, gehen hohe Kohlenwasserstoff-Konzentrationen in der Regel mit relativ geringen Stickoxid-Konzentrationen einher.



Abb. 31: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 – GOM 360 unter Vollund Teillast



Abb. 32: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 – GOM 360 unter Voll- und Teillast



Abb. 33: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 5 – GOM 360 unter Voll- und Teillast

6.2.6 Emissionen des GOM 530 (ohne Abgasbehandlung)

Der 530 kW Gas-Otto-Motor wurde auf Wunsch des Betreibers während der ersten drei Wiederholungen zusätzlich bei 94 % Last gemessen, da dies der hauptsächliche Betriebspunkt in der Praxis ist. Zum dritten Messtermin war aus technischen Gründen keine Volllastmessung möglich. Bei den an diesem Motor gemessenen CO-Konzentrationen fiel zunächst die tendenziell geringere Streuung der Messwerte unter Teillast gegenüber Volllast auf. Eine Ausnahme bildete hierbei die dritte Messung bei 94 % Last. Wie oben erwähnt, liegt dort der reguläre Betriebspunkt dieses Motors (ca. 498 kW). Wurde die Maschine auf Volllast gefahren, zeigten stärker schwankende CO- und NO_x-Werte instabile Verbrennungsverhältnisse an (Abb. 34 und Abb. 35).

Unter 80 % und 60 % Last waren die CO-Konzentrationen tendenziell stabiler und höher, die NO_x -Konzentrationen deutlich geringer als bei/nahe der Volllast (Abb. 35). Der THC-Gehalt im Abgas nahm unter Teillast zu, wobei die vierte Messung durch ein deutlich geringeres Niveau der Kohlenwasserstoffemissionen auffiel (Abb. 36).



Abb. 34: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 – GOM 530 unter Vollund Teillast



Abb. 35: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 – GOM 530 unter Voll- und Teillast



Abb. 36: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 6 – GOM 530 unter Voll- und Teillast

6.2.7 Emissionen des GOM 549 (mit thermischer Nachverbrennung)

Der 549 kW Gas-Otto-Motor ist mit einer thermischen Nachverbrennung (CLAIR®) ausgestattet. Um den Effekt der Abgasbehandlung zu untersuchen, wurde jeweils mit und ohne Betrieb der thermischen Nachverbrennungsanlage gemessen, so dass nur zwei Laststufen je Messtermin möglich waren. Deshalb wurde ein fünfter Messtermin anberaumt. Während an jedem Termin unter Volllast gemessen wurde, wurden die Teillaststufen gewechselt. Somit stehen Ergebnisse für drei Wiederholungsmessungen bei 80 % Last und zwei bei 60 % Last zur Verfügung.

Nach Abgasbehandlung lagen die gemessenen CO-Werte im Mittel auf niedrigem bis sehr niedrigem Niveau. Eine Ausnahme bildete die erste Messung, während der die Betriebstemperatur der thermischen Nachverbrennungseinheit noch nicht erreicht war (Abb. 37). Während des Aufheizvorgangs kommt es in einem gewissen Temperaturbereich zu einer Teiloxidation von Methan zu CO. Die CO-Konzentration im behandelten Abgas steigt daher temporär an und sinkt erst nach dem Erreichen der Betriebstemperatur wieder ab (wenn die thermische Aktivierungsenergie bei der geometrisch bedingten Verweildauer ausreicht⁵).

Dieser Aufwärmvorgang ist auch nach einem längeren Stillstand der CLAIR®-Einheit notwendig. Beim Umschalten zwischen den Reaktionskammern kam es ebenfalls zu einem kurzzeitigen Anstieg der CO-Konzentration im Abgas, was zu den in Abb. 37 erkennbaren Ausschläge nach oben führte. Sobald die Abgasbehandlung abgeschaltet wurde, stiegen die CO-Konzentrationen um einen Faktor von fünf bis acht an.



Abb. 37: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549 unter Vollund Teillast mit/ohne thermische Nachverbrennung der Abgase

⁵ nach Auskunft durch GE Jenbacher GmbH & Co OG am 07.06.2016



Abb. 38: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549 unter Voll- und Teillast mit/ohne thermische Nachverbrennung der Abgase

Auf die NO_x -Konzentrationen hatte die thermische Nachverbrennung auf allen Laststufen keinen eindeutigen Effekt. Am dritten Messtermin streuten die NO_x -Werte außergewöhnlich stark (Abb. 38). Es wird vermutet, dass es während dieser Messung zu Zündaussetzern kam.

Abb. 39 zeigt eindrücklich die vollständige Oxidation von Kohlenwasserstoffen im Abgas durch die thermische Nachverbrennung. Damit dieses System funktioniert, ist allerdings ein relativ hoher Methanschlupf erforderlich. Dies wird an den gemessenen THC-Konzentrationen deutlich, die nach Abschaltung der CLAIR®-Einheit gemessen wurden. Unter Volllast lagen diese im Bereich von 800 bis 1000 mg m⁻³. Während bei 80 % Last keine Erhöhung der THC-Werte erkennbar war, stiegen diese bei 60 % Last merklich an. Die extrem starke Streuung der THC-Konzentrationen bei 80 % Teillast während der zweiten Messung war mit geringerer Ausprägung auch an den CO-Werten erkennbar.



Abb. 39: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 7 – GOM 549 unter Voll- und Teillast mit/ohne thermische Nachverbrennung der Abgase

6.2.8 Emissionen des ZSM 265 (mit Oxidationskatalysator)

An den ersten beiden Messterminen funktionierte der Oxi-Kat an dem 265 kW Zündstrahlmotor einwandfrei, so dass im Abgas kaum CO gemessen werden konnte (Abb. 40). Zwischen der zweiten und dritten Messung gelang Zündöl in den Abgastrakt und brannte ein Loch in die Füllschicht des Katalysators, was in dessen Komplettausfall resultierte (siehe hierzu auch Abb. 54 und Abschnitt 6.3.1). Nach dem Einbau eines neuen Oxi-Kat war der CO-Wert bei der vierten Messung zwar wieder deutlich niedriger, zeigte jedoch bereits eine erneute Alterung des Katalysators an.

Bei der zweiten Messung unter Volllast deuteten die gemessenen Abgastemperaturen auf eine erhöhte Verbrennungstemperatur hin, was zu einer stärkeren thermischen Belastung des Oxi-Kats geführt haben könnte. Die hohen NO_x -Werte unter Volllast sind durch den niedrigen Lambda-Wert von 1,30 erklärbar, welcher bei den übrigen Messungen unter Volllast im Bereich von 1,45 bis 1,55 lag (Abb. 41).

Bei höherem Lambda-Wert unter Teillast nahmen die NO_x -Konzentrationen ab und die THC-Konzentrationen zu (Abb. 41 und Abb. 42), letztere überproportional bei 60 % Last. Der Lambda-Wert stieg auf dieser Laststufe bis auf 1,87.



Abb. 40: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 – ZSM 265 unter Vollund Teillast



Abb. 41: Gemessene NO_x-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 – ZSM 265 unter Vollund Teillast



Abb. 42: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 8 – ZSM 265 unter Vollund Teillast

6.2.9 Emissionen der MGT 30

(Mikro-)Gasturbinen weisen grundsätzlich andere technologische Eigenschaften als Hubkolbenmotoren. Entsprechend sind nach TA Luft 2002 die Abgaskonzentrationen für diese Aggregate auf einen Bezugssauerstoffgehalt von 15 % umzurechnen (gegenüber 5 % bei Kolbenmotoren). Die gemessenen Sauerstoffgehalte im Abgas der Mikrogasturbinen erreichten Werte bis zu 18 %.

Im Abgas der 30 kW Mikrogasturbine lagen die gemessenen CO-Konzentrationen bei allen Betriebsbedingungen unter 50 mg m⁻³ (Abb. 43). Solch niedrige Werte wurden von Kolbenmotoren nur mit neuem Oxi-Kat erreicht. Weshalb die CO-Werte bei der 30 kW Mikrogasturbine unter 80 % Teillast etwa doppelt so hoch lagen, wie auf den beiden anderen Laststufen, konnte nicht geklärt werden. Die THC-Emissionen zeigten dasselbe Verhalten wie die CO-Emissionen, auch was die Streuung anging (Abb. 44). NO_x konnte im Abgas der MGT 30 zwar nachgewiesen, aber nicht quantitativ bestimmt werden⁶. Lediglich bei 60 % Teillast konnte ein Wert von 7 mg m⁻³ bestimmt werden.

⁶ Die Bestimmungsgrenze des NO_x -Sensors liegt bei ca. vier bis fünf ppm, entsprechend einer Massenkonzentration unter den gegebenen Bedingungen von ca. einem mg m⁻³.



Abb. 43: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 9 – MGT 30 unter Vollund Teillast



Abb. 44: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 9 – MGT 30 unter Vollund Teillast

6.2.10 Emissionen der MGT 65

Im Gegensatz zur kleineren MGT 30 wies die 65 kW Mikrogasturbine ein den Kolbenmotoren ähnliches Verhalten der CO-Konzentrationen im Abgas auf: bei Teillast stiegen die CO-Konzentrationen im Abgas gegenüber Volllast deutlich an (Abb. 45). Das Niveau der CO-Konzentration lag im Vergleich zur kleineren Mikrogasturbine höher, aber meist unter 100 mg m⁻³. Die NO_x-Konzentration lag in allen Messungen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Am ersten Messtermin fielen bei 60 % Last Extremwerte der CO-Konzentration auf, die nicht erklärt werden konnten. Während der vierten Messung unter Volllast wurde wegen der heißen Außentemperaturen jeweils in einem Zeitintervall von wenigen Minuten eine aktive Kühlung der Ansaugluft zu-/abgeschaltet. Ansonsten hätte der Motor nicht auf Volllast betrieben werden können. Die abwechselnde Zu-/Abschaltung der Kühlung führte zu Schwankungen der Turbinenleistung zwischen 60 und 65 kW, was wiederum eine größere Streuung der CO-Werte während dieser Messung verursachte (Abb. 45).

Die THC-Konzentrationen waren unter Volllast stets und bei 80 % Last an den ersten beiden Messterminen sehr niedrig (< 50 mg m⁻³; Abb. 46). Bei 60 % sprangen diese nach oben und erreichten bei der dritten Messung im Mittel nahezu 1600 mg m⁻³. Offenbar war die Verbrennung in der Mikrogasturbine auf dieser Laststufe nicht mehr effektiv.



Abb. 45: Gemessene CO-Konzentrationen im Abgas von BHKW 10 – MGT 65 unter Vollund Teillast



Abb. 46: Gemessene THC-Konzentrationen im Abgas von BHKW 10 – MGT 65 unter Voll- und Teillast

6.2.11 Korrelation zwischen Kohlenwasserstoff- und Stickoxid-Konzentrationen im Abgas

Für die Betrachtung der Korrelation zwischen den Kohlenwasserstoff- und Stickoxid-Konzentrationen im Abgas der BHKW wurden diese entsprechend dem während der Messung festgestellten Lambda-Wert klassifiziert. Es wird ersichtlich, dass bei den mit fetterem Gemisch betriebenen Aggregaten (Lambda < 1,49) tendenziell niedrige THC-Konzentrationen mit hohen bis sehr hohen NO_x -Konzentrationen einhergingen. Bei den Magermotoren waren die Verhältnisse umgekehrt (Abb. 47).



Abb. 47: Korrelation der mittleren gemessenen NO_x- und THC-Konzentration im Abgas der zehn BHKW klassifiziert nach Lambda-Wert

Werte oberhalb von 1500 mg m⁻³ THC bzw. 2000 mg m⁻³ NO_x wurden nur in wenigen Fällen gemessen. Das gegenläufige Verhalten der THC- und NO_x-Konzentrationen in Abhängigkeit vom Lambda-Wert ließ sich während der Messungen gut beobachten, wenn die Lambda-Werte im Teillastbereich anstiegen.

6.2.12 Methanschlupf

Während der ersten drei Messkampagnen wurde die THC-Konzentration im Abgas mit dem FID gemessen und daraus der Methanschlupf näherungsweise berechnet. Ab der vierten Messkampagne stand der Methan Cutter zur Verfügung, so dass die Restmethankonzentration im Abgas direkt gemessen werden konnte (siehe Kapitel 6.2.13). Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden in Tab. 22 ausschließlich die auf Basis der THC-Analyse näherungsweisen ermittelten Werte für den Methanschlupf für alle Messreihen gegenübergestellt (Der aus der Näherung resultierende Fehler wird im folgenden Kapitel diskutiert).

	M1 ¹ 100	M2 100	M3 100	M4 100	M1 80	M2 80	M3 80	M4 80	M1 60	M2 60	M3 60	M4 60
GOM 75 ²	0,78	0,86	0,92	0,74	0,91	1,1	0,99	0,93	1,1	1,3	1,2	1,2
GOM 190	0,32	0,15	0,17	0,24	0,74	0,23	0,81	0,18	0,38	0,44	0,35	0,26
GOM 250	0,3	0,29	0,35	0,34	0,35	0,33	0,31	0,30	0,52	0,52	0,43	0,42
GOM 25 BR	1,5	1,4	1,7	1,2	1,5	1,7	1,9	1,4	1,9	2,0	2,5	1,6
GOM 360	2,5	2,6	2,7	2,3	2,6	2,5	2,6	2,4	2,7	2,4	2,7	2,5
GOM 530	0,35	0,35	0,38	0,30	0,60	0,64	0,62	0,55	0,79	0,95	0,76	0,69
GOM 549 ³ (th. Nv.)	0,030	0,030	0,033	0,026; 0,029 ³	-	0,020	0,030	0,030 ³	0,030	-	-	0,024
GOM 549	2,0	1,7	2,0	1,8	-	2,1	2,0	2,1	2,2	-	-	2,5
ZSM 265	0,72	0,34	1,1	0,51	2,3	1,1	2,6	1,6	7,7	4,9	7,3	6,0
MGT 30	0,88	1,3	0,61	1,7	2,5	2,3	1,5	1,8	0,45	0,62	0,25	0,40
MGT 65	0,010	0,020	0,14	0,10	0,25	0,30	1,3	2,5	4,8	6,6	12,9	5,6

Tab. 22: Näherungsweise ermittelter Methanschlupf der untersuchten BHKW-Aggregate unter Voll- und Teillast in %

¹) M1/2/3/4 = 1./2./3./4. Messung; ²) Bei der ersten Messung wurde statt bei 80 % bei 75 % sowie statt bei 60 % bei 50 % Last gemessen; ³) Zusätzliche Messung bei Volllast und 80 % Last; th. Nv. = thermische Nachverbrennung

Die THC-Konzentrationen und der Methanschlupf stiegen in den meisten Fällen unter Teillast an (Abb. 48). Im Mittel lag der Methanschlupf für die Kolbenmotoren unter Volllast bei ca. einem Prozent und stieg bei Teillast auf bis zu zweieinhalb Prozent an, beim Zündstrahlmotor noch deutlich höher. Den geringsten Methanschlupf zeigten GOM 75, GOM 190, GOM 250 sowie GOM 530. MGT 65 produzierte bei Volllast mit 0,01 bis 0,14 % den geringsten Methanschlupf aller Aggregate; bei 60 % Last schoss dieser allerdings "durch die Decke".



Abb. 48: Mittelwerte des (näherungsweise) gemessenen Methanschlupfs aller BHKW-Aggregate unter Volllast und Teillast

6.2.13 Anteil von Methan an den Gesamtkohlenwasserstoffen

Der verwendete FID detektiert die Gesamtheit der Kohlenwasserstoffe im Abgas, einschließlich von Bestandteilen wie Formaldehyd und Ethen. Aufgrund eines anderen Responsefaktors (Response = Signalstärke/Analytmenge) werden letztere "Nebenprodukte" der Verbrennung jedoch nicht vollständig erfasst. Um den Methanschlupf exakt zu bestimmen, wurden ab der vierten Messreihe vor der Analyse im FID mit dem Methan Cutter alle Kohlenwasserstoffe außer Methan katalytisch oxidiert. Durch abwechselnde Messung mit und ohne Methan Cutter konnte so der Anteil von Methan (CH₄) an den Gesamtkohlenwasserstoffen (THC) ermittelt werden. Dieser Anteil bewegte sich zwischen 90,0 und 99,9 %, wobei die meisten Messwerte zwischen 97,0 und 99,9 % lagen (Tab. 23). Dies bedeutet, dass der relative Fehler bei der näherungsweisen Berechnung des Methanschlupfs auf Basis der THG bis zu 5,4 % betrüge, in einem Fall zehn Prozent.

Fasst man alle Messergebnisse für den Methanschlupf zusammen, so ergibt sich die eindeutige Tendenz, dass dieser unter Teillast ansteigt – obgleich in unterschiedlicher Ausprägung. Die gemessenen Oxi-Kats waren für Methan nicht wirksam. Über die Zusammensetzung der THC außer Methan kann mit dem verwendeten Messinstrumentarium keine Aussage getroffen werden. Hierfür wäre zusätzliche Messtechnik erforderlich, z.B. ein FT-IR-Spektrometer.

Tab. 23: Anteil von Methan an den gesamten Kohlenwasserstoffen, Methanschlupf und
resultierender Fehler bei der näherungsweisen Bestimmung des Methanschlupfs
auf Basis der THC (alle Werte aus der vierten Messreihe)

	Last, %	Parameter	Mittlere Konz., mg m ⁻³	Anteil v. CH _{4,} %	Methan- schlupf, %	Absoluter Fehler, %	Relativer Fehler, %	
	100	CH ₄	420,2	97 /	0,7218	0.0193	26	
	100	THC	431,5	<i>у</i> , т	0,7411	0,0175	2,0	
GOM 75	80	CH_4	532,5	99.7	0,9302	0.0030	0.32	
001175	00	THC	534,2	<i>,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	0,9332	0,0050	0,52	
	60	CH_4	691,8	99.1	1,2319	0.0115	0.92	
	00	THC	698,2	<i>))</i> ,1	1,2434	0,0115	0,92	
	100	CH_4	134,5	98.8	0,2413	0.0029	12	
GOM 190	100	THC	136,1	70,0	0,2442	0,0027	1,2	
	80	CH ₄	108,4	97.0	0,1779	0.0055	3.0	
	00	THC	111,7	57,0	0,1834	0,0055	5,0	
	60	CH ₄	154,2	99.3	0,2533	0.0017	0,67	
	00	THC	155,2	<i>,</i> ,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	0,2550	0,0017		
	100	CH_4	553,7	98.8	1,2236	0.0152	1.2	
	100	THC	560,5	70,0	1,2388	0,0152	1,2	
GOM 250	80	CH ₄	628,8	99.2	1,3796	0.0106	0.76	
	00	THC	633,6	<i>)),</i> 2	1,3901	0,0100	0,70	
	60	CH_4	759,2	99.7	1,6389	0.0051	0.31	
		THC	761,6	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	1,6440	0,0051	0,51	
	100	CH ₄	199,9	98.5	0,3385	0.0051	15	
		THC	202,9	70,5	0,3436	0,0051	1,5	
GOM 250	80	CH_4	176,5	00.8	0,3001	0.0007	0.25	
BR	00	THC	177,0	<i>99</i> ,0	0,3008	0,0007	0,23	
	60	CH_4	239,8	07.3	0,4127	0.0115	27	
	00	THC	246,5	97,5	0,4243	0,0115	2,7	
	100	CH_4	1042,5	00.8	2,3080	0.0053	0.23	
	100	THC	1044,9	<i>99</i> ,8	2,3133	0,0055	0,23	
COM 360	80	CH_4	1079,4	00.2	2,3298	0.0186	0.70	
0011 300	80	THC	1088,0	99,2	2,3484	0,0180	0,79	
	60	CH_4	1166,4	00.0	2,4729	0.0021	0.00	
	00	THC	1167,5	<i>99,9</i>	2,4750	0,0021	0,09	
	100	CH_4	143,8	00.7	0,3027	0.0010	0.22	
	100	THC	144,3	99,7	0,3037	0,0010	0,33	
COM 520	20	CH_4	254,5	07.2	0,5354	0.0151	2.5	
GOIVI 530	80	THC	261,6	97,3	0,5505	0,0151	2,7	
	60	CH_4	321,6	00.0	0,6766	0.0100	1,8	
		THC	327,4	98,2	0,6888	0,0122		

	Last, %	Parameter	Mittlere Konz., mg m ⁻³	Anteil v. CH _{4,} %	Methan- schlupf, %	Absoluter Fehler, %	Relativer Fehler, %	
	100	CH_4	13,3	07.4	0,0279	0.0008	26	
	Clair	THC	13,6	97,4	0,0287	0,0008	2,0	
	100	CH_4	909,5	00.1	1,9727	0.0196	0.04	
COM 540	100	THC	918,1	99,1	1,9913	0,0186	0,94	
GOM 549	90 Clair	CH_4	14,5	00.5	0,0301	0.0001	0,48	
	80 Clair	THC	14,6	99,5	0,0302	0,0001		
	20	CH ₄	984,6	00.2	2,1053	0.0152	0.72	
	80	THC	991,8	99,3	2,1206	0,0153	0,72	
	100	CH ₄	235,2	04.6	0,4798	0.0051	5.4	
	100	THC	248,5	94,6	0,5069	0,0271	5,4	
ZSM 265	80	CH ₄	720,2	00.2	1,5533	0.0114	0.72	
		THC	725,5	99,5	1,5648	0,0114	0,75	
	60	CH_4	2391,3	0.9.1	5,8768	0,1114	1,9	
		THC	2436,6	90,1	5,9882			
	100	CH_4	156,6	05.1	1,6313	0.0925	4.0	
	100	THC	164,6	95,1	1,7148	0,0855	4,9	
MGT 30	80	CH_4	165,4	95.2	1,7237	0.0878	10	
WICI 50	80	THC	173,8	95,2	1,8115	0,0070	4,9	
	60	CH ₄	34,6	97.9	0,3874	0.0085	2.1	
	00	THC	35,4	,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	0,3959	0,0005	2,1	
	100	CH_4	12,8	90.0	0,0939	0.0105	10.0	
	100	THC	14,2	,0	0,1044	0,0105	10,0	
MGT 65	80	CH ₄	312,2	9/1 3	2,3725	0 1/23	57	
101 05	00	THC	330,9	74,5	2,5148	0,1425	5,7	
	60	CH_4	651,7	97.4	5,4556	0 1470	26	
		THC	669,3	27,4	5,6026	0,1470	2,0	
6.2.14 Start-Stopp-Betrieb

Biogas betriebene BHKW kommen derzeit im Wesentlichen für die Bereitstellung negativer Sekundärregelleistung (SRL) und negativer Minutenreserveleistung (MRL) zum Einsatz. Hierfür muss das BHKW die Einspeiseleistung innerhalb der geforderten Rampendauer um den angebotenen Leistungsbetrag reduzieren, die reduzierte Leistung über die Aufrufdauer halten und anschließend innerhalb des geforderten Zeitraums wieder zur Ausgangsleistung zurückzukehren. Während die SRL in der Regel mehrmals täglich für eine Dauer von wenigen Minuten abgefragt wird, sind die Aufrufe für die MRL deutlich seltener, können aber mehrere Stunden andauern (Keymer & Ikenmeyer, 2014).

Die bedarfsgerechte Stromerzeugung erfolgt in Abhängigkeit des Strommarktes möglichst zu Hochpreiszeiten. Die Strommenge, die herkömmlich kontinuierlich über den Tag erzeugt wird, muss dann innerhalb der Hochpreiszeiten mit entsprechend höherer Leistung eingespeist werden. In den Zeiten mit geringen Preisen steht das BHKW still. Ein solcher Intervall- oder Start-Stopp-Betrieb stellt höhere Anforderungen an den Motor und die Wärmeverwertung des BHKW (Häring et al., 2013). Wie sich dies längerfristig auf den Verschleiß und den Wirkungsgrad des Motors auswirkt, konnte bisher mangels Referenzobjekten noch nicht im Detail untersucht werden.

Da das Starten und Hochfahren des Motors nur wenige Minuten benötigt, ist die Messung des el. Wirkungsgrades in diesem Betriebszustand weder praktikabel noch sinnvoll. Es wurden aber im Rahmen des vorliegenden Projekts die Verläufe verschiedener Abgasparameter in dieser Phase gemessen. Im Folgenden werden hierzu drei Messreihen vorgestellt. Zukünftig sollen weitere Messungen vorgenommen werden, um die Aggregate auch in diesen Betriebszuständen miteinander vergleichen zu können. Es ist darauf hinzuweisen, dass in diesem Fall bei den Kohlenwasserstoff-Konzentrationen keine Umrechnung auf den entsprechenden Bezugssauerstoffgehalt im Abgas erfolgte. Beim Hoch- und Herunterfahren des Aggregats ist der Sauerstoffgehalt im Abgas sehr hoch, so dass eine Umrechnung große Abweichungen hervorrufen würde.

Die erste Messreihe zeigt das Verhalten der MGT 65 in Bezug auf verschiedene Abgaswerte vom Startbeginn bis zum Einpendeln auf Volllast. Nach dem Start der Turbine stiegen mit der abgegebenen Leistung (nicht dargestellt) die Konzentrationen von NO_x (relativ gleichmäßig) und THC (später und steiler) im Abgasstrom zunächst an, um mit Erreichen des Volllast-Niveaus auf (nahezu) Null abzufallen (Abb. 49). Anschließend benötigte die Mikrogasturbine etwa eineinhalb Minuten, um sich auf die genaue Last einzupendeln. Während dieses Zeitraums war die CO-Konzentration im Abgasstrom anfangs deutlich erhöht und sank dann auf ein sehr niedriges Niveau bei Volllast ab. Gleichzeitig gingen der Lambdawert und mit diesem der Sauerstoffgehalt im Abgas zurück, die CO₂-Konzentration und die Abgastemperatur stiegen an. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Oxidation von CO zu CO₂ unterbunden wird, "wenn die Verbrennungstemperatur niedrig ist, wenig Sauerstoff zur Verfügung steht oder die Flamme schnell abgekühlt wird"⁷.

⁷ Spyra, N. D.: Entwicklung und Untersuchung eines neuartigen Brennstoffaufbereitungssystems für kleine Gasturbinen. Dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl Flugantriebe, München: 2010.



Abb. 49: Gemessener Verlauf verschiedener Abgasparameter während des Startvorgangs der MGT 65

Abb. 50 zeigt den Verlauf der Schadstoffkonzentrationen im Abgas des 549 kW Gas-Otto-Motors, während dieser kurzzeitig abgeschaltet und anschließend wieder hochgefahren wurde. Zusätzlich wurde die abgegebene el. Leistung des Aggregats aufgezeichnet. Diese Demonstration ähnelt einer Rampe beim kurzzeitigen Aufruf negativer SRL. Die thermische Nachverbrennungseinheit wurde während dieser Messung abgeschaltet, um die Roh-Emissionen des Motors beobachten zu können.

Beim Herunterfahren des Aggregats stieg die Kohlenwasserstoff-Konzentration im Abgasstrom deutlich an, um nach dem Wieder-Hochfahren der Anlage auf das ursprüngliche Niveau unter Volllast zurückzukehren. Es ist also während dieser Phase von einem erhöhten Methanschlupf auszugehen. Dieser konnte allerdings in diesem Fall nicht bestimmt werden, da die Gaszusammensetzung nicht gemessen wurde und die Messgrenze des Gaszählers unterschritten wurde.

Die CO-Konzentration im Abgasstrom wurde durch die kurzzeitige Abschaltung wenig beeinflusst und stabilisierte sich nach dem Wiederhochfahren des Motors innerhalb kurzer Zeit (Abb. 50). Die NO_x-Konzentration stieg während der Abwärtsrampe an, was auf eine heißere Verbrennung schließen lässt. Nach dem Wiedererreichen der Volllast pendelte sich die NO_x-Konzentration nach einigen Minuten auf einem zunächst höheren Niveau ein als vor dem Abschaltvorgang.



Abb. 50: Gemessener Verlauf verschiedener Abgasparameter und der elektrischen Leistung des GOM 549 (ohne Abgasbehandlung) während eines kurzfristigen Abschaltvorgangs

An dem 530 kW Gas-Otto-Motor (ohne Abgasbehandlung) wurden zwei Abschaltvorgänge untersucht. Bei diesem Aggregat fiel während der Abwärtsrampe die THC-Konzentration im Abgasstrom auf nahezu Null ab, ehe der Motor komplett zum Stillstand kam (Abb. 51).

Die CO-Werte stiegen kurz nach den NO_x -Werten steil an (fehlende CO-Messwerte im Diagramm resultieren aus der Überschreitung des Messbereichs). Eine heißere Verbrennung erzeugt höhere NO_x -Werte im Abgas, während erhöhte CO-Werte durch eine unvollständige Verbrennung hervorgerufen werden. Es wird angenommen, dass entweder trotz des Abschaltens der Maschine eine kurzzeitige Nachverbrennung stattfand (ohne mechanische Leistungsabgabe) oder das Aggregat mit Luft gespült wurde.

Einen vergleichbaren Verlauf zeigte die zweite Messung am selben Aggregat, wobei die Abschaltung ausgehend von einer höheren Last erfolgte (Abb. 52). Allerdings stieg die CO-Konzentration in diesem Fall nicht so hoch.

Der Vergleich dieser drei Messreihen zu Abschaltvorgängen zeigt, dass die Aggregate unterschiedlich reagierten. Generell muss zwischen dem An- bzw. Abschalten nach längerem Stillstand bzw. Lastbetrieb und dem kurzzeitigen An-/Abschalten differenziert werden. Betrachtet man das Hochfahren nach längerer Standzeit bzw. das Abschalten nach längerem Lastbetrieb, so scheinen die CO-Werte zeitversetzt zu den NO_x-Werten anzusteigen. Um zuverlässige Aussagen zu diesen Sachverhalten treffen zu können, sind jedoch noch wesentlich mehr Messreihen erforderlich.



Abb. 51: Erste Messung verschiedener Abgasparameter und der elektrischen Leistung des GOM 530 kW während eines Abschaltvorgangs



Abb. 52: Zweite Messung verschiedener Abgasparameter und der elektrischen Leistung des GOM 530 während eines Abschaltvorgangs

6.3 Untersuchung verschiedener Abgasbehandlungsverfahren

6.3.1 Alterung von Oxidationskatalysatoren

Oxidationskatalysatoren (Oxi-Kats) werden mittlerweile regelmäßig für die Abgasbehandlung an Biogas betriebenen Motoren eingesetzt, um CO und Formaldehyd aus dem Abgasstrom zu entfernen. Für Biogasanlagen, welche nach dem BImSchG genehmigt wurden, ist ein Oxi-Kat unverzichtbar. Diese Anlagen müssen die Regelungen der TA Luft und die Vollzugsempfehlung für Formaldehyd (Grenzwert bis 2017: 60 mg m⁻³) einhalten. Vier der sieben gemessenen Kolbenmotoren waren mit einem Oxi-Kat ausgestattet. Da Formaldehyd im laufenden Projekt nicht gemessen wurde, wird im Folgenden nur auf die CO-Konzentrationen eingegangen.

In allen Messungen an Motoren mit Oxi-Kat konnten deutlich geringere CO-Werte im Abgas gemessen werden als bei Motoren ohne Abgasbehandlung. Bei zwei Anlagen (Abb. 53, vergleiche Betriebsstunden Tab. 14) konnte der Alterungsprozess der Oxi-Kats miteinander verglichen werden. Beim GOM 250 BR stieg die CO-Konzentration im Abgas nach dem Oxi-Kat bei der zweiten Messung im Vergleich zur ersten Messung um den Faktor zehn (unter Volllast). Zwischen der zweiten und dritten Messung wurde der Oxi-Kat ausgetauscht. In der vierten Messung war der CO-Gehalt gegenüber der dritten Messung wieder um den Faktor fünf angestiegen. Zwischen diesen beiden Messterminen lag ein Zeitraum von 13.228 Betriebsstunden.



Abb. 53: Anstieg der CO-Konzentrationen im Abgas des GOM 250 BR und des GOM 360 nach dem Oxi-Kat unter Voll- und Teillast

Am Aggregat GOM 360 hingegen, welches in einem ähnlichen zeitlichen Abstand von 11.738 Betriebsstunden gemessen wurde, wurde der Oxi-Kat nicht ausgetauscht. Während hier der Anfangswert des CO-Gehalts in der dritten Messung im Vergleich zum

GOM 250 BR relativ hoch war, lag die CO-Konzentrationen bei der vierten Messung für diesen Motor auf niedrigerem Niveau (Abb. 53). Der Oxi-Kat am GOM 250 schien also rascher an Wirksamkeit verloren zu haben, was auf Umbaumaßnahmen (z.B. neue Vorkammern) zurückzuführen sein könnte. Um die Fracht von CO und Formaldehyd im Roh-Abgas beider Motoren vergleichen zu können, hätten zusätzliche Messungen vor dem Oxi-Kat getätigt werden müssen.

Bei normalem Gebrauch liegt die geschätzte Lebensdauer eines gängigen Oxi-Kats bei ungefähr zwei Jahren. Sollten die Grenzwerte in der Novelle der TA Luft 2017 wie erwartet verschärft werden, könnte sich dieser Wert verkürzen. Um eine frühzeitige Inaktivierung des Oxi-Kats zu vermeiden, sollte generell eine wirksame Entschwefelung des Biogases erfolgen, da Schwefelverbindungen als Katalysatorgift wirken.

Im Falle des Zündstrahlmotors wurde ein Lochbrand im Oxi-Kat (Abb. 54) anhand stark erhöhter CO-Werte im Abgas erkennbar (Abb. 40). Wie bereits erwähnt gelangte hier Zündöl aus der Brennkammer in den Abgastrakt, wurde im Oxi-Kat aufgefangen und entzündete sich dort.



Abb. 54: Ausgebauter Oxi-Kat am ZSM 265 mit Lochbrand in der Füllschicht

Von der zweiten zur dritten Messung veränderte sich das Muster der Messwerte für CO, NO_x und THC im Abgas des ZSM 265 deutlich (Abb. 55). Gleichzeitig waren die Lambdawerte während der dritten Messung deutlich höher. Beides lässt auf eine zwischenzeitliche Änderung der Motoreinstellung schließen. Die drastisch erhöhten CO-Werte aus der dritten Messung könnten auf einen Bruch des Katalysators hinweisen.

Alternativ zu einem Oxi-Kat mit Vollwartungsvertrag wird oftmals vom selben Hersteller auch eine kostengünstigere Variante angeboten. Auf längere Sicht gesehen, dürfte die erste Option in der Regel jedoch die wirtschaftlichere sein, da hierbei gewährleistet wird, dass der Oxi-Kat über einen längeren Zeitraum funktioniert (Ausgeschlossen sind Schäden am Katalysator durch Eigenverschulden, z. B. in Folge wiederholter Zündaussetzer mangels Wartung der Zündkerzen). Um die Lebensdauer des Oxi-Kats zu verlängern, kann dieser vom Betreiber selbst "gewaschen" werden. Darüber hinaus bieten die Hersteller auch eine chemische Reinigung (Entgiftung) an.



Abb. 55: Gegenüberstellung der Messwerte für CO, NO_x und THC im Abgas des ZSM 265 mit Oxi-Kat vom ersten und zweiten Messtermin

6.3.2 Bewertung der thermischen Nachverbrennung

Die im vorliegenden Projekt untersuchte thermische Nachverbrennungseinheit an einem 549 kW Gas-Otto-Motor erzielte eine Reduktionsleistung von bis zu 99,5 % der THC im Roh-Abgas. Auch Kohlenmonoxid wurde weitgehend oxidiert (Abb. 56). Der Methanschlupf von 2,0 % im Roh-Abgas wurde durch die thermische Nachverbrennung auf ca. 0,03 % verringert, also praktisch eliminiert. Stickoxide wurden dagegen nicht nennenswert von der thermischen Nachverbrennung beeinflusst.



Abb. 56: Gemessene Schadstoffkonzentrationen und berechneter Methanschlupf im Abgas des 549 kW Gas-Otto-Aggregats nach thermischer Nachverbrennung unter Volllast und 80 % Last

6.3.3 Vergleich unterschiedlicher Strategien zur Reduzierung der Schadstoffemissionen von Biogas-BHKW

Als nationale Emissionsrichtlinie legt die TA Luft Emissionsgrenzwerte für nach dem BImSchG genehmigungsbedürftige Anlagen fest. Der geltende Grenzwert für Formaldehyd ist hierbei von vielen Motoren nur mittels Abgasbehandlung einzuhalten. Was die Begrenzung der NO_x-Emissionen angeht, so zeigen die vorliegenden und vorausgegangenen Messergebnisse, dass innermotorische Maßnahmen den el. Wirkungsgrad limitieren. Alternativ kann als außermotorische Maßnahme eine selektive katalytische Reduktion von NO_x durch die Einspritzung von Harnstoff erfolgen (SCR-Katalysator), welche jedoch kostenintensiv ist. Die erwarteten strengeren Grenzwerte der TA Luft 2017 werden die Anforderungen an die Motoreinstellung und die Abgastechnologie noch erhöhen.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Abgasemissionen von Kolbenmotoren mit Oxidationskatalysator bzw. thermischer Nachverbrennung mit denen von Mikrogasturbinen ohne Abgasbehandlung verglichen. Der Oxidationskatalysator an dem 250 kW Gas-Otto-Motor zeigte eine sehr hohe Konversionsrate für CO, war jedoch für Methan nicht wirksam. Die thermische Nachverbrennung eliminierte hingegen sämtliche Kohlenwasserstoffe aus dem Abgas des 549 kW Gas-Otto-Motors (Abb. 57).



Abb. 57: Gemessene Konzentrationen von CO, NO_x und THC im Abgas zweier Kolbenmotoren mit Abgasbehandlung und einer Mikrogasturbine ohne Abgasbehandlung unter Volllast und 80 % Last im Vergleich mit den geltenden Grenzwerten nach TA Luft 2002

Beide Magermotoren unterschritten bei Volllast den NO_x -Grenzwert nach TA Luft 2002von 500 mg m⁻³. Dass beim GOM 549 der NO_x -Wert in der Teillast anstieg, war auf die Motoreinstellung zurückzuführen: unter Volllast fuhr der Motor NO_x -optimiert, während unter Teillast zur Erhaltung des Wirkungsgrades ein fetteres Gemisch gefahren wurde. Insgesamt war die Wirksamkeit der Abgasbehandlungseinrichtungen an diesen beiden Motoren unter Teillast gegenüber Volllast kaum verändert.

Im Vergleich zu den Kolbenmotoren zeigte die Mikrogasturbine sowohl unter Volllast als auch unter 80 % Teillast ein geringeres Emissionsniveau. Allerdings stieg hier der Methanschlupf unter Teillast relativ stark an. Die wesentlich strengeren Grenzwerte der TA Luft für (Mikro-)Gasturbinen wurden von den untersuchten Aggregaten mit großer Sicherheit eingehalten. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei der Emissionsmessung an Mikrogasturbinen nach TA Luft auf 15 % Bezugssauerstoffgehalt umzurechnen ist, während bei Kolbenmotoren lediglich ein Bezugswert von 5 % Sauerstoff verwendet wird.

7 Diskussion

7.1 Bewertung der Ergebnisse für die Kolbenmotoren

Aus den Ergebnissen ist klar ersichtlich, dass sich sowohl der elektrische Wirkungsgrad als auch die Abgaszusammensetzung der BHKW-Aggregate unter Teillast gegenüber Volllast teilweise deutlich veränderten. Der Höchstwert des el. Wirkungsgrades wurde stets unter Volllast gemessen und nahm im Teillastbereich ab. Die einzelnen Kolbenmotoren erzielten im Mittel über alle Messreihen einen el. Wirkungsgrad von 31,2 bis 42,6 %. Der höchste Wert für den el. Wirkungsgrad betrug 43,3 % und wurde an dem 250 kW Gas-Otto-Aggregat mit BlueRail®-Technologie gemessen. Klein et. al (2014) geben für 294 Biogas-BHKW eine Spanne für den el. Wirkungsgrad laut Herstellerangabe von 27,7 bis 46,0 % an⁸.

Mit abnehmender Last sank der el. Wirkungsgrad der untersuchten Aggregate. Unter 80 % Last nahm dieser im Mittel um 1,5 %-Punkte (1,0 bis 2,6 %-Punkte) ab, unter 60 % Last betrug der Wirkungsgradrückgang im Mittel 3,8 %-Punkte (2,7 bis 6,1 %-Punkte) – jeweils gegenüber Volllast. Die große Streubreite der Werte deutet darauf hin, dass einzelnen Motoren bereits auf einen möglichst hohen Wirkungsgrad auch unter Teillast getrimmt wurden.

Der Rückgang des el. Wirkungsgrades, ob durch Alterung des Motors oder durch länger anhaltenden Teillastbetrieb, führt zu einem höheren Bedarf an Biogas und damit an Einsatzstoffen. Dies führt zu einer erhöhten Umweltbelastung bei gleichem Stromertrag. Effenberger & Hijazi (2016) stellten anhand einer Modellierung fest, dass im Teillastbetrieb der Rückgang des el. Wirkungsgrades einen viel größeren Einfluss auf die spezifischen CO₂-Äq-Emissionen der Stromerzeugung aus Biogas hatte, als die Veränderung der Abgasemissionen. Aufgrund des bis dato sehr begrenzten Umfangs eines dauerhaften Teillastbetriebs (z. B. für die Bereitstellung positiver Regelleistung) sind dessen Auswirkungen auf die Umweltwirkungen der Stromerzeugung aus Biogas derzeit allerdings insgesamt als sehr gering einzustufen.

Eine generelle Korrelation des el. Wirkungsgrades und der Abgaszusammensetzung kann aus den Messergebnissen nicht abgeleitet werden. Hierbei spielen vielfältige Faktoren eine Rolle, die nicht erfasst wurden, wie Motoreinstellung, Brennraumgeometrie, Zündung, Zündzeitpunkt, Brenngeschwindigkeit, etc. Teilweise deuteten auffallend hohe oder stark streuende Abgaskonzentrationen auf Probleme bei der Verbrennung im Motor hin, die jedoch nicht im Detail aufgeklärt werden konnten.

Die Messergebnisse zeigen für diejenigen Motoren, die mit fetterem Gemisch gefahren wurden – d. h. mit Lambda-Werten von ca. 1,3 bis 1,4 – ein hohes Niveau der NO_x -Konzentrationen im Abgas bei relativ niedrigen THC-Konzentrationen. Für die Magermotoren mit Lambda-Werten von ca. 1,5 bis 1,8 sind die Verhältnisse umgekehrt. Diese Ergebnisse entsprechen der Theorie der Verbrennungsprozesse im Motor (siehe Kapitel 3.3). Gleichzeitig erreichten die Magermotoren einen geringeren el. Wirkungsgrad, so dass hier ein Zielkonflikt zwischen dem Immissionsschutz und der Energieeffizienz auftreten kann.

Das gegenläufige Verhalten der Kohlenwasserstoff- und Stickoxid-Emissionen war für die Motoren mit Lambda-Werten von ca. 1,3 bis 1,4 auch beim Vergleich zwischen Voll- und Teillast zu beobachten. Bei den Motoren mit Lambda-Werten von 1,5 und darüber wurde

⁸) 10 bis 9.000 kW elektrische Nennleistung

dieser Effekt durch eine leichte Erniedrigung des Lambda-Wertes unter Teillast abgeschwächt oder weitgehend aufgehoben.

Die CO-Konzentrationen im unbehandelten Abgas der Motoren zeigten hinsichtlich des Teillastbetriebs kein eindeutiges Verhalten. Meist änderten diese sich kaum, in manchen Fällen stiegen sie leicht an. Die an den Motoren untersuchten Oxidationskatalysatoren zeigten im neuen Zustand eine sehr gute Wirksamkeit für CO. Unter Teillast sanken die CO-Konzentrationen im gereinigten Abgas weiter, was auf den geringeren Abgasdurch-fluss und damit die höhere Aufenthaltszeit im Oxi-Kat zurückgeführt wurde.

Insgesamt wurde bei Anlagen mit einem hohen Methanschlupf auch ein hoher el. Wirkungsgrad nachgewiesen. In der Regel war dies darauf zurückzuführen, dass die effizienteren BHKW-Motoren mit einer hohen Verdichtung arbeiteten. Daraus ergibt sich die Fragestellung, ob es ökologisch sinnvoller ist, bei höherem Methanschlupf effizienter Strom zu produzieren oder den Methanschlupf auf Kosten des elektrischen Wirkungsgrades möglichst gering zu halten. Effenberger & Hijazi (2016) stellten für fünf Fallbeispiele fest, dass der geringere el. Wirkungsgrad unter Teillast sich stärker auf die spezifischen CO₂-Äquivalentemissionen der Stromerzeugung auswirkte, als der erhöhte Methanschlupf. Dies legt nahe, dass die Priorität auf der Erhaltung eines möglichst hohen el. Wirkungsgrades liegen sollte. Dabei ist dieser Effekt auch abhängig von der Auswahl der Einsatzstoffe. Beim Einsatz von Energiepflanzen spielt die möglichst effiziente Verwertung dieser aufwändig zu erzeugenden Substrate eine besonders große Rolle.

7.2 Bewertung der Ergebnisse für die Mikrogasturbinen

In (Mikro-)Gasturbinen findet die Verbrennung unter hohem Sauerstoffüberschuss statt, weshalb auch ohne Abgasbehandlung deutlich niedrigere Schadstoffemissionen auftreten als bei Kolbenmotoren. Während beide untersuchten Mikrogasturbinen mit einer el. Nennleistung von 30 bzw. 65 kW praktisch kein NO_x emittierten, zeigten sich hinsichtlich der CO- und THC-Emissionen Unterschiede in Abhängigkeit von der Last. Die 30 kW Mikrogasturbine zeigte bei 80 % Last deutlich erhöhte Emissionen, bei der 65 kW Mikrogasturbine waren diese Emissionen (ähnlich wie bei den Kolbenmotoren) bei 60 % Last am höchsten.

Die kleinere der beiden Turbinen erreicht mit einem Eigenstrombedarfsanteil von nahezu einem Drittel einen el. Wirkungsgrad von knapp 20 %. Für die MGT 65 wurde ein el. Wirkungsgrad von im Mittel knapp 24 % gemessen. Zum Vergleich maßen Bekker & Oechsner (2010) an einer Mikrogasturbine gleicher Leistung unter Volllast einmalig einen Wirkungsgrad von 25,8 %, welcher an der unteren Leistungsgrenze von 35 bis 40 kW (entspricht 54 % bis 62 % Last) bis auf 18,8 % abnahm.

Mikrogasturbinen finden aufgrund ihres im Vergleich zu Kolbenmotoren deutlich geringeren Wirkungsgrades in der Biogasbranche kaum Verwendung. Anhand der SWOT-Analyse in Tab. 24 wird diskutiert, woran dies liegen könnte und wie die Chancen für eine stärkere Verbreitung dieser Technologie in der Zukunft stehen. Durch die zu erwartenden strengeren Vorgaben der TA Luft 2017 könnte diese Technologie zukünftig interessanter werden.

	Opportunities (Chancen)	Threats (Gefahren)
	 hoher Wärmeertrag hohe Belastbarkeit für Flexi- bilisierung Einsatzfähigkeit bei Güllean- lagen bis zu 75 kW Anlagen- größe Förderung größerer Anlagen mit 	 Rentabilität muss geprüft werden fehlender ökonomischer An- reiz
rengths (Stärken)	SO-Strategien	ST-Strategien
geringe Schadstoff- Emissionen wartungsarm hoher thermischer Wirkungs- grad geringe Lärmemissionen	 Einsatz ⇒ als Flex-BHKW ⇒ bei Anlagen mit hohem Wärmebedarf ⇒ bei Anlagen mit Einschränkungen nach TA Lärm 	keine Abgasbehandlung geringe Wartungskosten (müssen den Verlusten durch den geringe- ren Wirkungsgrad gegenüberge- stellt werden)
eaknesses (Schwächen)	WO-Strategien	WT-Strategien
Vergleichsweise geringer el. Wirkungsgrad Anfälligkeit des el. Wirkungs- grades auf die Außentempera- tur	Kühlung des Aufstellraums Betrieb als Zweit-BHKW zur Si- cherung der Spitzen und großer Wärmenachfrage	Technische und gesetzliche Ent- wicklung abwarten Planung bei größeren Aggregaten mit höherem el. Wirkungsgrad

Tab. 24: SWOT-Analyse des Einsatzes von Mikrogasturbinen im Biogassektor

St 1.

2. 3.

4.

W

2.

7.3 Beurteilung der flexiblen Fahrweise von BHKW in der Praxis

Ob häufigere Stillstandszeiten und Betriebszeiten unter Teillast im Rahmen der sogenannten Flexibilisierung der Stromerzeugung aus Biogas den Alterungsprozess und Verschleiß von BHKW beeinflussen, kann mangels Erfahrungswerten und Messdaten noch nicht zuverlässig beurteilt werden. Während der Vor-Ort-Messungen an den flexibel betriebenen BHKW wurden keine Auffälligkeiten festgestellt. Um genauere und weitere Aussagen ableiten zu können, müssten Flex-BHKW über einen längeren Zeitraum beobachtet werden.

An einzelnen Aggregaten erfolgten Abgasmessungen während des Herunter- und Wieder-Hochfahrens. Hierbei wurden für CO und NO_x Konzentrationsspitzen gemessen, bei der THC-Konzentration bzw. dem Methanschlupf fielen die Messergebnisse unterschiedlich aus. Da diese Betriebsphasen zeitlich eng begrenzt sind und ein geringes Abgasvolumen ausgestoßen wird, sind diese für das gesamte Emissionsgeschehen eines BHKW jedoch nicht ausschlaggebend.

Soll ein Motor regelmäßig in Intervallen betrieben werden, ist eine Zusatzheizung zu installieren, um Kaltstarts zu vermeiden. Die Temperatur im Kühlkreislauf sollte hierdurch auf 56 bis 60 °C gehalten werden (Häring et al., 2015, S. 15).

Was die Abgasbehandlung angeht, so kommt eine thermische Nachverbrennung für den Intervallbetrieb nicht in Frage. Ehe dieses System seine Betriebstemperatur erreicht, vergehen über vier Stunden Aufwärmzeit bei einer Heizleistung von ca. 35 kW. Während der Aufwärmphase wurden im Abgas CO-Konzentrationen bis zu 2.500 mg m⁻³ gemessen.

Ein Oxidationskatalysator wäre dagegen grundsätzlich im Intervallbetrieb einsetzbar, jedoch gibt es auch hierfür keine Erfahrungswerte. Es wird davon ausgegangen, dass längere Stillstandszeiten sowie das wiederholte Aufheizen und Abkühlen des Katalysators Einfluss auf die Lebensdauer nehmen werden.

7.4 Formaldehyd-Emissionen

Formaldehyd konnte im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht explizit analysiert werden und wurde lediglich als Bestandteil der Gesamt-Kohlenwasserstoffe zum Teil mit dem FID erfasst. Prager et al. (2015) maßen im Abgas von Biogas-BHKW einen Formaldehydanteil von drei bis fünf Prozent an den gesamten Kohlenwasserstoffen. Unter Volllastbedingungen konnte die thermische Nachverbrennung die Kohlenwasserstoffe bis auf einen Restgehalt von 16 mg m⁻³ reduzieren. Geht man von einem Formaldehyd-Anteil von fünf Prozent aus, so entspricht dies weniger als einem mg m⁻³. Demnach kann die thermische Nachbehandlung sicher den Grenzwert für Formaldehyd nach TA Luft 2002 einhalten. Die 65 kW Mikrogasturbine emittierte unter Volllast lediglich zwei Milligramm Kohlenwasserstoffe je Kubikmeter Abgas.

7.5 Immissionsschutzrechtliche Rahmenbedingungen für Biogas-BHKW

Die gegenwärtig gültigen Grenzwerte der TA Luft 2002 für BImSchG-pflichtige Anlagen werden voraussichtlich Mitte 2017 durch die Neuauflage der TA Luft abgelöst. Diesbezüglich werden auch neue Überwachungsmaßnahmen diskutiert. So sollen für bestimmte Parameter neben der jährlichen Messung auch kontinuierliche Messungen durch den Betreiber vorgeschrieben werden. Die durch die MCP-Richtlinie vorgegebenen Emissions-Grenzwerte müssen durch die EU-Staaten bis Ende 2017 umgesetzt werden. Eine Übersicht der geltenden und zukünftigen Schadstoffgrenzwerte geben Tab. 25 und Tab. 26.

Tab. 25:	Schadstoffgrenzwerte für Ko	lbenmotoren	ı nach verschieden	en Richtlinien	(alle
	Konzentrationswerte in mg m	1 ⁻³ und für ei	inen Bezugssauers	toffgehalt von	5 %)

	TA Lu	ft 2002	MCP-Dir	Entwurf TA Luft 2017						
Schadstoff	GOM ZSM <3 MW <3 MW		Bestand	Neu	keine Unter- scheidung					
СО	1.000	2.000	-	-	200					
NO _x	500 1.000		507 (GOM) 1.013 (ZSM)	507 (alle)	500					
SO ₂	31	11	160	107	89					
CH ₂ O	60		-	-	20 (30 für Bestand bis 01.01.2020)					
Gesamtstaub	- 20		-	-	4					
THC	-	-	-	-	1.000					

Tab. 26: Schadstoffgrenzwerte für (Mikro-)Gasturbinen nach verschiedenen Richtlinien (alle Konzentrationswerte in mg m⁻³ und für einen Bezugssauerstoffgehalt von 15 %)

	TA Luft 2002	MCP-D	Entwurf TA Luft 2017			
Schadstoff		Bestand	keine Un- terscheidung			
СО	100	-	-	100		
NO _x	150	200	75	75		
SO_2	-	60	40	-		
THC	-	-	-	25		

Vergleicht man die Grenzwerte im Einzelnen, so fällt auf, dass im Entwurf für die Novelle der TA Luft die Vorgaben der MCP-Direktive nicht nur eingehalten, sondern teilweise strenger ausgelegt werden. Nach der internationalen MCP-Richtlinie gibt es speziell für CO keine vorgegebenen Grenzwerte. Es gilt stattdessen die Vorgabe, dass die Grenzwerte nicht weniger streng ausgelegt werden dürfen. In diesem Fall wird der nationale Grenzwert strenger ausgelegt. Zudem soll in der TA Luft 2017 ein zusätzlicher Grenzwert für Kohlenwasserstoffe eingeführt werden. Dadurch wird eine weitere "Stellschraube" in der Verbrennungsmotorik weiter eingeschränkt. In diesem Kontext wäre der Einsatz einer thermischen Nachverbrennung bei Anlagen mit hohem Methanschlupf von Vorteil.

Nach den BVT (Beste Verfügbare Technik)-Schlussfolgerungen der EU wird auch der Formaldehyd-Grenzwert strenger ausfallen. Somit kann nicht auf einen Oxidationskatalysator verzichtet werden, der zudem größer dimensioniert werden muss und damit teurer wird. Auch die Lebensdauer der Oxidationskatalysatoren könnte eingeschränkt werden. Bei Einsatz dieser Abgastechnologie sollte es nach den hier vorgestellten Messergebnissen keine Überschreitungen der neuen CO-Grenzwerte geben. Während des Messprogramms konnte festgestellt werden, dass die meisten Kolbenmotoren Probleme hatten, die geltenden NO_x -Grenzwerte nach TA Luft einzuhalten⁹. Unter Teillast nahmen die NO_x -Emissionen gleichzeitig mit dem el. Wirkungsgrad. Gleichzeitig zeigten diejenigen Motoren, welche den NO_x -Grenzwert einhielten, einen relativ hohen Methanschlupf. Durch die Begrenzung der THC-Emissionen wird dadurch der Spielraum weiter eingeschränkt, wie aus Abb. 58 ersichtlich wird.



Abb. 58: Korrelation der mittleren gemessenen NO_x- und THC-Konzentration im Abgas der zehn BHKW klassifiziert nach Lambda-Wert vor dem Hintergrund der geltenden bzw. zu erwartenden Emissionsgrenzwerte nach TA Luft

Als Alternative zu Oxidationskatalysatoren könnte bei einer kontinuierlichen Fahrweise die thermische Nachverbrennung eingesetzt werden. Verglichen mit Oxi-Kats sind die Investitionskosten für diese Technologie anfangs deutlich höher, allerdings hat sie eine längere Standzeit.

Die Messergebnisse zeigen, dass Mikrogasturbinen unter Volllast die diskutierten Grenzwerte der TA Luft 2017 ohne Abgasbehandlung einhalten können. Größere Mikrogasturbinen mit höheren elektrischen Wirkungsgraden könnten daher in Zukunft als Flex-BHKW zum Einsatz kommen.

⁹ Nicht alle gemessenen Motoren unterlagen den Grenzwerten der TA Luft.

8 Schlussfolgerungen

In Bezug auf die Zielsetzung und die Fragestellungen des Projekts lassen sich auf Grundlage der Daten, die vor Ort an zehn untersuchten Biogas-BHKW innerhalb von zwei Jahren gemessen wurden, folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Moderne Motortechnologien wie Direkteinspritzung oder Abgasturbine ermöglichen für Kolbenmotoren im Leistungsbereich von $P_{el} = 250$ kW elektrische Wirkungsgrade von bis zu 43 % unter Volllast. Leistungsstärkere, hochverdichtende Motoren erreichen solche Wirkungsgrade nicht.
- Der **elektrische Wirkungsgrad** der Aggregate nimmt unter Teillast generell ab. Ein BHKW-Aggregat mit höherem el. Wirkungsgrad unter Volllast besitzt im Vergleich zu Aggregaten gleichen Typs auch einen höheren elektrischen Wirkungsgrad im Teillastbereich.
- Einzelne Aggregate zeigen ein günstigeres **Wirkungsgradverhalten bei Teillast**. Bei der Auswahl eines BHKW, das unter flexiblen Lastbedingungen betrieben werden soll, sollten diesbezügliche Informationen von den Herstellern angefordert werden.
- Der Lambda-Wert, λ ist ein Schlüsselfaktor für das Abgasverhalten von Kolbenmotoren. Im Magerbereich treten bei λ < 1,5 höhere NO_x-Konzentrationen im (unbehandelten!) Abgas bei relativ niedrigen THC-Konzentrationen auf, bei λ > 1,5 kehren sich die Verhältnisse um. Einem Anstieg der THC-Emissionen unter Teillast kann durch die Absenkung des Lambda-Wertes entgegengewirkt werden.
- Der **Methanschlupf** kann durch Messung der TCH im Abgas mittels FID ausreichend genau abgeschätzt werden. Er steigt im Teillastbereich in unterschiedlichem Maße an.
- Motoren mit größeren Sauerstoffüberschüssen ($\lambda = 1, 5...1, 8$) zeigen mehr Methanschlupf und gleichzeitig erheblich höhere elektrische Wirkungsgrade. Es ist im Einzelnen zu prüfen, ob eine **Minimierung des Methanschlupfs** ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist.
- **Oxidationskatalysatoren** sind für CO sehr wirksam, für Methan nicht. Sie unterliegen einem deutlichen Alterungsprozess und können durch thermische Belastung geschädigt werden.
- Die **thermische Nachverbrennung** ist insbesondere für THC sehr wirksam, kommt für einen Intervallbetrieb jedoch nicht in Frage, da eine lange Aufheizperiode erforderlich ist.
- Für Kolbenmotoren würden durch die erwarteten strengeren Grenzwerte der zu novellierenden TA Luft erheblich höhere Anforderungen an die Motor- und Abgasbehandlungstechnik stellen. Innermotorische Maßnahmen zur Begrenzung der NO_x-Emissionen limitieren hierbei den elektrischen Wirkungsgrad. Zur Begrenzung der CO-Emissionen könnte auf eine Abgasbehandlung nicht mehr verzichtet werden.
- **Mikrogasturbinen** benötigen für die Einhaltung der geltenden Emissions-Grenzwerte keine Abgasbehandlung, jedoch ist ihr elektrischer Wirkungsgrad im Vergleich zu Kolbenmotoren gering. Der Methanschlupf scheint im Teillastbetrieb deutlich anzusteigen. Mit nur zwei untersuchten Objekten liegen jedoch derzeit zu wenige Daten vor.
- Über den Verschleiß bei dauerhafter flexibler Fahrweise von BHKW einschließlich Abgasbehandlungseinrichtung können aufgrund der vorliegenden Ergebnisse noch keine zuverlässigen Aussagen getroffen werden.

9 Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes wurden an acht verschiedenen mit Biogas betriebenen Kolbenmotoren die Abgaskonzentrationen und der elektrische Wirkungsgrad vor Ort gemessen. Aus den Messergebnissen konnten Zusammenhänge zwischen den ermittelten Lambda-Werten, den gemessenen Schadstoffkonzentrationen und dem elektrischen Wirkungsgrad der Motoren abgeleitet werden. Da der Teillastbetrieb meist nur an den Messterminen simuliert wurde, können allerdings keine Aussagen zu den Auswirkungen eines dauerhaften Teillastbetriebs getroffen werden. Zu diesem Zweck sollten weitere Untersuchungen an entsprechend betriebenen Anlagen in der Praxis erfolgen. Für Mikrogasturbinen ist die Aussagekraft der Ergebnisse mit lediglich zwei Untersuchungsobjekten eingeschränkt.

Während umfangreichere Untersuchungen des Abgasverhaltens beim Hoch- und Herunterfahren von BHKW-Aggregaten nicht notwendig erscheinen, sollten Motoren im dauerhaften Intervallbetrieb hinsichtlich des Verschleißes beobachtet werden. Oxidationskatalysatoren gelten mittlerweile als Stand der Technik, um die Emissionen an Kohlenmonoxid und Formaldehyd zu begrenzen. Jedoch ist nicht bekannt, ob und wie sich ein Intervallbetrieb auf deren Wirksamkeit und Lebensdauer auswirkt. In diesem Kontext sollten Formaldehyd- und Kohlenmonoxid-Werte parallel gemessen werden, um eine mögliche Korrelation beider Parameter zu untersuchen und evtl. eine bessere Einschätzung der Notwendigkeit zum Austausch eines Oxidationskatalysators zu ermöglichen. Was die Einführung der kontinuierlichen Überwachung von Abgaswerten angeht, besteht Bedarf für wirtschaftlich darstellbare Messeinrichtungen.

Die Messergebnisse zeigen einen Zielkonflikt zwischen einer Minimierung der Methanemissionen aus dem Motorschlupf und einer Maximierung des elektrischen Wirkungsgrades auf. Es stellt sich die Frage, ob eine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte unter dem Strich ökologisch und ökonomisch effizient ("ökoeffizient") ist. Dies sollte anhand von Ökobilanzen modelliert und an Fallbeispielen validiert werden.

10 Vorträge und Veröffentlichungen aus dem Projekt

Vorträge:

Datum	<i>Thema</i> Referent, Veranstaltung (Veranstalter), Ort
17.10.2016	Abgasverhalten von Biogas-BHKW im Flex-Betrieb unter Berücksichti- gung der gesetzlichen Rahmenbedingungen
	S. Tappen, Biogas Convention, Fachverband Biogas, Hannover
17.06.2016	Auswirkungen einer flexiblen Biogasverwertung auf den el. Wirkungs- grad und die Abgasemissionen von Blockheizkraftwerken
	S. Tappen, 10. Rostocker Bioenergieforum, Universität Rostock, Rostock
29.02.2016	Möglichkeiten des Repowerings bei Biogasanlagen, Nutzung von ORC- Anlagen
	V. Aschmann, Tagung des Arbeitskreises der Biogasbetriebe Unterfran- ken, Werneck
25.02.2016	Biogasanlagen - Status Quo und zukünftige Herausforderungen
	V. Aschmann, Projektgruppe Energie Innovativ, Landshut
25.02.2016	Möglichkeiten zur Optimierung von bestehenden Biogasanlagen
	V. Aschmann, Stark im Markt: Thementag "Energie", Neumarkt i.d.OPf.
17.02.2016	Emissionen von Biogas-BHKW: Rechtliche Vorgaben und technische Umsetzbarkeit
	S. Tappen, Biogas Convention, Fachverband Biogas, Nürnberg
26./27.01.2016	Rund um das BHKW – technische Entwicklungen, Wirkungsgrade, Aus- wirkungen der flexiblen Fahrweise
	V. Aschmann, Biogas Betreibertreffen, Kupferzell / Biogasstammtisch, Steinkirch
14.01.2016	Anforderungen der Flexibilisierung an die Anlagentechnik
	V. Aschmann, Renergie "Biogas Infotage 2016", Ulm
06.10.2015	Flexible Biogasverstromung - Einfluss verschiedener Laststufen auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen
	S. Tappen, Alpenländisches Landtechnikertreffen, LfL, Freising
19.11.2015	Anforderungen der Flexibilisierung an die BHKW-Technik sowie an die Gasspeicherung
	V. Aschmann, Schulungsseminar "BioFit", Triesdorf
22.09.2015	Flexible Biogasverstromung – Einfluss verschiedener Laststufen auf den elektrischen Wirkungsgrad und Abgasemissionen (Poster)
	S. Tappen, FNR & KTBL Biogaskongress, Potsdam

26.08.2015	Flexible Einspeisung mit passender Technik: Bedeutung von Service und Wartung
	V. Aschmann, PlanET Betreiberschulung, Zerben
09.07.2015	Messungen des elektrischen Wirkungsgrades und der Kohlenmonoxid- (CO), Stickoxid- (NO _x) und Kohlenwasserstoffkonzentrationen (THC) im Abgas an einem Gas-Otto-Motor mit 75 kW elektrischer Leistung
	S. Tappen, Biogasanlage Grub, AVS/LfL, Grub
04.03.2015	Technische Ansprüche an Biogasanlagen und Gasspeichertechnik bei flexibler Stromerzeugung
	V. Aschmann, Nordschwäbischer Biogastag, Oberndorf a. Lech
22.01.2015	Anforderungen der Flexibilisierung an die BHKW-Technik sowie an die Gasspeicherung
	V. Aschmann, DLR Eifel Biogasseminar, Wittlich
13./14.10.2014	Technische Anforderungen beim flexiblen Betrieb von Biogasanlagen
	V. Aschmann, Fortbildung für Biogas Spezialberater/-innen, Linz
08.10.2014	Technische Anforderungen an die Biogasanlage bei der Bereitstellung von Strom in der Direktvermarktung
	V. Aschmann, FÜAK-Seminar, Landshut
02.10.2014	Einflussfaktoren auf die Effizienz von Biogasanlagen
	V. Aschmann, DBFZ-Jahrestagung, Leipzig
02.09.2014	Mit modernen Blockheizkraftwerken Geld sparen
	V. Aschmann, Biogastagung, top agrar, Kassel
06.02.2014	Anforderungen der Direktvermarktung an das Blockheizkraftwerk
	M. Effenberger, Stark im Markt: Thementag "Energie", Herrieden
12.12.2013	Anforderungen der Direktvermarktung an das Blockheizkraftwerk
	V. Aschmann, Stark im Markt: Thementag "Energie", Mindelheim
11.12.2013	Herausforderungen an die BHKW-Technik in der Direktvermarktung
	V. Aschmann, 12. Arbeitskreissitzung: Jahrestagung im AK Biogas, Sörup
04.12.2013	Biogas-BHKW in der Praxis: Wirkungsgrade und Emissionen
	V. Aschmann, DMK Biogastagung, Leipheim
28.11.2013	Anforderungen der Direktvermarktung an das Blockheizkraftwerk
	V. Aschmann, Stark im Markt: Thementag "Energie", Hohenpolding
26.11.2013	Technische Anforderungen bei der Direktvermarktung
	V. Aschmann, FÜAK-Seminar, Freising
21.11.2013	Anforderungen der Direktvermarktung an das Blockheizkraftwerk
	V. Aschmann, Stark im Markt: Thementag "Energie", Grafenrheinfeld

18./19.11.2013	BHKW – Wirkungsgrad / Emissionen im Teillast- und Intervallbetrieb
	V. Aschmann, 10. Sitzung des DLG-Ausschusses Biogas, Freising
06.11.2013	BHKW-Technik: Aktueller Stand und zukünftige Entwicklungen
	V. Aschmann, 31. Biogas-Praxistag der Regionalgruppe Oberpfalz, Kai- bitz bei Kemnath
20.09.2013	Cogeneration to heat and power – Gas utilisation
	V. Aschmann, International Biogas Operating and Engineering Course, Universität Hohenheim
11.09.2013	Technische Voraussetzungen für die Bereitstellung von Regelenergie mit Biogas
	V. Aschmann, KTBL & FNR-Biogaskongress, Kassel
17.07.2013	BHKW-Technik aus Sicht der LfL
	V. Aschmann, 24. Niederbayerischer Biogas-Praxistag, Reischach/Arbing
01.07.2013	Technik des Intervallbetriebes
	V. Aschmann, C.A.R.M.E.N. – Symposium, Straubing
03.06.2013	Effizienz und Emissionen bei der Biogasverwertung im BHKW
	V. Aschmann, 4. Treffen des BMK BioMethan-Kuratoriums des BRM und der FEE, Eningen unter Achalm
22.03.2013	Biogas-BHKW in der Praxis: Marktübersicht - Einflussfaktoren - Kenn- zahlen
	V. Aschmann, "BIOGAS Intensiv" Modul 3b: BHKW, Wolpertshausen
06.02.2013	Lebenszyklus des BHKW: Revisionen, Ersatz, Wirkungsgrade, Emissio- nen
	V. Aschmann, Arbeitskreis regenerative Energien im Beratungsring Hil- desheim, Borsum
29.01.2013	Effiziente Verwertung von Biogas im BHKW über die Standzeit: Strate- gien und Einflussfaktoren
	V. Aschmann, Biogas-Jahrestagung, Fachverband Biogas, Leipzig
04.12.2012	Elektrische Wirkungsgrade biogasbetriebener BHKWs – Theorie und Praxis
	V. Aschmann, Vortragsveranstaltung: "Mehr Ertrag aus Biogas" - REGIN, Ingolstadt
03.12.2012	Biogas-BHKW in der Praxis: Marktübersicht - Einflussfaktoren - Kenn- zahlen
	V. Aschmann, "BIOGAS Intensiv" Modul I: BHKW, Kirchberg/Jagst

09.10.2012	Der elektrische Wirkungsgrad biogasbetriebener BHKW als Kalkulati- onsgrundlage für die Anlagenplanung					
	V. Aschmann, 2. Anwenderforum "Biogasanlagen", Regensburg					
20.09.2012	Practical operation of a cogeneration plant with biogas: Function, oper- ation, maintenance					
	V. Aschmann, "International Biogas Operators Course", Uni Hohenheim					
28.06.2012	Wirkungsgrad- und Emissionsverhalten von BHKW im Verlauf der Standzeit					
	V. Aschmann, Seminar für die Betreiber der bayerischen Biogas- Pilotanlagen, LfL-ILT, Freising					
25.06.2012	Optimierungsmaßnahmen an und Emissionen von BHKWs					
	V. Aschmann, Fachtagung Müller-BBM Gruppe, Planegg					
21.06.2012	Biogas als Bestandteil der Energiewende					
	V. Aschmann, Infoveranstaltung Bündnis 90/Die Grünen: "Energiewen- de, aber richtig!", Diedorf					

Schriftliche Veröffentlichungen:

- Tappen, S., Aschmann, V., Effenberger, M.: Lifetime development and load response of the electrical efficiency of biogas-driven cogeneration units. eingereicht zur Veröffentlichung in *Energy*
- Aschmann, V., Tappen, S., Effenberger, M.: Viele Faktoren beeinflussen ein BHKW. Biogas Journal 4 (2016), S. 34-37
- Tappen, S.; Effenberger, M.: Auswirkungen einer flexiblen Biogasverwertung auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Abgasemissionen von Blockheizkraftwerken. In: 10. Rostocker Bioenergieforum, 16./17. Juni 2016, Universität Rostock, Schriftenreihe Umweltingenieurwesen Band 58, S. 351 – 362
- Aschmann, V., Effenberger, M.: Neue Anforderungen an die BHKW-Technik für Bestandsanlagen, Direktvermarktung und Regelenergieproduktion. 2. Auflage, Hrsg. AELF Nördlingen, 2015, S. 53 – 55
- Aschmann, V., Effenberger, M., Tappen, S. und G. Ebertsch: Voraussetzungen f
 ür einen emissionsarmen Betrieb biogasbetriebener BHKW In: Biogas Forum Bayern Nr. IV-8/2015 (2. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V.
- Aschmann, V; Keymer, U.; Rauh, S., Binder, S.; Schwertner, S.: Direktvermarktung III Bedarfsorientierte Stromerzeugung. In: Biogas Forum Bayern Nr. V-22/2015, Hrsg. ALB Bayern e.V.
- Aschmann, V., Effenberger, M.: Direktvermarktung Anforderungen an die BHKW-Technik. *Biogas Journal* 1 (2014), S. 43-45
- Aschmann, V., Effenberger, M.: Flexibilisierung der Stromerzeugung aus Biogas Anforderungen an die BHKW-Technik. *Schule und Beratung* 1 (2014), S. 25-27
- Aschmann, V.; Effenberger, M. und Tappen, S.: Marktübersicht BHKW. In: Biogas Forum Bayern Nr. V-9/2014 (2. Auflage), Hrsg. ALB Bayern e.V.

Aschmann, V., Effenberger, M.: Motor warmhalten. dlz-Agrarmagazin Juli 2013

- Häring, G., Sonnleitner, M., Wiedemann, L., Zörner, W., Aschmann, V.: Technische Anforderungen an Biogasanlagen für die flexible Stromerzeugung. In: Biogas Forum Bayern Nr. IV-12/2013, Hrsg. ALB Bayern e.V., Stand: 04.11.2015.
- Effenberger, M.: In vier Schritten die Schwächen aufdecken. *top agrar* 6 (2012), Verlagsbeilage "Energiemagazin", S. 8-11

11 Literaturverzeichnis

- Agostini, A.; Battini, F.; Giuntoli, J.; Tabaglio, V.; Padella, M.; Baxter, D.; Marelli, L.; Amaducci, S.: Environmentally Sustainable Biogas? The Key Role of Manure Co-Digestion with Energy Crops. *Energies* 8 (2015), S. 5234-5265.
- Aschmann, V.; Effenberger, M.: Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, FKZ: K/08/01. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising: 2012, 74 S.
- Aschmann, V.; Kissel, R.; Effenberger, M.; Eichelser, R.; Gronauer, A.: Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motoreinstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromversorgung. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg: 2007.
- Aschmann, V.; Kissel, R.; Stanzel, H.; Gronauer, A.: Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung. Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg: 2006.
- Bekker, M.; Oechsner, H.: Betrieb einer Mikrogasturbine mit Biogas praktische Erfahrungen. *Energietechnik* 65 (2010), 2, S. 136-138.
- Grohe, H.: Otto- und Dieselmotoren: Arbeitsweise, Aufbau und Berechnung von Zweitakt- und Viertakt-Verbrennungsmotoren. 11. Auflage, Heinz Grohe, Würzburg: 1995. - ISBN 3-8023-1559-6.
- Effenberger, M.; Hijazi, O.: Strom- und Wärmeerzeugung aus Biogas. In: Dressler, D.; Engelmann, K.; Böswirth, T.; Bryzinski, T.; Effenberger, M. et al.: Expertengruppe Ressourcenmanagement Bioenergie in Bayern – ExpRessBio. Abschlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (FKZ: EW/12/11). Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing: Juli 2016.
- Keymer, U.; Ikenmeyer, K.: Direktvermarktung II Regelleistung. In: Biogas Forum Bayern Nr. V-18/2014, Hrsg. ALB Bayern e.V., Stand: 04.11.2015.
- Klein, C.; Rozanski, K.; Gailfuß, M.; Kukuk, J.; Beck, T.: BHKW-Kenndaten 2014/2015. Module, Anbieter, Kosten. ASUE Arbeitsgemeinschaft f
 ür sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V., Berlin, Stand: Oktober 2014.
- Prager, M.; B. Korb; G. Wachtmeister: Emissionen beim flexiblen Betrieb von Biogas-BHKW. In: FNR/KTBL-Biogaskongress, 22./23. September 2015, KTBL-Schrift 508, Potsdam: 2015, S. 88 -97.
- Sklorz, M.; Schnelle-Kreis, J.; Gottlieb, A.; Kühnerl, N.; Schmid, B.: Katalysatoren an Biogasmotoren. In: Untersuchungen zum Einsatz von Oxidationskatalysatoren an landwirtschaftlichen Biogasverbrennungsmotoren. Schlussbericht an das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV), München: 2004.

Anhang

Tab. 27: Gemessene Volumenkonzentrationen von Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff im Biogas vor dem BHKW während der Messtermine (Minimum, Mittelwert und Maximum)¹⁰

		1. Messung		2. Messung			3. Messung			4. Messung			
		CH ₄	CO ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	O ₂
GOM	Maximum	53,7	42,9	0,43	53,6	42,0	0,26	52,8	45,5	0,35	53,0	44,3	0,45
75	Mittelwert	53,6	42,8	0,43	53,3	41,5	0,26	52,7	45,0	0,33	52,9	44,1	0,44
	Minimum	53,5	42,6	0,43	53,1	41,2	0,25	52,6	44,8	0,31	52,8	44,0	0,43
GOM	Maximum	52,7	45,0	0,20	51,9	41,7	0,11	53,4	41,1	0,11	51,4	44,9	0,11
190	Mittelwert	52,6	44,9	0,20	51,8	41,4	0,11	53,0	41,0	0,11	51,2	44,5	0,09
	Minimum	52,5	44,7	0,19	51,7	41,3	0,10	52,6	40,9	0,11	50,9	44,2	0,07
GOM	Maximum	52,1	44,4	0,25	52,9	42,8	0,02	53,6	40,1	0,16	51,4	44,2	0,12
250	Mittelwert	52,0	44,3	0,24	52,6	42,7	0,01	52,9	39,8	0,15	51,2	43,8	0,10
	Minimum	52,0	44,1	0,23	52,5	42,6	0,01	52,4	39,6	0,14	51,1	43,5	0,09
GOM	Maximum	51,8	43,7	0,45	51,1	41,7	0,60	53,0	40,2	0,47	49,9	43,3	0,69
BR	Mittelwert	51,5	43,5	0,34	50,6	41,1	0,59	53,0	40,0	0,47	49,6	43,1	0,68
211	Minimum	51,2	43,3	0,32	50,4	40,9	0,58	52,9	39,9	0,46	49,4	43,0	0,66
GOM 360	Maximum	52,6	48,0	0,14	51,8	43,4	0,07	51,9	47,0	0,12	51,9	46,3	0,10
	Mittelwert	52,3	47,3	0,12	51,7	43,3	0,07	51,8	47,0	0,08	51,7	45,5	0,09
	Minimum	52,1	46,9	0,11	51,6	43,1	0,07	51,7	46,9	0,01	51,5	44,8	0,08
GOM	Maximum	53,6	48,7	0,15	54,1	45,3	0,70	55,0	45,4	0,54	54,6	46,3	0,96
530	Mittelwert	53,3	48,3	0,13	53,9	45,2	0,34	54,9	44,8	0,50	54,2	45,2	0,58
	Minimum	52,9	48,1	0,12	53,5	44,9	0,24	54,8	44,5	0,41	53,6	42,5	0,27
GOM	Maximum	55,2	48,0	0,70	52,2	43,5	0,79	53,9	44,7	0,54	53,4	47,7	0,58
549	Mittelwert	54,6	47,5	0,65	51,1	42,5	0,46	53,6	44,6	0,45	53,2	47,3	0,42
	Minimum	54,3	46,7	0,54	50,3	42,0	0,34	53,4	44,4	0,41	52,9	46,6	0,36
ZSM	Maximum	53,4	46,2	1,2	52,0	46,1	0,30	55,0	49,1	0,17	53,7	47,8	0,26
265	Mittelwert	52,1	45,9	1,0	51,4	45,4	0,08	54,6	48,9	0,10	53,7	47,7	0,24
	Minimum	51,4	45,4	0,91	50,7	45,0	0,00	54,4	48,5	0,07	53,5	47,4	0,22
MGT	Maximum	65,3	37,8	0,10	60,6	40,7	0,09	64,2	37,7	0,13	61,5	36,6	0,31
30	Mittelwert	65,1	37,3	0,08	60,4	40,3	0,03	63,9	37,2	0,05	61,3	36,4	0,26
	Minimum	64,8	37,1	0,05	59,9	40,1	0,02	63,5	36,9	0,01	61,2	36,3	0,23
MGT	Maximum	62,5	43,8	0,05	61,6	42,0	0,06	61,1	41,2	0,01	59,8	40,2	0,48
65	Mittelwert	61,8	42,2	0,02	61,4	41,6	0,03	60,6	41,0	0,00	58,8	39,4	0,31
	Minimum	61,4	41,5	0,00	61,2	41,1	0,02	60,2	40,8	0,00	57,8	39,0	0,18

¹⁰ Messergebnisse im feuchten Biogas.