

Abgas- und Leistungsverhalten biogasbetriebener BHKW an Praxisanlagen

Volker Aschmann*, Rainer Kissel und Andreas Gronauer

Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Vöttlinger Str. 36, 85354 Freising, Germany

Kurzfassung - Abstract

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen ergeben einen repräsentativen Überblick über das Emissionsverhalten und die Leistungsfähigkeit von biogasbetriebenen BHKW verschiedener Leistungsklassen bei unterschiedlichen Wartungszuständen. Hierzu wurden die Energie- und Stoffströme (In- und Outputströme) an 10 Biogas-BHKW (5 Gas- und 5 Zündstrahl-BHKW) in den Leistungsklassen von 30 kW_{el.} bis 340 kW_{el.} über einen Zeitraum von etwa einem Jahr gemessen. Bei allen Anlagen wurde ein durchschnittlicher Methangehalt von etwa 50 % CH₄ ermittelt. Die Abgasrichtwerte der TA-Luft für Kohlenmonoxid- und Formaldehydkonzentrationen konnten mit Ausnahme des 30 kW_{el.} (CO) und des 80 kW_{el.} (Formaldehyd) bei allen BHKW eingehalten werden. Die NO_x-Richtwerte im Abgas konnten nur bei den BHKW sicher eingehalten werden, bei denen eine Wartung und Einstellung bei gleichzeitiger Kontrolle der Abgaswerte erfolgte. Eine Einstellung des BHKW nach Leistungskriterien hatte zum Teil erhebliche Grenzwertüberschreitungen zur Folge. Bei allen untersuchten BHKW wurde eine Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades über die Zeit festgestellt.

Schlüsselwörter: Abgas, Emissionen, Biogas, BHKW, elektrischer Wirkungsgrad

Exhaust emissions and performances of biogas-driven combined heat and power plants

The aim of this project was to give a representative overview of the efficiency and the exhaust gas emissions of biogas-driven combined heat and power units (CHPU) with various power outputs and for different service conditions. Over a period of one year, a complete analysis of input and output streams of 10 CHPU (5 pilot injection and 5 gas engines, respectively) with electrical power outputs of between 30 kW and 340 kW was performed. The average methane content in the biogas from all plants investigated was about 50 % (v/v). The guideline values for carbon monoxide (CO) and formaldehyde were met by almost all of the CHPU under investigation. The recommended values for NO_x in the exhaust gas were met only in those cases where the CHPU were serviced in conjunction with the monitoring of the exhaust gas values. In part, guideline values for exhaust gas emissions were significantly exceeded if engines were adjusted with respect to maximizing power output only. All of the CHPU investigated exhibited a decreasing trend of electrical efficiency over the course of this study.

Keywords: Exhaust emissions, biogas, CHPU, electrical efficiency

1 Einleitung

Für den Betrieb von Blockheizkraftwerken (BHKW) mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von ≥ 1 MW ist eine Genehmigung nach Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) erforderlich, wodurch die von der „Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA-Luft 2002) vorgegebenen Grenzwerte bezüglich der Abgasemissionen eingehalten werden müssen (Tabelle 1). Kleinere, dem Baurecht unterliegende Anlagen müssen dem Stand der Technik genügen. In diesem Fall gibt es zwar keine gesetzlich bindenden Grenzwerte, dafür aber Richtwerte, die sich an den Vorgaben der TA-Luft orientieren und die z.B. im Biogashandbuch Bayern (Bayerisches Landesamt für Umweltschutz 2004) auch als Grundlage zur Genehmigung von Biogasanlagen herangezogen werden können (Tabelle 1).

Tabelle 1: Emissionsgrenzwerte (BImSchG) und –richtwerte für Biogas-BHKW nach TA-Luft (2002) und Bayerischem Landesamt für Umweltschutz (2004)

Abgas	Motorentyp	TA-Luft	Biogashandbuch Bayern
		Grenzwerte ≥ 1 MW	Richtwerte < 1 MW
CO	Gas	1.000 mg/m ³	1.000 mg/m ³
	Zündstrahl	2.000 mg/m ³	2.000 mg/m ³
NO _x	Gas	500 mg/m ³	500 mg/m ³
	Zündstrahl	1.000 mg/m ³	1.500 mg/m ³
HCHO	Gas	60 mg/m ³	60 mg/m ³
	Zündstrahl	60 mg/m ³	60 mg/m ³

Von der Fachhochschule Zwickau wurden im Jahr 2000 Untersuchungen hinsichtlich des Abgasverhaltens unterschiedlicher biogasbetriebener BHKW in Abhängigkeit der Luftzufuhr, der Leistung, des Ein-

* Corresponding author. Tel. ++49 (0) 8161 71 3796; Fax: ++49 (0) 8161 71 4363; E-mail: volker.aschmann@lfl.bayern.de

spritzzeitpunktes und des Zündölanteils durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass Gasmotoren im oberen Leistungsbereich ($> 170 \text{ kW}_{el.}$) unter Einhaltung des entsprechenden Luftverhältnisses die Vorgaben der TA-Luft sicher erfüllen (Zwahr & Eichert 2003). Das entspricht den Literatur- bzw. Herstellerangaben, nach denen die Grenzwerteinhaltung innermotorische Maßnahmen erfordert (Köhler 1997, Waerdt 2000, Pott 2001). Ob daraus Wirkungsgradeinbußen resultieren, geht aus dem Forschungsbericht nicht hervor. Mit den vier untersuchten Zündstrahlaggregate (75-120 $\text{kW}_{el.}$) konnten die erforderlichen CO- und NO_x -Grenzwerte nicht gleichzeitig eingehalten werden (Zwahr & Eichert 2003). Messungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, die unabhängig vom Betriebszustand an Zündstrahlaggregate (22-160 $\text{kW}_{el.}$) durchgeführt wurden, kommen zum gleichen Ergebnis (Gronauer et al. 2003). In diesem Forschungsvorhaben wurde außerdem festgestellt, dass sich die Abgaseigenschaften tendenziell mit der Größe des Aggregats verbessern und die zum Teil drastischen Grenzwertüberschreitungen auf den generell mangelhaften Wartungszustand der Aggregate zurückzuführen sind. Die Resultate entsprechen den Aussagen von Mohr (1997), der bei reinem Dieselmotorbetrieb unter Vollast geringe Emissionen an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) bei gleichzeitig relativ hohem Ausstoß an NO_x angibt, so dass der entsprechende Grenzwert der TA-Luft nur schwer und unter Inkaufnahme von Wirkungsgradverlusten erreicht werden kann. Die Möglichkeit einer Schadstoffreduzierung von CO und Formaldehyd (HCHO) durch Oxidationskatalysatoren ist technisch möglich, wird aber aufgrund fehlender Langzeituntersuchungen an Praxisanlagen und der oft hohen Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas bisher kaum angewandt (GE Energy-Jenbacher Gasmotoren GmbH & Co OHG 2004, Sklorz et al. 2004).

Das Ziel dieser Untersuchung ist es zu klären, in wie weit die Abgaszusammensetzung und der elektrische Wirkungsgrad durch verschiedene Motorenarten bzw. deren Leistungsklassen, sowie durch deren Wartungszustand beeinflusst werden. Ferner können anhand der hier dargestellten Ergebnisse Empfehlungen für die Wartung von BHKW in der Praxis abgeleitet werden.

2 Material und Methoden

Um einen repräsentativen Überblick über den Stand der Technik für die Beantwortung der Fragestellungen zu erhalten, wurden 10 verschiedene, seit 2003 betriebene BHKW ausgewählt. Die von verschiedenen Herstellern stammenden 5 Gas-BHKW gehörten den Leistungsklassen 30 kW, 75 kW, 135 kW, 170 kW und 340 kW an, die 5 Zündstrahl-BHKW den Leistungsklassen 30 kW, 80 kW, 100 kW, 160 kW und 250 kW. Die ausgewählten BHKW wurden, wenn möglich in

drei verschiedenen Betriebszuständen (ungewartet, nach Betreiberwartung, nach Herstellerwartung), bei drei Wiederholungen gemessen, um die Auswirkungen verschiedener Wartungsmaßnahmen dokumentieren zu können. Dabei umfasste ein Messtermin eine vierstündige Dauermessung.

2.1 Messprogramm und Messtechnik

Für die Bewertung der Auswirkungen einzelner Wartungsmaßnahmen ist eine lückenlose Dokumentation der Energie- und Stoffströme wichtig. Zu diesem Zweck wurde das in Tabelle 2 aufgeführte Messprogramm für die Durchführung der Messungen entwickelt.

Tabelle 2: Messprogramm

	Parameter	Messtechnik/Verfahren
Input:	<ul style="list-style-type: none"> • Gasvolumen • Gaszusammensetzung (CH_4, CO_2, O_2, H_2S, H_2) • Druck und Temp. • Zündölanteil • Volumen der Motorzuluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbinenradzähler • Awite Gasanalysegerät • Drucksensor, PT 100 • gravimetrisch über Wägezelle • testovent 410
Output:	<ul style="list-style-type: none"> • Abgaszusammensetzung (NO_x, CO, O_2, Temperatur) • Kohlenwasserstoffe • Formaldehyd (HCHO) • Abgasvolumenstrom • Generatorstrom • elektrischer Wirkungsgrad 	<ul style="list-style-type: none"> • Testo 350 • FID • VDI-Richtlinie 3862 (2002) • Berechnung • Multimes • DIN ISO 3046-1 (1995)

Die Messung unterschiedlicher BHKW verschiedener Leistungsklassen an einzelnen Praxis-Biogasanlagen erfordert ein hohes Maß an Flexibilität bei der Adaption der Messtechnik. Aus diesem Grund wurden einzelne Messmodule gefertigt, die es ermöglichen, den unterschiedlichen Anforderungen jeder einzelnen Anlage Rechnung zu tragen. Ein Messmodul beinhaltet eine Gasmessstrecke, die in die bestehende Gasleitung im BHKW-Raum eingebaut werden kann. In dieser Messstrecke werden Gasvolumen, -zusammensetzung, -druck und -temperatur erfasst. Eine zweite Messeinheit setzt sich aus einem Ölfass und einer Wägezelle mit Display für die gravimetrische Erfassung des Zündölverbrauches zusammen. Diese Messeinheit wird während der Messungen in die Zündölleitung integriert. Für die Luftvolumenmessung wird ein Volumenstrom-Messtrichter (testovent 410) verwendet, der mittels einer Manschette an die Luftansaugung adap-

tiert werden kann. Mit Hilfe einer Druckdifferenzmessung und der definierten Öffnung des Trichters kann das dem Verbrennungsprozess zugeführte Luftvolumen berechnet werden. Das Messmodul für die Abgasmessung besteht aus einer Messeinrichtung für Kohlenwasserstoffe sowie für die Zusammensetzung der Abgase NO_x , CO und O_2 und einer Einrichtung zur Probeentnahme aus dem Abgasstrom, um die Formaldehydkonzentration zu bestimmen. In Abb. 1 sind die gesamte Messtechnik und die einzelnen Module schematisch dargestellt.

2.2 Datenbearbeitung

Um eine Vergleichbarkeit der erhobenen Daten mit Ergebnissen anderer Untersuchungen zu gewährleisten, wurden die aufgezeichneten Daten auf Normbezugsbedingungen umgerechnet. Dies betrifft die erfassten Gasvolumina, die Abgaszusammensetzung und die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades. Als Normbezugsbedingungen für Gase gelten 1.013 hPa und 273 K. Die Abgaskonzentrationen werden nach der TA-Luft in mg/m^3 bei 0°C und 5 % O_2 angegeben. Für die Ermittlung des exakten elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW dienen die Angaben der DIN ISO 3046-1 (1995) als Bezugsbasis. Die Angaben erfolgen unter Normbezugsbedingungen von 1.000 hPa, 298 K und 30 % relativer Luftfeuchte. Die Bestimmung der Formaldehydkonzentrationen erfolgt nach der VDI-Richtlinie 3862 (2002).

Die statistische Auswertung wurde anhand einer Varianzanalyse (Tukey-Test) von Halbstundenmittelwerten mit dem Statistikprogramm SAS durchgeführt.

3 Ergebnisse

Der Methangehalt der untersuchten Anlagen betrug im Durchschnitt 50 %.

Bei zwei Anlagen wurden sehr hohe H_2 -Werte im Gas festgestellt, die auf eine sehr hohe Fermenterbelastung mit organischer Substanz hindeuten. Die H_2S -Gehalte lagen bei den meisten Anlagen durchschnittlich in einem unkritischen Bereich unter 200 ppm. Eine Anlage wies durch Lufteinblasung mit anschließendem Aktivkohlefilter Werte unter 10 ppm auf, während bei drei anderen Anlagen die Werte trotz Lufteinblasung teilweise deutlich über 300 ppm lagen. Ursächlich für die hohen H_2S -Werte waren fehlende stationäre Gasanalysegeräte (keine Kontrollmöglichkeit) verbunden mit einer defekten oder unzureichenden Lufteinblasung und somit einer ungenügenden Entschwefelungsleistung.

Die Auswertung der Formaldehydproben ergaben nur in einem Fall eine Überschreitung des von der TA-Luft und vom Biogashandbuch Bayern vorgegebenen Grenzwertes von $60 \text{ mg}/\text{m}^3$. Bei den Gas-BHKW lagen die Werte im Durchschnitt bei $2,3 \text{ mg}/\text{m}^3$ und damit nur knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze von $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$. Die Zündstrahl-BHKW wiesen im Mittel mit $8,8 \text{ mg}/\text{m}^3$ etwas höhere Werte auf (Tabelle 3). Es konnten auch keine Zusammenhänge zwischen dem Wartungszustand, den geleisteten Betriebsstunden und der Höhe der Formaldehydemissionen ermittelt werden.

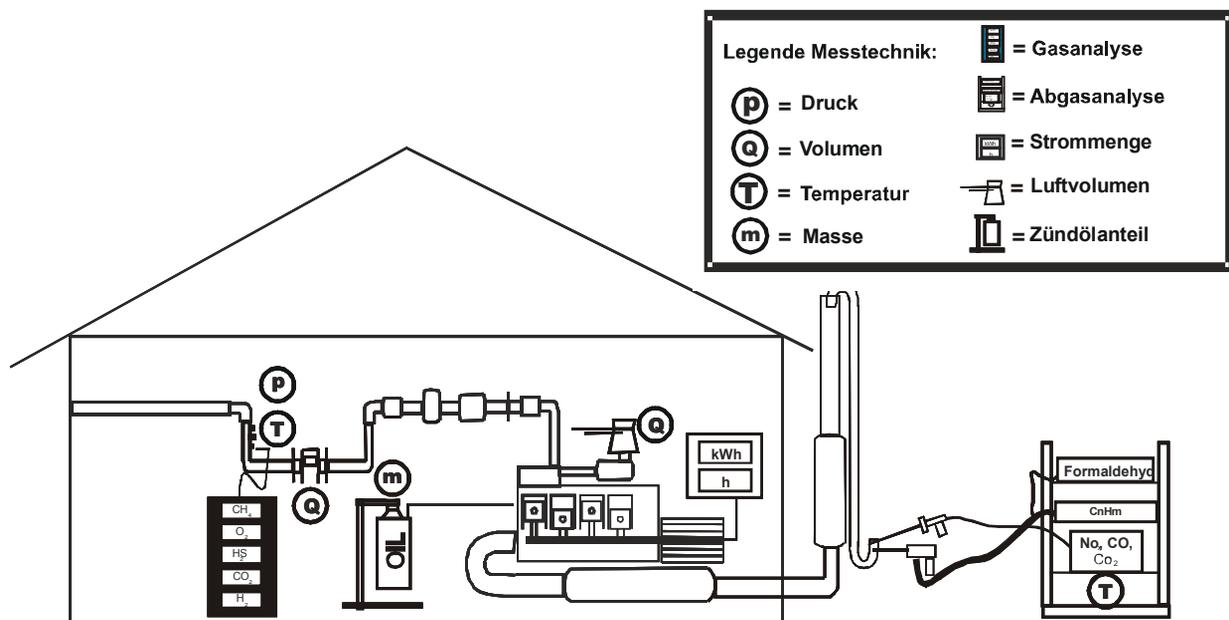


Abb. 1: Schematische Übersicht über die Messanordnung im BHKW

Tabelle 3: Durchschnittswerte (mg/m³) aller Abgasmessungen bei unterschiedlicher Wartung

	NO _x	CO	C _n H _m	HCHO
Gas-BHKW	1.781	558	269	2,3
Zündstrahl-BHKW	1.313	1.305	560	8,8

Bei der Gegenüberstellung aller gemessenen NO_x-Werte der untersuchten BHKW in Abhängigkeit der Wartungszustände fällt auf, dass bei den Gas-BHKW zum einen deutlich erhöhte Werte auftraten, und zum anderen diese Werte auch erheblichen Schwankungen unterlegen haben. Im Mittel über alle Messungen lag der Wert bei den Gas-BHKW bei 1.781 mg/m³ und damit über dem Dreifachen des Richtwerts von 500 mg/m³. Die NO_x-Werte der Zündstrahl-BHKW variierten nicht so stark und lagen im Mittel mit 1.313 mg/m³ deutlich unterhalb des Richtwertes von 1.500 mg/m³ (Tabelle 3). Bei den Zündstrahl-BHKW lagen die CO-Werte im Mittel mit 1.305 mg/m³ zwar deutlich unter dem Richtwert von 2.000 mg/m³, waren aber im Vergleich zu den Gas-BHKW (558 mg/m³) mehr als doppelt so hoch (Tabelle 3).

Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung im Motor. Bei Biogas-BHKW werden die Kohlenwasserstoffe durch den sogenannten „Methanschluß“ überwiegend in Form von CH₄ freigesetzt. Geringe Methangehalte im Biogas (unvollständige Verbrennung) und Ventilüberschneidungen begünstigen den Methanschluß (Sklorz et al. 2004). Aufgrund seiner hohen Klimarelevanz (CO₂-Äquivalenz = 23) sollte der Methanschluß im Abgas möglichst gering gehalten werden. Es gibt bis jetzt jedoch noch keine gesetzlich vorgeschriebenen Richt-

bzw. Grenzwerte, die einzuhalten sind. Die mittleren C_nH_m-Konzentrationen der Zündstrahl-BHKW betrug 560 mg/m³ im Abgas (Tabelle 3) und lagen damit doppelt so hoch, wie bei den Gas-BHKW.

4 Diskussion

In der Praxis konnten zwei verschiedene Wartungs- bzw. Einstellungskonzepte für die Motoreinstellung beobachtet werden (Abb. 2). Die Einstellung eines 75 kW_{el.} Gas-BHKW erfolgte von einem Service-Team des Herstellers einzig nach Kriterien zur Erhöhung der Motorleistung ohne Kontrolle der Abgaswerte. Die Leistung des Motors konnte dadurch zwar deutlich erhöht werden, jedoch wurden aufgrund der Verminderung der Luftüberschusszahl Lambda (λ) von 1,5 auf 1,2 („fettere“ Verbrennung) und der damit verbundenen Änderung der Verbrennungsgüte (Gütling & Kamm 2001) die Richtwerte beim NO_x-Gehalt im Abgas um das 6-fache überschritten (Abb. 2).

Ein anderes Motorenkonzept sieht die Einstellung des Motors unter Berücksichtigung der Abgaswerte und des Zündölanteils vor (80 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW). Hierbei ist eine deutliche Verbesserung der CO-Werte im Abgas und eine Verringerung der Zündölanteile bei gleichbleibend hoher Leistung des Motors unter Einhaltung der Abgasrichtwerte zu erkennen (Abb. 2).

Die in Abb. 3 dargestellten Abgaswerte aller untersuchten Gas-BHKW verdeutlichen den Zusammenhang von NO_x-Emissionen in Bezug auf die Wartung. Es ist bei allen BHKW, außer dem 75 kW_{el.} Gas-BHKW eine deutliche Verbesserung der Abgaswerte nach der Wartung bezüglich NO_x festzustellen. Allerdings liegen diese Werte in allen Fällen deutlich über dem Richtwert für NO_x von 500 mg/m³, während die

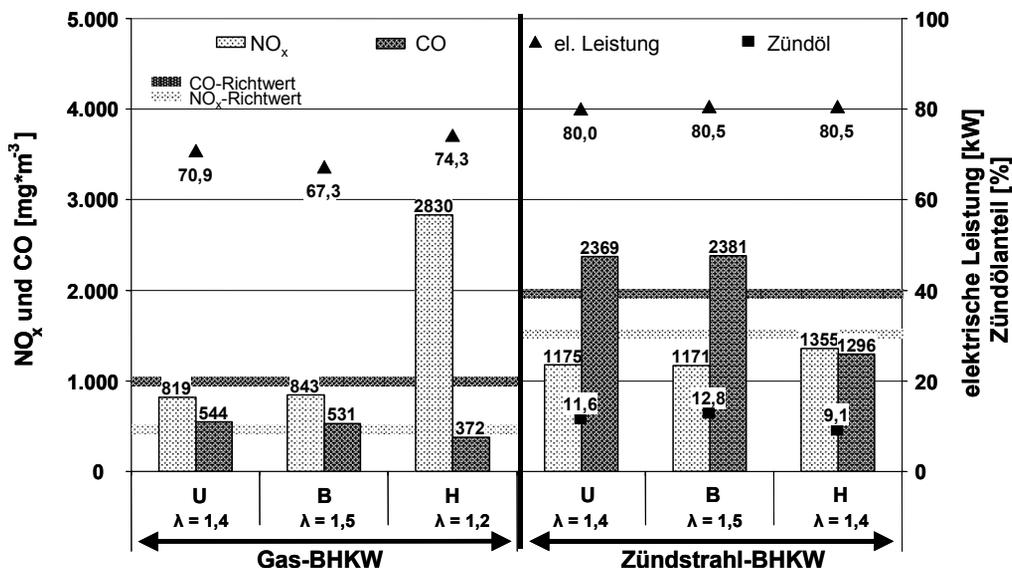


Abb. 2: Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Wartungskonzepte auf das Abgas- und Leistungsverhalten (75 kW_{el.} und 80 kW_{el.}) (U – ungewartet; B – nach Betreiberwartung; H – nach Herstellerwartung)

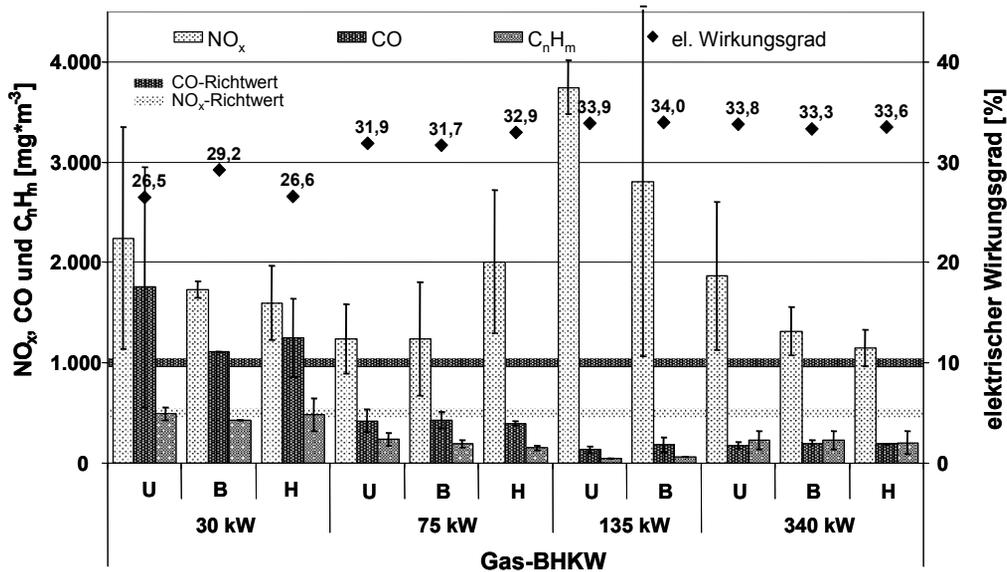


Abb. 3: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Gas-BHKW in Abhängigkeit der Wartung (U – ungewartet; B – nach Betreiberwartung; H – nach Herstellerwartung)

Werte für CO, außer beim 30 kW_{el.} BHKW, deutlich unter den Richtwerten von 1.000 mg/m³ bleiben. Die CO-Werte der Gas-BHKW lassen eine deutliche Verringerung mit Zunahme der Leistung erkennen. Die Werte betragen bei den höheren Leistungsklassen mit ca. 200 mg/m³ nur etwa ein Fünftel des Richtwertes von 1.000 mg/m³. Dies lässt sich durch die geringen Lambda-Werte erklären, die zu höheren Verbrennungstemperaturen führen, wodurch die NO_x-Konzentrationen ansteigen, die CO-Gehalte im Abgas jedoch stark reduziert werden. Die Hauptursache dieser Richtwertüberschreitungen dürfte darin liegen, dass bei keinem der hier untersuchten Gas-BHKW eine Wartung des Motors unter Berücksichtigung der momentanen Abgaswerte erfolgte, sondern lediglich Routinewartungen durchgeführt wurden. Bei der statisti-

schen Auswertung konnte zwar, mit Ausnahme des 75 kW_{el.} Gas-BHKW, eine signifikante Verbesserung der NO_x-Werte im Abgas durch eine Betreiber- bzw. Herstellerwartung nachgewiesen werden, jedoch ohne die Richtwerte zu unterschreiten.

Beim Abgasverhalten der Zündstrahl-BHKW lässt sich kein eindeutiger Bezug zum Wartungszustand feststellen. Es wird jedoch deutlich, dass bei den 30 kW_{el.}, 80 kW_{el.} und 160 kW_{el.} BHKW nur vereinzelt geringfügige Richtwertüberschreitungen auftraten und die Abgaswerte bei den 100 kW_{el.} und 250 kW_{el.} BHKW unterhalb der Abgasgrenzwerte für Zündstrahl-BHKW gehalten werden konnten (Abb. 4). Bei den Zündstrahl-BHKW erfolgte bei 4 von 5 Motoren die Wartung bei gleichzeitiger Kontrolle und Berück-

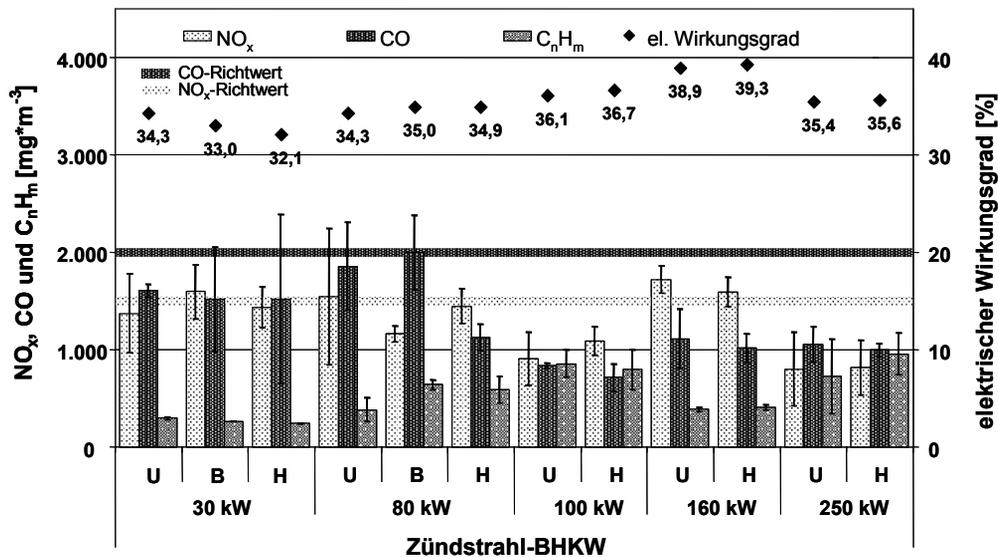


Abb. 4: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Zündstrahl-BHKW in Abhängigkeit der Wartung (U – ungewartet; B – nach Betreiberwartung; H – nach Herstellerwartung)

sichtigung der Abgaswerte sowie des Zündölanteils. Es konnten hier jedoch keine signifikanten Einflüsse zwischen der Wartung und den Emissionswerten nachgewiesen werden.

Auffällig ist, dass bei allen, außer den 30 kW_{el.} BHKW der elektrische Wirkungsgrad durch eine Wartung geringfügig erhöht wird (Abb. 4). Dies konnte statistisch jedoch nicht abgesichert werden.

Wenn man den Wirkungsgrad nicht in Abhängigkeit der Wartung sondern über den Zeitraum der Messreihen (ca. 1 Jahr) betrachtet, so zeigt sich, dass der Wirkungsgrad der BHKW (außer des 100 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW) mit zunehmender Betriebsstundenanzahl abnimmt (Abb. 5). Es ist deshalb davon auszugehen, dass die BHKW im Laufe der angestrebten Standzeit von 4 Jahren (Zündstrahl-BHKW) bis 6 Jah-

ren (Gas-BHKW) die vom Hersteller angegebenen Wirkungsgrade nicht halten können. Abschätzungen über den durchschnittlichen Wirkungsgrad über die gesamte Betriebsdauer können aber aufgrund dieser zeitlich begrenzten Messungen nicht gemacht werden.

Um einen besseren Vergleich der gemessenen Wirkungsgrade mit denen der Herstellerangaben zu erhalten, wurden, soweit möglich, die Wirkungsgrade herangezogen, die die einzelnen BHKW nach ca. 12.000 Betriebsstunden (ca. 2 Jahre Betriebsdauer) aufwiesen. In Abb. 6 ist dieser Vergleich graphisch dargestellt. Vergleicht man die Trendkurven, erkennt man einen relativ parallelen Verlauf zwischen den Herstellerangaben und den ermittelten Werten, die jedoch um etwa 1 % (Zündstrahl-BHKW) bzw. 1,5 % (Gas-BHKW) nach unten versetzt sind.

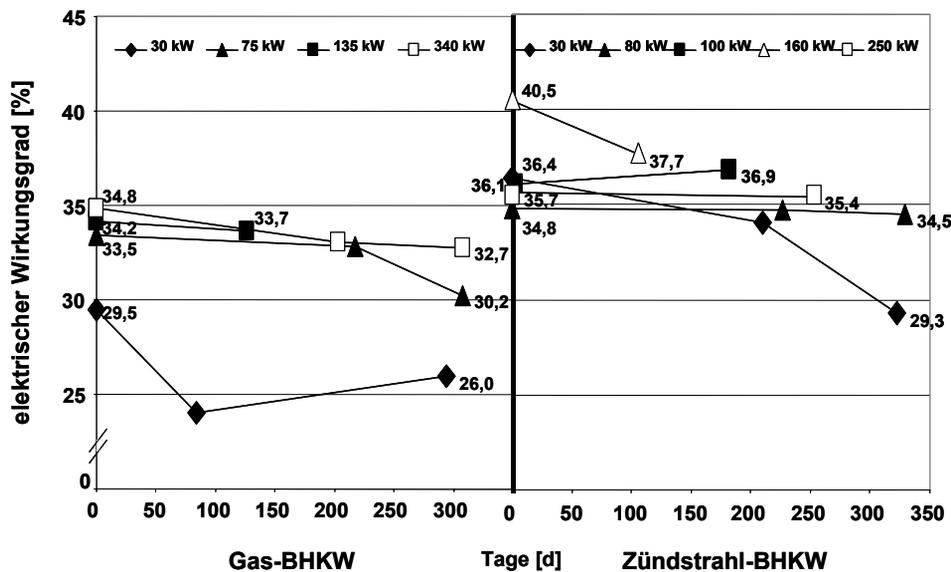


Abb. 5: Verlauf der elektrischen Wirkungsgrade der untersuchten BHKW während eines Messzeitraums von 350 Tagen

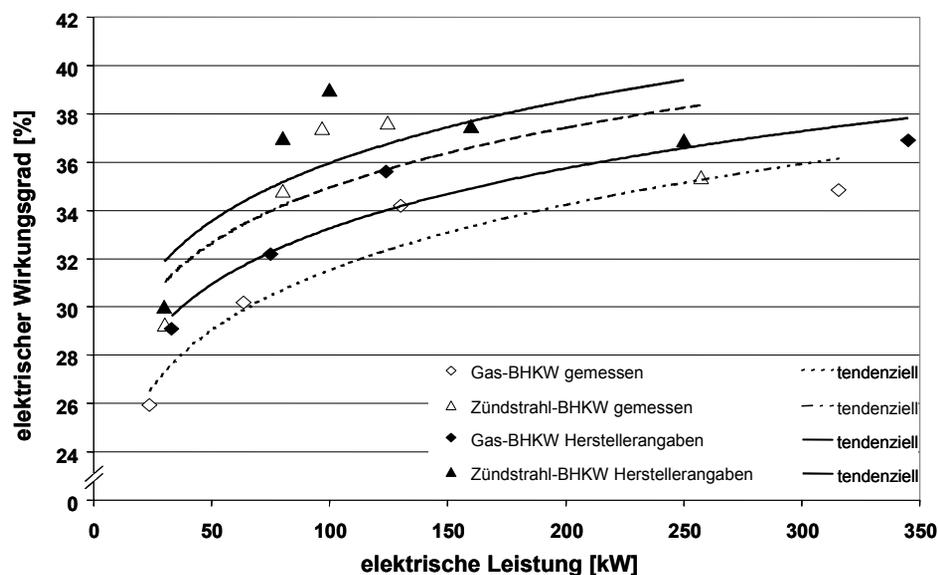


Abb. 6: Vergleich der gemessenen Wirkungsgrade (ca. 2 Jahre Betriebsdauer) mit Herstellerangaben

5 Schlussfolgerungen

Eine Kontrolle der Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas durch ein Gasanalysegerät ist für einen sicheren Betrieb ratsam, da hierdurch auf Veränderungen in der Gaszusammensetzung schneller reagiert werden kann. Die bei den Untersuchungen ermittelten Formaldehydkonzentrationen im Abgas lassen darauf schließen, dass bei den neuen BHKW dieser Leistungsklassen die Formaldehydemissionen keine Rolle spielen. Für eine Einhaltung der Abgasrichtwerte bezüglich der NO_x-Emissionen ist eine Kontrolle der Abgaswerte bei einer Wartung des Motors unabdingbar. Nur dadurch lässt sich bei der Motorwartung und -einstellung der Einfluss auf die Abgaswerte überprüfen und gegebenenfalls an die Erfordernisse anpassen. Alleinige Motoreinstellungen nach Leistungskriterien ziehen zum Teil extreme Richtwertüberschreitungen nach sich. So hat sich gezeigt, dass keines der untersuchten BHKW, an denen die Wartung ohne Kontrolle der Abgaswerte erfolgte, die Abgasrichtwerte bezüglich NO_x auch nur annähernd einhalten konnte. Die elektrischen Wirkungsgrade der BHKW verringern sich mit Zunahme der Betriebsstunden und liegen nach ca. 12.000 Betriebsstunden um etwa 1–1,5 % unterhalb denen der Herstellerangaben. Um Aussagen über das Verhalten der Wirkungsgrade über die gesamte Betriebsdauer zu erhalten wären weitergehende Untersuchungen nötig, die einen längeren Untersuchungszeitraum beinhalten müssten.

Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2004): Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Augsburg. <http://www.bayern.de/lfu/abfall/biogashandbuch/index.html>, Stand 15.11.2004.
- DIN ISO 3046-1 (1995): Hubkolben-Verbrennungsmotoren-Anforderungen, Teil 1; Deutsches Institut für Normung e.V., 4. Ausgabe, Beuth-Verlag, Berlin 1995, 23 pp.
- GE Energy-Jenbacher Gasmotoren GmbH & Co OHG (2004): Handbuch zur Nutzung von Bio-, Klär- und Deponiegasen in GE Jenbacher Gasmotoren. Unternehmensprospekt. Eigendruck, 98 pp.
- Gronauer A., Effenberger M., Kaiser F., Schlattmann M. (2003): Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). Materialien – Umwelt & Entwicklung Bayern, Abschlussbericht, 154 pp.
- Gütling K., Kamm K. (2001): Blockheizkraftwerke – Technik, Ökologie, Ökonomie. Landesamt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Hrsg.), Abteilung 3 – Industrie und Gewerbe, Karlsruhe, 38 pp.
- Köhler H. (1997): Stand der Entwicklung von Blockheizkraftwerken mit kleineren Gas-Otto-Motoren. In: Biogas, Verwertung und Aufbereitung; ATV-Schriftenreihe Bd. 9, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Hennef, 339-357.
- Mohr H. (1997): Technischer Stand und Potentiale von Diesel-/Gasmotoren. Brennstoff Wärme Kraft 49, 49-52 + 50-53.
- Pott J. (2001): Wirkungsgrade verschiedener Motorentypen. In: Biogas - mit neuer Energie Ressourcen schonen, Tagungsband 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Borken bei Kassel, 52-58.
- Sklorz M., Schnelle-Kreis J., Gottlieb A., Kühnerl N., Schmid B. (2004): Katalysatoren an Biogasmotoren. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). Materialien – Umwelt & Entwicklung Bayern, Band 182, 57 pp.
- VDI-Richtlinie 3862 (2002): Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren: Gaswaschflaschen/Tetrachlorkohlenstoff-Methode. Blatt 7. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5, 13 pp.
- TA-Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (GMBl. Nr. 25-29/2002 – 29 S. 511) in der Fassung vom 24. Juli 2002, 96-98.
- Waerdt S. (2000): Biogas-Blockheizkraftwerke – Abgasemissionen. Persönliche Mitteilung der Firma Pro2 Anlagentechnik GmbH, H.-M.-Schleyer-Str. 8, 47877 Willich.
- Zwahr S., Eichert H. (2003): Vergleich von Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren anhand von Messungen an Biogasanlagen in Sachsen. In: Informationen zur Biogaserzeugung: Gesammelte Referate, Stand 2003. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/, 63-90.

Danksagung

Die Arbeiten wurden vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz finanziert und fachlich vom Bayerischen Landesamt für Umwelt in Augsburg begleitet. Ein weiterer Dank gilt den beteiligten Anlagenbetreibern und Herstellerfirmen für die kooperative Zusammenarbeit.