

Volker Aschmann, Rainer Kissel und Andreas Gronauer, Freising

Umweltverträglichkeit biogasbetriebener Blockheizkraftwerke in der Praxis

Durchgeführt wurden Untersuchungen an sechs biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Es konnte gezeigt werden, dass die Abgasgrenzwerte bezüglich NO_x bei Volllastbetrieb in der Regel nicht eingehalten wurden. Eine Unterschreitung des Grenzwertes konnte nur unter Inkaufnahme von Wirkungsgrad-einbußen bei gleichzeitiger Erhöhung des Anteils an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) im Abgas erreicht werden. Es bestand ein direkter Zusammenhang zwischen der Reduktion der NO_x -Konzentration und der Höhe des Kohlenwasserstoffausstoßes. Für eine klimaschonende und zugleich effiziente energetische Verwertung von Biogas in Verbrennungsmotoren müssen daher weitere Maßnahmen ergriffen werden, um die erhöhten NO_x -Konzentrationen im Abgas zu reduzieren.

Dipl.-Ing. (FH) Volker Aschmann und Dipl.-Ing. (FH) Rainer Kissel sind technische Angestellte am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Am Staudengarten 3, 85354 Freising; e-mail: volker.aschmann@LfL.bayern.de
Dr. agr. Andreas Gronauer koordiniert den Arbeitsbereich Umweltechnik in der Landnutzung am Institut für Landtechnik und Tierhaltung.

Schlüsselwörter

Abgas, Emissionen, Biogas, BHKW, elektrischer Wirkungsgrad

Keywords

Exhaust gas, emissions, biogas, CHPU, electrical efficiency

Seit Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) in 2004 kam es zu einer erheblichen Steigerung der Inbetriebnahme neuer Biogasanlagen. Dieser Nachfrageboom hatte aber auch eine starke Erhöhung der Kosten für die Errichtung von Biogasanlagen zur Folge. Um so wichtiger ist es unter diesen Rahmenbedingungen, die Leistungsfähigkeit eines BHKW richtig einzuschätzen, da der Wirkungsgrad des BHKW mit ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit der Biogasanlage ist. Für eine nachhaltige und umweltschonende Energieproduktion ist dabei der Ausstoß an Schadgasen zu minimieren.

Die Einhaltung des nach der TA-Luft erforderlichen Grenzwertes für NO_x garantieren theoretisch mittlerweile alle BHKW-Hersteller. In der Praxis herrschen jedoch nicht immer optimale Verbrennungsbedingungen und auch die Wartung und Einstellung der Motoren erfolgt nicht immer unter Berücksichtigung der Emissionswerte, sondern richtet sich eher nach der Leistungsabgabe des BHKW.

Die in diesem Projekt untersuchten Biogas-BHKW wiesen sehr unterschiedliche Wartungskonzepte auf. Dabei reichte die Spanne von einer alleinigen Wartung durch den Anlagenbetreiber, der BHKW-Hersteller bot also keine Servicewartung an, bis zum Vollwartungsvertrag des Herstellers mit garantierter Leistung und Laufzeit. Ziel dieser Untersuchungen war die Analyse der Leistungs- und Emissionswerte neuer stationärer biogasbetriebener BHKW im Praxiseinsatz und die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen.

Material und Methoden

Für die Untersuchungen unter Praxisbedingungen wurden drei Zündstrahl- (110 kW_{el}, 250 kW_{el}, 265 kW_{el}) und drei Gas-BHKW (190 kW_{el}, 324 kW_{el}, 526 kW_{el}) ausgewählt.

Zur Erfassung der Stoff- und Energieströme der BHKW wurden folgende Messungen vorgenommen: Gasvolumen, -temperatur, -druck, -feuchte und -zusammensetzung in der Gastrecke; das Volumen der Verbrennungsluftzufuhr; die Zündölmenge und die abgegebene elektrische Leistung. Die dem Motor zugeführte Energiemenge wurde als Summe des Brennwertes des Normgasvolumens und der zugeführten Zündölmenge berechnet. Aus diesen Werten und der vom Generator abgegebenen Strommenge wurde gemäß der Vorgaben der DIN 3046-1 [1] der elektrische Wirkungsgrad des BHKW bestimmt. Das Volumen der Verbrennungsluft diente zur Berechnung des Abgasvolumenstromes und der Luftüberschusszahl Lambda (λ).

Abgasseitig wurden die Komponenten NO_x und CO sowie die Menge der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) erfasst. Anhand der gemessenen Werte konnten Angaben über den Einfluss der Wartung auf die Einhaltung der Grenzwerte der TA-Luft (Technische Anleitung Luft) [2] gemacht werden. Auch bestand die Möglichkeit, über die Abgasmenge und deren Zusammensetzung Schadstofffrachten zu bestimmen und diese in Beziehung zu den durchschnittlichen Emissionen aus dem deutschen Kraftwerksmix zu setzen. Die verwendete Messtechnik ist in *Tabelle 1* aufgeführt.

Tab. 1: Messtechnik

Table 1: Measuring equipment

Komponenten	Messgeräte	Einheiten
Gaszusammensetzung (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ S)	AWITE	%, ppm
Gasdruck, -feuchte und -temperatur	Druck- u. Feuchtesensor, PT 100	mbar, %, °C
Luftvolumen	testovent 410, Messimpeller	m ³
Zündölverbrauch	Wägezelle	kg
Gesamtheit der Kohlenwasserstoffe	FID	mg/m ³
Abgaszusammensetzung (NO _x , CO, CO ₂ , O ₂ , Temperatur)	Testo 350	mg/m ³ ; %, °C
Strommenge	KBR Multimes	kWh
elektrischer Wirkungsgrad	Berechnung nach DIN 3046-1	%

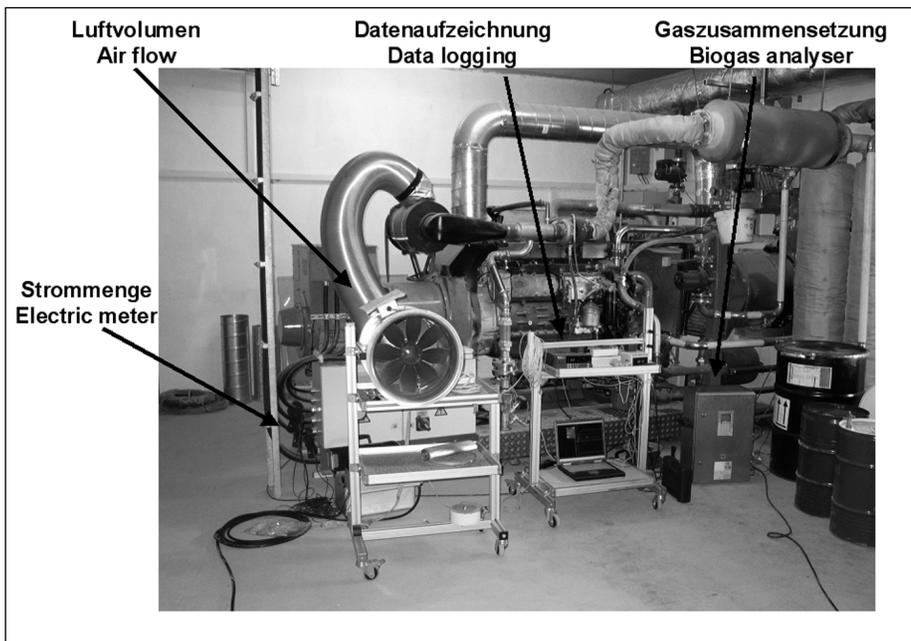


Bild 1: Messanordnung in der Praxis

Fig. 1: Measuring setup on site

In Bild 1 ist der messtechnische Aufbau in der Praxis dargestellt. Zu sehen sind das Gasanalysegerät, der Messimpeller zur Messung des Luftvolumens für die Verbrennung, die Datenaufzeichnungseinheit mit angeschlossenem Laptop sowie die Stromzangen zur Erfassung der produzierten Strommenge. Nicht zu sehen ist der Gaszähler und die Messtechnik für die Analyse der Abgaszusammensetzung, die sich außerhalb des BHKW-Raumes befindet.

Ergebnisse

Einfluss der Wartung

Eine Reihe von Faktoren beeinflusst die Leistungsfähigkeit, den elektrischen Wirkungsgrad und die Schadgasemissionen eines BHKW. Zum einen unterliegen die Komponenten einem gewissen alterungsbedingten Verschleiß. Hierzu zählen unter anderem das Motoröl, die Zündkerzen, die Ventile, der Luft-, Öl- oder Gasfilter und die Kolbenringe. Diese Verschleißteile können ersetzt werden, um somit die Lebensdauer des BKW zu verlängern. Die Wechsellzyklen sind im Normalfall vom Hersteller vorgegeben, können aber durch korrosive Bestandteile im Biogas (vorwiegend H₂S in Verbindung mit Feuchte) erheblich verkürzt werden. Die Durchführung der Wartung obliegt dem Anlagenbetreiber, es sei denn, es bestehen diesbezüglich konkrete Wartungsverträge.

Zum anderen bestimmt die Einstellung des BHKW (Lambda-Wert, Zündzeitpunkt, Ventilspiel) maßgeblich die Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad, aber auch die Höhe der Abgasemissionen. In der Regel erfolgen Wartung und Einstellung des BHKW durch das Service-Team des BHKW-Herstellers oder durch ein vom Anlagenbetreiber beauftragtes Unternehmen. Häufig wird die Wartung und Einstellung

auch vom Anlagenbetreiber selbst vorgenommen, entweder weil der BHKW-Hersteller keine Wartung anbietet oder der Anlagenbetreiber sich die Kosten sparen will.

In der Praxis wurden die einzelnen BHKW bei Volllastbetrieb untersucht. Es zeigte sich, dass in der Regel die Grenzwerte für NO_x unter Volllast im Betriebszustand „vor der Wartung“ (v.) nicht eingehalten wurden. Dies wurde den Herstellern mitgeteilt und es wurde veranlasst, bei der nächsten Wartung die Abgaswerte zu kontrollieren. Nach der Wartung wurden die BHKW erneut unter Volllastbetrieb gemessen.

Bild 2 zeigt die bei den Untersuchungen durchschnittlich gemessenen NO_x-Konzentrationen im Abgas aller untersuchten BHKW. Demnach wurden zum Teil erhebliche

che Grenzwertüberschreitungen festgestellt. Vor allem das 190 kW_{el} Gas-BHKW wies bei allen Messungen sehr hohe NO_x-Gehalte im Abgas auf. Dieses BHKW wurde nur vom Anlagenbetreiber gewartet und nur nach Leistungskriterien eingestellt. Ein Anpassen der Motoreinstellung an Abgaswerte fand zu keiner Zeit statt.

Die in der Grafik eingekreisten Messungen wurden für die weitere Veranschaulichung der Ergebnisse exemplarisch herausgegriffen, da hier die Einstellung des BHKW zu einer Absenkung der NO_x-Konzentration unter den Grenzwert führte.

Nach der Herstellerwartung konnte bei fünf BHKW eine Unterschreitung des NO_x-Grenzwertes festgestellt werden (einzig das 190 kW_{el} Gas-BHKW wies trotz Einstellung erhöhte NO_x-Gehalte auf). Dies hatte jedoch auf Grund der Erhöhung des Lambda-Wertes (Luftüberschusszahl) und der damit verbundenen Verringerung des Energiegehaltes im Brennstoffgemisch negative Auswirkungen auf die Konzentration der unverbrannten Kohlenwasserstoffe (C_nH_m) im Abgas. Gleichzeitig wurde bei den BHKW mit 110 kW_{el}, 250 kW_{el}, 324 kW_{el} und 526 kW_{el} eine Reduktion des elektrischen Wirkungsgrades festgestellt (Bild 3). Beim 265 kW_{el}-Zündstrahl-BHKW erfolgte keine Reduktion der NO_x-Werte, da diese bereits unterhalb des Grenzwertes lagen. Somit konnte eine Optimierung der Leistung vorgenommen werden, wodurch ein höherer elektrischer Wirkungsgrad erzielt wurde. Beim 190 kW_{el} Gas-BHKW wurde die NO_x-Konzentration zwar vermindert, lag aber noch immer auf sehr hohem Niveau. In die-

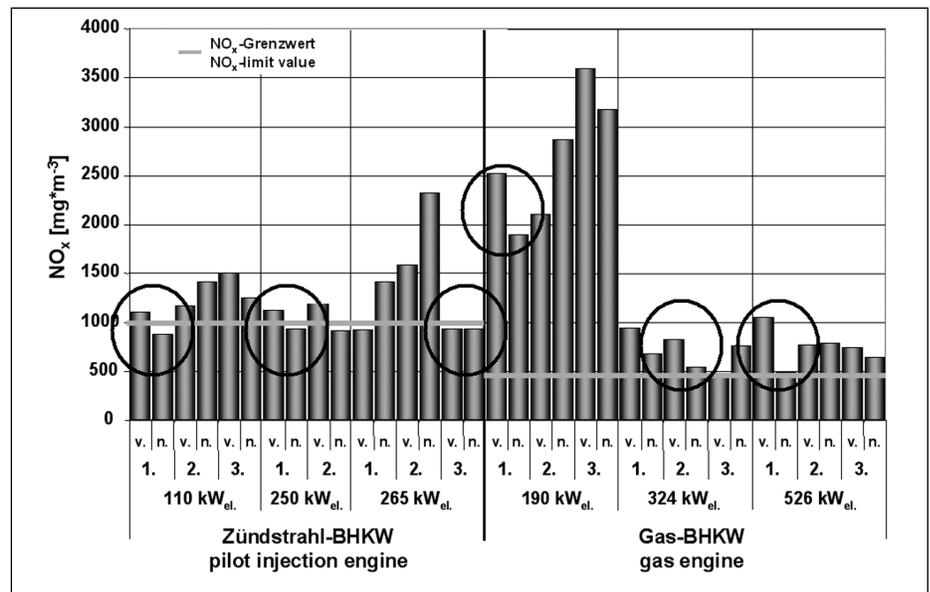


Bild 2: Durchschnittliche Abgaswerte der gemessenen Gas-BHKW vor der Wartung (v.) und nach der Wartung (n.)

Fig. 2: Exhaust gas emissions of biogas powered gas engines before maintenance (v.) and after maintenance (n.)

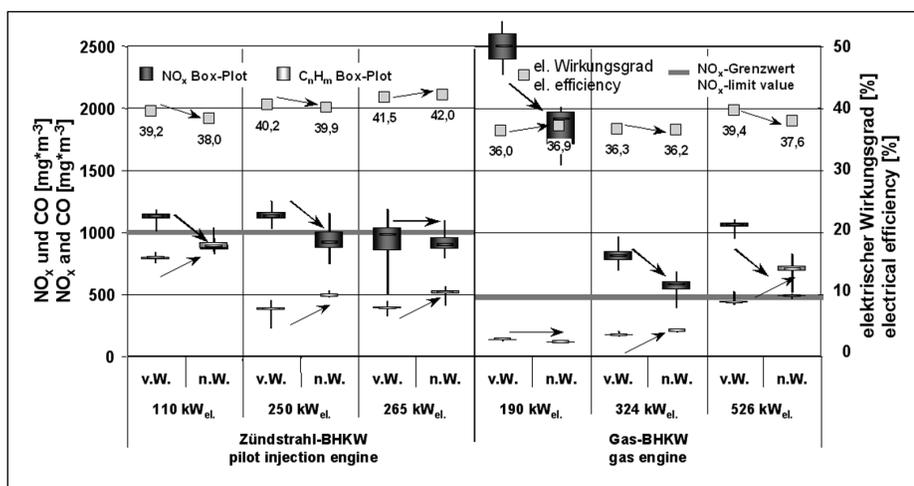


Bild 3: Veränderung der Abgaswerte (Box-Plots) und der elektrischen Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Motoreinstellung nach Abgasrichtwerten

Fig. 3: Exhaust gas emissions and electrical efficiency of biogas powered pilot injection gas engines depending on maintenance

sem Fall war der elektrische Wirkungsgrad nach der Wartung erhöht, die Leistungsabgabe blieb unverändert (Bild 3).

Allgemein lässt sich aus diesen Untersuchungen ableiten, dass die Einstellung des BHKW im Bereich der Grenzwerte der TA-Luft einen erheblichen Einfluss auf die Güte der Verbrennung, die elektrische Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad hat. Hier besteht ein Konflikt zwischen dem Bestreben, eine möglichst hohe Leistung und Effizienz bei der Verstromung des Biogases zu erzielen und der Vorgabe, möglichst geringe Schadstofffrachten in die Atmosphäre zu emittieren.

Schadwirkungen

Für eine nachhaltige und umweltverträgliche Stromproduktion aus erneuerbaren Energien ist die Klimarelevanz der einzelnen Verfahren zu betrachten. Erst dadurch wird eine Einordnung und Bewertung einzelner Verfahren und Verfahrenskomponenten möglich.

In diesem Projekt konnten anhand der Berechnung des Abgasvolumens Aussagen über die Schadstofffrachten der einzelnen BHKW gemacht werden. Zum Vergleich der Stromproduktion aus erneuerbaren und konventionellen Energiequellen erfolgte die Umrechnung der Emissionswerte in CO₂-Äquivalente bezogen auf die Produktion einer Kilowattstunde (kWh) elektrischer Energie. NO_x ist jedoch kein direkt treibhauswirksames Gas, wie etwa Methan, sondern gilt als versauernd und eutrophierend und ist an der Entstehung bodennahen Ozons beteiligt. Es wurde daher in SO₂-Äquivalenten angegeben.

Bild 4 zeigt zum einen die Menge an CO₂-Äquivalenten, die als Methanschlepp bei der Verbrennung emittiert werden, und zum anderen die Menge an SO₂-Äquivalenten durch die Emission an NO_x, jeweils bezogen auf die Produktion einer kWh Strom.

Die durch den Methanschlepp verursachten CO₂-Äquivalente liegen mit Werten zwischen 5 und 70 g•kWh⁻¹ weit unterhalb der CO₂-Emissionen des deutschen Strommixes mit 624 g•kWh⁻¹ (Bild 4). Hierbei handelt es sich jedoch nur um den Anteil, der direkt bei der Verstromung anfällt, ohne Berücksichtigung der gesamten Prozesskette vom Substratanbau bis zur Gärrestaubsbringung. Dennoch wird deutlich, dass die bei der Verbrennung erzeugten Emissionen an CO₂-Äquivalenten in der Gesamtbetrachtung keinesfalls zu vernachlässigen sind.

Bedingt durch die NO_x-Konzentrationen im Abgas verursacht die Stromproduktion aus Biogas deutlich höhere SO₂-Äquivalent-Emissionen als der deutsche Strommix mit 723 mg•kWh⁻¹ (Bild 4). Stickoxide entstehen bei hohen Verbrennungstemperaturen und im Vergleich zu Erdgas minderen Gasqualitäten (CO₂, H₂S, NH₃). Diese Emissionen wurden bei fast allen BHKW durch die Wartung verringert, jedoch wurde damit gleichzeitig die Höhe des Methanschleppes negativ beeinflusst (Bild 4).

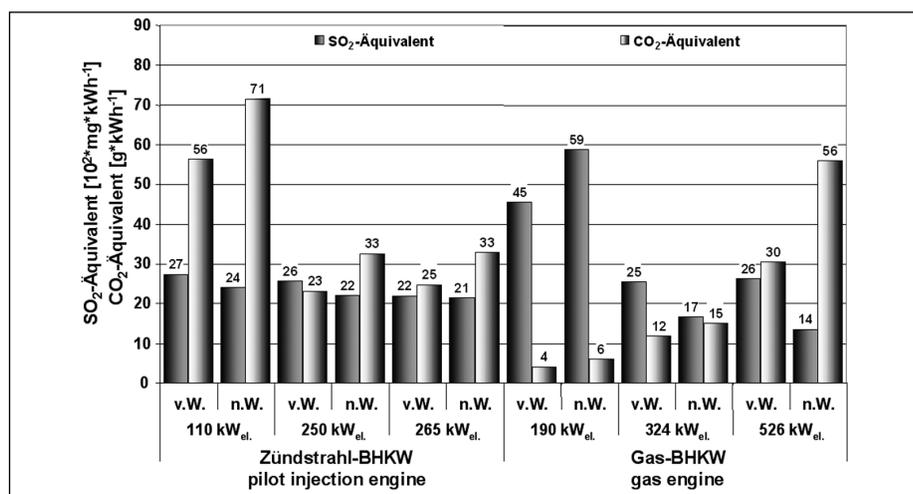


Bild 4: Gemessene Emissionen der untersuchten BHKW an CO₂- und SO₂-Äquivalenten
Fig. 4: Emissions of CO₂- and SO₂-equivalents from the CHPUs as investigated

Schlussfolgerungen

Effizienz und Umweltverträglichkeit biogasbetriebener BHKW stehen im direkten Zusammenhang. Eine einseitige Motoreinstellung nach Leistung und Profit geht immer zu Lasten der Umwelt. Bei der Wartung und Motoreinstellung sollte die Überprüfung und Einhaltung der vorgegebenen Emissionsgrenzwerte zum Standard gehören. Nur so kann eine effiziente und zugleich umweltverträgliche Stromproduktion gewährleistet werden.

Für die meisten Betreiber steht der wirtschaftliche Ertrag eines BHKW im Vordergrund. Die Einhaltung der vom Hersteller angegebenen elektrischen Wirkungsgrade ist über die gesamte Standzeit kaum zu realisieren und ist überwiegend vom Wartungszustand eines BHKW abhängig. Angaben über den durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrad (über die gesamte Laufzeit ermittelt) wären jedoch für Planung und Betriebssicherheit eines BHKW von Nutzen.

Förderung

Die Arbeiten wurden finanziert durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) mit Geldern der Europäischen Union (EU) aus dem Fond für regionale Entwicklung (EFRE). Die fachliche Begleitung oblag dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU).

Literatur

- [1] Deutsche Norm DIN ISO 3046-1: Hubkolben-Verbrennungsmotoren-Anforderungen, Teil 1; Deutsches Institut für Normung e.V., 4. Ausgabe, Beuth-Verlag, Berlin, 1995
- [2] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft) (GMBI. Nr. 25-29/2002 – 29 S. 511) in der Fassung vom 24. Juli 2002