



2019 | Volker Aschmann, Dr.-Ing. Mathias Effenberger, Dr.-Ing. Maximilian Prager, Simon Juan Tappe

Emissionsarmer Betrieb von Biogasmotoren

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Bauarten von Biogasmotoren	3
3	Emissionen	4
4	Emissionsminderung durch Abgasbehandlung.....	8
5	Kontrollmöglichkeiten	9
	Literatur	10
	Autoren	10

1 Einleitung

Die im Blockheizkraftwerk (BHKW) durch die Verbrennung des Biogas-Luft-Gemisches entstehenden Abgase enthalten als relevante Schadstoffe Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Formaldehyd (HCHO), Schwefeldioxid (SO_2), Stäube (Partikel) sowie restliches Methan (sogenannter Methanschlupf) in unterschiedlichen Konzentrationen. Diese Emissionen lassen sich standardisiert messen. Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) sowie die 44. Bundesimmissionsschutzverordnung (44. BImSchV 2019) legen die Höchstwerte fest. Durch technische Einrichtungen zur Abgasreinigung wie Katalysatoren und Nachverbrennungsanlagen können Emissionen reduziert werden.

2 Bauarten von Biogasmotoren

Für den Betrieb mit Biogas werden meistens Verfahren mit Kerzenzündung, mit gespülter Vorkammer und mit Zündstrahl genutzt. Die zugrundeliegenden Motoren für den Leistungsbereich bis etwa 500 kW sind meist Lkw-Dieselmotoren, die auf Gasbetrieb umgerüstet wurden.

Magerkonzept mit Oxi-Kat

Beim Magerkonzept wird dem Motor deutlich mehr Luft zugeführt, als eigentlich für die Verbrennung notwendig ist. Die Entflammung erfolgt bei kleineren Motoren durch eine spezielle Gasmotorenkerze, bei größeren Zylindervolumina durch eine ungespülte Vorkammerkerze und bei großen Zylindervolumina durch eine mit Gas gespülte Vorkammer mit Zündkerze. Vorteil des Magerkonzepts (Verhältnis Luft zu Brennstoff ($\text{Lambda} > 1$) gegenüber dem stöchiometrischen Betrieb ($\text{Lambda} = 1$) ist, dass der thermodynamische Wirkungsgrad steigt und der Motor effizienter gefahren werden kann. Allerdings funktioniert hier ein 3-Wege-Katalysator zur Stickoxidminimierung nicht mehr, weshalb die Stickoxidemissionen in der Regel durch die motorische Verbrennung eingehalten werden müssen – d. h. die Rohemissionen müssen die Grenzwerte erfüllen. Alternativ kommen neuerdings Abgasnachbehandlungssysteme unter Anwendung der selektiven katalytischen Reduktion (SCR) zum Einsatz, in denen mit einer Harnstofflösung im SCR-Katalysator die Stickoxidemissionen deutlich vermindert werden können. Die Emissionen von Kohlenwasserstoffen (engl. total hydrocarbons – THC) und Kohlenmonoxid können mittels eines Oxidationskatalysators (Oxi-Kat) auf das geforderte Niveau gesenkt werden.

Zündstrahl-Magermotor mit Oxi-Kat

Bei diesem Brennverfahren wird anstatt einer Zündkerze oder Vorkammer eine kleine Menge an Zündöl (meist Biodiesel) in den Brennraum eingespritzt. Das Zündöl entflammt dabei selbst und leitet die Verbrennung des Biogases im Brennraum ein. Vorteil bei diesem Brennverfahren ist, dass durch die Zündölmenge die Entflammung auch von weniger zündwilligen Gasen möglich ist, sodass auch niederkalorische Gase thermisch verwertet werden können. Nachteil ist, dass zwei komplette Kraftstoffsysteme betrieben und gewartet werden müssen.

3 Emissionen

Für Biogasmotoren sind nach Technischer Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) derzeit die Emissionen von Stickoxiden, Kohlenmonoxid, Formaldehyd, Schwefeldioxid und Stäuben (Partikel) reglementiert. Klima-relevant ist des Weiteren die Emission von unverbranntem Methan, das in diesem Falle den weitaus überwiegenden Anteil, rund 90% der Kohlenwasserstoffe (THC), im Abgas bildet (Abb. 1).

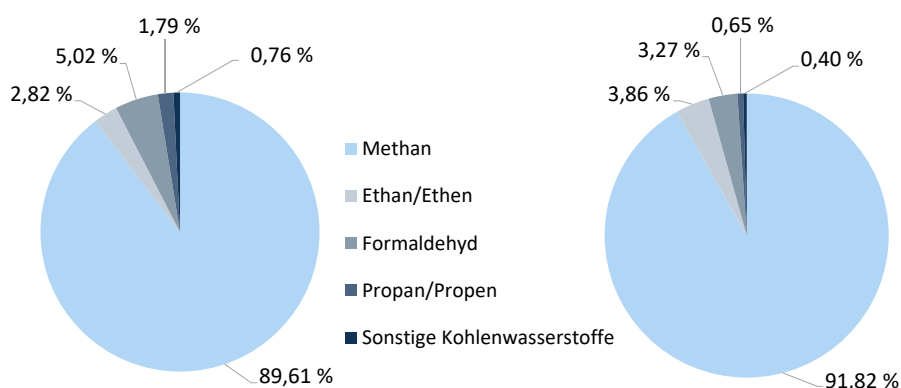


Abb. 1: Aufteilung der THC-Rohemission in die einzelnen Spezies, beispielhaft an zwei Betriebspunkten eines Versuchsmotors; links Lambda = 1,7 (THC = 462 ppm bei 8,0% O₂ im Abgas), rechts Lambda = 1,85 (THC = 873 ppm bei 9,2% O₂ im Abgas) (Prager et al. 2016, verändert)

Durch die europäische MCP-Richtlinie (MCPD = Medium Combustion Plant Directive) werden die Mitgliedsstaaten verpflichtet, neue Emissionsvorgaben zu entwickeln und diese zukünftig für Anlagen geltend zu machen. Darunter fallen alle sogenannten mittelgroßen Verbrennungsanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von 1 bis 50 MW. In Deutschland waren BImSchG-pflichtige Anlagen früher verpflichtet, die Grenzwerte der TA Luft einzuhalten. Die durch die MCPD vorgegebenen Grenzwerte wurden in der Novellierung der 44. Bundes-Immissionsschutzverordnung (44. BImSchV 2019) berücksichtigt, sodass Neuanlagen diese einhalten müssen. Für bestehende Anlagen gelten Übergangsfristen, in denen die bisherigen Grenzwerte der TA Luft anzuwenden sind.

Zudem wurde in der 44. BImSchV ein Grenzwert für die Gesamtemission organischer Stoffe (u. a. Kohlenwasserstoffe) im Abgas eingeführt. Für Neuanlagen gilt der Grenzwert von 1.300 mg m⁻³ ab 1. Januar 2023 und für Bestandsanlagen ab 1. Januar 2029. Für die Stickoxidemissionen wird eine kontinuierliche Überwachung vorgeschrieben. Der bisherige Grenzwert von 500 mg m⁻³ (TA Luft) im Abgas wird bei Neuanlagen ab 1. Januar 2023 und für Bestandsanlagen ab 1. Januar 2029 auf 100 mg m⁻³ herabgesetzt, was die Motor- und Abgasbehandlungstechnik vor neue Herausforderungen stellt. Der Grenzwert für Kohlenmonoxid beträgt für Neuanlagen 500 mg m⁻³. Für bestehende Anlagen gilt der genannte Grenzwert einheitlich ab dem 1. Januar 2025 und ersetzt den bis dahin geltenden Grenzwert von 1.000 mg m⁻³ (Gasmotor) bzw. 2.000 mg m⁻³ (Zündstrahlmotor). Ebenso gilt für Zündstrahlmotoren bei Neuanlagen ein Gesamtstaubgrenzwert von 20 mg m⁻³, dieser gilt dann ebenso bei bestehenden Anlagen ab 1. Januar 2025. Für Formaldehyd gilt und bleibt bei Bestandsanlagen nach Vollzugsempfehlung ein Grenzwert von 30 mg m⁻³, für Neuanlagen hingegen verringert sich ab dem 1. Januar 2020 dieser Grenzwert auf 20 mg m⁻³ (Abb. 2, Abb. 3).

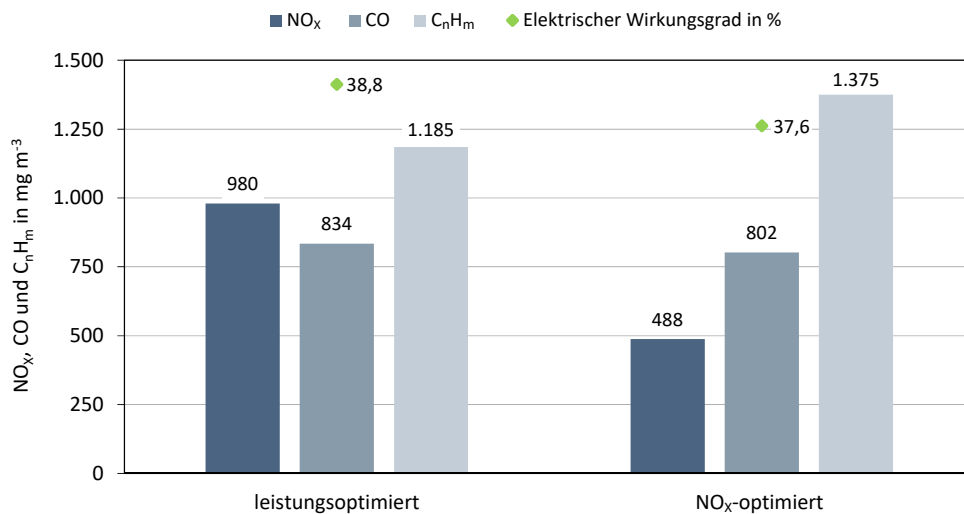


Abb. 2: Emissionswerte eines Gas-BHKW bei leistungsoptimierter (links) und NO_x-optimierter Betriebsweise (rechts) am Beispiel eines Gas-BHKW (526 kW_{el}) in der Praxis (Aschmann und Effenberger 2012, verändert)

Die Grenzwerte der 44. BImSchV für Bestandsanlagen gelten wie folgt:

CO-Grenzwert = 1.000 mg m⁻³ (bis 31.12.2024), 500 mg m⁻³ (ab 01.01.2025)

NO_x-Grenzwert = 500 mg m⁻³ (bis 31.12.2028), 100 mg m⁻³ (ab 01.01.2029)

C_nH_m-Grenzwert = 1.300 mg m⁻³ (ab 01.01.2029)

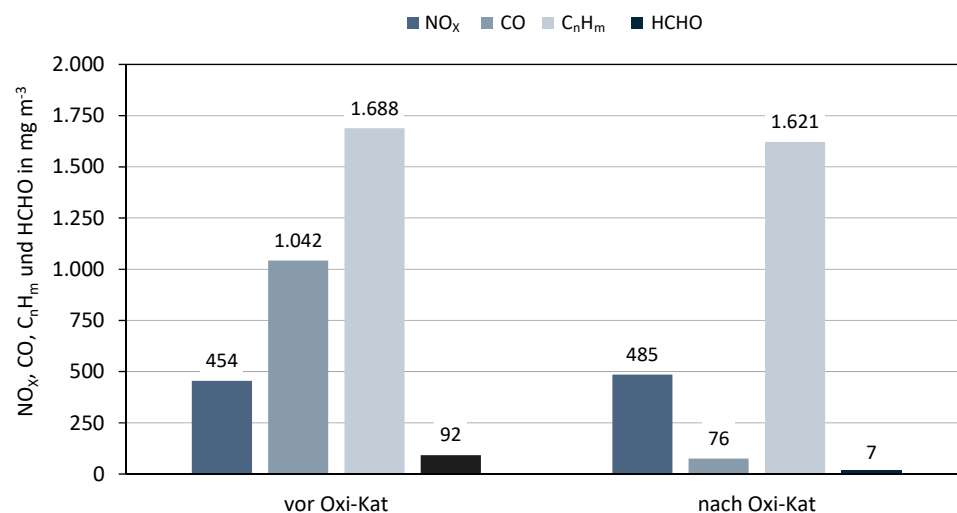


Abb. 3: Gemessene Abgasemissionen vor (links) und nach (rechts) dem Oxidationskatalysator am Beispiel eines Gas-BHKW (526 kW_{el}) in der Praxis (Aschmann und Effenberger 2012, verändert)

Die Grenzwerte der 44. BImSchV für Bestandsanlagen gelten wie folgt:

CO-Grenzwert = 1.000 mg m⁻³ (bis 31.12.2024), 500 mg m⁻³ (ab 01.01.2025)

NO_x-Grenzwert = 500 mg m⁻³ (bis 31.12.2028), 100 mg m⁻³ (ab 01.01.2029)

C_nH_m-Grenzwert = 1.300 mg m⁻³ (ab 01.01.2029)

HCHO-Grenzwert = 30 mg m⁻³ (Neuanlagen ab 01.01.2020: 20 mg m⁻³)

Entstehung von Schadstoffen im Abgas

Ursächlich für die Bildung von Stickoxid aus Stickstoff und Sauerstoff in der Verbrennungsluft sind die hohen Temperaturen im Motor. Diese Bedingungen herrschen insbesondere bei der Einstellung des Motors auf einen hohen Wirkungsgrad, also einer maximalen Leistungsabgabe, vor.

Die Emissionen an Kohlenmonoxid, Formaldehyd und THC sind hauptsächlich auf eine unvollständige Oxidation des Brennstoffes zurückzuführen. Grund hierfür ist, dass die Motorbauteile, welche deutlich geringere Temperaturen aufweisen (Kolben, Buchse, Zylinderkopf maximal 350°C) als der Verbrennungsraum (Spitzentemperaturen über 2.000 °C), die Flamme im Randbereich ablöschen. Bei hoch verdichteten Motoren kann neben dem erhöhten Wirkungsgrad auch ein größerer Schlupf an Methan beobachtet werden, da in den Schadräumen im Brennraum (Feuersteg, Ventiltaschen) anteilig mehr von der Flamme abgelöscht wird. Ein weiterer Grund für den Ausstoß von unverbranntem Kraftstoff kann auch das sogenannte Überschieben sein: Sind Aus- und Einlassventile während des Ladungswechsels zu lange gleichzeitig geöffnet, kann Kraftstoff vom Einlasskanal direkt in den Auspufftrakt gelangen. Hierdurch wird auch die mögliche Leistungsausbeute reduziert.

Motoreinstellung

Die Motoreinstellung nimmt wesentlichen Einfluss auf die Emissionen des BHKW. Soll der Motor leistungsoptimiert bei hohem Wirkungsgrad betrieben werden, ist ein „fetteres“ Brennstoff-Luft-Gemisch anzustreben: Dies führt jedoch zu erhöhten Stickoxidemissionen (Abb. 2, linke Seite). Um den Grenzwert der TA Luft (und zukünftig der 44. BImSchV) für Stickoxid einzuhalten, muss daher eine magerere Betriebsweise gefahren werden. Hierdurch sinken die Verbrennungstemperatur und die Stickoxidemissionen (Abb. 2, rechte Seite). Gleichzeitig ist jedoch aufgrund der ungünstigeren Verbrennungskonstellation („längere“ Verbrennung) eine Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades und ein Anstieg des „Methanschlupfes“ zu beobachten (Abb. 2, C_nH_m). Im dargestellten Beispiel eines Gasmotors mit 526 kW elektrischer Leistung betrug der Mehrverbrauch, um die abgegebene Leistung im „stickoxidoptimierten“ gegenüber dem „leistungsoptimierten“ Betrieb konstant zu halten, etwa 7 m³ Gas je Stunde bzw. 1 %; die Methanemissionen erhöhten sich hierbei um 16%. Wie langjährige Untersuchungen des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) an Praxis-Biogasanlagen gezeigt haben, stellt dies einen grundsätzlichen Zielkonflikt beim Betrieb von Biogas-BHKW dar.

Teillastbetrieb

Im Teillastbetrieb, der im Zuge der Flexibilisierung der Biogasverstromung realisiert werden kann, verstärken sich die zuvor beschriebenen Effekte. Durch die Reduktion der Leistung bei gleichbleibender Umdrehungszahl (1.500 min⁻¹) verringern sich der Energieinhalt und damit das Temperaturniveau im Brennraum. In der Folge sinkt die Effektivität der Verbrennung, da aufgrund der geringeren Energiefreisetzung und damit geringeren Temperaturen im Brennraum nicht mehr alle Brennstoffbestandteile oxidiert werden können. Dies führt sowohl zur Verringerung des elektrischen Wirkungsgrades als auch zur Erhöhung des Ausstoßes von Kohlenwasserstoffen. Damit steigt auch der Methanschlupf und die Klimabilanz der Biogasverwertung verschlechtert sich. Andererseits verringert sich unter Teillast der Stickoxidgehalt im Abgas aufgrund der kühleren Verbrennungstemperatur. Der Rückgang des elektrischen Wirkungsgrades bei 60 % Last bewegte sich bei einem BHKW in der Praxis zwischen 2,7 und 4,3 % (Tappen et al. 2017) (Abb. 4).

Dieser Wirkungsgradverlust verursacht in der Biogasanlage einen Mehrbedarf an Brenngas und damit Substrat. Daher rechnet sich ein längerfristiger Teillastbetrieb unterhalb von 80 % bei der Flexibilisierung meist nicht und sollte auch aus Umweltsicht unterbleiben.

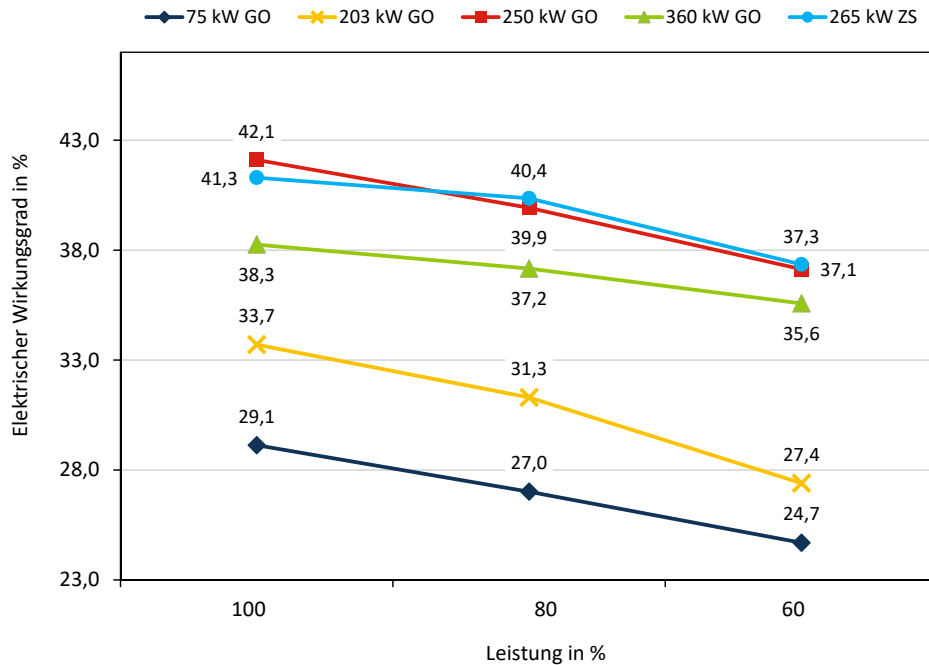


Abb. 4: Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades η von Gas-Ottomotoren (GO) und Zündstrahlmotoren (ZS) in Abhängigkeit der Leistung an unterschiedlichen BHKW in der Praxis (Tappen et al. 2017, verändert)

Start-Stopp-Betrieb

Soll durch An- bzw. Abschalten des BHKW (Start-Stopp-Betrieb) Regelleistung erbracht werden, ist das BHKW mit einer automatischen Motorvorwärmung auszustatten, um den sicheren und verschleißarmen Betrieb zu gewährleisten. Viele Hersteller bieten dies in der neuen BHKW-Generation bereits serienmäßig an. Auch die Vorwärmung des Motoröls kann den Verschleiß und die Emissionen mindern. Die während der Start- und Stopp-Vorgänge auftretenden erhöhten Schadstoffemissionen sind indessen für das gesamte Emissionsgeschehen aufgrund der kurzen Dauer (etwa fünf Minuten) von untergeordneter Bedeutung.

4 Emissionsminderung durch Abgasbehandlung

Drei-Wege-Katalysator (3-Wege-Kat)

Gas-Otto-Motoren im stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$) werden mit einem 3-Wege-Katalysator ausgestattet, um die Emission von THC und CO durch Oxidation mit Luftsauerstoff und jene von Stickoxid durch Reduktion mit CO zu mindern. Im Katalysator sind Temperaturen von über 300 °C nötig (sogenanntes Light-off), damit diese Reaktionen ablaufen und Konvertierungsraten der Schadstoffe von deutlich über 90 % erreicht werden können. Während der Anfahrphase und im Betrieb mit geringer Last kann der Katalysator zu kalt sein, sodass die Anlage erhöhte Schadstoffemissionen aufweist. Ein Betrieb bei $\lambda = 1$ ist für Biogasmotoren allerdings unüblich.

Oxidationskatalysator (Oxi-Kat)

Bei Magermotoren ($\lambda > 1$) kann ein (ungeregelter) Oxidationskatalysator eingesetzt werden, um die Emissionen von Formaldehyd, THC und CO zu vermindern. Hier sind ebenfalls Katalysatortemperaturen von über 300 °C erforderlich, damit die Oxidation zu CO_2 und H_2O stattfinden kann. Die Light-off-Temperatur sollte möglichst schnell erreicht werden.

Die Vorteile des Oxi-Kats liegen in der einfachen Bauweise und den vergleichsweise geringen Anschaffungskosten. Der Oxi-Kat hat jedoch keine Wirksamkeit für Stickoxid und Methan. Um Methan zu oxidieren, sind Abgastemperaturen von über 600 °C erforderlich, welche nach einem Turbolader meist nicht erreicht werden. Stickoxide werden im Magerbetrieb nicht reduziert, da Kohlenmonoxid mit dem überschüssigen Sauerstoff reagiert.

Abbildung 3 zeigt die in der Praxis an einem Motor mit Oxi-Kat gemessenen Abgasemissionen vor (links) und nach (rechts) dem Katalysator. Die Konvertierungsraten von Kohlenmonoxid und Formaldehyd sind hoch, für Stickoxid und Kohlenwasserstoffe (hauptsächlich Methan) wird hingegen keine Umsetzung erreicht (Aschmann et al. 2010). Um die Vorgaben der TA Luft (Übergangszeit) bzw. der 44. BImSchV (ab 2023/2029) einzuhalten, muss demnach – wie oben erläutert – eine NO_x -optimierte Motoreinstellung gewählt werden. Die Katalysatoren verlieren deutlich an Wirksamkeit, wenn Schwefelverbindungen im Abgas enthalten sind (Katalysatorvergiftung). Daher empfiehlt sich eine effektive Entschwefelung des Brenngases. Auch können Stäube die reaktive Oberfläche im Katalysator bedecken und somit dessen Leistungsfähigkeit mindern.

Thermische Nachverbrennung

Bei Magerkonzept-Motoren wird zur Abgasbehandlung auch auf thermische Oxidatoren gesetzt. Diese ermöglichen eine nahezu vollständige, autotherme „Nachverbrennung“ von noch im Abgas enthaltenen Kohlenwasserstoffen. Eine Reduktion von Stickoxid im Abgas findet hierbei prinzipiell nicht statt. Allerdings sind die Anschaffungskosten hoch und die Reaktoren benötigen eine mehrstündige Aufheizphase, sodass dieses Verfahren für den Intervallbetrieb von Biogasmotoren nicht geeignet ist.

Selektive katalytische Reduktion (SCR-Kat)

Zur Reduktion der Stickoxidemissionen im Magerbetrieb ist derzeit die selektive katalytische Reduktion (selective catalytic reduction – SCR) das Verfahren der Wahl für Biogas-BHKW. Hierbei wird eine Harnstofflösung in den Abgastrakt eingedüst. Das entstehende Ammoniak reagiert als Reduktionsmittel mit Stickoxid

in einem speziellen Katalysator zu Stickstoff und Wasserdampf. Entscheidend für eine hohe Konversionsrate und die Vermeidung der Emission von überschüssigem Ammoniak ist die exakte Regelung der Harnstoffzugabe.

Der große Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass der Motor leistungsoptimiert eingestellt werden kann, da die erhöhten Stickoxidgehalte im Rohabgas mittels SCR behandelt werden. Nachteilig sind der Aufwand und die Verbrauchskosten für die Bevorratung des Harnstoffs, der zudem schwach wassergefährdend ist (Wassergefährdungsklasse 1).

Mit der 44. BImSchV ist der Grenzwert für Stickoxid zukünftig auf 100 mg m^{-3} herabgesetzt (für BImSchG-pflichtige Bestandsanlagen greift dieser ab 01.01.2029, während Neuanlagen diesen Grenzwert ab dem 01.01.2023 einhalten müssen). Ein gesetzeskonformer und wirtschaftlicher Betrieb wird dann ohne den Einsatz eines SCR-Katalysators nicht mehr möglich sein, da – wie oben beschrieben wurde – für die Einhaltung dieses Grenzwertes durch Anpassung der Motoreinstellung erhebliche Einbußen bei der elektrischen Effizienz in Kauf genommen werden müssten. Den Betreibern BImSchG-pflichtiger Anlagen wird daher geraten, sich rechtzeitig auf eine Umrüstung vorzubereiten. Gleichzeitig muss bei Verwendung eines SCR-Katalysators auch der Grenzwert für Ammoniak im Abgas von 30 mg m^{-3} eingehalten werden.

5 Kontrollmöglichkeiten

Um die Schadstoffemissionen mit dem Abgas zu minimieren, ist dringend eine regelmäßige Wartung des Motors gemäß Herstellervorschrift zu empfehlen. Dies betrifft die mechanischen Einstellungen, z. B. die Steuerzeiten der Ventile zur Vermeidung des Überschiebens von Brenngas, den Austausch von Verschleißteilen wie Zündkerzen oder gegebenenfalls die Erneuerung des Katalysators. Des Weiteren sollte der Anlagenbetreiber selbst regelmäßig die Dichtheit der gasführenden Leitungen im Bereich des BHKW überprüfen, da sich Flansche durch Temperaturschwankungen und Vibrationen lockern können. Hierfür ist am besten ein geeignetes Lecksuchgerät zu verwenden.

Literatur

44. BImSchV (2019): Verordnung zur Einführung der Verordnung über mittelgroße Feuerungs-, Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen sowie zur Änderung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 13. Juni 2019 (BGBl. I S. 804)
- Aschmann, V.; Effenberger, M. (2012): Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer. Abschlussbericht, Freising
- Aschmann, V.; Effenberger, M.; Gronauer, A. (2010): Kohlenwasserstoffverbindungen im Abgas biogasbetriebener Blockheizkraftwerke. Landtechnik 65(5), S. 338-341
- Prager, M.; Korb, B.; Wachtmeister, G. (2016): Ursachen und Reduzierung der CH₄-Emissionen in Biogasmotoren. Teilvorhaben 1., Technische Universität München, <https://doi.org/10.2314/GBV:871460009>, Zugriff am 23.09.2019
- Tappen, S.J.; Aschmann, V.; Effenberger, M. (2017): Lifetime development and load response of the electrical efficiency of biogas-driven cogeneration units. Renewable Energy 114, pp. 857–865, <https://www.doi.org/10.1016/j.renene.2017.07.043>

Autoren

Volker Aschmann, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising
Dr.-Ing. Mathias Effenberger, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising
Dr.-Ing. Maximilian Prager, Technische Universität München, München
Simon Juan Tappen, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising