



**LfL**

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

## Biogas

### Emissionsoptimierung und Energieeffizienz biogasbetriebener Blockheizkraftwerke



**LfL-Information**

**Impressum:**

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)  
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan  
Internet: <http://www.LfL.bayern.de>

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung  
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising-Weihenstephan  
E-Mail: [TierundTechnik@LfL.bayern.de](mailto:TierundTechnik@LfL.bayern.de)  
Tel.: 08161/71-3794

2. überarbeitete Auflage September / 2008

Druck: Lerchl Druck, 85354 Freising

Schutzgebühr: 1.- €

© LfL



# **Emissionsoptimierung und Energieeffizienz biogasbetriebener Blockheizkraftwerke**

**Dipl.-Ing. (FH) Volker Aschmann**

**Dipl.-Ing. (FH) Rainer Kissel**

**Dr. Andreas Gronauer**



<b>Inhaltsverzeichnis</b>		Seite
<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Material und Methoden .....</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>9</b>
4.1	NO <sub>x</sub> -Konzentrationen in der Praxis .....	9
4.2	Auswirkungen einer Veränderung des Lambda-Wertes .....	10
4.2.1	Auswirkung auf den Verbrennungsprozess .....	10
4.2.2	Auswirkung auf die Kohlenwasserstoffkonzentration (C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> ) .....	10
4.2.3	Auswirkung auf die elektrische Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad.....	12
<b>5</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>13</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>		<b>14</b>

## 1 Einleitung und Problemstellung

Durch die Biogasverwertung kann im Vergleich mit der konventionellen Energieproduktion aus fossilen Brennstoffen die Freisetzung klimarelevanter Gase reduziert werden. Dazu ist es jedoch notwendig, die eingesetzten Potenziale so weit wie möglich auszuschöpfen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Emissionen von Schadgasen, die bei der motorischen Verbrennung von Biogas entstehen (Kohlenmonoxid - CO; Stickoxide - NO<sub>x</sub>) minimiert werden. Vorausgegangene Forschungsprojekte (GRONAUER et.al 2003; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2006) haben gezeigt, dass sowohl die Leistungsfähigkeit als auch das Abgasverhalten biogasbetriebener BHKW von der Einstellung der Maschine beeinflusst werden. Die durchgeführten Leistungs- und Emissionsmessungen an BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung < 1 MW (ZWAHR & EICHERT 2003, ZELL 2002) ergaben, dass die zur Orientierung herangezogenen Grenzwerte gemäß der novellierten Fassung der TA-LUFT 2002 (gültig für BHKW > 1 MW Feuerungswärmeleistung) von allen Aggregaten entweder für CO oder NO<sub>x</sub> überschritten wurden. Dies wurde zurückgeführt auf Schwankungen in der Brennstoffqualität, auf den Wartungszustand und vor allem auf die Einstellung der Maschine (EBERTSCH et. al 2007).

Die innerhalb der letzten zwei Jahre deutlich gestiegene Nachfrage nach leistungsstarken Aggregaten hat zu einer verstärkten Konkurrenz unter den Motorenherstellern geführt und war Anlass dafür, technisch veränderte und optimierte Aggregate anzubieten. So garantieren mittlerweile alle BHKW-Hersteller die Einhaltung des Grenzwertes für NO<sub>x</sub> nach der Technischen Anleitung Luft (TA-Luft). In der Praxis herrschen jedoch nicht immer optimale Verbrennungsbedingungen. Die Einstellung der Motoren erfolgt zudem nicht immer unter Berücksichtigung der Emissionswerte, sondern richtet sich eher nach der Leistungsabgabe des BHKW.

Es gilt somit einen Kompromiss zwischen hoher Leistung und niedrigen Emissionen bei der Verbrennung von Biogas in BHKW zu finden. In wieweit dies in der Praxis durchführbar ist und welchen Einfluss die Motorwartung darauf hat, wurde am Institut für Landtechnik und Tierhaltung im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) untersucht. Finanziert wurde dieses Vorhaben vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) und von der europäischen Union (EU) durch den europäischen Fond für regionale Entwicklung (EFRE).

## 2 Stand der Technik

Jedes BHKW unterliegt einem gewissen Alterungsprozess, der sich durch Verschleiß und der damit verbundenen Leistungsminderung und Verringerung der Standzeit ausdrückt. Um diesen Alterungsprozess entgegenzuwirken müssen die BHKW in regelmäßigen Abständen gewartet werden. Dabei werden einzelne Verschleißteile ausgetauscht. Hierzu gehören vor allem, sämtliche Filter (Luft-, Öl- bzw. Gasfilter), Zündkerzen und Einspritzdüsen. Der Ölwechsel stellt die arbeitsintensivste und häufigste Wartungsmaßnahme dar. Aufgrund der teilweise relativ hohen Schwefelwasserstoffkonzentrationen ( $H_2S$ ) im Brenngas kommt es zu einer mitunter sehr schnellen Versäuerung des Motorenöls. Die Folge ist Korrosion und eine verminderte Standzeit. Da die  $H_2S$ -Gehalte im Biogas, je nach Substrat und Effektivität der Entschwefelung erheblichen Schwankungen unterworfen sind, kann es keine generelle Ölwechselvorgabe geben. Deshalb werden zu Beginn die Ölwechselintervalle relativ kurz gewählt (ca. 400 Bh). Um die Intervalle verlängern zu können werden Ölanalysen ins Labor geschickt und auf Qualität und Abnutzung hin untersucht. Der maßgebliche Faktor ist die sogenannte TBN (Total Base Number), die angibt, wie viel säurepuffernde Inhaltsstoffe noch zur Verfügung stehen. Anhand dieser Untersuchungen lassen sich die Ölwechselintervalle anpassen. Wegen der sehr kurzen Ölwechselintervalle werden diese in der Regel vom Anlagenbetreiber selber durchgeführt. Einige Hersteller verwenden auch besonders große Motorölbehälter mit einigen 100 Litern Inhalt, die einige 1000 Bh halten und bei der routinemäßigen Wartung mit ausgetauscht werden.

Aufgrund der relativen Erhöhung der Investitionskosten für ein BHKW, aber auch wegen der Verwendung immer leistungsfähigeren BHKW, nehmen immer mehr Anlagenbetreiber eine professionelle Wartung in Anspruch. Die Angebotsspanne reicht von einer Herstellerwartung nach Bedarf, bis zu einem Vollwartungsvertrag mit garantierter Laufzeit und Leistung.

In der Regel wird ein BHKW, wie beim PKW nach vorgegebenen Wartungsintervallen gewartet und Verschleißteile ausgetauscht. Die Wartungsintervalle variieren von Hersteller zu Hersteller. Neuere BHKW werden öfter (ca. alle 2.000 Bh) gewartet, ältere dagegen in einem längeren Intervall (alle 3.000 bis 4.000 Bh).

### 3 Material und Methoden

Für die Messungen wurden drei Zündstrahl- (110 kW<sub>el</sub>, 250 kW<sub>el</sub> und 265 kW<sub>el</sub>) und drei Gas-BHKW (190 kW<sub>el</sub>, 324 kW<sub>el</sub> und 526 kW<sub>el</sub>) ausgewählt. Zur Erfassung der Stoff- und Energieströme der BHKW wurden folgende Messungen vorgenommen: Gasvolumen, -temperatur, -druck, -feuchte und -zusammensetzung in der Gasstrecke; das Volumen der Verbrennungsluftzufuhr; die Zündölmenge und die abgegebene elektrische Leistung. Die dem Motor zugeführte Energiemenge wurde als Summe des Brennwertes des Normgasvolumens und ggf. der zugeführten Zündölmenge berechnet. Aus diesen Werten und der vom Generator abgegebenen Strommenge wurde gemäß den Vorgaben der DIN 3046-1 (1995) der elektrische Wirkungsgrad des BHKW bestimmt. Das Volumen der Verbrennungsluft diente zur Berechnung des Abgasvolumenstromes und der Luftüberschusszahl Lambda ( $\lambda$ ). Abgasseitig wurden die Stickoxide (NO<sub>x</sub>), Kohlenmonoxid (CO) sowie unverbrannte Kohlenwasserstoffe (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), oft auch als Methanschlupf bezeichnet, erfasst. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die eingesetzte Messtechnik im Praxiseinsatz.

Anhand der gemessenen Werte konnten Angaben über den Einfluss der Wartung auf die Einhaltung der Grenzwerte der TA-Luft gemacht und der Einfluss der Motoreinstellung auf die Verbrennung und die Effizienz bestimmt werden.



Abbildung 1: Messtechnik im Praxis-Einsatz

## 4 Ergebnisse

### 4.1 NO<sub>x</sub>-Konzentrationen in der Praxis

Um Einflüsse der Wartungsarbeiten auf die Schadstoffemissionen der Motoren dokumentieren zu können, wurden Abgasmessungen vor und nach einer routinemäßigen Wartung durch das Serviceteam des Herstellers durchgeführt. Diese Messungen wurden an jedem BHKW dreimal vorgenommen. Abb. 1 zeigt die dabei ermittelten durchschnittlichen NO<sub>x</sub>-Konzentrationen im Abgas in Bezug zu den Grenzwerten der TA-Luft (2002) für Zündstrahl-BHKW (1 000 mg/m<sup>3</sup>) und Gas-BHKW (500 mg/m<sup>3</sup>).

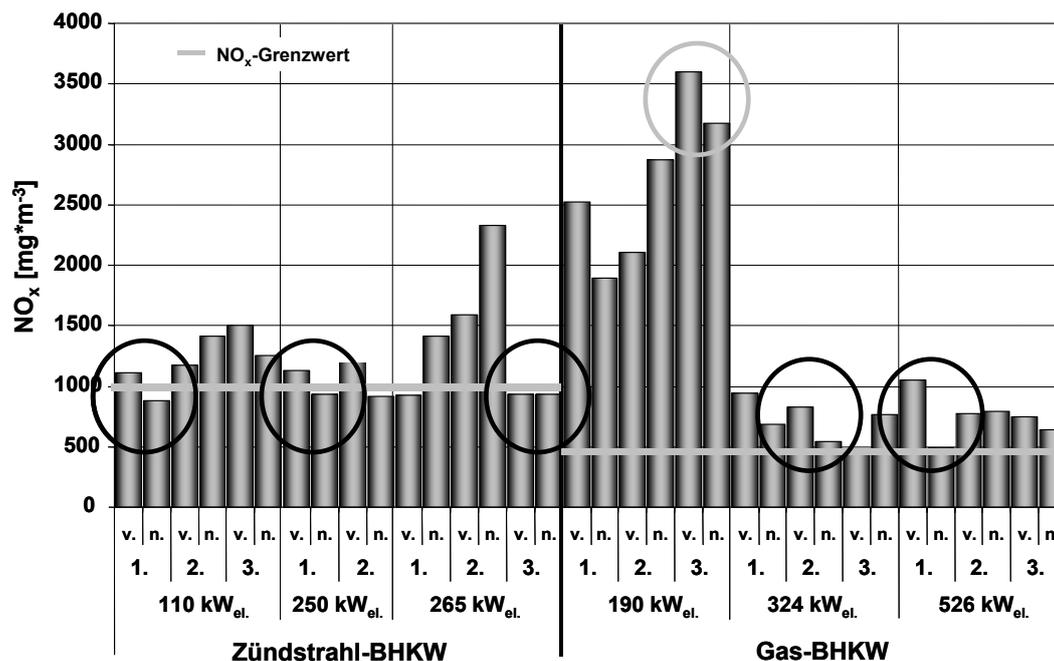


Abb. 1: Durchschnittlich gemessene NO<sub>x</sub>-Konzentrationen der untersuchten BHKW (v. = vor Wartung; n. = nach Wartung) mit ausgesuchten Beispielen (Kreise)

Es zeigte sich, dass die Grenzwerte der TA-Luft vor der Wartung (v.) nur in Einzelfällen eingehalten wurden. Bei der überwiegenden Zahl der Messungen wurden die Grenzwerte auch nach der Wartung (n.) noch überschritten. Besonders bei den Gas-BHKW konnte nur bei einigen Messungen nach der BHKW-Wartung eine Annäherung an den Grenzwert festgestellt werden. Das 190 kW<sub>el.</sub> Gas-BHKW wies Grenzwertüberschreitungen bis zum 7-fachen auf (Abb. 1). Dieses BHKW war auch das einzige, dass nur durch den Anlagenbetreiber gewartet und eingestellt wurde.

Die eingekreisten Messungen stellen Beispiele dar, bei denen die Herstellerfirma explizit darum gebeten wurde, bei der Wartung auf die Einhaltung der Grenzwerte zu achten. Die Messungen nach der Wartung zeigten bei fünf BHKW eine Unterschreitung, bzw. eine Annäherung an den Grenzwert. Für eine nähere Diskussion der Auswirkungen der NO<sub>x</sub>-Optimierung werden diese eingekreisten Messungen für die weitere Betrachtung ausgewählt. Das nur vom Anlagenbetreiber gewartete 190-kW<sub>el.</sub> Gas-BHKW konnte diese Vorgabe in keinem Fall erreichen.

## 4.2 Auswirkungen einer Veränderung des Lambda-Wertes

Der Lambda-Wert (= Luftüberschusszahl  $\lambda$ ) ist die maßgebende Konstante bei der Einstellung der Verbrennung. Welche Auswirkungen die Veränderung dieses Wertes auf die Abgaskonzentrationen und die BHKW-Effizienz hat, zeigen die ausgesuchten Beispiele.

### 4.2.1 Auswirkung auf den Verbrennungsprozess

Der Hersteller des 190-kW<sub>el</sub>-Gas-BHKW bot keine eigene Wartung und durch die Wartung des Anlagenbetreibers selbst konnte keine Einhaltung des Grenzwertes erreicht werden. Somit wurde in Zusammenarbeit mit dem Anlagenbetreiber während der Messung versucht, den NO<sub>x</sub>-Gehalt im Abgas durch die Erhöhung des Lambda-Wertes unter den Grenzwert zu senken. In Abb. 2 ist der resultierende Verlauf der Abgaszusammensetzung dargestellt.

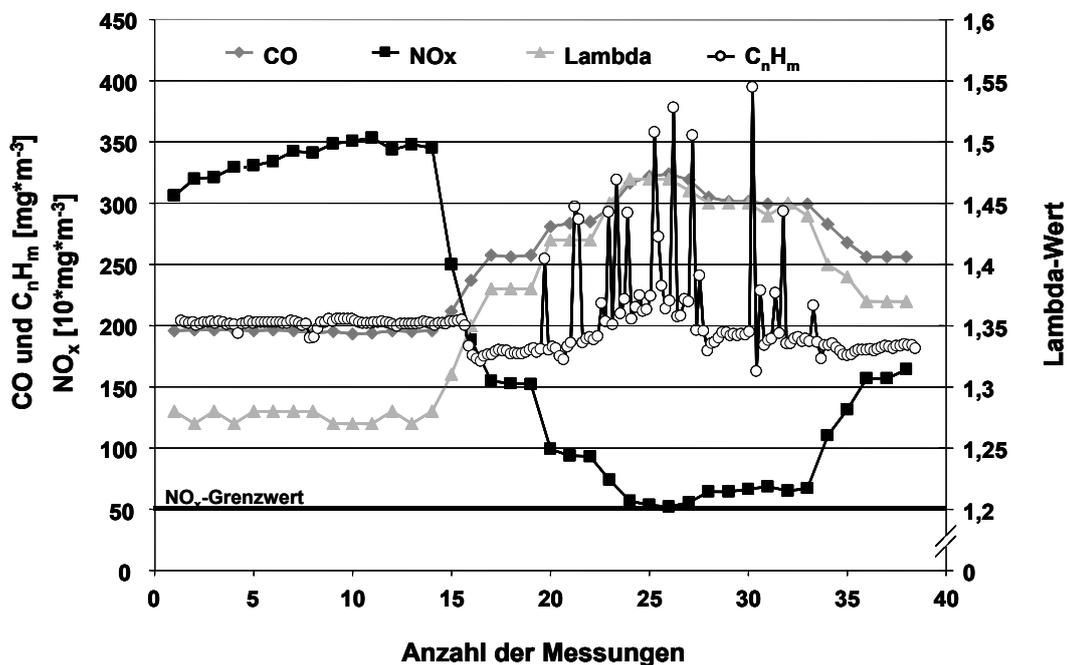


Abb. 2: Abgasverhalten eines 190-kW<sub>el</sub>-Gas-BHKW in Abhängigkeit von der Lambda-Einstellung

Durch die stufenweise Erhöhung des Lambda-Wertes von 1,27 auf 1,47 konnte die NO<sub>x</sub>-Konzentration von etwa 3 500 mg/m<sup>3</sup> auf 500 mg/m<sup>3</sup> gesenkt werden (Abb. 2). Gleichzeitig stieg die CO-Konzentration geringfügig von 200 mg/m<sup>3</sup> auf ca. 320 mg/m<sup>3</sup>. Der gestiegene Luftanteil in der Verbrennungsluft hatte jedoch zur Folge, dass die Energiedichte im Gemisch so stark sank, dass es zu erheblichen Zündaussetzern kam. Dies wird an der stark schwankenden Kurve der Konzentration an unverbrannten Kohlenwasserstoffen deutlich, die den sogenannten Methanschluß infolge der Zündaussetzer widerspiegelt (Abb. 2). Es musste deshalb der Lambda-Wert wieder soweit heruntergeregelt werden, bis ein störungsfreier Betrieb des BHKW gewährleistet war. Somit konnte bei diesem BHKW zu keiner Zeit ein geregelter Betrieb unterhalb des NO<sub>x</sub>-Grenzwertes erreicht werden.

### 4.2.2 Auswirkung auf die Kohlenwasserstoffkonzentration (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>)

Bei der Betrachtung der Abgaswerte der anderen BHKW ist zu erkennen, dass durch die Wartung des Herstellers die NO<sub>x</sub>-Grenzwerte der TA-Luft erreicht und sogar unterschritten

werden konnten. Gleichzeitig war mit der  $\text{NO}_x$ -optimierten Einstellung jedoch eine Erhöhung der Konzentration an unverbrannten Kohlenwasserstoffen verbunden (Abb. 3).

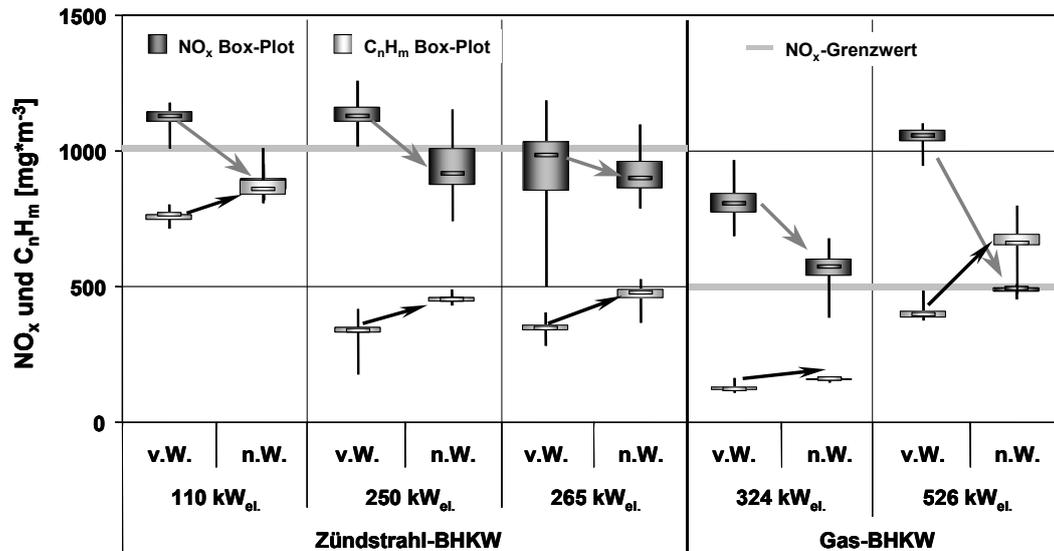


Abb. 3: Auswirkungen einer Optimierung der  $\text{NO}_x$ -Konzentration auf die Menge der unverbrannten Kohlenwasserstoffe ( $\text{C}_n\text{H}_m$ ) im Abgas (v.W. = vor Wartung; n.W. = nach Wartung)

Setzt man die Konzentrationen dieser beiden Abgasparameter in Beziehung zueinander, so lässt sich ein direkter Zusammenhang erkennen (Abb. 4). Eine Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Konzentration ist demnach mit einer gleichzeitigen Erhöhung des Anteils an unverbrannten Kohlenwasserstoffen im Abgas verbunden. Dieser Zusammenhang konnte bei den Untersuchungen nur im Bereich der TA-Luft-Grenzwerte festgestellt werden. Bei höheren  $\text{NO}_x$ -Konzentrationen trat dieser Zusammenhang nicht auf.

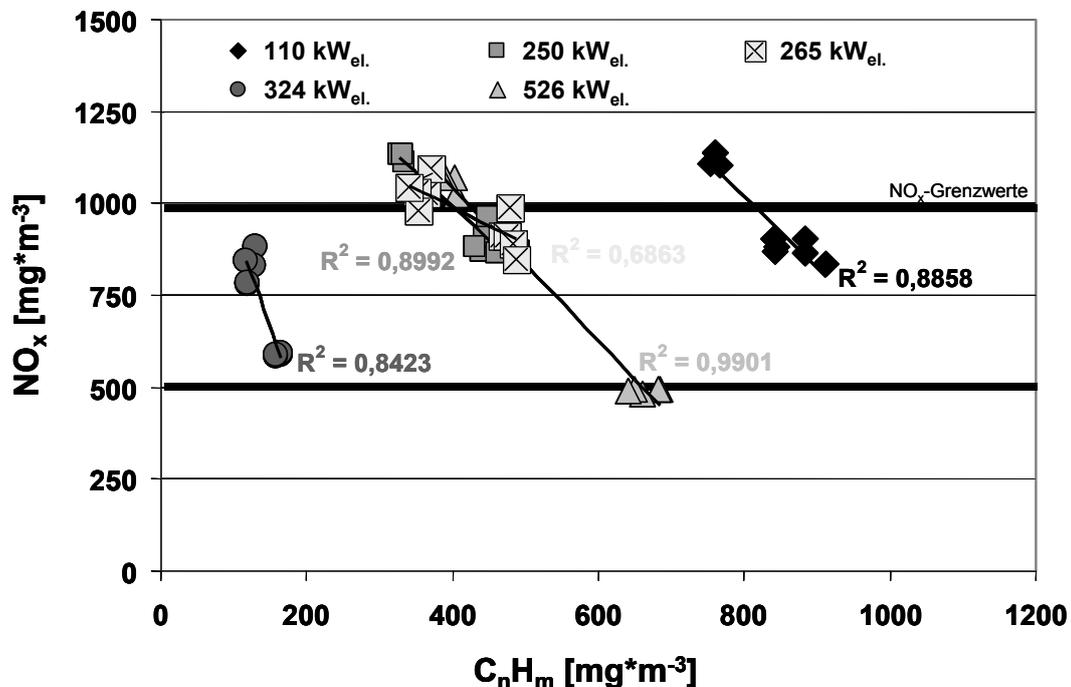


Abb. 4: Abhängigkeit zwischen  $\text{NO}_x$ - und  $\text{C}_n\text{H}_m$ -Konzentration (Halbstundenmittelwerte) im Abgas im Bereich der TA-Luft-Grenzwerte nach einer  $\text{NO}_x$ -Optimierung

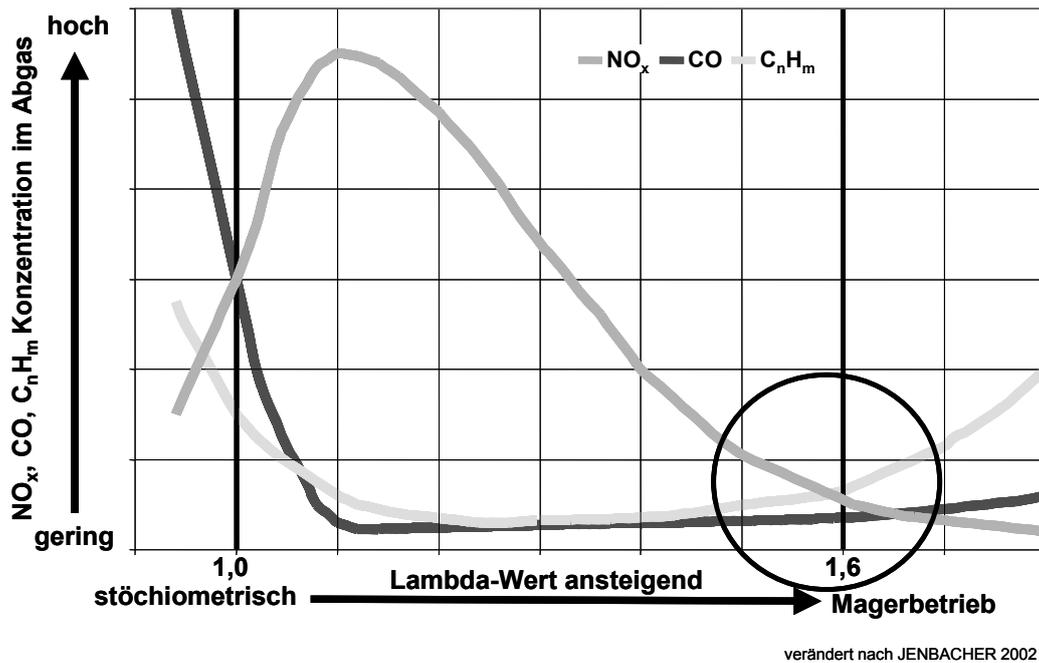


Abb. 5: Einfluss des Lambda-Wertes auf die Abgaszusammensetzung am Beispiel eines Erdgas-BHKW (Kreismarkierung: Bereich des Magerbetriebes bei Biogas-BHKW), nach JENBACHER 2004

Ursache für diesen starken Zusammenhang im Bereich um den TA-Luft-Grenzwert für NO<sub>x</sub> ist die Verschiebung der Verbrennungsverhältnisse in den Bereich des Magerbetriebes. Die Grafik in Abb. 5 zeigt hierzu das Abgasverhalten eines Erdgas betriebenen BHKW. Beim Betrieb eines Biogas betriebenen BHKW liegt die emissionsoptimierte Betriebsweise im eingekreisten Bereich. In diesem Bereich verhalten sich NO<sub>x</sub> und C<sub>n</sub>H<sub>m</sub> im Abgas gegenläufig, wenn eine Änderung des Lambda-Wertes vorgenommen wurde. (Abb. 5)

#### 4.2.3 Auswirkung auf die elektrische Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad

Bei den Messungen während der NO<sub>x</sub>-optimierten BHKW-Einstellung wurde auch die Änderung des elektrischen Wirkungsgrades und der elektrischen Leistung untersucht. In Abb. 6 sind die Veränderungen der Emissions- und Leistungswerte gegenüber der Einstellung vor der Wartung (v.W.) in Prozent angegeben. Man sieht deutlich die Reduktion der NO<sub>x</sub>-Konzentration bei gleichzeitiger Erhöhung der C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>-Konzentration.

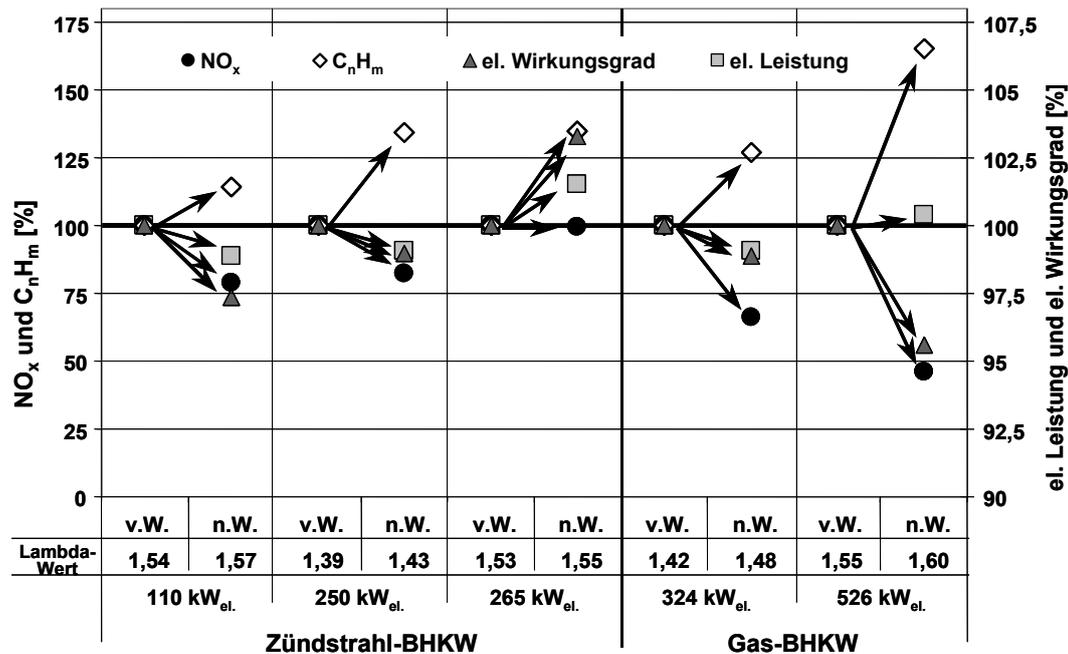


Abb. 6: Prozentuale Veränderung der Emissions- und Effizienzparameter nach der Optimierung der  $\text{NO}_x$ -Konzentration

Auch bei den Leistungsparametern ließen sich Veränderungen feststellen. So senkte sich bei den BHKW mit 110 kW<sub>el.</sub>, 250 kW<sub>el.</sub>, 324 kW<sub>el.</sub> und 526 kW<sub>el.</sub> die Nennleistung und der elektrische Wirkungsgrad um 1,5 % bis 4,5 % ab (Abb. 6). Verantwortlich hierfür ist die Erhöhung des Lambda-Wertes. Durch die Erhöhung des Sauerstoffgehaltes im Brenngas wird eine Reduzierung der  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Abgas ermöglicht, gleichzeitig jedoch durch die Verminderung des Energiegehaltes im Brenngasgemisch eine schlechtere Energieausbeute erzielt. Nur beim 265 kW<sub>el.</sub> BHKW konnte aufgrund sehr guter Abgaswerte bereits vor der Wartung eine zusätzliche Optimierung der Verbrennung mit erhöhter Leistung und verbessertem elektrischem Wirkungsgrad bei gleichbleibendem Lambda-Wert erreicht werden.

## 5 Ausblick

Effizienz und Schadstoffausstoß biogasbetriebener BHKW stehen in einem direkten Zusammenhang. Eine alleinige Emissionsoptimierung nach den Vorgaben der TA-Luft führte während der vorliegenden Untersuchungen zu erheblichen Mehremissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und vermutlich auch Formaldehyd, sowie zu einer verminderten Effizienz der Verstromung.

Im Sinne einer hoch effizienten und zugleich schadstoffarmen Verstromung von Biogas ist eine einseitige Fixierung der Motoreinstellung auf niedrige  $\text{NO}_x$ -Grenzwerte eher kontraproduktiv, da dadurch die Effizienz der Verbrennung gemindert und die Emission schadrelevanter Abgase wie Formaldehyd bzw. Kohlenwasserstoffen gefördert wird. Eine verbrennungsoptimierte Motoreinstellung mit einer nachgeschalteten Eliminierung, der dadurch erhöhten  $\text{NO}_x$ -Konzentration im Abgas, durch geeignete Katalysatoren (z.B. SCR-Katalysator) könnte einen hohen Beitrag zur Effizienz und Umweltverträglichkeit biogasbetriebener BHKW leisten.

## Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2006): Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoranlagen in Abhängigkeit von der Motorenwartung. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projektnummer 1325), Augsburg.
- Ebertsch G., Fiedler A., Aiblinger-Madersbacher K., Beck R., Karrasch T., Zell B. (2007): Emissionsschutz, einschließlich Klimaschutz. In: Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kap. 2.2.2, Bayerische Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Stand Juli 2007 <http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/doc/kap222.pdf>.
- GE Energy-Jenbacher Gasmotoren GmbH & Co OHG (2002): 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.
- Prescher K., Golisch J., Wichmann V. (2000): BHKW-Module bei Biogasanlagen – Entwicklungen und zukünftige Trends. In: Gülzower Fachgespräche: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Band 15, 26./27. Oktober 2000, Weimar, p. 87-100.
- 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.
- TA-Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (GMBI. Nr. 25-29/2002 – 29 S. 511) in der Fassung vom 24. Juli 2002, p. 96-98.
- 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](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl), p. 63-90.
- Zell B. (2002): “Emissionen von Biogas-Verbrennungsmotoren“; in „Fachtagung Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung“, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 17.10.2002, p. 42-57.