



Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades Biogas betriebener BHKW über die Be- triebsdauer

<Abschlussbericht>

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 Str. 36, 85354 Freising
E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de
Tel.: 08161/71-3450

Januar 2012

© LfL



**Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades
Biogas betriebener BHKW über die Betriebsdauer
Abschlussbericht**

Dipl.-Ing. (FH) Volker Aschmann
Dr.-Ing. Mathias Effenberger

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades biogasbetriebener BHKW über die Betriebsdauer

Auftraggeber:	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Ludwigstr. 2 86179 München
Auftragsdatum:	11.11.2007 K/08/01
Projektleitung:	Dr.-Ing. Mathias Effenberger
Bearbeiter:	Dipl.-Ing. (FH) Volker Aschmann
Berichtsabschluss:	31.01.2012
Berichtsumfang:	74 Seiten

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Summary	2
1 Einleitung	3
2 Stand des Wissens	4
2.1 Die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades	4
2.2 Einflussfaktor Motoreinstellung	5
3 Zielstellung	7
4 Material und Methoden	8
4.1 Auswahl der BHKW	8
4.1.1 BHKW 1 (30 kW _{el.} Gas-BHKW).....	9
4.1.2 BHKW 2 (100 kW _{el.} Gas-BHKW).....	10
4.1.3 BHKW 3 (190 kW _{el.} Gas-BHKW).....	11
4.1.4 BHKW 4 (250 kW _{el.} Gas-BHKW).....	12
4.1.5 BHKW 5 (324 kW _{el.} Gas-BHKW)	13
4.1.6 BHKW 6 (526 kW _{el.} Gas-BHKW).....	14
4.1.7 BHKW 7 (40 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW).....	15
4.1.8 BHKW 8 (75 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW)	16
4.1.9 BHKW 9 (110 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW)	17
4.1.10 BHKW 10 (250 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW)	18
4.2 Messprogramm	19
4.2.1 Messaufbau	19
4.2.2 Messtechnik	19
4.2.3 Auswertung der erhobenen Rohdaten	22
4.2.4 Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades	26
5 Ergebnisse	27
5.1 Ergebnisse der einzelnen Messreihen	27
5.1.1 BHKW 1 (30 kW _{el.} GO)	27
5.1.2 BHKW 2 (100 kW _{el.} GO)	28
5.1.3 BHKW 3 (190 kW _{el.} GO)	30
5.1.4 BHKW 4 (250 kW _{el.} GO)	31
5.1.5 BHKW 5 (324 kW _{el.} GO)	32
5.1.6 BHKW 6 (526 kW _{el.} GO)	34

5.1.7	BHKW 7 (40 kW _{el.} ZS)	35
5.1.8	BHKW 8 (75 kW _{el.} ZS)	36
5.1.9	BHKW 9 (110 kW _{el.} ZS)	37
5.1.10	BHKW 10 (250 kW _{el.} ZS)	38
5.2	Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades über die Standzeit	40
6	Diskussion.....	41
6.1	Der elektrische Wirkungsgrad im Verlauf der Standzeit und im Vergleich zu den Herstellerangaben	41
6.2	Einflussfaktoren auf den elektrischen Wirkungsgrad	44
6.2.1	Motoreinstellung	44
6.2.2	Teillast	45
6.2.3	BHKW-Verfügbarkeit	47
6.3	Emissionswerte	49
6.3.1	Stickoxide (NO _x).....	49
6.3.2	Kohlenmonoxid (CO).....	51
6.3.3	Kohlenwasserstoffe (C _n H _m).....	52
6.3.4	Formaldehyd (HCHO)	56
7	Schlussfolgerungen.....	59
	Literaturverzeichnis.....	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Verhalten des Konzentrationsniveaus von NO_x , CO und C_nH_m in Abhängigkeit des Luftüberschusses (Lambda-Wert)	6
Abb. 2: 30 kW _{el.} Gas-BHKW während einer Messung (Bild: Spatz 2008).....	9
Abb. 3: 100 kW _{el.} Gas-BHKW in der Praxis.....	10
Abb. 4: 190 kW _{el.} Gas-BHKW in der Praxis.....	11
Abb. 5: 250 kW _{el.} Gas-BHKW in der Praxis.....	12
Abb. 6: 324 kW _{el.} Gas-BHKW in der Praxis.....	13
Abb. 7: 526 kW _{el.} Gas-BHKW in der Praxis.....	14
Abb. 8: 40 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW in der Praxis.....	15
Abb. 9: 75 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW in der Praxis.....	16
Abb. 10: 110 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW in der Praxis.....	17
Abb. 11: 250 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW in der Praxis.....	18
Abb. 12: Messaufbau	19
Abb. 13: Messgeräte für Gaskomponenten, Luftzufuhr und Zündölmenge im Praxiseinsatz	21
Abb. 14: Messtechnischer Aufbau für die Erfassung der Leistung und Abgaszusammensetzung.....	22
Abb. 15: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen an den 30 kW _{el.} Gas-BHKW	28
Abb. 16: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 100 kW _{el.} Gas-BHKW	29
Abb. 17: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 190 kW _{el.} Gas-BHKW.....	30
Abb. 18: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 250 kW _{el.} Gas-BHKW.....	32
Abb. 19: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 324 kW _{el.} Gas-BHKW.....	33
Abb. 20: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 526 kW _{el.} Gas-BHKW.....	34
Abb. 21: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 40 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW	36
Abb. 22: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 75 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW	37
Abb. 23: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 110 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW	38

Abb. 24: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 250 kW _{el} Zündstrahl-BHKW	39
Abb. 25: Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades der BHKW in Abhängigkeit der geleisteten Betriebsstunden.....	40
Abb. 26: Vergleich der mittleren gemessenen elektrischen Wirkungsgrade mit Herstellerangaben.....	43
Abb. 27: Auswirkung der Motoreinstellung auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad an einem 526 kW _{el} Gas-BHKW.....	44
Abb. 28: Auswirkungen der Motoreinstellungen (η -optimiert, NO _x -optimiert und Teillast) auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad eines 250 kW _{el} Zündstrahl-BHKW	46
Abb. 29: Auswirkungen der Motoreinstellungen (n-optimiert, NO _x -optimiert und Teillast) auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad eines 75 kW _{el} Zündstrahl-BHKW	47
Abb. 30: Durchschnittliche Verfügbarkeit der untersuchten BHKW während des jeweiligen Beobachtungszeitraums	48
Abb. 31: Box-Plots der NO _x -Konzentrationen [mg·m ⁻³] im Abgas der untersuchten BHKW	49
Abb. 32: Box-Plots der NO _x -Konzentrationen [g·kWh ⁻¹] pro produzierte Kilowattstunde im Abgas der untersuchten BHKW	50
Abb. 33: Box-Plots der CO-Konzentrationen [mg·m ⁻³] im Abgas der untersuchten BHKW	51
Abb. 34: Box-Plots der CO-Konzentrationen [g·kWh ⁻¹] pro produzierte Kilowattstunde im Abgas der untersuchten BHKW	52
Abb. 35: Box-Plots der C _n H _m -Konzentrationen [mg·m ⁻³] im Abgas der untersuchten BHKW	53
Abb. 36: Box-Plots der C _n H _m -Konzentrationen [g·kWh ⁻¹] pro produzierte Kilowattstunde im Abgas der untersuchten BHKW	54
Abb. 37: CO ₂ -Äquivalentemissionen und Höhe des Methanschlupfes der untersuchten BHKW	55
Abb. 38: Formaldehydkonzentrationen im Vergleich zur Höhe der NO _x -Konzentration einiger untersuchter BHKW	57
Abb. 39: Einfluss eines Oxi-Kats auf die Höhe der Abgaskonzentrationen	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Auswahl der BHKW.....	8
Tab. 2: Daten des 30 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	9
Tab. 3: Daten des 100 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	10
Tab. 4: Daten des 190 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	11
Tab. 5: Daten des 250 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	12
Tab. 6: Daten des 324 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	13
Tab. 7: Daten des 526 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	14
Tab. 8: Daten des 40 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	15
Tab. 9: Daten des 75 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	16
Tab. 10: 110 kW _{el.} BHKW-Daten laut Herstellerangaben	17
Tab. 11: Daten des 250 kW _{el.} -BHKW (Herstellerangaben)	18
Tab. 12: An den untersuchten BHKW vorhandene bzw.eingesetzte Geräte zur Erfassung der Gasmenge	20
Tab. 13: Messtechnische Erfassung des BHKW-Input.....	20
Tab. 14: Messtechnische Erfassung des BHKW-Output	21
Tab. 15: Molgewicht und Moldichte der gemessenen Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung).....	23
Tab. 16: Bilanz der zugeführten Stoffmengen.....	25
Tab. 17: Volumenstrom der Abgaskomponenten	25
Tab. 18: Mittelwerte der Messreihen (30 kW _{el.} GO).....	28
Tab. 19: Mittelwerte der Messreihen (100 kW _{el.} GO).....	29
Tab. 20: Mittelwerte der Messreihen (190 kW _{el.} GO).....	31
Tab. 21: Mittelwerte der Messreihen (250 kW _{el.} GO).....	32
Tab. 22: Mittelwerte der Messreihen (324 kW _{el.} GO).....	33
Tab. 23: Mittelwerte der Messreihen (526 kW _{el.} GO).....	35
Tab. 24: Mittelwerte der Messreihen (40 kW _{el.} ZS).....	36
Tab. 25: Mittelwerte der Messreihen (75 kW _{el.} ZS).....	37
Tab. 26: Mittelwerte der Messreihen (110 kW _{el.} ZS).....	38
Tab. 27: Mittelwerte der Messreihen (250 kW _{el.} ZS).....	39
Tab. 28: Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades über den gesamten Messzeitraum	41

Tab. 29: Durchschnittlicher elektrischer Wirkungsgrad über die Betriebsstundenanzahl und Differenz zu den vom Hersteller angegebenen Werten	42
Tab. 30: Verfügbarkeit der untersuchten BHKW während des Messzeitraums.....	48
Tab. 31: Mittlere NO _x -Konzentrationen der untersuchten BHKW.....	50
Tab. 32: Mittlere CO-Konzentrationen der untersuchten BHKW	52
Tab. 33: Mittlere C _n H _m -Konzentrationen der untersuchten BHKW.....	54
Tab. 34: CO ₂ -Äquivalentemissionen und „Methanschlupf“ der untersuchten BHKW	56

Abkürzungsverzeichnis

€	Euro
€ct	Eurocent
%	Prozent
λ	Lambda-Wert
$\eta_{\text{el.}}$	elektrischer Wirkungsgrad
Bh	Betriebsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
°C	Grad Celsius
CH ₄	Methan
C _n H _m	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
EEG	Erneuerbare Energien Gesetz
FID	Flammenionisationsdetektor
GO	Gas-BHKW
g	Gramm
H ₂	Wasserstoff
ha	Hektar
HCHO	Formaldehyd
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
K	Kelvin
k.A.	keine Angaben
kg	Kilogramm
kW _{el.}	Kilowatt elektrisch
kWh	Kilowattstunde
l·h ⁻¹	Liter pro Stunde
m ³	Kubikmeter
mbar	Millibar
Mj	Megajoule
mg	Milligramm

$m_N^3 \cdot h^{-1}$	Normkubikmeter pro Stunde
NawaRo	nachwachsende Rohstoffe
N_2	Stickstoff
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NO_x	Stickoxide
O_2	Sauerstoff
Oxi-Kat	Oxidations-Katalysator
P	Leistung
PKW	Personenkraftwagen
ppm	parts per million
Stk.	Stück
Stabw	Standardabweichung
t	Tonne
$U \cdot \text{min}^{-1}$	Umdrehungen pro Minute
V_N	Normvolumen
Vol.-%	Volumenprozent
ZS	Zündstrahl-BHKW

Zusammenfassung

Im hier beschriebenen Projekt wurden an insgesamt zehn biogasbetriebenen BHKW mit einer elektrischen Anschlussleistung von 30 kW bis 526 kW umfangreiche Messungen durchgeführt. Der Untersuchungszeitraum erstreckte sich bei einigen BHKW auf über sechs Jahre (bis zu 47.000 Betriebsstunden - Bh). Bei jeder Messung wurden der elektrische Wirkungsgrad sowie die Emissionswerte von Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) ermittelt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen einen deutlichen Rückgang des elektrischen Wirkungsgrades von der ersten bis zur letzten Messung, der sich bei den länger im Messprogramm befindlichen BHKW im Bereich von 0,4 bis 4,7%-Punkten bewegt. Der geringe Rückgang von 0,4%-Punkten beim 526 kW_{el} Gas-BHKW konnte nur durch einen Vollwartungsvertrag inklusive einer Generalüberholung erreicht werden. Ohne diese Maßnahme läge der Rückgang bei über 2,7%-Punkten. Ein gutes Wartungskonzept kann also einen positiven Einfluss auf den Verlauf und die Höhe des Wirkungsgradverlustes im Verlauf der Standzeit eines Motors haben.

Im Vergleich zu den Herstellerangaben wurden an den BHKW unter den Bedingungen der Praxis um 1,9 bis 5,0%-Punkten geringere elektrische Wirkungsgrade ermittelt. Bei der Mehrheit der untersuchten BHKW ergab sich eine Differenz von 3,0 bis 3,5%-Punkten. Da die meisten dieser BHKW noch in Betrieb sind, kann man davon ausgehen, dass sich der Wirkungsgrad weiter verschlechtern wird.

Für eine Wirtschaftlichkeitsprognose einer zu errichtenden Biogasanlage ist der Planer oder Investor auf eine zuverlässige Annahme für den elektrischen Wirkungsgrad angewiesen. Um auf der sicheren Seite zu sein, sollte entsprechend der hier vorgestellten Messergebnisse für den elektrischen Wirkungsgrad des BHKW ein Abschlag von mindestens 3%-Punkten gegenüber der Herstellerangabe vorgenommen werden.

Bei den Messungen der Abgasemissionen hat sich der Konflikt zwischen NO_x -Emissionen und elektrischem Wirkungsgrad bestätigt. Ein Magerbetrieb des Motors mit einem höheren Luftüberschuss erzielt eine kühlere Verbrennung und führt damit zu einer Erniedrigung der NO_x -Emissionen. Gleichzeitig wird die Verbrennung ineffizienter, wodurch der Kohlenwasserstoffausstoß steigt und der elektrische Wirkungsgrad abnimmt. Die BHKW sind somit in der Lage, den Grenz- bzw. Richtwert für NO_x einzuhalten, müssen hierfür aber Einbußen beim elektrischen Wirkungsgrad von über 1%-Punkt in Kauf nehmen. Bei den Kohlenwasserstoffemissionen zeigt sich ein Trend zu einer Konzentrationserhöhung über die Standzeit bedingt durch den Verschleiß der Motoren. Auch wurde ein Zusammenhang zwischen niedrigen NO_x -Gehalten und höheren Kohlenwasserstoffkonzentrationen sowie Formaldehyd im Abgas festgestellt.

Summary

In this project which is shown here a total number of 10 CHPU with an electrical power output between 30 kW_{el.} and 526 kW_{el.} were measured extensively. At some CHPU the measuring period extended over nearly six years (at about 47,000 operating hours-oh). Between each measurement the electrical efficiency and the exhaust gas emissions of nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO) and unburnt hydrocarbons (C_nH_m) were determined.

The results of this work indicate a clear decrease of the electrical efficiency between the first and the last measurement, which is in the range of 0.4 to 4.7 %-points in between the CHPU which are measured for a longer period. The low decrease of 0.4 %-points from the 526 kW_{el.} gas-CHPU was due to a full service contract in conjunction with a general overhaul. Without this action the decrease would be in a range over 2.7%-points. So, a good maintenance concept can afford a positive influence on the process and the level of the decrease of electrical efficiencies during the life-time of a CHPU.

In comparison to the manufacturers' specifications the measurements in practice resulted in lower electrical efficiencies of 1.9 to 5.0%-points. In most cases of the CHPU under investigation the differences are in a range of 3.0 to 3.5%-points. Because of many CHPU are still in operation, it is assumed, that the electrical efficiencies degrades more in next time.

For an economical prognosis of a biogas plant under construction, the investor and the production engineer have to calculate with an realistic electrical efficiency. To be on the save side, corresponding to the results shown here, a general reduction of at least 3%-points of the manufacturers' specifications has to be done for the calculation.

During the measurements of the exhaust gas the conflict between the electrical efficiency and the NO_x emissions has been approved. A lean composition of the engine with a higher surplus of air resulted in a cooler combustion temperature and conduct therefore lower NO_x emissions. Simultaneously the combustion becomes more inefficient, whereby the emissions of unburnt hydrocarbons increase and the electrical efficiency decrease. In this case, the CHPU are able to reach the guideline and the limit value, but for this they have to take a loss of over 1%point in electrical efficiency. The emissions of hydrocarbons show a trend of increasing concentrations due to the operation hours caused by mechanical wear. Also a correlation between lower NO_x concentrations and higher hydrocarbon emissions as well as formaldehyde in the exhaust gas was found.

1 Einleitung

Der nach der Novellierung des EEG 2004 einsetzende Bauboom von Biogasanlagen führte zu einer deutlichen Steigerung der Nachfrage nach Biogas-Blockheizkraftwerken (BHKW) in Deutschland. Nachdem neben den etablierten Anbietern von BHKW auch neue Hersteller auf den Markt drängten, verstärkte sich der Konkurrenzdruck auf diesem Sektor. Besonders die steigenden Rohstoff- und Investitionskosten der letzten Jahre förderten die Konkurrenzsituation. Auch in Zukunft wird sich dieser Trend eher verstärken, da die Rohstoffpreise großen Schwankungen unterworfen sind und die Anforderungen an die Sicherheit der Technik der Biogasanlage steigen werden. Dies wiederum wirkt sich negativ auf den Spielraum bei der Anlagenplanung und –kalkulation aus. Eine standortangepasste Dimensionierung und kluge Kalkulation von Biogasanlagen ist daher die Grundvoraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb.

Mitentscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist vor allem ein verlässliches und effizientes Blockheizkraftwerk (BHKW) für die Verstromung des anfallenden Biogases sowie die möglichst weitgehende Verwertung der anfallenden Abwärme. Ausschlaggebend für die Projektion der monetären Einnahmen aus der Verstromung sind die Angaben zum elektrischen Wirkungsgrad des BHKW. Basierend auf den Herstellerangaben werden Kalkulationsmodelle über einen Zeitraum von 20 Jahren aufgestellt. Bereits geringe Abweichungen des realisierten elektrischen Wirkungsgrades haben enorme Auswirkungen auf den monetären Ertrag und können im Zweifelsfall über wirtschaftlichen Erfolg oder Misserfolg entscheiden.

Bedingt durch den gestiegenen Konkurrenzdruck versuchen viele BHKW-Anbieter den erzielbaren elektrischen Wirkungsgrad ihres BHKW zu steigern, um damit einen Wettbewerbsvorteil zu erzielen. Die Angaben der Hersteller zum elektrischen Wirkungsgrad beziehen sich dabei auf neue Aggregate, die unter optimalen Bedingungen auf dem Prüfstand gemessen wurden. Für die Berechnung einer Anlage in der Praxis sind diese Werte jedoch nur unter Vorbehalt verwendbar. So sind viele Anlagenplaner dazu übergegangen, für ihre Berechnungen Erfahrungswerte bzw. Abschlagswerte zu verwenden, die mehr oder weniger die Realität widerspiegeln. Verlässliche Untersuchungen über die Entwicklung des elektrischen Wirkungsgrades im Verlauf der Lebensdauer von Biogas betriebenen BHKW standen bisher nicht zur Verfügung.

Um hier einen Beitrag zu leisten, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes über einen Zeitraum von bis zu sechs Jahren Untersuchungen an zehn BHKW verschiedener Leistungsklassen zwischen 30 und 526 kW_{el.} unter den Bedingungen der Praxis durchgeführt. Die gewonnenen Ergebnisse liefern für Planer und Berater eine wertvolle Kalkulationsgrundlage.

2 Stand des Wissens

2.1 Die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades

Für die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW sind einige sehr genaue Messungen nötig. In der Regel erfolgt die Ermittlung auf speziellen Motorprüfständen bei den BHKW-Herstellern. Nur hier lassen sich definierte Umgebungsbedingungen realisieren, die eine einfache und reproduzierbare Messung ermöglichen.

Der elektrische Wirkungsgrad berechnet sich aus dem Wert des Quotienten zwischen der erzeugten und der eingesetzten Energiemenge, angegeben in Prozent. Die eingesetzte Energiemenge berechnet sich aus der normierten Gasmenge und deren Energiegehalt (Heizwert von Methan (CH_4): $9,97 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$). Bezugsbedingungen zur Umrechnung des gemessenen Gasvolumens auf Normgasvolumen sind:

- Luftdruck p_0 : 1013,25 mbar
- Temperatur T_0 : 273,15 K
- Gasfeuchte : 0%

Die erzeugte Energiemenge wird nach dem Generator gemessen. Es muss jedoch von dieser Energiemenge noch der sogenannte Eigenstrombedarf des BHKW abgezogen werden. Dabei werden nur die Verbraucher berücksichtigt, die unbedingt nötig sind, um die angegebene Leistung zu erbringen. Hierzu zählen z.B. die Wasserpumpe, ein Gasverdichter - wenn erforderlich - sowie die Ladeluftkühlung.

Der elektrische Wirkungsgrad wird nach folgender Formel ermittelt:

$$\eta_{\text{el.}} = (P_{\text{Generator}} - P_{\text{Eigenbedarf}}) \cdot (V_N \cdot \text{Methangehalt} \cdot 9,97 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$$

Es herrschen jedoch nicht an jedem Standort zur Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades dieselben äußeren Bedingungen. Deshalb ist für eine Vergleichbarkeit der ermittelten Werte einzelner BHKW untereinander wiederum eine Umrechnung auf Normbezugsbedingungen durchzuführen. Dies ist in der DIN ISO 3046 Blatt 1 geregelt. Hierfür werden folgende Normbezugsbedingungen festgelegt:

- Luftdruck p_0 : 1.000 mbar
- Temperatur T_0 : 298 K
- relative Luftfeuchte: 30%
- Ladeluftkühlmitteltemperatur: 298 K

Hieraus lässt sich unter Berücksichtigung der Motorart (Gas-Otto bzw. Zündstrahl-Motor, Schnellläufer, Ladeluftkühler, Turbolader, etc.) ein k -Wert zur Bestimmung des Verhältnisses der induzierten Leistung und damit wiederum ein β -Wert zur Berichtigung des Kraftstoffverbrauches in Abhängigkeit vom mechanischen Wirkungsgrad ermitteln.

Zu guter Letzt gibt die DIN 3046 vor, „dass die obere Grenzabweichung für den spezifischen Kraftstoffverbrauch bei Nennleistung 5% beträgt, wenn es nicht anders angegeben ist“. Dies hat auf den berechneten elektrischen Wirkungsgrad eine deutliche Auswirkung, wie das folgende Beispiel aus der Praxis zeigt:

$$P_{\text{Generator}} = 523 \text{ kW}; P_{\text{Eigenbedarf}} = 2,64 \text{ kW}_{\text{el.}}; V_N = 262 \text{ m}^3; \text{CH}_4\text{-Gehalt} = 53,0\%$$

η_{gemessen} :	37,5%
$\eta_{\text{Korrektur der Aufstellbedingungen}}$:	37,8%
$\eta_{\text{bei 5\% Grenzabweichung des Kraftstoffverbrauches}}$:	39,8%

Dieses Beispiel zeigt, wie schwierig eine genaue Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades ist und wie leicht sich daraus Probleme zwischen BHKW-Hersteller und Anlagenbetreiber ergeben können. Nach unserer Auffassung ist die Angabe der 5%-Grenzabweichung des Kraftstoffverbrauches für die Praxis eher verwirrend, weshalb alle Wirkungsgradangaben der von uns durchgeführten Messungen nur die Korrektur der Aufstellbedingungen beinhalten.

2.2 Einflussfaktor Motoreinstellung

Ein weiterer großer Einflussfaktor auf den elektrischen Wirkungsgrad stellt die Motoreinstellung dar. Diese Problematik kann anhand der Abb. 1 verdeutlicht werden. Hierzu sind jedoch einige grundlegende Fakten über die Verbrennungskinetik methanreicher Schwachgase nötig, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Biogas, mit einem fast gleichwertigen Anteil von Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2) wird als sogenanntes „Schwachgas“ bezeichnet, da der Energieanteil nur vom Methan kommt und damit nur bei ca. 50 bis 60% liegt. CO_2 hingegen fungiert in der Praxis als Löschmittel und bewirkt eine geringe Flammgeschwindigkeit bei der Verbrennung, was die Reaktion sehr träge macht. Positiv in diesem Zusammenhang ist lediglich, dass das Biogas dadurch sehr kloppfest ist, d.h. es neigt nur sehr gering zur Eigenendzündung und kann damit sehr hoch verdichtet werden, was den Nachteil des hohen CO_2 -Gehaltes etwas ausgleicht.

Bei der Verbrennung kohlenwasserstoffhaltiger Gase entstehen neben CO_2 und H_2O auch Schadgase in Form von NO_x , CO und C_nH_m , die in Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur und der zur Verfügung stehenden Sauerstoffmenge sehr variieren können.

Abb. 1 zeigt die Höhe der Schadgaskonzentrationen in Abhängigkeit der zugeführten Luftmenge (Lambda-Wert). Der Lambda-Wert gibt an, wie viel Luft bzw. Sauerstoff dem Verbrennungsprozess zugeführt wird. Ist der Lambda-Wert = 1, wird dem Verbrennungsprozess genau soviel Sauerstoff zugeführt, wie für eine stöchiometrische Verbrennung aller oxidierbaren Bestandteile (Energiebestandteile) benötigt wird. In diesem Bereich und teilweise darunter werden PKW-Motoren betrieben. Die so entstehenden Schadgase werden mittels Katalysatoren außermotorisch eliminiert.

Im Biogasbereich ist dies jedoch aufgrund des hohen Anteils an nicht brennbarem CO_2 nicht möglich. In diesem Fall muss ein gewisser Überschuss an Luft dem Verbrennungsprozess zur Verfügung gestellt werden, damit alle energiereichen Bestandteile auch oxidiert werden können. Das Optimum dieses Lambda-Wertes liegt allerdings genau in dem Bereich, in dem sehr hohe Verbrennungstemperaturen auftreten. Dies bewirkt wiederum in Verbindung mit dem über die Luft zugeführten Stickstoff (N_2) die Bildung hoher Mengen an NO_x . Da NO_x außermotorisch nur sehr schwer eliminiert werden kann, muss im Bereich der Biogasverstromung das Brenngas weiter abgemagert werden. Nur dadurch kann aufgrund des höheren Luftanteils eine Kühlung der Verbrennungstemperatur erreicht werden, was die Bildung von NO_x reduziert und somit die Einhaltung der Abgasgrenzwerte

der TA-Luft ermöglicht. Als Folge dieser Einstellung im „Magerbetrieb“ (Abb. 1) reduziert sich die laminare Flammgeschwindigkeit aufgrund des hohen Luftanteils dahingehend, dass zwar die NO_x -Konzentration gemindert wird, aber gleichzeitig die Verbrennung nicht mehr so effizient betrieben werden kann. Hierdurch steigt der Anteil an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (hier: Methan und Formaldehyd) im Abgas (Abb. 1, Kreis) und der elektrische Wirkungsgrad sinkt geringfügig. Dieser Effekt kann durch die Verwendung eines Abgasturboladers mit Ladeluftkühlung (höhere Energiedichte pro Volumen) abgeschwächt, aber nicht ganz ausgeglichen werden. Verschiedene Untersuchungen am Institut für Landtechnik haben dieses Problem zuvor bestätigt (Aschmann et. al, 2005 und 2007).

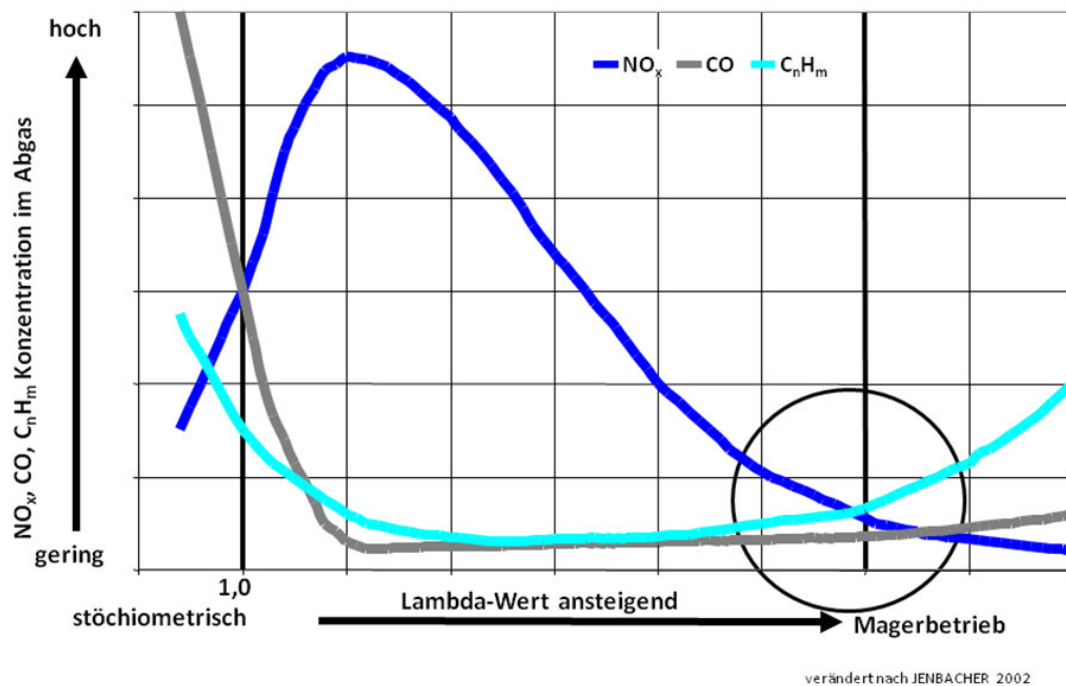


Abb. 1: Verhalten des Konzentrationsniveaus von NO_x , CO und C_nH_m in Abhängigkeit des Luftüberschusses (Lambda-Wert)

3 Zielstellung

Vorrangiges Ziel dieses Projektes war es, für die Wirtschaftlichkeitsprognose von Biogasanlagen zuverlässige Werte des elektrischen Wirkungsgrades von BHKW verschiedener Leistungsklassen bereit zu stellen. Dies sollte die Zuverlässigkeit solcher Prognosen erhöhen und dazu beitragen, monetäre Verluste auf Grund unrealistischer Annahmen zu vermeiden.

Zudem sollten aus dem ermittelten Verlauf der elektrischen Wirkungsgrade Rückschlüsse auf die Höhe des Wirkungsgradverlustes in Abhängigkeit von der Standzeit, die Notwendigkeit und die Auswirkung von Wartungsmaßnahmen und den richtigen Zeitpunkt für den Ersatz des BHKW gezogen werden. Daneben sollte der Verlauf der Schadgaskonzentrationen im Abgas gemessen und bewertet werden.

4 Material und Methoden

Für die Beantwortung der Fragestellung war zunächst eine repräsentative Auswahl an geeigneten BHKW zu treffen, an die im zweiten Schritt die notwendige Messtechnik adaptiert wurde. Aus den Vorgaben des Projektes wurde ein Messprogramm entwickelt und an den verfügbaren Zeitrahmen angepasst. Die einzelnen Schritte werden im Folgenden beschrieben.

4.1 Auswahl der BHKW

Die Anzahl der Anbieter von Biogas-BHKW hat in den letzten Jahren beträchtlich zugenommen. Die einzelnen Firmen haben jedoch im Vertrieb geographische Schwerpunkte gesetzt. Auch gibt es einige relativ kleine Firmen, die nur regional begrenzt auftreten. Da die BHKW-Auswahl in diesem Projekt einen Überblick über den Stand der Technik (Stand 2006) ermöglichen sollte, wurden nur solche Firmen in das Projekt involviert, die in Bayern stark vertreten sind. Für die Messungen wurden vier Zündstrahl- und sechs Gas-BHKW von sieben verschiedenen Herstellern ausgewählt (Tab. 1).

Tab. 1: Auswahl der BHKW

Motortyp	elektrische Nennleistung
Gas-BHKW	30 kW
	100 kW
	190 kW
	250 kW
	324 kW
	526 kW
Zündstrahl-BHKW	40 kW
	75 kW
	110 kW
	250 kW

Die Anzahl der Zündstrahl-BHKW ist geringer, da die Angebotspalette hier deutlich kleiner ist und nur bis zu einer elektrischen Leistung von 265 kW reicht. In der Praxis werden zurzeit ca. 80% Gas-BHKW und 20% Zündstrahl-BHKW betrieben, wobei die Anzahl der Zündstrahl-BHKW aufgrund der Problematik der obligatorischen Verwendung von Pflanzenölen als Stützfeuerung weiterhin rückläufig ist.

In Zusammenarbeit mit einigen Herstellerfirmen konnten anhand der Leistungsklassen der gesuchten BHKW die in Frage kommenden Anlagen ausgewählt werden. Fünf der zehn ausgewählten BHKW wurden von unserem Institut bereits in einem vorangegangenen Projekt (Förderung durch das BayStMLU) untersucht und konnten in das neue Projekt mit übernommen werden. Da die im vorangegangenen Projekt untersuchten BHKW bereits ab Beginn der Inbetriebnahme gemessen wurden, war es möglich, bei einigen BHKW die gesamte Standzeit von fünf bis sechs Jahren messtechnisch zu begleiten. Im Folgenden werden die ausgewählten BHKW kurz vorgestellt.

4.1.1 BHKW 1 (30 kW_{el.} Gas-BHKW)

Bei dem hier untersuchten 30 kW_{el.} Gas-BHKW handelt es sich um einen Serienmotor (Abb. 2 und Tab. 2). Da dieser Motor nicht mit 1.500 U·min⁻¹, sondern mit bis zu 3.000 U·min⁻¹ betrieben wird, bezeichnet man diese Art von Motor auch als „Schnellläufer“. Das BHKW steht auf einer Hofbiogasanlage auf dem Betriebsgelände der Firma NQ-Anlagentechnik und versorgt mit einem weiteren BHKW (40 kW_{el.}) die Bürogebäude mit Strom und Wärme. Des Weiteren wird dieses BHKW auch zur Forschung und Weiterentwicklung verwendet.

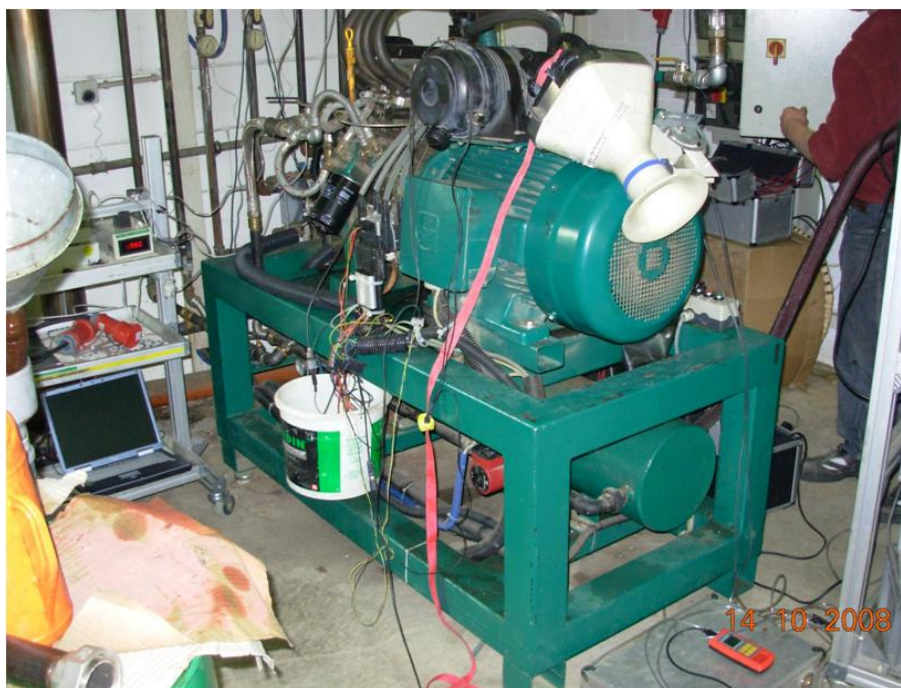


Abb. 2: 30 kW_{el.} Gas-BHKW während einer Messung (Bild: Spatz 2008)

Tab. 2: Daten des 30 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Motortyp		Technische Daten
Hubraum	Liter	1,98
Zylinder	Stk.	4
elektrische Leistung	kW	30
thermische Leistung	kW	46
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	keine Angabe (k. A.)
mechanischer Wirkungsgrad	%	k. A.
thermischer Wirkungsgrad	%	k. A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k. A.
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	k. A.

4.1.2 BHKW 2 (100 kW_{el.} Gas-BHKW)

Das 100 kW_{el.} Gas-BHKW (Abb. 3 und Tab. 3) befindet sich auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (Anlagenplaner: NQ Anlagentechnik) südlich von Augsburg, in der vorwiegend Schweinegülle und nachwachsende Rohstoffe vergärt werden. Das BHKW wurde bereits kurz nach der Inbetriebnahme (650 Bh) in das Messprogramm aufgenommen.



Abb. 3: 100 kW_{el.} Gas-BHKW in der Praxis

Tab. 3: Daten des 100 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	6,87
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	100
thermische Leistung	kW	keine Angabe (k.A.)
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k. A.
mechanischer Wirkungsgrad	%	40,5
thermischer Wirkungsgrad	%	49,6
Gesamtwirkungsgrad	%	90,2
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 500

4.1.3 BHKW 3 (190 kW_{el.} Gas-BHKW)

Das BHKW 3 hat eine elektrische Leistung von 190 kW (Abb. 4 und Tab. 4). Es ist auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage im Landkreis Donau-Ries in Betrieb. Die Biogasanlage besteht insgesamt aus sieben Behältern (3 Behälter Altanlage + 4 Behälter Neuanlage). Bei der von der Firma NQ-Anlagenbau geplanten Anlage handelt es sich um eine NawaRo-Anlage (hauptsächliche Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen), in der neben Gülle vorwiegend Maissilage vergoren wird. Dieses BHKW wurde bereits im vorausgegangenen Projekt untersucht, so dass hier schon Daten ab dem Jahre 2006 zur Verfügung stehen (Betriebsstundenanzahl bei Aufnahme 2006 Bh = 7.200).



Abb. 4: 190 kW_{el.} Gas-BHKW in der Praxis

Tab. 4: Daten des 190 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	12,81
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	190
mechanischer Wirkungsgrad	%	40,6
thermischer Wirkungsgrad	%	49,4
Gesamtwirkungsgrad	%	90,0
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 500

4.1.4 BHKW 4 (250 kW_{el.} Gas-BHKW)

Bei BHKW 4 handelt es sich um ein 250 kW_{el.} Gas-BHKW (Abb. 5 und Tab. 5). Dieses BHKW wurde erst im November 2008 an einer landwirtschaftlichen Biogasanlage (Anlagenplaner: Firma NovaTech), als Ersatz für ein 110 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW installiert (siehe Kap. 4.1.9).



Abb. 5: 250 kW_{el.} Gas-BHKW in der Praxis

Tab. 5: Daten des 250 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	14,62
Zylinder	Stk.	8 (V-Reihe)
elektrische Leistung	kW	250
thermische Leistung	kW	315
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k. A.
elektrischer Wirkungsgrad	%	38,2
thermischer Wirkungsgrad	%	47,8
Gesamtwirkungsgrad	%	88,3
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 500

4.1.5 BHKW 5 (324 kW_{el.} Gas-BHKW)

Im Kreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim befindet sich das BHKW 5 mit einer elektrischen Leistung von 324 kW (Abb. 6 und Tab. 6). Die zugehörige Biogasanlage (Anlagenplaner: Lipp-Rohn) wurde hauptsächlich für die Vergärung von Getreide und Gülle konzipiert. Die Anlage und das BHKW wurden 2005 in Betrieb genommen. Auch dieses BHKW wurde bereits in einem vorausgegangenen Projekt untersucht, so dass auch hier Daten ab 2006 zur Verfügung stehen (ca. 3.000 Bh bei Aufnahme).



Abb. 6: 324 kW_{el.} Gas-BHKW in der Praxis

Tab. 6: Daten des 324 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	k. A.
Zylinder	Stk.	12
elektrische Leistung	kW	349
thermische Leistung	kW	397
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k. A.
elektrischer Wirkungsgrad	%	k. A.
thermischer Wirkungsgrad	%	k. A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 500

4.1.6 BHKW 6 (526 kW_{el.} Gas-BHKW)

Auch das BHKW 6 mit einer elektrischen Leistung von 526 kW wurde bereits im vorherigen Projekt untersucht und befindet sich auf einer Biogasanlage der Firma NatUrgas (Anlagenplaner: Rückert) im Landkreis Schwandorf (Abb. 7). Die Anlage besteht aus zwei liegenden Pfropfenstromfermentern, einem Nachgärer und einem Endlager. Die erste Untersuchung erfolgte im Jahre 2006 nach ca. 3.900 Bh. Die technischen Daten des BHKW sind in Tab. 7 dargestellt.



Abb. 7: 526 kW_{el.} Gas-BHKW in der Praxis

Tab. 7: Daten des 526 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	29,2
Zylinder	Stk.	12
elektrische Leistung	kW	526
thermische Leistung	kW	566
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	1.301
elektrischer Wirkungsgrad	%	40,4
thermischer Wirkungsgrad	%	43,5
Gesamtwirkungsgrad	%	83,9
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	260
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 500

4.1.7 BHKW 7 (40 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW)

Das 40 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW befindet sich auf einer kleinen Hofanlage („Rosenheimer Modell“) im Landkreis Gunzenhausen (Abb. 8 und Tab. 8). Die Anlage wird hauptsächlich mit hofeigener Rindergülle und geringen Mengen an nachwachsenden Rohstoffen betrieben. Bei der Aufnahme des BHKW wies dieses eine Betriebsstundenanzahl von ca. 10.800 auf.



Abb. 8: 40 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW in der Praxis

Tab. 8: Daten des 40 kW_{el}.-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	4,4
Zylinder	Stk.	4 in Reihe
elektrische Leistung	kW	40
thermische Leistung	kW	40
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	108
elektrischer Wirkungsgrad	%	37,0
thermischer Wirkungsgrad	%	37,0
Gesamtwirkungsgrad	%	74,0
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	20
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	800

4.1.8 BHKW 8 (75 kW_{el}, Zündstrahl-BHKW)

In der Nähe von Kloster Irsee im Ostallgäu befindet sich BHKW 8 (Abb. 9 und Tab. 9). Es ist in einem alten Wirtschaftsgebäude untergebracht und versorgt die Wohngebäude und die Stallungen mit Wärme. Die Biogasanlage wird vorwiegend mit Gülle und NawaRos beschickt. Die Abwärme der anderen installierten BHKW wird dem Kloster Irsee zur Verfügung gestellt.

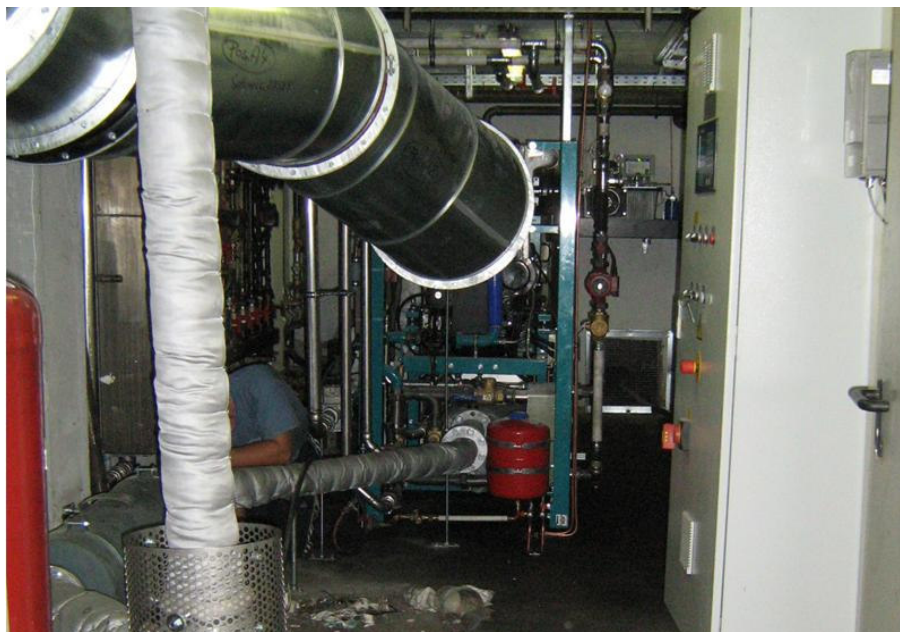


Abb. 9: 75 kW_{el}, Zündstrahl-BHKW in der Praxis

Tab. 9: Daten des 75 kW_{el}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	4,4
Zylinder	Stk.	4 in Reihe
elektrische Leistung	kW	40
thermische Leistung	kW	40
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	108
elektrischer Wirkungsgrad	%	37,0
thermischer Wirkungsgrad	%	37,0
Gesamtwirkungsgrad	%	k.A.
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	20
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	800

4.1.9 BHKW 9 (110 kW_{el}, Zündstrahl-BHKW)

Die Biogasanlage (Anlagenplaner: Novatech) mit BHKW 9 (elektrische Leistung 110 kW) steht im Landkreis Ansbach (Abb. 10 und Tab. 10). Auf dieser Anlage befinden sich zwei baugleiche BHKW mit gleicher Leistung, aber unterschiedlicher Betriebsstundenanzahl. Das jüngere BHKW wurde bereits im vorhergehenden Projekt untersucht, so dass auch hier Daten seit 2006 (ab ca. 1.500 Bh) zur Verfügung stehen. Dieses BHKW wurde Ende 2008 durch ein 250 kW_{el} Gas-BHKW ersetzt (siehe auch Kap. 4.1.4). Da jedoch ein baugleiches BHKW weiterhin zur Verfügung steht, wurde das ältere im Messprogramm behalten.



Abb. 10: 110 kW_{el}, Zündstrahl-BHKW in der Praxis

Tab. 10: 110 kW_{el}, BHKW-Daten laut Herstellerangaben

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	7,2
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	110
thermische Leistung	kW	144
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k. A.
elektrischer Wirkungsgrad	%	38,0
thermischer Wirkungsgrad	%	k. A.
Gesamtwirkungsgrad	%	k. A.
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	k. A.

4.1.10 BHKW 10 (250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW)

Das BHKW 10 mit 250 kW_{el.} befindet sich auf einer Anlage im Landkreis Donau-Ries. Die NawaRo-Biogasanlage (Anlagenplaner: NQ-Anlagenbau) ging Ende 2005 in Betrieb und besteht aus einem Fermenter, einem Nachgärer und einem Endlager. Vergärt werden hauptsächlich Gülle und Maissilage. Zur Gasverwertung stehen zwei Zündstrahl-BHKW (250 kW_{el.} und 265 kW_{el.}) zur Verfügung. Beide BHKW wurden auch bereits im vorherigen Projekt gemessen. Beim 250 kW_{el.} liegen Daten ab 2007 (ca. 10.300 Bh) vor.



Abb. 11: 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW in der Praxis

Tab. 11: Daten des 250 kW_{el.}-BHKW (Herstellerangaben)

Kennwert, Einheit		Herstellerangabe
Hubraum	Liter	16,0
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	250
thermische Leistung	kW	232
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	581
elektrischer Wirkungsgrad	%	43,0
thermischer Wirkungsgrad	%	40,0
Gesamtwirkungsgrad	%	83,0
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m _N ³ ·h ⁻¹	111,5
Zündölanteil	l·h ⁻¹ (%)	2,3 (4,1)
NO _x -Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 1000
CO-Gehalt im Abgas	mg·m ⁻³	< 2000

4.2 Messprogramm

Da die zu messenden BHKW sehr unterschiedliche Leistungen aufweisen und die örtlichen Begebenheiten teilweise stark voneinander abweichen, musste die Messtechnik variabel und mobil einsetzbar sein. Sonden mussten ohne kostenintensive und technisch aufwändige Installationen in die bestehende Gasleitung eingeführt werden können. Der Messaufbau und die dazugehörige Messtechnik werden im Folgenden erläutert.

4.2.1 Messaufbau

Der Messaufbau zur Erfassung der Stoff- und Energieströme eines BHKW teilt sich in zwei Bereiche: Die Inputströme werden charakterisiert durch Volumen, Temperatur, Druck, Feuchte und Zusammensetzung des Brenngases, das Volumen der Verbrennungsluft und die Zündölmenge. Als Output werden die abgegebene elektrische Leistung sowie der Abgasvolumenstrom und seine Zusammensetzung gemessen. Die Abgaszusammensetzung wird entweder direkt über Messstutzen am Abgaskamin oder in einem Teilstrom bestimmt, der mit einem Edelstahlrohr abgeleitet wird (Abb. 12, rechts).

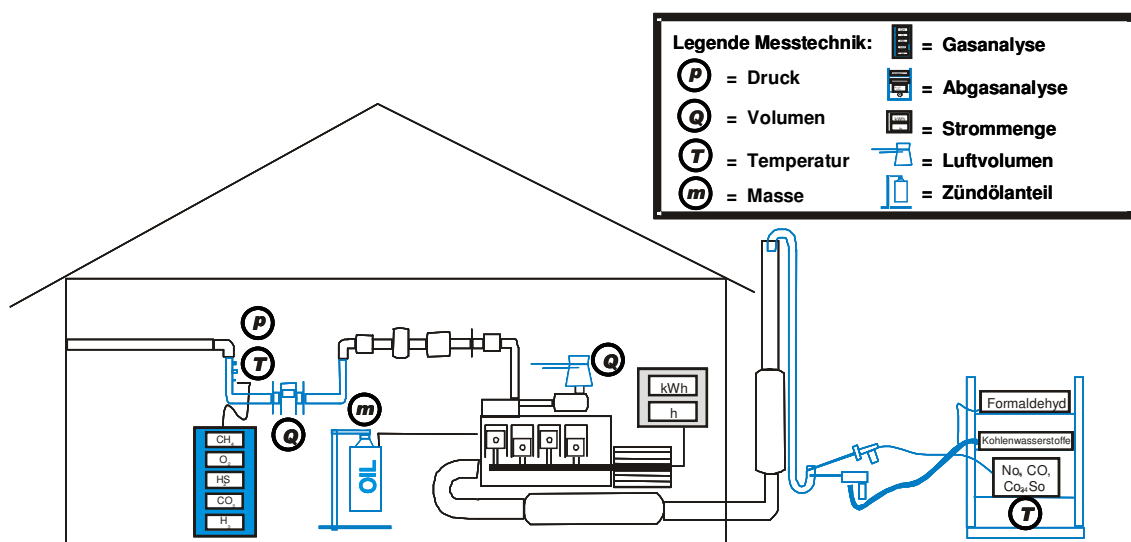


Abb. 12: Messaufbau

4.2.2 Messtechnik

4.2.2.1 BHKW-Input

Die Inputströme in das BHKW umfassen das Brenngas, die Zuluft und ggf. das Zündöl. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen zu gewährleisten, wurden die Gasvolumina auf Normbedingungen umgerechnet. Hierzu wurden Gastemperatur und Gasdruck erfasst (Tab. 13). Die Messungen am Brenngas erfolgten über vorhandene, oder nachträglich installierte Messstutzen direkt in der Gasleitung.

Für eine exakte Bestimmung der verbrauchten Menge an Biogas war das Vorhandensein eines geeichten Gaszählers an jedem untersuchten BHKW erforderlich. Dies war jedoch aufgrund des sehr hohen finanziellen Aufwands in der Praxis bei der Bandbreite und Anzahl der untersuchten BHKW nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurden ausschließlich Anlagen ausgewählt, die bereits über einen Gaszähler bzw. Gasdurchflussmesser verfügten und das vorhandene Gerät wurde zur Erfassung der Gasmengen verwendet. Drei der

untersuchten BHKW konnten vom Institut für Landtechnik und Tierhaltung mit Gasdurchflussmessern ausgestattet werden. Bei den anderen Anlagen wurden die vorhandenen Messeinrichtungen mit einem Referenzgerät überprüft und die Messwerte gegebenenfalls korrigiert. In Tab. 12 sind die an den Anlagen installierten Messeinrichtungen zur Erfassung der Gasmenge aufgelistet.

Tab. 12: An den untersuchten BHKW vorhandene bzw. eingesetzte Geräte zur Erfassung der Gasmenge

BHKW	Messverfahren	Hersteller	Typ	Genauigkeit (Herstellerangaben)
30 kW _{el.} GO ¹	Balgengaszähler	Krom Schroeder	BK-G25	± 0,2% v. Messwert
100 kW _{el.} GO	Balgengaszähler	Elster	G25	± 0,2% v. Messwert
190 kW _{el.} GO	Turbinenradzähler	Elster	Q/K65	± 1,0% v. Messwert
250 kW _{el.} GO	Massenstromzähler	Binder	Blendenzähler	k.A.
324 kW _{el.} GO	thermischer Massenstromzähler	ABB	Sensyflow	± 1,8% v. Messwert + 0,05% v. Endwert (1,8% v. Messwert + 0,05% v. Endwert)
526 kW _{el.} GO	thermischer Massenstromzähler	ABB	Sensyflow	± 1,8% v. Messwert + 0,05% v. Endwert (1,8% v. Messwert + 0,05% v. Endwert)
40 kW _{el.} ZS ²	Balgengaszähler	Krom Schroeder	BK-G25	± 0,2% v. Messwert
75 kW _{el.} ZS	Drehkolbenzähler	RMG Messtechnik	RNG-132a	± 0,3% v. Messwert
110 kW _{el.} ZS	Balgengaszähler	Krom Schroeder	BK-G25	± 0,2% v. Messwert
250 kW _{el.} ZS	Wirbelstrom-Durchflussmesser	ABB	Trio-Wirl-VT4	≤ ± 1% v. Messwert

¹⁾ Gas-BHKW; ²⁾ Zündstrahl-BHKW.

Für eine optimale Verbrennung im Motor ist ein bestimmter Sauerstoffanteil nötig, der über die Luftzufuhr geregelt wird. Aus der Aufzeichnung des zugeführten Luftvolumenstromes lassen sich Aussagen über den Lambda-Wert (λ = Luftüberschusszahl) und damit über die Güte der Verbrennung treffen sowie in Verbindung mit der zugeführten Brennstoffmenge der Abgasstrom und damit auch die Schadstofffrachten pro Zeiteinheit ermitteln. Die Volumenstrommessung der Zuluft erfolgte mit einem Messtrichter (bei kleineren Motoren) oder mit einem Messimpeller (bei größeren Motoren). Zur genauen Bestimmung der zugeführten Zündölmenge wurde ein Vorratsbehälter mit einer Wägezelle und einem Display verbunden und in die bestehende Zündölleitung integriert (siehe Tab. 13 und Abb. 13).

Tab. 13: Messtechnische Erfassung des BHKW-Input

Komponente	Messgerät	Einheiten
Gaszusammensetzung (CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , H ₂ , H ₂ S)	AWITE Bioenergie GmbH	%, ppm
Gasdruck, und -temperatur	Drucksensor, PT 100	mbar, °C
Luftvolumen	testovent 410, Messimpeller	m ³
Zündölverbrauch	Wägezelle	kg



Abb. 13: Messgeräte für Gaskomponenten, Luftzufuhr und Zündölmenge im Praxiseinsatz

4.2.2.2 BHKW-Output

Die Messungen im BHKW-Output konzentrieren sich auf die Abgaszusammensetzung und die Stromproduktion. Neben den hauptsächlichen Schadkomponenten NO_x und CO (Testo 350 bzw. ECOM J2KN-pro) wurden die Gesamtkohlenwasserstoffe (FID) erfasst (Tab. 14).

Tab. 14: Messtechnische Erfassung des BHKW-Output

Komponente	Messgerät	Einheiten
Gesamtheit der Kohlenwassertoffe (C_nH_m)	FID	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Abgaszusammensetzung (NO_x , CO, CO_2 , O_2 , Temperatur)	Testo 350, ECOM J2KN-pro	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$; %, $^{\circ}\text{C}$
Strommenge	KBR Multimes	kWh

Anhand der abgegebenen Strommenge, die direkt am BHKW-Schaltschrank abgegriffen wird (Abb. 14, links), und der zugeführten Energiemenge wurde nach DIN ISO 3046-1 der elektrische Wirkungsgrad des BHKW ermittelt.



Abb. 14: Messtechnischer Aufbau für die Erfassung der Leistung und Abgaszusammensetzung

4.2.3 Auswertung der erhobenen Rohdaten

Die in der Messkampagne erhobenen Rohdaten mussten entsprechend aufbereitet werden, damit die einzelnen zur Beurteilung eines BHKW notwendigen Betriebsparameter berechnet werden konnten. Die Auswertematrix wurde bereits in vorangegangenen Publikationen dargestellt, wird aber der Vollständigkeit halber hier nochmals erläutert.

4.2.3.1 BHKW-Input

Um die dem BHKW zugeführte Energiemengen bestimmen zu können, wurden mit den Rohdaten folgende Umrechnungen durchgeführt:

Gasmenge (Normgasvolumen)

Die Umrechnung der unter Betriebsbedingungen gemessenen Gasmenge auf Normbedingungen (1013 mbar, 0 °C) erfolgte nach dem allgemeinen Gasgesetz:

$$\frac{V_1 \cdot p_1}{T_1} = \frac{V_2 \cdot p_2}{T_2}$$

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot p_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2}$$

V_1 = gemessenes Gasvolumen [m³]
 p_1 = Druck in der Gasleitung [mbar]
 T_1 = Temperatur des Gases [K]
 V_2 = Gasmenge unter Normbedingungen
 p_2 = Normdruck [1013 mbar]
 T_2 = Normtemperatur [273 K]

Zündölmenge

Die Zündölmenge wurde gravimetrisch bestimmt. Die Dichte von Heizöl extraleicht beträgt 0,855 kg·l⁻¹ und der Heizwert 10,0 kWh·l⁻¹. Die mit dem Zündöl zugeführte Energiemenge berechnet sich wie folgt:

$$W_Z = \text{Energie im Zündöl [kWh]}$$

$$W_Z = \frac{m}{\rho} \cdot H_{uZ}$$

m = ermittelte Masse des Heizöls [kg]
 ρ = Dichte von Heizöl extraleicht [kg·l⁻¹]
 H_{uZ} = Heizwert von Heizöl extraleicht [kWh·l⁻¹]

Gesamtenergiezufuhr

Die dem BHKW zugeführte Energiemenge ist die Summe aus der im Biogas enthaltenen und der mit dem Heizöl zugeführten Energie. Der Heizwert von Methan beträgt 35,9 MJ·m⁻³ bzw. 9,97 kWh·m⁻³. Der Gesamtenergieinput wurde wie folgt errechnet:

$$W_G = (V_N \cdot C_K \cdot H_{uM}) + W_Z$$

W_G = zugeführte Gesamtenergiemenge [kWh]
 V_N = Biogasmenge (genormt) [m³]
 C_K = Methankonzentration (Kalibrierdruck) [%]

H_{uM} = Heizwert von Methan [$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$]

W_Z = Energiegehalt des Zündöls [kWh]

4.2.3.2 BHKW-Output

Um die erhobenen Daten mit ähnlichen, bereits abgeschlossenen Forschungsprojekten vergleichen zu können, erfolgten entsprechende Umrechnungen.

Abgaszusammensetzung

Die im Abgas vorliegenden Komponenten wurden in ppm gemessen. Die von der TA-Luft geforderten Grenzwerte sind jedoch in der Einheit $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ angegeben. Die gemessenen volumenbezogenen Anteile mussten somit in gewichtsbezogene Anteile umgerechnet werden. Die Massenkonzentration (E_M) wurde nach der folgenden Formel ermittelt (nach BANK 2000, S. 439):

$$E_M = \frac{m_{\text{mol}}}{V_{\text{mol}}} \cdot E_V$$

E_M = Massenkonzentration [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 E_V = gemessener Volumenanteil [ppm]
 m_{mol} = Molmasse [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]
 V_{mol} = Molvolumen [$\text{l}\cdot\text{mol}^{-1}$]

Zur Ermittlung der Massenkonzentration müssen somit alle relevanten im Abgasstrom gemessenen Komponenten mit einem Faktor multipliziert werden, der sich aus dem Verhältnis der Molmasse des entsprechenden Gases und dem Molvolumen von $22,4 \text{ l}\cdot\text{mol}^{-1}$ (bei Normbedingungen: $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$) ergibt. In Tab. 15 sind diese Faktoren für die verschiedenen Gase unter der Bezeichnung Moldichte dargestellt.

Tab. 15: Molgewicht und Moldichte der gemessenen Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung)

Messgröße	Molmasse [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$]	Moldichte [$\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$]
CO	28	1,25
NO	30	1,34
NO ₂ (NO _x)	46	2,05
SO ₂	64	2,93

Bevor jedoch ein Vergleich zwischen den Anlagen untereinander und gegenüber den Angaben der TA-Luft möglich ist, sind außerdem die verschiedenen Gaszustände zu berücksichtigen. Dafür gibt die TA-Luft für Grenzwertangaben, welche auf den Sauerstoffgehalt im Abgas bezogen sind, folgende Umrechnungsvorschrift:

$$E_B = \frac{21 - O_B}{21 - O_M} \cdot E_M$$

E_M = ermittelte Massenkonzentration im Abgas [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 E_B = Massenkonzentration beim Bezugssauerstoffgehalt [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$]
 O_M = gemessener Sauerstoffgehalt [%]
 O_B = Bezugssauerstoffgehalt [%]

Die in der TA-Luft vorgegebenen und für den betrachteten Fall relevanten Grenzwerte gelten für einen Bezugssauerstoffgehalt von 5 Vol.-%.

Abgasmenge (Zuluft)

Aus der Zusammensetzung und den Mengen der dem Motor zugeführten Stoffströme wurde der mengenmäßige Abgasvolumenstrom berechnet. Hierfür wurden folgende Parameter in die Berechnung aufgenommen:

Input:

- Biogas: Menge in Normkubikmeter
Zusammensetzung (CH₄ und CO₂) in %
- Zuluft: Volumenstrom in Normkubikmeter
Zusammensetzung (N₂: 79,05% und O₂: 20,95%)
- Zündöl: Menge in Liter

Output:

- Abgas: Zusammensetzung (CO₂ und O₂) in %
Temperatur in °C

Zuluft:

Am Verbrennungsprozess ist nur der Sauerstoffanteil der Luft beteiligt, wovon wiederum nur ein Teil reagiert. Da der Stickstoff und die Spurengase zwar durch den Motor strömen, jedoch nicht reagieren und mengenmäßig gleich bleiben, werden die restlichen Gase zum Stickstoff hinzugezählt. Somit ergibt sich der konstante Teil der Luft zu 79,05 Vol.-%.

Die vom Motor angesaugte Verbrennungsluft wurde über eine Differenzdruckmessung bestimmt und in einen Volumenstrom umgerechnet.

1. Gesamtvolumenstrom: $\dot{V} = 1,291 \cdot \sqrt{p_{dyn}} \cdot 22 \text{ in m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
2. Sauerstoffanteil: $V(O_2) = V_{ges} \cdot 0,2095$
3. Sauerstoffmenge: $n(O_2) = \frac{p \cdot V(O_2)}{R \cdot T}$
4. Normvolumen: $V_N = \frac{n \cdot R \cdot T}{p}$; wobei T = 273 K und p = 101.300 Pa

Heizöl:

Aus der Literatur geht hervor, dass aus einem Liter Diesel etwa 2,63 kg CO₂ entstehen. Hieraus lässt sich auf eine Molmenge von 59,77 mol Kohlenstoff pro Liter Heizöl schließen. Bei vollständiger Verbrennung entspricht dies einem Volumenausstoß von 1,339 m³ CO₂ pro Liter Heizöl.

$$n = \frac{m(\text{CO}_2)}{M(\text{CO}_2)} = \frac{2,63 \text{ kg}}{0,044 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}} = 59,77 \text{ mol (C-Atome) in einem Liter verbrannten Heizöls}$$

Durch die Verbrennung entsteht folgendes Normvolumen an CO₂:

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p} = \frac{59,77 \cdot 8,314 \cdot 273}{101300} = 1,339 \text{ Nm}^3 / \text{Liter Heizöl}$$

Verbrennung des Heizöls: $C_nH_{2n} + 1,5 n O_2 \rightarrow n CO_2 + n H_2O$

Da bei der Verbrennung pro C-Atom auch ein Molekül Wasser entsteht, kommt dieselbe Menge an Wasserdampf noch hinzu.

$$m(H_2O) = 59,77 \text{ mol} \cdot 0,018 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1} = 1,08 \text{ kg } H_2O \cdot \text{Liter}^{-1}$$

Heizöl benötigt $1,5 \cdot n$ Sauerstoff des entstehenden CO_2

also $1,5 \cdot 59,77 = 89,66 \text{ mol } O_2$ pro l Heizöl

oder in Normvolumen ausgedrückt: $2,008 \text{ m}_N^3 O_2$ pro l Heizöl.

Biogas:

Verbrennung von Methan: $CH_4 + 2 O_2 \rightarrow CO_2 + 2 H_2O$

Der Sauerstoff im Abgas errechnet sich aus dem eingehenden Luftsauerstoff abzüglich des Sauerstoffbedarfs des Methans und gegebenenfalls des Heizöls. Es handelt sich hierbei um den sogenannten Sauerstoffüberschuss der im Wert Lambda wiederzufinden ist.

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Berechnung des Abgasvolumenstroms ist im Folgenden eine Beispielrechnung für den Durchsatz eines Praxis-BHKW dargestellt:

Biogasrate: $57,7 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$

Lufrate: $469,33 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$

Zündölmenge: $4,2 \text{ l} \cdot h^{-1}$

Tab. 16: Bilanz der zugeführten Stoffmengen

	CH₄	CO₂	O₂	N₂	C
Biogas	$n=1355 \text{ mol} \cdot h^{-1}$	$n=1260 \text{ mol} \cdot h^{-1}$			
Zuluft			$4388 \text{ mol} \cdot h^{-1}$ $98,3 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$	$366,5 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$	
Heizöl					$251 \text{ mol} \cdot l^{-1}$

Tab. 17: Volumenstrom der Abgaskomponenten

	CO₂	N₂	H₂O	O₂
Biogas	$n=1355 \text{ mol} \cdot h^{-1} +$ $n=1260 \text{ mol} \cdot h^{-1}$ $58,59 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$		$2 \cdot 1355 \text{ mol} \cdot h^{-1}$ $60,70 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$	
Luft		$366,5 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$		$29,15 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$
Heizöl	$1,34 \text{ m}_N^3 \cdot l^{-1}$ $5,63 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$		$1,34 \text{ m}_N^3 \cdot l^{-1}$ $5,63 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$	

Ausstoß pro Stunde: $64,22 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} CO_2$

$366,5 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} N_2$

$66,33 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} H_2O$ entspricht $53,3 \text{ kg} \cdot h^{-1}$

$29,15 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1} O_2$ berechnet

Abgas gesamt: $526,3 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$

Abgas ohne H_2O : $459,97 \text{ m}_N^3 \cdot h^{-1}$

Das Testo-Abgasmessgerät misst bei 5°C und demnach bei 1% absoluter Luftfeuchte.

Deshalb wird der trockene Volumenstrom von $459,97 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ in Bezug zu 1% H_2O gesetzt, was einen Volumenstrom von **$464,62 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$** ergibt.

Aus $29,15 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (6,34% O_2) werden bei 5% O_2 Bezugssauerstoff $23 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Somit ergibt sich ein trockenes Gesamtabgasvolumen von $453,88 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Lambda-Wert:

Der Wert berechnet sich aus dem Quotienten des bei der Verbrennung vorhandenen Sauerstoffs und der theoretisch für eine vollständige Verbrennung nötigen Sauerstoffmenge.

$$\lambda = \frac{O_{2\text{vorhanden}}}{O_{2\text{nötig}}}$$

Aus dem oben angeführten Beispiel ergibt sich folgender Lambda-Wert:

- O_2 vorhanden: $98,3 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 - $\text{O}_{2\text{nötig}}$: $69,14 \text{ m}_\text{N}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- => **$\lambda = 1,42$**

4.2.4 Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades

Die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades erfolgte nach der DIN 3046 Blatt 1 wie unter Kap. 2.1 beschrieben. Alle für die Berechnung benötigten Daten wurden bei der Messung erfasst, mit Ausnahme der Ladeluftkühlmitteltemperatur, die mit 298 K als Normtemperatur angenommen wurde. Auf eine Anwendung der 5% Grenzabweichung des spezifischen Kraftstoffbedarfs wurde verzichtet.

Aus den aufgezeichneten Werten der vierstündigen Dauermessung während eines Messtermins wurden Stundenmittelwerte berechnet, aus denen sich der Mittelwert für den jeweiligen Messtermin ergab. Um den Durchschnittswert über den gesamten Messzeitraum zu ermitteln, wurden alle Messungen auf einer Zeitachse im Abstand von 1000 Bh aufgetragen und die fehlenden Messwerte interpoliert. Der so berechnete elektrische Wirkungsgrad wurde als Durchschnittswert über die gesamte Standzeit angegeben.

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die bei den Untersuchungen der einzelnen BHKW ermittelten Ergebnisse grafisch und tabellarisch dargestellt und die Verläufe des elektrischen Wirkungsgrades aller BHKW zusammengefasst.

5.1 Ergebnisse der einzelnen Messreihen

5.1.1 BHKW 1 (30 kW_{el}, GO)

Das 30 kW_{el} Gas-BHKW wurde als sogenannter „Schnellläufer“ mit 3.000 U·m⁻¹ betrieben. Der Nachteil dieses BHKW liegt in der sehr kurzen Standzeit des Motors mit lediglich ca. 12.000 Bh. Vorteilhaft ist der sehr niedrige Preis dieses Serienmotors mit ca. 2.500 €.

Da sich die Messungen in diesem Projekt über vier Jahre erstreckten, wurden in dieser Zeit an der Anlage insgesamt vier Motoren gemessen. Die erste Messung im Jahre 2008 (08-I) erfolgte an einem Motor mit über 10.000 Bh, weshalb sie auch am Ende der Abbildung zu finden ist. Der zweite Motor wurde im Jahr 2009 gemessen, der dritte im Jahr 2010 und der vierte im Jahr 2011 (Abb. 15).

An einem sehr neuen Motor mit nur 50 Bh konnte mit 31,2% der höchste elektrische Wirkungsgrad gemessen werden. Bei allen anderen Messungen lag der elektrische Wirkungsgrad im Bereich von 29% (Abb. 15). Es ist daher zu vermuten, dass der größte Wirkungsgradverlust in den ersten Betriebsmonaten zu verzeichnen ist. Aufgrund der relativ geringen Standzeit und der damit verbundenen geringen Messdichte in diesem Projekt kann dies jedoch nur vermutet werden. Für eine konkretere Aussage müssten mehrere Messungen an ein und demselben Motor während der kurzen Standzeit vorgenommen werden.

Die gemessenen Emissionswerte für NO_x und CO sind relativ hoch und übersteigen den Richtwert des Biogashandbuchs Bayern im Bereich des NO_x um das Sechsfache. Die in der Abb. 15 eingetragenen Richtwerte für NO_x und CO beziehen sich auf die Angaben des Biogashandbuchs Bayern (2007) und nicht auf die Grenzwerte der TA-Luft. Diese sind keine bindenden Werte, sondern dienen nur als Richtwert. Die relativ hohen und schwankenden Werte sind allerdings ein grundlegendes Problem der kleinen BHKW, die in diesem Bereich oft sehr hohe und uneinheitliche Werte aufweisen (siehe auch Kap. 5.1.7 und Kap. 6.3). Die Mittelwerte der wichtigsten Messwerte sind in Tab. 18 nochmals tabellarisch zusammengefasst.

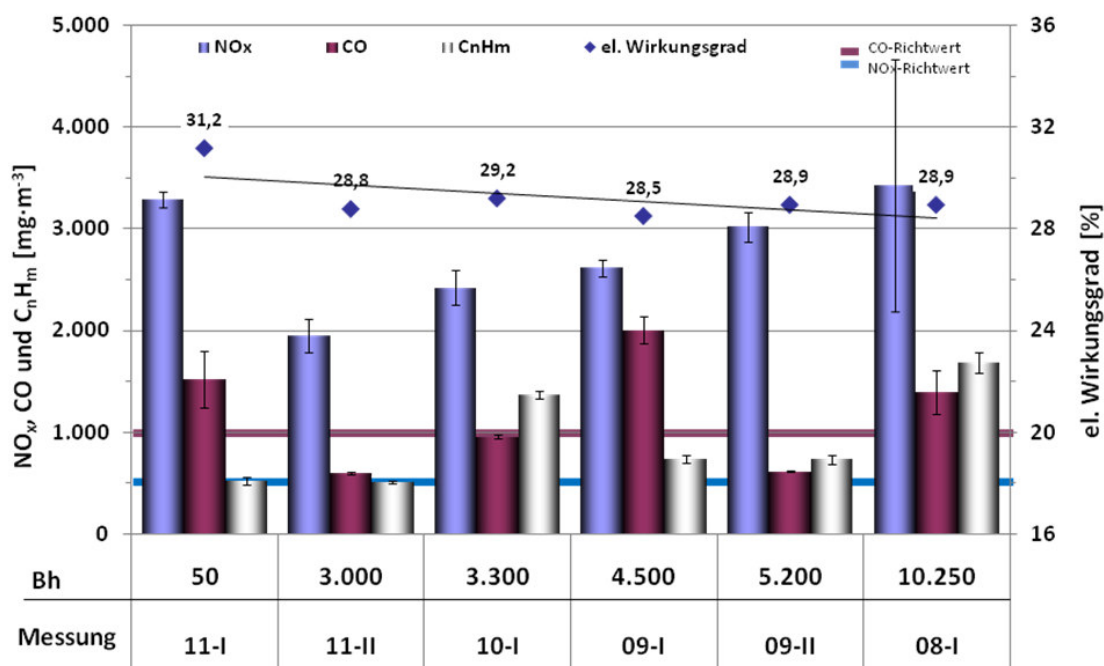


Abb. 15: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen an den 30 kW_{el.} Gas-BHKW

Tab. 18: Mittelwerte der Messreihen (30 kW_{el.} GO)

Messung 30 kW _{el.}	el. Wir- kungsgrad %	el. Leis- tung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgas- strom m ³ ·h ⁻¹
09.06.2011 (11-I)	31,2	30	50,7	3279	76	1520	275	523	35	83
29.09.2011 (11-II)	28,8	31	51,0	1946	170	595	18	509	13	124
17.06.2010 (10-I)	29,2	26	51,1	2416	170	955	15	1365	38	117
09.07.2009 (09-I)	28,5	31	49,4	2610	81	2002	127	739	37	114
03.08.2009 (09-II)	28,9	28	47,2	3014	143	614	8	730	48	117
14.10.2008 (08-I)	28,9	26	50,5	3420	1237	1391	216	1683	103	105

5.1.2 BHKW 2 (100 kW_{el.} GO)

Das 100 kW_{el.} Gas.-BHKW wurde 2008 bei einem Zählerstand von 650 Bh zum ersten Mal gemessen (Abb. 16). Dieses BHKW wurde allerdings nach 11.500 Bh im Rahmen einer Anlagenerweiterung bereits durch ein neues und größeres BHKW ersetzt und fiel damit aus dem Messprogramm heraus. Bis zu diesem Zeitpunkt konnten vier Messungen durchgeführt werden (Abb. 16, links). Die Ergebnisse des elektrischen Wirkungsgrades waren sehr uneinheitlich und lassen keine Aussagen über den Verlauf während der Standzeit zu. Um eine konkretere Aussage über den Wirkungsgradverlauf treffen zu können wurde ein Ersatz-BHKW desselben Herstellers gesucht und in die Messreihe mit aufge-

nommen. Dieses BHKW wurde bei 54.000 bzw. 57.000 Bh in 2011 zweimal gemessen (Abb. 16, rechts). Die Ergebnisse der insgesamt sechs Messungen zeigt Abb. 16.

Der elektrische Wirkungsgrad des zweiten BHKW lag trotz hoher Betriebsstundenzahl um 36% und damit auf demselben Niveau, wie für das erste BHKW mit wenigen Betriebsstunden. Der geringe elektrische Wirkungsgrad bei den Messungen 08-I und 09-II mit 33,5 und 34,0% könnte durch eine schlechte Motoreinstellung verursacht worden sein. Die trotz des hohen Betriebsstundenzählerstandes erreichten Wirkungsgrade von 36,3 und 35,4% beim zweiten BHKW wurden hingegen durch den relativ hohen NO_x -Gehalte im Abgas begünstigt, da diese Einstellung einen höheren elektrischen Wirkungsgrad zulassen (Abb. 16).

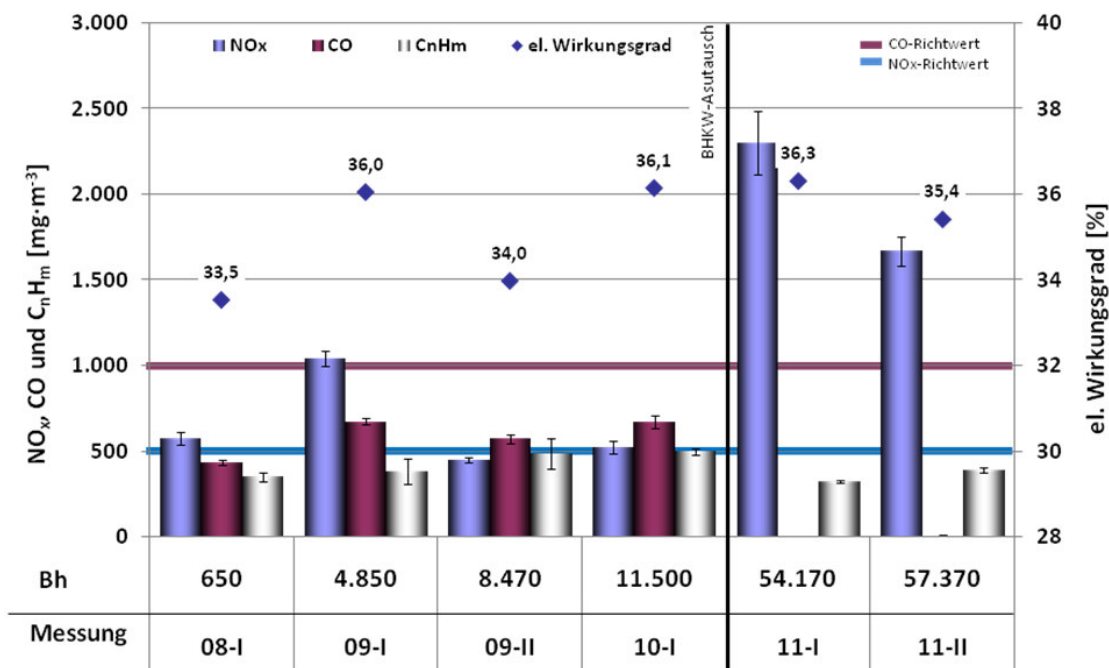


Abb. 16: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 100 kW_{el.} Gas-BHKW

Tab. 19: Mittelwerte der Messreihen (100 kW_{el.} GO)

Messung 100 kW _{el.}	el. Wir- kungsgrad %	el. Leis- tung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgas- strom m ³ ·h ⁻¹
15.12.2008 (08-I)	33,5	100	54,3	574	38	436	17	349	24	393
28.05.2009 (09-I)	36,0	99	51,4	1041	41	673	20	381	75	384
26.10.2009 (09-II)	34,0	91	54,0	449	17	573	27	487	89	395
04.03.2010 (10-I)	36,1	99	53,3	525	36	671	34	498	16	379
26.07.2011 (11-I)	36,3	100	51,2	2300	188	7	1	322	9	399
07.12.2011 (11-II)	35,4	100	52,1	1669	84	8	1	390	15	416

Die Abgaswerte sind abgesehen von den NO_x -Werten beim zweiten BHKW sehr gering und liegen im Bereich der Richtwerte für NO_x und CO. Die sehr geringen CO-Gehalte beim zweiten BHKW beruhen auf dem Einsatz eines Oxi-Kats, der Emissionswerte beim CO von unter $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ermöglicht (Abb. 16 und Tab. 19).

5.1.3 BHKW 3 (190 kW_{el.} GO)

Das 190 kW_{el.} Gas-BHKW wird bereits seit 2006 messtechnisch betreut, so dass die Ergebnisse in dieses Projekt mit einfließen können. Der Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades über die Standzeit gestaltet sich relativ ungleichmäßig, zeigt jedoch einen klaren Abwärtstrend (Abb. 17). Nach 35.000 Bh erfolgte eine Generalüberholung dieses BHKW. Hierbei wurden alle beweglichen Teile des Motors ausgetauscht. Allerdings konnte nach der Generalüberholung keine Zunahme des elektrischen Wirkungsgrades festgestellt werden. Einzig die Abgasemissionen zeigten die niedrigsten Werte der gesamten Messreihe. Ein Zusammenhang zwischen dem niedrigen elektrischen Wirkungsgrad nach der Generalüberholung und dem niedrigen NO_x -Gehalt kann in diesem Fall nicht ausgeschlossen werden. Bei der Betrachtung der NO_x -Gehalte und der Höhe des elektrischen Wirkungsgrades wird wiederum der deutliche Zusammenhang zwischen leistungsorientierter Einstellung und der Höhe der NO_x -Emissionen erkennbar (Abb. 17).

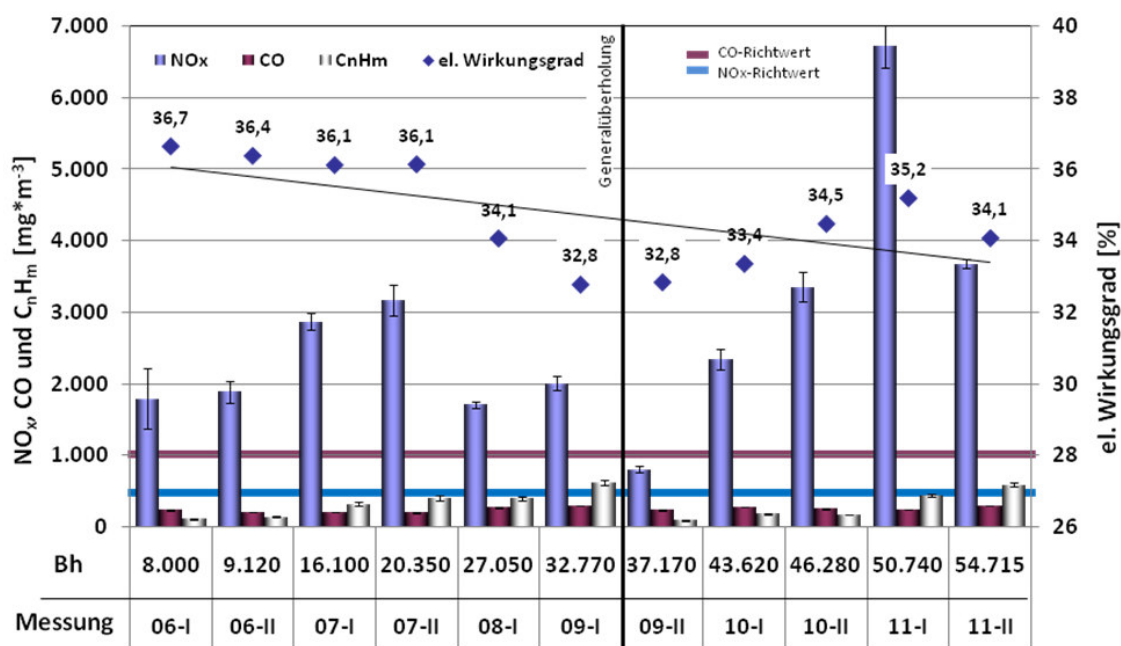


Abb. 17: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 190 kW_{el.} Gas-BHKW

Die NO_x -Gehalte übersteigen bei diesem BHKW die Richtwerte bis auf das 13-fache, was zum einen an der Einstellung des BHKW und zum anderen durch die Alterung des Motors bedingt ist. Laut Anlagenbetreiber erreicht das BHKW bei veränderter Motoreinstellung seine Leistung nicht mehr, was durch die Messung bestätigt wurde (Tab. 20; Messung 11-II). Ein weiterer Aspekt, der an dieser Anlage deutlich wurde, ist die Erhöhung des Ausstoßes von unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) bedingt durch den Motorverschleiß (Abb. 17). Dieser konnte durch die Generalüberholung zwar kurzzeitig wieder auf

den Ausgangswert zurückgeführt werden, stieg jedoch in der Folge wieder an. Dieses BHKW ist nach wie vor im Betrieb.

Tab. 20: Mittelwerte der Messreihen (190 kW_{el.} GO)

Messung 190 kW _{el.}	el. Wirkungsgrad %	el. Leistung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgasvolumen m ³ ·h ⁻¹
28.03.2006 (06-I)	36,7	187	52,1	1797	415	236	17	116	9	681
03.08.2006 (06-II)	36,4	190	51,3	1890	152	204	2	140	7	654
05.06.2007 (07-I)	36,1	189	52,9	2874	118	210	7	322	22	663
20.11.2007 (07-II)	36,1	188	52,4	3170	214	205	10	409	35	666
25.08.2008 (08-I)	34,1	188	52,0	1715	44	276	10	397	23	725
21.04.2009 (09-I)	32,8	187	51,7	2012	106	297	3	622	44	713
29.10.2009 (09-II)	32,8	189	53,4	809	43	240	7	93	4	744
28.07.2010 (10-I)	33,4	189	51,6	2342	145	282	4	188	7	707
17.11.2010 (10-II)	34,5	190	52,4	3358	201	259	10	171	6	699
25.05.2011 (11-I)	35,2	187	50,8	6732	305	244	8	448	16	664
09.11.2011 (11-II)	34,1	181	51,7	3682	71	300	5	591	23	688

5.1.4 BHKW 4 (250 kW_{el.} GO)

Das 250 kW_{el.} Gas-BHKW konnte nur dreimal gemessen werden, da sich herausstellte, dass der eingebaute Gaszähler (Massenstromzähler) trotz mehrmaliger Kalibration keine realistischen Werte anzeigte (Abb. 18), so dass kein plausibler elektrischer Wirkungsgrad ermittelt werden konnte und das BHKW aus dem Messprogramm herausgenommen wurde. Auf eine Aussage über den Wirkungsgradverlauf dieser Leistungsklasse wird daher verzichtet.

Lediglich die Abgaswerte, die im Bereich der NO_x-Konzentrationen sehr hohe Werte aufwiesen, werden in die nachfolgenden Betrachtungen mit eingebunden. Die Werte der einzelnen Messungen sind in Tab. 21 zusammengefasst.

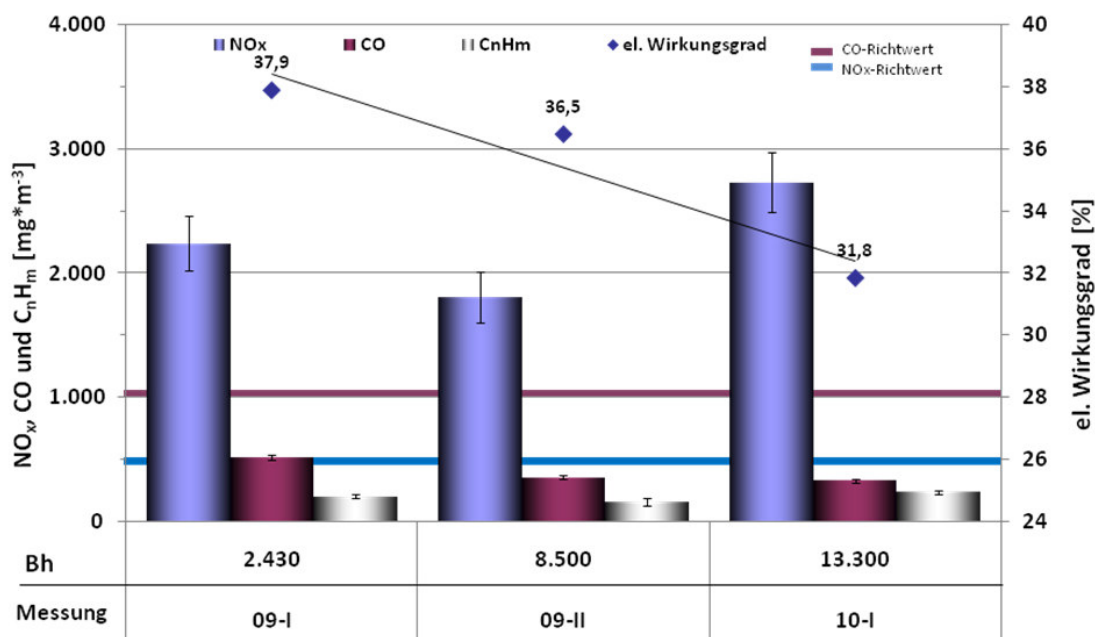


Abb. 18: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 250 kW_{el.} Gas-BHKW

Tab. 21: Mittelwerte der Messreihen (250 kW_{el.} GO)

Messung 250 kW _{el.}	el. Wir- kungsgrad %	el. Leis- tung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgas- strom m ³ ·h ⁻¹
10.03.2009 (09-I)	37,9	242	49,8	2238	218	517	18	201	13	908
19.11.2009 (09-II)	36,5	244	51,6	1807	204	354	13	157	34	910
16.06.2010 (10-I)	31,8	244	51,7	2730	242	328	14	234	16	1076

5.1.5 BHKW 5 (324 kW_{el.} GO)

Auch das 324 kW_{el.} Gas-BHKW befand sich bereits seit 2006 im Messprogramm und ließ eine Tendenz zur Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades über die Standzeit erkennen (Abb. 19). Die Messwerte 06-II und 09-II weisen im Bereich des elektrischen Wirkungsgrades Abweichungen auf, die messtechnisch bedingt sein könnten. Zum Ende des Messzeitraumes ist jedoch eine deutliche Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades erkennbar, die durch Verschleißerscheinungen des Motors verursacht wurde. Dies wirkt sich vor allem auf die Leistung des BHKW aus, die bei den letzten beiden Messungen (11-I und 11-II) unter 300 kW fiel. Das BHKW wurde aus diesem Grund Ende 2011 nach ca. 48.000 Bh durch ein neues und leistungsstärkeres BHKW ersetzt.

Bei den Abgaswerten wurden wie schon bei den anderen Gas-BHKW erhöhte NO_x-Konzentrationen gemessen, die die Richtwerte um das Sechsfache überstiegen. Es konnte hierbei jedoch kein Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad beobachtet werden (Abb. 19). Die Gehalte an C_nH_m im Abgas lagen bei allen Messungen zwischen 200 und 370 mg·m⁻³ (Tab. 22) und damit im unteren Bereich aller gemessenen BHKW. Es konnte auch

kein Anstieg von Kohlenwasserstoffen im Abgas aufgrund von Verschleißerscheinungen festgestellt werden.

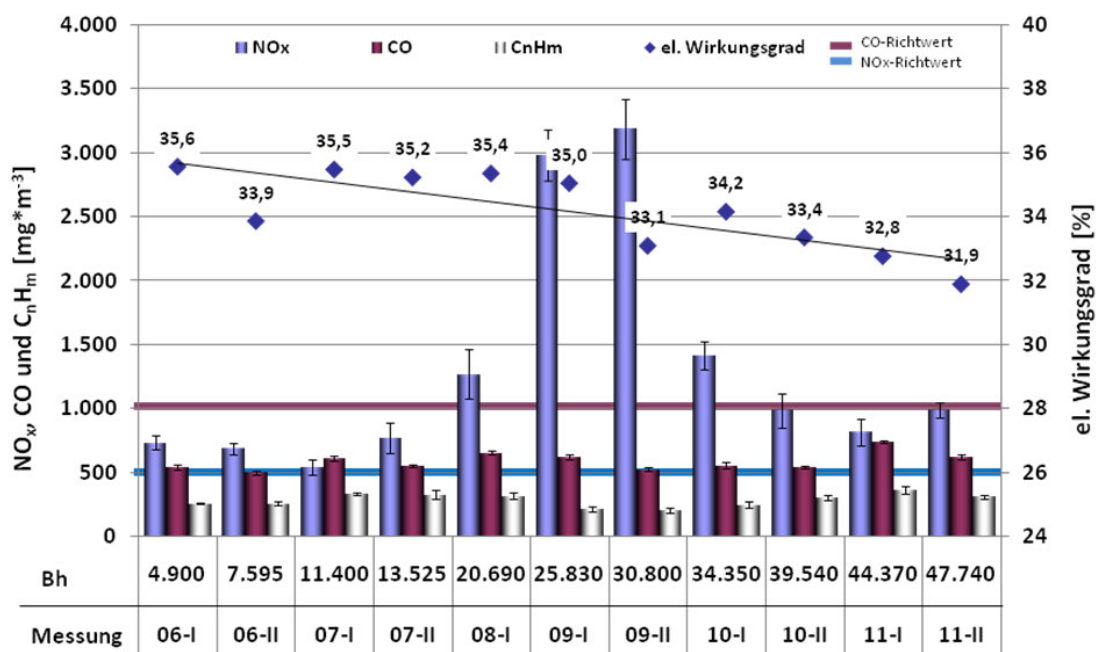


Abb. 19: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 324 kW_{el} Gas-BHKW

Tab. 22: Mittelwerte der Messreihen (324 kW_{el} GO)

Messung 324 kW _{el}	el. Wir- kungsgrad %	el. Leis- tung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgas- strom m ³ ·h ⁻¹
22.08.2006 (06-I)	35,6	312	51,7	735	57	544	20	257	6	1159
20.11.2006 (06-II)	33,9	313	56,1	688	44	499	14	260	19	1130
21.05.2007 (07-I)	35,5	309	54,3	546	60	612	16	337	10	1361
11.09.2007 (07-II)	35,2	314	57,0	767	118	551	10	328	36	1222
12.08.2008 (08-I)	35,4	312	55,2	1271	190	652	15	317	24	1226
16.04.2009 (09-I)	35,0	313	52,7	2980	198	621	23	214	17	1143
10.11.2009 (09-II)	33,1	313	59,5	3187	233	526	15	204	17	1130
08.04.2010 (10-I)	34,2	312	56,7	1418	108	557	21	250	21	1211
11.11.2010 (10-II)	33,4	314	56,4	985	131	544	12	306	21	1303
01.06.2011 (11-I)	32,8	299	56,1	819	104	740	9	364	25	1283
20.10.2011 (11-II)	31,9	292	57,8	986	61	623	17	312	13	1196

5.1.6 BHKW 6 (526 kW_{el.} GO)

Auch das 526 kW_{el.} Gas-BHKW wurde aus dem vorherigen Projekt übernommen und seit 2006 gemessen. Bei diesem BHKW besteht ein Vollwartungsvertrag mit dem BHKW-Hersteller, so dass mit Ausnahme vom Ölwechsel und kleineren Reparaturen alle Wartungs- und Reparaturmaßnahmen sowie die BHKW-Einstellung vom Serviceteam des Herstellers vorgenommen werden. Im Zuge dieses Wartungskonzeptes wurde nach 33.000 Bh eine Generalüberholung durchgeführt (Abb. 20).

Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW sank im Verlauf der Standzeit von über 38 auf unter 36% bei der Messung 09-II. Danach erfolgte eine Generalüberholung, die eine Anhebung des elektrischen Wirkungsgrades bis auf den Ausgangswert bewirkte. Hiermit konnte gezeigt werden, dass eine gute Wartungsstrategie einen positiven Effekt auf den Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades ausüben kann. Unter den BHKW, die schon seit längerer Zeit im Messprogramm sind, wies dieses BHKW den geringsten Wirkungsgradverlust über die Standzeit auf.

Bei den Emissionswerten fällt der sehr hohe Anteil an Kohlenwasserstoffemissionen von über 1.000 mg·m⁻³ auf (Abb. 20). Dies ist dadurch bedingt, dass dieses BHKW mit einem höheren Kompressionsdruck gefahren wird, ähnlich wie bei Zündstrahlmotoren. Dies bewirkt neben einem höheren elektrischen Wirkungsgrad auch höhere Kohlenwasserstoffemissionen. Ebenfalls erkennt man hier, dass sich die C_nH_m-Konzentration im Abgas im Verlauf der Standzeit durch den Motorverschleiß erhöht. Auch hier konnte die Generalüberholung einen positiven Effekt erzielen. Ab der Messung 09-I wurde das BHKW mit einem Oxi-Kat ausgestattet, was an den geringeren CO-Konzentrationen im Abgas erkennbar ist (Abb. 20). Die Mittelwerte der Messreihen sind in Tab. 23 zusammengefasst.

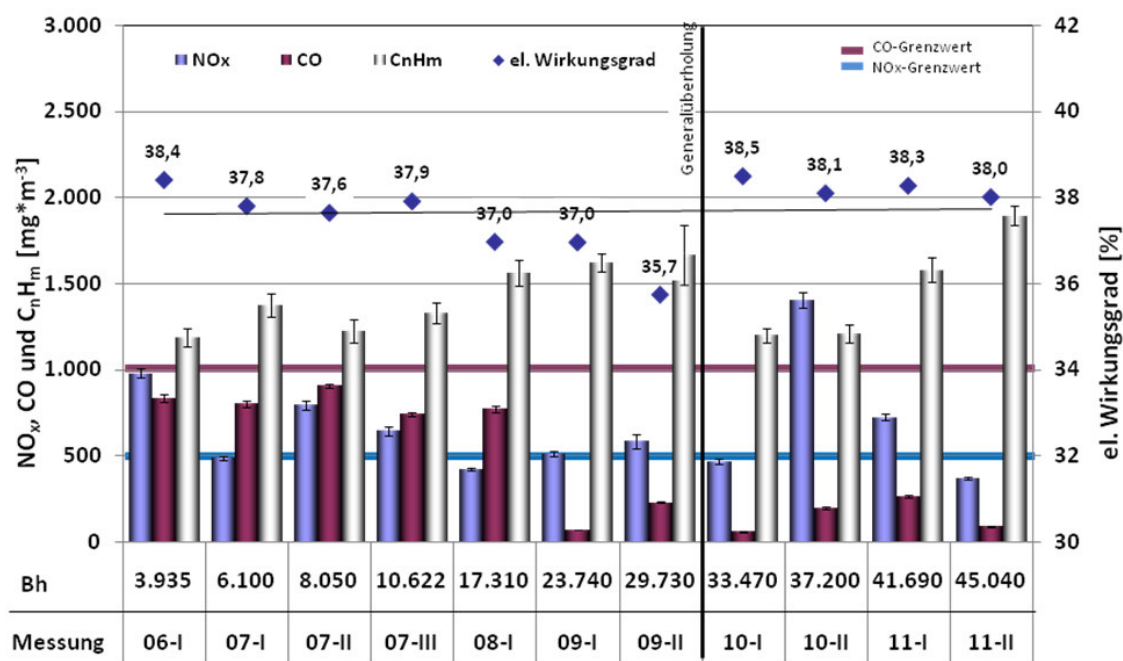


Abb. 20: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 526 kW_{el.} Gas-BHKW

Tab. 23: Mittelwerte der Messreihen (526 kW_{el} GO.)

Messung 526 kW _{el}	el. Wirkungsgrad %	el. Leistung kW	CH ₄ im Biogas %	NO _x mg·m ⁻³	Stabw	CO mg·m ⁻³	Stabw	C _n H _m mg·m ⁻³	Stabw	Abgasstrom m ³ ·h ⁻¹
28.11.2006 (06-I)	38,4	528	53,9	980	28	834	19	1185	51	2119
27.02.2007 (07-I)	37,8	529	52,1	488	11	802	21	1375	67	2119
30.05.2007 (07-II)	37,6	527	54,7	795	26	907	12	1223	70	2168
13.09.2007 (07-III)	37,9	526	53,1	644	27	742	9	1329	62	2138
10.07.2008 (08-I)	37,0	523	53,0	421	9	771	17	1561	75	2120
09.04.2009 (09-I)	37,0	522	52,6	485	15	76	1	1621	51	2275
16.12.2009 (09-II)	35,7	525	52,4	585	39	228	4	1667	173	2297
02.06.2010 (10-I)	38,5	527	51,8	470	14	59	2	1199	39	2136
10.11.2010 (10-II)	38,1	524	51,7	1403	47	198	7	1207	54	1998
18.05.2011 (11-I)	38,3	525	51,4	723	17	266	6	1580	68	2197
06.10.2011 (11-II)	38,0	522	51,0	369	7	89	1	1894	57	2149

5.1.7 BHKW 7 (40 kW_{el} ZS)

Das 40 kW_{el} Zündstrahl-BHKW wurde von 2008 bis 2010 dreimal gemessen. Es wurden an diesem BHKW jedoch jedes Mal nicht plausible Wirkungsgrade festgestellt, die bei der Betrachtung der Abgaswerte auf ein unzureichend eingestelltes BHKW hinwiesen (Abb. 21, links). Die gemessenen Kohlenwasserstoffemissionen waren bisher unübertroffen. Dies wurde dem Anlagenbetreiber auch mitgeteilt, jedoch wurden keine gravierenden Änderungen vorgenommen.

In Absprache mit dem BHKW-Hersteller wurde dieses BHKW aus dem Messprogramm herausgenommen und durch ein BHKW desselben Typs ersetzt. An diesem BHKW wurde unter Mithilfe des Herstellers 2011 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 30.500 Bh eine Messung vorgenommen (Abb. 21, rechts). Lediglich diese eine Messung (11-I) ergab mit fast 35% ein plausibles Ergebnis, so dass für den elektrischen Wirkungsgrad bei diesem BHKW nur ein Messpunkt vorliegt.

Trotz der Unterstützung des Herstellers während der Messung wurden bei diesem BHKW die höchsten CO- und C_nH_m-Werte aller Messreihen ermittelt. Auch der Zündölanteil von über 11% ist relativ hoch. Dies unterstreicht die Problematik bei BHKW kleiner Leistungsklassen, wie in Kap. 5.1.1 bereits angesprochen. Dieses BHKW ist nach wie vor im Betrieb und zeigt damit, dass auch BHKW dieser geringen Leistungsklasse höhere Standzeiten erreichen können. Die Mittelwerte der Messreihen sind in Tab. 24 zusammengefasst.

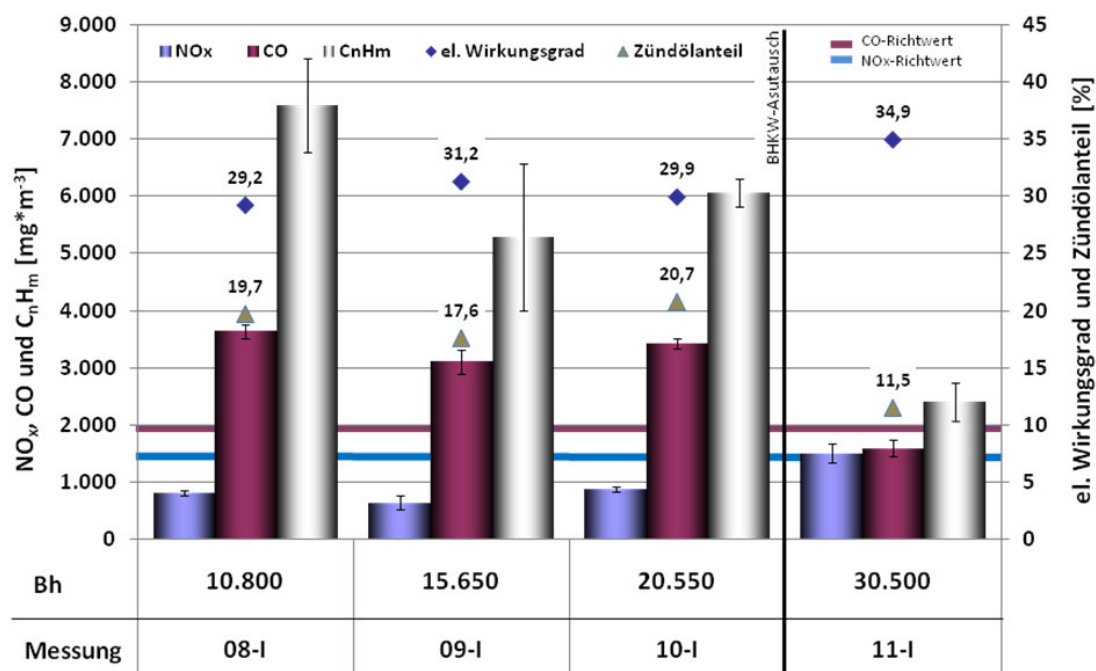


Abb. 21: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 40 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW

Tab. 24: Mittelwerte der Messreihen (40 kW_{el.} ZS)

Messung	el. Wirkungsgrad	el. Leistung	CH ₄ im Biogas	Zündöl	NO _x	Stabw	CO	Stabw	C _n H _m	Stabw	Abgasstrom
40 kW _{el.}	%	kW	%	%	mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		m ³ ·h ⁻¹
10.12.2008 (08-I)	29,2	35	48,5	19,7	804	49	3635	127	7590	814	211
11.08.2009 (09-I)	31,2	42	51,1	17,6	639	118	3107	207	5283	1295	209
14.04.2010 (10-I)	29,9	38	51,3	20,7	873	42	3424	90	6069	241	204
11.08.2011 (11-I)	34,9	41	50,7	11,5	1495	165	1589	144	2399	333	190

5.1.8 BHKW 8 (75 kW_{el.} ZS)

Beim 75 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW wurden 2009 und 2010 jeweils zwei Messungen vorgenommen. Auch hier war der Hersteller vor Ort, um die Messungen zu unterstützen und das BHKW einzustellen. Der Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades ist gleichmäßig und für diese Leistungsklasse auf einem recht hohen Niveau zwischen 36,7 und 37,7% (Abb. 22). Aufgrund der relativ geringen bisherigen Laufzeit von knapp 13.000 Bh lässt sich jedoch noch keine Aussage über den Wirkungsgradverlauf über die gesamte Standzeit treffen. Hierfür wäre ein längerer Zeitraum nötig.

Die Abgaswerte liegen alle in einem für Zündstrahl-BHKW sehr niedrigen Bereich unterhalb der Richtwerte für diese Leistungsklasse (Abb. 22). Ab 2010 wurde das BHKW mit einem Oxi-Kat ausgestattet, was die relativ geringen CO-Werte bei den Messungen 10-I und 10-II erklärt. Der Zündölanteil variiert sehr stark zwischen 3,3 und 8,3%, liegt aber auf einem normalen Niveau (Abb. 22 und Tab. 25)

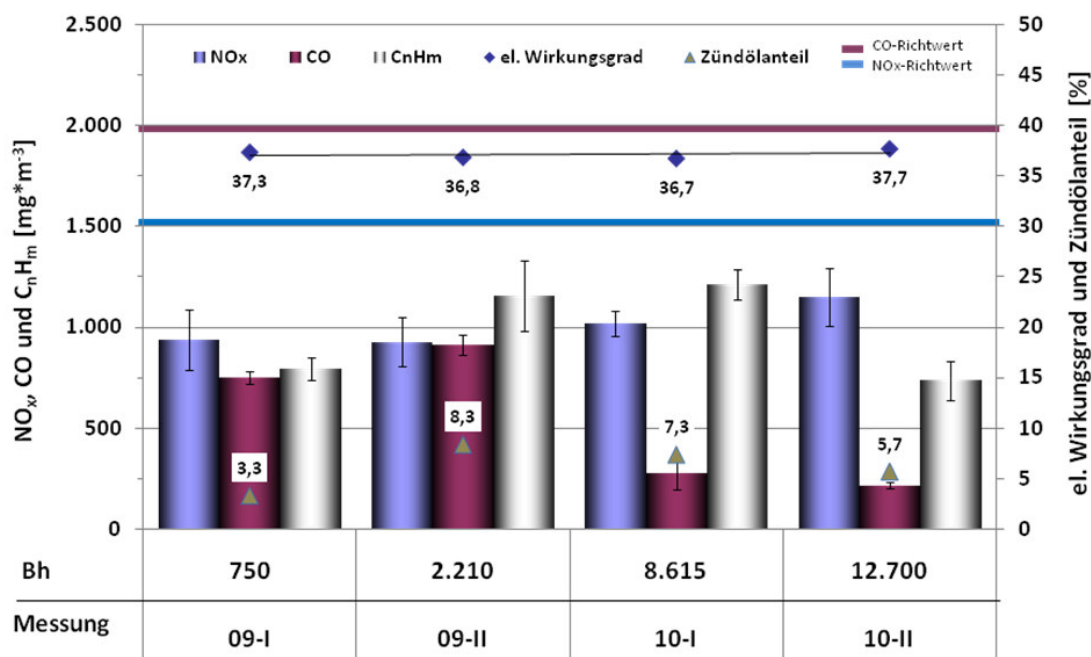


Abb. 22: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 75 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW

Tab. 25: Mittelwerte der Messreihen (75 kW_{el}. ZS)

Messung	el. Wirkungsgrad	el. Leistung	CH ₄ im Biogas	Zündöl	NO _x	Stabw	CO	Stabw	C _n H _m	Stabw	Abgasstrom
75 kW _{el}	%	kW	%	%	mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		m ³ ·h ⁻¹
21.07.2009 (09-I)	37,3	67	49,2	3,3	937	149	750	30	792	54	271
29.09.2009 (09-II)	36,8	67	48,2	8,3	926	120	913	50	1156	175	270
30.06.2010 (10-I)	36,7	62	45,1	7,3	1017	62	272	77	1211	73	264
21.12.2010 (10-II)	37,7	67	49,6	5,7	1147	142	214	15	734	97	271

5.1.9 BHKW 9 (110 kW_{el}. ZS)

Das 110 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW gehört wiederum zu den BHKW, die sich bereits seit 2006 im Messprogramm befinden. Dieses BHKW wurde Mitte 2009 nach ca. 33.000 Bh durch ein größeres BHKW ersetzt (siehe auch Kap. 4.1.4. und 4.1.9). Der elektrische Wirkungsgrad befand sich während der gesamten Standzeit auf einem, für diese Leistungsklasse recht hohen Niveau und viel im Verlauf nur leicht von 38 auf knapp unter 37% ab (Abb. 23). Die Abgasemissionen befanden sich im gesamten Messzeitraum unterhalb der Richtwerte für diese Leistungsklasse. Lediglich die C_nH_m-Konzentrationen und der Zündölanteil waren relativ hoch (Abb. 23 und Tab. 26).

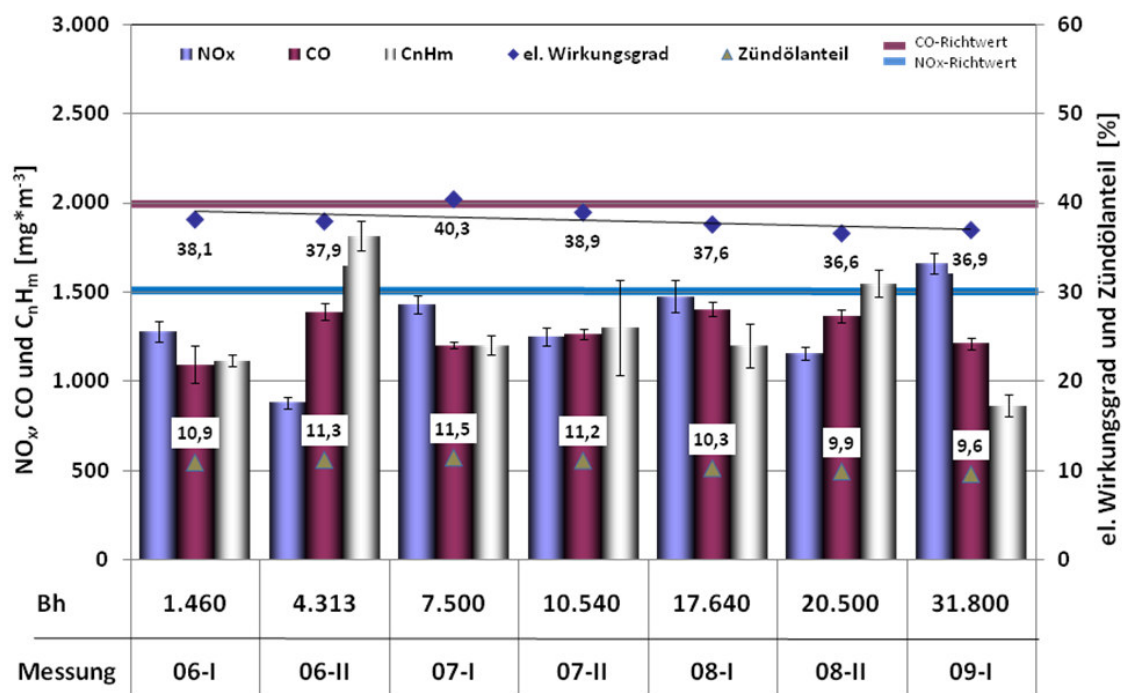


Abb. 23: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 110 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW

Tab. 26: Mittelwerte der Messreihen (110 kW_{el}. ZS)

Messung	el. Wirkungsgrad	el. Leistung	CH ₄ im Biogas	Zündöl	NO _x	Stabw	CO	Stabw	C _n H _m	Stabw	Abgasstrom
110 kW _{el}	%	kW	%	%	mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		m ³ ·h ⁻¹
23.08.2006 (06-I)	38,1	105	50,9	10,9	1280	58	1095	104	1116	31	399
19.12.2006 (06-II)	37,9	110	49,2	11,3	880	33	1390	49	1813	83	430
03.05.2007 (07-I)	40,3	109	49,4	11,5	1430	53	1203	20	1203	54	401
12.09.2007 (07-II)	38,9	111	50,8	11,2	1253	49	1265	27	1303	266	398
07.07.2008 (08-I)	37,6	109	50,0	10,3	1476	89	1404	40	1201	124	393
06.11.2008 (08-II)	36,6	112	49,8	9,9	1158	37	1366	36	1548	78	408
25.06.2009 (09-I)	36,9	115	50,7	9,6	1662	59	1211	34	864	61	398

5.1.10 BHKW 10 (250 kW_{el}. ZS)

Auch das 250 kW_{el}. Zündstrahl-BHKW wurde bereits 2006 in das Messprogramm aufgenommen. Dieses BHKW zeigte zum einen den höchsten elektrischen Wirkungsgrad über den gesamten Messzeitraum, zum anderen aber auch den höchsten Wirkungsgradverlust mit fast 5% (Abb. 24). Auch dieses BHKW ist nach wie vor im Praxiseinsatz, was zeigt, dass auch Zündstrahl-BHKW lange Standzeiten erreichen können.

Zudem liegen die Abgaswerte in den meisten Fällen unterhalb der Richtwerte für diese Leistungsklasse und unterschreiten dabei auch die Grenzwerte der TA-Luft (Abb. 24). Die

Zündölanteile lagen hierbei zu Beginn der Messungen in einem sehr niedrigen Bereich zwischen 2 und 4 %, stiegen aber im Verlauf durch altersbedingten Verschleiß auf fast 7% an (Abb. 24 und Tab. 27).

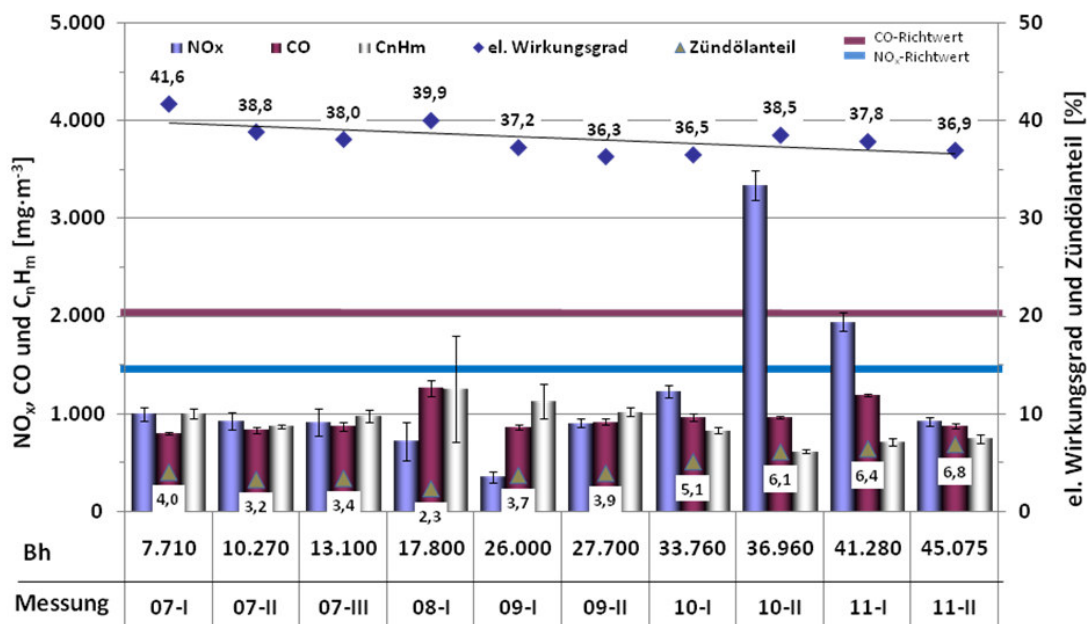


Abb. 24: Abgasemissionen und elektrischer Wirkungsgrad der einzelnen Messungen am 250 kW_{el} Zündstrahl-BHKW

Tab. 27: Mittelwerte der Messreihen (250 kW_{el} ZS)

Messung	el. Wirkungs- grad	el. Leis- tung	CH ₄ im Biogas	Zündöl	NO _x	Stabw	CO	Stabw	C _n H _m	Stabw	Abgas- strom
250 kW _{el}	%	kW	%	%	mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		mg·m ⁻³		m ³ ·h ⁻¹
30.01.2007 (07-I)	41,6	242	51,5	4,0	995	66	797	15	1000	53	809
19.06.2007 (07-II)	38,8	245	50,4	3,2	930	88	832	30	871	19	839
27.11.2007 (07-III)	38,0	249	52,3	3,4	912	144	868	43	975	67	825
08.07.2008 (08-I)	39,9	249	54,0	2,3	717	194	1264	81	1249	542	864
22.04.2009 (09-I)	37,2	247	52,1	3,7	350	60	861	28	1130	175	960
30.09.2009 (09-II)	36,3	247	52,0	3,9	902	42	915	30	1017	41	861
23.06.2010 (10-I)	36,5	248	53,5	5,1	1226	63	962	39	827	34	838
18.11.2010 (10-II)	38,5	248	55,4	6,1	3335	152	961	17	614	15	765
26.05.2011 (11-I)	37,8	241	52,7	6,4	1939	94	1195	13	709	40	792
08.11.2011 (11-II)	36,9	244	51,4	6,8	918	48	871	28	745	44	845

5.2 Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades über die Standzeit

Der Verlauf der ermittelten elektrischen Wirkungsgrade lässt sich in Abhängigkeit der geleisteten Betriebsstunden grafisch darstellen. Hierbei wird ein abnehmender Trend des elektrischen Wirkungsgrades mit zunehmender Betriebsstundenzahl deutlich. Alle BHKW, die über einen längeren Zeitraum untersucht wurden, zeigen diese Tendenz (Abb. 25).

Schwierig wird die Interpretation bei denjenigen BHKW, die nur über einen relativ kurzen Zeitraum untersucht wurden. Hierzu gehört zum einen das 75 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW, das nur knapp über 10.000 Bh im Messprogramm war (Abb. 25). Es ist nicht ausgeschlossen, dass der in diesem Fall konstante elektrische Wirkungsgrad damit in Verbindung steht, dass bei den Messungen der Hersteller mit vor Ort war und die Einstellung des BHKW angepasst hat. Zum anderen ist auch das 100 kW_{el.} (100 kW-I) Gas-BHKW bereits nach etwas über 10.000 Bh ausgetauscht worden. Hier konnte bis zu dem Zeitpunkt kein Trend beobachtet werden. Auch die Messung eines Ersatz-BHKW (100 kW-II) desselben Herstellers in derselben Leistungsklasse erbrachte keinen eindeutigen Trend, da das ältere BHKW mit über 50.000 Bh eine sehr leistungsorientierte (hoher NO_x-Gehalt im Abgas) Motoreinstellung aufwies, was sich erhöhend auf den Wirkungsgrad ausgewirkt haben könnte (Abb. 25). Das 40 kW_{el.} (40 kW-II) Zündstrahl-BHKW wurde, wie in Kap. 5.1.7 bereits beschrieben, nur einmal korrekt gemessen und kann daher nicht bewertet werden.

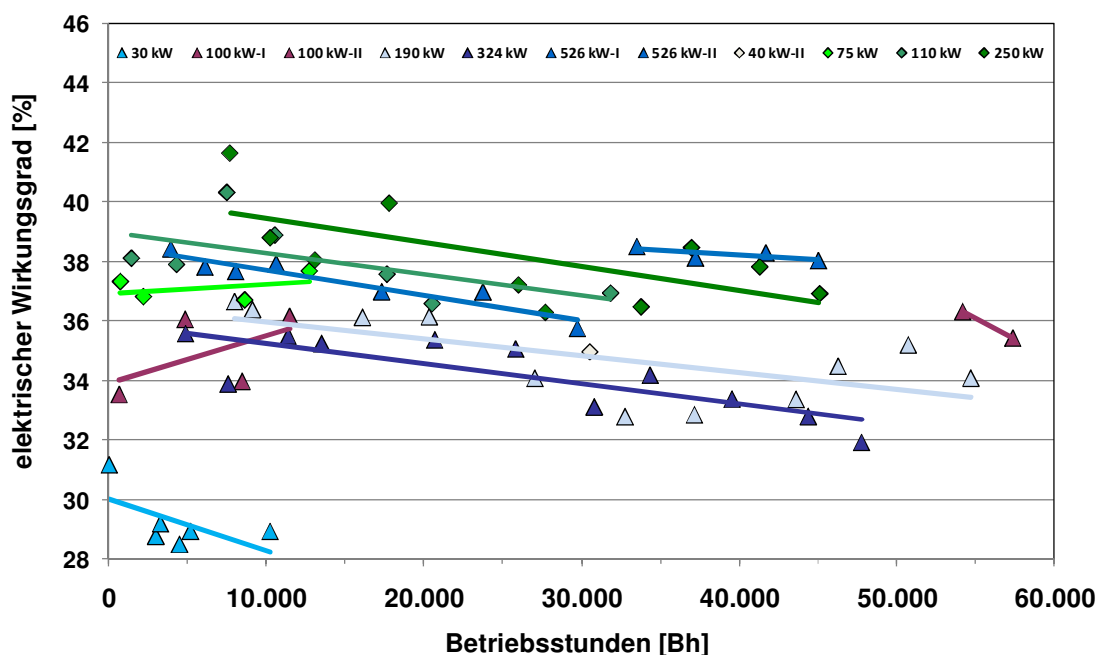


Abb. 25: Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades der BHKW in Abhängigkeit der geleisteten Betriebsstunden

Eine weitere Besonderheit stellt der Verlauf des 526 kW_{el.} Gas-BHKW dar. Hier konnte mit Hilfe einer Generalüberholung der Abwärtstrend gestoppt (526 kW-I) und eine Anhebung des elektrischen Wirkungsgrades (526 kW-II) bis zur Höhe der ersten Messung bewirkt werden. Alle anderen BHKW wiesen einen eindeutigen Abwärtstrend des elektrischen Wirkungsgrades auf (Abb. 25).

6 Diskussion

6.1 Der elektrische Wirkungsgrad im Verlauf der Standzeit und im Vergleich zu den Herstellerangaben

Für eine Betrachtung des tatsächlichen Wirkungsgradverlustes während des Messzeitraumes wird in Tab. 28 die Differenz der ersten und der letzten Messung gebildet. Um eindeutige Aussagen über die Abnahme des Wirkungsgrades treffen zu können, werden nur diejenigen BHKW mit einbezogen, die über einen längeren Zeitraum gemessen wurden. Tab. 28 zeigt den Betrag der Wirkungsgradabnahme und den dazugehörigen Beobachtungszeitraum für 6 BHKW. Bei allen anderen BHKW war der Beobachtungszeitraum zu kurz, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

Das 30 kW_{el.} Gas-BHKW wurde aufgrund der generell kurzen Standzeit in diese Auswertung mit aufgenommen. So ergibt sich für die gemessenen BHKW während des Beobachtungszeitraums von 10.200 Bh (30 kW_{el.} GO) bis 46.700 Bh (190 kW_{el.} GO) eine Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades zwischen 0,4%- (526 kW_{el.} GO) und 4,7%-Punkten (250 kW_{el.} ZS). Die geringe Abnahme beim 526 kW_{el.} GO beruht auf dem Effekt der Generalüberholung, die eine Anhebung des Wirkungsgrades auf den Anfangswert erbrachte. Ohne diese Generalüberholung hätte der elektrische Wirkungsgrad um mehr als 2,7%-Punkten abgenommen (vgl. Tab. 23 und Abb. 20).

Tab. 28: Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades über den gesamten Messzeitraum

BHKW	el. Wirkungsgrad erste Messung [%]	el. Wirkungsgrad letzte Messung [%]	Beobachtungs- zeitraum [Bh]	Abnahme des el. Wirkungsgrades [%-Punkte]
30 kW GO	31,2	28,9	10.200	- 2,3
190 kW GO	36,7	34,1	46.715	- 2,6
324 kW GO	35,6	31,9	42.840	- 3,7
526 kW GO	38,4	38,0	41.105	- 0,4
110 kW ZS	38,1	36,9	30.340	- 1,2
250 kW ZS	41,6	36,9	37.365	- 4,7

Die von den BHKW-Herstellern angegebenen elektrischen Wirkungsgrade beziehen sich nicht auf einen bestimmten Zeitraum, sondern spiegeln lediglich den Wirkungsgrad wider, der auf einem Motorprüfstand an einem neuen BHKW nach den Vorgaben der DIN 3046-1 ermittelt wurde. Hierbei wird oft die in der DIN erlaubte Grenzabweichung von 5% beim Kraftstoffverbrauch in die Berechnung mit einbezogen, was den elektrischen Wirkungsgrad positiv beeinflusst. Stellt man die im Projekt über den Messzeitraum ermittelten durchschnittlichen Wirkungsgrade den Herstellerangaben gegenüber, so lässt sich ein mehr oder weniger deutlicher Unterschied erkennen (Tab. 29).

Die absolute Differenz zwischen den gemessenen Werten und den Herstellerangaben beträgt je nach BHKW zwischen 1,9 (110 kW_{el.} ZS) und 5,0%-Punkten (250 kW_{el.} ZS). Diese beiden Werte stellen jedoch eher die Extreme dar. Die anderen Differenzen bewegen sich im Bereich zwischen 2,9 und 3,8%-Punkten. Es muss hierbei noch darauf hingewiesen werden, dass die meisten der hier dargestellten BHKW noch im Betrieb sind und deshalb eine endgültige Aussage nur für das 324 kW_{el.} Gas-BHKW (3,5%) und das 110 kW_{el.}

Zündstrahl-BHKW (1,9%) getroffen werden kann, da nur diese BHKW nach einem längeren Beobachtungszeitraum bereits durch ein neues BHKW ausgetauscht wurden (Tab. 29).

Tab. 29: Durchschnittlicher elektrischer Wirkungsgrad über die Betriebsstundenanzahl und Differenz zu den vom Hersteller angegebenen Werten

BHKW	Betriebsstundenanzahl [Bh]	durchschnittlicher el. Wirkungsgrad [%]	Herstellerangabe	Differenz
30 kW GO ¹	10.250	29,2	k.A.	k.A.
100 kW GO	57.350	35,1	38,0	2,9
190 kW GO	54.700	34,6	38,4	3,8
324 kW GO	47.750	34,2	37,7	3,5
526 kW GO	45.050	37,4	40,4	3,0
40 kW ZS ²	30.500	34,9	37,0	2,1
75 kW ZS	12.700	37,0	40,0	3,0
110kW ZS	33.000	37,8	39,7	1,9
250 kW ZS	45.050	38,0	43,0	5,0

Tendenziell steigt der elektrische Wirkungsgrad mit Zunahme der BHKW-Leistung an. Dies lässt sich anhand der von den Herstellern angegebenen Wirkungsgrade in Abb. 26 sehr gut darstellen. Trägt man die im Projekt ermittelten durchschnittlichen elektrischen Wirkungsgrade auf, so zeigt sich dieselbe Tendenz einer Wirkungsgraderhöhung mit Zunahme der elektrischen Leistung, jedoch auf einem niedrigeren Niveau (Abb. 26). Sehr gut zu sehen ist dies bei den Gas-BHKW, die tendenziell ca. 3,0 bis 3,5%-Punkte unterhalb der Herstellerangaben liegen. Bei den Zündstrahl-BHKW ist die Trendkurve nicht ganz parallel zu den Herstellerangaben. Dies ist zum einen dadurch begründet, dass im kleinen Bereich nur eine Messung (40 kW_{el.}) vorgenommen wurde und zum anderen, dass bei diesen Messungen (40 kW_{el.} und 75 kW_{el.}) der Hersteller bei den Messungen zugegen war und eine BHKW-Einstellung vorgenommen hat. Außerdem verzerrt der hohe Wirkungsgradverlust des 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW die Trendkurve (Abb. 26).

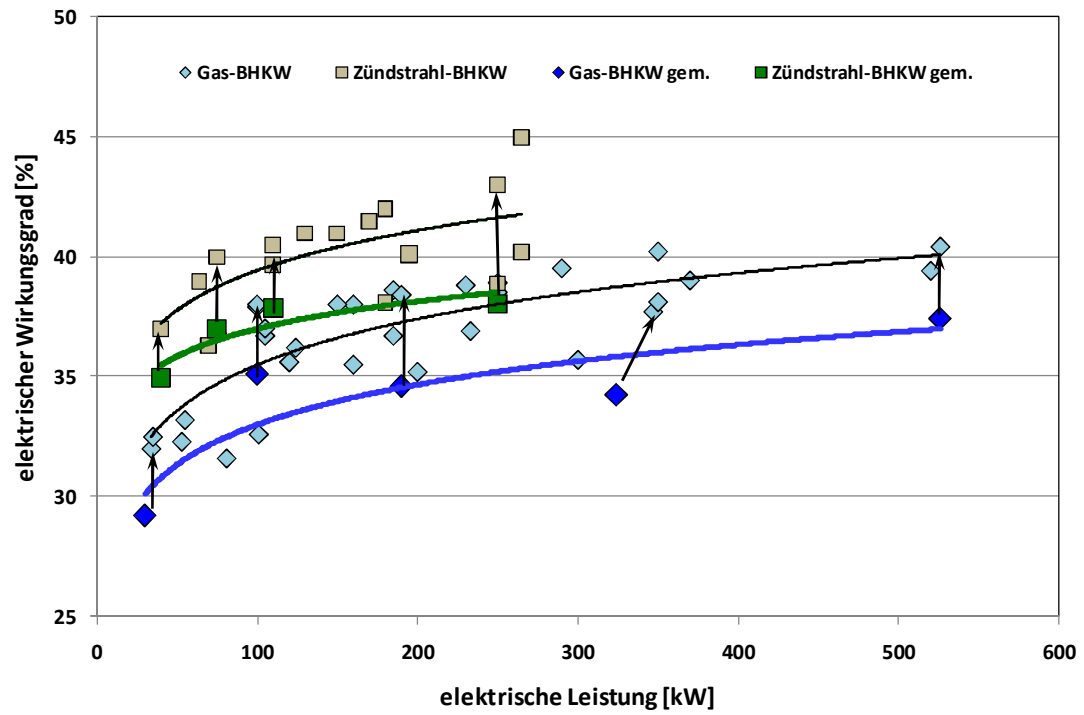


Abb. 26: Vergleich der mittleren gemessenen elektrischen Wirkungsgrade mit Herstellerangaben

6.2 Einflussfaktoren auf den elektrischen Wirkungsgrad

Es gibt neben der Standzeit des BHKW noch eine Reihe weiterer Faktoren, die die Höhe des elektrischen Wirkungsgrades beeinflussen und somit die Wirtschaftlichkeit des Anlagenbetriebs entscheidend beeinflussen können. Im Folgenden werden die wichtigsten Faktoren behandelt und die entsprechenden Ergebnisse dieses Projektes dargestellt.

6.2.1 Motoreinstellung

Einen der wesentlichen Einflussfaktoren stellt wie bereits im Kap. 2.2 beschrieben die Motoreinstellung dar. Auf Grund der Vorgabe der TA-Luft bezüglich des NO_x -Grenzwertes von $500 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ erfolgt die Einstellung des BHKW in Richtung minimierter NO_x -Emissionen, da gerade im Bereich der energetisch optimalen Verbrennung besonders viel NO_x gebildet wird und außermotorisch nicht wirtschaftlich reduziert werden kann.

Welche Auswirkung diese Einstellung auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad hat, ist in Abb. 27 anhand von Messergebnissen für das $526 \text{ kW}_{\text{el}}$ Gas-BHKW dargestellt. Eine leistungsoptimierte Einstellung bedingte hier eine NO_x -Konzentration im Abgas, die um fast das Doppelte über dem Grenzwert der TA-Luft lag. Nachdem der Motor auf geringen NO_x -Ausstoß optimiert wurde, konnte der Grenzwert unterschritten werden, wobei sich der CO-Gehalt im Abgas nur minimal änderte.

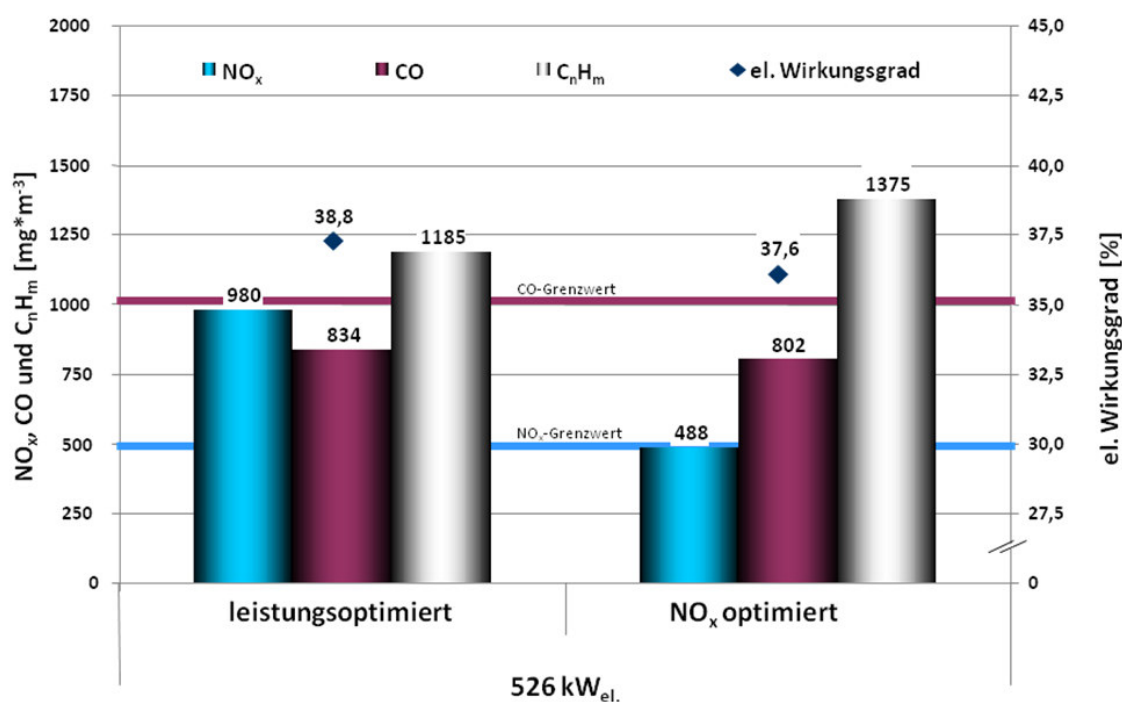


Abb. 27: Auswirkung der Motoreinstellung auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad an einem $526 \text{ kW}_{\text{el}}$ Gas-BHKW

Allerdings hat die mit dieser Einstellung verbundene Erhöhung des Luftüberschusses im Verbrennungsgemisch zur Folge, dass die laminare Flammgeschwindigkeit bei der Verbrennung noch weiter abgesenkt wird, so dass die kurze Zeit während eines Kolbenhubes nicht mehr ausreicht, alle energetischen Bestandteile des Gemisches ausreichend zu oxidieren. Damit erhöht sich der Ausstoß an Kohlenwasserstoffen, vor allem Methan, geringfügig. Im untersuchten Beispiel stieg dieser um 16% und der elektrische Wirkungsgrad

ging in Folge der weniger effizienten Verbrennung um ca. 1%-Punkt zurück (Abb. 27). In der Praxis nimmt der Anlagenbetreiber diesen Wirkungsgradverlust nicht wahr, da das BHKW nach wie vor die volle Leistung erbringt. Allerdings benötigt der Motor zum Erreichen dieser Leistung mehr Gas, d.h. es muss mehr Substrat zur Verfügung gestellt werden, um den Mehrverbrauch zu kompensieren. Welche wirtschaftlichen Auswirkungen dies hat, soll an einem Beispiel verdeutlicht werden:

BHKW:	526 kW _{el.} Gas-BHKW
Normgasverbrauch bei $\eta = 38,6 \%$:	260 m _N ³ ·h ⁻¹
Normgasverbrauch bei $\eta = 37,6 \%$:	267 m _N ³ ·h ⁻¹
=> Gasmehrverbrauch:	7 m_N³·h⁻¹
Betriebsstunden (Jahr):	8.500 Bh·a ⁻¹
=> Gasmehrverbrauch (Jahr):	59.500 m_N³·a⁻¹
Methangehalt im Biogas:	52%
=> Methanmehrverbrauch (Jahr):	30.940 m_N³CH₄·a⁻¹
Maisertrag:	ca. 50 t·ha ⁻¹
Methanertrag pro ha:	ca. 5.000 m ³ CH ₄ ·ha ⁻¹ bei 100 m ³ CH ₄ ·t ⁻¹
=> Um 1%-Punkt Wirkungsgradverlust auszugleichen, muss der Anlagenbetreiber ca. 6 ha mehr Mais pro Jahr anbauen.	

Aufwand und Kosten für den Mehranbau hat der Anlagenbetreiber zu tragen. Durch die schlechtere Ausnutzung des Biogases entsteht in diesem Beispiel ein Verlust aus dem entgangenen Nutzen, der mit ca. 20.000 €·a⁻¹ zu veranschlagen ist.

6.2.2 Teillast

Eine Masterarbeit (Jin 2010), die am Institut für Landtechnik und Tierhaltung im Rahmen dieses Projekts durchgeführt wurde, zeigte, dass nicht nur die Motoreinstellung Auswirkungen auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad hat. Vor allem der Betrieb bei Teillast kann diese Werte erheblich verschlechtern. Während der Messungen für diese Masterarbeit wurde auch die Formaldehydkonzentration im Abgas gemessen.

Abb. 28 und Abb. 29 zeigen die Ergebnisse für ein 250 kW_{el.} und ein 75 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW. Im ersten Fall (Abb. 28) wurde das BHKW bei 80% Last betrieben. Wie in Kap. 2.2 bereits beschrieben war deutlich zu erkennen, dass die NO_x optimierte Einstellung gegenüber der leistungsoptimierten Betriebsweise geringere NO_x-Werte aufweist. Auch der elektrische Wirkungsgrad ging um 1,5%-Punkte zurück. Beim Teillastbetrieb von 80% der maximalen Leistung änderten sich diese Werte nicht wesentlich.

Formaldehyd (HCHO) ist ein Aldehyd und somit streng genommen nicht Bestandteil der Kohlenwasserstoffe. Bei der Messung mittels Flammenionisationsdetektor (FID) wird die Konzentration dieses Aldehyds jedoch mit erfasst und geht somit in die C_nH_m-Konzentration mit ein. Zur exakten Bestimmung des Formaldehydgehaltes im Abgas wurde das DNPH-Verfahren nach VDI 3862 angewendet. Der Gehalt an Formaldehyd im Abgas stieg mit der gemessenen Konzentration an Kohlenwasserstoffen bei der NO_x optimierten Einstellung ebenfalls an, bei Teillastbetrieb von 80% hingegen nur in geringem Maße (Abb. 28). Es konnte jedoch eine deutliche Zunahme des Zündölverbrauchs festgestellt werden. Da das hier untersuchte BHKW über keinen Oxi-Kat verfügte, lagen die

Formaldehydwerte bei allen Messungen deutlich über dem Grenzwert der TA-Luft von $60 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Beim zweiten hier vorgestellten BHKW wurden dieselben Messungen vorgenommen. In diesem Fall wurde jedoch ein Teillastbetrieb von 70% der Leistung vorgenommen. Die Auswirkungen der leistungsoptimierten und NO_x optimierten Einstellung blieben im Erwartungsbereich (Abb. 29).

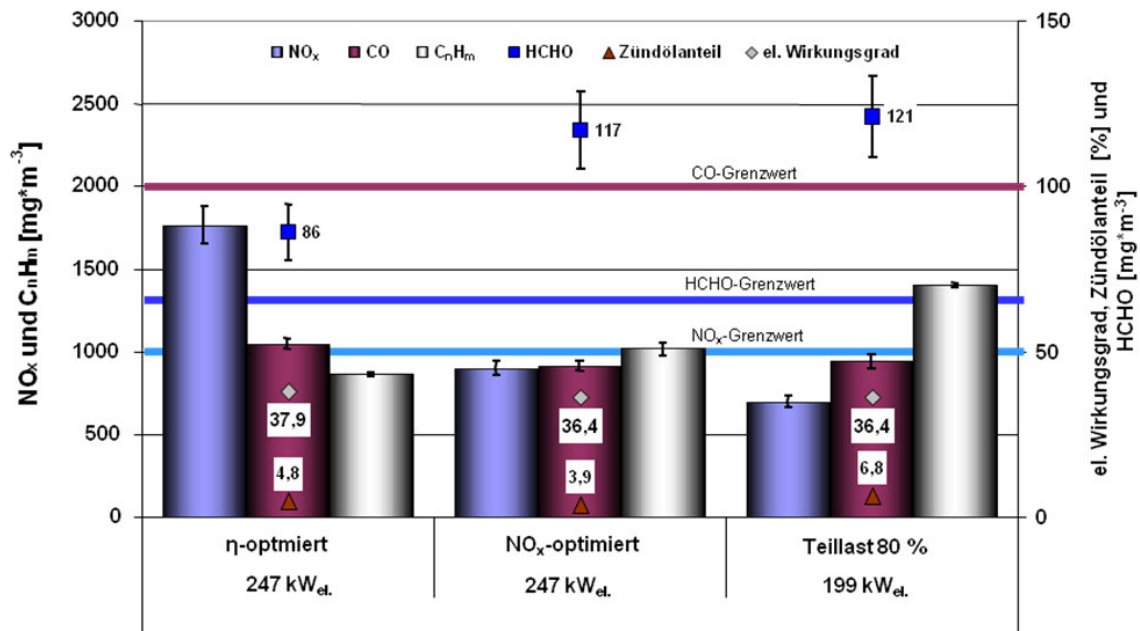


Abb. 28: Auswirkungen der Motoreinstellungen (η -optimiert, NO_x -optimiert und Teillast) auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad eines 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW

Da dieses BHKW wegen einer Einspeisebeschränkung bereits auf 67 kW_{el.} gedrosselt war, konnte beim elektrischen Wirkungsgrad keine Veränderung gemessen werden. Allerdings bewirkte der Teillastbetrieb hier um ein mehrfaches höhere Emissionen an C_nH_m- und Formaldehyd. Auch der CO-Wert überschritt den Grenzwert der TA-Luft. Neben einer Verdoppelung des Zündölverbrauchs wurde auch ein Rückgang des elektrischen Wirkungsgrades um fast 4%-Punkte beobachtet (Abb. 29).

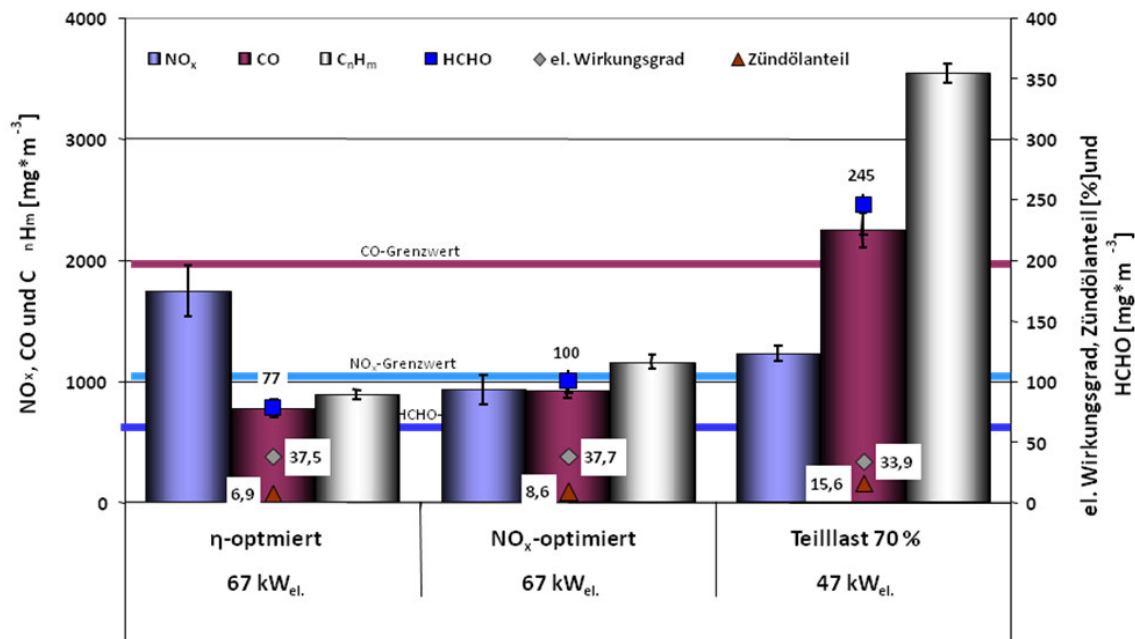


Abb. 29: Auswirkungen der Motoreinstellungen (n-optimiert, NO_x-optimiert und Teillast) auf die Emissionswerte und den elektrischen Wirkungsgrad eines 75 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW

6.2.3 BHKW-Verfügbarkeit

Die umfangreichen Messungen erlauben es auch, eine Aussage über die BHKW-Verfügbarkeit während eines gewissen Zeitraumes zu treffen. Diese Aussage bezieht sich darauf, ob das BHKW überhaupt in Betrieb war oder nicht und beinhaltet keine Angaben über Vollast- oder Teillastbetrieb (nicht: theoretische Volllaststunden). Bei den hier untersuchten BHKW wurden Zeiträume zwischen 10.000 und 40.000 Bh ausgewertet und die prozentuale Laufzeit der BHKW im Vergleich zum theoretisch Möglichen ermittelt (Abb. 30 und Tab. 30). Die Spannweite der Ergebnisse reicht von 92,9 bis 99,2%. Der sehr hohe Wert von 99,2% wurde allerdings nur erreicht, weil es sich hier um ein neues BHKW handelte und der Messzeitraum sich nur auf die ersten 10.000 Bh bezog. In diesem Zeitraum waren noch keine nennenswerten Reparaturmaßnahmen erforderlich. Für das 190 kW_{el.} Gas-BHKW wurde über einen Zeitraum von 40.000 Bh eine sehr hohe Verfügbarkeit von 98,8% ermittelt (Abb. 30). Dies entspricht 8.655 von 8.760 möglichen Jahresstunden.

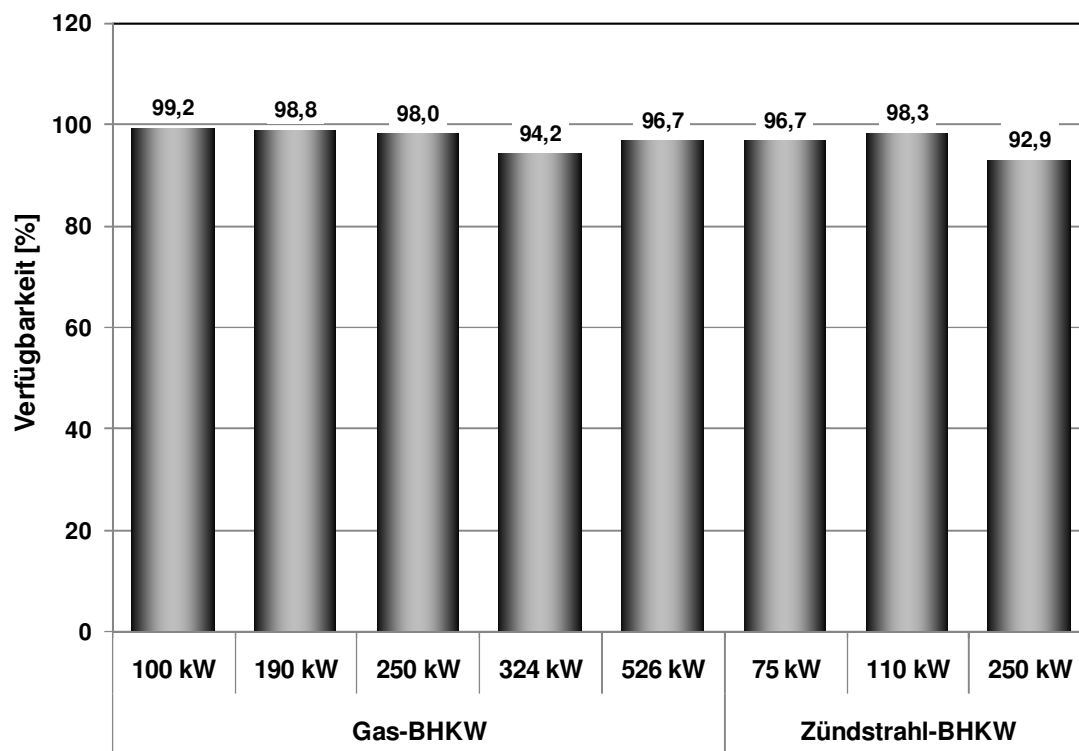


Abb. 30: Durchschnittliche Verfügbarkeit der untersuchten BHKW während des jeweiligen Beobachtungszeitraums

Die geringste Verfügbarkeit erreichte mit 92,9% (8.138 Bh) das 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW. Dieser Wert erscheint jedoch immer noch akzeptabel, wenn man bedenkt, dass in Anlagenkalkulationen teilweise von 8.000 Bh pro Jahr ausgegangen wird. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen wurden mit einem Durchschnittswert von 8.490 Bh pro Jahr deutlich erhöhte Verfügbarkeiten der BHKW festgestellt (FNR 2009).

Tab. 30: Verfügbarkeit der untersuchten BHKW während des Messzeitraums

BHKW	Beobachtungszeitraum [Bh]	BHKW-Verfügbarkeit [%]
100 kW GO	10.000	99,2
190 kW GO	40.000	98,8
250 kW GO	10.000	98,0
324 kW GO	40.000	94,2
526 kW GO	40.000	96,7
75 kW ZS	10.000	96,7
110kW ZS	20.000	98,3
250 kW ZS	30.000	92,9

6.3 Emissionswerte

Die Emissionswerte, die in diesem Projekt gemessen wurden, werden im Folgenden miteinander verglichen und bewertet. Die Ergebnisse aller durchgeführten Messungen werden für jedes BHKW anhand von Box-Plots dargestellt.

6.3.1 Stickoxide (NO_x)

Es hat sich in diesem Projekt gezeigt, dass vor allem die Gas-BHKW in der Praxis die NO_x -Grenz- bzw. Richtwerte nicht einhalten. Die Überschreitungen reichen vom Zweifachen bis zum Sechsfachen, im Extremfall auch bis zum Zwölffachen des vorgeschriebenen Wertes (Abb. 31). Nur das 526 kW_{el.} Gas-BHKW lag bei den meisten Messungen im Bereich des Grenzwertes von 500 mg·m⁻³. Eine dauerhafte Einhaltung des Grenzwertes im Praxisbetrieb konnte bei keinem hier untersuchten Gas-BHKW nachgewiesen werden. Ein Grund hierfür liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit in dem Bestreben, eine möglichst hohe Effizienz bei der Verstromung zu erreichen und der damit verbundenen Wahl einer eher leistungsorientierten Einstellung des BHKW. Die hohen Grenzwertüberschreitungen traten vermehrt bei einer hohen Betriebsstundenanzahl auf, womit auch ein höherer Verschleiß als Ursache in Frage kommt.

Die Zündstrahl-BHKW liegen im Bereich des Richtwertes von 1.500 mg·m⁻³ gemäß Bio-gashandbuch Bayern. Teilweise wird auch der Grenzwert der TA-Luft von 1.000 mg·m⁻³ unterschritten. Aber auch hier wurde in einzelnen Messungen das Dreifache des Grenzwertes erreicht (Abb. 31). Die günstigen NO_x -Werte des 75 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW waren das Ergebnis einer Einstellung des Motors durch den Hersteller.

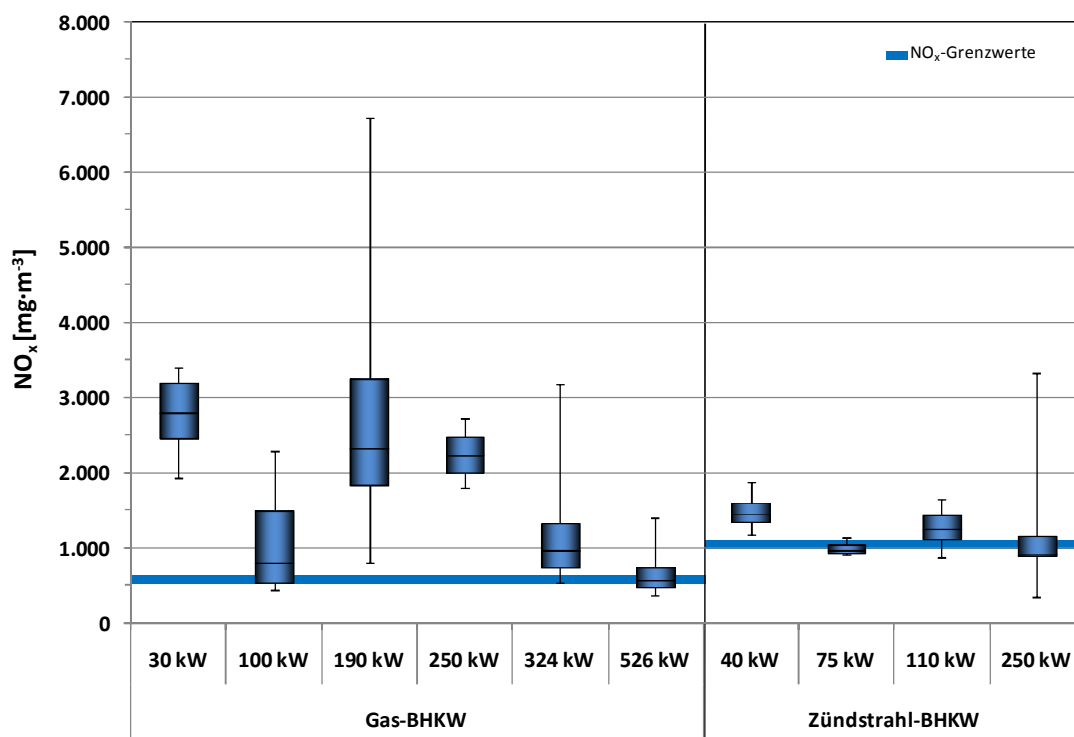


Abb. 31: Box-Plots der NO_x -Konzentrationen [mg·m⁻³] im Abgas der untersuchten BHKW (Werte aus allen Messreihen)

Um einen Vergleich zwischen den BHKW in Bezug auf die Höhe der NO_x -Emissionen in Abhängigkeit der Leistung anstellen zu können, werden die gemessenen Emissionen auf die produzierte kWh umgerechnet. Hieraus ergeben sich die in Abb. 32 dargestellten NO_x -Emissionen in $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$. Die Mittelwerte sind in Tab. 31 aufgeführt. Bei diesem Vergleich zeigt sich, dass die 100, 324 und 526 kW_{el} Gas-BHKW, sowie die 75, 110 und 250 kW_{el} Zündstrahl-BHKW einen NO_x -Ausstoß im Bereich von $\leq 5 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ aufweisen, während die anderen BHKW bei bis zu $10 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ und darüber liegen (Abb. 32).

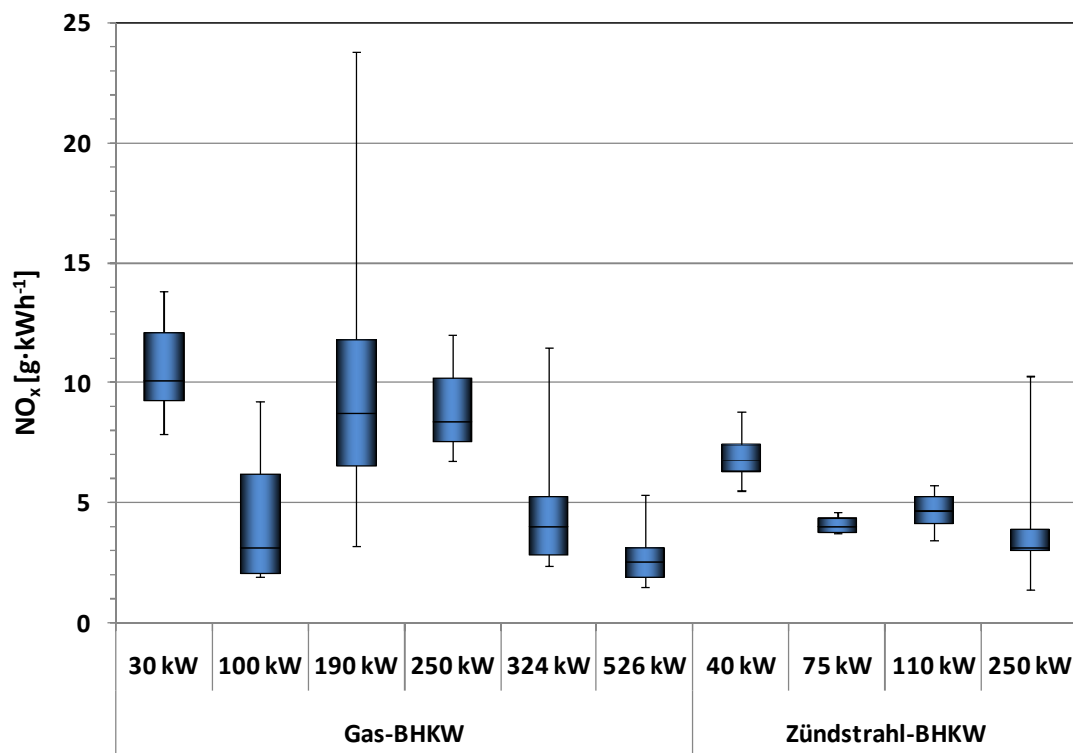


Abb. 32: Box-Plots der NO_x -Konzentrationen [$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$] pro produzierte Kilowattstunde im Abgas der untersuchten BHKW

Tab. 31: Mittlere NO_x -Konzentrationen der untersuchten BHKW

BHKW	NO_x		
	$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}_{\text{prod.}}$	$\text{g}\cdot\text{h}^{-1}$
30 kW GO	2.781	10,6	300
100 kW GO	1.093	4,4	436
190 kW GO	2.762	10,1	1.887
250 kW GO	2.258	9,1	2.204
324 kW GO	1.308	5,0	1.555
526 kW GO	672	2,7	1.436
40 kW ZS	1.495	7,0	284
75 kW ZS	1.007	4,1	271
110kW ZS	1.270	4,7	515
250 kW ZS	1.222	4,1	996

6.3.2 Kohlenmonoxid (CO)

Bei den Kohlenmonoxidemissionen schneiden für beide Motortypen die kleinen Aggregate (30 und 40 kW_{el.}) am Schlechtesten ab (Abb. 33). Der Grenz- bzw. Richtwert für CO wird allerdings nur vom 30 kW_{el.} Gas-BHKW überschritten. Die Einhaltung der Grenzwerte für diese Abgaskomponente stellte mit einer Ausnahme (30 kW_{el.} Gas-Motor) kein Problem dar.

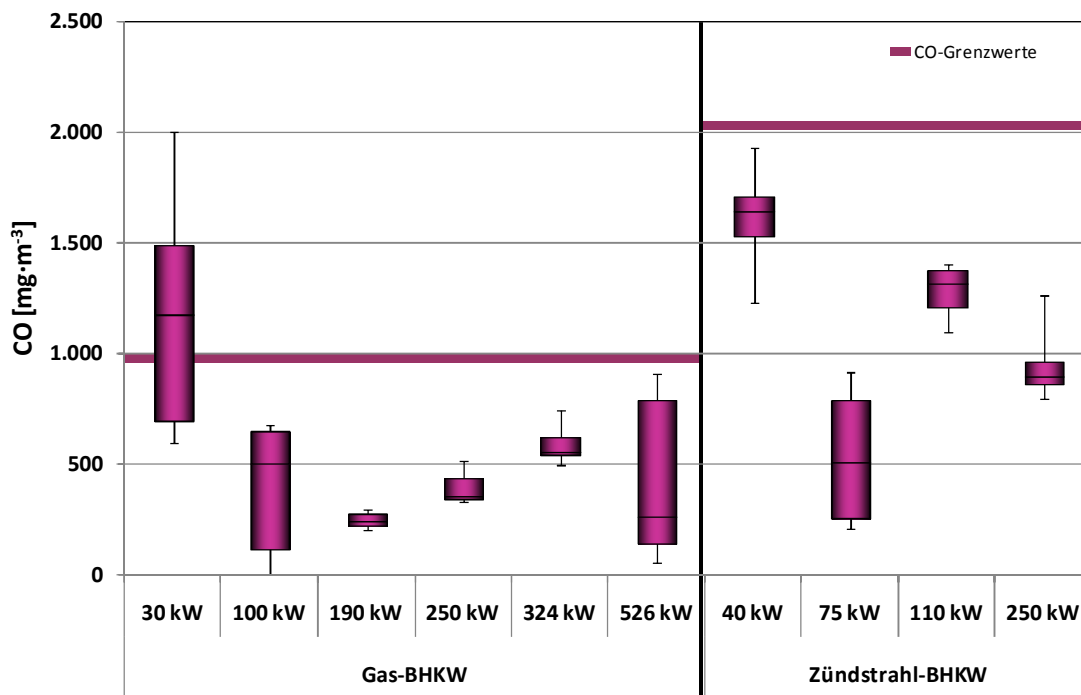


Abb. 33: Box-Plots der CO-Konzentrationen [$\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$] im Abgas der untersuchten BHKW

Die meisten BHKW zeigen bei den Emissionsfrachten für CO einen Wert zwischen 1 und 3 $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ (Abb. 34). Vor allem die kleinen BHKW (30, 40 und 110 kW_{el.}) weisen hier höhere Werte oberhalb von 3 $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ bis zu 8 $\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ auf (Abb. 34). Tab. 32 zeigt die mittleren Konzentrationen bzw. Frachten an CO für die untersuchten BHKW.

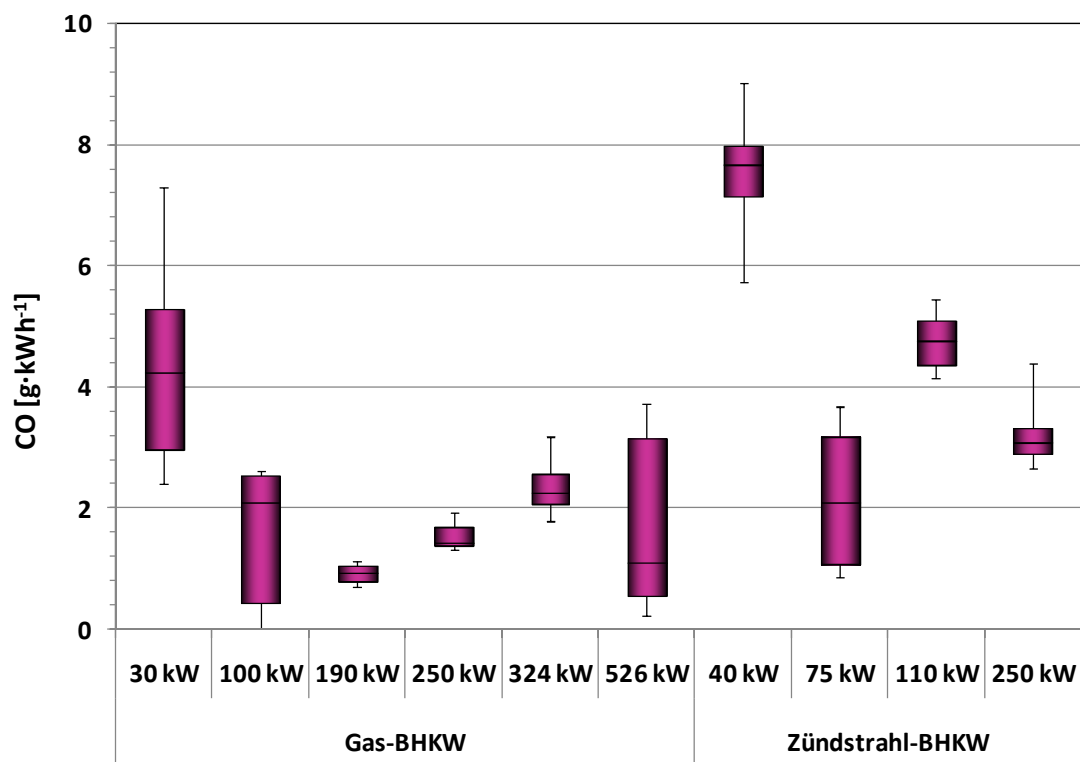


Abb. 34: Box-Plots der CO-Konzentrationen [g·kWh⁻¹] pro produzierte Kilowattstunde im Abgas der untersuchten BHKW

Tab. 32: Mittlere CO-Konzentrationen der untersuchten BHKW

BHKW	CO		
	mg·m ⁻³	g·kWh ⁻¹ _{prod.}	g·h ⁻¹
30 kW GO ¹	1.180	4,4	126
100 kW GO	394	1,6	153
190 kW GO	250	0,9	174
250 kW GO	400	1,6	382
324 kW GO	588	2,3	717
526 kW GO	452	1,8	967
40 kW ZS ²	1.589	7,4	302
75 kW ZS	537	2,2	145
110kW ZS	1.288	4,8	526
250 kW ZS	952	3,2	799

6.3.3 Kohlenwasserstoffe (C_nH_m)

Die Höhe der Kohlenwasserstoffemissionen hängt zum einen von der Güte der Verbrennung im Motor und zum anderen von der Brennraumgeometrie sowie den Ventilüberschneidungen ab. Die Mechanismen der Entstehung wurden bereits im Kap. 2.2 behandelt. Für die Emissionen an Kohlenwasserstoffen gibt es keinen verbindlichen Grenzwert. Da

es sich bei den hier gemessenen Kohlenwasserstoffen hauptsächlich um unverbranntes Methan aus dem Verbrennungsprozess handelt, sollte jedoch in Hinblick auf die Klimawirksamkeit (CH_4 ist 25mal klimawirksamer als CO_2) darauf geachtet werden, die Emissionen so gering wie möglich zu halten.

Abb. 35 zeigt für die 100, 190, 250 und 324 kW_{el} Gas-BHKW sehr geringe Werte für die Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas von unter $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Die Zündstrahl-BHKW mit 75, 110 und 250 kW_{el} weisen dagegen Werte im Bereich von 800 bis $1.500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ auf. Ursache hierfür ist die hohe Verdichtung bei der Verbrennung, die einerseits höhere elektrische Wirkungsgrade möglich macht, andererseits aber einen höheren Methanschleupf bedingt. Dies ist auch der Grund, warum das 526 kW_{el} Gas-BHKW ähnlich hohe Werte aufweist wie die Zündstrahl-BHKW (Abb. 35). Hier wurde durch eine höhere Verdichtung im Brennraum der elektrische Wirkungsgrad gesteigert, was eben die gleichzeitige Erhöhung der Kohlenwasserstoffemissionen zu Folge hat.

Zwei weitere Ausnahmen bilden auch hier wieder die BHKW mit der geringsten Leistung. Das 30 kW_{el} Gas-BHKW zeigte für ein Gas-BHKW relativ hohe C_nH_m -Werte und das 40 kW_{el} Zündstrahl-BHKW wies mit bis zu $3.000 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ die mit Abstand höchste C_nH_m -Konzentration der gesamten Messreihe auf (Abb. 35).

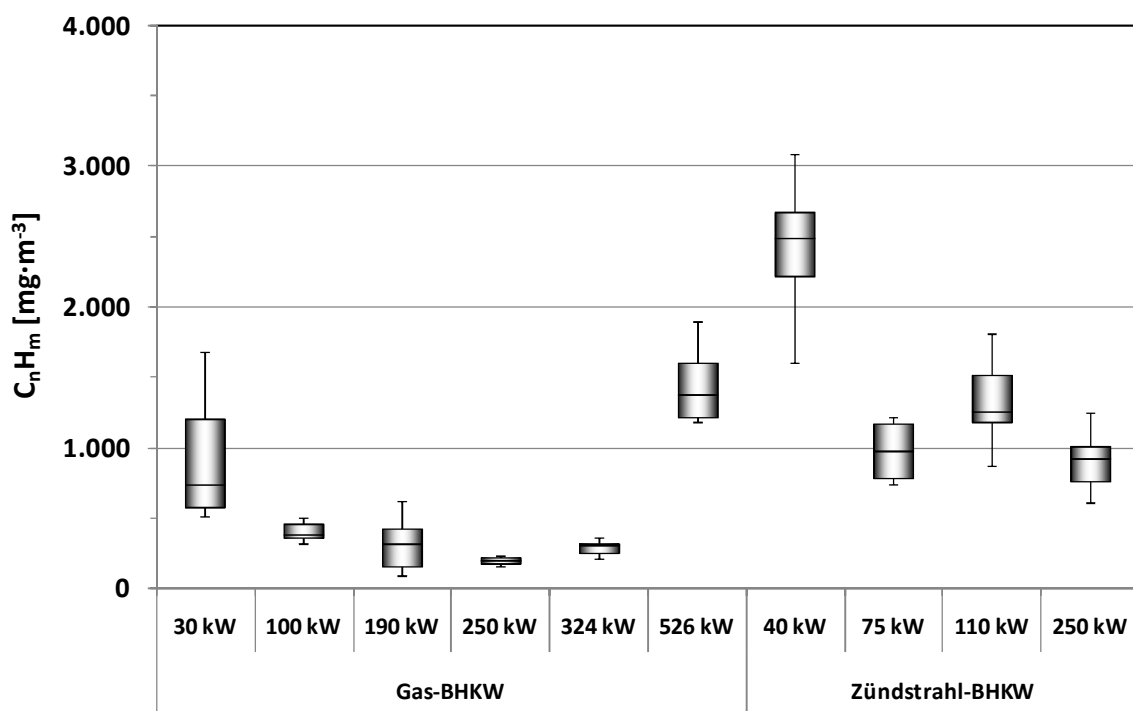


Abb. 35: Box-Plots der C_nH_m -Konzentrationen $[\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}]$ im Abgas der untersuchten BHKW

Die Betrachtung der Schadstofffrachten im Bezug auf die produzierte kWh verdeutlicht dieses Bild. Die normalen Gas-BHKW liegen im Allgemeinen unter $2 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$, während sich die Zündstrahl-BHKW und das höher verdichtete Gas-BHKW im Bereich von 3 bis $8 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$ bewegen (Abb. 36). Das 40 kW_{el} Zündstrahl-BHKW kommt hier auf Werte zwischen 8 und $14 \text{ g}\cdot\text{kWh}^{-1}$. Die mittleren C_nH_m -Konzentrationen der untersuchten BHKW sind in Tab. 33 aufgeführt.

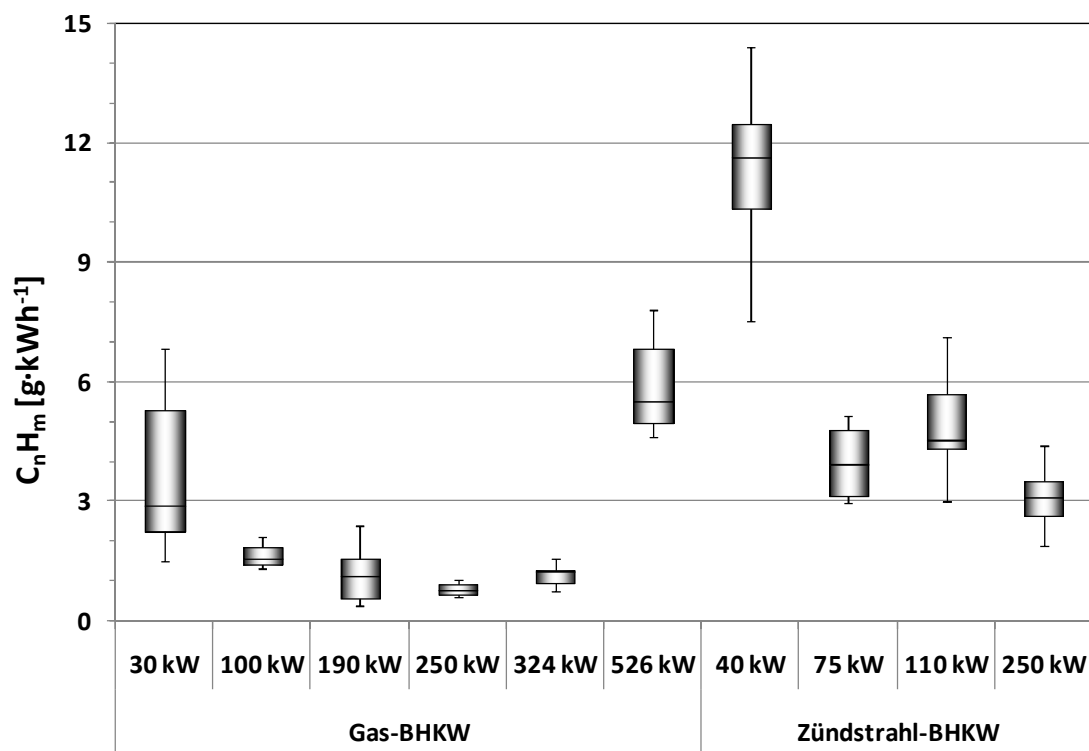


Abb. 36: Box-Plots der C_nH_m -Konzentrationen [$g \cdot kWh^{-1}$] im Abgas der untersuchten BHKW je produzierte Kilowattstunde Elektrizität

Tab. 33: Mittlere C_nH_m -Konzentrationen der untersuchten BHKW

BHKW	C_nH_m		
	$mg \cdot m^{-3}$	$g \cdot kWh_{prod.}^{-1}$	$g \cdot h^{-1}$
30 kW GO	925	3,7	102
100 kW GO	405	1,6	159
190 kW GO	318	1,2	219
250 kW GO	197	0,8	192
324 kW GO	287	1,1	351
526 kW GO	1.440	5,9	3.114
40 kW ZS	2.399	11,2	455
75 kW ZS	973	4,0	262
110kW ZS	1.320	4,9	542
250 kW ZS	914	3,1	774

6.3.3.1 CO₂-Äquivalentemissionen

Um eine Einschätzung zu erhalten, wie hoch die Emissionen an Kohlenwasserstoffen (hier vor allem Methan) sind, ist eine Umrechnung der Werte in CO₂-Äquivalente nötig. Da es sich hier fast ausschließlich um unverbranntes Methan handelt, werden die Werte mit dem Faktor für das Treibhausgaspotenzial im Bezug auf CO₂ multipliziert. Für Methan wurde ein Faktor von 25 verwendet (IPCC/TEAP 2005).

Abb. 37 zeigt diese CO₂-Äquivalentemissionen in g·kWh⁻¹_{produziert}. Es handelt sich hierbei um die Mittelwerte und Standardabweichungen der jeweiligen Messreihen. Da beim 40 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW nur eine Messung realisiert werden konnte, entfällt hier die Angabe einer Standardabweichung.

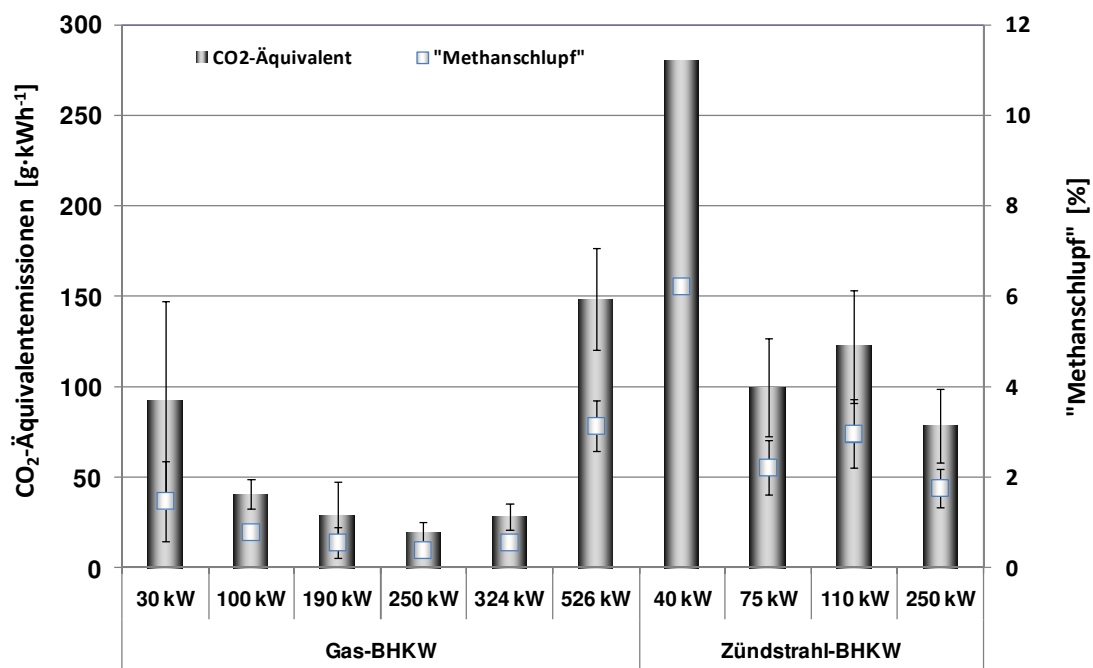


Abb. 37: CO₂-Äquivalentemissionen und Höhe des Methanschlupfes der untersuchten BHKW

Diese Grafik gibt an, wie viel CO₂-Äquivalente bei der Produktion einer kWh während der Verstromung im BHKW entstanden sind. Um die THG-Emissionen der gesamten Prozesskette der Stromproduktion aus Biogas zu ermitteln, sind zusätzlich die Emissionen aus dem Anbau, dem Transport und der Lagerung der Biomassen, der Vergärung, der Lagerung des Gärrückstands und der Ausbringung einschließlich der jeweiligen Vorketten zu berücksichtigen (vgl. Bachmaier et al. 2010).

Für die Gas-BHKW liegt der Wert bei der Verstromung mit 20 bis 40 g CO₂-Äq.·kWh⁻¹ relativ gering, während die Zündstrahl-BHKW und das höher verdichtete Gas-BHKW sowie das Gas-BHKW im kleinen Leistungsbereich auf Werte zwischen 70 und 150 g CO₂-Äq.·kWh⁻¹ kommen (Abb. 37). Das 40 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW bildet auch hier wieder mit CO₂-Äquivalentemissionen von 275 g·kWh⁻¹ die unrühmliche Ausnahme. Im Vergleich dazu lag der deutsche Strommix 2010 bei 563 g CO₂-Äq.·kWh⁻¹ (UBA

2010). Damit wird ersichtlich, dass die motorische Verbrennung des Biogases einen erheblichen Anteil an den CO₂-Emissionen der Stromgestehung aus Biogas haben kann.

Ein weiterer Aspekt, der in Abb. 37 dargestellt ist, ist die Höhe des Energieverlustes durch den sogenannten „Methanschluß“ in % der eingesetzten Energie. Dieser bewegt sich für die Gas-BHKW im Bereich von 0,5 bis 1%, für die Zündstrahl-BHKW und das hoch verdichtete Gas-BHKW bei 2 bis 3%. Tab. 34 zeigt diese Werte nochmals in der Zusammenfassung.

Tab. 34: CO₂-Äquivalentemissionen und „Methanschluß“ der untersuchten BHKW

BHKW	CO ₂ -Äquivalentemissionen g·kWh ⁻¹ _{prod.}	„Methanschluß“ %
30 kW GO	92	1,5
100 kW GO	41	0,8
190 kW GO	29	0,6
250 kW GO	20	0,4
324 kW GO	28	0,6
526 kW GO	148	3,1
40 kW ZS	280	6,2
75 kW ZS	100	2,2
110kW ZS	122	3,0
250 kW ZS	79	1,8

6.3.4 Formaldehyd (HCHO)

Formaldehyd gehört zu der Gruppe der Aldehyde und entsteht als Zwischenprodukt bei der Oxidation von Methan, wenn die Verbrennung z.B. in Kaltzonen und Toträumen im Brennraum nicht vollständig verläuft. An diesen Stellen reichen die Temperatur respektive die Sauerstoffmenge nicht aus, um eine vollständige Oxidation zu ermöglichen. Da Formaldehyd im Verdacht steht kanzerogen zu sein, ist es in den letzten Jahren vermehrt in den Fokus der Öffentlichkeit geraten. So wurde im EEG 2009 ein sogenannter „Luftreinhaltebonus“ von 1 €ct·kWh⁻¹ eingeführt, der bei Einhaltung eines Grenzwertes von 40 mg·m⁻³ Formaldehyd im BHKW-Abgas zusätzlich vergütet wird. Der Grenzwert der TA-Luft für Formaldehyd, der sich nur auf Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 1 MW bezieht, beträgt 60 mg·m⁻³.

In diesem Projekt wurden stichpunktartige Untersuchungen der Formaldehydkonzentration im Abgas der hier untersuchten BHKW durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 38 grafisch in Abhängigkeit der NO_x-Konzentration dargestellt. Es wird einerseits ersichtlich, dass die bei den Gas-BHKW gemessenen Formaldehydkonzentrationen im Abgas sehr gering und im Gegensatz zu den Zündstrahl-BHKW niedriger waren. Jedoch wiesen die Gas-BHKW gleichzeitig auch sehr hohe NO_x-Konzentrationen auf. Bei niedrigeren NO_x-Konzentrationen erhöhten sich die Formaldehydgehalte im Abgas. Dies konnte bei den Gas-, sowie bei den Zündstrahl-BHKW gemessen werden und legt die Vermutung nahe, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen hohen NO_x- und niedrigen Formaldehydkonzentrationen besteht. Im Rahmen einer Masterarbeit (Jin, 2010) konnte diese Hypothese bei Messungen an zwei Gas- und zwei Zündstrahl-BHKW gestützt werden. Als einziges

BHKW konnte das 526 kW_{el.} Gas-BHKW, das mit einem „Oxi-Kat“ ausgerüstet war, bei geringen NO_x-Werten unterhalb des Grenzwertes auch die Vorgaben der TA-Luft erfüllen.

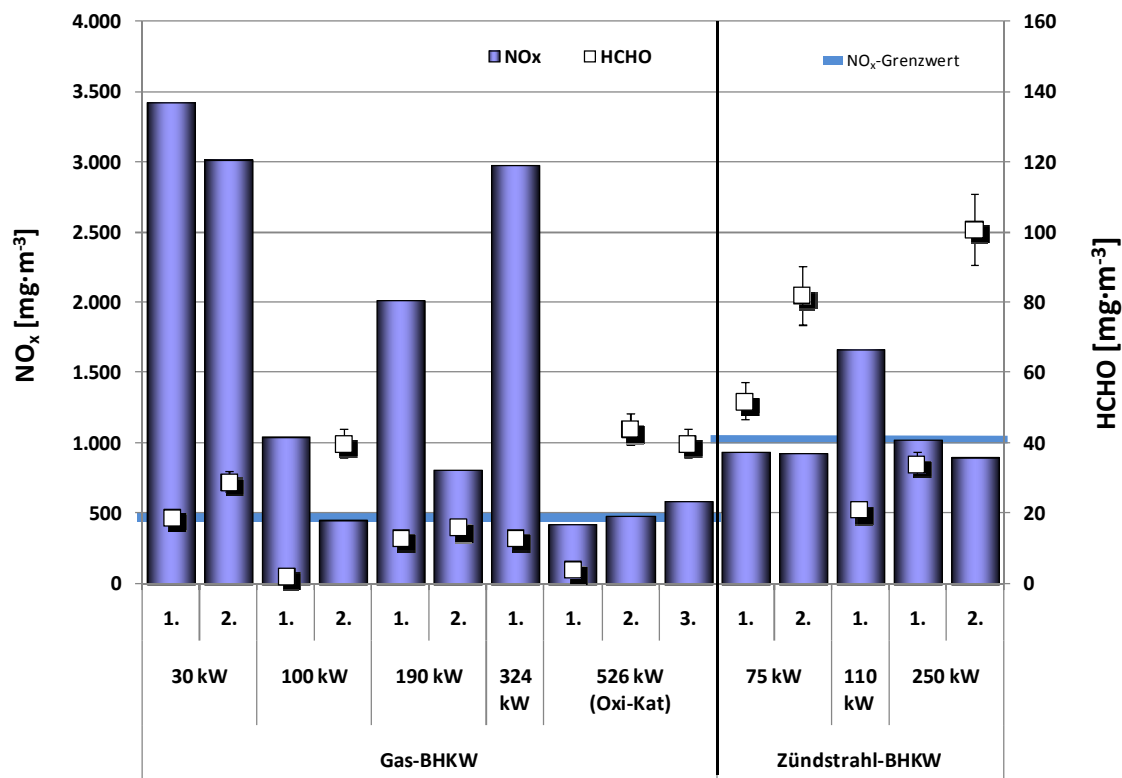


Abb. 38: Formaldehydkonzentrationen im Vergleich zur Höhe der NO_x-Konzentration einiger untersuchter BHKW

Ein weiterer Aspekt, der im Rahmen dieses Projektes mit untersucht wurde, war die Wirksamkeit eines Oxidationskatalysators (Oxi-Kat) für Biogasmotoren. In diesem Fall wurden im Abgas des 526 kW_{el.} Gas-Motors, der mit einem solchen Katalysator ausgestattet war, die Konzentrationen von NO_x, CO, C_nH_m und HCHO vor und nach dem Katalysator gemessen (Abb. 39).

Es ist eine deutliche Reduktion von CO und HCHO von über 90% zu sehen. Hier fand im Katalysator eine weitere Oxidation von CO zu CO₂ und von HCHO zu CO₂ + H₂O statt. Unverbranntes Methan wurde hingegen nicht oxidiert, da die hierfür erforderliche Aktivierungsenergie bei Temperaturen von 400 bis 500 °C im bestehenden System nicht verfügbar war. Zur nachträglichen Oxidation von Methan wären Temperaturen von über 700 bis 800 °C nötig. Dies ist nur durch eine thermische Nachverbrennung sicher zu gewährleisten (Bauer u. Wachtmeister 2010).

Diese Untersuchungen verdeutlichen wiederum das grundlegende Problem der Motoreinstellung. Durch den Einsatz eines Oxi-Kats kann zwar durch die NO_x optimierte Motoreinstellung der Ausstoß an Formaldehyd minimiert werden. Es ist jedoch nicht möglich, die durch diese Motoreinstellung bedingten Mehremissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen zu eliminieren, was sich wiederum negativ auf die Klimabilanz der Verstromung von Biogas auswirkt.

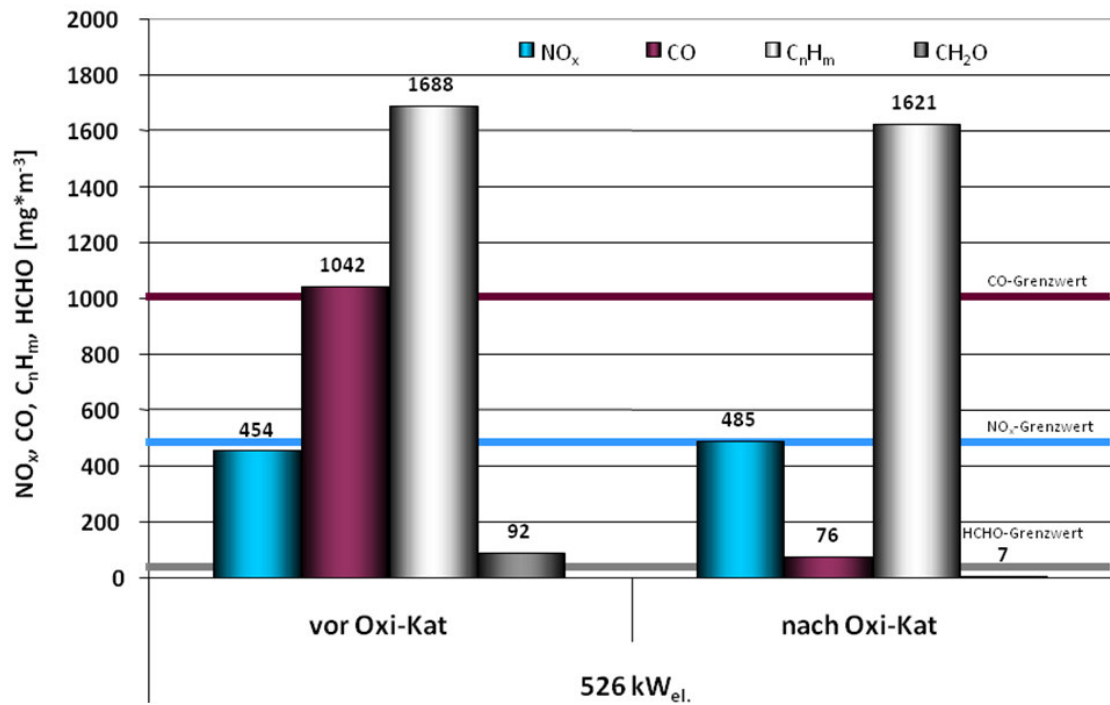


Abb. 39: Einfluss eines Oxi-Kats auf die Höhe der Abgaskonzentrationen

Für eine zusätzliche, außermotorische Reduktion der NO_x-Emissionen wäre ein sogenannter SCR-Kat („selektive katalytische Reduktion“) nötig, der NO_x zu elementarem Stickstoff reduziert. Damit könnte die Verbrennung dahingehend optimiert werden, dass gleichzeitig eine möglichst effiziente Verstromung des Biogases erfolgt. Allerdings birgt dieses Verfahren einerseits die Gefahr erhöhter Ammoniakemissionen bei unsachgemäßer Einstellung, andererseits ist es bisher noch sehr kostenintensiv und für die Biogasverstromung erst in der Entwicklungsphase.

7 Schlussfolgerungen

Aus den hier vorgestellten Untersuchungen können folgende für die Praxis relevante Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der elektrische Wirkungsgrad sinkt im Verlauf der Betriebsdauer eines BHKW. Die Höhe des Wirkungsgradabfalls hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Eine gute Wartungsstrategie einschließlich einer Generalüberholung kann den Verlauf des elektrischen Wirkungsgrades positiv beeinflussen. Dabei hat sich gezeigt, dass eine Wartung und Generalüberholung ausschließlich durch den Hersteller den besten Effekt erzielt.
- Im Vergleich zu den Angaben des BHKW-Herstellers sind für eine sichere Kalkulation der monetären Einnahmen bei der Anlagenplanung über die gesamte Laufzeit des BHKW Abstriche von mindestens 3%-Punkten zu machen.
- Die Motoreinstellung hat einen sehr großen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad und die Schadgasemissionen. In diesem Projekt wurde gezeigt, dass ein Konflikt besteht zwischen dem Bestreben, eine möglichst effiziente Verstromung zu erreichen und gleichzeitig die NO_x -Grenzwerte einzuhalten. Die energetisch günstigste Einstellung bei der Verbrennung bedingt gleichzeitig sehr hohe NO_x -Konzentrationen im Abgas, die außermotorisch derzeit nicht reduziert werden können.
- Eine Motoreinstellung hin zu einer NO_x optimierten Fahrweise erlaubt einerseits die Einhaltung der NO_x -Grenzwerte, bedingt aber andererseits durch einen hohen Luftüberschuss im Verbrennungsprozess eine ineffiziente Verbrennung bei geringerem elektrischem Wirkungsgrad und erhöhtem Ausstoß an Kohlenwasserstoffen und Formaldehyd.
- Ein Oxi-Kat kann die durch die NO_x optimierte Einstellung bedingten Mehremissionen an Formaldehyd sehr gut reduzieren, hat aber keinerlei Einfluss auf die ebenfalls vorhandenen Mehremissionen an Methan, was die Klimabilanz der Verstromung erheblich negativ beeinflusst. Die Reduktion dieser Mehremissionen ist nur in Verbindung mit einer thermischen Nachverbrennung möglich.
- Für eine ökonomisch wie ökologisch effiziente Verstromung von Biogas wäre eine leistungsoptimierte Motoreinstellung mit einer nachgeschalteten Abgasnachbehandlung für NO_x die beste Variante. Hierfür wäre eine Weiterentwicklung und Adaption der SCR-Technik, wie sie bereits im LKW-Dieselmotor zum Einsatz kommt, wünschenswert. Hierdurch könnten nicht nur die Emissionsfrachten, sondern auch der Flächenverbrauch bei der Biogasproduktion gesenkt werden.

Literaturverzeichnis

- ASCHMANN, V., R. KISSEL, H. STANZEL, A. GRONAUER (2006): Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoranlagen in Abhängigkeit von der Motorenwartung. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projektnummer 1325), Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg.
- ASCHMANN, V., R. KISSEL, M. EFFENBERGER, R. EICHELSE, A. GRONAUER (2007): Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motoreinstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromerzeugung. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 2007
- BACHMAIER, J., M. EFFENBERGER, A. GRONAUER (2010): Greenhouse gas balance and resource demand of biogas plants in agriculture. Eng Life Sci 6: 560–569
- Bank, M. (2000): Basiswissen Umwelttechnik – Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht. 4. Auflage, Vogel-Buchverlag, Augsburg, p.439.
- BAUER, M., G. WACHTMEISTER (2010): Formaldehyd-Emissionen in Biogas Verbrennungsmotoranlagen, Teil II: Eingehende Darstellung. Schlussbericht zum Vorhaben. Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK) der Technischen Universität München (TUM), München 2010
- DIN ISO 3046-1 (1995): Hubkolben-Verbrennungsmotoren-Anforderungen, Teil 1; Deutsches Institut für Normung e.V., 4. Ausgabe, Beuth-Verlag, Berlin 1995, 23 pp.
- EBERTSCH, G., A. FIEDLER, R. BECK, T. KARRASCH, B. ZELL, B. RUTTKA: Immissionschutz, einschließlich Klimaschutz. In: Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kapitel 2.2.2, Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Stand 2007, Augsburg
- FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (2009) Hrsg.: Biogas-Messprogramm II: 61 Biogasanlagen im Vergleich. 1. Auflage, Gülzow 2009
- IPCC/TEAP (2005): Special Report on Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons [Metz, B., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 488 S.
- JENBACHER GASMOTOREN GMBH & CO OHG (2002): Handbuch zur Nutzung von Bio-, Klär- und Deponiegasen in GE Jenbacher Gasmotoren. Unternehmensprospekt, Eigendruck, 98 pp.
- JIN, W. (2010): Emission and electrical efficiency of biogas driven CHPU influenced by different operating conditions. Master Thesis am Institut für Landtechnik, Freising 2010, unveröffentlicht
- Testo (2000): Testo 350 Rauchgas-Analysegerät. Bedienungsanleitung mit Wartungsbuch. Testo GmbH, Lenzkirch
- 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.

- UMWELTBUNDESAMT UBA (2010): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix 1990-2009 und erste Schätzung 2010 im Vergleich zu CO₂-Emissionen der Stromerzeugung. Internetveröffentlichung: <http://www.umweltbundesamt.de/energie/archiv/co2-strommix.pdf>
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE VDI 3862 Blatt 7 (2002): Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 5, Düsseldorf 2002