



Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motor- einstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromversorgung





Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motor- einstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromversorgung

Impressum

Effizienzsteigerung, Emissionsminderung und CO₂-Einsparung durch optimierte Motoreinstellung bei Biogas-Blockheizkraftwerken zur dezentralen Stromversorgung

ISBN (Online-Version): 978-3-940009-32-6

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: (08 21) 90 71-0

Fax: (08 21) 90 71-55 56

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

V. Aschmann, R. Kissel, M. Effenberger, R. Eichelser und A. Gronauer

Bayerisches Landesamt für Landwirtschaft (LfL)

Institut für Landtechnik und Tierhaltung (ILT)

Vöttinger Str. 36, 85354 Freising/Weihenstephan

www.LfL.bayern.de

unter Mitwirkung des LfU

Druck:

Eigendruck Bayer. Landesamt für Umwelt

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

Dezember 2007

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.



Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz im Rahmen der EU-Strukturförderung für regionale Entwicklung (EFRE) finanziert.



Danksagung

Das Institut für Landtechnik und Tierhaltung dankt dem Landesamt für Umwelt (LfU) und dem Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) für die Vergabe der Arbeiten.

Zum erfolgreichen Gelingen des Projektes haben seitens des LfU, der beteiligten Anlagenbetreiber, der beteiligten Herstellerfirmen und dem Institut für Landtechnik und Tierhaltung zahlreiche Personen mitgewirkt. Insbesondere Herrn Bernhard Zell vom LfU sei hier gedankt für die konstruktive Kritik und gute Zusammenarbeit.

Freising, 2007

Autoren Institut für Landtechnik
Volker Aschmann
Rainer Kissel
Mathias Effenberger
Andreas Gronauer

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	10
2	Stand der Technik	11
2.1	Motorwartung	11
2.2	Regelung der Verbrennungsluftzufuhr (λ)	11
2.3	Katalysatoren	13
2.3.1	-3-Wege-Katalysator	13
2.3.2	Oxidationskatalysator	13
2.3.3	SCR-Katalysator	13
3	Material und Methoden	14
3.1	Auswahl der BHKW	14
3.1.1	BHKW 1	15
3.1.2	BHKW 2	16
3.1.3	BHKW 3	17
3.1.4	BHKW 4	18
3.1.5	BHKW 5 und BHKW 6	19
3.2	Aufbau und Durchführung der Messungen	20
3.2.1	Messaufbau	20
3.2.2	Verwendete Messtechnik	21
3.2.2.1	BHKW-Input	21
3.2.2.2	BHKW-Output	23
3.3	Auswertung der erhobenen Rohdaten	25
3.3.1	BHKW-Input	25
3.3.1.1	Gasmenge (Normgasvolumen)	25
3.3.1.2	Zündölmenge	25
3.3.1.3	Gesamtenergiezufuhr	25
3.3.2	BHKW-Output	26
3.3.2.1	Abgaszusammensetzung	26
3.3.2.2	Abgasmenge (Zuluft)	27
3.3.2.3	Elektrischer Wirkungsgrad	29
4	Ergebnisse	31
4.1	Testmessungen	31
4.2	Messreihen der einzelnen BHKW	32
4.2.1	110 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW	32
4.2.2	250 kW _{el.} Zündstrahl- BHKW	34
4.2.3	265 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW	36
4.2.4	190 kW _{el.} Gas-BHKW	38
4.2.5	324 kW _{el.} Gas-BHKW	41
4.2.6	526 kW _{el.} Gas-BHKW	43
5	Diskussion der Ergebnisse	45
5.1	Vergleich der Abgaswerte	45
5.1.1	Kohlenmonoxid (CO)	45
5.1.2	Kohlenwasserstoffe (C _n H _m)	46
5.1.3	Stickoxide (NO _x)	46
5.2	Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade	47
5.3	Einflussfaktoren auf Emissions- und Leistungskennwerte	48
5.4	Betrachtungen zur Treibhausgasbilanz	50

6	Zusammenfassung und Ausblick.....	53
7	Literaturverzeichnis	54

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Abgasemissionen in Abhängigkeit des Luftüberschusses (nach GE-JENBACHER 2004).....	12
Abb. 2: Foto BHKW 1 (Gas-Otto-Motor, 190 kW _{el.}).....	15
Abb. 3: Foto des BHKW 2 (324 kW _{el.} Gas-BHKW).....	16
Abb. 4: Foto des BHKW 3 (526 kW _{el.} Gas-Otto-Motor) im Container.....	17
Abb. 5: Foto des BHKW 4 (110 kW _{el.} Zündstrahl-Motor) im Container vor dem Fermenter mit Gasspeicher	18
Abb. 6: Fotos der BHKW 5 und 6 (250 kW _{el.} und 265 kW _{el.} Zündstrahl-Motoren).....	19
Abb. 7: Aufbau für die kontinuierliche Messung des Leistungs- und Emissionsverhaltens eines BHKW unter Praxisbedingungen	20
Abb. 8: Messgeräteaufbau am BHKW in der Praxis	21
Abb. 9: Messstutzen für die Messung von Gaszusammensetzung, -druck, -temperatur und -feuchte.....	22
Abb. 10: Messgeräte für Gaskomponenten, Luftzufuhr und Zündölmenge im Praxiseinsatz	23
Abb. 11: Messgeräte für Leistung und Abgaszusammensetzung im Praxiseinsatz.....	24
Abb. 12: Vorrichtung der Firma H-J Schnell zur Integration der Zündölwiegevorrichtung in die bestehende Zündölleitung von Zündstrahl-BHKW	24
Abb. 13: Abgaswerte und Wirkungsgrade der Testmessungen der einzelnen BHKW	32
Abb. 14: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 110 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	33
Abb. 15: BHKW 2: Einfluss des Teillastbetriebes (180 kW _{el.}) auf Abgasemissionen und Wirkungsgrad im Gegensatz zum Vollastbetrieb (250 kW _{el.})	34
Abb. 16: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 250 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	35
Abb. 17: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 265 kW _{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	37
Abb. 18: Einfluss des Teillastbetriebes (230 kW _{el.} u. 250 kW _{el.}) auf Abgasemissionen und Wirkungsgrad im Vergleich zum Vollastbetrieb (265 kW _{el.})	38
Abb. 19: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 190 kW _{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	39
Abb. 20: Einfluss des Lambda-Wertes auf die Abgaskonzentrationen an einem 190 kW _{el.} Gas-BHKW	40
Abb. 21: Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Lambda-Wert	41
Abb. 22: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 324 kW _{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	42
Abb. 23: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 526 kW _{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung).....	43
Abb. 24: Box-Plot der CO-Gehalte im Abgas aller drei Messreihen der untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) einer Wartung	45
Abb. 25: Box-Plot der C _n H _m -Gehalte im Abgas aller drei Messreihen der untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) einer Wartung	46
Abb. 26: Box-Plot der NO _x -Gehalte im Abgas der untersuchten BHKW aus allen drei Messreihen vor (v.) und nach (n.) einer Wartung.....	47

Abb. 27: Elektrische Wirkungsgrade aller untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) der Wartung (Berechnung nach DIN 3046 ohne Anrechnung der 5 % Grenzabweichung beim Kraftstoffverbrauch)	48
Abb. 28: Veränderung der Leistungs- und Emissionskennwerte der vermessenen BHKW durch eine Wartung mit Abgasmessung	49
Abb. 29: Korrelation von C _n H _m - und NO _x -Gehalt im Abgas für fünf der vermessenen BHKW	50
Abb. 30: Emissionsraten der gemessenen BHKW in Abhängigkeit der produzierten Strommenge (U= ungewartet; W = gewartet).....	51
Abb. 31: CO ₂ - und SO ₂ -Äquivalentemissionen der untersuchten BHKW	52

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Für die Leistungs- und Emissionsmessungen ausgewählte BHKW	14
Tab. 2: Technische Daten des BHKW 1 (190 kW _{el.}) laut Herstellerangaben	15
Tab. 3: Technische Daten des BHKW 2 (340 kW _{el.}) laut Herstellerangaben	16
Tab. 4: Technische Daten des BHKW 2 (526 kW _{el.}) laut Herstellerangaben	17
Tab. 5: Technische Daten des BHKW 4 (110 kW _{el.}) laut Herstellerangaben	18
Tab. 6: Technische Daten der BHKW 5 und 6 (180 kW _{el.} und 250 kW _{el.}) laut Herstellerangaben	19
Tab. 7: An den untersuchten BHKW vorhandene bzw. für Referenzmessungen eingesetzte Geräte zur Erfassung der Gasmenge	22
Tab. 8: Messtechnik zur Erfassung des BHKW-Input	23
Tab. 9: Messtechnik zur Erfassung des BHKW-Output	24
Tab. 10: Molgewicht und Moldichte der gemessenen Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung)	26
Tab. 11: Bilanz der zugeführten Stoffmengen	28
Tab. 12: Volumenstrom der Abgaskomponenten	28
Tab. 13: Wirkungsgradänderung eines Gas-BHKW durch Umrechnung auf Bezugsbedingungen gemäß DIN ISO 3046	30
Tab. 14: Anzahl Betriebsstunden der einzelnen BHKW zu Beginn der Messungen	31
Tab. 15: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (110 kW _{el.} -BHKW)	33
Tab. 16: Veränderung der Messwerte durch die Erhöhung auf Volllastbetrieb	35
Tab. 17: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (250 kW _{el.} -BHKW)	36
Tab. 18: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (265 kW _{el.} -BHKW)	37
Tab. 19: Vergleich der gemessene Werte bei 230 kW _{el.} , 250 kW _{el.} und 265 kW _{el.}	38
Tab. 20: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (190 kW _{el.} -BHKW)	39
Tab. 21: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (324 kW _{el.} -BHKW)	42
Tab. 22: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (526 kW _{el.} -BHKW)	43

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Bh	Betriebsstunden
BHKW	Blockheizkraftwerk
CH ₄	Methan
C _n H _m	Kohlenwasserstoffe
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
FID	Flammenionisationsdetektor
g	Gramm
h	Stunde
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
kW	Kilowatt
kW _{el.}	elektrische Leistung
kWh	Kilowattstunde
kWh _{prod.}	produzierte Kilowattstunde
m ³	Kubikmeter
mg	Milligramm
MW	Megawatt
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NO _x	Stickoxide
Tab.	Tabelle
%	Prozent

1 Einleitung

Aus Gründen des Klimaschutzes sowie der Verknappung und damit Verteuerung fossiler Brennstoffe ist die Bereitstellung einer ökologisch wie ökonomisch zukunftsfähigen Energieversorgung dringend geboten. Die Produktion von Strom und Wärme in mit Biogas betriebenen Blockheizkraftwerken (BHKW) gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung. So konnte durch die Novellierung des EEG im Jahre 2004 die Anzahl neu errichteter Biogasanlagen erheblich gesteigert werden. Insbesondere Landwirte, die in strukturschwachen Gebieten angesiedelt sind, greifen die Gelegenheit auf, einen neuen umweltfreundlichen und wirtschaftlich sinnvollen Betriebszweig aufzubauen. Die Förderung dieser dezentralen Form der Energiegewinnung in solchen Regionen ist positiv zu bewerten, da Arbeitsplätze geschaffen werden und eine kostengünstige Energieversorgung bereit gestellt wird.

Durch die Biogasverwertung kann im Vergleich mit der konventionellen Energieproduktion aus fossilen Brennstoffen die Freisetzung klimarelevanter Gase reduziert werden. Dazu ist es jedoch notwendig, die eingesetzten Potenziale so weit wie möglich auszuschöpfen. Des Weiteren ist darauf zu achten, dass die Emissionen von Schadgasen, die bei der motorischen Verbrennung von Biogas entstehen (Kohlenmonoxid - CO; Stickoxide - NO_x) minimiert werden. Vorausgegangene Forschungsprojekte (GRONAUER ET.AL 2003; BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT 2006) haben gezeigt, dass sowohl die Leistungsfähigkeit als auch das Abgasverhalten biogasbetriebener BHKW von der Einstellung der Maschine beeinflusst werden. Die durchgeführten Leistungs- und Emissionsmessungen an BHKW mit einer Feuerungswärmeleistung < 1 MW (ZWAHR & EICHERT 2003, ZELL 2002) ergaben, dass die zur Orientierung herangezogenen Grenzwerte gemäß der novellierten Fassung der TA-LUFT 2002 (gültig für BHKW > 1 MW Feuerungswärmeleistung) von allen Aggregaten entweder für CO oder NO_x überschritten wurden. Dies wurde zurückgeführt auf Schwankungen in der Brennstoffqualität, auf den Wartungszustand und vor allem auf die Einstellung der Maschine (EBERTSCH ET. AL 2007).

Die innerhalb der letzten zwei Jahre deutlich gestiegene Nachfrage nach leistungsstarken Aggregaten hat zu einer verstärkten Konkurrenz unter den Motorenherstellern geführt und war Anlass dafür, technisch veränderte und optimierte Aggregate anzubieten. Ziel dieses Forschungsprojektes war es herauszufinden, inwieweit sich diese technischen Modifikationen auf das Leistungs- und Abgasverhalten auswirken und in welchem Maße das CO₂-Einsparungspotential durch gezielte Wartungsmaßnahmen bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen noch gesteigert werden kann.

2 Stand der Technik

2.1 Motorwartung

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

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

Der allgemeine Wartungszustand eines BHKW ist für die Höhe der Schadgasemissionen mit von entscheidender Bedeutung. Dies haben verschiedene Untersuchungen an einzelnen in der Praxis befindlichen BHKW bereits gezeigt (.

2.2 Regelung der Verbrennungsluftzufuhr (Lambda, λ)

Für die Verbrennung energiereicher Gase ist die Zufuhr von Verbrennungsluft nötig. Durch die Zugabe von Sauerstoff findet eine oxidative Reaktion statt. Im Idealfall wird dem Verbrennungsprozess genau so viel Sauerstoff zugeführt, wie für die Oxidation der Stoffe nötig ist. Man spricht dann von einer sogenannten „stöchiometrischen Verbrennung“. Das Maß für die Luftzufuhr ist die Luftüberschusszahl Lambda (λ). Bei der stöchiometrischen Verbrennung ist $\lambda = 1$ (siehe Abb. 1). In diesem Bereich findet die energieeffizienteste Verbrennung statt, allerdings entstehen aufgrund der relativ hohen Verbrennungstemperatur auch hohe Konzentrationen an NO_x , CO und C_nH_m (Kohlenwasserstoffe).

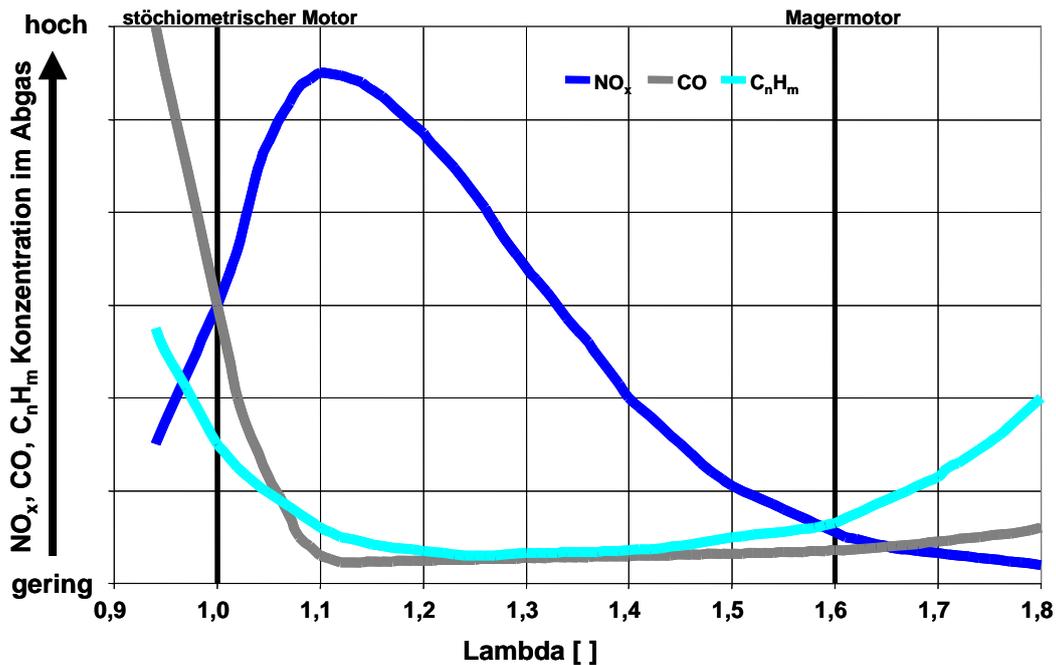


Abb. 1: Abgasemissionen in Abhängigkeit des Luftüberschusses (nach GE-JENBACHER 2004)

Für die Reduktion dieser Schadstoffe werden z. B. in der Automobilindustrie so genannte 3-Wege-Katalysatoren eingesetzt, die für Biogasmotoren aufgrund sehr aggressiver Bestandteile des Brenngases (v. a. H₂S) jedoch nicht tauglich sind. Deshalb werden Biogasmotoren in der Regel im Magergemischbereich mit einem Lambda-Wert zwischen 1,4 und 1,8 - je nach BHKW - betrieben. Man spricht dann von einem Magermotor (Abb. 1).

Mit zunehmendem Verbrennungsluftanteil sinkt die Energiedichte des Gasgemisches, was sich negativ auf die Leistung und den elektrischen Wirkungsgrad auswirkt. Um diese Verluste zu kompensieren und eine hohe Leistungsdichte bei geringen Schadkonzentrationen im Abgas zu erzielen, werden Abgasturbolader und Ladeluftkühler verwendet. Sie ermöglichen eine Verdichtung und Kühlung des Gases und damit eine Erhöhung der Energiedichte im Gasgemisch. Fast jeder moderne Motor ist damit ausgestattet. Einige Hersteller bieten sinnvoller Weise auch noch eine Feinreinigung des Biogases mit Aktivkohlefilter vor der Gasregelstrecke an, um den H₂S-Anteil im Biogas zu minimieren.

Die Höhe der Schadgasemissionen im Regelbetrieb eines BHKW hängt zu einem großen Teil von der Einstellung des Lambda-Wertes ab. Da die Biogasqualität, je nach Fütterungsintervallen und Substratqualitäten, teilweise recht großen Schwankungen in relativ kurzen Zeitintervallen unterworfen ist, müssen sich die Einstellungen des BHKW diesen Gegebenheiten anpassen können.

In der Praxis gibt es verschiedene Regelprinzipien für den Lambda-Wert. Die einfachste Form ist ein fester Lambda-Wert, der vom Hersteller an der Anlage vor Inbetriebnahme oder bei Wartungsarbeiten anhand der Biogasqualität vorgegeben wird. Die im Abgasstrom angebrachte Lambda-Sonde misst den im Abgas vorhandenen Sauerstoffgehalt und vergleicht diesen mit dem Soll-Wert. Es findet ein Ist-Soll-Ableich statt. Modernere Systeme besitzen eine automatische Lambda-Regelung, die es erlaubt den Lambda-Wert soweit zu erhöhen, bis ein erster Zündaussetzer erfolgt. Erst dann wird der Lambda-Wert wieder geringfügig reduziert, so dass ein störungsfreier Betrieb bei minimierter Schadgasemission gewährleistet ist. Neueste Verfahren, wie z.B. das LEANOX[®]-System der Firma GE-Jenbacher garantieren eine geringe

NO_x-Konzentration durch die Regelung des Ladedruckes in Abhängigkeit der Generatorklemmenleistung und der Gemischtemperatur über den motorbetätigten Gasmischer. Hierbei wird keine Lambda-Sonde mehr benötigt.

2.3 Katalysatoren

Eine weitere Möglichkeit der Schadgasreduktion ist die Verwendung geeigneter Katalysatoren, die bestimmte Schadstoffgruppen umwandeln und eliminieren. In der Praxis werden drei Gruppen von Katalysatoren angewandt.

2.3.1 3-Wege-Katalysator

Der 3-Wege-Kat ist der bekannteste Katalysator, da er mittlerweile in der Automobilindustrie gängige Praxis darstellt. Auch für den Betrieb bei Gasmotoren ist er einsetzbar. Er besteht in der Regel aus einem keramischen oder metallischen Trägerkörper, auf den Katalysatormaterialien wie z.B. Platin aufgedampft sind. An diesen Oberflächen werden Stickoxide (NO, NO₂) reduziert (N₂) und Kohlenwasserstoffe (C_nH_m), sowie Kohlenmonoxid (CO) oxidiert (CO₂, H₂O). Voraussetzung hierfür ist jedoch die Abwesenheit von Sauerstoff. Aufgrund des hohen Schwefelwasserstoffgehaltes (H₂S) kann diese Technik bei biogasbetriebenen BHKW nicht angewendet werden, da durch die Katalysatorgifte der Katalysator schnell inaktiviert wird (PRESCHER et. al 2000).

2.3.2 Oxidationskatalysator

Der Oxidationskatalysator kann auch im Magergemischbetrieb eingesetzt werden. Jedoch findet in diesem Fall nur eine Oxidation der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid statt. Die Reduktion von NO_x ist nicht möglich. Aber auch hier ist der limitierende Faktor die hohe Konzentration an Katalysatorgiften, so dass sich ein Einsatz im Biogasbereich bis jetzt noch nicht durchsetzen konnte (SKLORZ 2004).

2.3.3 SCR-Katalysator

Die „selektiv katalytische Reduktion“ (SCR) wird Harnstoff in den Abgaskanal eingedüst. Dies führt zuerst zu einer Umwandlung des Harnstoffes in Ammoniak (NH₃) und Kohlendioxid (CO₂). Im zweiten Schritt werden die Stickoxide (NO_x) mit dem Ammoniak in molekularen Stickstoff (N₂) und Wasserdampf (H₂O) umgesetzt. Diese Katalysatortechnik findet in der Nutzfahrzeugtechnik immer mehr Anwendung. Bei der Verwendung im Biogasbereich gibt es noch Probleme mit der schwankenden Gasqualität und dem daraus resultierenden Ammoniakslupf. Auch fehlen Langzeituntersuchungen in diesem Bereich.

3 Material und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die untersuchten BHKW, die für die Messungen erforderliche Messtechnik, die Durchführung der Messreihen, sowie die für die Auswertung nötigen Berechnungen dargestellt.

3.1 Auswahl der BHKW

Die Anzahl der Firmen, die Biogas-BHKW anbieten, hat in den letzten Jahren beträchtlich zugenommen. Die Präsenz der einzelnen Firmen ist in der Praxis jedoch regional sehr unterschiedlich. Auch gibt es einige relativ kleine Firmen, die regional nur sehr begrenzt auftreten. Da die BHKW-Auswahl in diesem Projekt einen Überblick über den heutigen Stand der Technik ermöglichen sollte, wurden gerade diejenigen Firmen in das Projekt involviert, die in Bayern gerade in strukturschwachen Gebieten besonders nachgefragt werden. Es wurden drei Zündstrahl- und drei Gas-BHKW in jeweils drei verschiedenen Leistungsklassen für die Messungen ausgesucht. Vorgabe hierfür war eine möglichst geringe Betriebsstundenzahl, das Vorhandensein eines Gaszählers bzw. Gasdurchflussmessers sowie die Bereitschaft des Anlagenbetreibers zur Unterstützung der Messungen. In Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen konnten anhand der Leistungsklassen der gesuchten BHKW die in Frage kommenden Anlagen ausgewählt werden. Die ins Messprogramm aufgenommenen BHKW sind in Tab. 1 aufgeführt und werden im Folgenden kurz beschrieben.

Tab. 1: Für die Leistungs- und Emissionsmessungen ausgewählte BHKW

BHKW	Hersteller	elektrische Nennleistung	Inbetriebnahme
Gas-BHKW	Elektro-Hagl	190 kW	Frühjahr 2005
	MDE	324 kW	Herbst 2005
	GE Jenbacher	526 kW	Sommer 2006
Zündstrahl-BHKW	Dreyer & Bosse	110 kW	Frühjahr 2006
	H-J Schnell	250 kW	Herbst 2005
	H-J Schnell	265 kW	Herbst 2005

3.1.1 BHKW 1

Das BHKW 1 (Abb. 2) hat eine elektrische Leistung von 190 kW_{el.} und steht auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage im nördlichen Teil des Landkreises Donau-Ries. Die Anlage wird zur Zeit erweitert und besteht insgesamt aus sieben Behältern (3 Behälter Altanlage + 4 Behälter Neuanlage). Anlagenplaner ist die Firma NQ-Anlagenbau. Bei der Anlage handelt es sich um eine NawaRo-Anlage in der neben Gülle vorwiegend Maissilage vergoren wird.



Abb. 2: Foto BHKW 1 (Gas-Otto-Motor, 190 kW_{el.})

Für die Gasverwertung stehen zwei Gas-BHKW (190 kW_{el.} und 340 kW_{el.}) der Firma Elektro-Hagl zur Verfügung. Die technischen Daten des ins Messprogramm aufgenommenen BHKW (Betriebsstunden bei Aufnahme Bh = 7200) sind soweit vom Hersteller angegeben in Tab. 2 aufgeführt.

Tab. 2: Technische Daten des BHKW 1 (190 kW_{el.}) laut Herstellerangaben

Motortyp		MAN – Hagl HGB E 2876
Hubraum	Liter	12,81
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	190
thermische Leistung	kW	244
elektrischer Wirkungsgrad	%	38,6
thermischer Wirkungsgrad	%	49,4
Gesamtwirkungsgrad	%	90
NO _x -Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	< 500

3.1.2 BHKW 2

Im Kreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim befindet sich das BHKW 2 (Abb. 3) mit einer elektrischen Leistung von 324 kW_{el.}. Bei der zugehörigen Biogasanlage handelt es sich um eine Anlage zur hauptsächlichen Vergärung von Getreide und Gülle, mit einem „Ligavator“, einer beheizbaren Vorgrube, einem Fermenter und einem Endlager (Anlagenplaner: Lipp-Rohn). Die Anlage und das BHKW wurden 2005 in Betrieb genommen.



Abb. 3: Foto des BHKW 2 (324 kW_{el.} Gas-BHKW)

Die Anlage ist mit einem 324 kW_{el.} Gas-BHKW der Firma MDE ausgestattet (ca. 3000 Bh bei Aufnahme). Die technischen Daten sind soweit vom Hersteller angegeben in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Technische Daten des BHKW 2 (340 kW_{el.}) laut Herstellerangaben

Motortyp		MAN – MDE MB 3042 L 1
Hubraum	Liter	k. A.
Zylinder	Stk.	12
elektrische Leistung	kW	324
thermische Leistung	kW	426
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	945
elektrischer Wirkungsgrad	%	k. A.
thermischer Wirkungsgrad	%	k. A.
NO _x -Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	< 500

3.1.3 BHKW 3

Das BHKW 3 mit einer elektrischen Leistung von 526 kW befindet sich auf einer Biogasanlage der Firma NatUrgas (Anlagenplaner: Rückert) im Landkreis Schwandorf. Die Anlage besteht aus zwei liegenden Pfropfenstromfermentern, einem Nachgärer und einem Endlager. Sie wird vorwiegend mit nachwachsenden Rohstoffen sowie mit Hähnchenmist beschickt.



Abb. 4: Foto des BHKW 3 (526 kW_{el.} Gas-Otto-Motor) im Container

Die Abb. 4 zeigt den auf der Anlage befindlichen Container mit einem 526 kW_{el.} Gas-BHKW der Firma GE-Jenbacher. Das bei Aufnahme auf der Anlage installierte 340 kW_{el.} Gas-BHKW der gleichen Firma wurde erst im Juni 2006 durch das größere Aggregat ersetzt. Dies ermöglichte die Messung der Abgas- und Leistungsmerkmale vom Beginn der Inbetriebnahme des BHKW an. Die technischen Daten des BHKW sind in Tab. 4 dargestellt.

Tab. 4: Technische Daten des BHKW 2 (526 kW_{el.}) laut Herstellerangaben

Motortyp		GE Jenbacher J 312 GS-C221
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)	Nm ³ *h ⁻¹	260
NO _x -Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	< 500

3.1.4 BHKW 4

Die Biogasanlage (Anlagenplaner: Novatech) mit dem kleinsten gemessenen BHKW 4 (elektrische Leistung 110 kW) steht im Landkreis Ansbach. In Abb. 5 sind die beiden BHKW-Container mit dem Fermenter im Hintergrund zu sehen. Beide Aggregate haben dieselbe Leistung.



Abb. 5: Foto des BHKW 4 (110 kW_{el.} Zündstrahl-Motor) im Container vor dem Fermenter mit Gaspeicher

Das ins Messprogramm aufgenommene BHKW wurde erst im April 2006 auf der Anlage installiert. Dieses neue Zündstrahl-BHKW der Firma Dreyer & Bosse wurde von Beginn an ins Messprogramm aufgenommen. Die technischen Daten sind in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5: Technische Daten des BHKW 4 (110 kW_{el.}) laut Herstellerangaben

Motortyp		ZS BF 6M 1013 EC
Hubraum	Liter	7,2
Zylinder	Stk.	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	110
thermische Leistung	kW	120
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	k. A.
elektrischer Wirkungsgrad	%	39,5
thermischer Wirkungsgrad	%	k. A.
NO_x-Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	< 1000

3.1.5 BHKW 5 und BHKW 6

Die BHKW 5 und 6 (Abb. 6) befinden sich auf einer Anlage im nördlichen Teil des Landkreises Donau-Ries. Die NawaRo-Biogasanlage (Anlagenplaner: NQ-Anlagenbau) ist Ende 2005 in Betrieb gegangen und besteht aus einem Fermenter, einem Nachgärer und einem Endlager. Vergärt werden hauptsächlich Gülle und Maissilage.



Abb. 6: Fotos der BHKW 5 und 6 (250 kW_{el.} und 265 kW_{el.} Zündstrahl-Motoren)

Zur Gasverwertung stehen zwei Zündstrahl-BHKW (250 kW_{el.} und 265 kW_{el.}) der Firma H-J Schnell zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um zwei baugleiche Aggregate, wobei eines mit einer technischen Neuerung der Firma H-J Schnell ausgerüstet wurde, die eine Leistungssteigerung um 15 kW bewirkt. Hier bestand daher die Möglichkeit, die Veränderung der Abgas- und Leistungsmerkmale des BHKW durch diese technische Neuerung mit zu beurteilen. Die technischen Daten der beiden BHKW sind in der Tab. 6 dargestellt.

Tab. 6: Technische Daten der BHKW 5 und 6 (180 kW_{el.} und 250 kW_{el.}) laut Herstellerangaben

Motortyp		SCANIA – Schnell ES 2505	SCANIA – Schnell ES 2655
Hubraum	Liter	16,0	16,0
Zylinder	Stk.	6 in Reihe	6 in Reihe
elektrische Leistung	kW	250	265
thermische Leistung	kW	261	218
Gesamtfeuerungswärmeleistung	kW	581	589
elektrischer Wirkungsgrad	%	43,0	45,0
thermischer Wirkungsgrad	%	45,0	37,0
Gesamtwirkungsgrad	%	87,0	82,0
Gasverbrauch (bei 50 % CH ₄)	m ³ *h ⁻¹	112,0	113,0
Zündölanteil	l*h ⁻¹ (%)	2,3 (4,0)	2,3 (4,0)
NO _x -Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	700	1000
CO-Gehalt im Abgas	mg*m ⁻³	1000	800

3.2 Aufbau und Durchführung der Messungen

Die Durchführung präziser kontinuierlicher Messungen an BHKW unter den Bedingungen der Praxis bedingt einen hohen zeitlichen und messtechnischen Aufwand. Um sich an alle Begebenheiten vor Ort anpassen zu können, müssen die einzelnen Messtechnikkomponenten eine hohe Mobilität und Flexibilität aufweisen. Die von der messtechnischen Abteilung des Instituts für Landtechnik und Tierhaltung selbst gefertigten Messmodule wurden so ausgeführt, dass ein problemloser und sicherer Transport in einem Anhänger möglich war.

Der Ablauf einer Messung stellte sich wie folgt dar:

Die Anfahrt zu den einzelnen Anlagen dauerte ca. 2 bis 3 h. Der Aufbau der Messtechnik vor Ort benötigte in der Regel 1 bis 1,5 h, da das FID mindestens 1 h Vorlauf benötigte, um einsatzfähig zu sein. Für den Abbau und die Heimfahrt war dieselbe Zeit zu veranschlagen, so dass an einem Arbeitstag eine kontinuierliche Messung von höchstens 4 h Dauer möglich war.

3.2.1 Messaufbau

Um alle wesentlichen Stoff- und Energieströme eines BHKW erfassen zu können, ist eine Ausrüstung verschiedener Messpunkte mit einzelnen Messinstrumenten nötig. In Abb. 7 ist der gesamte Messaufbau grafisch dargestellt.

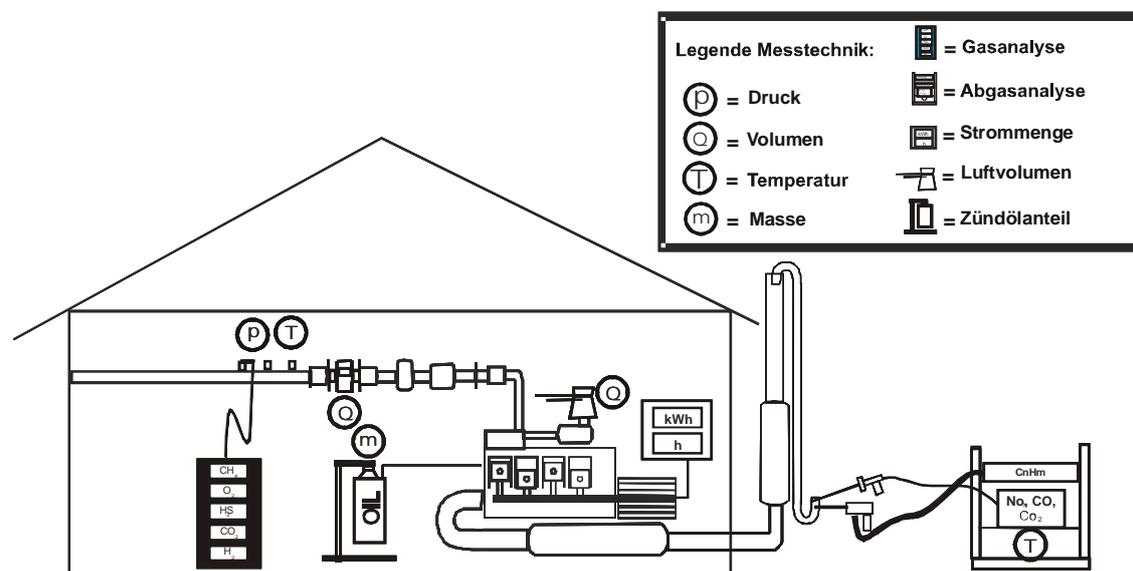


Abb. 7: Aufbau für die kontinuierliche Messung des Leistungs- und Emissionsverhaltens eines BHKW unter Praxisbedingungen

Der Messaufbau erfasste zum einen die dem BHKW zufließenden Ströme (Input) und zum anderen die vom BHKW abfließenden Ströme (Output). Zur Inputseite gehörte die Gasstrecke, in der Gasvolumen, -temperatur, -druck, -feuchte und -zusammensetzung gemessen wurden, das Volumen der Verbrennungsluftzufuhr sowie die Zündölmenge. Zum Output gehörten die abgegebene elektrische Leistung zur Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrades des BHKW, sowie das Abgasvolumen und die Ab-

gaszusammensetzung. Die Messung der Abgaszusammensetzung wurde über die Ableitung eines Teilstromes mit Hilfe eines Edelstahlrohres realisiert (Abb. 7, rechts). In Abb. 8 ist beispielhaft der Aufbau der eingesetzten Messgeräte an einem Zündstahl-BHKW dargestellt. Im Bild nicht zu sehen ist die Vorrichtung zur Zündölerfassung, die sich hinter dem BHKW befindet, sowie der Aufbau der Abgasmessung, der sich außerhalb des BHKW-Raumes befindet.

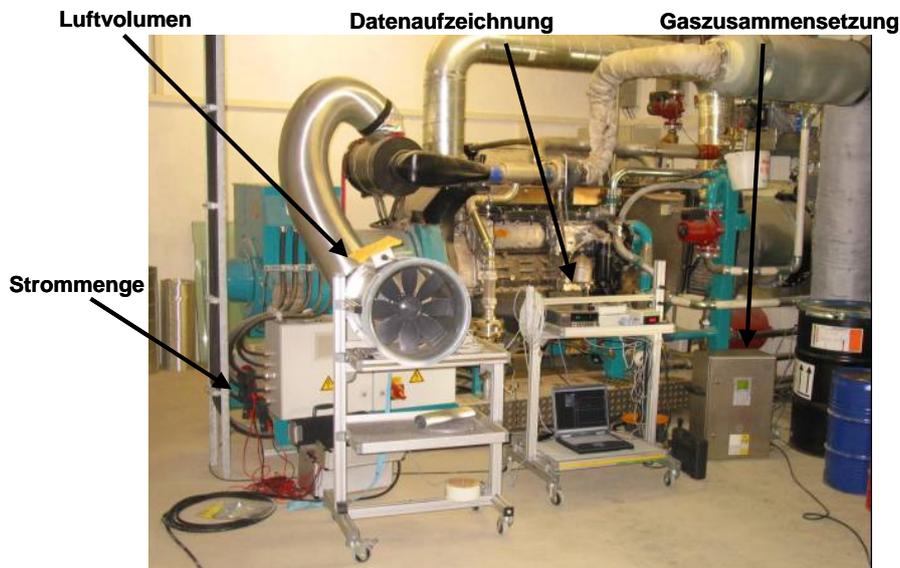


Abb. 8: Messgeräteaufbau am BHKW in der Praxis

3.2.2 Verwendete Messtechnik

3.2.2.1 BHKW-Input

Der Input in das BHKW umfasst, wie oben bereits beschrieben, drei Bereiche: Brenngas, Zuluft und Zündöl. Die Gaszusammensetzung und das Gasvolumen bestimmen den Energieinput in das BHKW.

Die Gaszusammensetzung wurde mit einem automatischen Gasanalyse-System bestimmt (Fa. AWITE Bioenergie, Niederhummel). Das Gasvolumen wurde mit verschiedenen Gaszählern bzw. Gasdurchflussmessern erfasst (s. u.). Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Untersuchungen zu gewährleisten, ist eine Umrechnung der Gasvolumina auf Normbedingungen Voraussetzung. Für die Umrechnung sind Angaben über Gastemperatur (PT 100) und Gasdruck (Barogebir) erforderlich (Tab. 8). Aufgrund des oben beschriebenen zeitlich engen Rahmens für die Messungen war die problemlose Anpassung der umfangreichen Messtechnik an die Gegebenheiten der jeweiligen Anlage vor Ort von größter Bedeutung. Deshalb wurde die Gasleitung jeder Anlage im Voraus mit 3 Messstutzen in der Gasstrecke ausgestattet, so dass für eine Messung keine weiteren Einbauten in bestehende Leitungen notwendig waren (Abb. 9).



Abb. 9: Messstutzen für die Messung von Gaszusammensetzung, - druck, –temperatur und –feuchte

Für eine exakte Bestimmung der verbrauchten Menge an Biogas wäre ein Einbau eines geeichten Gaszähler an jedem untersuchten BHKW erforderlich geworden. Dies hätte jedoch einen sehr hohen finanziellen Aufwand dargestellt. 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. Zwei der untersuchten BHKW waren im Zuge eines vom Institut für Landtechnik und Tierhaltung durchgeführten Projektes zur wissenschaftlichen Begleitung von Biogasanlagen in der Praxis mit Gasdurchflussmessern ausgestattet worden. Bei den anderen Anlagen wurden die vorhandenen Messeinrichtungen mit einem Referenzgerät überprüft und die Messwerte gegebenenfalls korrigiert. In Tab. 7 sind die an den Anlagen installierten Messeinrichtungen zur Erfassung der Gasmenge und die Referenzgeräte aufgelistet.

Tab. 7: An den untersuchten BHKW vorhandene bzw. für Referenzmessungen eingesetzte Geräte zur Erfassung der Gasmenge

BHKW	Messverfahren	Hersteller	Typ	Genauigkeit
110 kW _{el.}	Balgengaszähler	Krom Schroeder	BK-G25	± 0,2 % v. Messwert
überprüft mit	Balgengaszähler	GMT	DZ-G25	keine Angaben
250/265 kW _{el.}	Wirbelstrom-Durchflussmesser	ABB	Trio-Wirl-VT4	≤ ± 1 % v. M. unter Referenzbedingungen
überprüft mit	Balgengaszähler	Elster	BK-G40	± 0,5 %
190 kW _{el.}	Turbinenradzähler	RMG	TERZ 94	± 1,5 % v. Messwert
überprüft mit	Turbinenradzähler	Elster	Q/K65	± 1,0 % v. Messwert
324 kW _{el.}	thermischer Massenstromzähler	ABB	Sensyflow	± 1,8 % v. Messwert + 0,05 % v. Endwert
526 kW _{el.}	thermischer Massenstromzähler	ABB	Sensyflow	± 1,8 % v. Messwert + 0,05 % v. Endwert

Bei einer ungenügend ausgelegten Gaskühlstrecke können teilweise erhebliche Mengen an Wasserdampf im Biogas enthalten sein, was die Verbrennung im Motor negativ beeinflusst (Kühlung, Korrosion, etc.). Die Effektivität der Gaskühlung wurde durch einen Hygrometer erfasst (Fa. Bartec, Bad Mergentheim).

Für eine optimale Verbrennung im Motor ist ein bestimmter Sauerstoffanteil nötig, der über die Luftzufuhr geregelt wird. Aus der Aufzeichnung der zugeführten Luft lassen sich Aussagen über den Lambda-Wert (λ = Luftüberschusszahl) und damit über die Güte der Verbrennung treffen und zum anderen in Verbindung mit der zugeführten Brennstoffmenge der Abgasstrom und damit auch die Schadstofffrachten ermitteln. Die Messung des zugeführten Luftvolumenstrom erfolgte mit einem Messtrichter (testovent 410, 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, welcher in die bestehende Zündölleitung integriert wurde (siehe Tab. 8 und Abb. 10). In Abb. 10 sind die beschriebenen Messinstrumente zur Veranschaulichung im Praxiseinsatz dargestellt.

Tab. 8: Messtechnik zur Erfassung des BHKW-Input

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



Abb. 10: Messgeräte für Gaskomponenten, Luftzufuhr und Zündölmenge im Praxiseinsatz

3.2.2.2 BHKW-Output

Die Messungen des BHKW-Output konzentrieren sich auf die Abgaszusammensetzung und die abgegebene Strommenge. Neben den hauptsächlichen Schadkomponenten NO_x und CO (Testo 350) wurden die Gesamtkohlenwasserstoffe (FID) erfasst (Tab. 9). Anhand der abgegebenen Strommenge (KBR Multimess), die direkt am BHKW-Schaltschrank abgegriffen wurde (Abb. 11, links) und der zugeführten Energiemenge konnte nach DIN ISO 3046-1 (1995) der elektrische Wirkungsgrad des BHKW ermittelt werden. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 11 die verwendete Messtechnik noch einmal im Praxiseinsatz dargestellt.

Tab. 9: Messtechnik zur Erfassung des BHKW-Output

Komponente	Messgerät	Einheiten
Gesamtheit der Kohlenwasserstoffe	FID	mg/m ³
Abgaszusammensetzung (NO _x , CO, CO ₂ , O ₂ , Temperatur)	Testo 350	mg/m ³ ; %, °C
Strommenge	KBR Multimes	kWh



Abb. 11: Messgeräte für Leistung und Abgaszusammensetzung im Praxiseinsatz

Um Problemen, die erst bei den Messungen vor Ort auftreten, vorzubeugen, wurden alle Anlagen einer zwei- bis dreistündigen Probemessung unterzogen (siehe Kap. 4.1). Bei diesen Testmessungen gab es bei den Zündstrahl-BHKW erhebliche Schwierigkeiten mit der Kompatibilität der Messtechnik und der sehr komplexen Zündölversorgung. Daher wurde beim 110 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW der am BHKW befindliche Zündölzähler in die Aufzeichnungen mit aufgenommen. Für die Messungen an den 250 kW_{el.} und 265 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW stellte die Firma H-J Schnell freundlicherweise ihre eigene Zündölentnahmeeinheit (Abb. 12) kostenlos zur Verfügung.



Abb. 12: Vorrichtung der Firma H-J Schnell zur Integration der Zündölwiegevorrichtung in die bestehende Zündölleitung von Zündstrahl-BHKW

3.3 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.

3.3.1 BHKW-Input

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

3.3.1.1 Gasmenge (Normgasvolumen)

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

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

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]

3.3.1.2 Zündölmenge

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

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

W_Z = Energie im Zündöl [kWh]
 m = ermittelte Masse des Heizöls [kg]
 ρ = Dichte von Heizöl extraleicht [kg/l]
 H_{uZ} = Heizwert von Heizöl extraleicht [kWh/l]

3.3.1.3 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/m³ bzw. 9,97 kWh/m³ unter. Der Gesamtenergieinput errechnet sich wie folgt:

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

W_G = zugeführte Gesamtenergiemenge [kWh]
 V_N = Biogasmenge (genormt) [m³]
 C_K = Methankonzentration (Kalibrierdruck) [%]
 H_{uM} = Heizwert von Methan [kWh/m³]

$$W_Z = \text{Energiegehalt des Zündöls [kWh]}$$

3.3.2 BHKW-Output

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

3.3.2.1 Abgaszusammensetzung

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

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

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

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 $22,4 \text{ mol}^{-1}$ (bei Normbedingungen: $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$) ergibt. In Tab. 10 sind diese Faktoren für die verschiedenen Gase unter der Bezeichnung Moldichte dargestellt.

Tab. 10: Molgewicht und Moldichte der gemessenen Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung)

Messgröße	Molmasse [g/mol]	Moldichte [mg/ml]
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 Methode zur Umrechnung vor:

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

E_M = ermittelte Massenkonzentration im Abgas [mg/m^3]
 E_B = Massenkonzentration bezogen auf 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.-%.

3.3.2.2 Abgasmenge (Zuluft)

Aus der Zusammensetzung und den Mengen der dem Motor zugeführten Stoffströme wird der mengenmäßige Abgasvolumenstrom berechnet. Hierfür werden 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 gehen, 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 wird über eine Differenzdruckmessung bestimmt und in einen Volumenstrom umgerechnet.

1. Gesamtvolumenstrom: $\dot{V} = 1,291 * \sqrt{p_{dyn}} * 22$ in m³*h⁻¹
2. Sauerstoffanteil: $V(O_2) = V_{ges} * 0,2095$
3. Sauerstoffmenge: $n(O_2) = \frac{p * V(O_2)}{R * T}$
4. Normvolumen: $V_N = \frac{n * R * T}{p}$; wobei T=273K und P=101300Pa

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.

$$n = \frac{m(CO_2)}{M(CO_2)} = \frac{2,63kg}{0,044 \frac{kg}{mol}} = 59,77 mol \text{ (C-Atome) in einem Liter verbrannten Heizöls}$$

Durch die Verbrennung entsteht folgendes Normvolumen an CO₂:

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

Verbrennung des Heizöls: C_nH_{2n} + 1,5n O₂ → n CO₂ + n H₂O

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

$$m(\text{H}_2\text{O}) = 59,77 \text{ mol} * 0,018 \text{ kg/mol} = 1,08 \text{ kg H}_2\text{O/Liter}$$

Heizöl benötigt 1,5*n Sauerstoff des entstehenden CO₂

$$\text{also } 1,5 * 59,77 = 89,66 \text{ mol O}_2/\text{l Heizöl}$$

oder in Normvolumen ausgedrückt: 2,008 Nm³ O₂/l Heizöl.

Biogas:



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:

Biogasmenge	57,7 Nm ³ *h ⁻¹
Luftmenge:	469,33 Nm ³ *h ⁻¹
Zündölmenge:	4,2 l*h ⁻¹

Tab. 11: Bilanz der zugeführten Stoffmengen

	CH ₄	CO ₂	O ₂	N ₂	C
Biogas	n=1355 mol*h ⁻¹	n=1260 mol*h ⁻¹			
Zuluft			4388 mol*h ⁻¹ 98,3Nm ³ *h ⁻¹	366,5 Nm ³ *h ⁻¹	
Heizöl					251 mol*l ⁻¹

Tab. 12: Volumenstrom der Abgaskomponenten

	CO ₂	N ₂	H ₂ O	O ₂
Biogas	n=1355 mol*h ⁻¹ + n=1260 mol*h ⁻¹ 58,59 Nm ³ *h ⁻¹		2*1355 mol*h ⁻¹ 60,70 Nm ³ *h ⁻¹	
Luft		366,5 Nm ³ *h ⁻¹		29,15Nm ³ *h ⁻¹
Heizöl	1,34Nm ³ *l ⁻¹ 5,63 Nm ³ *h ⁻¹		1,34Nm ³ *l ⁻¹ 5,63 Nm ³ *h ⁻¹	

Ausstoß pro Stunde:	64,22 Nm ³ *h ⁻¹ CO ₂
	366,5 Nm ³ *h ⁻¹ N ₂
	66,33 Nm ³ *h ⁻¹ H ₂ O entspricht 53,3 kg*h ⁻¹
	29,15 Nm ³ *h ⁻¹ O ₂ berechnet
Abgas gesamt:	526,3 Nm ³ *h ⁻¹
Abgas ohne H ₂ O:	459,97 Nm ³ *h ⁻¹

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

Deshalb wird der trockene Volumenstrom von $459,97 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ in Bezug auf 1% H_2O gesetzt, was einen Volumenstrom von **$464,62 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$** ergibt.
 Aus den $29,15 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (6,34 % O_2) werden bei 5 % O_2 Bezugssauerstoff $23 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.
 Somit ergibt sich ein trockenes Gesamtabgasvolumen von $453,88 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

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: $98,3 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
 - $\text{O}_{2\text{nötig}}$: $69,14 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
- $\Rightarrow \lambda = 1,42$

3.3.2.3 Elektrischer Wirkungsgrad

Zur Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW werden der produzierte Generatorstrom sowie die dem Motor zugeführte Gesamtenergiemenge benötigt. Am motorischen Prozess beteiligte elektrische Verbraucher (Hilfseinrichtungen wie z. B. Wasserpumpe und Gasgebläse), die Generatorstrom beziehen, jedoch i.d.R. hinter der Messstelle angeklemt sind, müssen vom Messwert wieder abgezogen werden, da sie die nutzbare Strommenge reduzieren. Der Einfluss von Schwankungen in der Leistungsaufnahme dieser Verbraucher auf den Wirkungsgrad des BHKW wird als vernachlässigbar betrachtet. Für die Berechnungen wird deshalb die Leistungsaufnahme unter Nennbelastung herangezogen.

Die Leistungsfähigkeit bzw. der Kraftstoffverbrauch von Motoren ist abhängig vom Aufstellungsort und damit von den dort vorherrschenden Bedingungen. Die Datenerhebung und Umsetzung exakter Leistungsdaten von BHKW im Praxisbetrieb ist in der DIN ISO 3046: „Hubkolben-Verbrennungsmotoren“ vom Dezember 1995 geregelt. Um die Motoren bezüglich des Wirkungsgrades miteinander vergleichen zu können, sind deshalb die vor Ort ermittelten Daten umzurechnen, indem die in der DIN-Norm aufgeführten Bezugsbedingungen zugrunde gelegt werden:

- Luftdruck: $p_r = 100 \text{ kPa}$
- Lufttemperatur: $T_r = 298 \text{ K}$ ($t_r = 25 \text{ °C}$)
- relative Luftfeuchte: $\varphi_r = 30 \%$
- Ladeluftkühlmitteltemperatur: $T_{cr} = 298 \text{ K}$ ($t_{cr} = 25 \text{ °C}$)

Mit Hilfe der im BHKW-Raum ermittelten Daten ist der k-Wert für einen Motorentyp zu bestimmen und mit diesem der Korrekturfaktor β aus einer Tabelle abzulesen, die dem Anhang der DIN-Norm beigelegt ist. Damit kann der Energieverbrauch und der Wirkungsgrad eines Motors unter Bezugsbedingungen berechnet werden. Die Formel zur Bestimmung des k-Wertes lautet wie folgt:

$$k = (R_1)^m * (R_2)^n * (R_3)^s \quad \text{dabei ist} \quad R_1 = \frac{p_x}{p_r} \quad R_2 = \frac{T_r}{T_x} \quad R_3 = \frac{T_{cr}}{T_{ex}}$$

- p_x = Umgebungs-Gesamtdruck am Aufstellungsort
- T_x = Umgebungs-Lufttemperatur am Aufstellungsort
- T_{cx} = Umgebungs-Ladeluftkühlmitteltemperatur am Aufstellungsort

Die in der Formel mit m, n und s bezeichneten Exponenten sind ebenfalls in der DIN ISO 3046 enthalten und davon abhängig, um welchen Motorentyp es sich handelt (Zündstrahl- oder Gasmotor) und ob die Maschine mit einem Abgasturbolader ausgestattet ist bzw. ob die Ladeluft gekühlt wird. Zur Bestimmung des Korrekturfaktors β wird der Wert $\eta_m = 0,8$ (mechanischer Wirkungsgrad) zugrunde gelegt. Auf eine Berücksichtigung des oberen Grenzwertes für den Kraftstoffverbrauch von 5 % wurde bei diesen Untersuchungen verzichtet. In Tab. 13 sind die zur Berechnung der Wirkungsgradänderung eines abgasturbogeladenen Gasmotors zugrunde gelegten Mess- und Tabellenwerte beispielhaft dargestellt.

Tab. 13: Wirkungsgradänderung eines Gas-BHKW durch Umrechnung auf Bezugsbedingungen gemäß DIN ISO 3046

Umgebungsdruck	Temperatur Zuluft	m	n	s	k-Faktor	Korrekturfaktor	Energiebedarf Aufstellungsort	Energiebedarf Bezugsbed.	Stromproduktion	original η	korrigiert η
mbar	K				k	β	kWh	kWh	kWh	%	%
962	296,7	0,86	0,55	0	0,97	1,0055	69,21	68,84	20,30	29,33	29,49

4 Ergebnisse

Um die Messgeräte an die jeweiligen Anlagen zu adaptieren, wurde die erste Messung als Testmessung durchgeführt. Anschließend wurden an jedem BHKW drei Messzyklen vorgenommen, die jeweils aus einer Messung vor und nach einer größeren Wartungsmaßnahme bestanden.

4.1 Testmessungen

Die in Kap. 3.1 vorgestellten 5 Anlagen wurden von verschiedenen Herstellern/Planern konzipiert und besitzen BHKW in sehr unterschiedlichen Leistungsklassen. Daher musste die benötigte Messtechnik an jede Anlage individuell angepasst werden. Aus diesem Grund wurde nach der Auswahl der geeigneten Messgeräte an jedem BHKW eine zwei- bis dreistündige Testmessung durchgeführt. Somit konnte die Funktionalität der Messtechnik an dem spezifischen BHKW überprüft und ein störungsfreier Ablauf der folgenden Messungen gewährleistet werden. Außerdem lieferte die Testmessung Hinweise auf den Zustand des BHKW zu Beginn der Messkampagne und einen ersten Vergleichspunkt für die nachfolgenden Messungen. In Tab. 14 sind die geleisteten Betriebsstunden der einzelnen BHKW zum Zeitpunkt der Testmessung aufgeführt. Nur zwei BHKW wiesen Laufzeiten über 5000 Bh auf.

Tab. 14: Anzahl Betriebsstunden der einzelnen BHKW zu Beginn der Messungen

BHKW	Zündstrahl			Gas		
Leistung (kW _{el.})	110	250	265	190	324	526
Betriebsstunden (Bh)	1460	6480	4780	8000	4900	3935

Die in Abb. 13 dargestellten Messwerte zeigen die durchschnittlichen Abgaswerte und elektrischen Wirkungsgrade während der Testmessungen. Die jeweiligen Abgasgrenzwerte der TA-Luft für NO_x bzw. CO für Anlagen > 1 MW Feuerungswärmeleistung sind in der Abbildung farblich markiert. Besonders bei den Gas-BHKW sind bereits deutliche Unterschiede festzustellen (Abb. 13).

Die Einhaltung der CO-Grenzwerte stellte bei keinem der untersuchten BHKW ein Problem dar. Die Grenzwerte wurden, außer beim 526 kW_{el.} Gas-BHKW, höchstens zur Hälfte erreicht. Dagegen hielt kein Gas-BHKW den vorgeschriebenen NO_x-Grenzwert von 500 mg*m⁻³ Abgas ein, während bei den Zündstrahl-BHKW nur beim 110 kW_{el.} BHKW eine markante Überschreitung des Grenzwertes für Zündstrahl-BHKW (1000 mg*m⁻³) zu verzeichnen war (Abb. 13). Vor allem der 190 kW_{el.} Gas-BHKW wies mit 1800 mgNO_x*m⁻³ Abgas eine fast 4-fache Überschreitung der Grenzwerte auf.

Die im Abgas gemessenen Kohlenwasserstoffgehalte („Methanschlupf“ oder genauer C_nH_m) der Zündstrahl-BHKW sind aufgrund der höheren Drücke in den Kolben bei der Verbrennung und der daraus resultierenden größeren Ventilüberschneidung erwartungsgemäß wesentlich höher als die der Gas-BHKW. Auffällig ist der recht hohe Wert beim 526 kW_{el.} Gas-BHKW. Nach Rücksprache mit dem Anlagenbetreiber konnte der Grund jedoch festgestellt werden: Dieses BHKW wird auch mit höherer Verdichtung gefahren, weil dadurch laut Herstellerfirma ein höherer elektrischer Wirkungsgrad erzielt werden kann (40,4 % laut Herstellerangabe). Der angegebene Wirkungsgrad konnte in diesem Fall in den Messungen zwar nicht bestätigt werden, war

jedoch im Vergleich mit den anderen überprüften Gas-BHKW mit 38,8% immer noch sehr hoch. Die Zündstrahl-BHKW wiesen mit Werten von 38,4 % bis 41,4 % für den elektrischen Wirkungsgrad sehr gute Werte auf (Abb. 13).

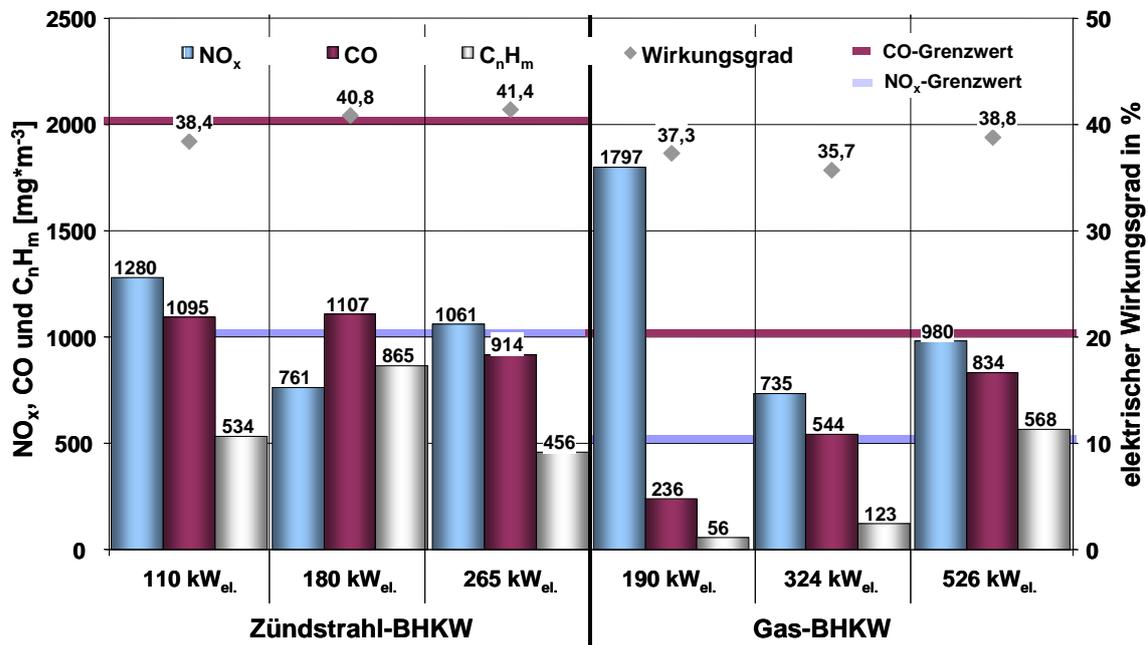


Abb. 13: Abgaswerte und Wirkungsgrade der Testmessungen der einzelnen BHKW

Der relativ hohe Gehalt an C_nH_m im Abgas des 180 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW ist bedingt durch einen Betrieb bei Teillast. Zu Beginn der Messungen wurde dieses BHKW, welches als 250 kW_{el.} BHKW angeschafft worden war, nur im Teillastbetrieb mit ca. 180 kW_{el.} betrieben, da die Anlage noch keine volle Auslastung erreicht hatte. Dies wurde im Verlauf der weiteren Messungen noch verändert (siehe hierzu Kap. 4.2.2).

4.2 Messreihen der einzelnen BHKW

Nach Abschluss der Testmessungen wurden letzte Anpassungen der Messtechnik vorgenommen und es wurde mit den Messreihen an den einzelnen BHKW begonnen. Hierbei wurde zuerst eine Messung vor einer größeren Wartungsmaßnahme (v.W.) vorgenommen. Da es sich bei allen BHKW um relativ neue Aggregate handelte, wurden mit Ausnahme des 190 kW_{el.} Gas-BHKW alle in regelmäßigen Abständen (alle 2.000 bis 4.000 Bh) vom Service-Team des Herstellers gewartet und eingestellt. Nach dieser Wartungsmaßnahme wurde eine weitere Messung (n.W.) durchgeführt. Dieser Messzyklus wurde bei jedem BHKW dreimal wiederholt.

4.2.1 110 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW

Die erste Messung erfolgte im November 2006 nach ca. 3800 Bh. Die letzte Messung wurde im September 2007 nach ca. 10.500 Bh durchgeführt. Das BHKW wurde vom Serviceteam des Herstellers nach ca. 4.000, 7.000 und 10.000 Bh routinemäßig gewartet und eingestellt. Die jeweilige Wartung wurde vom Anlagenbetreiber veranlasst.

Abb. 14 zeigt die gemessenen Abgaswerte, die elektrische Leistung und den erzielten elektrischen Wirkungsgrad (nach DIN 3046) für alle drei Messzyklen. Die bei

BlmSchG-Anlagen über 1 MW Feuerungswärmeleistung einzuhaltenen Grenzwerte der TA-Luft sind farblich markiert. Da die untersuchte Anlage jedoch unter 1 MW installierter Leistung lag, galten in diesem Fall keine verbindlichen Grenzwerte, sondern lediglich Richtwerte von $1500 \text{ mg NO}_x \cdot \text{m}^{-3}$ bzw. $2000 \text{ mg CO} \cdot \text{m}^{-3}$. Trotzdem wurde der Hersteller angehalten, bei der Wartung die Einhaltung der Grenzwerte der TA-Luft zu beachten.

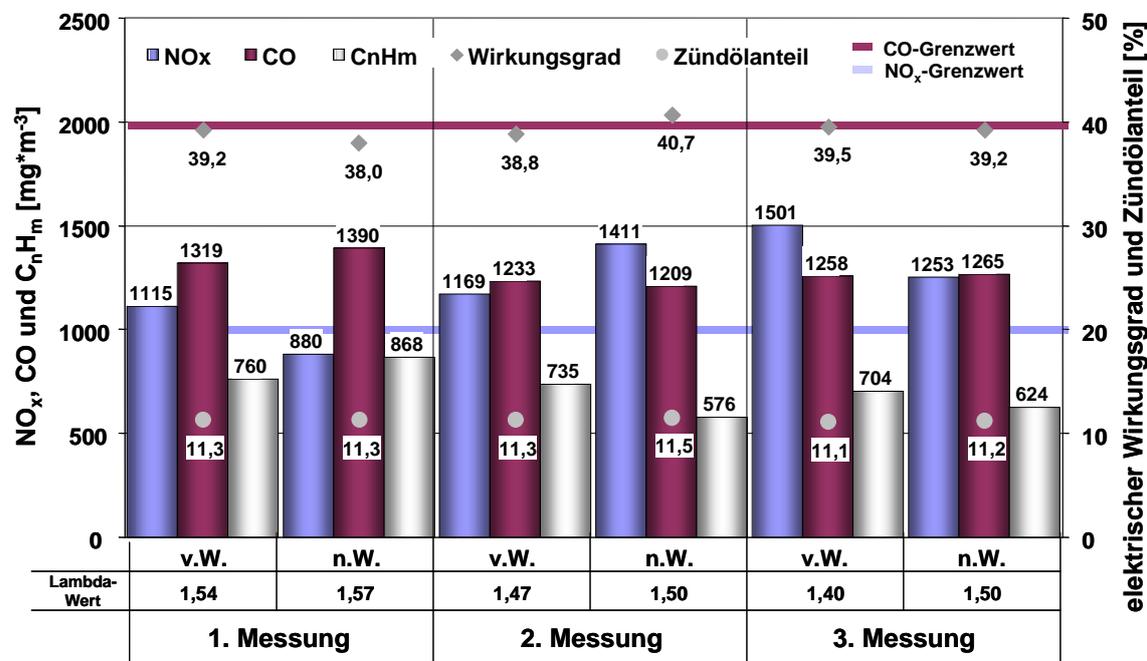


Abb. 14: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 110 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 15: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (110 kW_{el.}-BHKW)

Messung	1. Messung			Δx [%]	2. Messung			Δx [%]	3. Messung			Δx [%]
	v.W.	n.W.			v.W.	n.W.			v.W.	n.W.		
Betriebsstunden Bh	3.800	4.310	-		6.625	7.500	-		10.030	10.540	-	
Lambda-Wert λ	1,54	1,57	+1,8		1,47	1,50	+1,4		1,40	1,50	+7,2	
NO _x [mg·m ⁻³]	1.115	880	-21,0		1.169	1.411	+20,7		1501	1253	-16,5	
C _n H _m [mg·m ⁻³]	760	868	+14,3		735	576	-21,6		704	624	-11,3	
el. Leistung [kWh]	111,0	109,8	-1,1		110,1	109,3	-0,7		110,6	110,7	+0,1	
el. Wirkungsgrad [%]	39,2	38,0	-3,2		38,8	40,7	+4,7		39,5	39,2	-0,7	
Gasverbrauch [m ³ ·h ⁻¹]	48,2	51,5	+6,9		50,4	49,6	-1,5		51,0	49,6	-2,7	
Methangehalt [%]	50,9	49,2	-3,3		50,1	49,4	-1,4		49,3	50,8	+3,1	

Nach der ersten Wartung wurden NO_x-Konzentrationen im Abgas unter $1000 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ gemessen, gleichzeitig wurde jedoch eine Erhöhung des C_nH_m-Gehaltes und eine Verminderung des elektrischen Wirkungsgrades festgestellt. Die CO-Werte lagen unterhalb des Grenzwertes auf einem hohen Niveau (Abb. 14). Der Gehalt an Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) im Abgas war, wie bei den meisten Zündstrahl-BHKW, aufgrund des hohen Verbrennungsdruckes im Kolben, der größeren Ventilüberschneidungen und eines damit verbundenen höheren sogenannten „Methanschlupfes“ relativ hoch. Die Erhöhung im gewarteten Betriebszustand wurde durch den etwas geringeren Methangehalt im Biogas (Absenkung von ca. 51 % auf 49 %) bei gleichzeitiger

Erhöhung des Luftüberschusses (Verminderung des Energiegehaltes) verursacht. Dadurch wurde auch die elektrische Leistung geringfügig vermindert (siehe Tab. 15). Bei der zweiten Messreihe wurde durch die Einstellung des BHKW ein deutlich höherer elektrischer Wirkungsgrad bei gleichbleibender Leistung und vermindertem C_nH_m -Ausstoß festgestellt. Jedoch nahm die NO_x -Konzentration deutlich zu (Abb. 14 und Tab. 15).

Die dritte Messreihe zeigte wiederum eine Verringerung der NO_x -Konzentration mit einem geringerem elektrischen Wirkungsgrad. Der Zündölanteil lag bei allen Messungen im Bereich von 11,1 bis 11,5 %. Die höchsten elektrischen Wirkungsgrade wurden auch bei den höchsten NO_x -Konzentrationen erzielt (Abb. 14).

4.2.2 250 kW_{el.} Zündstrahl- BHKW

Wie bereits in Kap. 4.1 beschrieben, wurde zu Beginn der Messungen das 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW nur bei einer Leistung von ca. 180 kW_{el.} betrieben. Unter diesen Bedingungen wurde auch die erste Messreihe durchgeführt. Bei der Auswertung dieser ersten Messung nach 6550 Bh stellte sich jedoch heraus, dass die gewonnenen Daten keinen regulären Betrieb widerspiegeln, sondern einen typischen Teillastbetrieb wiedergeben. Dies zeigte sich besonders an der geringen NO_x - und gleichzeitig sehr hohen C_nH_m -Konzentration im Abgas, welche durch einen hohen Luftüberschuss ($\lambda=1,7$) und eine daraus resultierende ungenügende Verbrennung hervorgerufen werden (Abb. 15, linke Seite).

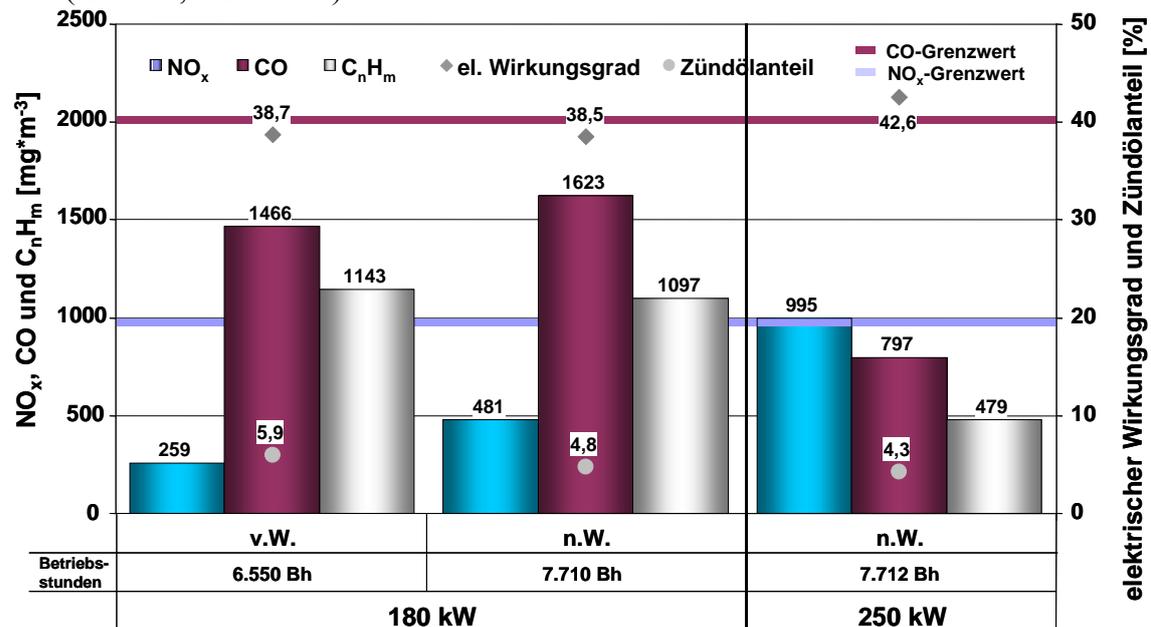


Abb. 15: BHKW 2: Einfluss des Teillastbetriebes (180 kW_{el.}) auf Abgasemissionen und Wirkungsgrad im Gegensatz zum Vollastbetrieb (250 kW_{el.})

Tab. 16 Veränderung der Messwerte durch die Erhöhung auf Volllastbetrieb

Messung	180 kW _{el.}	250 kW _{el.}	Δx
	n.W	n.W	[%]
Lambda- Wert λ	1,66	1,47	-11,5
NO _x [mg*m ⁻³]	481	995	+107,1
C _n H _m [mg*m ⁻³]	1.097	479	-56,3
el. Leistung [kWh]	176,7	241,5	+36,7
el. Wirkungsgrad [%]	38,5	42,6	+10,3
Gasverbrauch [Nm ³ *h]	85,1	110,2	+29,6
Methangehalt [%]	50,7	50,7	±0,0

Um keine Verfälschung der Messergebnisse dieses BHKW zu erhalten wurde nach der Wartung die Leistung des BHKW auf Volllast erhöht. Vergleichsweise wurde eine zweistündige Messung jeweils bei 180 kW_{el.} und 250 kW_{el.} vorgenommen, um eventuelle Unterschiede im Leistungs- und Effizienzverhalten zu dokumentieren. Wie Abb. 15 und Tab. 16 zeigen, waren diese Unterschiede beträchtlich. Es konnte beobachtet werden, dass sich durch die bessere Verbrennung und Leistungsausnutzung des Brennstoffes (weniger Luftüberschuss = mehr Energieinhalt) der elektrische Wirkungsgrad um 10,3 %, von 38,5 % auf 42,6 %, erhöhte. Gleichzeitig konnte der Ausstoß an C_nH_m halbiert werden. Im Gegenzug dazu verdoppelte sich jedoch die NO_x-Konzentration im Abgas. Sie blieb allerdings innerhalb des erlaubten Grenzwertes von 1000 mg*m⁻³ (Abb. 15 und Tab. 16). Diese Messung zeigt deutlich den Einfluss eines Teillastbetriebes gegenüber dem Volllastbetrieb. Im weiteren Verlauf wurde dieses BHKW dann nur noch bei Volllast (250 kW_{el.}) untersucht.

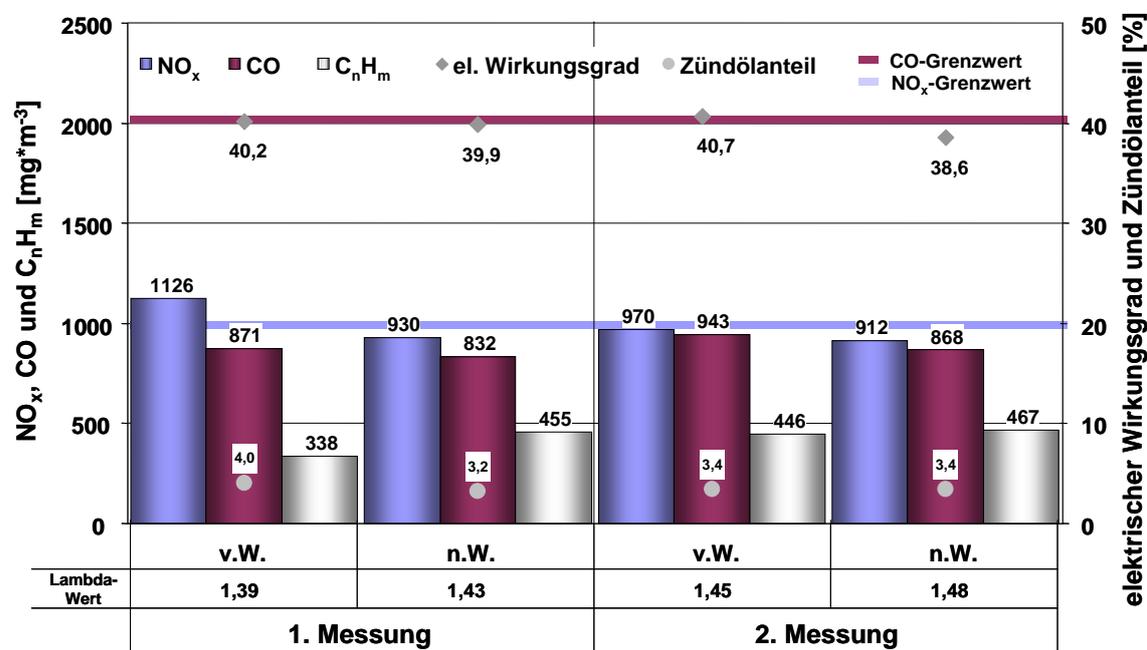


Abb. 16: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 250 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 17: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (250 kW_{el}-BHKW)

Messung	1. Messung		ΔX [%]	2. Messung		ΔX [%]
	v.W.	n.W.		v.W.	n.W.	
Betriebsstunden Bh	10.250	10.270	-	12.290	13.100	-
Lambda-Wert λ	1,39	1,43	+3,1	1,45	1,48	+1,9
NO_x [mg*m⁻³]	1.126	930	-17,4	970	912	-6,0
C_nH_m [mg*m⁻³]	338	455	+34,5	446	467	+4,7
el. Leistung [kWh]	247,3	245,0	-0,9	249,3	248,5	-0,3
el. Wirkungsgrad [%]	40,2	39,9	-0,7	40,7	38,6	-5,3
Gasverbrauch [Nm³*h]	118,3	120,6	+1,9	120,5	119,1	-1,1
Methangehalt [%]	51,1	50,4	-1,4	49,7	52,3	+5,3

Die Messungen des BHKW im Regelbetrieb bei Volllast ergaben sehr gute Werte bezüglich der NO_x-Konzentration (Einhaltung der Grenzwerte) und des elektrischen Wirkungsgrades (ca. 40 %; vgl. Abb. 16). Dies deutet auf einen sehr gut eingestellten und gewarteten Motor, da sich die Werte zwischen den Wartungsterminen kaum veränderten (siehe Abb. 16 und Tab. 17). Auffällig ist jedoch auch hier der offensichtliche Zusammenhang zwischen Lambda-Wert, NO_x- und C_nH_m-Konzentration sowie die Auswirkung auf die elektrische Leistung und den Wirkungsgrad (Tab. 17).

4.2.3 265 kW_{el} Zündstrahl-BHKW

Das 265 kW_{el} Zündstrahl-BHKW ist von der Bauart mit dem 250 kW_{el} BHKW (siehe Kap. 4.2.2) identisch. Dieses Aggregat ist jedoch zusätzlich mit einem „Turbocompound“ ausgerüstet. Dieser Compounder ist dem Abgasturbolader nachgeschaltet und besitzt eine Turbine, die durch das Abgas bis auf 50.000 U*min⁻¹ beschleunigt wird. Die daraus resultierende Kraft wird über eine Kupplung an den Antriebsstrang übertragen. Dadurch wird eine Erhöhung der elektrischen Leistung um 15 kW erreicht und der elektrische Wirkungsgrad um 2 % gesteigert.

Die erste Messreihe erfolgte nach 7.700 Bh. Bei der Wartung nach 8.000 Bh stellte sich jedoch heraus, dass durch einen Defekt des Turbocompounders Metallspäne in den Motorraum gelangt waren. So musste der komplette Motorblock vom Hersteller ersetzt werden. Nach Erneuerung des BHKW konnte ein sehr hoher elektrischer Wirkungsgrad von fast 43,0 % gemessen werden. Jedoch fand bis zu dem Zeitpunkt noch keine Einstellung der Abgaswerte auf die geforderten Grenzwerte statt (Abb. 17).

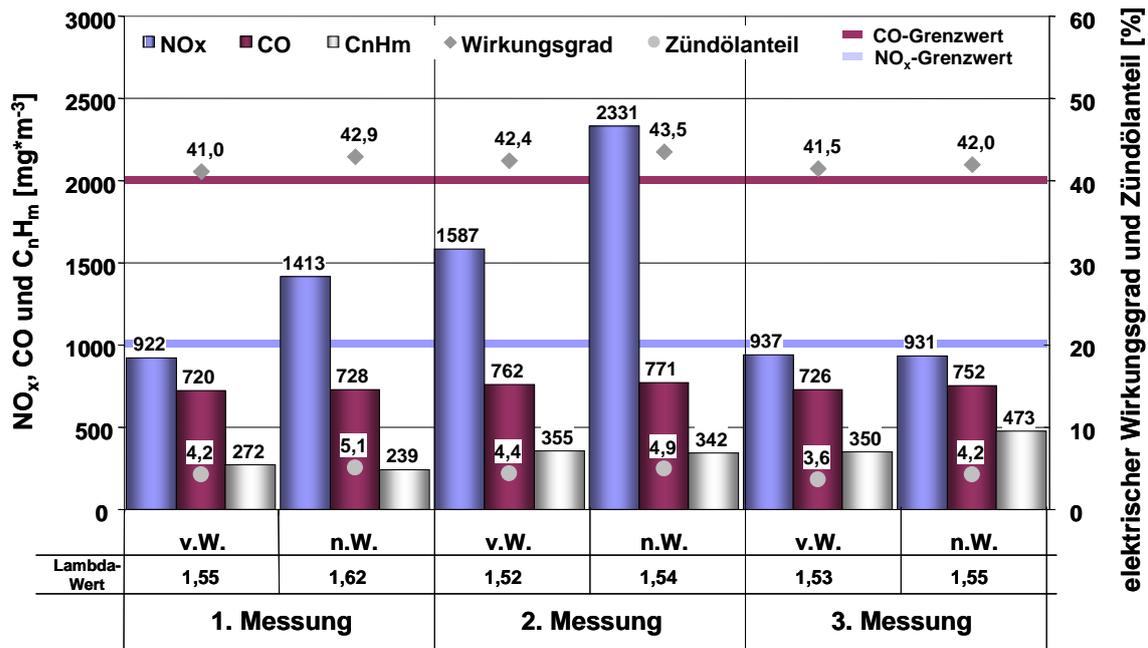


Abb. 17: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 265 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 18: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (265 kW_{el.}-BHKW)

Messung	1. Messung		ΔX [%]	2. Messung		ΔX [%]	3. Messung		ΔX [%]
	v.W.	n.W.		v.W.	n.W.		v.W.	n.W.	
Betriebsstunden Bh	7.700	8.200	-	12.450	11.520	-	14.220	15.830	-
Lambda-Wert λ	1,55	1,62	+4,2	1,52	1,54	+1,1	1,53	1,55	+1,3
NO _x [mg*m ⁻³]	922	1.413	+53,3	1.587	2.331	+46,9	937	931	-0,6
C _n H _m [mg*m ⁻³]	272	239	-12,1	355	342	-3,6	350	473	+35,1
el. Leistung [kWh]	261,0	265,5	+1,7	261,3	261,6	+0,1	260,0	264,0	+1,5
el. Wirkungsgrad [%]	41,0	42,9	+4,5	42,4	43,5	+2,5	41,5	42,0	+1,2
Gasverbrauch [Nm ³ *h]	120,3	115,1	-4,3	113,5	111,3	-1,9	120,2	117,7	-2,1
Methangehalt [%]	51,0	50,9	-0,3	52,4	52,4	± 0,0	51,0	51,2	+0,4

Aufgrund eines Abstimmungsfehlers zwischen Herstellerfirma und Institut wurde das BHKW schon vor der 2. Messung „vor der Wartung“ (v.W.) gewartet. So konnte zu diesem Zeitpunkt nur eine Messung „nach der Wartung“ (n.W.) durchgeführt werden. Diese Messung zeigte sehr hohe NO_x-Konzentrationen im Abgas von über 2300 mg*m⁻³ bei einem sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad von 43,5 %. Dies deutet auf eine Leistungsoptimierung bei der BHKW-Einstellung hin. Die Messung „vor der Wartung“ (v.W.) wurde zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt (siehe Tab. 18). Auch hier konnten erhöhte NO_x-Konzentrationen bei einem hohem elektrischem Wirkungsgrad gemessen werden. Ein möglicher Grund der erhöhten Abgaswerte liegt in der Tatsache, dass das BHKW im Regelbetrieb nur auf Teillastbetrieb mit ca. 240 kW_{el.} betrieben wurde und die Einstellung des BHKW auf diese Leistungsabgabe hin erfolgte.

Es wurde mit dem Hersteller vereinbart, bei der nächsten Wartung eine Motoreinstellung auf Vollastbetrieb vorzunehmen. In Abb. 17 und Tab. 18 sind die hierbei gemessenen Werte dargestellt. Sie zeigen den optimalen Kompromiss hinsichtlich NO_x-Konzentration, elektrischer Leistung und elektrischem Wirkungsgrad. Nur die C_nH_m-

Konzentration im Abgas zeigte sich gegenüber der vorherigen Messung um 35 % erhöht.

Um auch in diesem Fall eine Aussage über die Auswirkung eines Teillastbetriebes treffen zu können, wurden bei der letzten Messung die Teillastbereiche 230 kW_{el.} und 250 kW_{el.} mit erfasst und dem Vollastbetrieb gegenübergestellt (Abb. 18 und Tab. 19). Hierbei konnte eindeutig gezeigt werden, dass ein Teillastbetrieb negative Auswirkungen auf den elektrischen Wirkungsgrad und den Ausstoß an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) hat. Einzig die Verringerung der NO_x-Konzentration im Abgas stellt sich hierbei positiv dar.

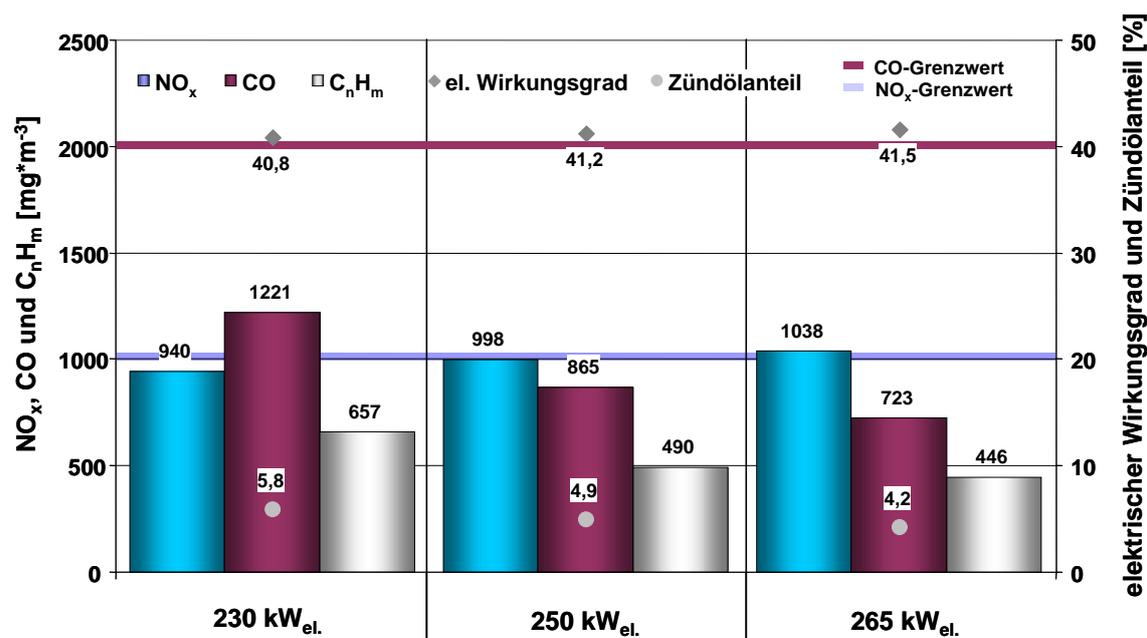


Abb. 18: Einfluss des Teillastbetriebes (230 kW_{el.} u. 250 kW_{el.}) auf Abgasemissionen und Wirkungsgrad im Vergleich zum Vollastbetrieb (265 kW_{el.})

Tab. 19: Vergleich der gemessene Werte bei 230 kW_{el.}, 250 kW_{el.} und 265 kW_{el.}

Messung	230 kW _{el.}	250 kW _{el.}	ΔX [%]	265 kW _{el.}	ΔX [%]
	v.W.	n.W.		v.W.	
Lambda-Wert λ	1,70	1,60	-5,7	1,52	-4,0
NO _x [mg*m ⁻³]	940	998	+6,1	1.038	+4,1
CO [mg*m ⁻³]	1.221	865	-29,2	723	-16,4
C _n H _m [mg*m ⁻³]	657	490	-25,3	446	-9,0
el. Leistung [kWh]	226,5	250,0	+10,4	270,0	+8,0
el. Wirkungsgrad [%]	40,8	41,2	+1,0	41,5	+0,7

4.2.4 190 kW_{el.} Gas-BHKW

Im Gegensatz zu den Zündstrahl-BHKW sind für Gas-BHKW die Grenzwerte nach BImSchG für NO_x bzw. CO im Abgas nur halb so hoch (500 bzw. 1000 mg*m⁻³). In Abb. 19 sind die gemessenen Abgas- und Leistungswerte vor (v.W.) und nach (n.W.) der Wartung des 190 kW_{el.} Gas-BHKW dargestellt. Die jeweiligen Messungen erfolgten nach 9100 Bh innerhalb von zwei Tagen vor und nach einer Wartung durch den Anlagenbetreiber, da durch den BHKW-Hersteller in diesem Fall keine Wartung angeboten wurde.

Bei den NO_x-Werten während des ersten Messzyklus im Betriebszustand „vor der Wartung“ war eine Überschreitung des Grenzwertes um das 5-fache festzustellen. Nach der Wartung verbesserte sich dieser Wert auf ca. 1900 mg*m⁻³, womit der Grenzwert jedoch immer noch knapp um das 4-fache überschritten wurde. Die CO- und C_nH_m-Gehalte im Abgas blieben relativ konstant auf einem sehr niedrigen Niveau. Auch die elektrische Leistung und der Gasverbrauch blieben nahezu unverändert, wohingegen der elektrische Wirkungsgrad trotz geringeren Methangehalts im Biogas durch die Wartung von 36,6 auf 37,8 % gesteigert werden konnte (Abb. 19). Auch die weiteren Messungen nach 15.000 (2. Messung) bzw. 20.000 Bh (3. Messung) ergaben eher noch schlechtere NO_x-Werte. Bei der 3. Messreihe wurde zwar die volle elektrische Leistung noch erreicht (Tab. 20), jedoch sank der elektrische Wirkungsgrad um ca. 2 Prozentpunkte im Vergleich zu den vorherigen Messungen (Abb. 19). Der Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen stieg von Messung zu Messung an. Dies weist bereits auf einen beginnenden Verschleiß einzelner Motorbauteile hin.

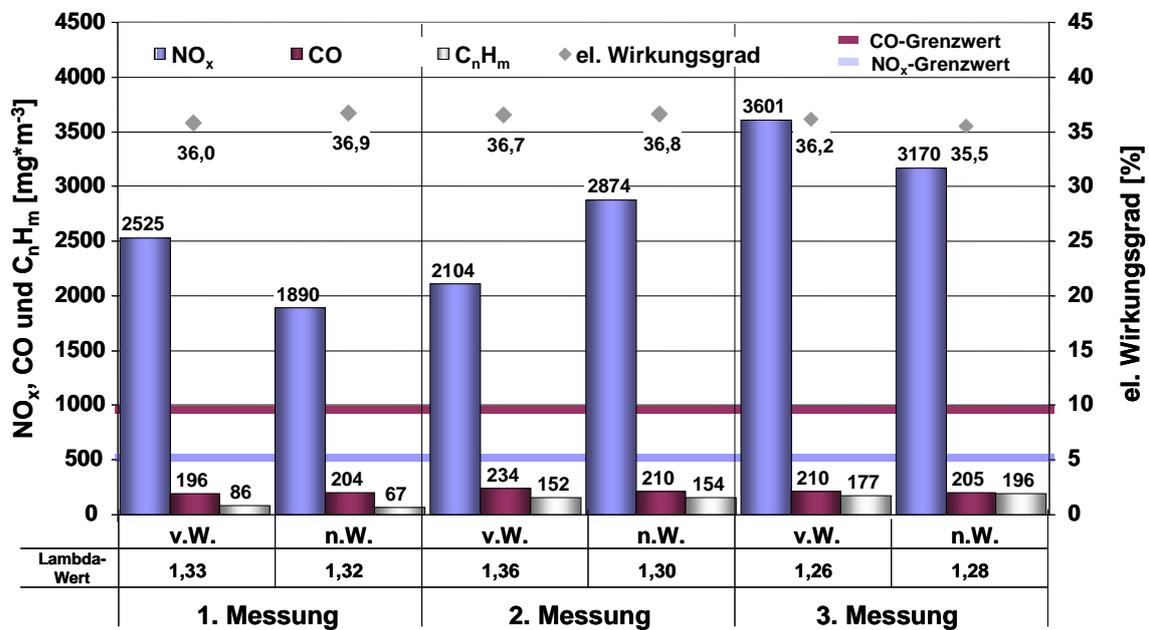


Abb. 19: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 190 kW_{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 20: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (190 kW_{el.}-BHKW)

Messung	1. Messung		ΔX	2. Messung		ΔX	3. Messung		ΔX
	v.W.	n.W.	[%]	v.W.	n.W.	[%]	v.W.	n.W.	[%]
Betriebsstunden Bh	9.100	9.120	-	15.600	16.375	-	20.325	20.350	-
Lambda-Wert λ	1,33	1,32	-0,7	1,36	1,30	-4,7	1,26	1,28	+1,8
NO _x [mg*m ⁻³]	2.525	1.890	-25,1	2.104	2.874	+36,6	3.601	3.170	-12,0
C _n H _m [mg*m ⁻³]	86	67	-22,1	152	154	+1,2	177	196	+10,8
el. Leistung [kWh]	189,5	189,5	± 0,0	186,0	188,5	+1,3	190,0	189,3	-0,4
el. Wirkungsgrad [%]	36,0	36,9	+2,6	36,7	36,8	+0,3	36,2	35,5	-1,9
Gasverbrauch [Nm ³ *h]	99,9	101,5	+1,5	97,3	98,2	+0,9	100,6	100,4	-0,3
Methangehalt [%]	54,8	51,3	-6,4	52,8	52,9	+0,2	51,4	52,4	+1,8

Beispielhaft wurde an diesem BHKW versucht, die weit überhöhten NO_x -Konzentrationen im Abgas durch eine Erhöhung des Lambda-Wertes während des Betriebes soweit zu reduzieren, dass die Vorgaben der TA-Luft eingehalten werden konnten. Nach der Erhöhung des Lambda-Wertes von anfänglich $\lambda = 1,27$ auf $\lambda = 1,47$ konnte der NO_x -Gehalt im Abgas von ca. $3500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ bis auf den Grenzwert von $500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ abgesenkt werden. Hierbei kam es jedoch zu erheblichen Zündaussetzern (Abb. 20), so dass der Lambda-Wert wieder so weit reduziert wurde, bis ein störungsfreier Verbrennungsverlauf gewährleistet war. Damit stiegen die NO_x -Konzentrationen wieder auf über $1500 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ an. Die Einhaltung des NO_x -Grenzwertes war somit bei diesem BHKW über die Verstellung des Lambda-Wertes nicht möglich. Der CO-Gehalt im Abgas stieg gleichzeitig mit der Erhöhung des Lambda-Wertes an, lag aber mit 200 bis $320 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ auf einem relativ niedrigem Niveau (Abb. 20).

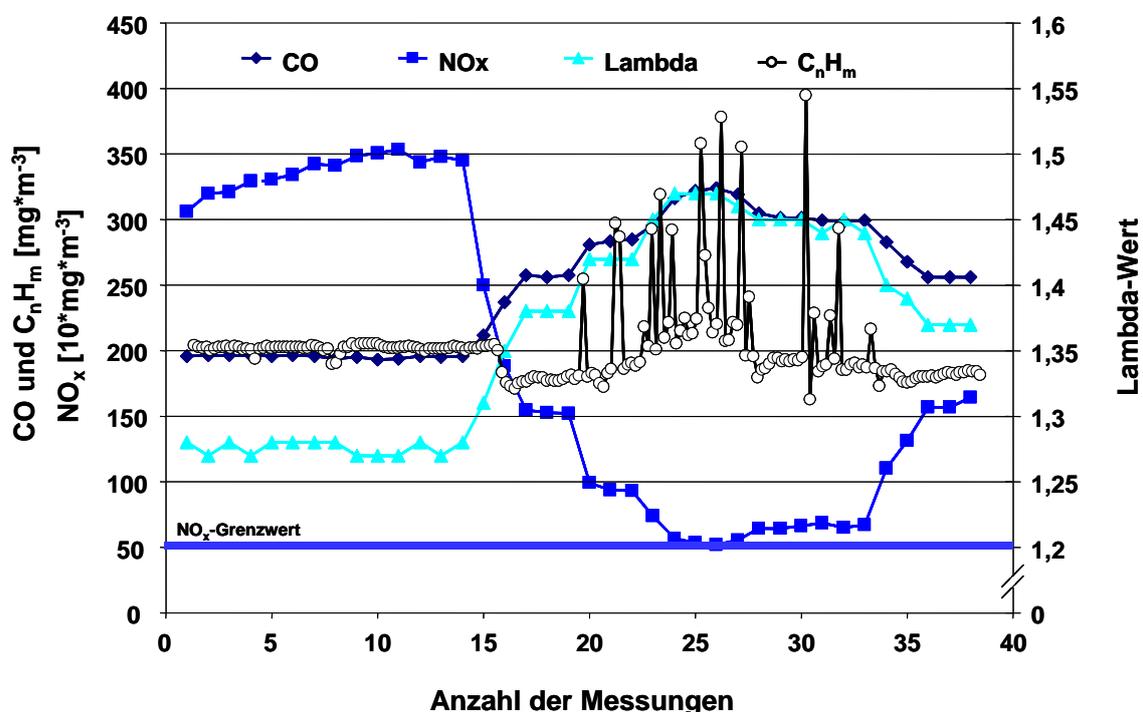


Abb. 20: Einfluss des Lambda-Wertes auf die Abgaskonzentrationen an einem $190 \text{ kW}_{\text{el}}$ Gas-BHKW

Bei einer weiteren Messung an demselben BHKW zeigte die Veränderung des Lambda-Wertes einen deutlichen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad (Abb. 21). Je höher der Luftüberschuss und je geringer damit der Energieinhalt je m^3 Gas, desto geringer war auch der elektrische Wirkungsgrad.

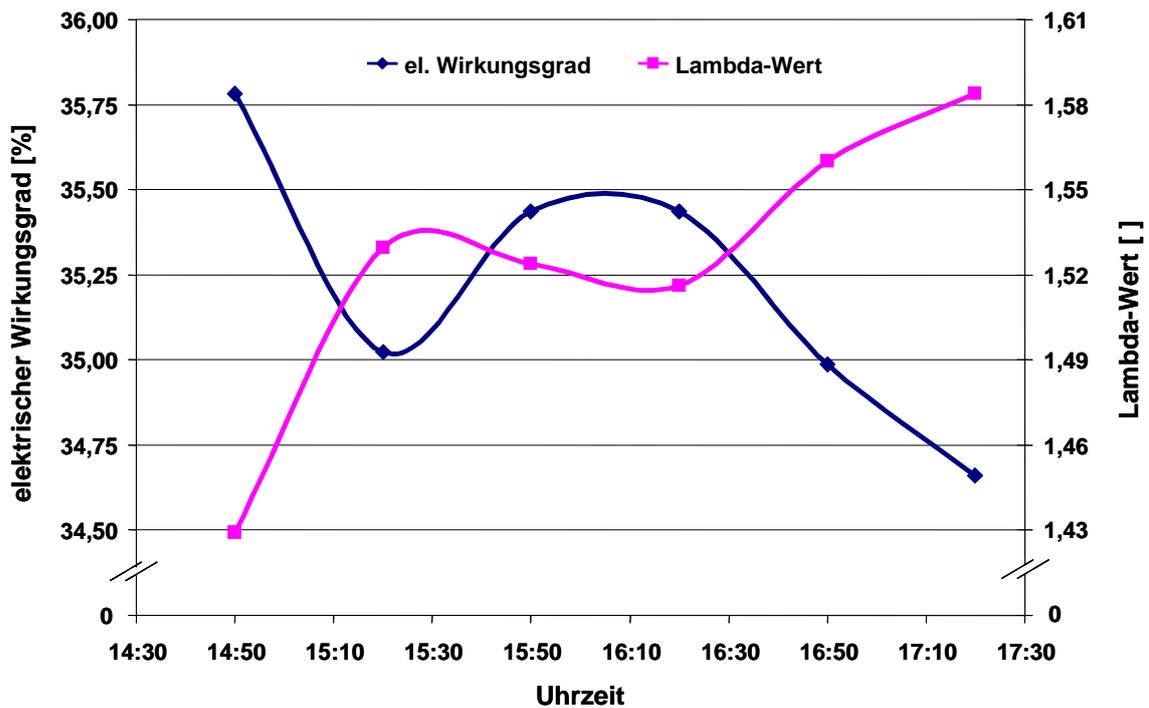


Abb. 21: Veränderung des elektrischen Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Lambda-Wert

Die generelle Einstellung dieses BHKW zielt auf eine Maximierung der Energieausbeute ab und erfolgt nur nach Leistungskriterien. Eine Kontrolle der Abgaswerte erfolgte zu keiner Zeit.

Der vor dem BHKW installierte Gaszähler wies vor der letzten Messreihe einen Defekt auf und wurde für die Dauer der letzten Messungen durch einen institutseigenen Turbinenradzähler ersetzt. Die beim Vergleich der beiden Gaszähler festgestellte Abweichung des defekten Gaszählers wurde korrigiert.

4.2.5 324 kW_{el.} Gas-BHKW

Die Wartung des 324 kW_{el.} Gas-BHKW erfolgte durch den Hersteller in Verbindung mit einem Wartungsvertrag in Form einer generellen Wartung alle 2.000 Bh.

Durch die Wartungsarbeiten wurde in den ersten beiden Messreihen eine deutliche Verbesserung der NO_x-Werte erreicht. Der NO_x-Grenzwert konnte bis auf den Grenzwert abgesenkt werden (Abb. 22). Die angegebene elektrische Leistung wurde allerdings nicht erreicht (Tab. 21).

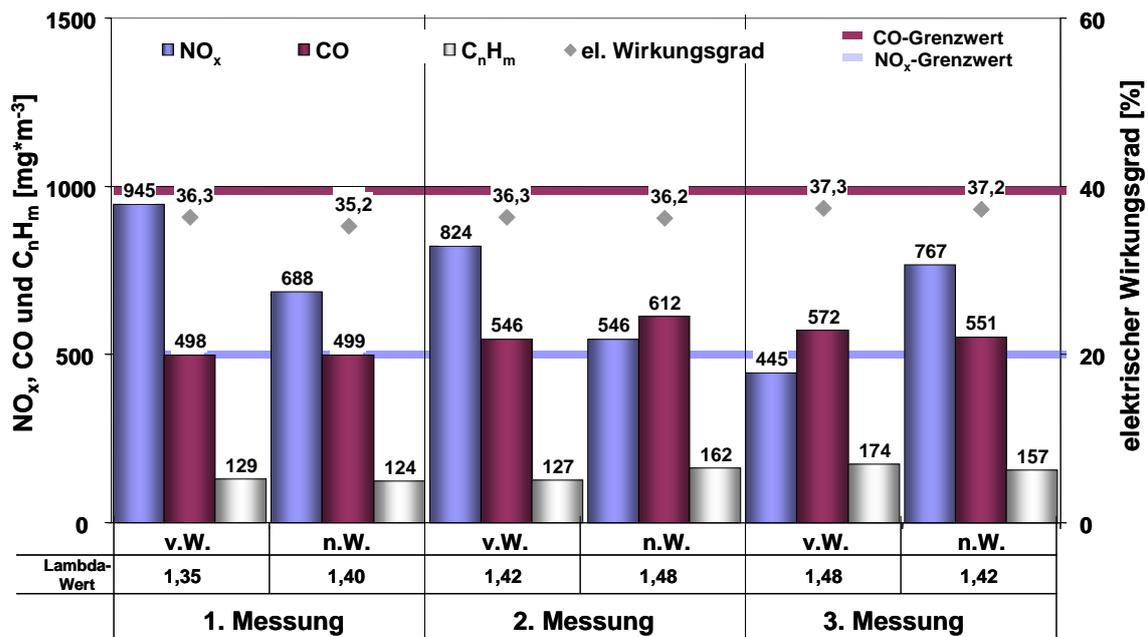


Abb. 22: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 324 kW_{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 21: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (324 kW_{el.}-BHKW)

Messung	1. Messung			2. Messung			3. Messung		
	v.W.	n.W.	ΔX [%]	v.W.	n.W.	ΔX [%]	v.W.	n.W.	ΔX [%]
Betriebsstunden Bh	6.925	7.595	-	11.000	11.400	-	13.075	13.525	-
Lambda-Wert λ	1,35	1,40	+3,5	1,42	1,48	+4,6	1,48	1,42	-3,9
NO _x [mg*m ⁻³]	945	688	-27,2	824	546	-33,7	445	767	+72,3
C _n H _m [mg*m ⁻³]	129	124	-3,9	127	162	+27,0	174	157	-9,5
el. Leistung [kWh]	314,2	314,7	+0,2	312,2	309,3	-0,9	313,5	314,3	+0,3
el. Wirkungsgrad [%]	36,3	35,2	-3,0	36,3	36,2	-0,3	37,3	37,2	-0,2
Gasverbrauch [Nm ³ *h]	172,8	158,3	-8,4	158,0	159,1	+0,7	150,3	147,9	-1,6
Methangehalt [%]	50,6	56,1	+10,9	55,9	54,3	-2,9	56,6	57,0	+0,7

Zwischen den beiden Messterminen der ersten Messreihe erfolgte auf der Anlage eine Umstellung in der Gasaufbereitung. Statt der Entschwefelung des Biogases durch Lufteinblasung in den Fermenter wurde nun durch Zugabe eines Eisen-III-Präparates das Biogas chemisch entschwefelt. Der Anstieg des Methangehaltes im Biogas von 50,6 auf 56,2 % aufgrund der fehlenden Verdünnung des Biogases durch die eingeblasene Luft war deutlich zu erkennen (Tab. 21).

Die Überschreitung des NO_x-Grenzwertes nach der zweiten Messung (v.W.) wurde dem BHKW-Hersteller mitgeteilt und es wurde um eine Beachtung während der Wartung gebeten. Nach dieser Wartung wurde der NO_x-Grenzwert nur knapp überschritten (Abb. 22). Die relativ geringen NO_x-Konzentrationen über sämtliche Messungen wurden durch eine automatische Regelung des Lambda-Wertes erreicht. Hierbei wird der Luftüberschuss so lange abgesenkt, bis der erste Zündaussetzer auftritt. Danach wird der Wert geringfügig hochgeregelt. Auf diese Weise werden die für die Motoreinstellung und die gewünschte elektrische Leistung günstigsten Abgaswerte erreicht. Insgesamt konnte bei diesem BHKW ein guter allgemeiner Wartungszustand festgestellt werden.

4.2.6 526 kW_{el.} Gas-BHKW

Auch das 526 kW_{el.} Gas-BHKW verfügt über eine automatische Lambda-Regelung. Zudem besteht ein Vollwartungsvertrag zwischen dem Anlagebetreiber und der Herstellerfirma mit garantierter elektrischer Leistung und BHKW-Laufzeit über 60.000 Bh. Der Hersteller berechnet hierfür 5 € pro Betriebsstunde des BHKW. Aufgrund dieser Regelung wird das BHKW nur im Volllastbetrieb betrieben, um je Betriebsstunde einen möglichst hohen monetären Ertrag zu erwirtschaften.

Bei der ersten Messung wurden erhöhte NO_x-Konzentrationen im Abgas festgestellt, die dem BHKW-Hersteller mitgeteilt wurden. Bei der Messung „nach der Wartung“ wurden die NO_x-Grenzwerte eingehalten, jedoch bei verringertem elektrischem Wirkungsgrad und einer erhöhten Konzentration an Kohlenwasserstoffen (Abb. 23). Die Kohlenwasserstoffgehalte im Abgas lagen bei allen Messungen auf einem für Gas-BHKW relativ hohen Niveau. Wie in Kap. 4.1 bereits erläutert, ist dies auf die höhere Verdichtung des Motors zurückzuführen (Abb. 23).

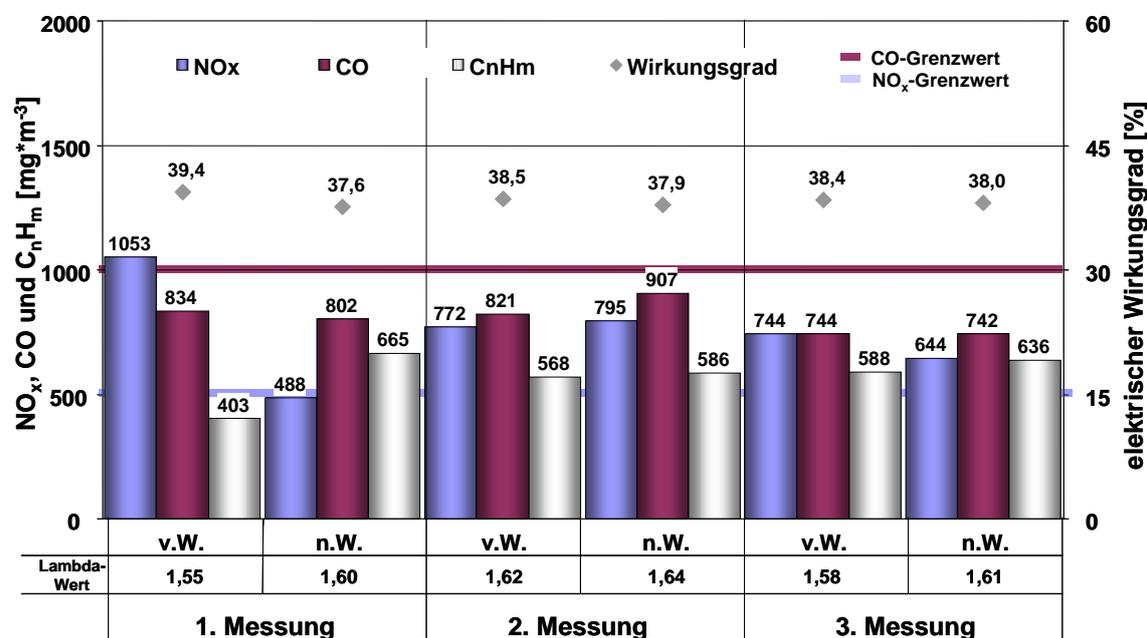


Abb. 23: Abgaskonzentrationen und elektrische Wirkungsgrade des 526 kW_{el.} Gas-BHKW (v.W.= vor Wartung; n.W.= nach Wartung)

Tab. 22: Durchschnittliche gemessene Werte und Veränderung durch die Wartung in % (526 kW_{el.}-BHKW)

Messung	1. Messung		ΔX	2. Messung		ΔX	3. Messung		ΔX
	v.W.	n.W.	[%]	v.W.	n.W.	[%]	v.W.	n.W.	[%]
Betriebsstunden Bh	5.120	6.100	-	7.590	8.050	-	9.940	10.620	-
Lambda-Wert λ	1,55	1,60	+2,8	1,62	1,64	+1,3	1,58	1,61	+1,8
NO _x [mg*m ⁻³]	1.053	488	-53,7	772	795	+2,9	744	644	-13,5
C _n H _m [mg*m ⁻³]	403	665	+65,1	568	586	+3,2	588	636	+8,1
el. Leistung [kWh]	526,0	528,0	+0,4	525,3	526,5	+0,2	523,3	525,6	+0,4
el. Wirkungsgrad [%]	39,4	37,6	-4,4	38,5	37,9	-1,7	38,4	38,0	-1,0
Gasverbrauch [Nm ³ *h]	257,5	265,0	+2,9	255,6	252,8	-1,1	259,2	260,9	+0,7
Methangehalt [%]	51,3	52,1	+1,6	53,6	54,7	+2,0	52,5	53,1	+1,1

Insgesamt wies das 526 kW_{el.} Gas-BHKW eine sehr hohe Leistungsausnutzung und die höchsten bei Gas-BHKW gemessenen elektrischen Wirkungsgrade (ca. 37,6 bis 39,4 %) auf.

5 Diskussion der Ergebnisse

Um eine Einordnung der Messwerte zu ermöglichen, werden die Ergebnisse der einzelnen BHKW untereinander verglichen. Hierbei werden Unterschiede zwischen den einzelnen BHKW in Abhängigkeit von Motoreinstellung und -typ deutlich. Dies ist vor allem hinsichtlich der Schadgaskonzentrationen und der erzielten elektrischen Wirkungsgrade von Interesse. Dabei werden die entscheidenden Einflussfaktoren der Motoreinstellung auf die Höhe der Abgaskonzentrationen herausgearbeitet. Zusätzlich werden auf Grundlage der Messergebnisse einige Aspekte der Treibhausgasbilanz der Stromgestehung aus Biogas im Vergleich mit konventionellen Stromgestehungsverfahren diskutiert.

5.1 Vergleich der Abgaswerte

5.1.1 Kohlenmonoxid (CO)

Bei den in diesem Projekt vermessenen BHKW konnte kein deutlicher Einfluss der Wartung und Einstellung des Motors auf die CO-Konzentrationen im Abgas festgestellt werden. In Abb. 24 ist erkennbar, dass jedes BHKW einen typischen Bereich der CO-Konzentrationen aufwies, wobei auch ersichtlich ist, dass mit zunehmender Leistung bei den Zündstrahl-BHKW die Höhe der CO-Emissionen eher rückläufig ist, während sie bei den Gas-BHKW mit zunehmender Leistung ansteigen. Eine Einhaltung der von der TA-Luft geforderten Grenzwerte für CO war in jedem Fall und bei allen BHKW ohne Probleme gegeben (Abb. 24). Die 250 und 265 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW unterschritten sogar den für Gas-BHKW gültigen Grenzwert von 1000 mg*m⁻³.

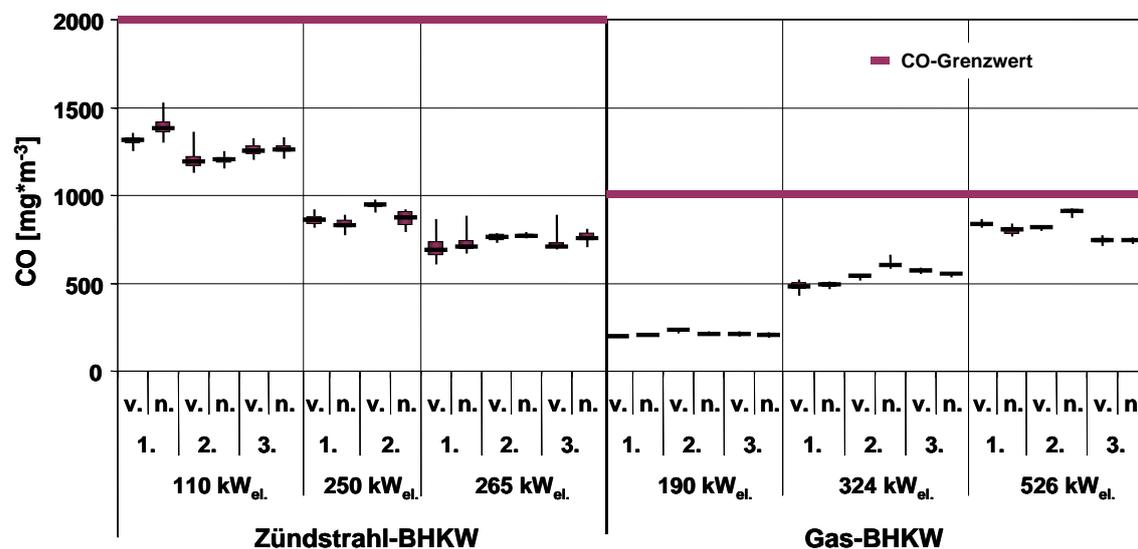


Abb. 24: Box-Plot der CO-Gehalte im Abgas aller drei Messreihen der untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) einer Wartung

Mit diesen Messungen können frühere Untersuchungen widerlegt werden, die bei Zündstrahl-BHKW eine generelle Neigung zur Überschreitung der vorhandenen CO-Grenzwerte zeigten (GRONAUER ET. AL 2003). Dies wurde zum Einen durch die Ver-

besserung der Motorentechnik und zum Anderen durch eine verbesserte Wartung und Einstellung der Motoren erreicht.

5.1.2 Kohlenwasserstoffe (C_nH_m)

Für den Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen (Gesamt-C) gibt es in der TA-Luft nur bezüglich Formaldehyd einen vorgeschriebenen Grenzwert von 60 mg*m⁻³. Formaldehyd ist Bestandteil der gemessenen Kohlenwasserstoffe, macht hiervon aber nur einen sehr geringen Teil aus, da über 90 % der gemessenen Kohlenwasserstoffe aus einer unvollständigen Verbrennung des Methans stammen (Daher auch die Bezeichnung „Methanschluß“).

Die gemessenen Werte waren von BHKW zu BHKW recht unterschiedlich. Wie in Kap. 4.2 bereits beschrieben, sind die Werte der Zündstrahl-BHKW und des 526 kW_{el.} Gas-BHKW aufgrund der höheren Verdichtung im Brennraum relativ hoch. Die höchsten Werte wiesen das 110 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW und das 526 kW_{el.} Gas-BHKW mit 600 bis über 800 mg*m⁻³ auf. Die übrigen Zündstrahl-BHKW mit 300 bis 500 mg*m⁻³ und vor allem die übrigen Gas-BHKW mit unter 200 mg*m⁻³ lagen auf einem niedrigeren Niveau (Abb. 25). Welche Auswirkungen dies auf die Treibhausgasbilanz hat, wird in Kap. 5.4 näher erläutert.

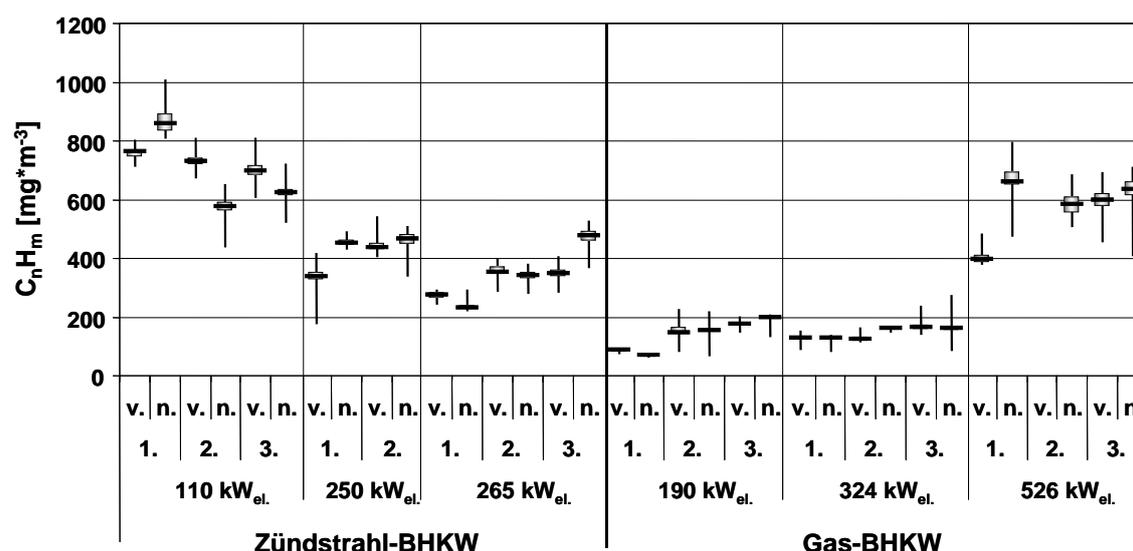


Abb. 25: Box-Plot der C_nH_m-Gehalte im Abgas aller drei Messreihen der untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) einer Wartung

5.1.3 Stickoxide (NO_x)

Bei den NO_x-Konzentrationen lagen die einzelnen Messwerte teils erheblich auseinander. Vor allem beim 190 kW_{el.} Gas-BHKW streuten die Werte sehr stark. Dies war auch die einzige Anlage, bei der keine Herstellerwartung stattfand. So konnte der Anlagenbetreiber nur eine Wartung nach Leistungskriterien vornehmen, ohne die Abgaswerte zu prüfen. Die anderen Gas-BHKW liegen im Bereich zwischen 500 und 1000 mg*m⁻³ und damit fast ohne Ausnahme über dem Grenzwert von 500 mg*m⁻³ (Abb. 26), obwohl beide BHKW eine automatische Lambda-Regulierung besitzen, die immer die für die angestrebte Leistung geringsten NO_x-Konzentration erzielen soll. Aufgrund dieser automatischen Regulierung wird bei der Wartung des BHKW auch auf eine Überprüfung der Abgaswerte verzichtet. Die niedrigen NO_x-Werte beim 324 kW_{el.} (2. n.) und beim 526 kW_{el.} (1. n.) kamen nur dadurch zustande, dass das Institut

dem Hersteller eine Überprüfung der Abgaswerte angeraten hatte. Bei der Wartung fand dann auch ein Abgleich der beiden Abgasmessgeräte (Hersteller und Institut) statt. Die Messwerte waren in beiden Fällen nahezu identisch.

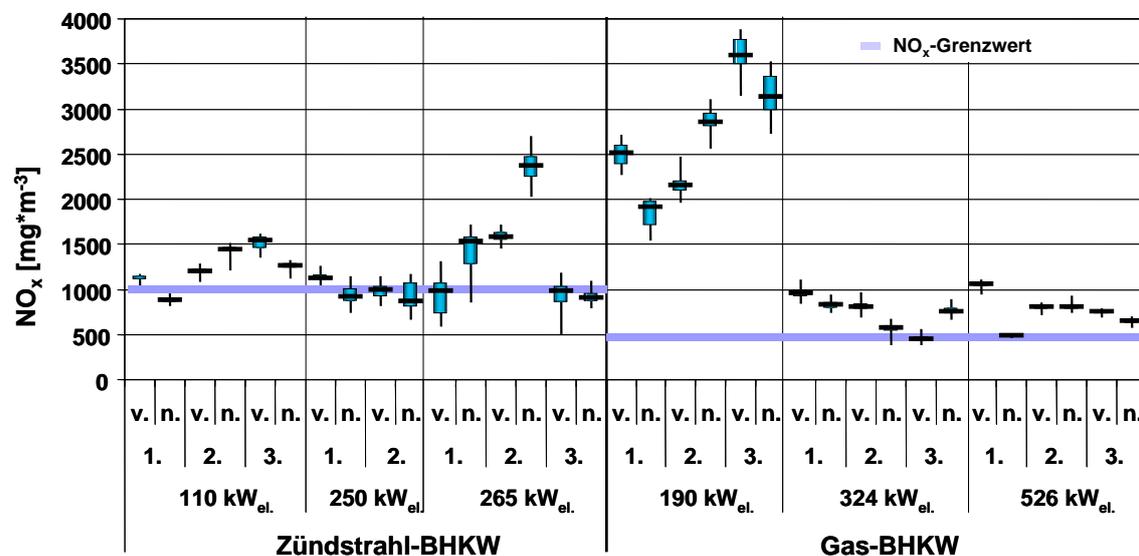


Abb. 26: Box-Plot der NO_x -Gehalte im Abgas der untersuchten BHKW aus allen drei Messreihen vor (v.) und nach (n.) einer Wartung

Bei den Zündstrahl-BHKW lag mit Ausnahme eines Ausreißers die NO_x -Konzentration im Abgas im Bereich von 1000 bis 1500 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ (Abb. 26), wobei der Grenzwert von 1000 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ bei fast der Hälfte der Messungen eingehalten wurde. Vor allem das 250 kW_{el} -BHKW wies fast durchgängig Werte unterhalb des Grenzwertes auf. Bei diesem und dem 265 kW_{el} -Zündstrahl-BHKW fand routinemäßig während der Motoreinstellung eine Messung der Abgaswerte statt. Bei allen anderen BHKW wurde eine Messung der Abgaswerte bei der BHKW-Wartung vom Institut veranlasst.

5.2 Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade

In Abb. 27 sind die während der Untersuchungen gemessenen und gemäß DIN 3046 unter Normbezugsbedingungen unter Berücksichtigung der elektrischen Nebenaggregate berechneten elektrischen Wirkungsgrade grafisch dargestellt. Die Linien sollen die Veränderungen von der Messung „v.“ (vor der Wartung) zur Messung „n.“ (nach der Wartung) verdeutlichen. Hierbei ist bei einigen Messungen ein deutlicher Einfluss der Wartung auf den elektrischen Wirkungsgrad zu erkennen. Aus diesem Kontext lassen sich allerdings keine Rückschlüsse auf die Auswirkungen der Motoreinstellung ziehen. Hierzu sind Gesamtbetrachtungen der erhobenen Daten vonnöten (siehe Kap. 5.3). Es ist jedoch ersichtlich, dass die Zündstrahl-BHKW mit durchschnittlich 40,5 % elektrischem Wirkungsgrad, einen um 3,5 % höheren Wirkungsgrad erzielten als die Gas-BHKW mit durchschnittlich 37,0 %.

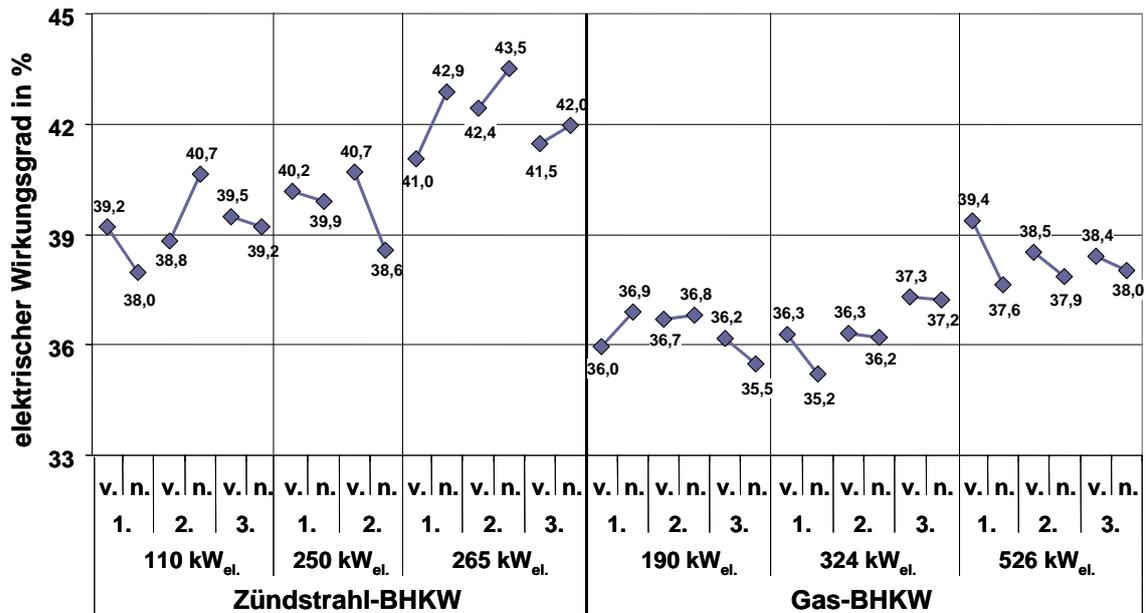


Abb. 27: Elektrische Wirkungsgrade aller untersuchten BHKW vor (v.) und nach (n.) der Wartung (Berechnung nach DIN 3046 ohne Anrechnung der 5 % Grenzabweichung beim Kraftstoffverbrauch)

5.3 Einflussfaktoren auf Emissions- und Leistungskennwerte

Als Hauptziel der Emissionsreduktion hat sich bei diesen Untersuchungen die Verringerung der NO_x-Konzentrationen im Abgas herausgestellt, da hier bei vielen BHKW eine Grenzwertüberschreitung festgestellt wurde. Zu den langfristigen Reduktionsmaßnahmen gehört vor allem die routinemäßige Wartung und Einstellung des BHKW durch fachkundige Personen. Dies ermöglicht einen emissions- und verschleißarmen Betrieb über längere Zeit ohne Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit. Kurzfristig konnte bei den hier untersuchten BHKW die NO_x-Konzentration im Abgas nur durch die Erhöhung des Lambda-Wertes gesenkt werden. Dies hatte jedoch Auswirkungen auf die Leistung und das Emissionsverhalten.

Am anschaulichsten kann dieser Sachverhalt an den Messungen verdeutlicht werden, bei denen explizit eine Motoreinstellung unter Berücksichtigung der Abgaswerte erfolgte. Wie in Kap. 4.2 bereits beschrieben, wurden bei denjenigen BHKW, bei denen eine Überschreitung der Grenzwerte festgestellt wurde, die Hersteller aufgefordert, die Wartung unter Berücksichtigung der Abgaswerte vorzunehmen. Dies geschah beim 110 kW_{el.}, 250 kW_{el.} und 526 kW_{el.} BHKW während der ersten Messreihe, beim 324 kW_{el.} während der zweiten Messreihe und beim 265 kW_{el.} aufgrund der notwendigen Erneuerung des Motorblocks erst während der 3. Messreihe. Beim 190 kW_{el.} BHKW wurde wie bereits beschrieben keine Wartung des Herstellers angeboten, deshalb wurde in diesem Fall auch die erste Messreihe als beste Variante ausgewählt. Die prozentuale Veränderung der Leistungs- und Emissionskennwerte zwischen den Messungen vor der Wartung (v.W. = 100 %) und nach der Wartung (n.W.) ist in Abb. 28 dargestellt.

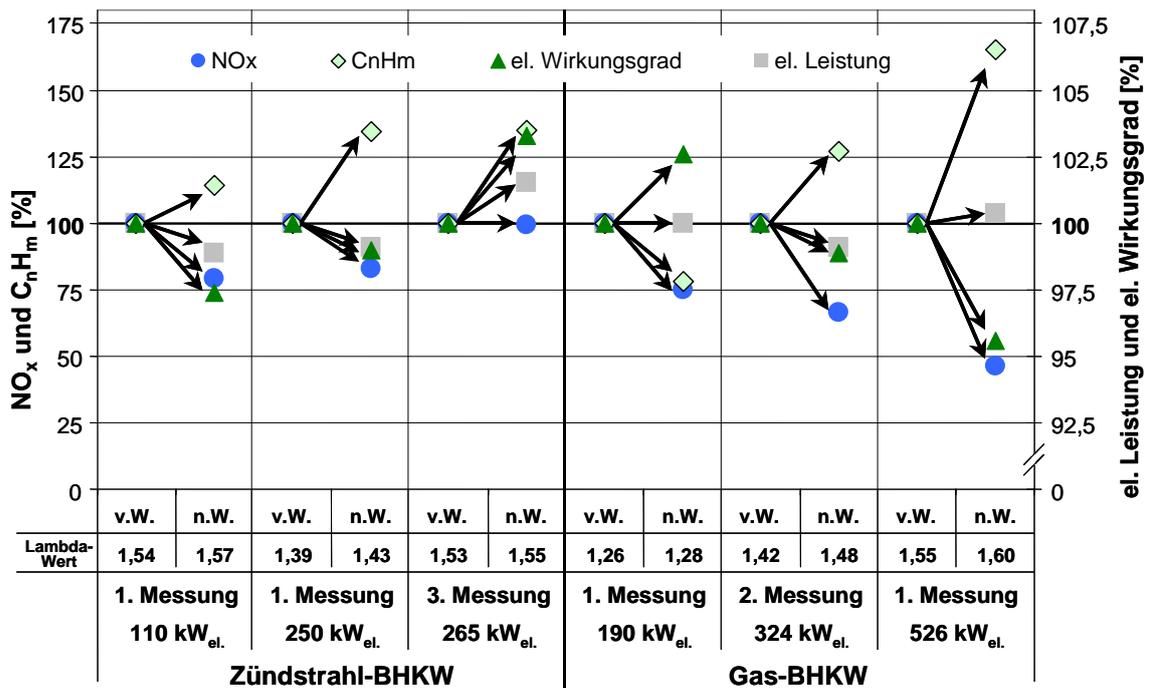


Abb. 28: Veränderung der Leistungs- und Emissionskennwerte der vermessenen BHKW durch eine Wartung mit Abgasmessung

Hauptziel der Motoreinstellung war die Einhaltung der Grenzwerte nach TA-Luft bei Volllastbetrieb. Daher galt es bei allen BHKW, die hohen NO_x-Konzentrationen zu senken.

Nur beim 265 kW_{el.} Zündstrahl-BHKW wurde bereits vor der Wartung der NO_x-Grenzwert eingehalten (Abb. 28). Bei allen anderen Motoren konnte durch die Erhöhung des Lambda-Wertes um 0,3 bis 0,6 eine teils deutliche Reduktion der NO_x-Konzentration erreicht werden. Jedoch hatte dies im Gegenzug negative Auswirkungen vor allem auf den Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und den elektrischen Wirkungsgrad. Auch konnte beim 110 kW_{el.}, 250 kW_{el.} und 324 kW_{el.} BHKW die maximale Leistung nicht mehr erbracht werden (Abb. 28). Zurückzuführen ist dies, wie bereits mehrfach angesprochen, auf die Erhöhung des Luftüberschusses, die zu einer Verringerung des Energieinhaltes im Brenngas führt und damit den elektrischen Wirkungsgrad bei maximaler Leistungsausnutzung verschlechtert. Auffällig ist hierbei der direkte Zusammenhang zwischen NO_x- und C_nH_m-Konzentration im Abgas, welche sich gegenläufig verhalten (Abb. 28 und Abb. 29).

In Abb. 29 sind die Halbstundenmittelwerte der gemessenen NO_x-Konzentration in Abhängigkeit der C_nH_m-Konzentration grafisch dargestellt. Das 190 kW_{el.} ist bei dieser Darstellung nicht berücksichtigt worden, da hier keine Unterschreitung des Grenzwertes erreicht werden konnte.

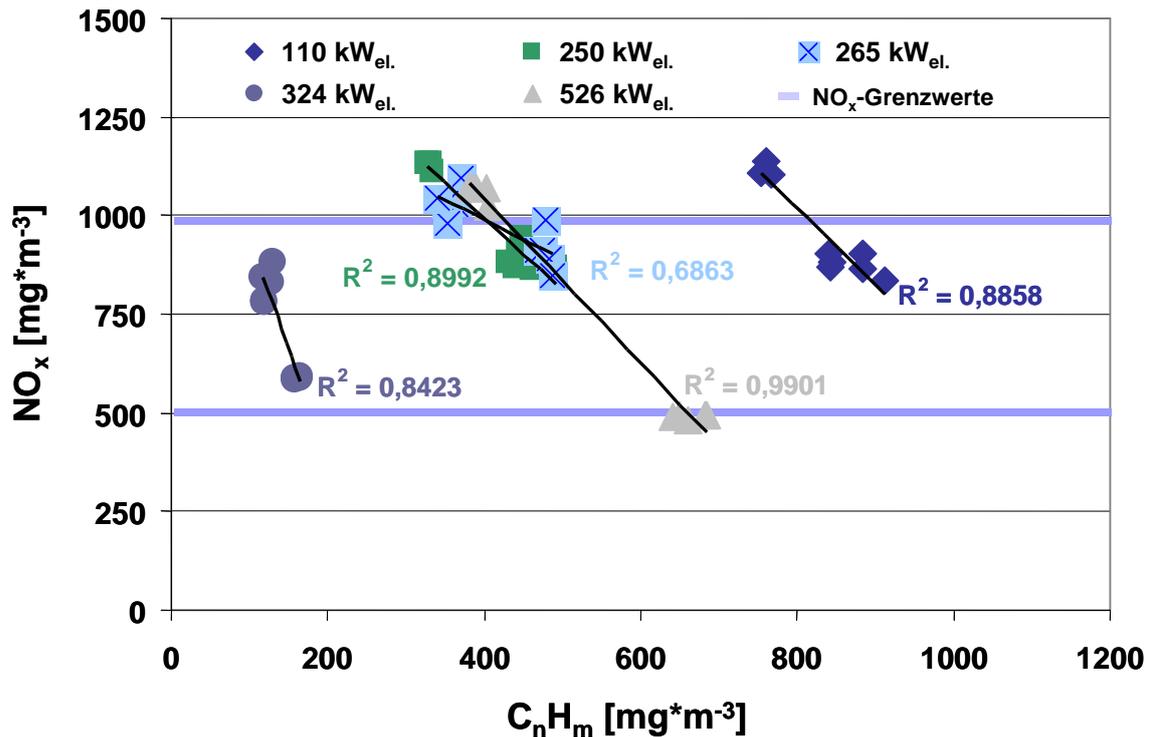


Abb. 29: Korrelation von C_nH_m - und NO_x -Gehalt im Abgas für fünf der vermessenen BHKW

5.4 Betrachtungen zur Treibhausgasbilanz

In die bisherigen Betrachtungen der Messergebnisse wurden nur die direkt gemessenen Emissionswerte einbezogen. An den Messwerten konnten Veränderungen durch Wartungsmaßnahmen erkannt werden. Dies lässt jedoch keinen Vergleich zwischen den gemessenen BHKW zu. Um hier eine Vergleichbarkeit zu erhalten, müssen die gemessenen Schadgasfrachten auf eine Bezugsbasis umgerechnet werden. Als Bezugsbasis dient hierbei die produzierte Strommenge in Kilowattstunden ($kWh_{\text{prod.}}$). Die Berücksichtigung des Abgasvolumens jedes BHKW, welches aus den bei den Messungen mit erfassten Inputströmen berechnet werden kann (siehe Kap. 3.3.2.2), hat hierbei den Vorteil, dass auch der Wirkungsgrad und damit die Güte der Verbrennung in die Bewertung mit einfließt.

Abb. 30 zeigt die Emissionswerte der untersuchten BHKW in $g \cdot kWh_{\text{prod.}}^{-1}$ vor und nach einer Wartung. Es handelt sich hierbei um dieselben Messungen, wie in Kap. 5.3 beschrieben. Um eine Einschätzung der Höhe der Emissionsfracht zu ermöglichen, sind die Grenzwerte der EURO 4-Norm (UMWELTBUNDESAMT 2003) für Nutzfahrzeuge und Gasmotoren in der Grafik farbig dargestellt.

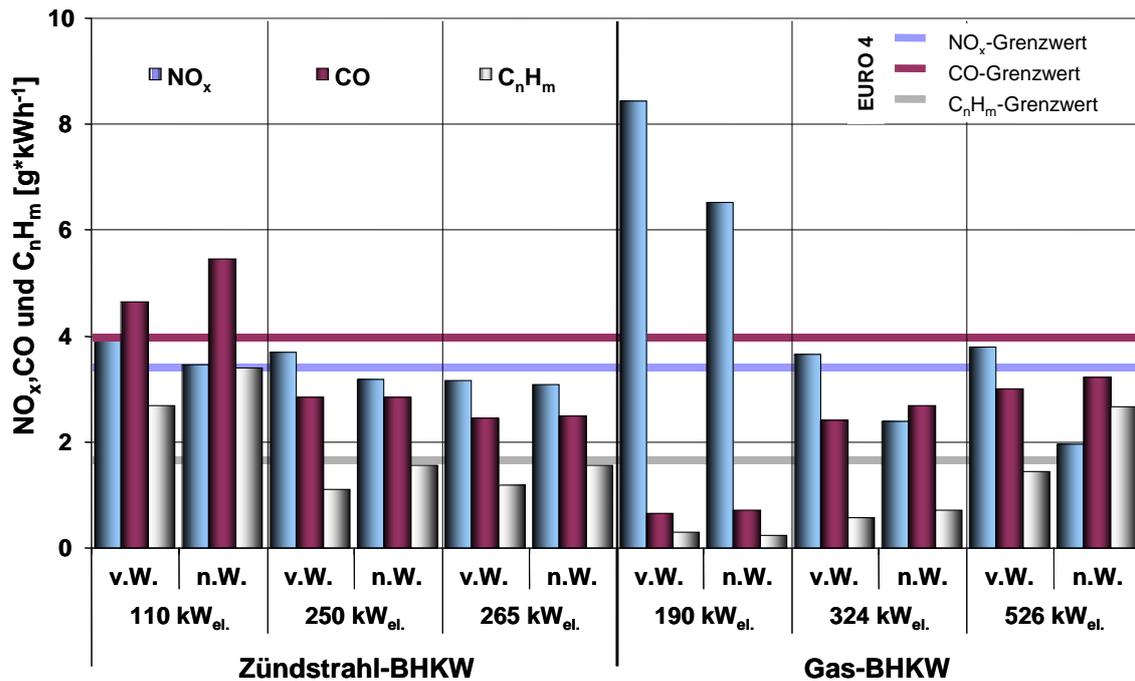


Abb. 30: Emissionsraten der gemessenen BHKW in Abhängigkeit der produzierten Strommenge (U=ungewartet; W = gewartet)

Der NO_x-Grenzwert der EURO 4-Norm von 3,5 g*kWh⁻¹_{prod.} kann von den BHKW mit Ausnahme des 190 kW_{el.}-BHKW nach der Wartung eingehalten werden (Abb. 30). Die strengere EURO 5-Norm mit 2,0 g*kWh⁻¹_{prod.}, die 2008 in Kraft tritt, wird nur noch vom 526 kW_{el.} BHKW erreicht. Jedoch wird hier der C_nH_m-Grenzwert nicht mehr eingehalten. Dieser Grenzwert setzt sich zusammen aus 1,1 g CH₄*kWh⁻¹_{prod.} und 0,55 g NMHC*kWh⁻¹_{prod.} (Nichtmethan-Kohlenwasserstoffe) und gilt für Gasmotoren. Ansonsten wird der C_nH_m-Grenzwert nur noch vom 110 kW_{el.}-BHKW überschritten. Dieses BHKW überschreitet in diesem Fall auch als einziges BHKW die EURO 4-Norm für CO mit 4,0 g*kWh⁻¹_{prod.} (Abb. 30).

Aber nicht nur der Vergleich der einzelnen BHKW untereinander ist interessant. Für eine Abschätzung der Umweltverträglichkeit der Stromproduktion ist eine Gegenüberstellung mit konventioneller Stromproduktion sinnvoll. Für die Bilanzierung wurden die gemessenen Schadstofffrachten in sogenannte Äquivalente umgerechnet. Diese geben das Ausmaß der Umweltwirkung an. Schadstoffe, die direkt klimawirksam sind, werden in CO₂-Äquivalenten (g_{CO2}*kWh_{prod.}⁻¹) angegeben. Zu ihnen gehören vor allem die Kohlenwasserstoffe, wie beispielsweise CH₄, das ein Treibhausgaspotenzial bezogen auf CO₂ von 21 besitzt. Bei der Verbrennung von Biogas handelt es sich um eine sogenannte CO₂ neutrale Verbrennung, da bei der Vergärung und anschließenden Verbrennung nur soviel CO₂ in die Atmosphäre emittiert wird, wie die Pflanze zuvor während des Wachstums aufgenommen hat. Daher wird nur die Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe (hauptsächlich in Form von Methan) aufgrund deren hoher Klimawirksamkeit in die CO₂-Bilanz mit aufgenommen.

NO_x dagegen ist ein Schadgas, das nicht direkt klimawirksam ist, sondern eutrophierend wirkt und an der Bildung bodennahen Ozons beteiligt ist. Es wird daher in SO₂-Äquivalenten angegeben. Die Umrechnungsfaktoren (CH₄ = 21; NO_x = 0,69625) sowie die Vergleichswerte des deutschen Strommixes wurden aus GEMIS (2004) entnommen.

In Abb. 31 sind die CO₂- und SO₂-Äquivalente der untersuchten BHKW dargestellt. Die CO₂-Äquivalente fallen im Vergleich zum deutschen Strommix mit ca. 624 g CO₂*kWh_{prod.}⁻¹ sehr gering aus, jedoch sind hier nur die direkt bei der Verbrennung entstandenen CO₂-Äquivalente aufgeführt ohne Berücksichtigung der gesamten Verfahrenskette. Messungen im Teillastbetrieb ergaben CO₂-Äquivalentemissionen von bis zu 100 g CO₂*kWh_{prod.}⁻¹, was für die gesamte Klimabilanz nicht unerheblich ist. Die umgerechneten SO₂-Äquivalente mit 1400 bis 8600 mg SO₂*kWh_{prod.}⁻¹ sind im Gegensatz zum deutschen Strommix mit 723 mg SO₂*kWh_{prod.}⁻¹ sehr hoch. Die Gründe hierfür liegen in den sehr hohen Verbrennungstemperaturen im Zusammenhang mit einem hohen Luftüberschuss und dem energiearmen und störfstoffhaltigen Biogas als Brenngas.

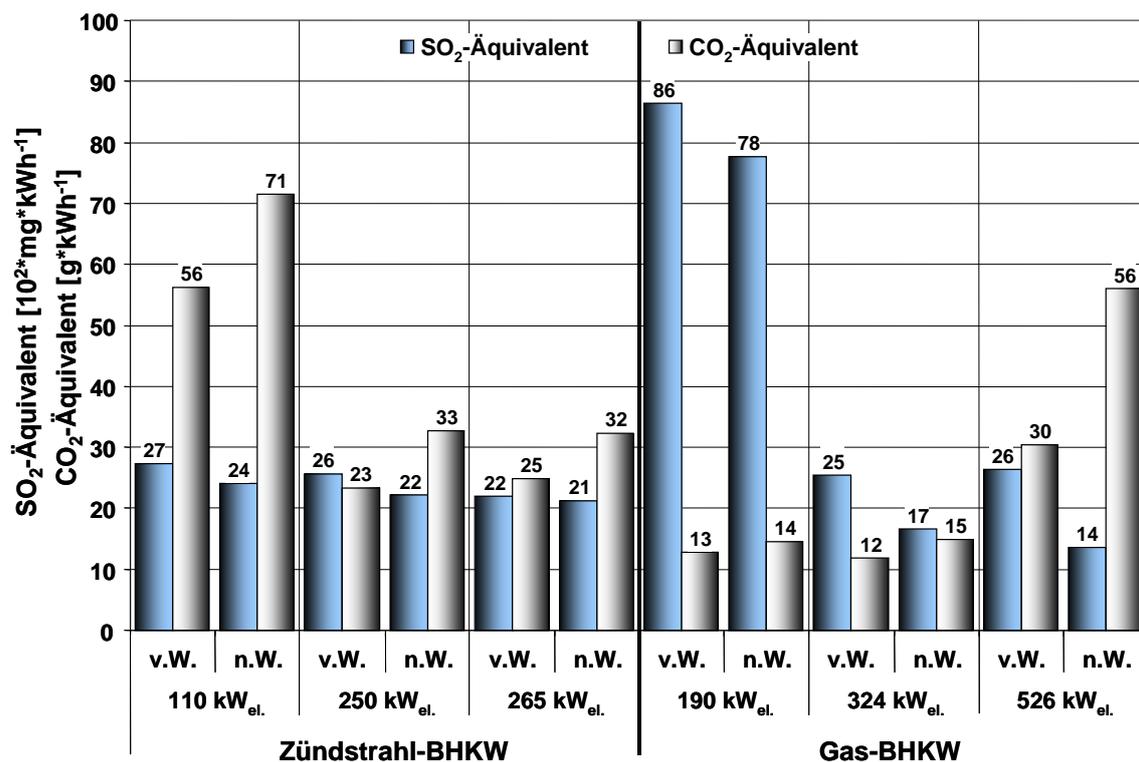


Abb. 31: CO₂- und SO₂-Äquivalentemissionen der untersuchten BHKW

6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Projekt wurden Untersuchungen an neuen, auf dem heutigen Stand der Technik befindlichen Gas- und Zündstrahl-BHKW durchgeführt. Dabei wurde das Leistungs- und Emissionsverhalten der BHKW in Abhängigkeit von der Wartung und Motoreinstellung unter den Bedingungen der Praxis untersucht. Als wesentliche Erkenntnisse dieser Untersuchungen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Es konnten verschiedene Wartungskonzepte untersucht werden
- Das Spektrum der Wartung reicht von einer alleinigen Wartung durch den Anlagenbetreiber, bis zu einem Vollwartungsvertrag mit dem Hersteller einschließlich garantierter Leistung und BHKW-Standzeit
- Eine alleinige Wartung und Einstellung durch den Anlagenbetreiber birgt die Gefahr, eine einseitige, nur auf die Effizienz und die Leistungsabgabe ausgerichtete Motoreinstellung vorzunehmen.
- In diesen Fällen wurden die Grenzwerte der TA-Luft bezüglich NO_x in erheblichem Maße überschritten
- Dem gegenüber kann eine regelmäßige Herstellerwartung und Motoreinstellung eine gleichmäßige und emissionsarme Betriebsweise garantieren
- Eine Überprüfung der Abgaswerte bei der Wartung ist zwingend erforderlich, was bei den hier durchgeführten Untersuchungen bei keinem Hersteller routinemäßig durchgeführt wurde
- Daher wurde auch bei fast allen BHKW vor der Wartung eine Grenzwertüberschreitung der NO_x-Konzentration im Abgas festgestellt
- Ein Konflikt besteht zwischen der NO_x-Reduktion unterhalb des Grenzwertes und dem Bestreben den Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen zu minimieren (im Wesentlichen Methan und Formaldehyd)
- Eine Reduktion des NO_x-Gehaltes bewirkt eine Verringerung der Leistung und des elektrischen Wirkungsgrades bei einer gleichzeitigen Erhöhung des Anteils an unverbrannten Kohlenwasserstoffen bis zur Entstehung von Zündaussetzern
- Die Erhöhung des Anteils an unverbrannten Kohlenwasserstoffen wirkt sich wiederum negativ auf die Treibhausbilanz aus
- Beim Teillastbetrieb erhöht sich der Ausstoß an unverbrannten Kohlenwasserstoffen und CO bis über das Doppelte. Auch der elektrische Wirkungsgrad sinkt erheblich
- Viele BHKW-Hersteller stellen ihr BHKW in der Praxis so ein, dass eine möglichst hohe elektrische Leistung und ein guter elektrischer Wirkungsgrad erzielt wird. Dies geht zu Lasten des NO_x-Ausstoßes und kann zu deutlichen Mehrmissionen führen mit zum Teil erheblichen Grenzwertüberschreitungen
- Um eine hohe Effizienz der Energiegewinnung zu erreichen, bei einer gleichzeitigen Verringerung der Abgasemissionen, müssen zusätzliche Maßnahmen zur Reduktion der NO_x-Konzentration im Abgas getroffen werden
- In Frage kommen die Rückführung der Abgase in den Verbrennungsraum und der Einsatz eines Systems zur Abgasnachbehandlung (z.B. SCR-Katalysator)

7 Literaturverzeichnis

- Bank, M. (2000): Basiswissen Umwelttechnik – Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht. 4. Auflage, Vogel-Buchverlag, Augsburg, p.439.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2006): Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoranlagen in Abhängigkeit von der Motorenwartung. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projektnummer 1325), Augsburg.
- 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., Fiedler A., Aiblinger-Madersbacher K., Beck R., Karrasch T., Zell B. (2007): Emissionsschutz, einschließlich Klimaschutz. In: Biogashandbuch Bayern – Materialienband, Kap. 2.2.2, Bayerische Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Stand Juli 2007
<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/doc/kap222.pdf>.
- GE Energy-Jenbacher Gasmotoren GmbH & Co OHG (2004): Handbuch zur Nutzung von Bio-, Klär- und Deponiegasen in GE Jenbacher Gasmotoren. Unternehmensprospekt. Eigendruck, 98 pp.
- Gronauer A., Effenberger M., Kaiser F., Schlattmann M. (2003): Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.). Materialien – Umwelt & Entwicklung Bayern, Abschlussbericht, 154 pp.
- Prescher K., Golisch J., Wichmann V. (2000): BHKW-Module bei Biogasanlagen – Entwicklungen und zukünftige Trends. In: Gülzower Fachgespräche: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Band 15, 26./27. Oktober 200, Weimar, p. 87-100.
- Sklorz M., Schnelle-Kreis J., Gottlieb A., Kühnerl N., Schmid B. (2004): Katalysatoren an Biogasmotoren. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Hrsg.). Materialien – Umwelt & Entwicklung Bayern, Band 182, 57 pp.
- TA-Luft (2002): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (GMBl. Nr. 25-29/2002 – 29 S. 511) in der Fassung vom 24. Juli 2002, p. 96-98.
- Testo (2000): Testo 350 Rauchgas-Analysegerät. Bedienungsanleitung mit Wartungsbuch. Testo GmbH, Lenzkirch

- Umweltbundesamt (2003): Future Diesel: Abgasgesetzgebung für Pkw, leichte Nfz und Lkw – Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, Berlin, p. 73.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2353.pdf>.
- Zwahr S., Eichert H. (2003): Vergleich von Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren anhand von Messungen an Biogasanlagen in Sachsen. In: Informationen zur Biogaserzeugung: Gesammelte Referate, Stand 2003. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl, p. 63-90.
- Zell B. (2002): "Emissionen von Biogas-Verbrennungsmotoren"; in „Fachtagung Biogasanlagen - Anforderungen zur Luftreinhaltung“, Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, 17.10.2002, p. 42-57.

