

Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung

Schlussbericht zum Forschungsvorhaben (LfU-Projekt Nr. 1325)



Augsburg, 2006

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: <http://www.lfu.bayern.de>

Das Projekt wurde vom Institut für Landtechnik, Bauwesern und Umwelttechnik (ILT) der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) durchgeführt.

Das Projekt wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV) finanziert und vom Landesamt für Umwelt (LfU) fachlich betreut und begleitet.

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (jetzt : Bayerisches Landesamt für Umwelt)
Auftragsdatum: 23.09.2003 (Projekt 1325)
Projektleitung: Dr. agr. Andreas Gronauer
Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Volker Aschmann, Dipl.-Ing. (FH) Rainer Kissel, Dr. agr. Hans Stanzel
Projektabschluss: 30.11.2005

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umwelt (Hrsg.):

Emissions- und Leistungsverhalten von Biogas-Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit von der Motorwartung, Augsburg, 2006

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2006

Gedruckt auf Recyclingpapier

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Problemstellung	7
2. Material und Methoden	8
2.1 Anlagenauswahl.....	8
2.1.1 Anlage 1	9
2.1.2 Anlage 2	10
2.1.3 Anlage 3	11
2.1.4 Anlage 4	12
2.1.5 Anlage 5	13
2.1.6 Anlage 6	14
2.1.7 Anlage 7	15
2.1.8 Anlage 8	16
2.2 Messtechnik.....	17
2.2.1 Messtechnik BHKW-Input.....	17
2.2.1.1 Gasmessstrecke	17
2.2.1.2 Ansaugluft	18
2.2.1.3 Zündölmenge.....	18
2.2.2 Messtechnik BHKW-Output.....	19
2.2.2.1 Abgaszusammensetzung	19
2.2.2.2 Stromerzeugung	20
2.2.2.3 Messfahrten	21
2.2.3 Messaufbau.....	21
2.3 Auswertung der erhobenen Rohdaten.....	22
2.3.1 BHKW-Input.....	22
2.3.1.1 Gasmenge (Normgasvolumen).....	22
2.3.1.2 Methangehalte	22
2.3.1.3 Zündölmenge.....	23
2.3.1.4 Gesamtenergieinput.....	23
2.3.2 BHKW-Output	23
2.3.2.1 Abgaszusammensetzung	23
2.3.2.2 Abgasmenge (Zuluft)	24
2.3.2.3 Elektrischer Wirkungsgrad.....	26
2.3.3 Statistische Auswertung	27
3. Ergebnisse	29
3.1 BHKW I - Anlage 1 (Hyundai-Zündstrahl-BHKW 160 kW_{el.}).....	29
3.1.1 Betriebszustand - ungewartet	29
3.1.2 Betriebszustand – Herstellerwartung	30
3.1.3 Zusammenfassung der Messreihen	31
3.2 BHKW II - Anlage 1 (MAN-Gas-BHKW 135 kW_{el.})	32
3.2.1 Betriebszustand - ungewartet	32
3.2.2 Betriebszustand – Betreiberwartung	32
3.2.3 Zusammenfassung der Messreihen	33
3.3 BHKW III - Anlage 2 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 80 kW_{el.}).....	35
3.3.1 Betriebszustand - ungewartet	35
3.3.2 Betriebszustand – Betreiberwartung	36
3.3.3 Betriebszustand – Herstellerwartung	37
3.3.4 Zusammenfassung der Messreihen	38
3.4 BHKW IV - Anlage 2 (VW-Gas-BHKW 30 kW_{el.}).....	39
3.4.1 Betriebszustand - ungewartet	39
3.4.2 Betriebszustand – Betreiberwartung	40

3.4.3	Betriebszustand – Herstellerwartung	40
3.4.4	Zusammenfassung der Messreihen	42
3.5	BHKW V – Anlage 3 (MAN-Gas-BHKW 75 kW_{el.})	43
3.5.1	Betriebszustand – ungewartet	43
3.5.2	Betriebszustand – Betreiberwartung	44
3.5.3	Betriebszustand – Herstellerwartung	45
3.5.4	Zusammenfassung der Messreihen	46
3.6	BHKW VI – Anlage 4 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 100 kW_{el.})	47
3.6.1	Betriebszustand – ungewartet	47
3.6.2	Betriebszustand – Herstellerwartung	48
3.6.3	Zusammenfassung der Messreihen	48
3.7	BHKW VII – Anlage 5 (MAN-Gas-BHKW 340 kW_{el.})	49
3.7.1	Betriebszustand – ungewartet	49
3.7.2	Betriebszustand – Betreiberwartung	50
3.7.3	Betriebszustand – Herstellerwartung	52
3.7.4	Zusammenfassung der Messreihen	53
3.8	BHKW VIII – Anlage 6 (Deutz-Zündstrahl-BHKW 250 kW_{el.})	54
3.8.1	Betriebszustand – ungewartet	54
3.8.2	Betriebszustand – Herstellerwartung	55
3.8.3	Zusammenfassung der Messreihen	56
3.9	BHKW IX – Anlage 7 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 30 kW_{el.})	57
3.9.1	Betriebszustand – ungewartet	57
3.9.2	Betriebszustand – Betreiberwartung	58
3.9.3	Betriebszustand – Herstellerwartung	58
3.9.4	Zusammenfassung der Messreihen	60
3.10	BHKW X – Anlage 8 (CAT-Gas-BHKW 170 kW_{el.})	61
3.10.1	Zusammenfassung der Messreihen	61
4.	Diskussion der Ergebnisse	62
4.1	Gaszusammensetzung	62
4.2	Zündölanteil	63
4.3	Abgaswerte	64
4.3.1	NO _x -Konzentration im Abgas	64
4.3.2	CO-Konzentration im Abgas	64
4.3.3	Formaldehyd	65
4.3.4	Kohlenwasserstoffe (Methanschluß)	66
4.4	Elektrische Wirkungsgrade	67
4.5	Einfluss der Wartung	70
4.5.1	Gas-BHKW	70
4.5.2	Zündstrahl-BHKW	72
5.	Zusammenfassung	74
6.	Fazit	75
7.	Literaturverzeichnis	76

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anlage I mit Fermenter, Nachgärbehälter, Gashaube und Vorrichtung zur Feststoffeinbringung.....	9
Abb. 2: Anlage II mit Fermenter, Pumpenstation und Gärrückstandslager.....	10
Abb. 3: Anlage III mit Maschinenraum, Fermenter Einspülschacht und Stallungen.....	11
Abb. 4: Anlage IV mit BHKW-Containern, Fermentern mit Gashaube und Notkühleinrichtung.....	12
Abb. 5: Anlage V mit Maschinenraum, Fermentern und Notkühleinrichtung.....	13
Abb. 6: Anlage VI mit Fermenter, Gashaube, Gärrückstandslager und Stallungen.....	14
Abb. 7: Anlage VII mit Vorgrube, Maschinenraum, Fermentern und Nachgärbehälter.....	15
Abb. 8: Anlage VIII mit Maschinenraum, Notkühleinrichtungen und Gärrückstandslagern..	16
Abb. 9: Mobile Gasmessstrecke im Praxis-Einsatz.....	18
Abb. 10: Messung der Zuluftmenge in der Praxis.....	18
Abb. 11: Zündölwaage am Zündstrahl-BHKW.....	19
Abb. 12: Rüstsatz B zur Bestimmung der Abgaszusammensetzung.....	20
Abb. 13: Multimes-Netzanalysator am BHKW-Schaltschrank.....	21
Abb. 14: Mobile Messeinrichtung zur Überprüfung von Biogas – BHKW.....	21
Abb. 15: Schematischer Aufbau der gesamten Messtechnik.....	22
Abb. 16: Messergebnisse des 160 kW Zündstrahl-BHKW.....	31
Abb. 17: Verlauf der Abgaskonzentrationen in Abhängigkeit des Lambda-Wertes am Beispiel eines Erdgas-BHKW (nach HERDIN 2002).....	34
Abb. 18: Messergebnisse des 135 kW Gas-BHKW.....	34
Abb. 19: Messergebnisse des 80 kW Zündstrahl-BHKW.....	38
Abb. 20: Messergebnisse des 30 kW Gas-BHKW.....	42
Abb. 21: Messergebnisse des 75 kW Gas-BHKW.....	46
Abb. 22: Messergebnisse des 100 kW Zündstrahl-BHKW.....	49
Abb. 23: Messergebnisse des 340 kW Gas-BHKW.....	53
Abb. 24: Messergebnisse des 250 kW Zündstrahl-BHKW.....	56
Abb. 25: Messergebnisse des 30 kW Zündstrahl-BHKW.....	60
Abb. 26: Messergebnisse des 170 kW Gas-BHKW.....	61
Abb. 27: Durchschnittliche Gaszusammensetzung der einzelnen Anlagen.....	62
Abb. 28: Zündölanteil der untersuchten Zündstrahl-BHKW in Abhängigkeit des Betriebszustandes.....	63
Abb. 29: NO _x -Werte im Abgas aller gemessenen BHKW.....	64
Abb. 30: CO-Werte im Abgas aller gemessenen BHKW.....	65
Abb. 31: Formaldehydgehalte im Abgas der gemessenen BHKW.....	66
Abb. 32: Kohlenwasserstoffgehalte im Abgas der gemessenen BHKW.....	67
Abb. 33: Gemessene Wirkungsgrade im Vergleich zu den Herstellerangaben.....	67
Abb. 34: Verlauf der elektrischen Wirkungsgrade über die gesamte Messdauer (ca. 1 Jahr).....	68
Abb. 35: Vergleich der ermittelten Wirkungsgrade (nach DIN ISO 3046) mit Angaben der Herstellerfirmen.....	69
Abb. 36: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Gas-BHKW (trockenes Gas mit 5 % O ₂).....	71
Abb. 37: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Zündstrahl-BHKW (trockenes Gas mit 5 % O ₂).....	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Emissionsgrenzwerte für Biogas-BHKW nach TA-Luft (≥ 1 MW) und Richtwerte nach Biogashandbuch (2004)	7
Tab. 2: Gegenüberstellung der ausgewählten Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren (mit Hersteller)	8
Tab. 3: Installierte BHKW an der Anlage I	9
Tab. 4: Installierte BHKW an der Anlage II	10
Tab. 5: Installierte BHKW an der Anlage III	11
Tab. 6: Installierte BHKW an der Anlage IV	12
Tab. 7: Installierte BHKW an der Anlage V	13
Tab. 8: Installierte BHKW an der Anlage VI	14
Tab. 9: Installierte BHKW an der Anlage VII	15
Tab. 10: Installierte BHKW an der Anlage VIII	16
Tab. 11: Komponenten zum Energieinput und eingesetzte Messtechnik	17
Tab. 12: Komponenten zum BHKW- Output und eingesetzte Messtechnik	19
Tab. 13: Molgewicht und Mol-dichte der gemessenen Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung)	24
Tab. 14: Bilanz der zugeführten Stoffmengen	26
Tab. 15: Volumenstrom der Abgaskomponenten	26
Tab. 16: Wirkungsgradänderung eines Gasmotor-BHKW durch zugrunde gelegte Bezugsbedingungen aus der DIN ISO 3046	27
Tab. 17: BHKW I ungewartet: Bilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte).....	29
Tab. 18: BHKW I ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)..	30
Tab. 19: BHKW I – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte).....	30
Tab. 20: BHKW I – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	31
Tab. 21: BHKW II ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte) ...	32
Tab. 22: BHKW II ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte). 32	
Tab. 23: BHKW II – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	33
Tab. 24: BHKW II – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte).....	33
Tab. 25: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte) ..	35
Tab. 26: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwert). 35	
Tab. 27: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwert)...	36
Tab. 28: BHKW III – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte).....	36
Tab. 29: BHKW III – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	36
Tab. 30: BHKW III – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	37
Tab. 31: BHKW III – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	37
Tab. 32: BHKW III– Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	38
Tab. 33: BHKW IV– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte) 39	
Tab. 34: BHKW IV– ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	39

Tab. 35: BHKW IV – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	40
Tab. 36: BHKW IV – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	40
Tab. 37: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	41
Tab. 38: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	41
Tab. 39: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	42
Tab. 40: BHKW V– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte) .	43
Tab. 41: BHKW V – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	43
Tab. 42: BHKW V – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	43
Tab. 43: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	44
Tab. 44: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	44
Tab. 45: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	45
Tab. 46: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	45
Tab. 47: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	45
Tab. 48: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	46
Tab. 49: BHKW VI– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	47
Tab. 50: BHKW VI – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	47
Tab. 51: BHKW VI – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	48
Tab. 52: BHKW VI – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	48
Tab. 53: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	50
Tab. 54: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	50
Tab. 55: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	50
Tab. 56: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	51
Tab. 57: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	51
Tab. 58: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	51
Tab. 59: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	52
Tab. 60: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	52
Tab. 61: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	53

Tab. 62: BHKW VIII– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	54
Tab. 63: BHKW VIII – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	54
Tab. 64: BHKW VIII – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	55
Tab. 65: BHKW VIII – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	55
Tab. 66: BHKW IX– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	57
Tab. 67: BHKW IX – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	57
Tab. 68: BHKW IX – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	57
Tab. 69: BHKW IX – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	58
Tab. 70: BHKW IX – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	58
Tab. 71: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)	59
Tab. 72: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)	59
Tab. 73: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)	59
Tab. 74: Betriebsstunden und Wirkungsgradänderungen ($\Delta \eta$) während der Messreihen	69
Tab. 75: Statistische Auswertung über die Auswirkung der Wartung auf NO _x -Werte und Wirkungsgrad der Gas-BHKW (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %)	71
Tab. 76: Statistische Auswertung über die Auswirkung der Wartung auf NO _x -Werte und Wirkungsgrad der Zündstrahl-BHKW (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %)	73

1. Einleitung und Problemstellung

Für den Betrieb von Blockheizkraftwerken (BHKW) mit einer Gesamtfeuerungswärmeleistung von ≥ 1 MW ist eine Genehmigung nach Bundesimmissionsschutzgesetz BImSchG erforderlich, wodurch die von der *Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft* (TA-Luft) vorgegebenen Grenzwerte bezüglich der Abgasemissionen eingehalten werden müssen (Tab. 1). Kleinere, dem Baurecht unterliegende Anlagen müssen dem Stand der Technik genügen. In diesem Fall gibt es zwar keine gesetzlich bindenden Grenz-, jedoch Richtwerte, die sich an den Vorgaben der TA-Luft orientieren und die z.B. im Biogashandbuch Bayern (2004) auch als Grundlage zur Genehmigung von Biogasanlagen herangezogen werden können (Tab. 1).

Tab. 1: Emissionsgrenzwerte für Biogas-BHKW nach TA-Luft (≥ 1 MW) und Richtwerte nach Biogashandbuch (2004)

	TA-Luft	Biogashandbuch Bayern
	Grenzwerte ≥ 1 MW (BImSchG)	Richtwerte < 1 MW
CO-Werte		
Gasmotoren	1000 mg/m ³	1000 mg/m ³
Zündstrahlmotoren	2000 mg/m ³	2000 mg/m ³
NO_x-Werte		
Gasmotoren	500 mg/m ³	500 mg/m ³
Zündstrahlmotoren	1000 mg/m ³	1500 mg/m ³

Von der Fachhochschule Zwickau wurden im Jahr 2000 Untersuchungen hinsichtlich des Abgasverhaltens unterschiedlicher biogasbetriebener BHKW in Abhängigkeit der Luftzufuhr, der Leistung, des Einspritzzeitpunktes und der Zündölmenge durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass Gasmotoren im oberen Leistungsbereich (> 170 kW) unter Einhaltung des entsprechenden Luftverhältnisses die Vorgaben der TA-Luft sicher erfüllen (JÄKEL UND EICHERT 2001). Das entspricht den Literatur- bzw. Herstellerangaben, nach denen die Grenzwerteinhalten innermotorische Maßnahmen erfordert (KÖHLER 1997; WAERDT 2000; POTT 2001). Ob daraus Wirkungsgradeinbußen zu verzeichnen sind geht aus dem Forschungsbericht nicht hervor. Mit den vier untersuchten Zündstrahlaggregaten (75 – 120 kW_{el.}) konnten die erforderlichen CO und NO_x-Grenzwerte nicht gleichzeitig eingehalten werden (JÄKEL UND EICHERT 2001). Unabhängig vom Betriebszustand durchgeführte Messungen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft an Zündstrahlaggregaten (22 – 160 kW_{el.}) kommen zum gleichen Ergebnis (GRONAUER et. al. 2002). In diesem Forschungsvorhaben wurde außerdem festgestellt, dass sich die Abgaseigenschaften tendenziell mit der Größe des Aggregats verbessern und die zum Teil drastischen Grenzwertüberschreitungen auf den generell mangelhaften Wartungszustand der Aggregate zurückzuführen sind. Die Resultate entsprechen den Aussagen von MOHR (1997), der bei reinem Dieselmotorbetrieb unter Vollast geringe Emissionen an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (C_nH_m) bei gleichzeitigem relativ hohem Ausstoß an NO_x angibt, so dass der entsprechende Grenzwert der TA-Luft nur schwer und unter Inkaufnahme von Wirkungsgradverlusten erreicht werden kann.

Es besteht also nach wie vor Klärungsbedarf darüber, in wie weit die Abgaszusammensetzung und der elektrische Wirkungsgrad durch verschiedene Motorenarten bzw. deren Leistungsklassen, sowie deren Wartungszustand beeinflusst wird und ob sich Schwankungen in der Brenngaszusammensetzung diesbezüglich auswirken.

Für die Beantwortung dieser Fragestellungen wurde am Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik (ILT), der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) im Auftrag vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz (LfU) ein Projekt durchgeführt. Finanziert wurde dieses Projekt vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (StMUGV).

2. Material und Methoden

Für eine erfolgreiche Durchführung des Projektes war die Erarbeitung eines geeigneten Messprogramms, die Auswahl verschiedener Praxis-Biogasanlagen und eine Adaption der Messtechnik an die besonderen Gegebenheiten der einzelnen Anlagen nötig. Die Auswahl der Anlagen, der Messtechnik und das Messprogramm, sowie die Auswertungsmethoden der erhobenen Daten werden in folgenden Kapiteln dargestellt.

2.1 Anlagenauswahl

Um bei den Untersuchungen einen repräsentativen Überblick über das gesamte Spektrum der verschiedenen Leistungsklassen zu erhalten wurden die BHKW in fünf Leistungsklassen unterteilt:

- Klasse 1: ≤ 50 kW
- Klasse 2: zwischen 50 u. 100 kW
- Klasse 3: zwischen 100 u. 150 kW
- Klasse 4: zwischen 150 u. 200 kW
- Klasse 5: ≥ 200 kW

Aus diesen fünf Leistungsklassen sollte jeweils ein Zündstrahl- und ein Gas-BHKW für das Messprogramm zur Verfügung stehen.

Um in das Messprogramm aufgenommen zu werden, mussten die Anlagen einige Auswahlkriterien erfüllen:

- Abdeckung der Bandbreite der Leistungsklassen
- Abdeckung der Bandbreite der Herstellerfirmen
- Inbetriebnahme des BHKW möglichst ab dem Jahr 2003
- genügend großer BHKW-Raum für die Aufstellung verschiedener Messgeräte
- Leichter Zugang zum BHKW und zum Abgasrohr
- Möglichkeit zum Einbau von Messgeräten in bestehende Leitungen (Messgasstrecke)
- Zustimmung und Mitarbeit des Anlagenbetreibers
- Erreichbarkeit der Anlage (Entfernung unter 150 km)

In Zusammenarbeit mit den Herstellerfirmen wurden verschiedene Anlagen ausgewählt, beachtet und die vorhandenen BHKW gegebenenfalls ins Messprogramm aufgenommen (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Gegenüberstellung der ausgewählten Zündstrahl- und Gas-Otto-Motoren (mit Hersteller)

Leistungsklasse	I	II	III	IV	V
Zündstrahl-BHKW	30 kW (HJS) ¹⁾	80 kW (HJS)	100 kW (HJS)	160 kW (OET) ²⁾	250 kW (D.u.B.) ³⁾
Gas-BHKW	30 kW (N.Q.) ⁴⁾	75 kW (Hochreiter) ⁵⁾	135 kW (Hagl) ⁶⁾	170 kW (OET)	340 kW (Hochreiter)

¹⁾ Hans-Jürgen Schnell - Anlagenbau, ²⁾ Ochtruper Energietechnik, ³⁾ Dreyer & Bosse Kraftwerke GmbH, ⁴⁾ NQ – Anlagentechnik, ⁵⁾ Johann Hochreiter GmbH, ⁶⁾ Hagl Nikolaus Elektroinstallation

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Eigenschaften der einzelnen ausgewählten Anlagen kurz vorgestellt. Dabei wird auf das Jahr der Inbetriebnahme, die Anlagengröße und die Art der verwendeten Substrate eingegangen. Außerdem sind die Arten und Leistungsklassen der im Einsatz befindlichen BHKW dargestellt.



2.1.1 Anlage 1



Abb. 1: Anlage I mit Fermenter, Nachgärbehälter, Gashaube und Vorrichtung zur Feststoffeinbringung

- Inbetriebnahme: 2002
- Anlage:
- Vorgrube
 - Fermenter mit 650 m³
 - Nachgärbehälter mit 1000 m³,
 - Gärrückstandslager mit 1800 m³ und 2000 m³
- Gärsubstrate:
- Bullen- und Schweinegülle (ca. 300 GV),
 - Mais- und Grassilage
- Fütterungsintervalle: - Fütterung 2x täglich über Feststoffdosierer (Vielfraß) (Abb. 1)

Tab. 3: Installierte BHKW an der Anlage I

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	el. Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Ochtruper Energietechnik	Zündstrahl-BHKW	Hyundai	160kW	Jan 04	
BHKW II*	Hagl Nikolaus Elektroinstallation	Gas-BHKW	MAN	135kW	Nov 02	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW



2.1.2 Anlage 2



Abb. 2: Anlage II mit Fermenter, Pumpstation und Gärrückstandslager

- Inbetriebnahme: 2001
- Anlage:
- Fermenter mit 760 m³
 - Nachgärbehälter mit 760 m³
 - mehrere Gärrückstandslager mit insgesamt 1200 m³
- Gärsubstrate:
- Mastbullengülle (ca. 160 GV),
 - Maissilage, Getreideschrot, sowie Schlempe und Kartoffelreste
- Fütterungsintervalle:
- Fütterung 2x täglich über Einspülschacht
 - ab März 2005 kontinuierlich über Feststoffdosierer (Hochreiter)

Tab. 4: Installierte BHKW an der Anlage II

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Hans-Jürgen Schnell - Anlagenbau	Zündstrahl-BHKW	Perkins	80 kW	Feb 03 (generalüberholt)	
BHKW II*	NQ – Anlagentechnik	Gas-BHKW	VW	30 kW	Jan 03	
BHKW III	NQ – Anlagentechnik	Gas-BHKW	MAN	80 kW	Dez 03	

*: ins Messprogramm aufgenommene BHKW


2.1.3 Anlage 3



Abb. 3: Anlage III mit Maschinenraum, Fermenter Einspülschacht und Stallungen

- Inbetriebnahme: 2000
- Anlage:
- Fermenter mit 670 m³
 - Nachgärbehälter mit 400 m³
 - Gärrückstandslager mit 1200 m³
- Gärsubstrate:
- Milchvieh- und Kälbergülle (ca. 140 GV),
 - Mais- und Grassilage
- Fütterungsintervalle:
- Fütterung 2x täglich über Einspülschacht
 - ab Juni 2005 kontinuierlich über Feststoffdosierer (U.T.S.)

Tab. 5: Installierte BHKW an der Anlage III

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Johann Hochreiter GmbH	Gas-Otto	John Deere	75 kW	Dez 03	
BHKW II	Johann Hochreiter GmbH	Gas-Otto	John Deere	80 kW	2002	
BHKW III	Johann Hochreiter GmbH	Zündstrahler	John Deere	45 kW	2001	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW


2.1.4 Anlage 4



Abb. 4: Anlage IV mit BHKW-Containern, Fermentern mit Gashaube und Notkühleinrichtung

- Inbetriebnahme: 2002
- Anlage:
- Fermenter 1 mit 560 m³
 - Fermenter 2 mit 615 m³
 - Gärrückstandslager mit 650 m³
- Gärsubstrate:
- Milchviehgülle (125 GV),
 - Mais- und Grassilage
- Fütterungsintervalle: - kontinuierliche Substratzugabe über Feststoffdosierer (Vielfraß)

Tab. 6: Installierte BHKW an der Anlage IV

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Hans-Jürgen Schnell - Anlagenbau	Zündstrahler	Perkins	100 kW	Jan 04	
BHKW II	Hans-Jürgen Schnell - Anlagenbau	Zündstrahler	Perkins	100 kW	Nov 02	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW


2.1.5 Anlage 5



Abb. 5: Anlage V mit Maschinenraum, Fermentern und Notkühleinrichtung

Inbetriebnahme: 2002
 Anlage: - Vorgrube
 - Fermenter mit 900 m³
 - Nachgärbehälter mit 1800 m³
 - Gärrückstandslager mit 1800 m³
 Gärsubstrate: - Bullen- und Kälbergülle (ca. 250 GV),
 - Mais- und Grassilage, Kartoffeln, Karotten und Zwiebeln
 Fütterungsintervalle: - Feststofffütterung 2x täglich über Vorgrube

Tab. 7: Installierte BHKW an der Anlage V

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Johann Hochreiter GmbH	Gas-Otto	MAN	340 kW	Nov 02	
BHKW II	Johann Hochreiter GmbH	Gas-Otto	MAN	160 kW	Jan 02	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW


2.1.6 Anlage 6



Abb. 6: Anlage VI mit Fermenter, Gashaube, Gärrückstandslager und Stallungen

- Inbetriebnahme: 2000
- Anlage:
- Fermenter mit 900 m³
 - Nachgärbehälter mit 500 m³
 - Gärrückstandslager mit 1500 m³
- Gärsubstrate:
- Schweinegülle (ca. 100 GV),
 - Speisereste (2800 t), Fettabscheiderfette (700 t) und
 - Maissilage
- Fütterungsintervalle:
- Speisereste und Fettabscheiderfette kontinuierlich über Hygienisierung
 - Feststoffe diskontinuierlich über Vorgrube

Tab. 8: Installierte BHKW an der Anlage VI

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Dreyer & Bosse Kraftwerke GmbH	Zündstrahler	Deutz	250 kW	Jul 03	
BHKW II	Dreyer & Bosse Kraftwerke GmbH	Zündstrahler	Deutz	110 kW	Aug 03	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW


2.1.7 Anlage 7



Abb. 7: Anlage VII mit Vorgrube, Maschinenraum, Fermentern und Nachgärbehälter

Inbetriebnahme: 2002
 Anlage: - Vorgrube
 - Fermenter 1 (thermophil) mit 53 m³ (liegend)
 - Fermenter 2 u. 3 (mesophil) mit 57 m³ u. 150 m³ (stehend)
 - Gärrückstandslager mit 800 m³
 Gärsubstrate: - ausschließlich Rindergülle (70 GV)
 Fütterungsintervalle: - kontinuierlich über Vorgrube

Tab. 9: Installierte BHKW an der Anlage VII

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Hans-Jürgen Schnell - Anlagenbau	Zündstrahler	Perkins	30 kW	Nov 02	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW

2.1.8 Anlage 8



Abb. 8: Anlage VIII mit Maschinenraum, Notkühleinrichtungen und Gärrückstandslagern


Inbetriebnahme: 2000

Anlage: - Fermenter 1 mit 700 m³
 - Fermenter 2 mit 700 m³
 - Nachgärbehälter mit 1250 m³
 - mehrere Gärrückstandslager mit insgesamt 3000 m³

Gärsubstrate: - Bullen- u. Schweinegülle (ca. 500 GV),
 - Maissilage, Futterrüben, Zuckerrübenblätter, Kartoffeln

Fütterungsintervalle: - Feststoffe 2x täglich über Feststoffeinbringung

Tab. 10: Installierte BHKW an der Anlage VIII

BHKW	Hersteller	Typ	Motor	Leistung	Inbetriebnahme	Bild
BHKW I*	Ochtruper Energietechnik	Gasmotor	CAT	170 kW	März 04	
BHKW II	Ochtruper Energietechnik	Zündstrahler	Deutz	240 kW	Okt 03	
BHKW III	Ochtruper Energietechnik	Zündstrahler	Scania	160 kW	Okt 02	

*ins Messprogramm aufgenommene BHKW

2.2 Messtechnik

Um sämtliche erforderlichen Messdaten auf allen ausgewählten Anlagen erfassen zu können, wurden am ILT verschiedene mobile Messmodule entwickelt, die es ermöglichen, die Messtechnik an die jeweiligen Bedingungen vor Ort anzupassen. Nachfolgend werden diese Module vorgestellt und das ausgewählte Messprogramm mit der dazu gehörigen Messtechnik skizziert.

2.2.1 Messtechnik BHKW-Input

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Motors sowie zur quantitativen Bestimmung des Abgasstromes werden mit Hilfe eines vom ILT konstruierten Rüstsatzes (vgl. Abb. 9) die mengenmäßige Brennstoffzufuhr (Biogas, ggf. Zündöl) und deren Zusammensetzung ermittelt. Hierfür sind die in Tab. 11 dargestellten Parameter zu messen.

Tab. 11: Komponenten zum Energieinput und eingesetzte Messtechnik

Komponente	Messgerät	Einheiten
Biogasmenge	Ölgelagerter Turbinenradzähler	m ³
Gaszusammensetzung	AWITE-Gasanalysator	CH ₄ , CO ₂ , H ₂ S, O ₂ , H ₂ in Vol.%
Gasdruck	Absolutdruckmesser	mbar
Gastemperatur	PT 100 Temperaturfühler	°C
Ansaugluft	Druckdifferenzmesser	mbar
Zündölmenge	Zündölwaage (ILT)	kg
Lufttemperatur	PT 100 Temperaturfühler	°C
Luftfeuchte	kapazitiver Feuchtefühler	%
Luftdruck	Absolutdruckmesser	mbar

2.2.1.1 Gasmessstrecke

Bis auf die Vorrichtungen zur Messung der Ansaugluft- und Zündölmenge sind alle in Tab. 11 aufgelisteten Geräte in der Gasmessstrecke integriert. Zur kontinuierlichen Aufzeichnung der Daten ist die Apparatur außerdem mit einem Datalogger (Hydra) ausgestattet, der mit allen vorhandenen Messvorrichtungen verbunden ist. Mit Hilfe einer auf den Datalogger abgestimmten Software können die Daten in den Laptop eingelesen und entsprechend weiter verarbeitet werden. Ausgenommen hiervon ist der Gaszähler, dessen Zählerstand während des Einsatzes aufgrund einer fehlenden Schnittstelle alle 10 Minuten von Hand notiert wird. Zur Erfassung der Inputströme ist die Gasmessstrecke (Abb. 9) in die Gasleitung eines jeden zu untersuchenden BHKW zu integrieren. Dazu muss die Gasleitung vor der Gasregelstrecke geöffnet, ein entsprechend gefertigtes Adapterstück eingesetzt und die Messstrecke angeschlossen werden. Nach Beendigung der dreiteiligen Messreihe wird das Adapterstück wieder entfernt und durch ein Zwischenstück ersetzt.



Abb. 9: Mobile Gasmessstrecke im Praxis-Einsatz

2.2.1.2 Ansaugluft

Analog wird mit der Einrichtung zur Bestimmung der angesaugten Luftmenge verfahren. Hier ist in einem Testo-Trichter eine Sonde zur Druckdifferenzmessung integriert. Der Trichter ist mit Hilfe einer Gummimanschette so an den Ansaugstutzen des Motors montiert, dass keine Fremdluft angesaugt werden kann (Abb. 10). Mit einem Handgerät wird der Differenzdruck an der Sonde gemessen und die Daten alle zehn Minuten notiert.



Abb. 10: Messung der Zuluftmenge in der Praxis

2.2.1.3 Zündölmenge

Zur Bestimmung der verbrauchten Heizölmenge bei den ausgewählten BHKW mit Zündstrahlmotoren wird das an eine Wägezelle montierte Ölfass mit Heizöl aus den an den Betrieben befindlichen Vorrattanks befüllt. Hierfür wird ein mit einer Handpumpe verbundener Teflonschlauch in den Vorratsbehälter eingeführt und das Öl in das Fass gepumpt. Anschließend wird die Verbindung der Dieselleitung zu den Vorrattanks unterbrochen und stattdessen

eine Verbindung zum Ölfass hergestellt (Abb. 11). Der Ölverbrauch während des Betriebes kann dann aufgrund der Verringerung des Fassgewichtes gravimetrisch bestimmt werden. Das Gewicht wird an einer mit der Wägezelle verbundenen digitalen Anzeige abgelesen. Da die Anzeige keine digitale Schnittstelle aufweist, wird die Gewichtsveränderung auch in diesem Fall alle 10 Minuten notiert.



Abb. 11: Zündölwaage am Zündstrahl-BHKW

2.2.2 Messtechnik BHKW-Output

Der Abgasstrom wird aus den kontinuierlich gemessenen Parametern Motorzuluft-, Gas- und Zündölmenge errechnet. Ferner wird die durch das BHKW innerhalb einer bestimmten Motorenlaufzeit produzierte Strommenge mit Hilfe eines Leistungsmesskoffers bestimmt. Zur Bestimmung der Abgaszusammensetzung ist ein weiterer am ILT konstruierter Rüstsatz im Einsatz (vgl. Abb. 12).

Tab. 12: Komponenten zum BHKW- Output und eingesetzte Messtechnik

Komponente	Messgerät	Einheiten
Gesamtheit der Kohlenwasserstoffe	FID	ppm
CO, NO, NO _x , NO ₂ , SO ₂ , O ₂ , CO ₂ , Temperatur	Testo	ppm; %, °C
Formaldehyd	BIFA - Analysegerät	ppm
Strommenge	KBR Multimess	kWh

2.2.2.1 Abgaszusammensetzung

Die Zusammensetzung des Abgasstromes wird mit Hilfe eines am Ende des Auspuffs montierten Edelstahlrohres bestimmt, durch das das Abgas nach unten geleitet wird. Aufgrund des sperrigen und schweren Aufbaus der Abgasmessstrecke scheidet eine Installation zur Messung am oberen Ende des Auspuffs aus. Auf den Einbau einer Umleitungsstrecke muss zurückgegriffen werden, da im BHKW-Raum keine geeigneten Bedingungen vorherrschen (Probennahmestellen, Platzangebot, Temperatur), und die Auspuffrohre z.T. mehr als sieben Meter Höhe aufweisen. Eine für die Messung notwendige Demontage der Rohre ist aufgrund des Gewichtes nur in Einzelfällen möglich.

Im unteren Bereich der Umleitungsstrecke befinden sich zwei Bohrungen, durch die die Testo- und die FID-Sonde eingeführt werden können. Mit dem Testo-Gerät werden Abgastemperatur sowie die Gehalte an CO, CO₂, O₂, NO, NO₂, NO_x in % bzw. ppm gemessen. Der Flammen-Ionisationsdetektor (FID) liefert die Werte für die im Abgas vorhandene Gesamtmenge an Kohlenwasserstoffen in ppm. Zur Bestimmung des Formaldehydgehaltes wird der durch die FID-Sonde eingesaugte Abgasstrom über die beheizte Formaldehydmessvorrichtung geleitet, bevor er das FID erreicht (Abb. 12).



Abb. 12: Rüstsatz B zur Bestimmung der Abgaszusammensetzung

2.2.2.2 Stromerzeugung

Zur Messung der vom Generator erzeugten Menge an elektrischer Energie wurde eigens für dieses Projekt ein Multimes-Netzanalysator der Firma KBR angeschafft (Abb. 13). Mit Stromzangen wird der Stromfluss, mit Eingangsklemmen für den Spannungspfad wird die Spannung in den vom Generator abgehenden drei Phasen gemessen. Diese beiden Größen werden in dem Gerät verrechnet und die produzierte Strommenge in kWh angezeigt. Da für dieses Projekt nur eine begrenzte Anzahl an Laptops zur Verfügung steht und sich der Schaltschrank i.d.R. nicht in unmittelbarer Nähe des BHKW befindet, wo ein Laptop zur Datenaufzeichnung der Gasmessstrecke zur Verfügung stünde, werden die Stromzählerstände in einem 10 Minuten-Intervall notiert.

Das Messgerät steht erst seit dem 05.08.04 zur Verfügung weshalb die vorher ermittelten Stromdaten aus den betriebseigenen Stromzählern an den Schaltschränken der zu Beginn der Kampagne gemessenen BHKW stammen. Bei den nächsten Messungen wurden diese Zähler mit den Aufzeichnungen des Netzanalysators verglichen und die Werte dementsprechend angepasst.



Abb. 13: Multimesh-Netzanalysator am BHKW-Schaltschrank

2.2.2.3 Messfahrten

Um die zu den Messungen notwendigen Konstruktionen transportieren zu können, wurde ein am ILT vorhandener geschlossener Anhänger so modifiziert, dass alle Rüstsätze sowie die zur Installation notwendigen Kleinteile und Werkzeuge darin Platz finden. Somit wurde eine mobile Messeinrichtung zur Beurteilung von BHKW in Biogasanlagen geschaffen (vgl. Abb. 14).



Abb. 14: Mobile Messeinrichtung zur Überprüfung von Biogas – BHKW

2.2.3 Messaufbau

Zur Erläuterung der Durchführung der Messungen in und am Maschinenraum, ist in Abb. 15 ein Messaufbau graphisch dargestellt. Auf der linken Seite befindet sich die Gasmessstrecke zur Erfassung der Gaseigenschaften und Gasmenge. Der Rüstsatz zur Bestimmung der Zündöl- und Ansaugluftmenge ist in der Bildmitte zu sehen. Der zur Messung der Abgaseigenschaften konstruierte Rüstsatz ist in der Graphik rechts abgebildet.

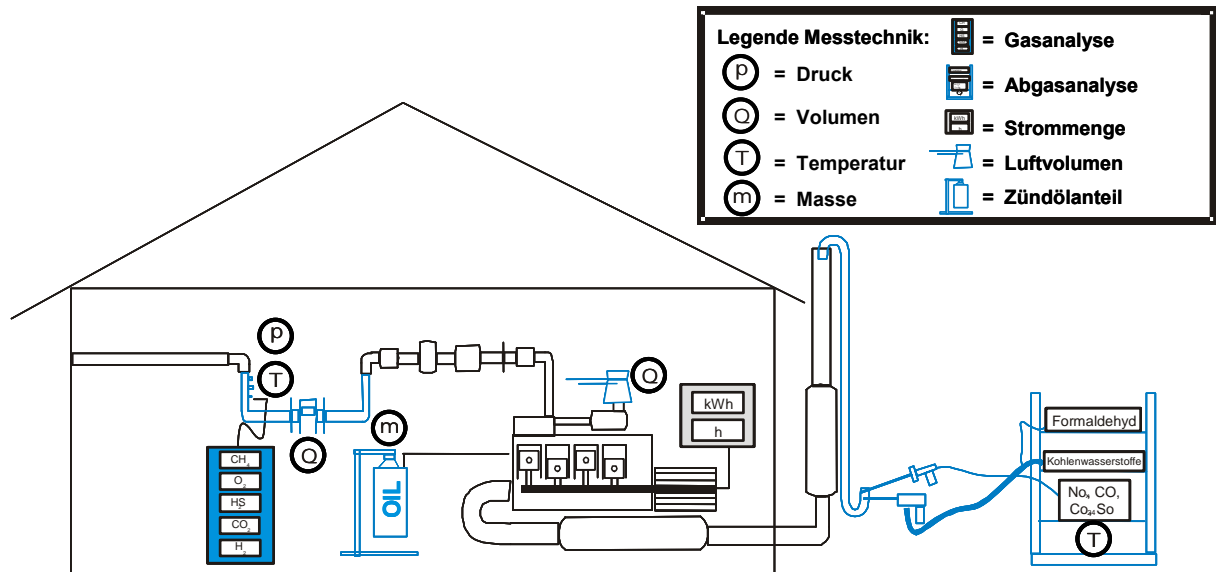


Abb. 15: Schematischer Aufbau der gesamten Messtechnik

2.3 Auswertung der erhobenen Rohdaten

Die in der Messkampagne erhobenen Rohdaten müssen entsprechend aufbereitet werden, damit die einzelnen zur Beurteilung eines BHKW notwendigen Betriebsparameter berechnet werden können. Auf welche Art und Weise die Rohdaten und die Charakteristika der BHKW bearbeitet bzw. berechnet wurden, ist in diesem Kapitel dargestellt.

2.3.1 BHKW-Input

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

2.3.1.1 Gasmenge (Normgasvolumen)

Mit den gemessenen Gastemperaturen, dem Gasdruck in der Leitung und der Gasmenge unter diesen Bedingungen kann letztere auf Normbedingungen umgerechnet (1013 mbar, 0 °C) werden. Dabei wird das allgemeine Gasgesetz angewandt:

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

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

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

2.3.1.2 Methangehalte

Da die Sensoren in dem eingesetzten Gasanalysator nicht druckkompensiert sind, werden bei vom Kalibrationsdruck abweichenden Druckverhältnissen zu hohe bzw. zu niedrige Methangehalte angezeigt. Die tatsächliche Methankonzentration kann mit Hilfe des Druckes in der Leitung und dem bekannten Kalibrationsdruck (965 mbar) berechnet werden:

$$C_K = \frac{C_g * p_k}{p_g}$$

C_K = Methankonzentration unter Kalibrierbedingungen [%]
 C_g = gemessene Methankonzentration [%]
 p_K = Kalibrationsdruck [965 mbar]
 p_g = Druck in der Gasleitung [mbar]

2.3.1.3 Zündölmenge

Die Zündölmenge wird gravimetrisch bestimmt. Die Dichte von Heizöl extraleicht beträgt 0,855 kg/l und der Heizwert 10 kWh/l. Somit wird die durch Zündöl zugeführte Energiemenge folgendermaßen berechnet.

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

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

2.3.1.4 Gesamtenergieinput

Die dem BHKW zugeführte Energiemenge ist die Summe aus der im Biogas enthaltenen und der durch das Heizöl zugeführten Energie. Der Heizwert von Methan beträgt 35,9 MJ/m³ bzw. 9,97 kWh/m³ unter Normbedingungen (1013 mbar, 0 °C). 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 = Energiegehalt des Zündöls [kWh]

2.3.2 BHKW-Output

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

2.3.2.1 Abgaszusammensetzung

Die im Abgas vorliegenden Komponenten werden in ppm gemessen. Die von der TA-Luft geforderten Grenzwerte sind in der Einheit mg/m³ 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):

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

E_M = Massenkonzentration [mg/m³]
 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 l (bei Normbedingungen: $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$) ergibt. In Tab. 13 sind diese Faktoren für die verschiedenen Gase unter der Bezeichnung Moldichte dargestellt.

Tab. 13: 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 (ANON. 2001):

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

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

2.3.2.2 Abgasmenge (Zuluft)

Aus den Zusammensetzungen und Mengen der in den Motor eingehenden Stoffe 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 dieses Sauerstoffes 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 den Volumenstrom umgerechnet.

1. Gesamtvolumenstrom: $\dot{V} = 1,291 * \sqrt{p_{dyn}} * 22 \quad \text{in m}^3/\text{h}$
2. Sauerstoffanteil: $V(\text{O}_2) = V_{ges} * 0,2095$
3. Sauerstoffmenge: $n(\text{O}_2) = \frac{p * V(\text{O}_2)}{R * T}$
4. Normvolumen: $V_N = \frac{n * R * T}{p}$; wobei $T=273\text{K}$ und $P=101300\text{Pa}$

Heizöl:

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

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

Durch die Verbrennung entsteht folgendes Normvolumen an CO₂:

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

Verbrennung des Heizöls: $\text{C}_n\text{H}_{2n} + 1,5n \text{ O}_2 \rightarrow n \text{ CO}_2 + n \text{ H}_2\text{O}$

Da bei der Verbrennung pro C-Atom auch noch ein Molekül Wasser entsteht, kommt dieselbe Menge durch H₂O 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

also $1,5 * 59,77 = 89,66 \text{ mol O}_2/\text{l Heizöl}$
oder in Normvolumen ausgedrückt sind das $2,008 \text{ Nm}^3 \text{ O}_2/\text{l Heizöl}$.

Biogas:

Verbrennung von Methan: $\text{CH}_4 + 2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{ H}_2\text{O}$

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

Zur Verdeutlichung der Vorgehensweise bei der Berechnung des Abgasvolumenstroms ist im Folgenden eine Beispielrechnung für den Durchsatz eines Praxis-BHKW dargestellt (vgl. Tab. 14 und Tab. 15):

Biogasmenge	57,7 Nm ³ /h
Luftmenge:	469,33 Nm ³ /h
Zündölmenge:	4,2 l/h

Tab. 14: Bilanz der zugeführten Stoffmengen

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

Tab. 15: Volumenstrom der Abgaskomponenten

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

Ausstoß pro Stunde: 64,22 Nm³/h CO₂
 366,5 Nm³/h N₂
 66,33 Nm³/h H₂O entspricht 53,3 kg/h
 29,15 Nm³/h O₂ berechnet

Abgas gesamt: 526,3 Nm³/h
 Abgas ohne H₂O; 459,97 Nm³/h

Das Testo-Abgasmessgerät misst bei 5°C und demnach bei 1% absoluter Luftfeuchte. Deshalb wird der trockene Volumenstrom von 459,97 Nm³/h in Bezug auf 1% H₂O gesetzt und ergibt somit ein Volumen von **464,62 Nm³/h**. Aus den 29,15 Nm³/h (6,34 % O₂) werden bei 5 % O₂ Bezugssauerstoff 23 Nm³/h und somit ergibt sich ein trockenes Gesamtabgasvolumen von 453,88 Nm³/h.

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:

- O₂ vorhanden: 98,3 Nm³/h
 - O₂nötig: 69,14 Nm³/h
- => **λ = 1,42**

2.3.2.3 Elektrischer Wirkungsgrad

Zur Bestimmung des elektrischen Wirkungsgrades eines BHKW werden der produzierte Generatorstrom sowie die dem Motor zugeführte Gesamtenergiemenge benötigt. Am motorischen Prozess beteiligte elektrischen Verbraucher (Hilfseinrichtungen wie z. B. Wasserpumpe und Gasgebläse), die Generatorstrom beziehen, jedoch i.d.R. hinter der Messstelle angeklemmt 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: $\phi_r = 30 \%$
- 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 herauszusuchen, die dem Anhang der DIN-Norm beigelegt ist. Damit kann der Energieverbrauch und damit 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 bzw. ob die Ladeluft gekühlt wird. Wird vom Hersteller keine andere Angabe zum mechanischen Wirkungsgrad des Motors gemacht, wird zur Bestimmung des Korrekturfaktors β der Wert $\eta_m = 0,8$ (mechanischer Wirkungsgrad) zugrunde gelegt. In Tab. 16 sind die zur Berechnung der Wirkungsgradänderung eines abgasturbogeladenen Gasmotors zugrunde gelegten Mess- und Tabellenwerte beispielhaft dargestellt.

Tab. 16: Wirkungsgradänderung eines Gasmotor-BHKW durch zugrunde gelegte Bezugsbedingungen aus der 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

2.3.3 Statistische Auswertung

Für eine abschließende Bewertung der Abgas- und Leistungsveränderungen in Abhängigkeit des Wartungszustandes der untersuchten BHKW ist eine statistische Auswertung der erhobenen Daten unerlässlich. Diese Auswertung erfolgt anhand einer Varianzanalyse der Abgaswerte und der Wirkungsgrade in Bezug auf den Wartungszustand und den Messtermin auf

Basis der Halbstundenmittelwerte. Als Auswertungsprogramm dient das Statistikprogramm SAS. Die Varianten, die sich signifikant unterscheiden, wurden später einem geeigneten Mittelwertvergleich (Tukey-Test) unterzogen.

Hieraus soll eine Abschätzung erfolgen, mit welchen Wartungsmaßnahmen und bei welchen BHKW eine signifikante Verbesserung der Abgaswerte erreicht werden kann, und ob sich dies günstig auf den Wirkungsgrad auswirkt.

3. Ergebnisse

Im Ergebnisteil sind sämtliche Abgas- und Leistungsmessungen an den einzelnen BHKW aufgelistet und interpretiert. Ein allgemeiner Vergleich der Auswirkungen der Wartungsarbeiten auf das Abgasverhalten und die statistische Auswertung befinden sich in Kap. 4.5.

3.1 BHKW I - Anlage 1 (Hyundai-Zündstrahl-BHKW 160 kW_{el.})

Gemäß dem zwischen der Herstellerfirma und dem Betreiber geschlossenen Wartungsvertrag dürfen an diesem BHKW die Wartungsarbeiten nur von der Firma OET (Ochtruper Energie-Technik) durchgeführt werden, wenn die Gewährleistung erhalten bleiben soll. Da somit keine Messung nach einer Betreiberwartung möglich ist, wurden pro Messkampagne nur zwei Messreihen erstellt. Das BHKW wurde zweimal in ungewartetem Zustand und nach einer Wartung durch den Hersteller untersucht. Eine dritte Überprüfung konnte nicht durchgeführt werden, da die Maschine im März 2005 aufgrund eines größeren Schadens ausgetauscht werden musste.

Die erste Messreihe wurde am 12.07.2004 (Betriebsstundenzählerstand: Bhz = 1.100 Bh) begonnen, die zweite am 26.10.2004 (Bhz = 2.200 Bh).

3.1.1 Betriebszustand - ungewartet

In Tab. 17 sind die Ergebnisse der ersten Messreihe (12.07.2004) zur Energiezufuhr, Motorleistung und elektrischem Wirkungsgrad des BHKW in ungewartetem Zustand dargestellt. Aufgrund der Übersichtlichkeit und der Konstanz der Daten wurden Stundenmittelwerte bzw. ein Mittelwert über die gesamte Messzeit berechnet. Zur Bestimmung der produzierten Strommenge musste auf den betriebseigenen Stromzähler zurückgegriffen werden, da zu diesem Zeitpunkt das Multimes-Gerät nicht zur Verfügung stand. Spätere Kontrollmessungen haben ergeben, dass die Werte des installierten Zählers und die des Multimes-Zählers übereinstimmen. Der in der Tabelle in Litern angegebene Zündölverbrauch entspricht einem mittleren Anteil an der zugeführten Gesamtenergiemenge von 14,7 % über den gesamten Messzeitraum.

Tab. 17: BHKW I ungewartet: Bilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
58,8	51,4	5,2	349,5	143,1	40,9
57,8	52,6	5,2	348,8	139,9	40,1
57,5	52,6	5,2	347,0	138,3	39,9
57,2	53,0	4,9	344,8	138,3	40,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
57,8	52,4	5,1	347,5	139,9	40,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 18 sind die Ergebnisse der Messreihe vom 26.10.2004 dargestellt, bei der das BHKW zum zweiten mal in ungewartetem Zustand untersucht wurde. Zum Zeitpunkt der Messungen konnte das mobile Strommessgerät wieder eingesetzt werden. Der mittlere Zündölanteil an der zugeführten Gesamtenergie betrug 12,8 %.

Tab. 18: BHKW I ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
57,2	51,3	4,1	330,7	124,3	37,8
56,0	52,3	4,2	330,7	123,5	37,4
56,6	52,6	4,4	336,2	126,5	37,6
56,7	52,9	4,4	339,0	126,5	37,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
56,6	52,2	4,3	334,2	125,2	37,5

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.1.2 Betriebszustand – Herstellerwartung

Von den Fachkräften der Fa. OET wurden im Anschluss an die erste Messreihe folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Zündzeitpunktes
- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Analog dem Kapitel 3.1.1 ist in Tab. 19 die Energiebilanz der ersten Messreihe (15.07.2004) dargestellt, nachdem von der Herstellerfirma OET die Wartungsarbeiten durchgeführt wurden. Auch bei dieser Messung musste auf das mobile Strommessgerät Multimes ver zichtet werden. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe in gewartetem Zustand betrug von der zugeführten Gesamtenergiemenge 13,4 %.

Tab. 19: BHKW I – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
53,5	49,4	4,2	300,8	122,3	40,7
56,8	49,3	4,5	317,8	130,3	41,0
56,6	49,5	4,2	315,5	127,9	40,5
57,2	49,9	4,0	318,2	128,7	40,4
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
56,0	49,5	4,2	313,1	127,3	40,7

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 20 sind die Ergebnisse der Messreihe vom 27.10.2004 dargestellt, bei der das BHKW zum zweiten mal nach einer Herstellerwartung untersucht wurde. Dabei wurden von OET die gleichen Wartungsarbeiten durchgeführt wie zur ersten Messkampagne.

Wie bereits zur zweiten Messung in ungewartetem Zustand, stand das mobile Strommessgerät wieder zur Verfügung. Der mittlere Zündölanteil während der zweiten Messreihe in gewartem Zustand betrug von der zugeführten Gesamtenergiemenge 16,5 %.

Tab. 20: BHKW I – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
55,2	50,6	5,3	330,0	129,5	39,3
52,4	52,1	5,3	322,6	119,5	37,0
52,9	52,3	5,4	327,2	122,5	37,5
53,6	52,2	5,5	330,8	124,5	37,6
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
53,5	51,8	5,4	327,6	124,0	37,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.1.3 Zusammenfassung der Messreihen

In Abb. 16 sind die Messergebnisse der zwei Messungen graphisch dargestellt. Die angestrebte und auch eingestellte elektrische Leistung von 160 kW_{el.} konnte bei keiner Messung erreicht werden. Die Ursache für diese geringe Leistungsabgabe ist nicht bekannt. Die Abgasrichtwerte für CO können sicher eingehalten werden, während die NO_x-Werte überschritten werden. Die Einhaltung eines Zündölanteils von 10 % der gesamten zugeführten Energie wird nicht erreicht. Die Herstellerwartung kann zwar den momentanen Wirkungsgrad geringfügig erhöhen, hat aber keinen Einfluss auf die Abgaswerte. Ein Grund für die hohen Zündölanteile und NO_x-Werte liegen ursächlich in einer Wartung ohne Kontrolle der Abgaswerte und des Zündölverbrauches. Die gemessenen Kohlenwasserstoffgehalte im Abgas liegen in einem mittleren Bereich der überprüften Zündstrahl-BHKW.

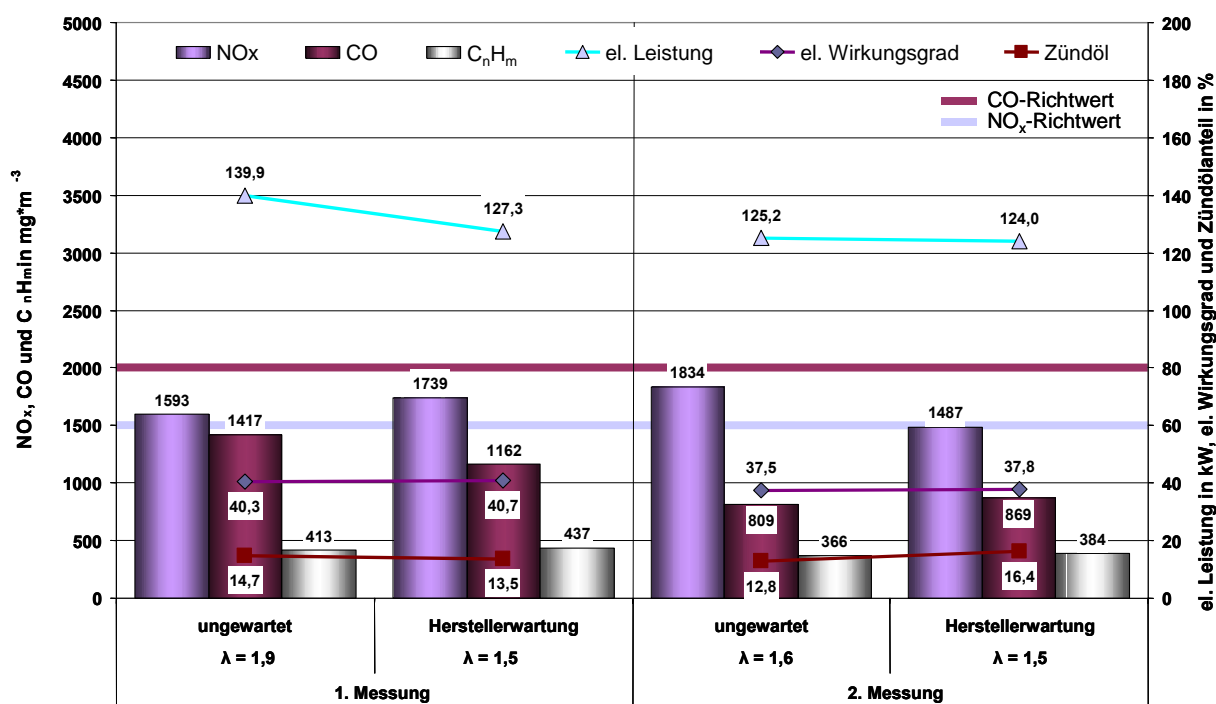


Abb. 16: Messergebnisse des 160 kW Zündstrahl-BHKW

Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW ist mit über 40 % bei der ersten Messung relativ hoch, fällt aber bei der zweiten Messung bereits auf ca. 38 % ab. Im Rahmen des Projektes wurden an diesem BHKW trotz des Betriebes im Teillastbereich die höchsten elektrischen Wirkungsgrade gemessen.

3.2 BHKW II - Anlage 1 (MAN-Gas-BHKW 135 kW_{el.})

Das Konzept der Firma Hagl sah zum Zeitpunkt der Messkampagne keine Servicewartung an ihren BHKW vor. Deshalb wurde das BHKW nur in ungewartetem Zustand und nach einer Wartung durch den Anlagenbetreiber untersucht. Auch dieses BHKW wurde im Winter 2004/2005 nach ca. 20.000 Bh durch ein neues Aggregat ersetzt, so dass nur zwei Messkampagnen durchgeführt werden konnten.

3.2.1 Betriebszustand - ungewartet

In Tab. 21 sind die Ergebnisse der ersten Messreihe am 06.07.2004 (Bhz = 14.100 Bh) zur Energiezufuhr, Motorleistung und elektrischem Wirkungsgrad des BHKW mit Gasmotor in ungewartetem Zustand dargestellt. Auch hier wurden Stundenmittelwerte bzw. ein Mittelwert über die gesamte Messzeit berechnet. Zur Bestimmung der produzierten Strommenge musste auf den betriebseigenen Stromzähler zurückgegriffen werden, da zu diesem Zeitpunkt das Multimesst-Gerät nicht zur Verfügung stand. Spätere Kontrollmessungen haben ergeben, dass die Werte des installierten Zählers und die des Multimesst-Zählers weitestgehend übereinstimmen (Abweichung: 0,7 % vom Messwert).

Tab. 21: BHKW II ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
73,3	49,3	359,3	127,1	35,4
77,9	50,8	392,7	134,0	34,1
76,7	51,4	391,6	133,9	34,2
80,7	52,0	415,6	133,9	32,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
77,2	50,9	389,8	132,2	34,0

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 22 sind die Ergebnisse der Messreihe vom 09.11.2004 (Bhz = 17.000 Bh) dargestellt, bei der das BHKW zum zweiten Mal im ungewarteten Zustand untersucht wurde. Das mobile Strommessgerät konnte zu diesem Zeitpunkt wieder eingesetzt werden.

Tab. 22: BHKW II ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
77,8	51,7	402,3	134,8	33,5
77,6	52,0	403,6	135,8	33,6
76,9	52,2	401,5	135,8	33,8
76,9	52,5	403,6	136,8	33,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
77,3	52,1	402,7	135,8	33,7

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.2.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Vom Betreiber der Biogasanlage wurden im Anschluss an die erste Messreihe am 06.07.04 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 14.150 Stunden folgende Wartungsarbeiten am Motor des BHKW durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Prüfung der Zündkerzen
- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die Messungen erfolgten am Tag darauf (07.07.2004), die Ergebnisse sind in Tab. 23 dargestellt.

Tab. 23: BHKW II – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
71,1	47,1	332,5	114,2	34,3
77,3	49,2	377,1	136,9	36,3
74,4	51,2	377,1	124,7	33,1
78,2	52,1	403,9	136,7	33,8
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
75,2	49,9	372,7	128,1	34,4

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die durchgeführten Wartungsarbeiten zum zweiten Messtermin im Betriebszustand „Betreiberwartung“ entsprechen denen vom 06.07.2004. Die Messungen erfolgten am 11.11.2004 bei einem Betriebsstundenzählerstand des BHKW von 17.059 Stunden. In Tab. 24 sind die aus der Datenerhebung berechneten motorspezifischen Parameter dargestellt.

Tab. 24: BHKW II – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
76,4	53,0	404,5	136,8	33,8
75,4	53,3	401,3	134,8	33,6
75,7	53,8	406,6	136,8	33,6
75,3	54,3	407,8	135,8	33,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
75,7	53,6	405,1	136,1	33,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.2.3 Zusammenfassung der Messreihen

Bei diesem BHKW lag eine eindeutige Einstellung nach Leistungskriterien vor, d.h. durch den geringen Lambda-Wert von 1,3 bzw. 1,2 konnte zwar eine hohe Leistung gefahren werden, jedoch nur unter Inkaufnahme von weit überhöhten NO_x-Gehalten im Abgas (Abb. 17), die teilweise den Richtwert um das neunfache überschritten (Abb. 18). Positiv wirkte sich dies auf die CO-Konzentration im Abgas aus. An diesem Aggregat wurden von allen untersuchten BHKW die höchsten NO_x- aber auch die niedrigsten CO-Werte im Abgas gemessen.

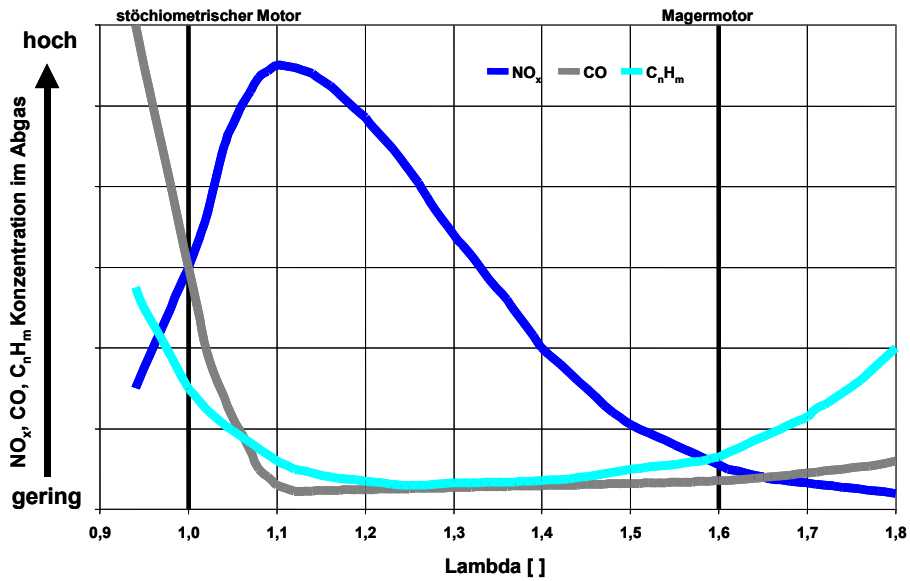


Abb. 17: Verlauf der Abgaskonzentrationen in Abhängigkeit des Lambda-Wertes am Beispiel eines Erdgas-BHKW (nach HERDIN 2002)

Durch eine Erhöhung des Lambda-Wertes von 1,3 auf 1,6 konnte der NO_x-Gehalt im Abgas erheblich gesenkt werden (Abb. 18). Eine Überwachung der Abgaswerte ist deshalb unverzichtbar. Mangel an Information bzw. die hohen Kosten führen dazu, dass von Betreiberseite die Anschaffung eines Abgasüberwachungsgerätes in der Regel nicht in Erwägung gezogen wird. Durch die Erhöhung des Lambda-Wertes musste jedoch eine geringfügige Verringerung der Leistung (ca. 3 %) in Kauf genommen werden. Die geringen C_nH_m-Gehalte im Abgas dürften auf eine optimale Einstellung der Ventile und der damit verbundenen Reduzierung des Methanschlupfs zurückzuführen sein. Bei der 2. Messung konnten aufgrund von Reparaturarbeiten am Messgerät keine C_nH_m-Gehalte ermittelt werden.

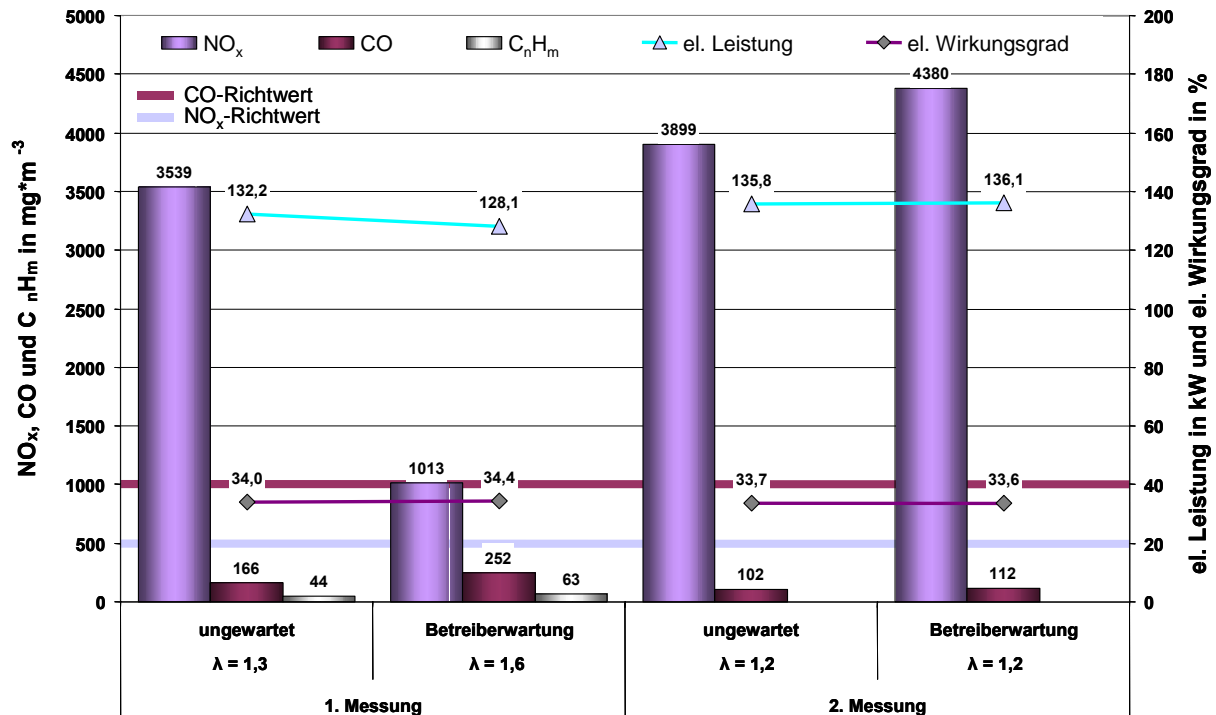


Abb. 18: Messergebnisse des 135 kW Gas-BHKW

Auch bei diesem BHKW konnte eine leichte Reduktion des Wirkungsgrades von der ersten zur zweiten Messkampagne festgestellt werden.

3.3 BHKW III - Anlage 2 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 80 kW_{el.})

3.3.1 Betriebszustand - ungewartet

Tab. 25 zeigt die Ergebnisse der ersten Messreihe am 03.08.2004 (Bhz = 22.270 Bh) in ungewartetem Zustand. Bei den Daten handelt es sich um Stundenmittelwerte bzw. einen Mittelwert über die gesamte Messzeit. Aufgrund eines Defektes am Rüstsatz zur Bestimmung der verbrauchten Zündölmenge, konnte diese in den ersten 90 Minuten der Messung nicht festgestellt werden. Aus diesem Grund liegen energiespezifische Daten nur über rund drei Stunden vor. Zur Erfassung der produzierten Strommenge musste, wie auch bei der Messung nach der Wartung des Betreibers, auf den betriebseigenen Stromzähler zurückgegriffen werden, da das mobile Messgerät erst zum Termin nach der Herstellerwartung zur Verfügung stand. Bei Kontrollmessungen wurden die Werte der beiden Stromzähler miteinander verglichen, wobei die gemessenen Abweichungen als vernachlässigbar betrachtet werden können. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe in ungewartetem Zustand betrug von der zugeführten Gesamtenergiemenge 11,5 %.

Tab. 25: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
48,0	43,3	2,5	229,4	79,2	34,5
47,6	44,4	3,3	241,0	80,70	33,5
46,3	45,6	2,5	233,4	78,7	33,7
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
47,3	44,4	2,7	234,6	79,5	33,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 26 sind die Ergebnisse der Messreihe vom 15.03.2005 (Bhz = 26.530 Bh) dargestellt, bei der das BHKW zum zweiten Mal im ungewarteten Zustand untersucht wurde. Aufgrund einer Unterbrechung der Zündölzufuhr musste die um 15:40 Uhr begonnene Messung bereits um 16:40 Uhr abgebrochen werden. Da der Betrieb der Maschine erst um 20:00 Uhr wieder aufgenommen werden konnte, liegen die Ergebnisse nur für einen Zeitraum von einer Stunde vor. Der mittlere Zündölanteil während der zweiten Messreihe in ungewartetem Zustand betrug 10,9 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 26: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwert)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
44,0	46,7	2,5	230,4	80,03	34,7

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 27 sind die Ergebnisse der Messreihe vom 28.06.2005 (Bhz = 28.827 Bh) dargestellt, bei der das BHKW zum dritten Mal im ungewarteten Zustand untersucht wurde. Auch zu diesem Messtermin musste eine Unterbrechung der Zündölzufuhr in Kauf genommen werden (um 15:25 Uhr). Die Messung konnte erst um 19:15 Uhr fortgesetzt werden und wurde auf einen Zeitraum von einer Stunde begrenzt. Der mittlere Zündölanteil während der dritten Messreihe in ungewartetem Zustand betrug 11,7 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 27: BHKW III ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwert)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
43,2	49,5	2,8	238,3	81,5	34,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.3.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Vom Betreiber der Biogasanlage wurden im Anschluss an die erste Messreihe am 03.08.04 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 22.276 Stunden folgende Wartungsarbeiten am Motor des BHKW durchgeführt:

- Wechsel der Einspritzdüsen
- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die Ergebnisse der im Anschluss an die Betreiberwartung durchgeführten Messungen vom 04.08.2004 sind in Tab. 28 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe im Zustand nach der Betreiberwartung betrug 12,9 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 28: BHKW III – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh *	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
45,6	45,8	3,1	237,8	83,7	35,2
43,5	45,6	2,9	226,3	78,7	34,8
43,6	45,2	3,1	226,0	78,7	34,8
45,1	44,6	2,8	226,9	79,7	35,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
44,5	45,3	3,0	229,2	80,2	35,0

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die durchgeführten Wartungsarbeiten zum zweiten Messtermin im Betriebszustand Betreiberwartung beschränken sich auf einen Ölwechsel sowie den Austausch von Öl- und Luftfilter. Die Messungen erfolgten am 29.06.2005 bei einem Betriebsstundenzählerstand des BHKW von 28.837 Stunden. Da die anschließende Herstellerwartung unmittelbar nach der Datenaufnahme erfolgte, musste die Messung auf drei Stunden eingeschränkt werden. Aufgrund zeitlicher Engpässe beim Landwirt wurden nur zwei Betreiberwartungen durchgeführt. In Tab. 29 sind die aus der Datenerhebung berechneten motorspezifischen Parameter dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der zweiten Messreihe im Zustand nach der Betreiberwartung betrug 11,9 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 29: BHKW III – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh *	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
44,8	46,9	2,9	235,6	81,4	34,6
45,3	46,3	2,8	234,9	82,7	35,2
45,1	45,5	2,6	228,7	79,7	35,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
45,1	46,2	2,8	233,1	81,3	34,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.3.3 Betriebszustand – Herstellerwartung

Vor Beginn der dritten Messreihe am 05.08.04 wurden von den Fachleuten der Herstellerfirma H. J. Schnell folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Reparatur des Turboladers
- Erneuerung des Ladeluftkühlers
- Einstellung des Ventilspiels
- Kontrolle des Zündzeitpunkts (keine Änderungen notwendig)
- Durchführung einer Kompressionsprüfung

Die Ergebnisse der im Anschluss an die Herstellerwartung durchgeführten Messungen sind in Tab. 30 dargestellt. Für die Messungen im Betriebszustand nach der Herstellerwartung wurde das mobile Messgerät (Multimes) der Fa. KBR verwendet. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe im Zustand nach der Herstellerwartung betrug 9,2 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 30: BHKW III – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
42,5	47,7	2,0	220,0	78,7	35,8
42,7	49,0	2,1	226,5	80,7	35,6
42,6	48,6	2,1	225,3	79,7	35,4
45,4	47,1	2,1	231,9	81,7	35,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
43,3	48,1	2,1	225,9	80,2	35,5

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Folgende Arbeiten wurden vor Erstellung der zweiten Messreihe nach einer Herstellerwartung durchgeführt:

- Wechsel der Einspritzdüsen
- Wechsel von Öl- und Luftfilter
- Einstellung des Ventilspiels
- Reinigung des Turboladers

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen am 17.03.2005 sind in Tab. 31 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der zweiten Messreihe im Zustand nach der Herstellerwartung betrug 9,7 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 31: BHKW III – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
44,4	47,5	2,3	232,7	83,7	36,0
43,0	48,9	2,3	233,2	79,7	34,2
43,0	49,5	2,2	234,1	80,7	34,5
42,3	50,2	2,2	233,5	80,7	34,6
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
43,2	49,0	2,3	233,4	81,2	34,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Folgende Arbeiten wurden vor Erstellung der dritten Messreihe nach einer Herstellerwartung von der Fa. Schnell durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels

- Ölwechsel
- Öl- und Luftfilterwechsel
- Kontrolle Einstellung des Einspritzzeitpunktes

Die Ergebnisse der im Anschluss durchgeführten Messungen vom 29.06.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 28.860 sind in Tab. 32 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil betrug 8,3 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 32: BHKW III- Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
49,1	46,1	2,1	244,0	85,7	35,1
47,2	47,0	2,0	238,5	81,7	34,3
47,3	47,3	2,0	240,9	81,7	33,9
47,4	47,8	2,0	243,5	83,5	34,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
47,7	47,1	2,0	241,7	83,2	34,4

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.3.4 Zusammenfassung der Messreihen

Bei dem in Abb. 19 dargestellten BHKW wird bei der Wartung durch den Hersteller eine Motoreinstellung nach Abgaswerten und Zündölverbrauch durchgeführt. Eine Einhaltung der Abgasrichtwerte und des Zündölverbrauches unter 10 % ist dadurch ohne Leistungsverluste möglich. Der el. Wirkungsgrad und die Leistung des BHKW konnte sogar noch leicht erhöht werden. Die erhöhten CO-Werte während der 1. Messung (ungewartet, Betreiberwartung) sind auf einen defekten Abgasturbolader und Ladeluftkühler zurückzuführen. Die C_nH_m-Werte lagen mit 500 mg/m³ in einem für Zündstrahl-BHKW mittleren Bereich.

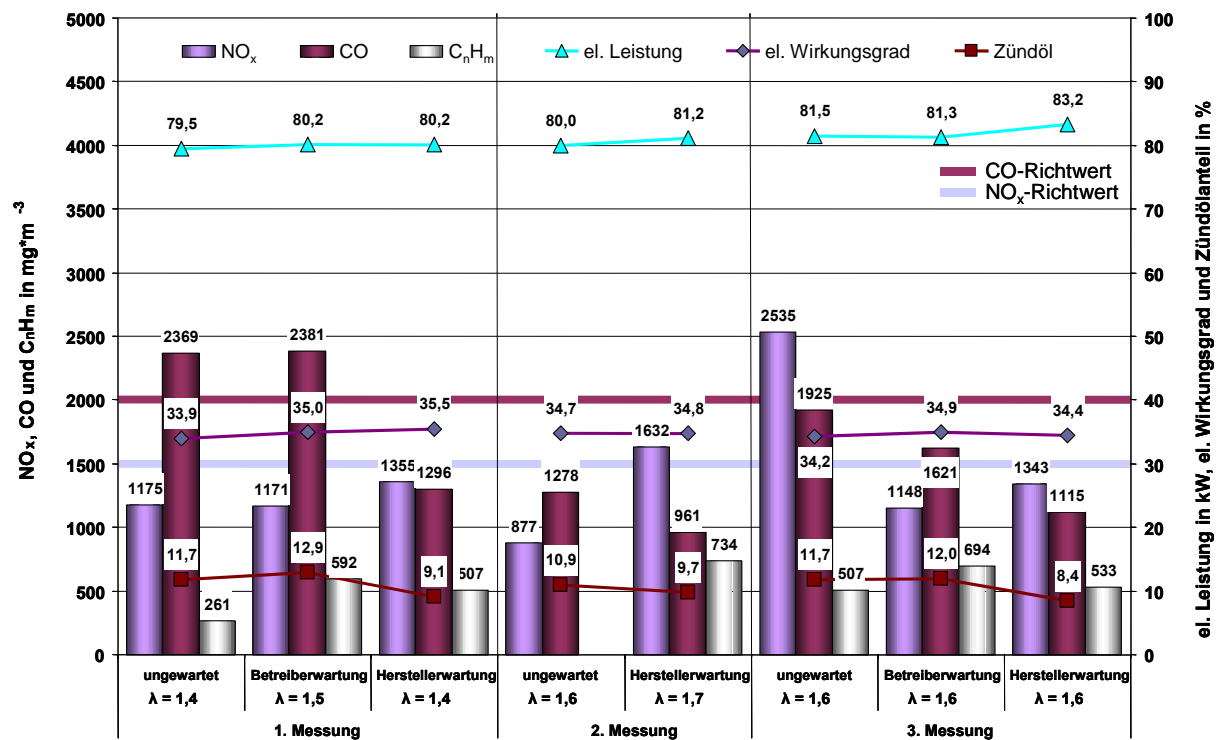


Abb. 19: Messergebnisse des 80 kW Zündstrahl-BHKW

3.4 BHKW IV - Anlage 2 (VW-Gas-BHKW 30 kW_{el.})

An diesem BHKW wurden drei Messkampagnen durchgeführt. Während des zweiten Messtermins konnten nur zwei Messreihen erstellt werden, da die Lambda-Regelung der Maschine ausgefallen war und nicht vom Betreiber repariert werden konnte. Somit konnte das zugeführte Gas-Luft-Gemisch nicht den Erfordernissen der Maschine angepasst werden, was zu ungleichmäßigem Lauf des Motors geführt hat. Aufgrund daraus resultierender Produktionseinbußen musste im Sinne des Betreibers auf die Betreiberwartung verzichtet werden. Alle Wartungsarbeiten wurden im Zuge des Austauschs des defekten Lambda-Reglers von der Herstellerfirma ausgeführt. Auch zur dritten Messkampagne musste aufgrund zeitlicher Engpässe beim Betreiber auf die Betreiberwartung verzichtet werden.

3.4.1 Betriebszustand - ungewartet

Tab. 33 zeigt die Ergebnisse der ersten Messreihe (27.07.2004) am BHKW mit Gasmotor in ungewartetem Zustand. Zur Erfassung der produzierten Strommenge musste für die ersten beiden Messreihen auf den betriebseigenen Stromzähler zurückgegriffen werden. Kontrollmessungen (über sechs Stunden), bei denen die Werte der beiden Stromzähler miteinander verglichen wurden, ergaben keine nennenswerte Abweichung des betriebseigenen Zählers. Der Stand des Betriebsstundenzählers lag vor der ersten Messung bei 11.370 Stunden.

Tab. 33: BHKW IV– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
20,8	46,0	92,8	27,6	29,7
21,3	46,3	95,5	30,0	31,4
19,9	46,5	89,5	26,7	29,8
21,3	46,4	95,9	28,9	30,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
20,8	46,3	93,4	28,3	30,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am ungewarteten BHKW wurde am 19.10.2004 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 11.750 Stunden durchgeführt. Die motorspezifischen Ergebnisse sind in Tab. 34 dargestellt. Im Zuge der Messung wurde der betriebseigene Stromzähler mit Hilfe des Multimessgeräts einer Kontrolle unterzogen.

Tab. 34: BHKW IV– ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
17,7	46,6	82,4	19,4	23,6
17,8	48,0	84,9	19,4	22,9
18,2	48,0	87,1	19,9	22,9
18,1	48,4	87,0	19,5	22,5
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
17,9	47,7	85,3	19,6	22,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am ungewarteten BHKW wurde am 17.05.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 12.630 Stunden durchgeführt. Die motorspezifischen Ergebnisse sind in Tab. 35 dargestellt.

Tab. 35: BHKW IV – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
19,2	47,6	90,7	23,9	26,3
18,8	47,6	89,1	23,4	26,3
19,0	47,7	89,9	23,8	26,5
19,1	47,9	90,6	23,6	26,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
19,0	47,7	90,1	23,7	26,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.4.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Vom Betreiber der Biogasanlage wurden im Anschluss an die erste Messreihe am 27.07.04 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 11.380 Stunden folgende Wartungsarbeiten am Motor des BHKW durchgeführt:

- Wechsel der Zündkerzen
- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die erste Messreihe am vom Betreiber gewarteten BHKW wurde am 28.07.2004 erstellt. Auch hier wurde der betriebseigene Stromzähler verwendet.

Tab. 36: BHKW IV – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
20,1	45,6	91,5	26,4	28,9
20,9	45,4	94,4	27,6	29,2
20,7	45,1	92,8	27,2	29,5
20,9	45,1	94,0	27,4	29,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
20,7	45,3	93,2	27,2	29,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Auf eine weitere Messung im Betriebszustand der Betreiberwartung musste aufgrund zeitlicher Engpässe beim Betreiber verzichtet werden.

3.4.3 Betriebszustand – Herstellerwartung

Aufgrund günstiger Voraussetzungen (BHKW-Hersteller vor Ort) konnte die erste Messreihe im Betriebszustand der Herstellerwartung ebenfalls am 28.07.04 durchgeführt werden. Vor Beginn der Messungen wurden von der Firma NQ-Anlagentechnik folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Korrektur des Elektrodenabstands der Zündkerzen
- Einstellung des Zündzeitpunkts

Die Ergebnisse der Messreihe sind in Tab. 37 dargestellt.

Tab. 37: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
20,1	46,3	92,7	26,7	28,8
20,5	46,7	95,4	27,6	28,9
19,5	46,7	90,5	26,3	29,1
20,3	46,8	94,4	27,4	29,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
20,1	46,6	93,2	27,0	29,0

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Zur zweiten Messreihe am vom Motorenhersteller gewarteten Aggregat betrug der Stand des Betriebsstundenzählers vor der Messung 11.760 Stunden. Es konnte der mobile Stromzähler eingesetzt werden, wobei die Kontrolle des betriebseigenen Zählers fortgesetzt wurde. Von der Firma NQ wurden folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Zündzeitpunkts
- Austausch des Lambda-Reglers
- Austausch des Zahnriemens
- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die Ergebnisse der am 20.10.2004 erstellten Messreihe sind in Tab. 38 dargestellt.

Tab. 38: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
19,4	47,9	92,2	23,5	25,5
19,0	48,2	91,3	22,5	24,6
19,2	47,8	91,3	23,2	25,4
18,8	47,0	87,7	21,9	25,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
19,1	47,7	90,6	22,8	25,1

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am vom Hersteller gewarteten BHKW wurde am 18.05.2005 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 12.640 Stunden durchgeführt. Folgende Arbeiten wurden während der Wartung vorgenommen:

- Einstellung des Zündzeitpunktes
- Zündkerzenwechsel
- Öl- und Luftfilterwechsel
- Ölwechsel

Die motorspezifischen Ergebnisse sind in Tab. 39 dargestellt.

Tab. 39: BHKW IV – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
18,7	49,4	91,9	23,7	25,8
18,6	49,2	91,4	23,4	25,6
18,7	48,9	91,2	23,3	25,6
18,7	48,6	90,9	23,1	25,4
Mittelwert über die gesamte Messperiode				
18,7	49,0	91,3	23,4	25,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.4.4 Zusammenfassung der Messreihen

Beim 30 kW_{el.} Gas-BHKW konnte nur bei der 2. Messung (ungewartet) eine Einhaltung der Richtwerte beim NO_x gemessen werden. Ursächlich hierfür war ein defekter Lambda-Regler, der gleichzeitig zu weit überhöhten CO-Werten führte. Es wurde festgestellt, dass dieses BHKW generell Probleme hatte beide Richtwerte gleichzeitig einzuhalten. Die C_nH_m- Gehalte waren im Vergleich zu den anderen gemessenen Gas-BHKW am Höchsten und erreichten im Mittel die Werte der Zündstrahl-BHKW (Abb. 20). Die Ausschöpfung des Leistungspotenzials von 30 kW elektrisch konnte nur bei der 1. Messung annähernd erreicht werden und nahm trotz vergleichbarer Brenngaseigenschaften über die Standzeit des BHKW ab.

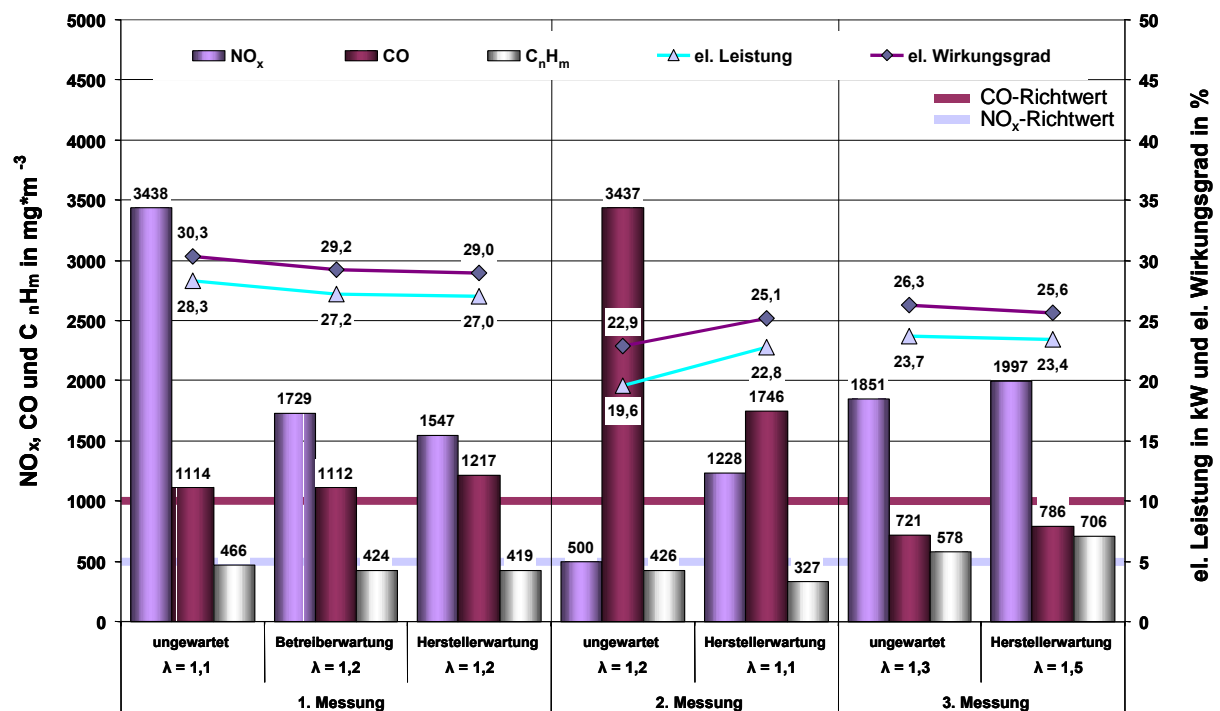


Abb. 20: Messergebnisse des 30 kW Gas-BHKW

Auch hier war eine stetige Verringerung des Wirkungsgrades von der ersten bis zur dritten Messung zu verzeichnen was auf den Alterungsprozess des BHKW zurückzuführen sein dürfte (Abb. 20).

3.5 BHKW V – Anlage 3 (MAN-Gas-BHKW 75 kW_{el.})

3.5.1 Betriebszustand – ungewartet

Die erste Messung des BHKW in ungewartetem Zustand erfolgte am 14.09.2004 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 6.100 Stunden. Die Ergebnisse sind in Tab. 40 dargestellt.

Tab. 40: BHKW V – ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
38,7	51,1	196,5	68,6	34,9
39,1	52,0	201,4	68,6	34,1
39,5	52,0	203,0	69,3	34,1
39,6	52,7	206,9	70,3	34,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
39,2	52,0	201,9	69,2	34,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messung des BHKW in ungewartetem Zustand erfolgte am 18.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 10.855 Stunden. Die Ergebnisse sind in Tab. 41 dargestellt. Die Messung während der ersten Stunde muss verworfen werden, da aufgrund der Warmlaufphase des Motors keine repräsentativen Werte erhoben werden konnten.

Tab. 41: BHKW V – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
42,0	51,8	220,3	72,1	32,7
42,1	52,7	225,2	74,3	33,0
39,7	53,6	215,3	70,3	32,7
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
41,3	52,7	220,2	72,2	32,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messung des BHKW in ungewartetem Zustand erfolgte am 18.07.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 12.950 Stunden. Die Ergebnisse sind in Tab. 42 dargestellt.

Tab. 42: BHKW V – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
39,5	47,3	185,1	54,0	29,2
41,7	48,6	200,3	57,9	28,9
41,4	49,0	200,8	56,3	28,0
40,6	49,7	199,8	56,3	28,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
40,8	48,6	196,5	56,1	28,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.5.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Vom Betreiber der Biogasanlage wurden im Anschluss an die erste Messreihe am 15.09.2004, bei einem Betriebsstundenzählerstand von 6.120 Stunden folgende Wartungsarbeiten am Motor des BHKW durchgeführt:

- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die Daten am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung wurden am Folgetag der ersten Messreihe erhoben. In Tab. 43 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 43: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
39,7	52,4	210,8	62,0	30,2
40,4	52,3	213,6	64,6	31,0
40,6	52,8	215,5	69,3	33,0
40,3	52,1	212,1	66,3	32,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
40,2	52,4	213,0	65,6	31,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung wurde am 20.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 10.895 Stunden erstellt. Davor wurden vom Betreiber folgende Wartungsmaßnahmen getroffen:

- Ölwechsel
- Austausch der Zündkabel
- Reparatur der Drosselklappe für die Zuluft
- Einstellung des Lambda-Wertes

In Tab. 44 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 44: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
43,6	48,6	215,3	70,7	32,8
44,9	48,5	221,1	71,0	32,1
45,8	48,4	225,3	73,3	32,5
44,1	48,7	218,0	70,3	32,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
44,6	48,5	219,9	71,3	32,4

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung wurde am 19.07.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 12.957 Stunden erstellt. Davor wurden vom Betreiber folgende Wartungsmaßnahmen getroffen:

- Ölwechsel
- Ölfilterwechsel
- Reinigung des Luftfilters

In Tab. 45 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt

Tab. 45: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
42,7	50,4	216,2	67,8	31,4
43,6	50,0	218,4	68,2	31,2
43,5	50,3	218,7	67,3	30,8
42,6	51,0	217,7	67,3	30,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
43,1	50,4	217,7	67,7	31,1

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.5.3 Betriebszustand – Herstellerwartung

Vor Beginn der ersten Messreihe am 16.09.04 wurden durch eine von der Herstellerfirma J. Hochreiter beauftragte Service-Firma folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Zündzeitpunktes
- Korrektur des Elektrodenabstands der Zündkerzen
- Umstellung des Gas-Luft-Gemischs auf ein λ von 1,2

In Tab. 46 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine im Zustand nach der Herstellerwartung bei einer Stundenlaufzeit von 6.140 Bh dargestellt.

Tab. 46: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
41,4	50,4	208,9	72,4	34,7
41,6	50,2	209,2	72,2	34,6
41,3	50,8	209,5	72,3	34,5
41,7	51,0	213,4	73,3	34,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
41,5	50,6	210,2	72,6	34,5

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 21.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 10.910 Stunden erstellt. Aufgrund umfangreicher Wartungsarbeiten des Landwirtes beschränkte sich die fachmännische Wartung auf die Einstellung des Ventilspiels. In Tab. 47 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 47: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
40,0	53,3	217,4	71,9	33,1
40,6	50,2	207,7	71,3	34,3
41,2	51,0	213,7	70,3	32,9
40,6	52,1	215,1	71,3	33,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
40,6	51,7	213,4	71,2	33,4

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 20.07.2005 erstellt. Im Zuge der Wartung wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Lambda-Wertes
- Austausch der Zündkerzen

In Tab. 48 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 48: BHKW V – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
43,7	48,4	211,6	66,1	31,2
44,5	49,0	218,3	67,3	30,8
45,4	48,8	221,3	68,3	30,9
44,2	49,0	216,2	66,3	30,7
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
44,4	48,8	216,8	67,0	30,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.5.4 Zusammenfassung der Messreihen

Aus Abb. 21 wird klar ersichtlich, dass durch die Herstellerwartung eine Einstellung des BHKW ausschließlich nach Leistungskriterien erfolgte. Die Leistung und der Wirkungsgrad stiegen bei der 1. Messung deutlich an, während der Lambda-Wert sank und somit der NO_x-Gehalt im Abgas erheblich zunahm. Durch die Erhöhung der Luftzufuhr konnte zwar bei späteren Messterminen der NO_x-Wert zum Teil erheblich gesenkt werden, jedoch wurde zu keinem Zeitpunkt die Einhaltung der Richtwerte erreicht. Der CO-Richtwert konnte bei allen Messungen problemlos eingehalten werden. Eine Abgasmessung während der Wartung wurde vom Wartungsservice nicht durchgeführt. Die Kohlenwasserstoffgehalte bewegten sich auf einem sehr niedrigen Niveau. Die während der 1. Messung (Betreiberwartung) beobachteten extremen Werte sind auf den Einbau falscher Zündkerzen zurückzuführen (Abb. 21).

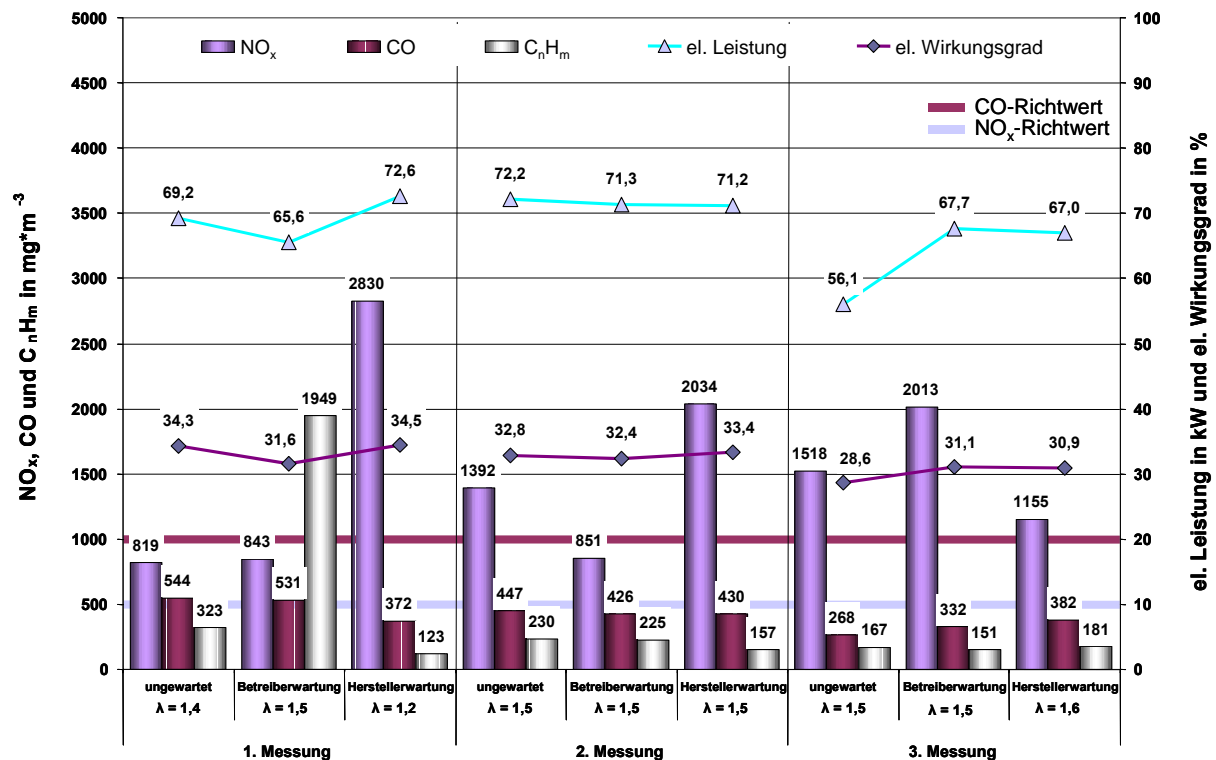


Abb. 21: Messergebnisse des 75 kW Gas-BHKW

Trotz der relativ geringen Betriebszeit des BHKW (6000 Bh bei der 1. Messung) konnte die volle Leistung auch nach einer Herstellerwartung nicht erreicht werden. Zurückzuführen ist dies unter anderem auf eine mangelnde fachmännische Betreuung der Maschine (Herstellerwartung wurde nur aufgrund unserer Messungen durchgeführt).

3.6 BHKW VI – Anlage 4 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 100 kW_{el.})

Die Betreiberwartung an diesem Betrieb beinhaltete ausschließlich den Ölwechsel, was nur geringfügige Änderungen im Abgasverhalten des Motors bewirkte. Zudem wurde zum Zeitpunkt der ersten Messungen der Fermenter neu hochgefahren, nachdem aufgrund eines Defekts ein Rührwerk ausgetauscht werden musste. Aus diesen Gründen wurde die Maschine nur in ungewartetem Zustand und nach der Wartung der Herstellerfirma gemessen, die ohnehin an der Anlage präsent war. Den vom Betreiber regelmäßig durchgeführten Ölwechsel erledigte die Herstellerfirma im Rahmen der fachmännischen Wartung.

3.6.1 Betriebszustand – ungewartet

Die Ergebnisse der ersten am 02.11.2004 erstellten Messreihe am BHKW in ungewartetem Zustand sind in Tab. 49 dargestellt. Trotz der mangelhaften Gasqualität und einem Zündölanteil von nur 8,1 % der zugeführten Bruttoenergiemenge konnte die Maschine im Bereich der Nennbelastung betrieben werden. Der Stand des Betriebsstundenzählers während der Messung lag bei 4.000 Stunden.

Tab. 49: BHKW VI– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
64,7	39,8	2,4	281,9	98,2	64,7
65,7	40,0	2,2	286,1	98,7	65,7
66,6	39,8	2,4	290,0	99,7	66,6
65,6	39,4	2,4	283,5	98,7	65,6
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
65,7	39,7	2,3	285,4	98,8	34,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die Ergebnisse der zweiten, am 03.05.2005 erstellten Messreihe am BHKW in ungewartetem Zustand sind in Tab. 50 dargestellt. Der Stand des Betriebsstundenzählers lag zu diesem Zeitpunkt bei 7000 Stunden. Die Gaszusammensetzung hatte sich zu diesem Zeitpunkt wieder stabilisiert. Der Zündölanteil lag bei 11,3 % an der zugeführten Energiemenge.

Tab. 50: BHKW VI – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
50,6	44,7	2,9	253,8	99,7	39,3
50,3	47,6	2,9	267,8	99,7	37,2
49,2	48,6	3,1	269,3	100,7	37,4
47,3	51,0	2,7	237,1	86,8	36,6
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
49,4	48,0	2,9	257,0	96,7	37,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Aufgrund verschiedener Defekte an der eingesetzten Messtechnik konnten zum Zeitpunkt der dritten Messkampagne wichtige, zur Berechnung motorspezifischer Daten notwendige Parameter nicht ermittelt werden. Aus diesem Grund wurde auf eine Darstellung der Ergebnisse dieser Messreihe verzichtet.

3.6.2 Betriebszustand – Herstellerwartung

Von den Mitarbeitern der Fa. H. J. Schnell wurden im Rahmen einer fachmännischen Wartung folgende Arbeiten am Motor des BHKW ausgeführt:

- Wechsel des Luftfilters
- Wechsel des Ölfilters
- Ölwechsel
- Einstellen des Ventilspiels
- Einstellen des Zündzeitpunkts

In Tab. 51 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine im Zustand nach der Herstellerwartung am 03.11.2004 dargestellt. Trotz der anhaltend schlechten Gaseigenschaften konnte der el. Wirkungsgrad bei einem geringfügig höheren Zündölanteil (9 %) durch die Wartungsarbeiten gesteigert werden.

Tab. 51: BHKW VI – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
57,9	35,6	2,5	233,6	87,4	37,7
64,6	40,2	2,4	286,1	99,0	34,7
64,0	39,0	2,5	276,9	99,7	36,0
63,5	39,4	2,2	275,0	98,7	35,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
62,5	38,6	2,4	267,9	96,2	36,1

* korrigiert nach DIN ISO 3046

In Tab. 52 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse des BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung am 04.05.2005 dargestellt. Die verbesserten Gaseigenschaften und die optimale Einstellung der Maschine ermöglichten eine Reduzierung des Zündölanteils auf nur 6 % bei leichten Einbußen im el. Wirkungsgrad gegenüber dem ungewarteten Zustand. Die von der Firma Schnell durchgeführten Wartungsarbeiten entsprachen denen des ersten Wartungstermins.

Tab. 52: BHKW VI – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
51,7	48,6	1,4	264,6	98,0	37,0
48,7	48,6	1,6	252,8	92,7	36,7
49,6	50,1	1,5	263,5	99,7	37,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
50,0	49,1	1,5	260,3	96,8	37,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.6.3 Zusammenfassung der Messreihen

Das 100 kW Zündstrahl-BHKW konnte trotz einem sehr geringen Methangehalt (39 %) im Biogas bei der 1. Messung die Abgasrichtlinien und den Zündölanteil ohne Probleme einhalten (Abb. 22). Die Schadstoffgehalte betragen nur etwa 50 % (CO) bzw. 75 % (NO_x) des Richtwertes, während sich die Kohlenwasserstoffe auf einem vergleichsweise hohen Niveau bewegten. Insbesondere bei der 1. Messung verursachten die niedrigen Methangehalte im Brenngas (Herabsetzung der Flammgeschwindigkeit) einen erhöhten Methanschluß. Wäh-

rend der Wartungsarbeiten wurden vom Service-Team Abgasmessungen durchgeführt und Motor bzw. Zündölverbrauch nach diesen Werten eingestellt.

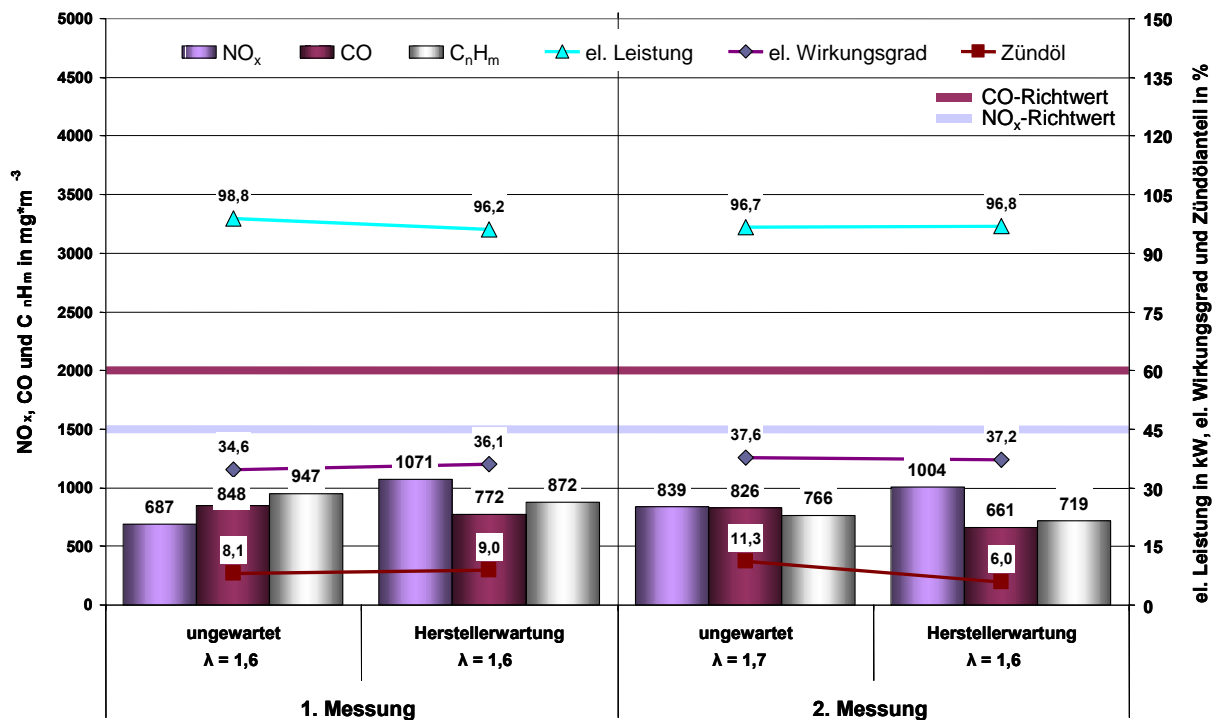


Abb. 22: Messergebnisse des 100 kW Zündstrahl-BHKW

Die Unterschiede im Wirkungsgrad von der 1. zur 2. Messung resultieren vor allem aus der Biogasqualität (1. Messung < 40 %; 2. Messung 48,5 % CH₄).

3.7 BHKW VII – Anlage 5 (MAN-Gas-BHKW 340 kW_{el})

Zu drei Terminen wurde in jeweils drei aufeinanderfolgenden Tagen das BHKW in den verschiedenen Betriebszuständen hinsichtlich der leistungsspezifischen Parameter untersucht. Aufgrund eines defekten Ladeluftkühlers konnte die Maschine während der ersten beiden Messreihen nur im Teillastbereich betrieben werden. Im Rahmen der Herstellerwartung wurde das defekte Aggregat ausgetauscht, wodurch der Betrieb im Nennlastbereich wieder hergestellt werden konnte.

3.7.1 Betriebszustand – ungewartet

Zu Beginn der Messungen wurden zusätzliche Leistungseinbußen festgestellt, was wahrscheinlich auf den Kaltstart im Zusammenhang mit dem defekten Ladeluftkühler zurückzuführen ist. Erst nach ca. 90 Minuten Betrieb wurde die für den Zustand des Motors maximal mögliche Leistung von 250 kW_{el} erreicht. Entsprechend niedrig fielen die Wirkungsgrade der ersten beiden Stunden aus und wurden nicht zur Berechnung des mittleren stündlichen Wirkungsgrades herangezogen. In Tab. 53 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der ersten Messung vom 21.09.2004 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 14.250 Stunden dargestellt.

Tab. 53: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
129,9	51,0	659,4	194,1	28,9
137,1	51,4	701,7	192,9	27,6
133,9	52,2	696,2	244,1	35,1
135,0	52,5	705,1	244,1	34,6
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
134,4	52,3	700,7	244,1	34,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im ungewarteten Zustand wurde am 04.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 18.850 Stunden erstellt. Aufgrund eines Fehlers bei der Strommessung konnten in der ersten Stunde der Messung keine verwertbaren Daten zur Stromproduktion erhoben werden. In Tab. 54 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine deshalb nur über eine Messperiode von drei Stunden dargestellt.

Tab. 54: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
159,9	54,8	885,0	294,3	33,3
164,6	55,1	914,2	302,1	33,0
161,8	55,3	901,4	299,1	33,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
162,1	55,1	900,2	298,5	33,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im ungewarteten Zustand wurde am 25.07.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 21.475 erstellt. Da die Maschine in der ersten Stunde der Messung in der Warmlaufphase arbeitete, wurde bei der Berechnung des mittleren stündlichen el. Wirkungsgrades der erste errechnete Wert nicht berücksichtigt. In Tab. 55 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 55: BHKW VII – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
209,4	277,1	968,3	293,1	30,3
170,2	46,6	775,8	256,1	33,0
196,5	45,7	896,4	298,6	33,3
191,8	46,2	883,9	295,6	33,4
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
186,1	46,1	852,0	283,4	33,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.7.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Die erste Messreihe wurde am 22.09.2004 erstellt, nachdem vom Betreiber bei einem Betriebsstundenzählerstand von 14.270 folgende Wartungsarbeiten durchgeführt worden sind:

- Ölwechsel
- Wechsel des Ölfilters

Aufgrund des noch nicht in Stand gesetzten Ladeluftkühlers konnte auch während der zweiten Messung eine Motorleistung von 250 kW_{el.} nicht überschritten werden. In Tab. 56 sind die Ergebnisse der ermittelten leistungsspezifischen Parameter des BHKW nach der Betreiberwartung dargestellt.

Tab. 56: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
129,7	52,9	684,2	240,1	35,1
132,4	53,6	708,5	246,1	34,7
128,3	53,8	688,7	239,5	34,8
128,0	53,9	688,9	237,1	34,4
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
129,6	53,5	692,6	240,7	34,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung wurde am 05.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 18.862 erstellt. Es wurden folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Ölwechsel
- Ölfilterwechsel
- Zündkerzenwechsel
- Steigerung des Lambda-Wertes von 1,28 auf 1,36

Durch die Veränderung des Luftanteils im Gasgemisch wurde eine leichte Beeinträchtigung der Leistung registriert (Tab. 57 – dritte und vierte Zeile). In Tab. 57 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 57: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
167,0	54,8	926,4	306,1	33,0
171,7	54,9	954,1	313,1	32,8
161,6	55,0	898,2	294,1	32,7
165,2	54,8	915,7	297,6	32,5
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
166,4	54,9	923,6	302,7	32,8

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung wurde am 26.07.2005 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 21.500 Stunden erstellt. Die durchgeführten Wartungsarbeiten beschränkten sich auf einen Öl- und Ölfilterwechsel. In Tab. 58 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 58: BHKW VII – Betreiberwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
178,0	50,5	895,2	291,6	32,6
174,7	51,5	896,4	291,1	32,5
173,4	51,9	894,8	289,1	32,3
170,4	53,1	899,2	288,1	32,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
174,1	51,7	896,4	290,0	32,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.7.3 Betriebszustand – Herstellerwartung

Im Anschluss der Messung nach der Betreiberwartung wurde das BHKW von einem von der Herstellerfirma beauftragten Serviceunternehmen einer fachmännischen Wartung unterzogen:

- Einstellung des Ventilspiels
- Erneuerung des defekten Ladeluftkühlers

Beim Betrieb im Nennlastbereich war eine leichte Erhöhung des elektrischen Wirkungsgrades zu verzeichnen. In Tab. 59 sind die Ergebnisse der Messungen vom 23.09.2004 am von der Herstellerfirma gewarteten BHKW dargestellt (Stand des Bhz: 14.290 Stunden).

Tab. 59: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
157,5	53,8	849,6	294,1	34,6
175,5	52,7	927,7	325,1	35,0
178,6	51,8	926,2	321,1	34,7
178,3	51,0	911,3	322,1	35,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
172,5	52,3	903,7	315,6	34,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 14.04.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 19.076 erstellt. Die durchgeführte Wartung umfasste folgende Arbeiten:

- Einstellung des Ventilspiels
- Erneuerung der Ventildeckeldichtung
- Planschleifen der Dichtflächen

In Tab. 60 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 60: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
173,4	53,0	928,4	307,1	33,1
173,8	52,7	921,7	308,1	33,4
167,2	52,5	883,8	294,1	33,3
171,6	52,9	915,4	301,1	32,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
171,5	52,8	912,3	302,6	33,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 27.07.2005 erstellt. Es wurden folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Erneuerung der Zündkerzen

In Tab. 61 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 61: BHKW VII – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
159,5	52,8	835,5	278,1	33,3
159,8	53,9	854,5	275,1	32,2
157,5	54,1	844,2	267,1	31,6
157,3	54,4	848,3	267,1	31,5
Mittelwerte über die gesamte Messperiode				
158,5	53,8	845,6	271,9	32,1

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.7.4 Zusammenfassung der Messreihen

Die Abgasrichtwerte bezüglich NO_x konnten bei keinem Wartungszustand eingehalten werden, sondern wurden bei allen Messungen um das 2- bis 5-fache überschritten. Dagegen lagen die CO- und C_nH_m-Gehalte in einem sehr niedrigen Bereich. Die verringerte Leistung im ungewarteten Zustand und nach der Betreiberwartung der 1. Messung wurde durch einen defekten Ladeluftkühler verursacht (Abb. 23). Eine vollständige Ausnutzung des Leistungspotenzials konnte zu keinem Messtermin erreicht werden. Ursächlich hierfür war unter anderem der hohe H₂-Gehalt im Brenngas, der zu einer unkontrollierten Verbrennung führte. Der durchschnittliche H₂-Gehalt im Brenngas stieg im Laufe der Messungen von 570 ppm (1. Messung) über 890 ppm (2. Messung) auf über 1200 ppm (3. Messung) an. Dies deutet auf eine Überfütterung der Biozönose im Fermenter hin.

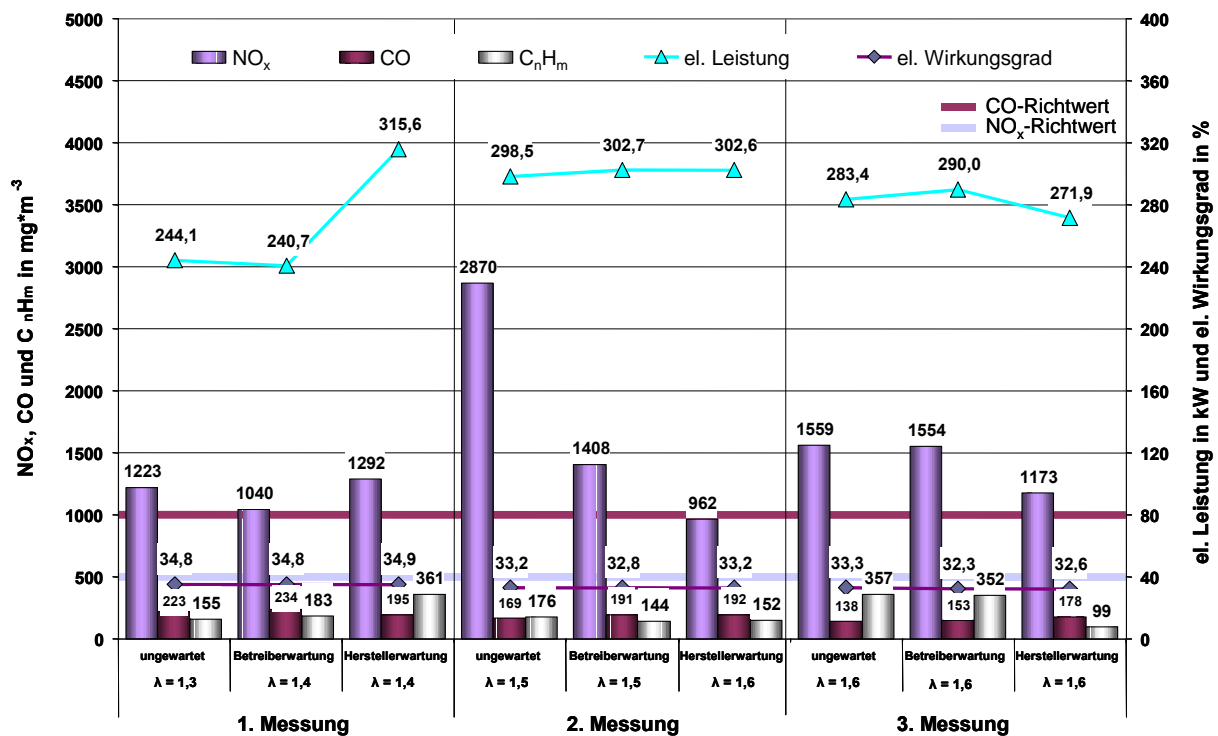


Abb. 23: Messergebnisse des 340 kW Gas-BHKW

Der für diesen Leistungsbereich relativ niedrige Wirkungsgrad ist auf die geringe Leistungsausnutzung im Teillastbetrieb, sowie auf einen erhöhten H₂-Gehalt im Brenngas zurückzuführen.

3.8 BHKW VIII – Anlage 6 (Deutz-Zündstrahl-BHKW 250 kW_{el.})

Gemäß dem zwischen der Herstellerfirma und dem Betreiber geschlossenen Wartungsvertrag dürfen an diesem BHKW die Wartungsarbeiten nur von der Fa. Dreyer & Bosse durchgeführt werden, wenn die Gewährleistung erhalten werden soll. Da somit keine Messung nach einer Betreiberwartung möglich ist, wurden nur zwei Messreihen pro Messkampagne erstellt. Diese wiederum mussten ebenfalls auf zwei Termine eingeschränkt werden, da der Betreiber nach der zweiten Datenaufnahme die Deutz Maschine durch einen Scania Motor ersetzt hat.

3.8.1 Betriebszustand – ungewartet

Durch die Verringerung des Gasleitungsquerschnitts und den vor die Gasmessstrecke installierten Seitenkanalverdichter war zunächst kein Betrieb unter Nennlast möglich ($P_{\max.}$: 150 kW). Nach Entfernen des Verdichters und der Drosselung der zugeführten Luftmenge wurde die Maximalleistung (250 kW) erreicht. Dadurch wurde der Abgasstrom zu heiß, so dass der Motor kurzzeitig abschaltete. Die Gasmessstrecke musste deshalb nach der Messung vom Team der Fa. Dreyer & Bosse entfernt werden. Aufgrund der Umbauarbeiten hatte sich der Beginn der Messungen erheblich verzögert. Da aus terminlichen Gründen das Serviceteam die Deinstallation der Gasmessstrecke bis 19:15 abgeschlossen haben musste, konnte die Messreihe nur über einen Zeitraum von zwei Stunden erstellt werden. Die Ergebnisse der Messungen vom 28.09.2004 bezüglich der Leistungsparameter sind in Tab. 62 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe in ungewartetem Zustand betrug 9,1 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 62: BHKW VIII– ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
130,2	48,3	6,4	705,0	256,0	36,3
129,4	48,7	6,2	702,0	255,0	36,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
129,8	48,5	6,3	703,5	255,5	36,3

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im ungewarteten Zustand wurde am 06.06.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 14.200 erstellt. Bei der zweiten Messung konnte eine Verringerung des Leitungsquerschnittes der Gasleitung vermieden werden. In Tab. 63 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 63: BHKW VIII – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
121,5	53,5	7,6	725,7	258,8	35,7
127,1	54,8	6,1	756,1	257,0	34,0
124,5	55,3	5,9	745,6	257,0	34,5
127,3	55,6	6,1	767,1	262,0	34,2
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
125,1	54,8	6,4	748,6	258,7	34,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.8.2 Betriebszustand – Herstellerwartung

Das BHKW (Betriebsstunden: 8.500) wurde vom Service-Team der Firma OET folgendermaßen gewartet:

- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Zündölanteils
- Reinigung des Abgaswärmetauschers

Aufgrund der bereits erwähnten Reduzierung des Leitungsquerschnitts und der damit verbundenen mangelhaften Gasversorgung, wurde der Betrieb des BHKW auch am zweiten Messtag mehrmals unterbrochen. Dadurch wurde eine kontinuierliche Datenaufnahme erheblich erschwert. Außerdem wurde durch die Reinigung des Abgaswärmetauschers die Temperatur des Abgasstromes so weit reduziert, dass es an der Messstelle zur Kondensatbildung kam. Die Testo-Messung musste am zweiten Messtag unterbrochen werden, da sich in dem anfallenden Kondensat Schadgase lösten und die Ergebnisse verfälscht wurden. Zudem hatte das Kondensat den Sinterfilter an der Messsonde verschlossen, was zu einer Unterbrechung der Messgaszufuhr führte. Aufgrund dieser Umstände konnte eine kontinuierliche Datenaufnahme nur über einen Zeitraum von zwei Stunden erfolgen. Die motorspezifischen Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 64 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe im Zustand nach der Herstellerwartung betrug 10 % der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 64: BHKW VIII – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
131,2	53,1	8,5	790,4	270,0	34,2
116,5	53,5	6,4	696,1	249,0	35,8
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
123,9	53,3	7,4	743,3	259,5	35,0

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand der Herstellerwartung wurde am 07.06.2005 erstellt. Der Stand des Betriebsstundenzählers lag bei 14.220. Von der Firma Dreyer & Bosse wurden folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Wechsel der Einspritzdüsen
- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Lambda-Wertes

In Tab. 65 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 65: BHKW VIII – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
108,5	59,5	4,8	694,7	256,0	36,9
116,0	57,1	4,9	712,2	257,0	36,1
120,6	56,1	5,0	727,5	260,0	35,7
110,7	58,4	4,8	696,1	251,0	36,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
114,0	57,8	4,9	707,6	256,0	36,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.8.3 Zusammenfassung der Messreihen

Trotz der oben beschriebenen extremen Betriebsbedingungen während der 1. Messung, konnten die Abgasrichtwerte problemlos eingehalten werden (Abb. 24). Im Betrieb unter Normalbedingungen (2. Messung) wurden die vorgegebenen Richtwerte (NO_x und CO) um mehr als die Hälfte unterschritten. Jedoch wurden bei diesem BHKW die höchsten Kohlenwasserstoffgehalte im Abgas aller BHKW gemessen. Der angestrebte Zündölanteil von 10 % konnte bei allen Messungen eingehalten werden. Bei der 2. Messung wurde durch die Wartung ein Anteil von unter 7 % erreicht (Abb. 24). Bei der Wartung wurden die Abgaswerte und der Zündölanteil durch das Serviceteam überprüft.

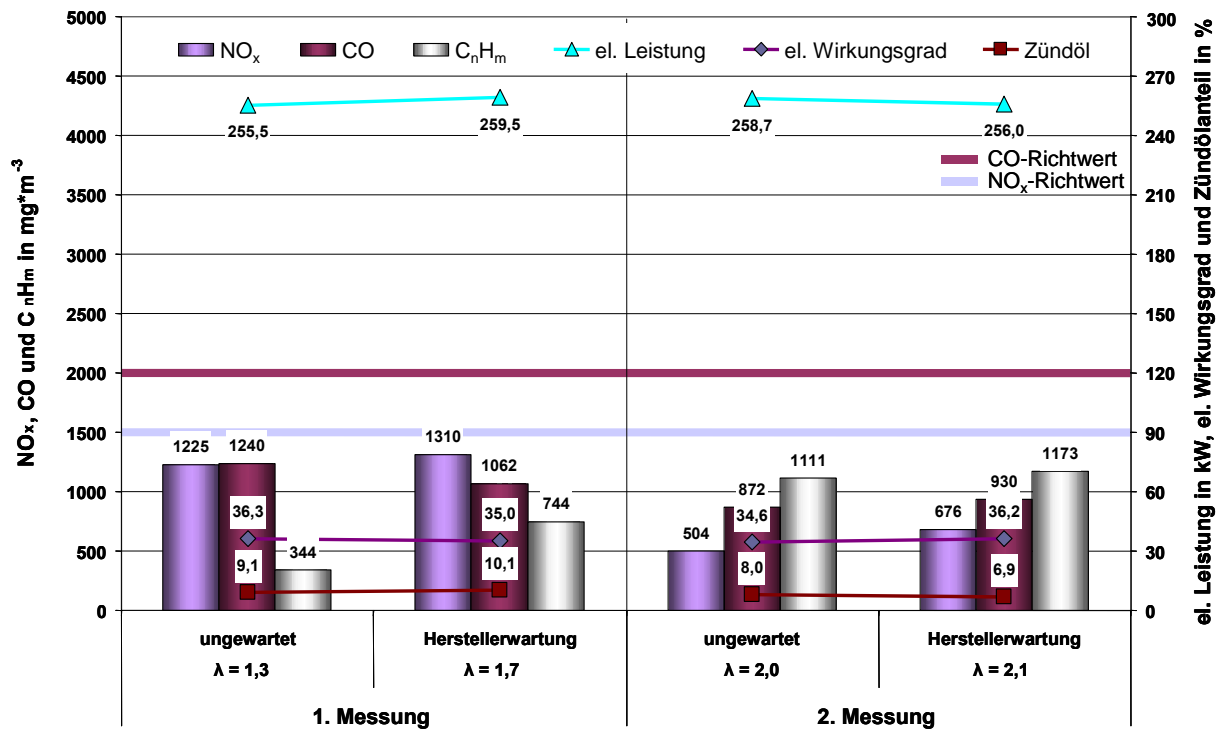


Abb. 24: Messergebnisse des 250 kW Zündstrahl-BHKW

Aufgrund der erschwerten Betriebsbedingungen führten die Wartungsarbeiten zu keiner Verbesserung des elektrischen Wirkungsgrades während der 1. Messung. Unter Normalbedingungen (2. Messung) konnte der Wirkungsgrad durch die Wartung um 1,6 %-Punkte erhöht werden.

3.9 BHKW IX – Anlage 7 (Perkins-Zündstrahl-BHKW 30 kW_{el.})

3.9.1 Betriebszustand – ungewartet

Die erste Messreihe wurde am 24.08.2004 erstellt. Die Ergebnisse zu den Leistungsparametern des ungewarteten BHKW sind in Tab. 66 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe in ungewartetem Zustand lag mit 23 % der zugeführten Gesamtenergiemenge sehr hoch.

Tab. 66: BHKW IX – ungewartet: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
11,2	49,0	2,1	76,2	29,0	38,8
13,1	49,6	1,8	82,2	29,0	35,5
13,3	49,5	1,8	82,6	31,0	37,5
13,2	49,5	1,9	83,5	30,0	36,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
12,7	49,4	1,9	81,1	29,8	37,0

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im ungewarteten Zustand wurde am 22.03.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 16.145 erstellt. Aufgrund einer fehlerhaften Messung sind die Daten bezüglich der Strommessung in der ersten Stunde nicht verwertbar, weshalb hier auf eine Darstellung der ersten Messdaten verzichtet wurde. Der mittlere Zündölanteil betrug 5 % der zugeführten Gesamtenergiemenge. In Tab. 67 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 67: BHKW IX – ungewartet: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
16,0	49,8	0,5	84,8	28,5	33,6
15,5	45,2	0,4	74,1	26,7	36,0
18,2	44,8	0,3	84,7	30,5	36,0
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
16,6	46,6	0,4	81,2	28,6	35,2

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im ungewarteten Zustand wurde am 11.07.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 18.000 Stunden erstellt. Der mittlere Zündölanteil betrug 10,1 %. In Tab. 68 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt.

Tab. 68: BHKW IX – ungewartet: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad (η _{el.})* %
16,9	51,1	0,9	95,1	30,0	31,5
16,9	51,7	1,3	99,8	30,0	30,1
17,4	52,9	1,1	102,0	31,0	30,4
16,9	54,1	0,8	98,9	30,0	30,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
17,0	52,5	1,0	99,0	30,3	30,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.9.2 Betriebszustand – Betreiberwartung

Vom Betreiber der Biogasanlage wurden unmittelbar vor Beginn der zweiten Messung am 25.08.04 bei einem Betriebsstundenzählerstand von 12.483 Stunden folgende Wartungsarbeiten am Motor des BHKW durchgeführt:

- Motorenölwechsel
- Wechsel des Ölfilters
- Wechsel des Luftfilters

Die motorspezifischen Ergebnisse der Messungen sind in Tab. 69 dargestellt. Der mittlere Zündölanteil während der ersten Messreihe im Zustand nach der Betreiberwartung betrug immer noch 21,5 % von der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 69: BHKW IX – Betreiberwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
12,8	51,6	1,8	82,6	30,0	36,5
13,6	50,8	1,9	86,9	31,0	35,7
12,8	50,7	1,8	81,5	30,0	37,0
13,3	50,9	1,9	85,2	31,0	36,4
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
13,1	51,0	1,8	84,1	30,5	36,4

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Betreiberwartung konnte erst zur dritten Messkampagne am 12.07.2005 bei einem Stand des Betriebsstundenzählers von 18.015 Stunden durchgeführt werden, da der Betreiber zur zweiten Kampagne verhindert war. Es liegen deshalb nur zwei Ergebnisse für den Betriebszustand Betreiberwartung vor. In Tab. 70 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt. Der mittlere Zündölanteil lag bei 9,7 % von der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 70: BHKW IX – Betreiberwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
17,1	52,0	0,9	97,8	29,7	30,4
18,4	52,8	1,1	106,8	31,6	29,6
17,2	54,5	1,2	104,4	29,3	28,1
17,2	54,5	0,9	102,4	31,0	30,3
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
17,5	53,5	1,0	102,8	30,4	29,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.9.3 Betriebszustand – Herstellerwartung

Vor Beginn der dritten Messreihe am 26.08.04 wurden durch die Herstellerfirma H. J. Schnell folgende Wartungsarbeiten durchgeführt:

- Einstellung des Ventilspiels
- Einstellung des Brennstoff-Luftgemischs mittels Abgasmessung
- Erneuerung der Einspritzdüsen

Die Ergebnisse zu den Leistungsparametern des vom Hersteller gewarteten BHKW sind in Tab. 71 dargestellt. Durch die Wartungsmaßnahmen des Herstellers konnte der mittlere Zündölanteil auf 10,8 % der zugeführten Gesamtenergiemenge gesenkt werden.

Tab. 71: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der ersten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
14,8	49,9	0,9	83,1	30,0	36,1
15,4	50,4	0,8	85,6	30,0	35,2
14,6	50,5	0,9	82,7	30,0	36,6
15,0	50,2	0,9	84,2	30,0	35,7
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
14,9	50,2	0,9	83,9	30,0	35,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die zweite Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 23.03.2005 durchgeführt. Davor wurde das BHKW von der Fa. Schnell folgendermaßen gewartet:

- Ölwechsel
- Öl- und Luftfilterwechsel
- Einstellung des Ventilspiels und der Zündölzufuhr
- Wechsel der Einspritzdüsen

In Tab. 72 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt. Der mittlere Zündölanteil betrug 8,3 % von der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 72: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der zweiten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
17,0	49,3	0,8	92,2	30,0	32,6
16,7	51,6	0,8	93,2	30,5	32,7
17,0	48,7	0,8	90,8	29,5	32,5
17,5	48,5	0,7	92,5	31,3	33,9
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
17,1	49,5	0,8	92,1	30,3	32,9

* korrigiert nach DIN ISO 3046

Die dritte Messreihe am BHKW im Zustand nach der Herstellerwartung wurde am 14.07.2005 durchgeführt. Davor wurde das BHKW folgendermaßen gewartet:

- Überprüfung, Modifizierung und Abdichtung der Einspritzdüsen
- Erneuerung der Ventildeckeldichtung

In Tab. 73 sind die leistungsspezifischen Ergebnisse der Maschine dargestellt. Der mittlere Zündölanteil betrug 10 % von der zugeführten Gesamtenergiemenge.

Tab. 73: BHKW IX – Herstellerwartung: Energiebilanz der dritten Messreihe (Stundenmittelwerte)

Gasverbrauch Nm ³ /h	CH ₄ -Gehalt %	Zündölverbrauch l/h	Energiezufuhr kWh*	Stromproduktion kWh	el. Wirkungsgrad ($\eta_{el.}$)* %
18,4	52,6	1,1	106,2	30,1	28,3
18,8	53,1	1,1	109,4	30,3	27,7
18,5	54,0	1,1	109,4	29,9	27,3
18,4	54,3	1,2	110,6	30,0	27,1
Mittelwerte über die gesamte Messperiode					
18,5	53,5	1,1	108,9	30,1	27,6

* korrigiert nach DIN ISO 3046

3.9.4 Zusammenfassung der Messreihen

Bei der 1. Messung des 30 kW Zündstrahl-BHKW kam es zu Störungen in der Datenaufzeichnung und damit zu Messdatenverlusten. So konnten bei der ungewarteten Messung keine Abgaswerte aufgezeichnet werden. Es wird trotzdem ersichtlich, dass durch die Wartung seitens des Herstellers der Zündölverbrauch bis auf 10 % gesenkt werden konnte. Auch bei den folgenden Messungen lag der Zündölanteil im angestrebten Bereich. Allerdings waren bei der 3. Messung hohe CO-Werte im Abgas zu beobachten. Dies resultierte aus den sehr hohen Temperaturen ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$) im BHKW Raum in Verbindung mit einer unzureichenden Belüftung. Bei normalen Außentemperaturverhältnissen wurden die CO-Richtwerte problemlos unterschritten. Die NO_x -Richtwerte konnten in der Regel eingehalten werden. Aufgrund defekter Messtechnik liegen nicht alle Abgaswerte bezüglich der Kohlenwasserstoffkonzentrationen vor. Die aufgezeichneten Daten sind jedoch deutlich niedriger als die der anderen gemessenen Zündstrahl-BHKW und bewegen sich im Bereich der bei Gas-BHKW ermittelten Werte (Abb. 25). Das Leistungspotenzial des BHKW wurde bei nahezu allen Messungen vollständig ausgeschöpft.

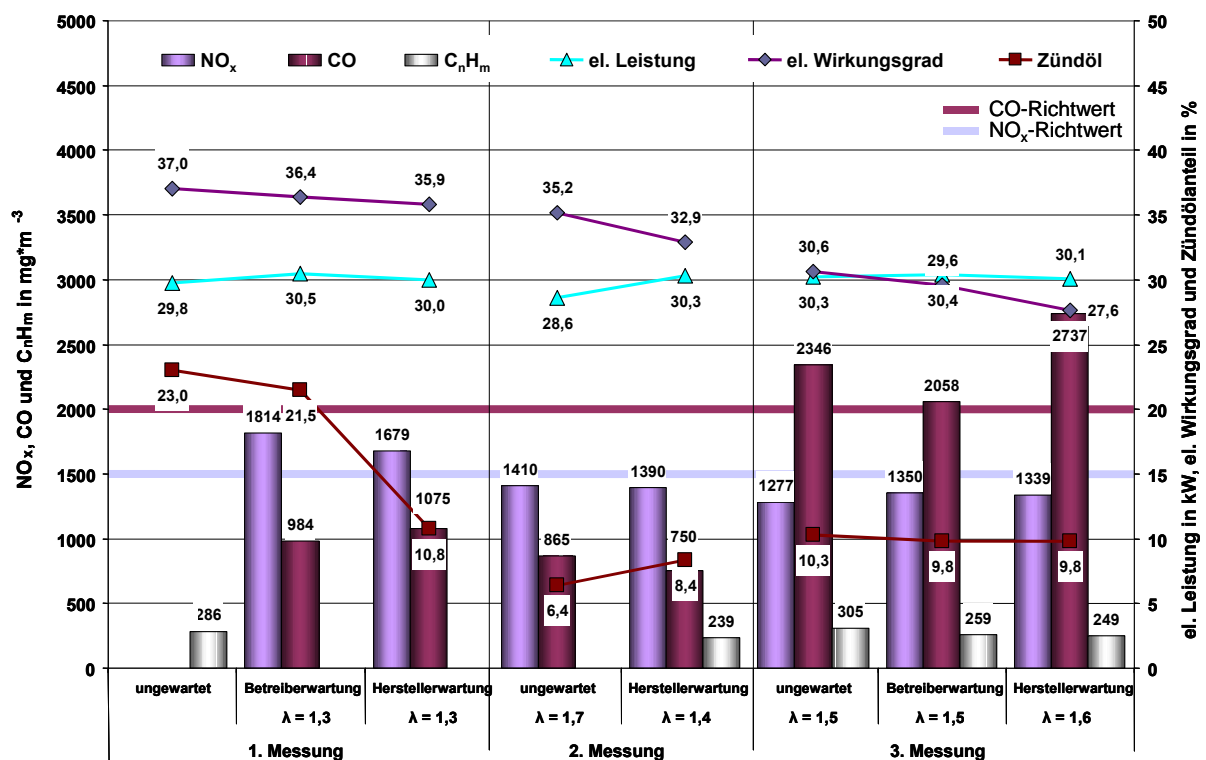


Abb. 25: Messergebnisse des 30 kW Zündstrahl-BHKW

Insbesondere bei den ersten beiden Messungen wurden für ein BHKW dieser Leistungsklasse überdurchschnittlich hohe elektrische Wirkungsgrade beobachtet, was auch auf die sehr hohen Zündölanteile von über 20 % zurückzuführen sein dürfte. Nach weiteren 6.000 Betriebsstunden wurde eine Reduzierung des Wirkungsgrades auf 30 % festgestellt. Ursache hierfür ist die Alterung der Maschine sowie die Einstellung des Motors, die aufgrund der hohen Ladelufttemperatur nicht optimiert werden konnte.

3.10 BHKW X – Anlage 8 (CAT-Gas-BHKW 170 kW_{el.})

Die geplante Inbetriebnahme des 170 kW_{el.} Gas-BHKW erfolgte erst im Herbst 2004, so dass die erste Messung auf das Frühjahr 2005 verschoben werden musste. Zum Zeitpunkt des ersten Messtermins am 28.02.05 herrschten Temperaturen von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Messungen konnten trotz einiger Probleme erfolgreich durchgeführt werden, jedoch stellte sich am Ende der Messung nach der Herstellerwartung heraus, dass die Leistungsregelung des BHKW einen Defekt hatte, und deshalb nur ca. 90 kW statt 170 kW Strom produziert wurden.

Eine zweite Messreihe konnte nicht mehr durchgeführt werden, da das BHKW nach den ersten Messungen laut Anlagenbetreiber zur Inspektion zum Hersteller geschickt wurde und bis zum Ende der Messkampagne nicht mehr in den Betrieb zurückkam. Deshalb ist hier die Zusammenfassung der ersten Messreihe nur der Vollständigkeit halber aufgeführt und geht nicht in die allgemeinen Auswertungen mit ein. Auf eine Berechnung des Wirkungsgrades wurde verzichtet.

3.10.1 Zusammenfassung der Messreihen

Die NO_x-Werte im Abgas beim ungewarteten BHKW waren mit über 3500 mg/m³ sehr hoch, konnten aber durch die Anhebung des Lambda-Wertes von 1,3 auf 1,5 seitens des Herstellers bei der Wartung auf unter 900 mg/m³ gesenkt werden (Abb. 26). Diese Werte sind allerdings aufgrund des Betriebes im Teillastbereich (88 – 93 kW_{el.} Leistung) nicht repräsentativ für diesen Motor.

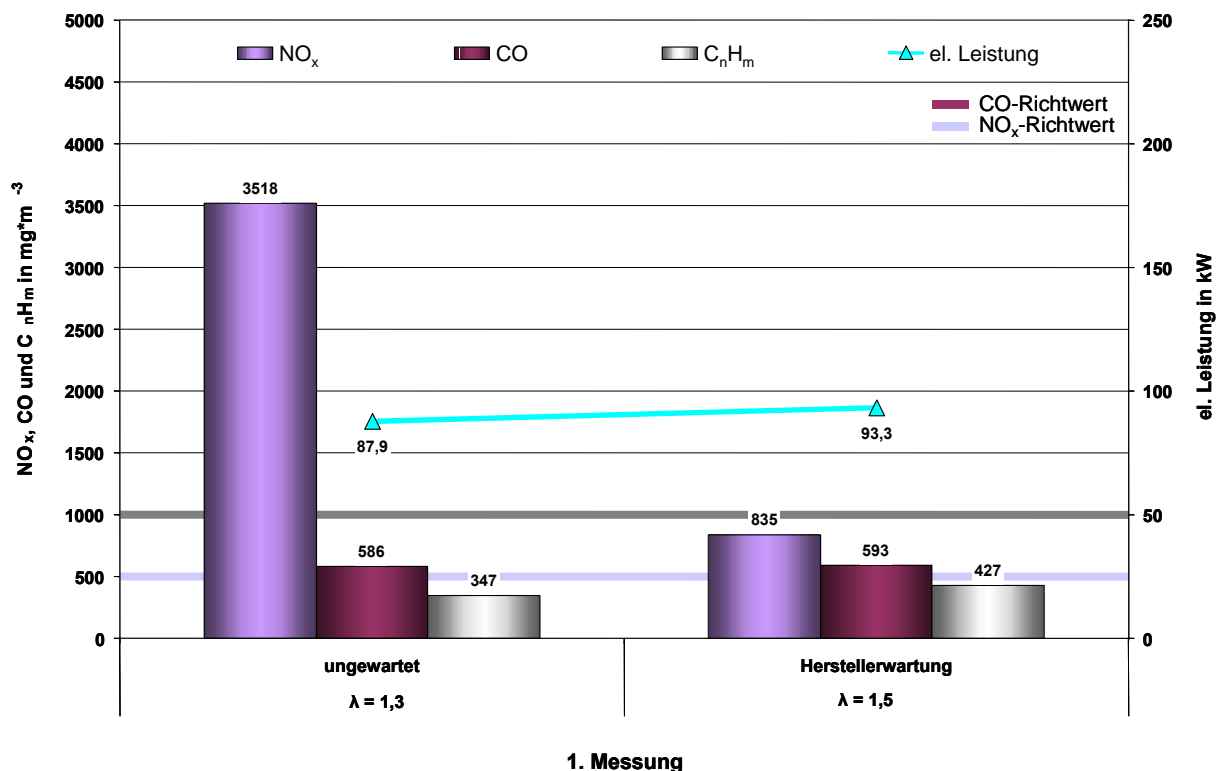


Abb. 26: Messergebnisse des 170 kW Gas-BHKW

4. Diskussion der Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die ermittelten Ergebnisse der Abgasmessungen, der Wirkungsgrade und der Zündölanteile noch einmal zusammenfassend betrachtet und statistisch ausgewertet.

4.1 Gaszusammensetzung

Neben dem energetisch wertvollen Bestandteil Methan (CH_4) befinden sich auch Schadkomponenten im Gas, die den Verbrennungsprozess behindern bzw. beeinflussen und auf Anlagen- und Motorbauteile korrosiv wirken. Zu diesen Schadkomponenten gehören vor allem Schwefelwasserstoff (H_2S) und Wasserstoff (H_2).

H_2S ist nicht nur ein hoch giftiges, sondern auch sehr aggressives Gas und verursacht schon bei geringen Konzentrationen eine Versäuerung des Motorenöls und hohe Korrosionsschäden an Motorbestandteilen. Die Reduktion erfolgt durch schwefelabbauende Bakterien unter Einblasen von Luft, oder durch Zugabe Sulfat fixierender Eisensalze. Wasserstoff im Biogas ist ein Indikator für die Belastung der Biozönose und entsteht bei der Hydrolyse verdaulicher Bestandteile im Substrat. Er steht allerdings auch im Verdacht aufgrund seiner höheren Flammgeschwindigkeit den Zündzeitpunkt und damit den Verbrennungsprozess (Frühzündung) negativ zu beeinflussen. Zu hohe Prozessbelastungen (Überfütterung des Fermenters) sind daher zu vermeiden.

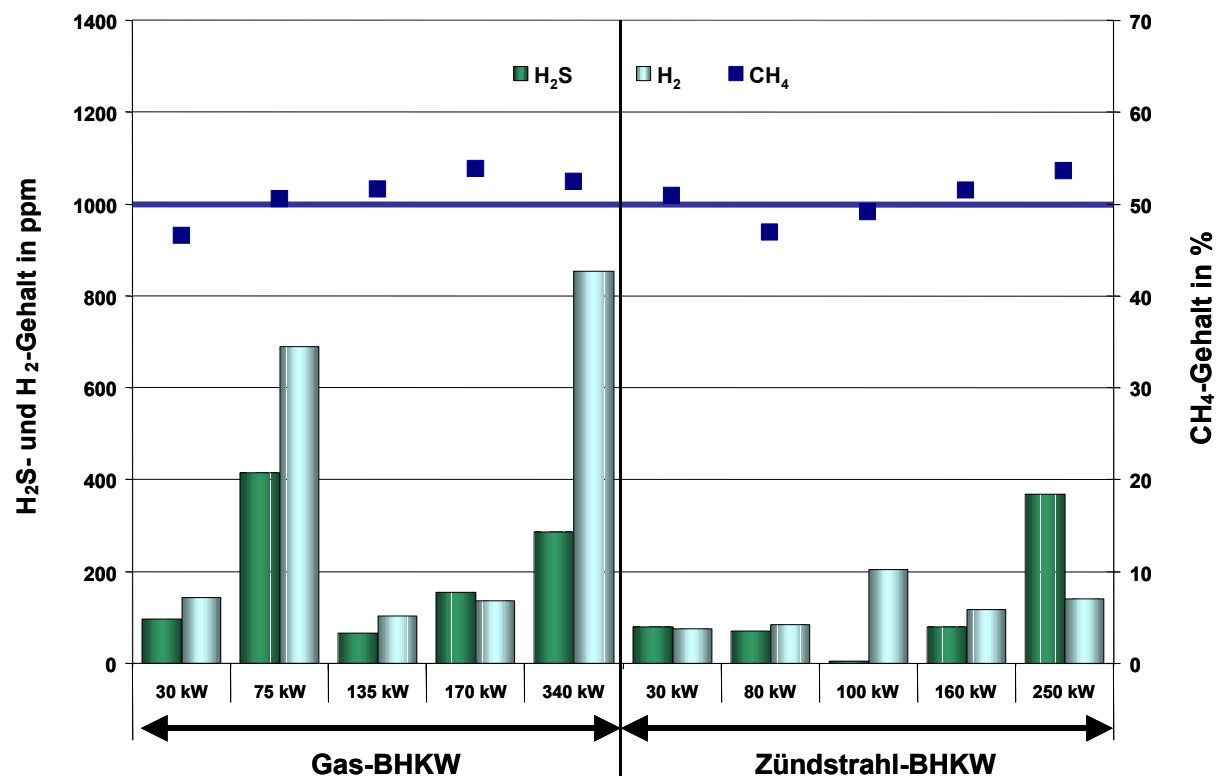


Abb. 27: Durchschnittliche Gaszusammensetzung der einzelnen Anlagen

Bei den untersuchten Anlagen handelte es sich bis auf eine (250 kW Zündstrahl-BHKW) um durchschnittliche, also repräsentative NaWaRo-Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von 200 kW bis 550 kW (ausgenommen eine Versuchsanlage mit 30 kW Zündstrahl-BHKW). Auffällig ist, dass die Methangehalte im Biogas aller Anlagen im Mittel um

50 % (47 % - 53 %) lagen (Abb. 27). Dies sollte bei Wirtschaftlichkeitsberechnungen bzw. Planungen von Biogasanlagen anhand von theoretischen Gaserträgen berücksichtigt werden. Bei allen Anlagen erfolgte die Entschwefelung durch Einblasen von Luft in den Fermenter. Zwei Anlagen verwendeten zusätzlich Aktivkohlefilter (100 kW u. 250 kW Zündstrahl-BHKW). Die Anlage mit 100 kW konnte dadurch den H₂S-Gehalt im Biogas auf bis zu 4 ppm reduzieren. Der H₂S-Gehalt lag bei der Hälfte der im Projekt untersuchten Anlagen in einem vertretbaren Rahmen von 75 bis 175 ppm. Drei Anlagen lagen mit durchschnittlichen 290 bis zu 410 ppm H₂S im Biogas oberhalb der für Motoren im Dauerbetrieb verträglichen Konzentration von ca. 200 ppm (Abb. 27). Bei diesen Motoren ist eine Schädigung im weiteren Verlauf nicht auszuschließen.

Der H₂-Gehalt im Biogas ist ein Maß für die Belastung des Fermenters und sollte möglichst niedrig liegen. Bei zwei Anlagen (75 kW und 340 kW) waren jedoch hohe Werte zu beobachten, die im Verlauf der Messungen noch weiter anstiegen. Hier ist auf Dauer eine Überfütterung der Biozönose zu befürchten. Bei den übrigen Anlagen lagen die H₂-Werte in einem günstigen Bereich (Abb. 27).

4.2 Zündölanteil

Der zulässige Zündölanteil für die Stützfeuerung bei Zündstrahl-BHKW wird oft mit 10 % angegeben. Dieser Grenzwert ist jedoch weder im neuen EEG noch in der Biomasseverordnung (BiomasseV) gesetzlich festgelegt und somit nicht bindend. Dies hat das Landgericht Dortmund in einem Urteil vom 21.01.2005 bestätigt (Az. O 6 197/02). Aus fachlicher Sicht sollte der Zündölanteil dem neuesten technischen Stand eines BHKW entsprechen und einen Anteil von 10 % nicht überschreiten.

Die in diesem Projekt ermittelten Zündölanteile wiesen relativ starke Schwankungen auf (Abb. 28). Bis auf das 160 kW BHKW wurden alle Zündstrahl-BHKW bei der Herstellerwartung unter Berücksichtigung des Zündölverbrauches gewartet und eingestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Herstellerwartung den Zündölanteil auf unter 10 % halten konnte, während beim 160 kW Aggregat ohne Verbrauchsmessung der Zündölverbrauch vor und nach der Wartung wesentlich darüber lag (Abb. 28). Die Betreiberwartung hatte in diesem Fall keinen positiven Effekt auf den Zündölverbrauch.

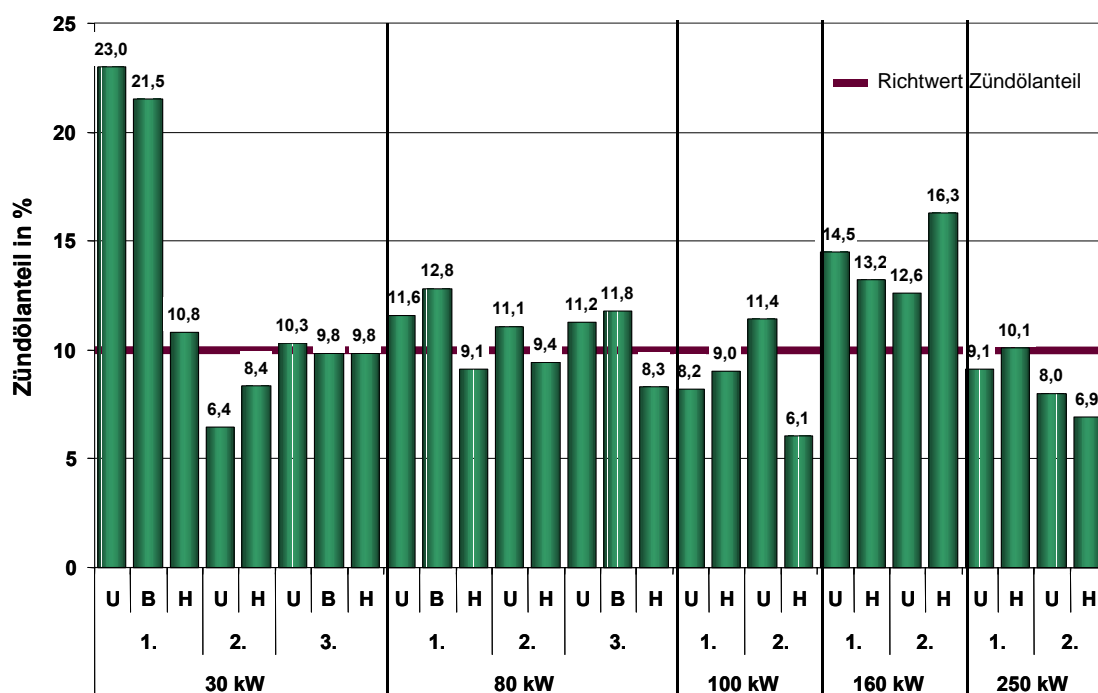


Abb. 28: Zündölanteil der untersuchten Zündstrahl-BHKW in Abhängigkeit des Betriebszustandes

Stellt man die verschiedenen Wartungszustände gegenüber, so lässt sich erkennen, dass die Herstellerwartung unter Berücksichtigung des Zündölverbrauches diesen im Gegensatz zum ungewarteten Zustand um durchschnittlich 2 Prozentpunkte von 11,0 % auf 8,8 % verbesserte, während die Herstellerwartung ohne Berücksichtigung des Zündölverbrauches keine Verringerung bewirkte.

4.3 Abgaswerte

Bei der Betrachtung der gemessenen Abgaswerte sind vor allem die NO_x -, CO- und Formaldehydwerte im Abgas für die Beurteilung der Emissivität der einzelnen BHKW von Interesse. Die durchschnittlichen Messergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst und mit den Richtwerten des Biogashandbuch Bayern 2004 verglichen.

4.3.1 NO_x -Konzentration im Abgas

Bei der Gegenüberstellung aller NO_x -Werte der gemessenen BHKW und deren Wartungszuständen fällt auf, dass bei den Gas-BHKW zum einen deutlich erhöhte Werte auftraten, und zum anderen diese Werte auch erheblichen Schwankungen ausgesetzt waren (Abb. 29). Im Mittel über alle Messungen lag der Wert bei den Gas-BHKW bei 1781 mg/m^3 und damit über dem Dreifachen des Richtwertes (500 mg/m^3).

Die Abgaswerte der Zündstrahl-BHKW variierten nicht so stark und lagen im Mittel mit 1313 mg/m^3 deutlich unterhalb des Richtwertes von 1500 mg/m^3 . Betrachtet man nur die BHKW, die nach Abgaswerten eingestellt werden, so verringert sich dieser Wert auf 1253 mg/m^3 (Abb. 29).

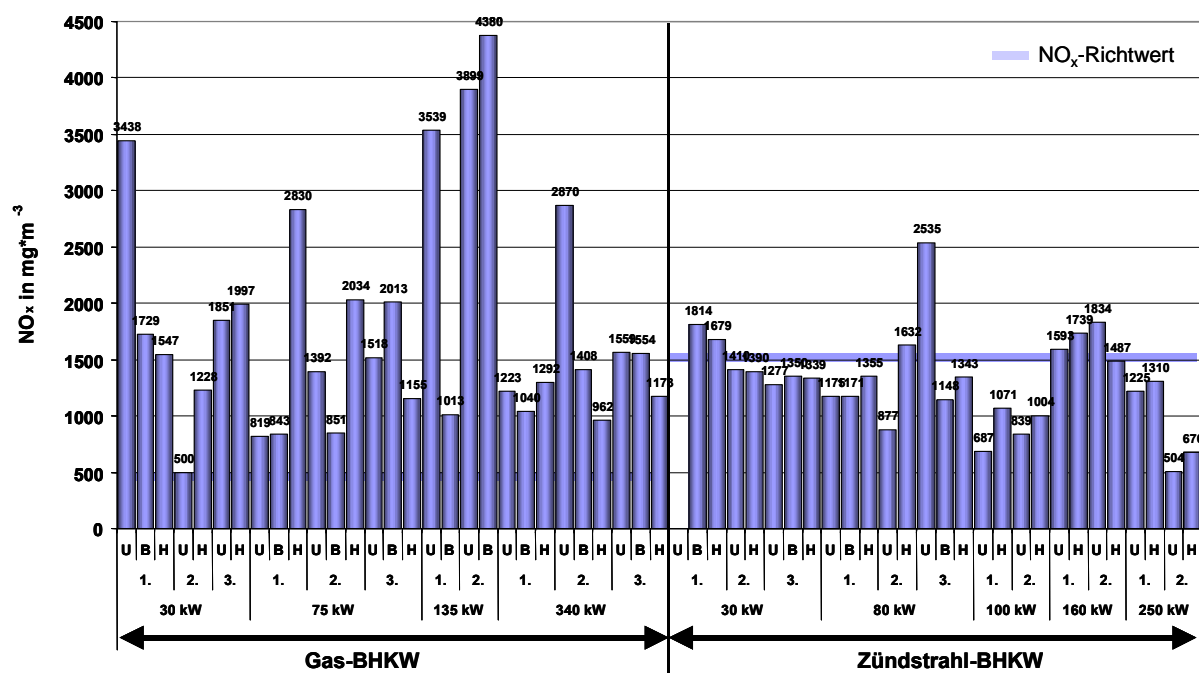


Abb. 29: NO_x -Werte im Abgas aller gemessenen BHKW

4.3.2 CO-Konzentration im Abgas

Die CO-Werte der Gas-BHKW lassen eine deutliche Verringerung mit Zunahme der Leistung erkennen. Die Werte betragen bei den höheren Leistungsklassen mit ca. 200 mg/m^3 nur etwa ein Fünftel des Richtwertes von 1000 mg/m^3 (Abb. 30). Dies lässt sich durch die geringen Lambda-Werte erklären, die zu höheren Verbrennungstemperaturen führen, wodurch die NO_x -Konzentrationen ansteigen, die CO-Gehalte im Abgas jedoch stark reduziert werden.

Bei den Zündstrahl-BHKW lagen die Werte im Mittel mit 1305 mg/m^3 zwar deutlich unter dem Richtwert von 2000 mg/m^3 , waren aber im Vergleich zu den Gas-BHKW mit 558 mg/m^3 mehr als doppelt so hoch (Abb. 30).

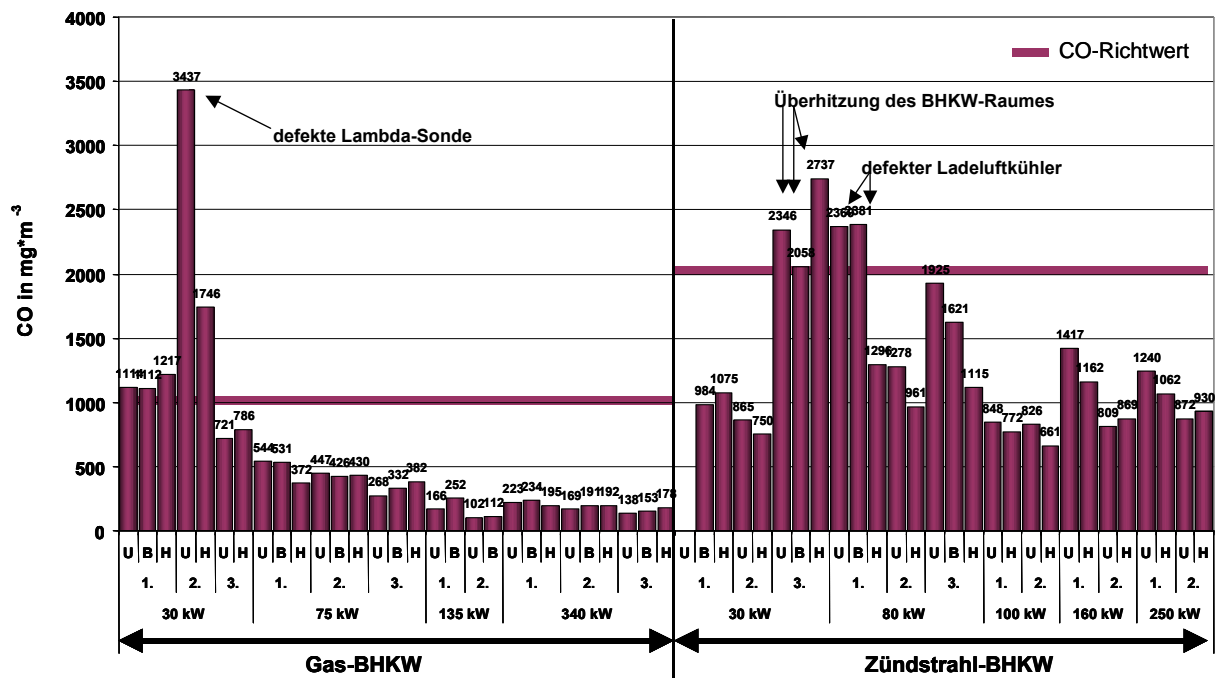


Abb. 30: CO-Werte im Abgas aller gemessenen BHKW

4.3.3 Formaldehyd

Formaldehyd (HCOH) ist ein farbloses, stechend riechendes und giftiges Gas. Es steht auch im Verdacht, Krebs zu erzeugen. Gebildet wird es vor allem bei Verbrennungsprozessen (wie z.B. Autoverkehr, Feuerungsanlagen, Tabakrauch). Der MAK-Wert liegt bei $0,6 \text{ mg/m}^3$. In der Atmosphäre wird Formaldehyd größtenteils in CO_2 und in kleinen Mengen in Ameisensäure umgewandelt. Das Biogashandbuch Bayern und die TA-Luft geben Formaldehydgrenzwerte von 60 mg/m^3 an (Abb. 31).

Die Auswertung der Formaldehydproben ergaben nur in einem Fall eine Überschreitung der Richtwerts von 60 mg/m^3 (Abb. 31). Bei den Gas-BHKW lagen die Werte im Durchschnitt bei $2,3 \text{ mg/m}^3$ und damit nur knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze von $0,5 \text{ mg/m}^3$. Die Zündstrahl-BHKW wiesen im Mittel mit $8,8 \text{ mg/m}^3$ etwas höhere Werte auf. Es konnten auch keine Zusammenhänge zwischen Wartungszustand, Standzeit und der Höhe der Formaldehydemissionen ermittelt werden.

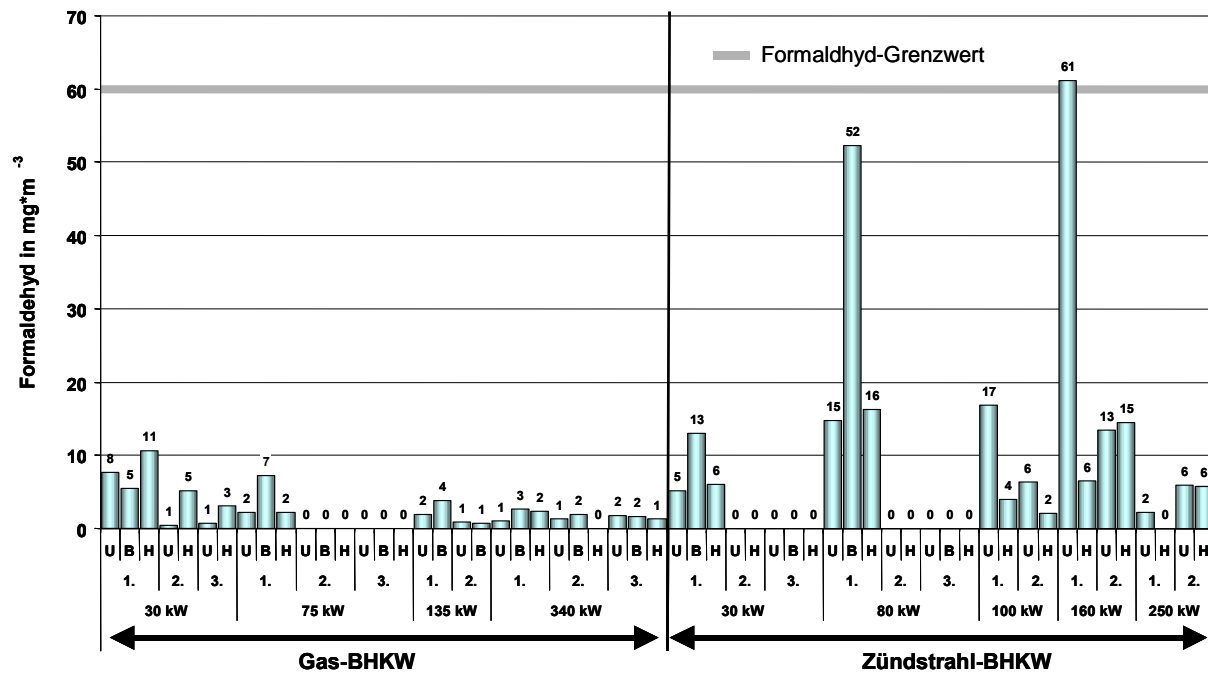


Abb. 31: Formaldehydgehalte im Abgas der gemessenen BHKW

Somit kann davon ausgegangen werden, dass Formaldehydemissionen von Biogas-BHKW in diesen Leistungsklassen nur eine untergeordnete Rolle spielen.

4.3.4 Kohlenwasserstoffe (Methanschlupf)

Kohlenwasserstoffe entstehen bei einer unvollständigen Verbrennung im Motor. Bei Biogas-BHKW werden die Kohlenwasserstoffe durch den sogenannten „Methanschlupf“ überwiegend in Form von CH_4 freigesetzt. Geringe Methangehalte im Biogas und Ventilüberschneidungen begünstigen den Methanschlupf. Aufgrund seiner hohen Klimarelevanz (CO_2 -Äquivalenz = 23) sollte der Methanschlupf im Abgas möglichst gering gehalten werden. Es gibt bis jetzt jedoch noch keine gesetzlich vorgeschriebenen Richt- bzw. Grenzwerte, die einzuhalten sind.

In Abb. 32 sind die mittleren Kohlenwasserstoffgehalte der gesamten Messreihen abgebildet. Lücken im Diagramm kennzeichnen die Termine, zu denen aufgrund von Defekten bzw. Reparaturmaßnahmen am Gerät keine Aufzeichnungen durchgeführt werden konnten. Der sehr hohe Wert beim 75 kW Gas-BHKW mit 1949 mg/m^3 kam durch die Verwendung falscher Zündkerzen (erhöhter Methanschlupf durch zu hohen Anodenabstand) zu Stande (vgl. auch Kap. 3.5.2). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass die Zündstrahl-BHKW mit einer mittleren C_nH_m -Konzentration von 560 mg/m^3 im Abgas fast doppelt so viel Kohlenwasserstoffe emittierten wie die Gas-BHKW (290 mg/m^3).

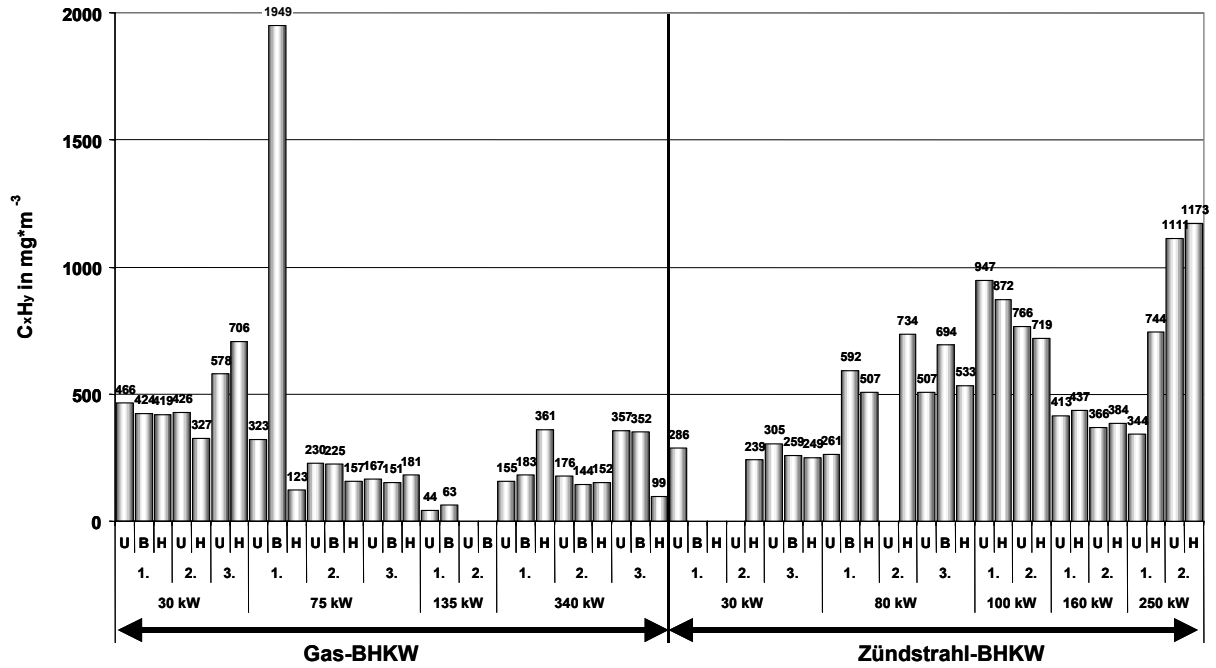


Abb. 32: Kohlenwasserstoffgehalte im Abgas der gemessenen BHKW

4.4 Elektrische Wirkungsgrade

Beim Vergleich der gemessenen elektrischen Wirkungsgrade mit den Herstellerangaben wird ersichtlich, dass die in den drei Messreihen ermittelten el. Wirkungsgrade teilweise in einem großen Bereich um den Wert der Herstellerangabe streuen (Abb. 33). Um eine Aussage über die gesamte Messperiode (ca. 1 Jahr) treffen zu können, müssen die erhobenen Daten über die Zeit betrachtet werden (Abb. 34).

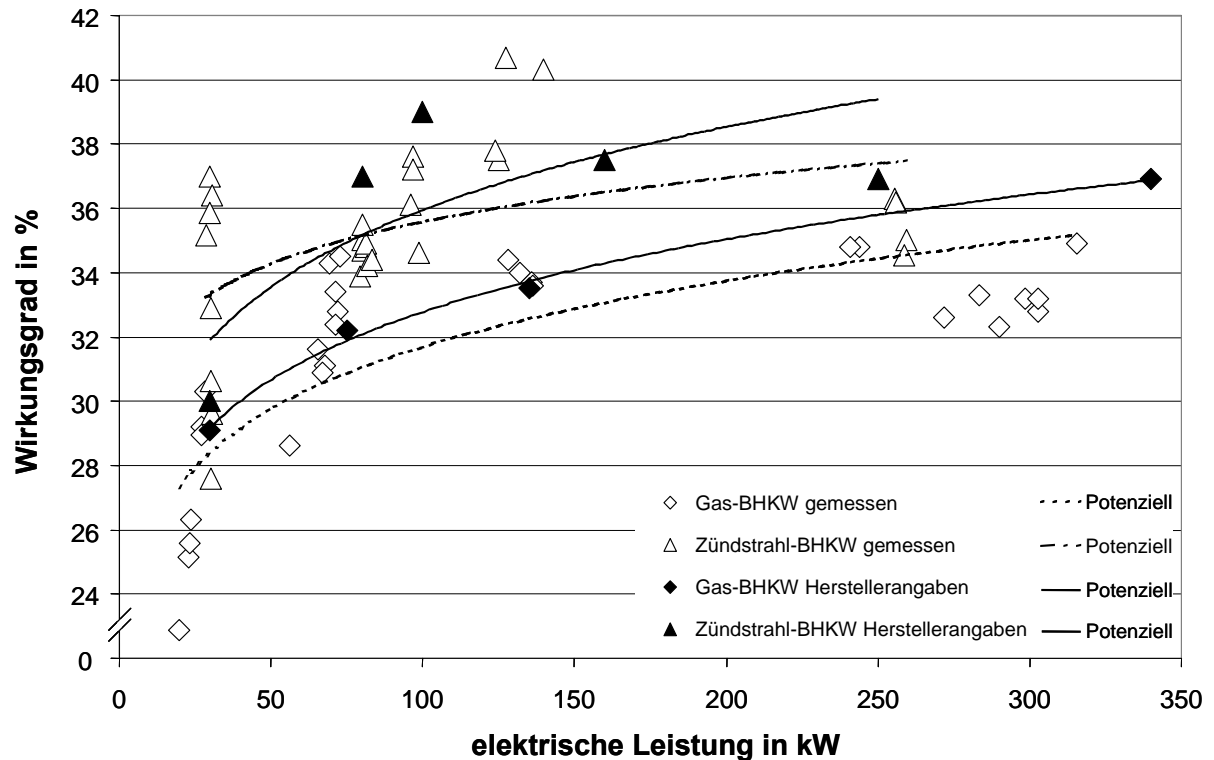


Abb. 33: Gemessene Wirkungsgrade im Vergleich zu den Herstellerangaben

Die Aufschlüsselung über die einzelnen Messungen (Mittelwerte der Messreihen) lies eine eindeutige Tendenz zur Wirkungsgradabsenkung bei Zunahme der Betriebsstundenanzahl erkennen (Abb. 34). Die Wirkungsgradänderung zwischen der 1. und 3. Messung betrug 0,3 bis 7 %. Nur beim 100 kW BHKW konnte zwischen der 1. und 2. Messung ein Anstieg beobachtet werden. Verantwortlich hierfür war vor allem der niedrige Methangehalt im Biogas während der 1. Messung (vgl. Kap. 3.6.3).

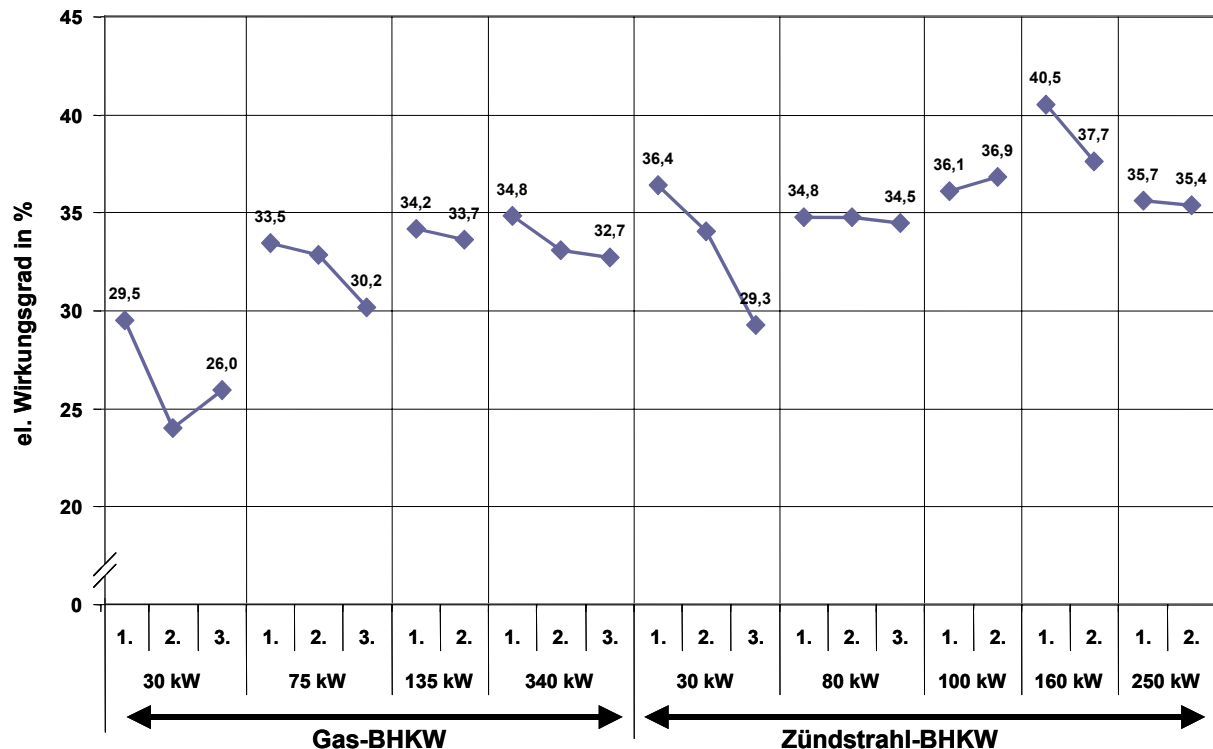


Abb. 34: Verlauf der elektrischen Wirkungsgrade über die gesamte Messdauer (ca. 1 Jahr)

Diese Aufschlüsselung erlaubt jedoch noch keine Aussage über die Wirkungsgradveränderung in Abhängigkeit der tatsächlichen Standzeit des BHKW. Deshalb wurden in Tab. 74 die Wirkungsgradveränderungen in Abhängigkeit der Betriebsstunden dargestellt. Die in diesem Projekt untersuchten BHKW wiesen bereits bei der 1. Messreihe sehr unterschiedliche Betriebsstunden auf. Auch die Laufzeit während der gesamten Messkampagne war von BHKW zu BHKW sehr verschieden. In Tab. 74 sind in der letzten Spalte die Wirkungsgradveränderungen in Abhängigkeit der Laufzeit dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Daten zu erhalten wurde die Änderung des Wirkungsgrades in $\Delta \eta/1000$ Betriebsstunden angegeben. Daraus wurde ersichtlich, dass die tatsächliche Absenkung des Wirkungsgrades bei den einzelnen BHKW Schwankungen unterworfen war, die von 0,05 Prozentpunkten (100 kW und 250 kW Zündstrahl-BHKW) bis zu 2,5 Prozentpunkten/1000 Betriebsstunden (160 kW Zündstrahl-BHKW) reichten.

Tab. 74: Betriebsstunden und Wirkungsgradänderungen ($\Delta \eta$) während der Messreihen

BHKW	1. Messung		2. Messung		3. Messung		Summe	
Gas-BHKW	Betriebsstunden	η	Laufzeit	$\Delta \eta$	Laufzeit	$\Delta \eta$	Laufzeit	$\Delta \eta/1000 \text{ Bh}$
30 kW	11.400 Bh	29,5	350 h	- 4,5	850 h	+ 2,0	1.200 h	- 2,08
75 kW	6.000 Bh	33,5	4.850 h	- 0,6	2.150 h	- 2,7	7.000 h	- 0,47
135 kW	14.150 Bh	34,2	2.850 h	- 0,5	-	-	2.850 h	- 0,18
340 kW	14.250 Bh	34,8	4.750 h	- 1,7	2.500 h	- 0,4	7.250 h	- 0,29
Zündstrahl-BHKW	Betriebsstunden	η	Laufzeit	$\Delta \eta$	Laufzeit	$\Delta \eta$	Laufzeit	$\Delta \eta/1000 \text{ Bh}$
30 kW	12.500 Bh	36,4	3.600 h	- 2,4	2.000 h	- 4,7	5.600 h	- 1,27
80 kW	22.200 Bh	34,8	4.300 h	0	2.300 h	- 0,3	6.600 h	- 0,05
100 kW	4.000 Bh	35,4	3.000 h	+ 2,0	-	-	3.000 h	-
160kW	1.100 Bh	40,5	1.100 h	- 2,8	-	-	1.100 h	- 2,5
250 kW	8.500 Bh	35,7	5.700 h	- 0,3	-	-	5.700 h	- 0,05

Um einen besseren Vergleich der gemessenen Wirkungsgrade mit denen der Herstellerangaben zu erhalten, wurden soweit möglich, die Wirkungsgrade herangezogen, die die einzelnen BHKW nach ca. 12.000 Bh (ca. 2 Jahre Betriebsdauer) aufwiesen. In Abb. 35 ist dieser Vergleich graphisch dargestellt. Vergleicht man die potenziellen Kurven erkennt man einen relativ parallelen Verlauf zwischen den Herstellerangaben und den ermittelten Werten, jedoch um etwa 1 % (Zündstrahl-BHKW) bzw. 1,5 % (Gas-BHKW) nach unten versetzt (Abb. 35).

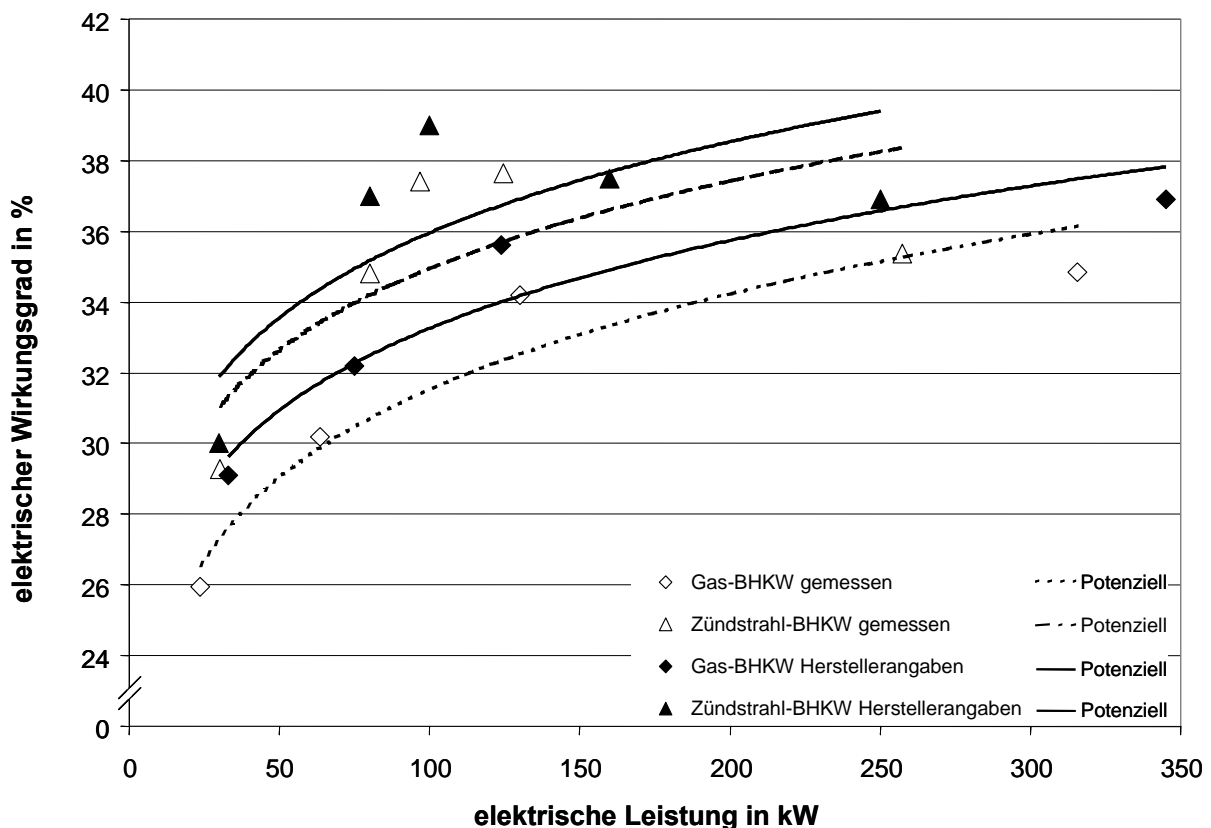


Abb. 35: Vergleich der ermittelten Wirkungsgrade (nach DIN ISO 3046) mit Angaben der Herstellerfirmen

Vergleicht man die Mittelwerte über die gesamten BHKW, so bestätigt sich dieser Trend:

Gas-BHKW (Herstellerangaben):	32,9 %
Gas-BHKW (gemessen):	31,6 %
Zündstrahl-BHKW (Herstellerangaben):	36,1 %
Zündstrahl-BHKW (gemessen):	35,2 %

In wie weit sich der Wirkungsgrad über die gesamte Standzeit eines BHKW veränderte, lies sich durch die Messungen nicht abschließend feststellen, jedoch sollten diese Ergebnisse bei der Berechnung der Stromproduktion eines BHKW über die Standzeit berücksichtigt werden. Die durch die Verringerung der Leistungsfähigkeit eines BHKW verursachten jährlichen Mindereinnahmen durch die Stromeinspeisung werden an dieser Stelle auf Basis der ermittelten Daten am 340 kW_{el} Gas-BHKW beispielhaft dargestellt. Folgende, den am Betrieb vorherrschenden Bedingungen entsprechende Daten wurden dabei zugrunde gelegt:

- Methangehalt im Biogas: 52,2 %
- Wirkungsgrad 1: 34,8 %
- Wirkungsgrad 2 32,7 %
- Betrieb im Teillastbereich: 299 kW
- Jährliche Laufzeit 7.500 h
- Einspeisevergütung: 0,153 €/kWh

Durch die Verschlechterung des Wirkungsgrades wurden unter diesen Bedingungen die Einnahmen aus dem Stromverkauf um rund 20.000 € pro Jahr reduziert. Sollten die Mindereinnahmen durch eine gesteigerte Brennstoffzufuhr kompensiert werden, müssten rund 80.000 m³ mehr Gas zur Verfügung gestellt werden. Bei einem unterstellten Hektarertrag von 50 t Mais und einer Gasausbeute von 200 m³ Biogas pro t Frischmasse bedeutet das einen zusätzlichen Flächenbedarf von rund 8 ha LN.

4.5 Einfluss der Wartung

Nachfolgen werden noch einmal die Ergebnisse der Gas- und Zündstrahl-BHKW gesondert betrachtet. Hier geht es vorwiegend um die Frage, ob der Wartungszustand generell einen Einfluss auf die Abgasemissionen und auf den Wirkungsgrad eines BHKW hatte.

4.5.1 Gas-BHKW

Wie in Kap. 4.3.1 bereits beschrieben, variierten die NO_x-Konzentrationen im Abgas bei den Gas-BHKW sehr stark. Fasst man die einzelnen Messreihen zusammen, erhält man die Mittelwerte der Wartungszustände (Abb. 36). Sie zeigen eine deutliche Veränderung der Konzentrationen zwischen dem ungewarteten und dem gewarteten (Betreiber- oder Herstellerwartung) Zustand. Außer beim 75 kW BHKW (NO_x Anstieg) verbesserte sich bei den untersuchten BHKW der NO_x-Gehalt im Abgas nach einer Wartung. Nach der Herstellerwartung waren jeweils die günstigsten Abgaswerte zu beobachten. Die CO- und C_nH_m-Werte veränderten sich dagegen kaum (Abb. 36). Betrachtet man dazu noch die jeweiligen Wirkungsgrade, so ist ein leichter Anstieg nach Wartungsmaßnahmen zu erkennen.

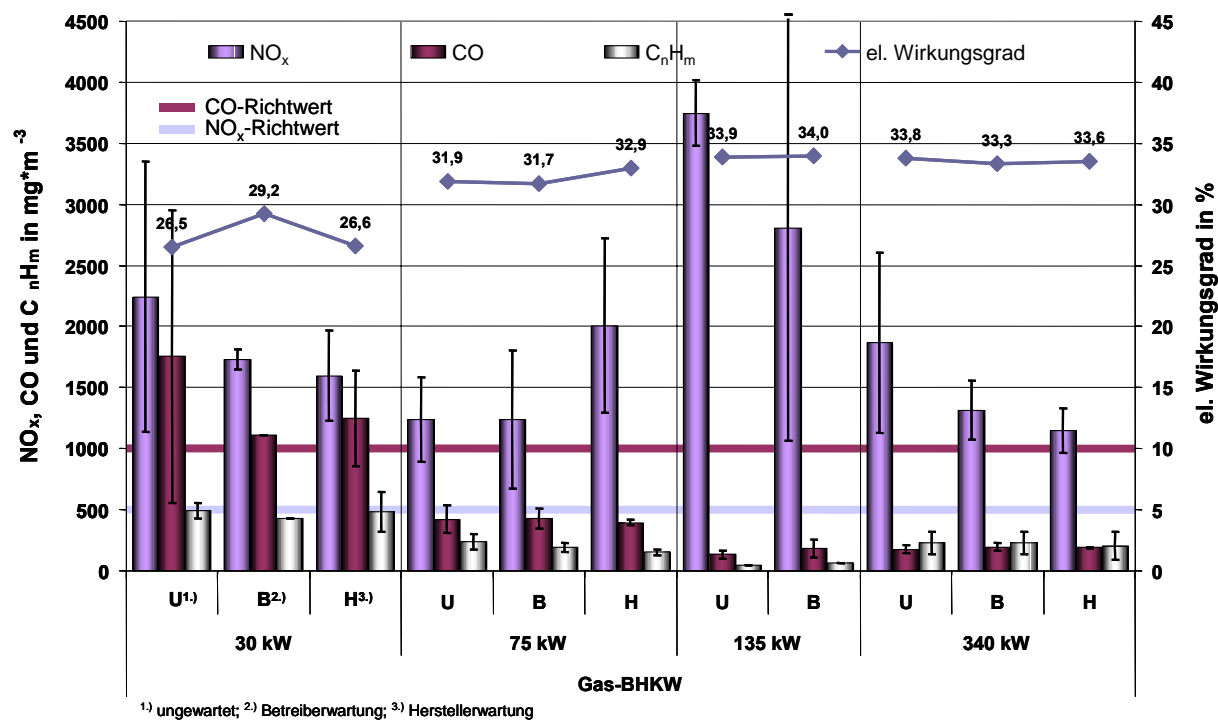


Abb. 36: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Gas-BHKW (trockenes Gas mit 5 % O₂)

Ob und in welchem Maße eine Betreiber- bzw. eine Herstellerwartung signifikante Verbesserungen bei den Abgasemissionen und den Wirkungsgraden brachte, ist in Tab. 75 dargestellt. Aus der Varianzanalyse mit Mittelwerttest (Tukey-Test) geht hervor, dass eine Betreiber- bzw. Herstellerwartung (außer beim 75 kW BHKW) eine signifikante Verbesserung der NO_x Emissionen bringen kann. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass die NO_x-Werte noch weit oberhalb der Richtwerte lagen.

Eine signifikante Erhöhung des Wirkungsgrades durch eine Herstellerwartung konnte nur beim 75 kW BHKW nachgewiesen werden. Diese Wirkungsgraderhöhung ging allerdings auf Kosten der NO_x Emissionen, die sich, hervorgerufen durch eine Einstellung des BHKW nach Leistungskriterien, signifikant verschlechterten (vgl. Kap. 3.5.4). Darüber hinaus konnte eine signifikante Steigerung des Wirkungsgrades durch die Betreiberwartung nur beim 30 kW Gas-BHKW festgestellt werden. Bei allen anderen Varianten waren die Unterschiede nicht signifikant (Tab. 75).

Tab. 75: Statistische Auswertung über die Auswirkung der Wartung auf NO_x-Werte und Wirkungsgrad der Gas-BHKW (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %)

Parameter	Wartung	30 kW	75 kW	135 kW	340 kW
NO _x	U ¹⁾ – B ²⁾	+ ⁴⁾	0 ⁵⁾	+	+
	U – H ³⁾	+	- ⁶⁾	k.M. ⁷⁾	+
	B – H	0	-	k.M.	+
Wirkungsgrad	U – B	+	0	0	0
	U – H	0	+	k.M.	0
	B – H	-	+	k.M.	0

¹⁾ ungewartet, ²⁾ Betreiberwartung, ³⁾ Herstellervartung, ⁴⁾ signifikante Verbesserung, ⁵⁾ keine Signifikanz, ⁶⁾ signifikante Verschlechterung, ⁷⁾ keine Messung

4.5.2 Zündstrahl-BHKW

Bei den Zündstrahl-BHKW wurden bei den Messungen in verschiedenen Wartungszuständen keine großen Differenzen der Abgaswerte festgestellt, so dass hier keine hohen Signifikanzen zu erwarten sind. Auch hier gingen die Wirkungsgrade durch die Wartungsmaßnahmen leicht nach oben, nicht jedoch beim untersuchten 30 kW Zündstrahlmotor, bei dem eine Abnahme des Wirkungsgrades zu beobachten war (Abb. 37).

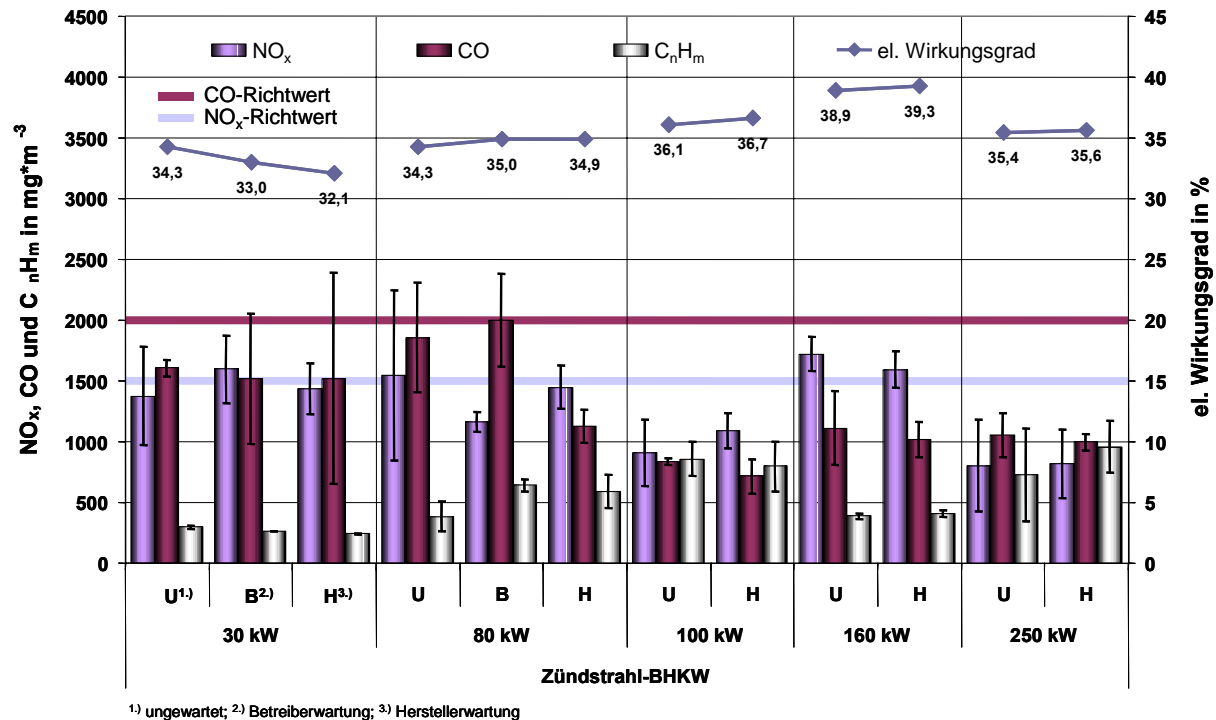


Abb. 37: Durchschnittliche Abgaswerte und Wirkungsgrade der gemessenen Zündstrahl-BHKW (trockenes Gas mit 5 % O₂)

Die mit den zur Verfügung stehenden Daten durchgeführte Varianzanalyse ergab in einigen Bereichen signifikante Unterschiede bezüglich des NO_x-Ausstoßes bzw. des Wirkungsgrades in Abhängigkeit vom Wartungszustand. In Tab. 76 sind die Ergebnisse der Mittelwertvergleiche dargestellt.

Beim 30 kW BHKW waren bei den Abgaswerten keine Unterschiede festzustellen, während die Wirkungsgrade vom ungewarteten Zustand zur Herstellerwartung abnahmen. Eine Begründung für dieses Verhalten konnte jedoch nicht gefunden werden. Beim 80 kW Aggregat lies sich eine Verbesserung der Abgaswerte durch eine Wartung erzielen, wohingegen sich die Wirkungsgrade nicht signifikant änderten. Die signifikante Erhöhung des Wirkungsgrades beim 100 kW Motor ging wiederum zu Lasten der Abgaswerte, wobei diese auf einem sehr niedrigen Niveau lagen. Anders beim 160 kW Modul. Hier konnten Wirkungsgrade erhöht und gleichzeitig die Abgaswerte signifikant verbessert werden, jedoch lagen diese Abgaswerte oberhalb des Richtwertes. Beim 250 kW Zündstrahl-BHKW konnten keine Signifikanzen festgestellt werden (Tab. 76).

Tab. 76: Statistische Auswertung über die Auswirkung der Wartung auf NO_x-Werte und Wirkungsgrad der Zündstrahl-BHKW (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %)

Parameter	Wartung	30 kW	80 kW	100 kW	160 kW	250 kW
NO _x	U ¹⁾ – B ²⁾	0 ⁵⁾	+ ⁴⁾	k. M. ⁷⁾	k. M.	k. M.
	U – H ³⁾	0	+	- ⁶⁾	+	0
	B - H	0	-	k. M.	k. M.	k. M.
Wirkungsgrad	U - B	-	0	k. M.	k. M.	k. M.
	U - H	-	0	+	+	0
	B - H	-	0	k. M.	k. M.	k. M.

¹⁾ ungewartet, ²⁾ Betreiberwartung, ³⁾ Herstellerwartung, ⁴⁾ signifikante Verbesserung, ⁵⁾ keine Signifikanz, ⁶⁾ signifikante Verschlechterung, ⁷⁾ keine Messung

5. Zusammenfassung

Die in diesem Projekt durchgeführten Untersuchungen liefern einen repräsentativen Überblick über das Emissionsverhalten und die Leistungsfähigkeit von biogasbetriebenen BHKW verschiedener Leistungsklassen. Untersucht wurden In- und Outputströme an 10 BHKW (5 Gas- und 5 Zündstrahl-BHKW) in den Leistungsklassen von 30 kW_{el.} bis 340 kW_{el.}

Die Abgasrichtwerte der CO- und Formaldehydkonzentrationen konnten bei nahezu allen BHKW eingehalten werden. Nur bei den BHKW im unteren Leistungsbereich (30 kW) traten bei den CO-Werten Richtwertüberschreitungen auf. Weder eine Betreiber- noch eine Herstellerwartung hatten einen signifikanten Einfluss auf die CO-Konzentrationen im Abgas. Die in Fachkreisen viel diskutierte Grenzwertüberschreitungen der Formaldehydkonzentrationen konnten in diesem Projekt nicht bestätigt werden.

Sehr interessant stellten sich die Ergebnisse der NO_x-Abgaswerte dar. Hier konnte entgegen den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen gezeigt werden, dass die Gas-BHKW den Richtwert für die NO_x-Konzentration zum Teil um ein Vielfaches überschreiten. Durch Wartungsarbeiten wurden die NO_x-Gehalte im Abgas zwar nachweislich reduziert, eine Unterschreitung der Richtwerte konnte aber in keinem Fall erreicht werden, da die Verbesserungen lediglich durch die Wartung (Öl-, bzw. Zündkerzenwechsel, Ventilspieleinstellungen) bewirkt wurden, aber keinerlei Optimierung der Motoreinstellung auf die NO_x- und CO-Emissionen durch den Einsatz eines Emissionsmessgerätes erfolgte.

Bei den Zündstrahl-BHKW lagen die NO_x-Konzentrationen im Abgas mit einer Ausnahme aufgrund bereits optimierter Motoreinstellungen unterhalb des vorgegebenen Richtwertes. Auffällig war, dass die NO_x-Richtwerte nicht eingehalten werden konnten, sofern die Wartung keine Kontrolle der Abgaszusammensetzung beinhaltete. Dies gilt sowohl für Gas- als auch für Zündstrahl-BHKW. Bei keinem der untersuchten Gas-BHKW wurden während der Wartung die Abgaswerte kontrolliert, um den Motor auf seine Emissionen hin zu optimieren. Hingegen wurden vier von fünf Zündstrahl-BHKW stets nach Abgaswerten gewartet, wodurch die Zündstrahl-BHKW deshalb i. d. R. von vornherein schon die Emissionsgrenzwerte eingehalten haben.

Die Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas von Zündstrahl-BHKW lagen im Mittel etwa doppelt so hoch wie bei den Gas-BHKW, wobei die Ursache wahrscheinlich im Wesentlichen an Ventilüberschneidungen liegt.

Die im Rahmen dieses Projektes ermittelten elektrischen Wirkungsgrade haben gezeigt, dass eine optimale Einstellung des Motors die Leistungsfähigkeit erhöhen kann, ohne die Abgaswerte zu verschlechtern. Bei einer einseitigen Einstellung des BHKW nach Leistungskriterien – wie dies die NO_x-Emissionen der Gas-BHKW deutlich gezeigt haben – ist jedoch mit einer drastischen Zunahme der NO_x-Emissionen zu rechnen.

Bei allen BHKW war eine alterungs- bzw. verschleißbedingte Abnahme des elektrischen Wirkungsgrades im Laufe der Betriebsdauer festzustellen. Der ermittelte elektrische Wirkungsgrad lag in allen Fällen leicht unterhalb des vom Hersteller angegebenen Wertes. Hierzu sollten unbedingt weitergehende Langzeituntersuchungen – möglichst über die gesamte Motorlebensdauer – durchgeführt werden.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den, im Projekt untersuchten BHKW um Motoren der Baujahre 2002/2003 handelte. Im Zuge der Novellierung des EEG wurde die Motorentechnik auf diesem Sektor stark verbessert, so dass die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse nicht ohne weiteres auf die neue Motorengeneration übertragen werden können.

6. Fazit

- Bei den hier untersuchten Gas-BHKW erfolgte die Motorwartung stets ohne Messung der Abgasemissionen
- Alle untersuchten Gas-BHKW haben die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für NO_x von 500 mg/m^3 z. T. erheblich überschritten
- Die Einhaltung von Emissionsgrenzwerten kann nur über regelmäßige Motorwartung und gleichzeitige Emissionsmessung bei der Motoreinstellung gewährleistet werden
- Motorwartung und Motoreinstellung bzw. -optimierung sollten deshalb künftig nur in Verbindung mit einer Abgas-Emissionsmessung (NO_x , CO, Lambda (λ) bzw. O_2 -Gehalt) durchgeführt werden
- Die von den Motorherstellern angegebenen Wirkungsgrade können höchst wahrscheinlich nicht über die gesamte Motorlebensdauer aufrecht erhalten werden
- Langzeituntersuchungen möglichst über die gesamte Motorenbetriebszeit sind dringend geboten, um einen möglichst emissionsarmen und wirkungsgradoptimierten Betrieb der Biogas-BHKW zu gewährleisten

7. Literaturverzeichnis

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
(Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft)
(GMBI. Nr. 25-29/2002 – 29 S. 511)
in der Fassung vom 24. Juli 2002

JÄKEL, EICHERT, (2001): Ergebnisse zu Abgasuntersuchungen an Blockheizkraftwerken in Biogasanlagen. Mündliche Mitteilung; Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft

GRONAUER, A.; M. EFFENBERGER; F. KAISER; M SCHLATTMANN (2002): Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken - Abschlussbericht; Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Landnutzung

GRONAUER, A. et. al., (2004): Biogas Handbuch Bayern. Internetpublikation:
<http://www.bayern.de/lfu/abfall/biogashandbuch/index.html>

MOHR, H. (1997): Technischer Stand und Potentiale von Diesel-/Gasmotoren. *Brennstoff Wärme Kraft* 49: S.49-52 + S.50-53.

POTT, J. (2001): Wirkungsgrade verschiedener Motorentypen. In: Biogas - mit neuer Energie Ressourcen schonen, 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. (Borken bei Kassel); S. 52-58.

KÖHLER, H. (1997): Stand der Entwicklung von Blockheizkraftwerken mit kleineren Gas-Otto-Motoren. In: Biogas, Verwertung und Aufbereitung; ATV-Schriftenreihe Bd. 9, S. 339-357; Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Hennef.

WAERDT, S. (2000): Biogas-Blockheizkraftwerke – Abgasemissionen. Persönliche Mitteilung der Firma Pro2 Anlagentechnik GmbH, H.-M.-Schleyer-Str. 8, 47877 Willich.