

Biogas-BHKW: Einflussparameter auf die Formaldehydemissionen

Schriftenreihe, Heft 16/2010



**Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten
eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen –
Zusätzliche Ermittlung der Formaldehydemissionen aus BHKW-Motoren,
die über Abgasreinigungsanlagen verfügen**

Torsten Neumann, Dr. Volker Beer, Harald Wedwitschka

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation	10
2	Motivation	11
3	Aufgabenstellung	13
4	Projektpartner	13
5	Vorgehensweise – Bearbeitungsablauf	15
5.1	Vorhandene Grundlagen	15
5.2	Auswahl der BHKW-Motorspezifikationen	16
5.3	Bereitschaftserklärung der Agrarbetriebe	17
5.4	Zeitplan.....	18
6	Methodische Umsetzung	18
6.1	Messplan	18
6.2	Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen mit Datenerfassungen	19
6.2.1	Abgasemissionsmessungen	19
6.2.2	Biogasanalysen	21
6.2.3	Datenerfassungen	24
7	Ergebnisse	26
7.1	Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen	26
7.2	Ist-Zustand ermittelter Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Formaldehydemissionen	27
7.2.1	Caterpillar-Motorspezifikationen	28
7.2.2	MWM-Motorspezifikationen	32
7.2.3	Deutz-Motorspezifikation	35
7.3	Wartungseinfluss	37
7.3.1	Caterpillar-Motoren „G 3412 TA“	38
7.3.2	MWM-Motoren „TCG 2016 V12“	42
7.3.3	Deutz-Motoren „BF6M 1015 C“	45
7.4	Motorbetriebsparameter	49
7.4.1	Zylindertemperaturen.....	49
7.4.2	Verbrennungsluftverhältnis	56
7.5	Biogasaufbereitung.....	57
7.5.1	Entschwefelung	58
7.5.1.1	Biologische Verfahren zur Entschwefelung.....	58
7.5.1.1.1	Entschwefelung im Fermenter durch Lufteinblasung	58
7.5.1.1.2	Entschwefelung mit Biotropfkörper	59
7.5.1.2	Adsorption und Fällung an eisenhaltigen Verbindungen.....	59
7.5.1.3	Adsorption an Aktivkohle	60
7.5.2	Entfeuchtung	61

7.6	Biogasanalysenkampagnen.....	63
7.6.1	BHKW „37“ und „42“.....	63
7.6.2	BHKW „38“ und „48“.....	64
7.6.3	BHKW „40“ und „139“.....	65
7.6.4	BHKW „43“, „57“ und „75“.....	67
7.6.5	BHKW „45“ und „78“.....	68
7.6.6	BHKW „47“.....	70
7.6.7	BHKW „52“.....	71
7.6.8	BHKW „53“.....	73
7.6.9	BHKW „54“.....	74
7.6.10	BHKW „55“.....	75
7.6.11	BHKW „56“ und „129“.....	76
7.6.12	BHKW „60“.....	77
7.6.13	BHKW „76“ und „77“.....	78
7.7	Biogaszusammensetzung.....	79
7.7.1	Methananteil.....	79
7.7.2	Schwefelwasserstoffanteil.....	81
7.8	Biogasfeuchte.....	83
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	86
9	Literaturverzeichnis.....	89

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Landwirtschaftliche Biogasanlagen in Sachsen /2/	11
Abbildung 2:	Teilergebnis der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/	12
Abbildung 3:	Partner des Forschungsvorhabens „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen“	14
Abbildung 4:	Teilergebnis der „Studie zu Maßnahmen ... BHKW“ /7/ → BHKW-Anzahl bzw. -verteilung unter Berücksichtigung der Motorenhersteller	15
Abbildung 5:	Flammenionisationsdetektor „FID-BA 3006“ der SICK MAIHACK GmbH /8/, Abgaskamin mit eingebrachter Abgasmesssonde, im Messwagen installierte Messtechnik	19
Abbildung 6:	Beispiele stationärer Gasanalysegeräte in Pöhsig und in Kotten	21
Abbildung 7:	Biogasmonitor „GA 2000“ der ASYNCO Analytische Systeme und Componenten GmbH Karlsruhe und Messplatzaufbau mit Probenentnahmebeutel	22
Abbildung 8:	Auswahl von parallel zu den Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen erfassten Motorbetriebsparametern	25
Abbildung 9:	Abgasemissionen Caterpillar-Gasottomotoren (6 bzw. 8 Zylinder, 3 Standorte)	29
Abbildung 10:	Washcoat im Träger eines AIR-SONIC-Kat. /15/	30
Abbildung 11:	BHKW mit Oxidationskatalysator (Datenbanknummer „47“)	30
Abbildung 12:	Abgasemissionen Caterpillar-Gasottomotoren (12 Zylinder, V-Anordnung, ohne Katalysator)	31
Abbildung 13:	Abgasemissionen Caterpillar-Gasottomotoren (12 Zylinder, V-Anordnung, mit Katalysator)	32
Abbildung 14:	Abgasemissionen MWM-Gasottomotoren (6 bzw. 12 Zylinder, V-Anordnung)	34
Abbildung 15:	Abgasemissionen Deutz-Zündstrahlmotoren (6 Zylinder, V-Anordnung)	37
Abbildung 16:	Maximale Emissionswerte für ein Gasottomotoren-BHKW vor und nach einer Wartung /7/	37
Abbildung 17:	Auswahl von Wartungstätigkeiten für Gasotto- und Zündstrahlmotoren	38
Abbildung 18:	BHKW mit der Caterpillar-Motorspezifikation „G 3412 TA“ (Datenbanknummer „40“)	40
Abbildung 19:	Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „40“ → „G 3412 TA“	40
Abbildung 20:	Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „57“ → „TCG 2016 V12“	44
Abbildung 21:	Zylinderköpfe vom BHKW mit der Datenbanknummer „76“ → „BF6M 1015 C“	47
Abbildung 22:	Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „75“ → „BF6M 1015 C“	48
Abbildung 23:	Schaltschrankdisplay zum Ablesen der Zylindertemperaturen	50
Abbildung 24:	Zylinderbezeichnungen /17/	50
Abbildung 25:	Zylindertemperaturen der Messkampagnen vor und nach der Wartung für das BHKW „52“ mit der BHKW-Gasottomotorenspezifikation „TCG 2015 V6“	51
Abbildung 26:	Ergebnisse der Untersuchungen zum Verbrennungsluftverhältnis für die MWM-Gasottomotoren	57
Abbildung 27:	Tropfkörper-Biorieselbettreaktor	59
Abbildung 28:	Entschwefelung mittels Eisensalzen → Vorratsbehälter der Salzlösung	60
Abbildung 29:	Zusätzliche Entschwefelung mittels Aktivkohlefilter vor dem Gaseintritt in das BHKW „54“	61
Abbildung 30:	Schematische Darstellung der Gasleitung Fermenter/BHKW	62
Abbildung 31:	Technische Gaskühlung (z. B. BHKW „60“)	62

Abbildung 32:	Biogaszusammensetzung für BHKW „37“ und „42“	64
Abbildung 33:	Biogaszusammensetzung für BHKW „38“ und „48“	65
Abbildung 34:	Biogaszusammensetzung für BHKW „40“ und „139“	66
Abbildung 35:	Biogaszusammensetzung für BHKW „43“ und „57“	67
Abbildung 36:	Biogaszusammensetzung für BHKW „75“	68
Abbildung 37:	Biogaszusammensetzung für BHKW „45“	69
Abbildung 38:	Biogaszusammensetzung für BHKW „78“	70
Abbildung 39:	Biogaszusammensetzung für BHKW „47“	71
Abbildung 40:	Biogaszusammensetzung für BHKW „52“	72
Abbildung 41:	Biogaszusammensetzung für BHKW „53“	73
Abbildung 42:	Biogaszusammensetzung für BHKW „54“	74
Abbildung 43:	Biogaszusammensetzung für BHKW „55“	75
Abbildung 44:	Biogaszusammensetzung für BHKW „56“	76
Abbildung 45:	Biogaszusammensetzung für BHKW „60“	77
Abbildung 46:	Biogaszusammensetzung für BHKW „76“ und „77“	78
Abbildung 47:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten CH ₄ -Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	80
Abbildung 48:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten CH ₄ -Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	80
Abbildung 49:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten H ₂ S-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	82
Abbildung 50:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten H ₂ S-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	82
Abbildung 51:	Biogasfeuchtemittelwerte der einzelnen Analysekampagnen.....	84
Abbildung 52:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten Biogasfeuchte sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	85
Abbildung 53:	Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten Biogasfeuchte sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW	86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auswahl von Emissionsgrenzwerten für Biogas-BHKW gemäß TA Luft /6/.....	12
Tabelle 2:	Häufigkeitsverteilung ausgewählter Gasotto- und Zündstrahlmotoren in Sachsen /7/.....	17
Tabelle 3:	Diskontinuierliche nasschemische Messverfahren zur Formaldehydanalyse /3/.....	20
Tabelle 4:	Toleranzbereich mobiler Biogasmonitor „GA 2000“.....	22
Tabelle 5:	Toleranzbereich stationärer AWITE-Biogasmonitor.....	23
Tabelle 6:	Toleranzbereich Laborwaage.....	23
Tabelle 7:	Toleranzbereich Gasprobenehmer „GS 312“.....	24
Tabelle 8:	Toleranzbereich Thermometer.....	24
Tabelle 9:	Aufstellung Mess-/Analysekampagnen nach Motorspezifikation bzw. Anzahl.....	27
Tabelle 10:	Technische Angaben der vermessenen Caterpillar-Motorspezifikationen /11, 14/.....	28
Tabelle 11:	Auswahl technischer Angaben der vermessenen MWM-Motorspezifikationen /12/.....	33
Tabelle 12:	Technische Angaben der vermessenen Deutz-Motorspezifikation /13, 16/.....	35
Tabelle 13:	Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „G 3412 TA“.....	39
Tabelle 14:	Auswahl von Wartungstätigkeiten und Teilewechseln am 12.07.2006 am BHKW „40“.....	41
Tabelle 15:	Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „TCG 2016 V12“..	42
Tabelle 16:	Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „BF6M 1015 C“...	46
Tabelle 17:	Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „52“ (TCG 2015 V6) und „53“ bis „57“ sowie „60“ (alle TCG 2016 V12) aufgenommenen Messreihen.....	53
Tabelle 18:	Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „42“, „43“, „45“, „47“ und „48“ (alle G 3412 TA) aufgenommenen Messreihen.....	55
Tabelle 19:	Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „75“ bis „78“ (alle BF6M 1015 C) aufgenommenen Messreihen.....	56

Abkürzungsverzeichnis

AHMT	4-Amino-3-hydrazino-5-mercapto-1,2, 4-triazol
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BfUL	Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BioAbfV	Bioabfallverordnung
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlendioxid
DBFZ	Deutsches BiomasseForschungsZentrum
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNPH	Dinitrophenylhydrazin
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
el.-chem.	elektrochemisch
FAME	fatty acid methyl ester (Fettsäuremethylester)
Fe	Eisen
FeCl ₂	Eisen-(II)-chlorid
FeCl ₃	Eisen-(III)-chlorid
Fe(OH) ₃	Eisen-(III)-oxidhydrat
FeS	Eisen-(II)-sulfid
FeSO ₄	Eisen-(II)-sulfat
FiF	Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik
FTIR	Fourier Transform InfraRot
FuE	Forschung und Entwicklung
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen
Ges-C	Gesamtkohlenstoff
HCHO	Formaldehyd
HCl	Chlorwasserstoff (auch Salzsäure)
HEL	Heizöl extra leicht
HTW	Hochschule für Technik und Wirtschaft
H ₂	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
H ₂ SO ₄	Schwefelsäure
K	Kalium
K ₂ CO ₃	Kaliumcarbonat

KI	Kaliumiodid (auch Kaliumjodid)
KMnO ₄	Kaliumpermanganat
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KW	Kalenderwoche
LAI	Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MAN	Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg
max.	maximale(r)
MBHT	3-Methyl-2-benzothiazolinomhydrozon
MWM	Motoren-Werke Mannheim
Na	Natrium
NH ₃	Ammoniak
Ni	Nickel
NMHC	nichtmethanhaltige Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickstoffoxid(e)
nR	nach Reparatur
nW	nach Wartung
N ₂	Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
NO ₂	Stickstoffdioxid
o. li.	oben links
Oxikat	Oxidationskatalysator
O ₂	Sauerstoff
P	Phosphor
PDF	Portable Document Format
re.	rechts
S	Schwefel
SMUL	Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SO ₂	Schwefeldioxid
TA	Technische Anleitung
TLL	Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft
TLUG	Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
u. li.	unten links
USB	Universal Serial Bus
V	V-Form (Kurzzeichen in Motortypbezeichnung für Zylinderanordnung)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
vW	vor Wartung

Einheiten

°C	Grad Celsius
ct	Cent
g	Gramm
GV/ha LF	Großvieheinheiten pro Hektar Landwirtschaftsfläche
h	Stunde(n)
Hz	Hertz
kg	Kilogramm
kW(h)	Kilowatt(stunde)
kWh/Nm ³	Kilowattstunde pro Normkubikmeter
l/h	Liter pro Stunde
l/min	Liter pro Minute
mA	Milliampere
mbar	Millibar
mg/l	Milligramm pro Liter
mg/m ³	Milligramm pro Kubikmeter
min ⁻¹	Umdrehungen pro Minute
MW	Megawatt
NI/min	Normliter pro Minute
Nm ³	Normkubikmeter
pH	pondus Hydrigenii (Maß für die saure oder alkalische Reaktion einer wässrigen Lösung)
ppm	parts per million
t	Tonne(n)
V	Volt
Vol. %	Volumenprozent

Formelzeichen, Indizes, Einzelziffern und -buchstaben

H ₂ S _{high}	höchster Schwefelwasserstoffmessbereich
H ₂ S _{low}	niedrigster Schwefelwasserstoffmessbereich
HCHO _{max}	Formaldehyd maximal
H _u	unterer Heizwert
T _{max}	Maximaltemperatur
T _{min}	Minimaltemperatur
λ	Verbrennungsluftverhältnis

Einleitung

Das hier vorgestellte Forschungsvorhaben basiert hauptsächlich auf Angaben bzw. Daten, die von 13 beteiligten Agrarbetrieben (Anlagenband: Anlage 1) in Form von ausgefüllten Befragungsbögen, bereitgestellten Kopien von Wartungs- und Betriebsstoffnachweisen sowie Emissionsmessberichten per Post, Mail oder Fax bzw. im Rahmen von Vor-Ort-Terminen zur Verfügung gestellt wurden. Eine weitere Grundlage bildeten Betriebsanleitungen für einige in dieser Studie berücksichtigte Verbrennungsmotorenspezifikationen. Diese wurden durch die Motoren-Werke Mannheim GmbH sowie die Deutz AG Köln unkompliziert und in effizienter Form zur Verfügung gestellt. In diesem Zusammenhang ist ausdrücklich hervorzuheben, dass insbesondere die sowohl durch die Agrarbetriebe als auch durch die Motorenhersteller übermittelten Daten, Informationen und Unterlagen wesentlich zur Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens und der resultierenden Erstellung dieses Abschlussberichtes beigetragen haben.

In dieses Forschungsvorhaben wurden auch einige im Freistaat Thüringen installierte Biogasanlagen einbezogen. Im Ergebnis dessen war es möglich, die Ergebnisse für einige Untersuchungsparameter hinsichtlich einer BHKW-Motorspezifikation repräsentativer darzustellen.

Eine Besonderheit dieses Forschungsvorhabens war, dass die Ergebnisse ausschließlich auf die Auswertung von durch Dritte bereitgestellten Angaben und Werten aus Befragungsbögen, Emissionsmessberichten sowie Betriebsanleitungen und Wartungs- und Betriebsstoffnachweisen beruhen. Für mögliche Fehler aus diesen Datenquellen übernehmen die Autoren dieses Abschlussberichtes keine Gewähr. Diese entsprechend zum Ansatz gebrachten Angaben bzw. Werte lassen sich durch eine umfangreiche Vielfalt der Anlagen- bzw. der BHKW-Spezifikationen charakterisieren. Für die jeweiligen Untersuchungen waren Plausibilitätsprüfungen notwendig, die jedoch aus Effizienzgründen nicht für jeden Anlagenstandort bzw. für jedes BHKW gleichermaßen realisiert werden konnten.

1 Ausgangssituation

U. a. aufgrund stetig steigender Anforderungen sowohl an den globalen als auch an den lokalen Umwelt- und Klimaschutz sowie der zunehmend knapp werdenden Primärenergieressourcen gewinnen alternative Antriebsvarianten (z. B. Hybrid, Brennstoffzelle) und Kraftstoffe für den Betrieb von Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen zunehmend an Bedeutung. Hierbei werden auch Biokraftstoffe wie z. B. Pflanzenöl, Bioethanol, Fettsäuremethylester (FAME) und „Biogas“ in verschiedenen und vielfältigen Anwendungsbereichen eingesetzt.

Der Schwerpunkt des Biogaseinsatzes liegt gegenwärtig auf der Verwendung in Verbrennungsmotoren von Blockheizkraftwerken, so werden in Deutschland zurzeit ca. 4.100 Biogasanlagen betrieben /1/. Nach /1/ geht der Fachverband Biogas e. V. davon aus, dass für 2010 ein Zuwachs um ca. 500 bis 600 Biogasanlagen zu erwarten ist.

In Sachsen befanden sich mit Stand zum 01.01.2010 141 landwirtschaftliche Biogasanlagen in Betrieb. Weitere 26 Biogasanlagen sind in der Bau- bzw. in der Planungsphase (Abbildung 1).

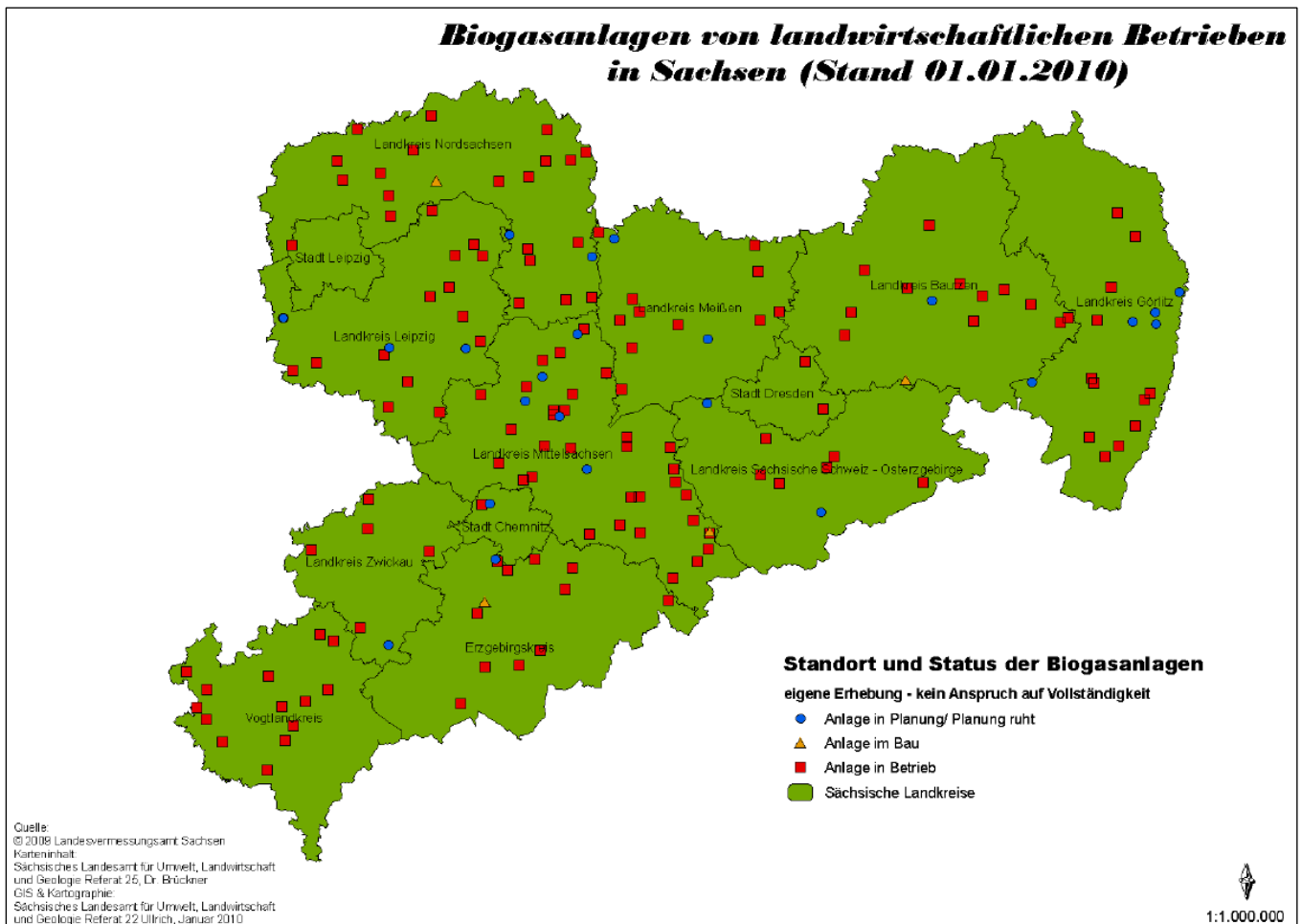


Abbildung 1: Landwirtschaftliche Biogasanlagen in Sachsen /2/

2 Motivation

Bei der Installation und dem Betrieb von Biogas-BHKW sind sowohl genehmigungs- als auch sicherheitsrelevante Gesetze und Vorschriften zu beachten. Beispielhaft werden die Betriebsicherheitsverordnung, das Bundes-Immissionsschutzgesetz, das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz, die Bioabfallverordnung sowie die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft genannt. Unter anderem ist darin geregelt, dass Biogas-BHKW turnusmäßigen Prüfungen und Messungen zu unterziehen sind. Im Rahmen derartig durchgeführter Abgasemissionsmessungen wurde deutschlandweit (z. B. /3/, /4/) festgestellt, dass der in der TA Luft vorgeschriebene Grenzwert für Formaldehyd (HCHO) = 60 mg/m³ teilweise mehr oder minder überschritten wurde.

Unter anderem resultierend aus diesen Abgasemissionsmess- bzw. -analysewerten sowie den Ergebnissen eines durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie durchgeführten Messprogramms „Geruchsemissionen aus Abgasen von Blockheizkraftwerken (BHKW)“ /5/ ergeben sich Motivationen hinsichtlich des Forschungsbedarfes zu Maßnahmen, welche die Einhaltung der gemäß TA Luft festgelegten Emissionsgrenzwerte (Tabelle 1) ermöglichen könnten.

Tabelle 1: Auswahl von Emissionsgrenzwerten für Biogas-BHKW gemäß TA Luft /6/

Abgas-emissionsbestandteil	Emissionsgrenzwerte [mg/m ³] bezogen auf 5 Vol.% O ₂			
	Fremdzündungsmotoren (z. B. 4-Takt-Otto-Motoren)		Selbstzündungsmotoren (z. B. Zündstrahlmotoren)	
	FEUERUNGSWÄRMELEISTUNG			
	< 3 MW	= > 3 MW	< 3 MW	= > 3 MW
Kohlenmonoxid (CO)	1.000	650	2.000	650
Stickstoffoxide NO + NO ₂ = NO _x (angegeben als NO ₂)	500		1.000	500
Formaldehyd (HCHO)	60			

Ausgehend von diesen Überlegungen hat das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, vertreten durch das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, mit der Erarbeitung einer Studie zu „Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ /7/ beauftragt. Als ein Teilergebnis hat sich auch in Sachsen der Trend hinsichtlich der auch in anderen Bundesländern festgestellten HCHO-Grenzwertüberschreitungen bestätigt (Abbildung 2).

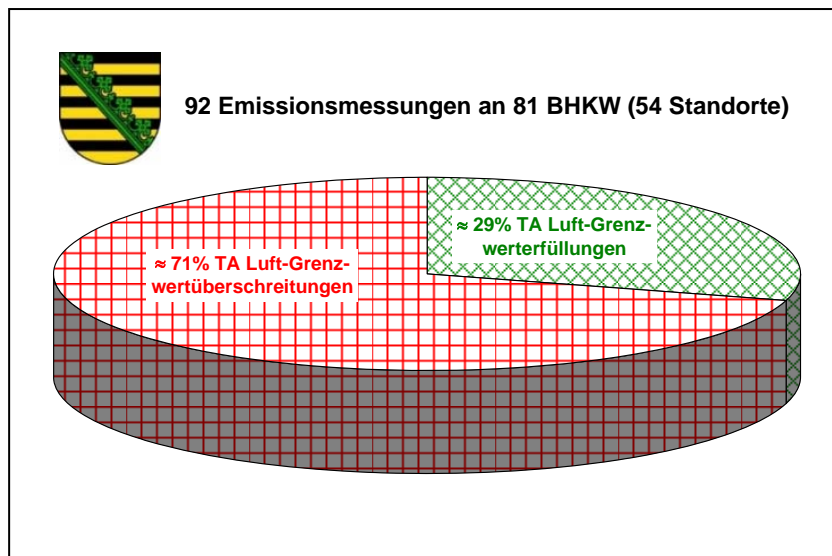


Abbildung 2: Teilergebnis der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/
 → 65 x Überschreitung und 27 x Erfüllung des geltenden TA Luft-HCHO-Grenzwertes

3 Aufgabenstellung

Als ein weiteres Ergebnis der „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ /7/ wurde herausgearbeitet, dass auch der Inspektions- und Wartungszustand der BHKW einen Einfluss auf die Formaldehydemissionen haben könnte. Aufgrund dieser These wurde in der o. g. Studie als eine mögliche Maßnahme zur Minderung von HCHO-Emissionen die Verkürzung der Wartungsintervalle bei den BHKW-Motoren vorgeschlagen. Zur Umsetzung dieser Maßnahme ist es jedoch erforderlich, zunächst den Einfluss der jeweils nach Herstellervorgabe und Intervall auszuführenden Tätigkeiten und Verschleißteile- sowie Betriebsstoffwechsel auf die Minderung der HCHO-Emissionen zu untersuchen. Beispielhaft sind Ventilspieleinstellungen sowie ggf. Zündkerzen- oder Injektorwechsel zu erwähnen. Diese Untersuchungen wurden als Teilleistung 1 definiert. Resultierend aus diesen Erkenntnissen sollten verkürzte Wartungsintervalle sowie optimierte Wartungsqualitäten vorgeschlagen werden. Außerdem war abzuschätzen, welcher finanzielle Mehraufwand für die Betreiber durch die Änderungen bei der Anlageninspektion und -wartung entstehen würde. Diese Leistungen wären in Abhängigkeit von den Ergebnissen der Teilleistung 1 zum gegebenen Zeitpunkt separat als Teilleistung 2 zu beauftragen.

Ziel des Forschungsvorhabens war, für die ausgewählten Anlagen in Zusammenarbeit mit den Anlagenherstellern den Einfluss der Wartung auf die Minderung der Formaldehydemissionen genauer zu untersuchen und die im Hinblick auf die Reduzierung von Formaldehydemissionen optimalen Wartungsintervalle zu ermitteln, diese in der Praxis zu erproben und daraus Handlungsanleitungen für die Betreiber zu erarbeiten (Teilleistung 2). Im Rahmen der Erfüllung der Aufgabenstellung waren jeweils Abgasemissionsmessungen und Biogasanalysen vor und nach der planmäßigen Wartung an ausgewählten Biogas-BHKW verschiedener Standorte durchzuführen, auszuwerten und mögliche Zusammenhänge hinsichtlich der jeweiligen Wartungstätigkeiten bzw. Verschleißteile- und Betriebsstoffwechsel herauszuarbeiten und zu formulieren.

4 Projektpartner

Unter Berücksichtigung der erläuterten Ausgangssituation sowie der Aufgabenstellung wurde durch das LfULG eine Ausschreibung zum Forschungsvorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen“ realisiert. Diese Ausschreibung wurde am 29.05.2009 in Bundes- und Landesausschreibungsblättern veröffentlicht. Daraufhin hat sich das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW Dresden um die Ausführung dieses Forschungsvorhabens beworben und am 10.07.2009 den Zuschlag erhalten. Hierbei fungieren das LfULG als Auftraggeber und das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik der HTW als Auftragnehmer.

Da der Auftragnehmer nicht über das Know-how und die notwendigen Erfahrungen zur Durchführung von Biogasanalysen verfügt, war der Einsatz eines Nachauftragnehmers für die Beauftragung dieser Leistungen notwendig. Resultierend aus den Ausschreibungsbedingungen hat das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik eine ausführliche Recherche hinsichtlich von Instituten bzw. Laboratorien, welche Biogasanalysen in ihrem Dienstleistungsfolio haben, realisiert. Diese Recherche orientierte sich, insbesondere unter Berücksichtigung der Standortentfernungen zu den ausschließlich in Sachsen befindlichen und noch festzulegenden Biogasanlagen, auf im Freistaat Sachsen ansässige Unternehmen.

Im Ergebnis dieser Recherche sowie der dementsprechend vorliegenden Informationen wurde das DBFZ um die Abgabe eines Angebotes gemäß LfULG-Ausschreibungsbedingungen gebeten und resultierend aus der Zuschlagserteilung an das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik mit der Ausführung dieser Biogasanalysen beauftragt. Die Abgasemissionsmessungen wurden durch die BfUL ausgeführt (Abbildung 3).

Grundvoraussetzung für die Realisierung dieses Forschungsvorhabens war die Beteiligung mehrerer Agrarbetriebe, die Biogas-BHKW betreiben. Hierbei war darauf zu orientieren, dass für diese keinerlei Mehrkosten entstehen und nicht in den Betriebsablauf eingegriffen wurde. Dementsprechend wurden die jeweiligen Abgasemissionsmessungen und Biogasanalysen so organisiert, dass für die jeweiligen Abgasmess- und Biogasanalysekampagnen die planmäßig anstehenden BHKW-Wartungen die Grundlage für die Terminisierung bildeten.

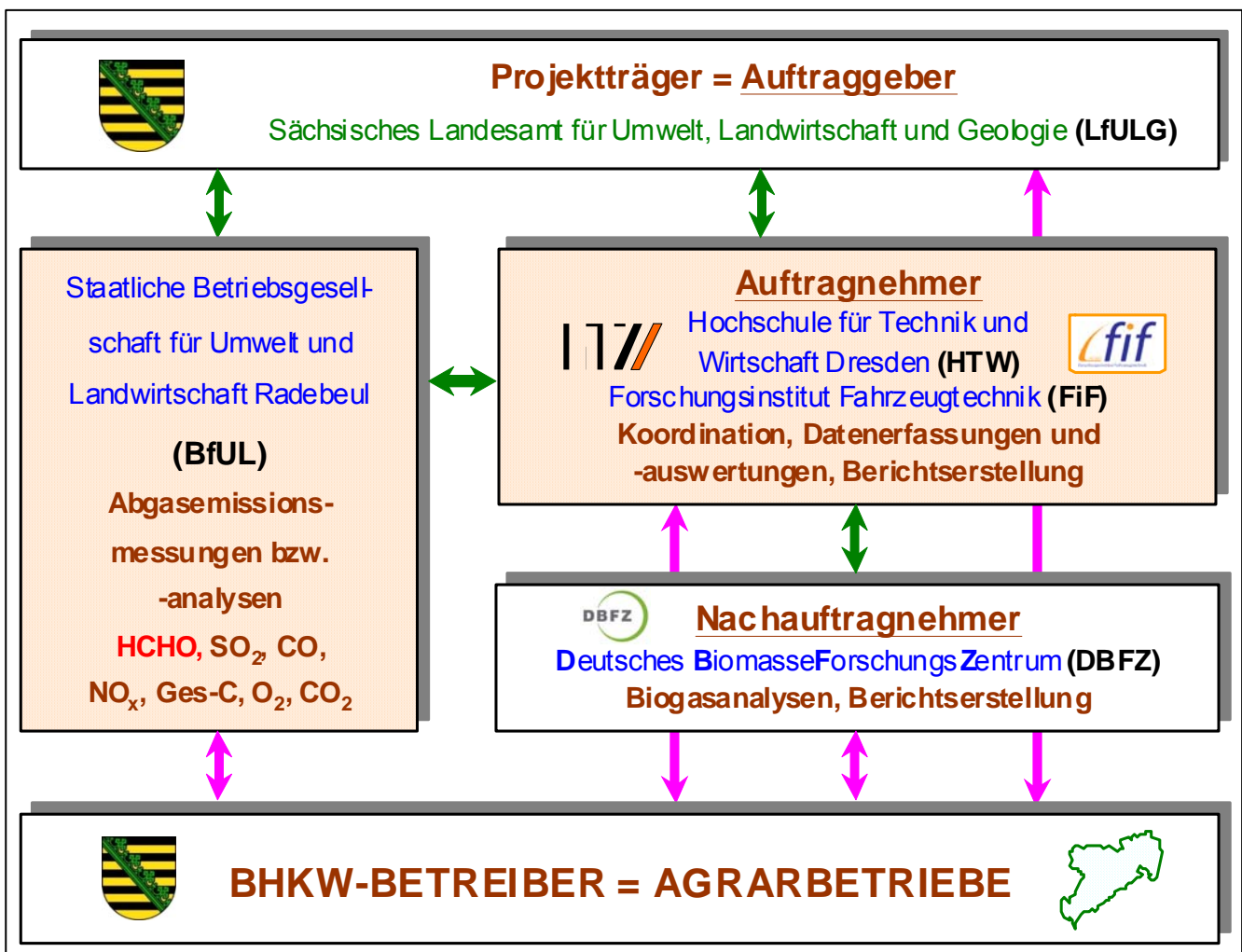


Abbildung 3: Partner des Forschungsvorhabens „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen“

Im Rahmen der Erarbeitung des Messplanes zur Durchführung der Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen hat sich für einige zu untersuchende Biogas-BHKW eine neue Situation ergeben. Es wurde festgestellt, dass bereits einige BHKW-Motoren mit einem Abgasreinigungssystem (Abgaskatalysator) und teilweise auch mit einer zusätzlichen Gasreinigung (Aktivkohlefilter) ausgerüstet sind bzw. demnächst ausgerüstet werden. Diese Entwicklung wird sich durch den Erlass des SMUL „Formaldehydemissionen aus Verbrennungsmotoren beim Einsatz von Biogas“ vom 23.07.2009 weiter verstärken. Da jedoch derzeit noch keine ausreichenden Erkenntnisse zu den zu erwartenden Emissionen aus solchen Anlagen vorliegen, war es aus fachlicher Sicht erforderlich, im Rahmen des Forschungsvorhabens „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen“ zusätzlich Anlagen zu vermessen, welche über entsprechende Abgasreinigungssysteme und u. U. auch über zusätzliche Gasreinigungen verfügen. Aus diesem Grund wurde das Forschungsvorhaben um die „Zusätzliche Ermittlung der Formaldehydemissionen aus BHKW-Motoren, die über Abgasreinigungsanlagen verfügen“ ergänzt. Die dafür auszuführenden Aufgaben bzw. Leistungen wurden ebenfalls durch die Projektpartner wahrgenommen bzw. ausgeführt.

5 Vorgehensweise – Bearbeitungsablauf

5.1 Vorhandene Grundlagen

Eine wesentliche Grundlage der Bearbeitung dieses Forschungsauftrages bildete die „Studie zu Maßnahmen ... BHKW“ /7/. Die aus dieser Studie am häufigsten im Freistaat Sachsen eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen sind in Abbildung 4 ersichtlich.

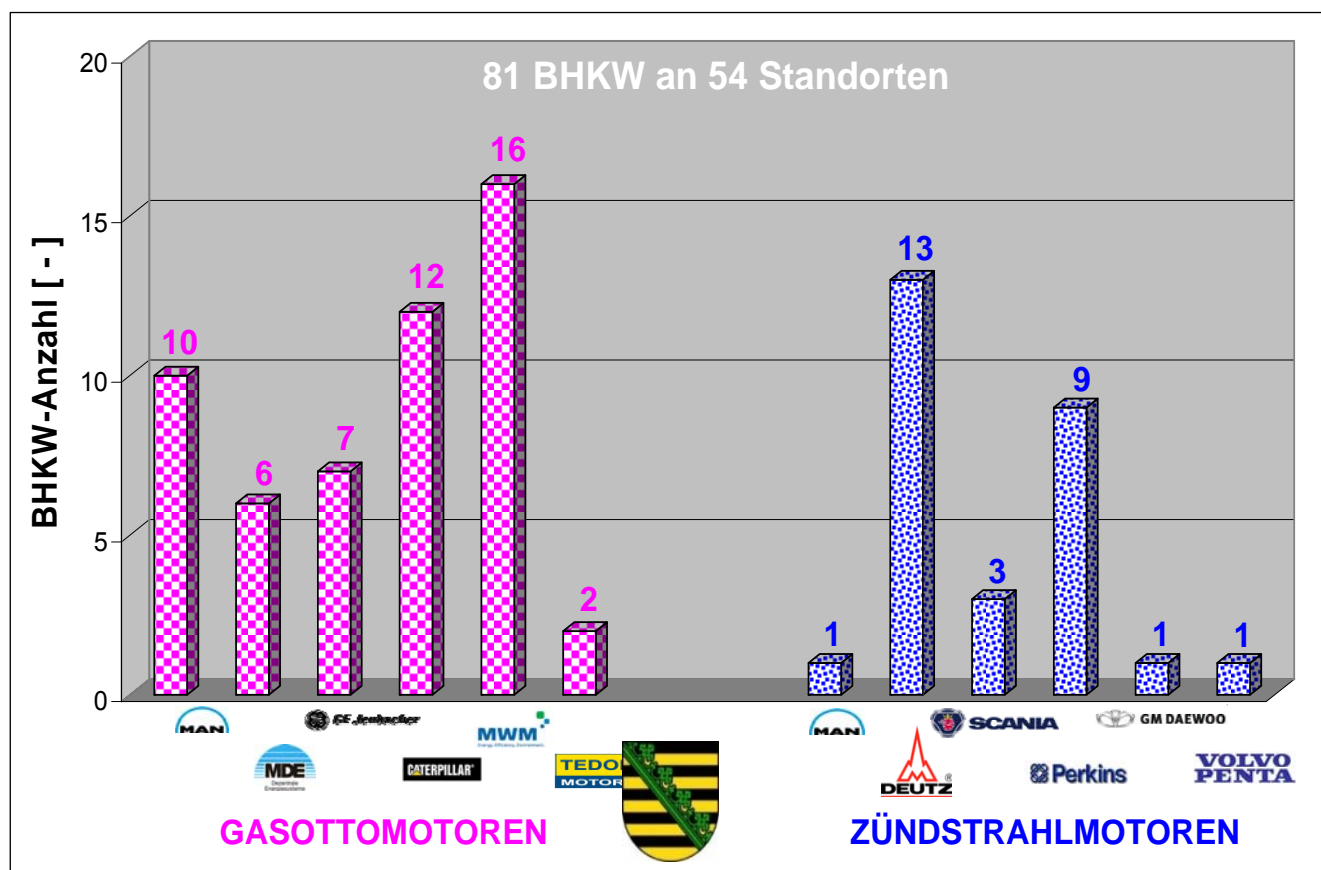


Abbildung 4: Teilergebnis der „Studie zu Maßnahmen ... BHKW“ /7/ → BHKW-Anzahl bzw. -verteilung unter Berücksichtigung der Motorenhersteller

Resultierend aus der Abbildung 4 war eine Auswahl der zu untersuchenden Biogas-BHKW vorzunehmen. Gemäß Aufgabenstellung waren dabei sowohl aus Effizienz- als auch Repräsentativitätsgründen die am häufigsten in Sachsen eingesetzten BHKW-Motorenspezifikationen zu berücksichtigen. Im Ergebnis dieser Festlegung boten sich nach Auswertung der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/ für die **Gasottomotoren** insbesondere die **MAN-**, die **Caterpillar-** sowie die **MWM-Motorspezifikationen** an. Hinsichtlich der **Zündstrahlmotoren** sind am häufigsten **DEUTZ-** bzw. **Perkins-Motorenspezifikationen** im Einsatz (Abbildung 4).

Die Ergebnisse der Studie veranschaulichten weiterhin, dass evtl. auch die jeweiligen Unterspezifikationen mit teilweise verschiedenen Auslegungen (z. B. Zylinderanordnung, -anzahl, Gemischkühlung) von besonderer Bedeutung sein könnten. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes wurde entschieden, die Untersuchungen im Forschungsvorhaben auf drei spezielle Unterspezifikationen von drei verschiedenen Motorherstellern zu konzentrieren. In diesem Zusammenhang wurde auch beachtet, dass die unterschiedlichen Arbeitsprinzipien (**Gasottoverfahren** bzw. **Zündstrahlverfahren**) in die Untersuchungen einbezogen werden.

5.2 Auswahl der BHKW-Motorspezifikationen

Im Weiteren war auf der Grundlage von Abbildung 4 eine Analyse und daraus resultierend eine Auswahl der zu untersuchenden Unterspezifikationen für die Biogas-BHKW vorzunehmen. Dabei lassen sich nachfolgende Teilergebnisse formulieren:

Hinsichtlich der **MAN-Gasottomotorenspezifikationen** wurde insbesondere unter dem Aspekt der in der o. g. Studie analysierten **HCHO-Formaldehydemissionswerte** entschieden, diese nicht zu berücksichtigen. Für die 10 in Sachsen installierten BHKW-Motoren haben sich die Maximalwerte aus 12 Formaldehydemissionsmessungen wie folgt dargestellt.

2 x > 60 mg/m³

4 x < 60 mg/m³, aber > 40 mg/m³

6 x < 40 mg/m³

In die Studie sowie in dieses hier beschriebene Vorhaben wurden auch sechs in Thüringen installierte Biogas-BHKW mit **MAN-Gasottomotorenspezifikationen** einbezogen. Für diese BHKW liegen insgesamt acht Maximalwerte aus den entsprechenden Formaldehydemissionsanalysen vor. Es wurde eine ähnliche Tendenz wie für die in Sachsen betriebenen Biogas-BHKW mit **MAN-Gasottomotorenspezifikationen** analysiert (**2 x < 60 mg/m³, jedoch > 40 mg/m³, 6 x < 40 mg/m³**).

Für die in Sachsen am häufigsten nach dem **Zündstrahlprinzip** arbeitenden Biogas-BHKW war der Studie „Maßnahmen ...“ /7/ zu entnehmen, dass hierfür überwiegend **DEUTZ-** bzw. **Perkins-Motorspezifikationen** eingesetzt werden. Für das Forschungsvorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle ...“ sind unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung (Abbildung 4) jedoch ausschließlich die **DEUTZ-Motorenspezifikation** von besonderem Interesse. Die in der Abbildung 4 ersichtliche Anzahl der **Perkins-Motoren** reduziert sich um drei, da an einem Standort diese **drei Perkins-Motoren** zwischenzeitlich durch ein **SCANIA-Schnell-Zündstrahlaggregat** ersetzt wurden. Demnach könnten im Forschungsvorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle ...“ maximal **sechs Perkins-Motoren** berücksichtigt werden, wobei es sich hierbei um zwei verschiedene Unterspezifikationen handelt (**4 x 1006 TG, 2 x 2006 TAG 2**). Mit maximal vier zu untersuchenden Biogas-BHKW ist keine Ergebnisrepräsentativität zu erwarten.

In der Tabelle 2 werden drei **Caterpillar-Motorspezifikationen** ersichtlich, obwohl sich die Untersuchungen auf eine **Gasottomotorspezifikation** beschränken sollen. In diesem Zusammenhang ist auf eine Besonderheit hinzuweisen. Es existieren zwei Standorte, an denen sowohl je ein **G 3406 TA** als auch ein **G 3412 TA** betrieben werden. An einem anderen Standort wird ein **G 3408 TA** und ein **G 3412 TA** unterhalten. Die anderen BHKW mit der Motorspezifikation **G 3412 TA** befinden sich an verschiedenen Standorten. In diesem Zusammenhang wurde aus Effizienz- und Vergleichsgründen für den Fall, dass an den Standorten mit unterschiedlichen **Caterpillar-Motorspezifikationen** planmäßige Wartungen zum annähernd gleichen Zeitpunkt an jeweils beiden BHKW anstehen, festgelegt, beide BHKW in den Mess- und Analysekampagnen sowie in den Untersuchungen zu berücksichtigen.

Tabelle 2: Häufigkeitsverteilung ausgewählter Gasotto- und Zündstrahlmotoren in Sachsen /7/

GASOTTOMOTORSPEZIFIKATION → Caterpillar Inc. Peoria (Illinois, USA)				
2 x G 3406 TA	1 x G 3408 TA		9 x G 3412 TA	
GASOTTOMOTORSPEZIFIKATION → MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH				
2 x TBG 616 V12	1 x TBG 616 V16K	1 x TCG 2015 V6	11 x TCG 2016 V12	1 x TCG 2016 V16
ZÜNDSTRAHLMOTORSPEZIFIKATION				
3 x BF6M 1013 EC	9 x BF6M 1015 C		1 x BF8M 1015 C	

5.3 Bereitschaftserklärung der Agrarbetriebe

Entsprechend der auf Basis der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/ durchgeführten Auswertung stellen die **GASOTTOMOTORSPEZIFIKATIONEN** „**G 3412 TA**“ und „**TCG 2016 V12**“ sowie die **ZÜNDSTRAHLMOTORSPEZIFIKATION** „**BF6M 1015C**“ die am häufigsten in Sachsen eingesetzten BHKW-Motorspezifikationen dar. Dementsprechend hatten diese drei Motorspezifikationen Priorität bei der Realisierung des Forschungsvorhabens „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle ...“.

Zwecks Vorbereitung dieses Forschungsvorhabens wurden die sächsischen Biogas-BHKW-Betreiber kontaktiert, welche mindestens eine der festgelegten Motorspezifikationen unterhalten. Insgesamt wurden 26 Agrarbetriebe angesprochen, sich an dem Forschungsvorhaben zu beteiligen. Im Ergebnis dessen haben 16 Unternehmen die Bereitschaft zur Teilnahme an der Teilleistung 1 erklärt (Anlagenband, Anlage 1). Hierbei ist ausdrücklich hervorzuheben, dass insbesondere die durch die Agrarbetriebe bereitgestellten Daten, Informationen und Unterlagen die wesentlichste Grundlage zur Bearbeitung dieses Forschungsvorhabens bildeten. Jedoch ist auch zu erwähnen, dass insbesondere aus Zeit-, Kapazitäts- und Kostengründen nicht alle Unternehmen hinsichtlich ihrer Teilnahme berücksichtigt werden konnten.

5.4 Zeitplan

Den realisierten Zeitplan bei der Bearbeitung von Teilleistung 1 im Vorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen - Zusätzliche Ermittlung der Formaldehydemissionen aus BHKW-Motoren, welche über Abgasreinigungsanlagen verfügen“ zeigt Anlage 2. In die Kopfzeile dieses Zeitplanes wurden die Nummerierungen entsprechend der Ausschreibungsunterlagen berücksichtigt. Dabei war von folgenden Arbeitspaketen auszugehen.

1.3	Leistungen des Auftraggebers
1.4.1	Festlegung der zu untersuchenden BHKW-Motoren
1.4.2	Mess- und Untersuchungsparameter
1.4.4	Festlegung der Messdurchführung
1.4.5	Durchführung der festgelegten Messungen, Analysen und Erfassungen
1.4.6	Auswertung der Mess- und Analyseergebnisse sowie Erfassungen und Erarbeitung Sachstandsbericht mit Erstauswertung
1.4.7	Abschlussbericht

6 Methodische Umsetzung

6.1 Messplan

Bei Beauftragung wurden durch den Auftraggeber die ausgewählten BHKW mit Benennung des jeweiligen Agrarbetriebes mitgeteilt sowie die bereits vorhandenen Betreiberdaten übermittelt. Daraus resultierend war im Rahmen des Projektbeginns zunächst der Messplan zu erstellen. Besonderheit hierbei war, dass das beim jeweiligen Biogas-BHKW-Betreiber praktizierte Betriebsregime ohne Einschränkungen aufrecht zu erhalten war. Das bedeutete u. a., alle zu vereinbarenden Termine für die jeweiligen Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen an den zu untersuchenden BHKW unter Berücksichtigung der jeweils planmäßig anstehenden Wartungen zu koordinieren. Die Termine wurden teilweise unkompliziert direkt vereinbart oder zunächst ein Datenblattmuster (Anlage 3) per Fax oder E-Mail übermittelt, um auf der Basis der entsprechend ausgefüllten Angaben weitere Termine fernmündlich zu vereinbaren. Der realisierte Messplan ist in der Anlage 4 ersichtlich. Zwecks Anonymisierung sind hierbei keine Anlagenbetreiber benannt, sondern Datenbanknummern berücksichtigt. Da es sich bei diesem Vorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle ...“ um ein Folgeprojekt der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/ handelt, wurden keine neuen Datenbanknummern vergeben. Um dem Leser jedoch den Bezug zu dieser Studie zu ermöglichen, wurden die Datenbanknummern entsprechend der Registratur in der Studie beibehalten.

Die Datenbanknummern für die **Gasottomotoren** wurden „**ROSA**“ und die der **Zündstrahlmotoren** „**BLAU**“ hervorgehoben. Des Weiteren ist auf folgende Besonderheiten hinzuweisen. Für die BHKW mit den Datenbanknummern „**37**“ und „**42**“ wurden gemäß einer Ergänzung der Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorhaben „Ermittlung ... - Zusätzliche ... Abgasreinigungsanlagen verfügen“ lediglich Messungen nach der Wartung durchgeführt. Die geplanten Messkampagnen am BHKW mit der Motorspezifikation „**BF6M 1015C**“ (Datenbanknummer „**129**“) konnten wegen einem Schaden (defekter Oxidationskatalysator) nicht realisiert werden.

6.2 Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen mit Datenerfassungen

6.2.1 Abgasemissionsmessungen

Bei den Abgasemissionsmessungen wurden u. a. die Abgasbestandteile Stickoxide (NO_x), wobei Stickstoffdioxid (NO_2) und Stickstoffmonoxid (NO) getrennt ausgewiesen sind, Schwefeldioxid (SO_2), Kohlenmonoxid (CO) und Sauerstoff (O_2) vermessen. Außerdem wurden die Emissionen von Formaldehyd (HCHO) analysiert. Des Weiteren wurden die Randparameter Menge, Temperatur und Feuchte des Abgases zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen erfasst. Die jeweiligen Mess- und Analyseergebnisse sind in einer von der Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) bestätigten Mustervorlage zum „Bericht über die Durchführung von Emissionsmessungen“ vor- bzw. dargestellt.

Das Messobjekt Gesamtkohlenstoff wurde kontinuierlich im Rahmen der jeweiligen Messkampagne vor Ort gemessen. Hierfür wurde ein Flammenionisationsdetektor „FID-BA 3006“ der SICK MAIHAK GmbH eingesetzt (Abbildung 5). Die Messungen von Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid, Kohlenmonoxid und Sauerstoff erfolgten ebenfalls vor Ort. Dafür wurde ein Multikomponenten Gasanalysator „NGA 2000 MLT“ der SIEMENS AG verwendet. Zur jeweiligen Probenahme dienten die in Edelstahlausführung vorhandenen Abgaskamine (z. B. Abbildung 5).



Abbildung 5: Flammenionisationsdetektor „FID-BA 3006“ der SICK MAIHACK GmbH /8/ (oben links), Abgaskamin mit eingebrachter Abgasmesssonde (unten links), im Messwagen installierte Messtechnik (rechts)

Im Bereich der Analyse von Formaldehyd in Motorabgasen aus Biogas-BHKW werden zurzeit hauptsächlich diskontinuierliche Messverfahren auf nasschemischer Basis angewandt. Hierbei gilt die VDI-Richtlinie 3862. Momentan beinhaltet diese sieben Blätter. In Tabelle 3 sind die dementsprechend zur Anwendung gelangenden Messverfahren zur Formaldehydanalyse aufgeführt.

Tabelle 3: Diskontinuierliche nasschemische Messverfahren zur Formaldehydanalyse /3/

VDI-Richtlinie 3862 ...	Bezeichnung
... Blatt 1	Messen gasförmiger Emissionen – Messen aliphatischer Aldehyde (C1 bis C3) nach dem MBHT-Verfahren
... Blatt 2	Messen gasförmiger Emissionen – Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren - Gaswaschflaschen
... Blatt 3	Messen gasförmiger Emissionen – Messen aliphatischer und aromatischer Aldehyde und Ketone nach dem DNPH-Verfahren - Kartuschenmethode
... Blatt 4	Messen gasf. Emissionen – Messen von Formaldehyd nach dem AHMT-Verfahren
... Blatt 7	Messen gasförmiger Emissionen – Messen aliphatischer u. aromatischer Aldehyde u. Ketone nach dem DNPH-Verfahren – Gaswaschflaschen/Tetrachlorkohlenstoff-Methode

Allen Verfahren ist gemein, dass der in einer volumetrisch bestimmten Abgasmenge vorhandene Formaldehyd vor Ort in definierten Reagenzien gelöst oder chemisch gebunden wird. Diese Proben werden im Nachgang im Labor untersucht und der Aldehyd-Gehalt bestimmt. Wegen der chemischen Nachweisreaktion ist eine Automatisierung schlecht möglich. Aufgrund des hohen personellen und zeitlichen Aufwandes sind nur stichprobenartige Messungen realisierbar. Nach Auswertung der bereits erwähnten Studie /7/ ist einzuschätzen, dass im Freistaat Sachsen überwiegend das AHMT-Verfahren verwendet wird. Zumindest was diese Studie betrifft, gelangt das DNPH-Verfahren selten und das MBTH-Verfahren gar nicht zur Anwendung. Eine unmittelbare Aussage vor Ort über das Niveau der Emission ist nicht möglich, d. h. eine schnelle Reaktion auf erhöhte Emissionen, z. B. durch Änderung der Einstellgrößen (z. B. **Zündzeitpunkt** oder **Förderbeginn**) an den mit Biogas betriebenen **Gasotto-** bzw. **Zündstrahl**motoren, kann nicht erfolgen. Mit quasikontinuierlich bzw. kontinuierlich arbeitenden Messverfahren können die Messwerte zeitnah und direkt an der Anlage ermittelt werden. Hierbei gelangen Gaschromatographen oder FTIR-Analysatoren (**F**ourier **T**ransform **I**nfra**R**ot) zur Anwendung. Hohe Abgastemperaturen (z. B. bis 180 °C) und aggressive Medien stellen bei dieser Messmethode kein Problem dar. Jedoch sind die Anschaffungskosten für diese Messsysteme sehr hoch und der Betrieb vor Ort ist aus verschiedenen Gründen mit Problemen verbunden. Beispielhaft sind ungeeignete räumliche Voraussetzungen, evtl. zusätzlich benötigtes Fachpersonal für die Messwertauswertung und die Messgerätewartung sowie teilweise notwendige Arbeits- und Prüfgase zu nennen.

Für die Motorenentwicklung an Prüfständen sowie zur Überprüfung von gesetzlich geltenden Emissionswerten (z. B. Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft → TA Luft) sind diese Verfahren jedoch sehr gut geeignet. So wurden beispielsweise nach /3/ durch die Umweltanalytik RUK GmbH Longuich mehrfach zeitgleiche Formaldehydvergleichsmessungen zwischen einem FTIR-Analysator (z. B. Anlage 5) und den nach dem AHMT-Verfahren (VDI-Richtlinie 3862 Blatt 4) analysierten Probenahmen realisiert. Diese Untersuchungen bezogen sich zunächst auf drei BHKW-Standorte sowie einen Motorenprüfstand und einer Prüfgasstrecke auf Permeationsbasis. Dabei war eine gute Übereinstimmung der mit diesen beiden Methoden ermittelten Formaldehydkonzentrationswerte wahrzunehmen /3/.

Um jedoch eine statistisch sichere und daraus resultierende repräsentative Aussage hinsichtlich der praktikablen Machbarkeit dieser Messmethodik an Biogas-BHKW (z. B. zur Online-Überwachung) treffen zu können, sind weitere Vergleichsmessungen und die Ermittlung der Messunsicherheit des FTIR-Analysators unerlässlich. In diesem Zusammenhang könnten beispielsweise ein Folgeprojekt oder die Fortsetzung dieses Forschungsvorhabens „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle ...“ im Rahmen der ggf. zu realisierenden Teilleistung 2 einen Beitrag zum Vergleich von „online“ nach dem FTIR-Verfahren gemessenen und den nasschemisch nach dem AHMT-Verfahren analysierten Formaldehydemissionen leisten.

6.2.2 Biogasanalysen

Die Messung, Steuerung und Regelung von Biogaserzeugungsprozessparametern sowie der Energieerzeugung sind für den zuverlässigen und störungsfreien Betrieb der Biogasanlage unerlässlich. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auch die laufende Erfassung der Biogaszusammensetzung von besonderer Bedeutung, um beispielsweise im Falle von unzureichenden Biogasqualitäten, welche zu Störungen führen können, eine automatische Abschaltung des BHKW zu ermöglichen. Diese Aufgaben der komplexen Prozessüberwachung sowie die Messung der Biogaszusammensetzung werden durch spezielle Sensoren und Analysegeräte wahrgenommen. In der Regel werden im Rahmen des laufenden Betriebes zumeist mindestens die Methan-, Kohlendioxid-, Sauerstoff- und Schwefelwasserstoffgehalte erfasst. Hierfür gelangen entweder mobile Handmessgeräte oder stationäre Analysegeräte zur Anwendung (Abbildung 6).



Abbildung 6: Beispiele stationärer Gasanalysegeräte in Pöhsig ([links](#)) und in Kotten ([rechts](#))

Die Überlegungen zu den Ursachen von unvollständig ablaufenden Verbrennungsprozessen und infolge dessen möglicherweise erhöhter Formaldehydbildungen gingen u. a. davon aus, dass auch der Biogaszusammensetzung eine besondere Bedeutung beizumessen ist. Aufgrund dieser These waren zeitgleich zu den Abgasemissionsmessungen die Biogaszusammensetzung, -menge und -feuchte sowie die Umgebungstemperatur zu analysieren bzw. zu messen. Diese Biogasanalysen wurden durch das DBFZ realisiert. Die jeweiligen Messungen der Biogaszusammensetzung wurden halbstündlich parallel zu den jeweiligen Abgasemissionsmessungen vorgenommen.

Hierbei wurden mittels eines Biogasmonitors „ANSYCO GA 2000“ (Abbildung 7) die Methan- (CH₄), Kohlendioxid- und Sauerstoffanteile analysiert. Zwecks Prüfung bzw. Vergleich wurden im unmittelbaren Anschluss an die jeweilige mobile Gasmessung Gasproben entnommen, welche mittels stationären AWITE-Messgerät am DBFZ-Standort analysiert wurden. Hinsichtlich der Biogasentnahme wurde überwiegend ein bereits am Gaseintritt zum Verdichter befindlicher Messstutzen genutzt (Abbildung 7). Die Biogasfeuchte wurde gravimetrisch unter Anwendung der EN 14790 ermittelt.

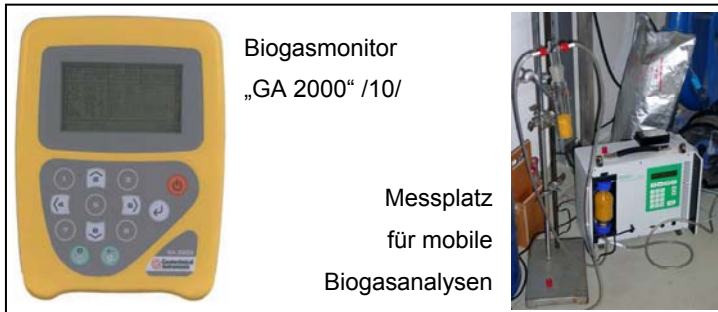


Abbildung 7: Biogasmonitor „GA 2000“ der ASYNCO Analytische Systeme und Componenten GmbH Karlsruhe (links) und Messplatzaufbau mit Probenentnahmebeutel (rechts)

Nachfolgend werden einige wesentliche Parameter der für die Analyse und Feuchtemessung des Biogases angewandten Messtechnik genannt.

Mobile Gasmessung

- Gerät: mobiler Biogasmonitor
- Hersteller: ASYNCO Analytische Systeme u. Componenten GmbH
- Typ: GA 2000
- Messbereich: H₂S (0...5.000) ppm ± 3 %

Tabelle 4: Toleranzbereich mobiler Biogasmonitor „GA 2000“

Messkomponente	CH ₄	CO ₂	O ₂
	[Vol.%]		
Messbereich [Vol.%]	0 – 100 Infrarot	0 – 100 Infrarot	0 – 25 elektrochemisch
0 – 5	± 0,5	± 0,5	± 1,0
5 – 15	± 1,0	± 1,0	± 1,0
> 15	± 3,0	± 3,0	± 1,0

- integrierter Luftdrucksensor in der Gasmesstechnik
- Messbereich: (700...1.200) mbar ±5 mbar
- letzte Überprüfung/Kalibrierung: 06.11.2008
- Baujahr: 2008

Stationäre Gasmessung

- Gerät: stationärer Biogasmonitor
- Hersteller: AWITE Bioenergie GmbH Langenbach
- Typ: Gasanalyse System 100_4

Tabelle 5: Toleranzbereich stationärer AWITE-Biogasmonitor

Messkomponente	CH ₄ infrarot	CO ₂ infrarot	O ₂ el.-chem.	O ₂ paramagnetisch	H ₂ S low el.-chem.	H ₂ S high el.-chem.	H ₂ el.-chem.
Messbereich	0...100 Vol.%	0...100 Vol.%	0...25 Vol.%	0...25 Vol.%	0...500 ppm	0...5.000 ppm	0...50.000 ppm
Toleranzbereich	± 2,0 Vol.%	± 2,0 Vol.%	± 2,0 Vol.%	± 1,0 Vol.%	± 3,0 ppm	± 3,0 ppm	± 3,0 ppm

- integrierter Luftdrucksensor in der Gasmesstechnik
- Messbereich: (950...1.050) mbar ±5 mbar
- letzte Überprüfung/Kalibrierung: 07.05.2009
- letzte Überprüfung/Kalibrierung H₂S-Sensor: 27.08.2009
- Baujahr: 2004

Gravimetrische Gasfeuchtebestimmung

- Gerät: Laborwaage
- Hersteller: Sartorius AG Göttingen
- Typ: MA AF 200
- Messbereich: (5...4.840) g

Tabelle 6: Toleranzbereich Laborwaage

Messbereich	0...0,8 kg	0,8...1,6 kg	1,6...3 kg	3...4,84 kg
Toleranzbereich	0,01 g	0,02 g	0,05 g	0,1 g

- letzte Überprüfung/Kalibrierung: 07.09.2009
- Baujahr: 1986
- Gerät: Gasprobenehmer
- Hersteller: DESAGA GmbH Heidelberg
- Typ: GS 312
- Förderbereich: (0,2...12) NI/min

Tabelle 7: Toleranzbereich Gasprobenehmer „GS 312“

Vorgabe am Gerät	12 l/min	6 l/min	2 l/min
Volumen Gerät	50 l	50 l	50 l
Toleranzbereich	+ 0,4%	-0,6%	-0,8%

- letzte Überprüfung/Kalibrierung: 10.09.2009
- Baujahr: 2009

Temperaturmessung

- Gerät: Thermometer
- Hersteller: Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH Holzkirchen
- Typ: System Almemo/Thermo ZA 9020-FS
- Messbereich: (-40...1.200) °C

Tabelle 8: Toleranzbereich Thermometer

Messbereich	(-20...0)°C	(0...70)°C	(70...125)°C
Toleranzbereich	± 0,4°C	± 0,1°C	± 0,6°C

- letzte Überprüfung/Kalibrierung: werkseitig kalibriert, keine weitere Kalibrierung notwendig
- Baujahr: 2002

Während der Messkampagnen wurden die Parameter im 30-Minuten-Intervall gemessen. Je Biogas-BHKW erfolgten somit vier mobile Gasmessungen, zwei Gasfeuchtemessungen, die Messung der Gastemperatur und die Entnahme von vier Gasproben. Weiterhin wurden Luftdruck und Lufttemperatur am Messtag erfasst.

6.2.3 Datenerfassungen

Bei den jeweiligen Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen war ein Mitarbeiter des Auftragnehmers anwesend. Der Mitarbeiter erfasste zeitgleich zu den Emissionsmessungen bzw. Formaldehydprobenahmen und Biogasanalysen relevante Motorbetriebsparameter (Abbildung 8, Anlagen 6a bis 6c) sowie Daten hinsichtlich der Inspektions- bzw. Wartungstätigkeiten (Anlagen 7a bis 7c) und den Verschleißteile- sowie Betriebsstoffwechseln (Anlagen 8a und 8b). Hinsichtlich der BHKW konzentrierten sich diese Erfassungen hauptsächlich auf die Historie seit Inbetriebnahme des jeweiligen BHKW. In diesem Zusammenhang wurden, sofern vom Betreiber freigegeben, alle entsprechenden Wartungsanleitungen und -bücher, die Inspektions- und Wartungsprotokolle sowie die Betriebsstoff- und Materialnachweise eingesehen und auszugsweise gescannt oder kopiert.

Entsprechend o. g. Verfahrensweise war die Möglichkeit gegeben, auch die bereits zur Erarbeitung der „Studie zu Maßnahmen BHKW“ /7/ für die jeweils zu berücksichtigenden BHKW vorliegenden Emissionsmessdaten bzw. Analysewerte in die Untersuchungen zu diesem Forschungsauftrag einzubeziehen.

Es ist rückwirkend nachvollziehbar, welchen annähernden Inspektions- bzw. Wartungszustand die jeweiligen BHKW zum Zeitpunkt der Emissionsmesskampagnen, die in der „Studie ... BHKW“ /7/ ausgewertet wurden, aufwiesen. Damit sind eine effiziente Einbeziehung bereits vorhandener Emissionsmess- bzw. Analysewerte und daraus resultierend repräsentativere Forschungsergebnisse darstellbar.


GASOTTOMOTOR	GASOTTOMOTOR	ZÜNDSTRAHLMOTOR
„G 3412 TA“ /11/	„TCG 2016 V12“ /12/	„BF6M 1015C“ /13/
		
z. B.	z. B.	z. B.
Istleistung	Istleistung	Istleistung
Zylindertemperaturen	Zylindertemperaturen	Zylinderraumtemperaturen
Schmieröldruck	Drosselklappenstellung	Zündölverbrauch
Schmieröltemperatur	Kurbelraumdruck	Kühlwassertemperatur
Gastemperatur	Schmieröltemperatur	Motortemperatur
Kühlwassertemperatur	Gemischkühlertemperatur	Gastemperatur
Motortemperatur	Kühlwassertemperatur	Ladelufttemperatur
Ladedruck	Ansauglufttemperatur	
Ladelufttemperatur	Methananteil	

Abbildung 8: Auswahl von parallel zu den Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen erfassten Motorbetriebsparametern

7 Ergebnisse

7.1 Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen

Gemäß Tabelle 2 hätten im Forschungsvorhaben **neun BHKW** mit der **Caterpillar-Gasottemotorspezifikation „G 3412 TA“** und **11 BHKW** mit der **MWM-Gasottemotorspezifikation „TCG 2016 V12“** berücksichtigt werden können. Hinsichtlich der **Zündstrahlmotorspezifikation** wäre die Einbeziehung von gleichfalls **neun BHKW** mit dem Motortyp **„BF6M 1015C“** in das Forschungsvorhaben möglich gewesen. Die entsprechenden Bereitschaftserklärungen der BHKW-Betreiber lagen vor.

Wie bereits im Abschnitt 5.3 erwähnt, war aus Zeit-, Kapazitäts- und Kostengründen eine Mindestanzahl der zu untersuchenden BHKW festzulegen. Im Ergebnis dessen wurde insbesondere aus Repräsentativitätsgründen entschieden, mindestens je fünf BHKW von jeder der drei am häufigsten zum Einsatz gelangenden BHKW-Motorspezifikationen **„G 3412 TA“**, **„TCG 2016 V12“** bzw. **„BF6M 1015 C“** zu vermessen sowie deren Messwerte auszuwerten und zu analysieren. Dies bedeutete, dass nicht alle Unternehmen, welche ihre Bereitschaft zur Teilnahme am Forschungsvorhaben erklärt haben, berücksichtigt werden konnten.

Für die **Caterpillar-Gasottemotorspezifikation „G 3412 TA“** wurde bei der Auswahl insbesondere aus Effizienzgründen die Besonderheit beachtet, unbedingt die Anlagen einzubeziehen, an denen auch die beiden anderen **Caterpillar-Gasottemotorspezifikation „G 3406 TA“** bzw. **„G 3408 TA“** eingesetzt werden. Grundvoraussetzung hierfür war, dass die jeweils planmäßigen Wartungen am gleichen oder einem nachfolgenden Tag erfolgen (vgl. Anlage 4).

Beim Betrachten des Messplanes (Anlage 4) fällt auf, dass entgegen der vorgenommenen Erläuterung die **Caterpillar-Spezifikation „G 3412 TA“** und die **MWM-Spezifikation „TCG 2016 V12“** nicht fünfmal, sondern je sechsmal berücksichtigt wurden. Hintergrund ist eine Ergänzung der Leistungsbeschreibung. Demnach waren auch je eine Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagne an zwei BHKW einer Biogasanlage zu berücksichtigen, die über je einen Oxidationskatalysator sowie eine biologische Entschwefelung verfügen. Hierbei handelt es sich um die BHKW mit den Datenbanknummern **„37“** und **„42“**. Diese Kampagnen wurden unmittelbar nach den an beiden BHKW planmäßig ausgeführten Wartungen realisiert (Anlage 4). Außerdem war entsprechend der Ergänzung zur Leistungsbeschreibung ein Biogas-BHKW, welches mit einer zusätzlichen Entschwefelung mittels Aktivkohlefiltereinheit und einem Oxidationskatalysator ausgerüstet ist, in das Forschungsvorhaben einzubeziehen (Datenbanknummer **„54“** → Anlage 4).

Gemäß Absprache mit dem Auftraggeber wurde das BHKW mit der Datenbanknummer **„52“** zusätzlich vermessen. Dieses BHKW hat die **MWM-Gasottemotorenspezifikation „TCG 2015 V6“**. Die Einbeziehung dieses BHKW erfolgte insbesondere unter dem Aspekt von Vergleichszwecken mit der vom gleichen Motorhersteller (MWM GmbH) im Produktprogramm befindlichen sowie der in diesem Forschungsvorhaben zu berücksichtigenden **Gasottemotorspezifikation „TCG 2016 V12“**.

Hinsichtlich der **Zündstrahlmotorspezifikation „BF6M 1015C“** haben sich die Untersuchungen gegenüber der ursprünglichen Planung, nämlich zur Berücksichtigung von fünf BHKW, auf vier BHKW beschränkt. Ein BHKW mit dieser Motorspezifikation (Datenbanknummer „129“) konnte nicht vermessen werden, da es wegen eines defekten Oxidationskatalysators an den geplanten Messtagen vor und nach der planmäßigen Wartung außer Betrieb war.

Insgesamt wurden 18 BHKW vor einer planmäßigen Wartung und 20 BHKW nach der jeweils ausgeführten Wartung vermessen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Aufstellung Mess-/Analysekampagnen nach Motorspezifikation bzw. Anzahl

BHKW-Motorspezifikation	BHKW-Anzahl vor Wartung	BHKW-Anzahl nach Wartung
Caterpillar → G 3406 TA	1	2
Caterpillar → G 3408 TA	1	1
Caterpillar → G 3412 TA	5	6
MWM → TCG 2015 V6	1	1
MWM → TCG 2016 V12	6	6
DEUTZ → BF6M 1015C	4	4
SUMME KAMPAGNEN	18	20

7.2 Ist-Zustand ermittelter Stickoxid-, Kohlenmonoxid- und Formaldehydemissionen

Zunächst sollen einige allgemeine Ausführungen zum besseren Verständnis der in den folgenden Abschnitten vorgestellten Auswertungen und den damit verbundenen Abbildungen beitragen.

- Die Abgasemissionswerte werden entweder den durch die BfUL (z. B. Anlage 9) und/oder den durch die jeweiligen Biogas-BHKW-Betreiber bereitgestellten Abgasemissionsmessberichten entnommen.
- In den nachfolgenden Abbildungen wurden ausschließlich die für das jeweilige BHKW (Datenbanknummern) gemessenen Maximalwerte für **CO**, **NO_x**, **Formaldehyd** und ggf. **NO₂** mit Bezug auf 5 % Sauerstoff zugrunde gelegt. Hierbei wurde bewusst die Darstellung dieser Emissionsbestandteile gewählt, da diese den Schwerpunkt für die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens bilden.
- Für alle Anlagenstandorte sind den jeweiligen Abgasemissionsmessberichten auch Messwerte für **SO₂**, **NMHC**, **Ges-C** und **Staub** zu entnehmen. Diese werden jedoch nicht näher betrachtet. Im Rahmen der Auswertungen zur Abschlussberichtserstellung war zu analysieren, dass keine wesentlichen Zusammenhänge bzw. Einflussmöglichkeiten auf die Formaldehydemissionen bestehen.
- In den Abbildungen wird keine Unterscheidung in Voll- bzw. Teillastbetrieb vorgenommen.
- Die Anordnungsreihenfolge der Emissionswerte für die vermessenen BHKW erfolgt aufsteigend nach Datenbanknummern der jeweiligen BHKW. Die Mess- bzw. Analysetermine werden nicht berücksichtigt. Teilweise erfolgen Darstellungen jeweils für die BHKW ohne bzw. für die BHKW mit nachgerüsteter Abgasminderungstechnologie (z. B. Oxidationskatalysator).

- Für einige Anlagen war aus den durch den jeweiligen Betreiber zur Verfügung gestellten Emissionsmessberichten bzw. -auszügen nicht zu entnehmen, ob das AHMT- oder DNPH-Verfahren zur Analyse der Formaldehydemissionen angewandt wurde. In Auswertung aller vorliegenden Emissionsmessberichte war jedoch zu analysieren, dass die Messungen überwiegend nach dem AHMT-Verfahren erfolgten. Aus diesem Grund wurde für die Standorte, wo nicht auf das verwendete Verfahren hingewiesen wurde, unterstellt, dass die Analyse nach dem AHMT-Verfahren erfolgte.
- Formaldehydemissionswerte wurden überwiegend für die BHKW angegeben, wo Überschreitungen des TA-Luft-Grenzwertes vorhanden sind oder wo die Überschaubarkeit der Abbildungen dies zuließ.
- Um in den jeweiligen Abbildungen auch einen schnellen Überblick hinsichtlich der je nach Hersteller eingesetzten **Motorspezifikationen** zu bekommen, wurden diese mit der Schriftfarbe „GRÜN“ hervorgehoben.
- Sofern an den zu untersuchenden Biogas-BHKW Abgasnachbehandlungstechniken eingesetzt werden, erfolgt der entsprechende Hinweis in den Abbildungen (**GRÜN**).

7.2.1 Caterpillar-Motorspezifikationen



An den BHKW mit **Caterpillar-Motorspezifikationen** wurden sieben Messkampagnen vor und neun Messkampagnen nach der jeweiligen Wartung realisiert. Im Ergebnis dessen liegen sechs Emissionsmessberichte für diese jeweils vor und nach der Wartung im Rahmen dieses Vorhabens vermessenen Biogas-BHKW vor. Die Tabelle 10 zeigt einige technische Angaben zu diesen vermessenen BHKW.

Tabelle 10: Technische Angaben der vermessenen Caterpillar-Motorspezifikationen /11, 14/

Datenbanknummer	37 und 38	139	40, 42, 43, 45, 47 und 48
Motortypbezeichnung	G 3406 TA	G 3408 TA	G 3412 TA
Arbeitsprinzip	GASOTTO		
Motorkonzept	Magermotor		
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung		
Gemischkühlung	1-stufig		
Zylinderanzahl	6	8	12
Zylinderanordnung	Reihe	V-Form	
Hubvolumen	14,6 l	17,9 l	26,9 l
Nenn Drehzahl	1.500 min ⁻¹		
elektrische Leistung ^{(1), (2)}	180 kW	230 kW	370 kW
Kühlwasserwärme ^{(1), (2), (3)}	158 kW	195 kW	262 kW

Abgaswärme bis 180 °C ^{(1), (2), (3)}	81 kW	72 kW	119 kW
Nutzwärme gesamt ^{(1), (2), (3)}	239 kW	267 kW	381 kW
Brennstoffeinsatz (+/- 5 %) ^{(1), (2)}	510 kW	633 kW	971 kW
elektrischer Wirkungsgrad ^{(1), (2)}	35,3%	36,3%	38,1%
thermischer Wirkungsgrad ^{(1), (2)}	46,9%	42,2%	39,2%
Gesamtwirkungsgrad ^{(1), (2)}	82,2%	78,5%	77,3%

⁽¹⁾ für Biogas mit 60 % CH₄, 35 % CO₂, Rest N₂, Mindestmethanzahl 80 und Mindestheizwert H_u = 5,0 kWh/Nm³

⁽²⁾ bei 100 % Last

⁽³⁾ +/- 8 %

In der Abbildung 9 sind die Maximalwerte hinsichtlich der für die BHKW mit den Datenbanknummern „37“, „38“ und „139“ gemessenen CO- bzw. ermittelten NO_x- und HCHO-Emissionen dargestellt.

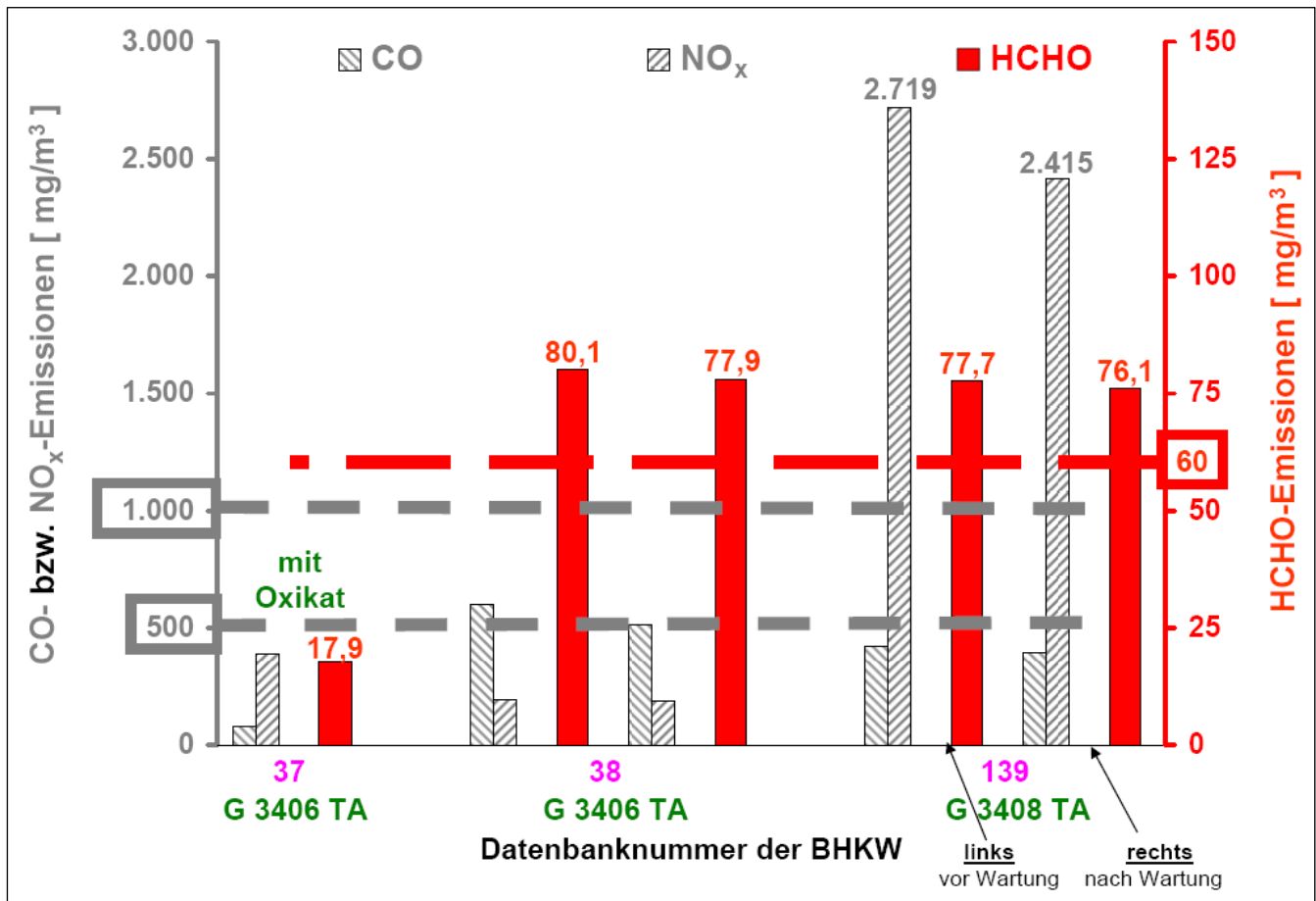


Abbildung 9: Abgasemissionen Caterpillar-Gasotomotoren (6 bzw. 8 Zylinder, 3 Standorte)



Abbildung 10: Washcoat im Träger eines AIR-SONIC-Kat. /15/

Bei dem BHKW mit der Datenbanknummer „37“ handelt es sich um ein BHKW, welches zusätzlich zu vermessen war, wobei lediglich Mess- bzw. Analysekampagnen nach der Wartung ausgeführt wurden. Dieses BHKW („37“) ist seit ca. Mitte Mai 2009 mit einem Oxidationskatalysator (z. B. Abbildung 10) ausgerüstet. Es ist einzuschätzen, dass die sehr niedrigen **CO-** (78 mg/m^3) und **HCHO**-Maximalemissionen insbesondere durch den Einsatz dieser Abgasnachbehandlungstechnik erreicht wurden. Die Aufgabe dieses Katalysators besteht darin, **CO** zu **CO₂** sowie **HC** bzw. **HCHO** zu **CO₂** und **H₂O** umzuwandeln. Die maximalen **NO_x**-Emissionen dieses BHKW betragen 387 mg/m^3 . Damit wird der gemäß TA Luft geforderte Grenzwert (500 mg/m^3) eingehalten. Für die BHKW mit den Datenbanknummern „38“ und „139“ wird ersichtlich, dass die sowohl vor als auch nach der Wartung analysierten maximalen **HCHO**-Emissionswerte auf annähernd gleichem Niveau liegen. Für diese beiden BHKW sind nach der Wartung Verbesserungen der Emissionswerte für **CO** und **NO_x** wahrzunehmen. Grundsätzlich kritisch ist jedoch zu bewerten, dass das BHKW mit der Datenbanknummer „139“ vor und nach der Wartung auch den TA Luft-Grenzwert für **NO_x** um ca. 440 % bzw. ca. 380 % überschreitet.

Der **Caterpillar-Gasottomotor „G 3412 TA“** wurde als eine der am häufigsten in Sachsen eingesetzten BHKW-Spezifikationen ermittelt. Für diese Spezifikation wurden 11 Mess- bzw. Analysekampagnen realisiert. Es handelt sich um die BHKW mit den Datenbanknummern „40“, „42“, „43“, „45“, „47“ und „48“. Fünfmal erfolgten die Kampagnen vor und sechsmal nach der Wartung (vgl. Tabelle 9). Daraus resultierend liegen sechs Emissionsmessberichte für sechs BHKW, die sich an sechs verschiedenen Standorten befinden, vor. Jeweils drei dieser BHKW sind ohne bzw. mit Oxidationskatalysator (z. B. Abbildung 11) ausgestattet. Aufgrund der unterschiedlichen Auslegungen mit bzw. ohne Katalysator sind die BHKW nicht direkt miteinander vergleichbar. Deshalb wird der Ist-Zustand für die **CO-**, **NO_x**- und **HCHO**-Emissionen getrennt in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellt.

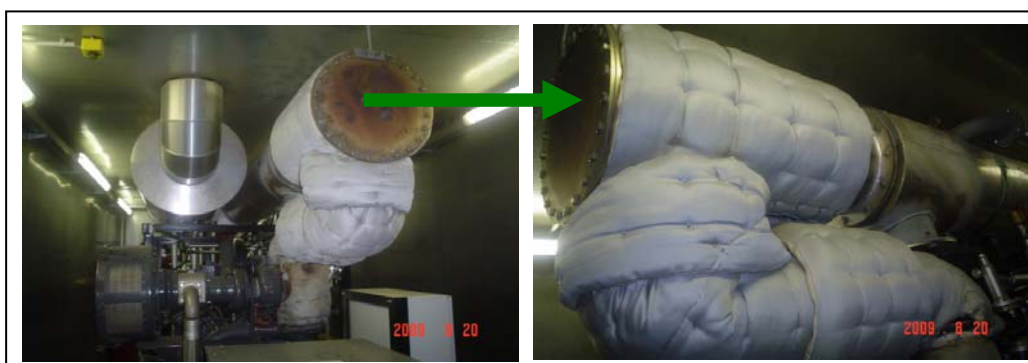


Abbildung 11: BHKW mit Oxidationskatalysator (Datenbanknummer „47“)

Für die drei „G 3412 TA“ ohne Katalysator sind keine wesentlichen Verbesserungen des Emissionsverhaltens nach der Wartung wahrzunehmen (Abbildung 12). Einzige Ausnahme stellen die NO_x -Emissionen für das BHKW mit der Datenbanknummer „45“ dar. Die Verbesserung liegt bei ca. 32 %.

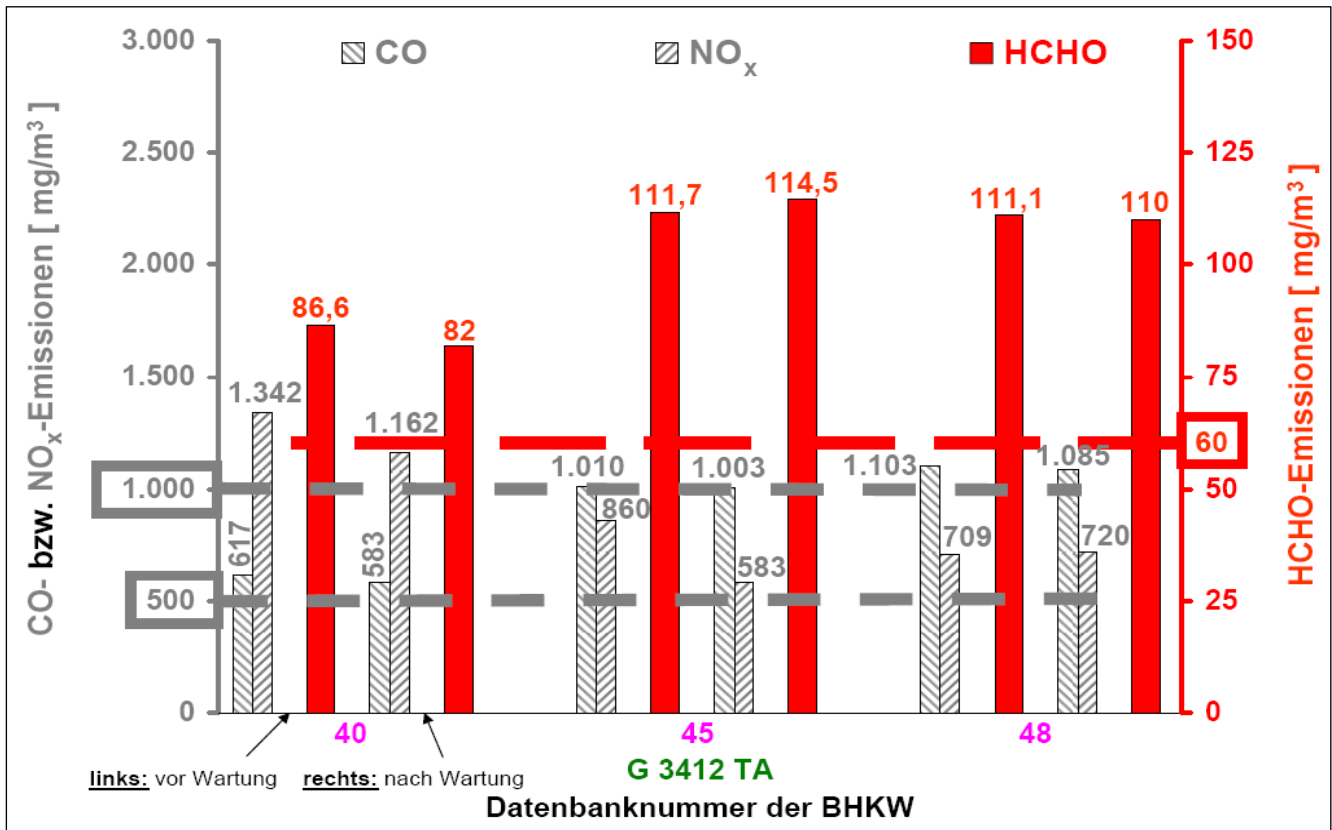


Abbildung 12: Abgasemissionen Caterpillar-Gasotomotoren (12 Zylinder, V-Anordnung, ohne Katalysator)

In Abbildung 12 ist auffallend, dass die **HCHO-Maximalwerte** für die BHKW „45“ und „48“ im Bereich zwischen (110 ... 114,5) mg/m^3 gemessen wurden. Demgegenüber stellen sich die maximalen **HCHO-Emissionen** für das BHKW „40“ günstiger dar. Für das BHKW „40“ beträgt die maximale **HCHO-Emission** vor der Wartung **ca. 87 mg/m^3** . Nach der Wartung wurden für dieses BHKW maximal **82 mg/m^3** ermittelt. Die gegenüber den BHKW „45“ und „48“ etwas günstigeren **HCHO-Maximalwerte** könnten in motorspezifischen Unterschieden begründet sein. Beim Studium der jeweils vorhandenen Unterlagen zu diesen BHKW („40“, „45“ und „48“) wurde analysiert, dass das BHKW „40“ mit einer λ -Sonde ausgerüstet ist. Mittels dieser Sonde wird das Verbrennungsluftverhältnis entsprechend des Betriebszustandes über den jeweils gemessenen Sauerstoffgehalt im Abgas geregelt. Demgegenüber verfügen die anderen beiden BHKW über keine λ -Sonde. In Auswertung der zu diesen beiden BHKW vorliegenden Informationen ist einzuschätzen, dass das Verbrennungsluftverhältnis über die laufend gemessenen Zylindertemperaturen geregelt wird (siehe auch Anlage 6a). Weitere Auswertungen hierzu enthält der Abschnitt 7.4.2. Auffallend ist auch, dass, ausgenommen die **CO-Emissionen** für BHKW „40“, Überschreitungen der TA Luft-Grenzwerte gemessen bzw. ermittelt wurden.

Die Abbildung 13 zeigt die für die BHKW mit den Datenbanknummern „42“, „43“ und „47“ ermittelten Emissionsmaximalwerte für CO, NO_x und HCHO. Diese BHKW sind mit Katalysator ausgerüstet. Über die jeweiligen Spezifikationen dieser Katalysatoren (z. B. Hersteller, Beschichtung) sind zurzeit keine Angaben verfügbar. Nach Auswertung der Emissionswerte dieser BHKW ist einzuschätzen, dass die Katalysatoren ordnungsgemäß arbeiten. Sowohl die CO- als auch die HCHO-Werte stellen sich sehr niedrig dar. Demgegenüber wurden für die NO_x-Emissionen TA Luft-Grenzwertüberschreitungen analysiert. Auffallend sind die gegensätzlichen Tendenzen der BHKW „43“ und „47“. Für BHKW „43“ wurden nach der Wartung Emissionsminderungen für NO_x von ≈ 76 % und HCHO von ≈ 60 % erreicht. Bei BHKW „47“ sind NO_x-Erhöhungen eingetreten.

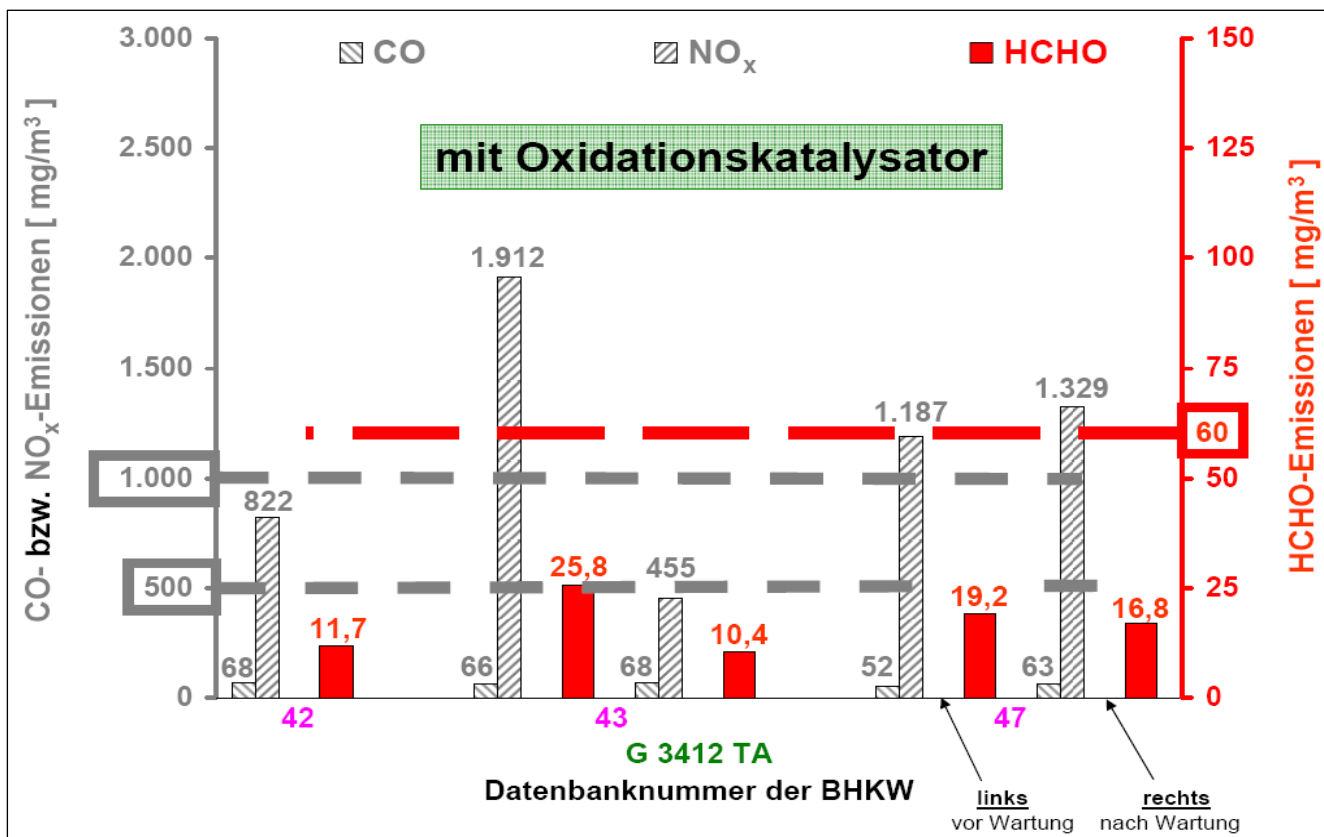


Abbildung 13: Abgasemissionen Caterpillar-Gasotomotoren (12 Zylinder, V-Anordnung, mit Katalysator)

7.2.2 MWM-Motorspezifikationen

Die MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH ist aus der DEUTZ Power Systems GmbH & Co. KG Mannheim hervorgegangen. Das Unternehmen entwickelt und stellt überwiegend Gasmotoren für Blockheizkraftwerke her. In kleinerem Umfang werden auch noch Dieselmotoren produziert. Im Rahmen der Produktpalette dieses Maschinenbauunternehmens werden Motorleistungsbereiche zwischen (180...4.000) kW bedient.

Hinsichtlich der **MWM-Gasotomotoren** wurden die Baureihen 2015 und 2016 im Forschungsvorhaben „Ermittlung ...“ berücksichtigt. In der Tabelle 11 ist eine Auswahl hinsichtlich der technischen Angaben zu diesen vermessenen **Gasotomotorspezifikationen** „TCG 2015 V6“ und „TCG 2016 V12“ zusammengestellt. Dem Leser wird auffallen, dass in die Tabelle 11 hinsichtlich der **MWM-Gasotomotorspezifikation** „TCG 2016 V12“ die Datenbanknummer „64“ aufgenommen wurde. Hintergrund ist, dass für dieses BHKW durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (TLUG) sowohl zur Erarbeitung der bereits erwähnten Studie „Maßnahmen ...“ /7/ als auch zur Bearbeitung dieses Forschungsauftrages BHKW-, Wartungs- und Emissionsdaten bereitgestellt wurden. Aus diesem Grund wurde dieses BHKW zwecks Erhöhung der Ergebnisrepräsentativität in die Untersuchungen und Auswertungen einbezogen.

Tabelle 11: Auswahl technischer Angaben der vermessenen MWM-Motorspezifikationen /12/

Datenbanknummer	52	53, 54, 55, 56, 57, 60, 64
Motortypbezeichnung	TCG 2015 V6	TCG 2016 V12
Arbeitsprinzip	GASOTTO	
Motorkonzept	Magermotor	
Aufladung	Abgasturbolader	
Gemischkühlung	1-stufig	
Zylinderanzahl	6	12
Zylinderanordnung	V-Form	
Hubvolumen	11,9 l	26,3 l
Nenn Drehzahl	1.500 min ⁻¹	
elektrische Leistung ⁽¹⁾	171 kW	537 kW
Kühlwasserwärme (+/- 8 %) ⁽¹⁾	172 kW	210 kW
Abgaswärme bis 120 °C (+/- 8 %) ⁽¹⁾	100 kW	-
Abgaswärme bis 150 °C (+/- 8 %) ⁽¹⁾	91 kW	321 kW
Brennstoffeinsatz (+5 %) ⁽¹⁾	492 kW	1.341 kW
elektrischer Wirkungsgrad ⁽¹⁾	34,8 %	40 %
thermischer Wirkungsgrad ⁽¹⁾	55,3 %	39,6 %
Gesamtwirkungsgrad ⁽¹⁾	90,1 %	79,6 %

⁽¹⁾ für Biogas mit 60 % CH₄, 32 % CO₂, Rest N₂ und Mindestheizwert H_u = 5,0 kWh/Nm³

Die Abbildung 14 veranschaulicht die für die Spezifikationen „TCG 2015 V6“ („52“) sowie „TCG 2016 V12“ („53“ ... „64“) ermittelten Maximalemissionswerte für CO, NO_x bzw. NO₂ („64“) und HCHO. Auffallend ist, dass der „TCG 2015 V6“ („52“) und der „TCG 2016 V12“ („64“), die beide ohne Katalysator betrieben werden, den TA Luft-HCHO-Grenzwert erfüllen. Den BHKW „54“ bis „57“ ist zur Abgasnachbehandlung je ein Katalysator nachgeschaltet. Leider liegen zurzeit auch zu diesen Katalysatoren keine Informationen über die jeweiligen Spezifikationen vor. Wie der Abbildung 14 zu entnehmen ist, wurden für diese mit Oxidationskatalysator ausgestatteten BHKW („54“ bis „57“) überwiegend sehr niedrige CO- und HCHO-Werte ≤ 60 mg/m³ analysiert. Eine Ausnahme stellt das BHKW „54“ dar. Für dieses wurde im Ergebnis der Messkampagne vor der Wartung als HCHO-Maximalemissionswert ≈ 104 mg/m³ ermittelt. Bei der planmäßigen Wartung wurde festgestellt, dass der Katalysator defekt war, sodass dieser während dieser Wartung ausgetauscht wurde. Bei der Messkampagne nach der Wartung liegt der HCHO-Maximalemissionswert für dieses BHKW bei ≈ 22 mg/m³. Damit liegt dieser HCHO-Emissionswert auf annähernd gleichem Niveau wie die BHKW „55“ und „57“.

Für das BHKW „56“ wurden HCHO-Emissionswerte im Bereich von (44,8...56,8) mg/m³ analysiert. Damit wird der TA Luft-Grenzwert eingehalten, jedoch nicht die Voraussetzung erfüllt, um den Bonus in Höhe von 1 ct/kWh zu erhalten. Für dieses BHKW ist von besonderem Interesse, seit wann dieser Katalysator installiert ist bzw. wie viel Betriebsstunden dieser seit Einbau absolviert hat. Hierzu sind momentan keine Angaben vorhanden. Aus diesem Mess- bzw. Analyseergebnis wird seitens der Autoren eingeschätzt, dass Untersuchungen zum Langzeitverhalten, zur Lebensdauer und zur Wartung der Katalysatoren grundsätzlich sinnvoll sind. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, ein Folgeprojekt zu initiieren, welches diese Untersuchungsparameter behandelt. Hinsichtlich der CO- und NO_x bzw. NO₂-Emissionen ist aus Abbildung 14 ersichtlich, dass die TA Luft-Grenzwerte für diese Emissionsbestandteile überwiegend eingehalten werden. Ausnahmen sind bei den CO-Emissionen an BHKW „53“ und an BHKW „56“ für die NO_x-Emissionen gegeben. Wesentliche Emissionsminderungen nach der Wartung sind nicht zu erkennen.

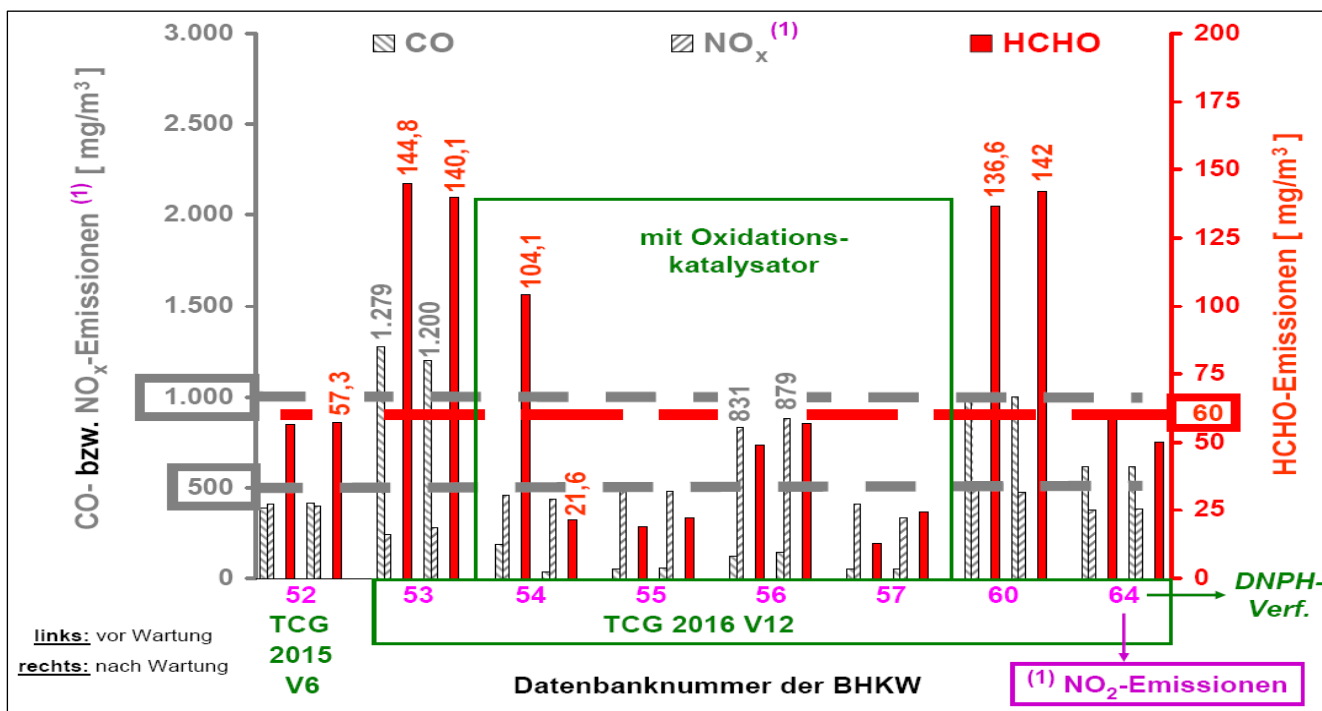


Abbildung 14: Abgasemissionen MWM-Gasotomotoren (6 bzw. 12 Zylinder, V-Anordnung)

7.2.3 Deutz-Motorspezifikation



Für die Durchführung dieses Forschungsvorhabens wurden fünf BHKW ausgewählt. Wie bereits erwähnt, konnten lediglich vier BHKW vermessen werden, da die Messungen am BHKW mit der Datenbanknummer „129“ aufgrund eines defekten Oxidationskatalysators nicht realisiert werden konnten. Eine Auswahl technischer Daten der vermessenen BHKW sind in der Tabelle 12 ersichtlich. Die Auswertung des vorliegenden Datenbestandes zu diesen BHKW sowie ausführliche Internet- und Literaturrecherchen lassen die Schlussfolgerung zu, dass die zu berücksichtigenden **Zündstrahl-BHKW** ursprünglich Basisdieselmotoren waren, welche durch ein spezielles Maschinen- und Anlagenbauunternehmen an den Biogasbetrieb angepasst wurden.

Tabelle 12: Technische Angaben der vermessenen Deutz-Motorspezifikation /13, 16/

Datenbanknummer	75, 76, 77, 78
Motortypbezeichnung	BF6M 1015C
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung
Gemischkühlung	1-stufig
Zylinderanzahl	6
Zylinderanordnung	V-Form
Hubvolumen	11,906 l
Nenn Drehzahl	1.500 min ⁻¹
elektrische Leistung ^{(1), (2)}	190 kW
Kühlwasserwärme ^{(1), (2), (3)}	92 kW
Abgaswärme bis 150 °C ^{(1), (2), (3)}	96 kW
Nutzwärme gesamt ^{(1), (2), (3)}	188 kW
Brennstoffeinsatz (+5 %) ^{(1), (2)}	465 kW
elektrischer Wirkungsgrad ^{(1), (2)}	40,9 %
thermischer Wirkungsgrad ^{(1), (2)}	40,4 %
Gesamtwirkungsgrad ^{(1), (2)}	81,3 %
Zündölverbrauch ^{(1), (2)} (Biodiesel)	3 l/h

⁽¹⁾ für Biogas mit 55 % CH₄, 42 % CO₂, Rest N₂, Mindestmethanzahl 80 und Mindestheizwert H_u = 5,0 kWh/Nm³

⁽²⁾ bei 100 % Last

⁽³⁾ +/- 8 %

In der Abbildung 15 sind die für die im Rahmen dieses Forschungsauftrages zu berücksichtigende **Zündstrahlmotorspezifikation „BF6M 1015 C“** jeweils vor und nach der Wartung gemessenen bzw. analysierten maximalen Emissionswerte für **CO**, **NO_x** und **HCHO** dargestellt. Zu dem mit Oxidationskatalysator betriebenen BHKW „75“ sind bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine weiteren Informationen zu diesem Katalysator verfügbar. Für die dargestellten BHKW „75“ bis „78“ sind keine wesentlichen Gemeinsamkeiten bzw. Einflüsse der Wartung auf Emissionsminderungen zu formulieren. Das Emissionsverhalten stellt sich für die jeweiligen BHKW unterschiedlich dar. Grundsätzlich positiv ist zu bewerten, dass, ausgenommen der **NO_x-Messwert** für das BHKW „78“ vor der Wartung (**1.085 mg/m³**), die TA Luft-Grenzwerte für **CO** und **NO_x** eingehalten wurden.

Für das BHKW „75“ sind insbesondere die stark voneinander abweichenden **CO**- und **HCHO**-Emissionen beim Vergleich der Werte vor mit nach der Wartung auffallend. Diese dürften nicht auf die ausgeführten Wartungstätigkeiten, sondern auf den Oxidationskatalysator zurückzuführen sein. Bei der Wartung an diesem BHKW „75“ wurde festgestellt, dass der Katalysator nicht mehr funktionstüchtig ist. Dementsprechend erfolgte ein Austausch. Es wird eingeschätzt, dass dieser dann ordnungsgemäß arbeitende Katalysator diese im Vergleich zu den anderen BHKW „76“ bis „78“ sehr niedrigen **CO**- und **HCHO**-Emissionen ermöglichte. Für das BHKW „76“ sind die Emissionen vor und nach der Wartung annähernd gleich. Für die BHKW „77“ und „78“ sind gegensätzliche Tendenzen erkennbar. Beim BHKW „77“ ist nach der Wartung für **NO_x** ein um **7 mg/m³** verminderter Wert ermittelt worden. Demgegenüber sind nach der Wartung für **CO** $\approx 10\%$ u. für **HCHO** $\approx 13\%$ Emissionserhöhungen wahrzunehmen. Das Emissionsverhalten des BHKW „78“ stellt sich gegenüber den beiden vergleichbaren BHKW „76“ und „77“ sowohl vor als auch nach der Wartung grundsätzlich differenzierter dar, wobei jedoch die Messwerte für dieses BHKW „78“ für den jeweiligen Emissionsbestandteil auf annähernd gleichem Niveau liegen. Das BHKW „78“ emittierte im Vergleich zu den BHKW „76“ und „77“ weniger **CO** und **HCHO**. Dem stehen jedoch um ca. 50 % höhere **NO_x-Emissionen** gegenüber. Es wird vermutet, dass diese in unterschiedlichen Motorbetriebsparametern (z. B. Verbrennungsluftverhältnis, Zylindertemperaturen) begründet sind. Die Untersuchungen und die resultierenden Auswertungen hierzu werden im Abschnitt 7.4 vorgestellt.

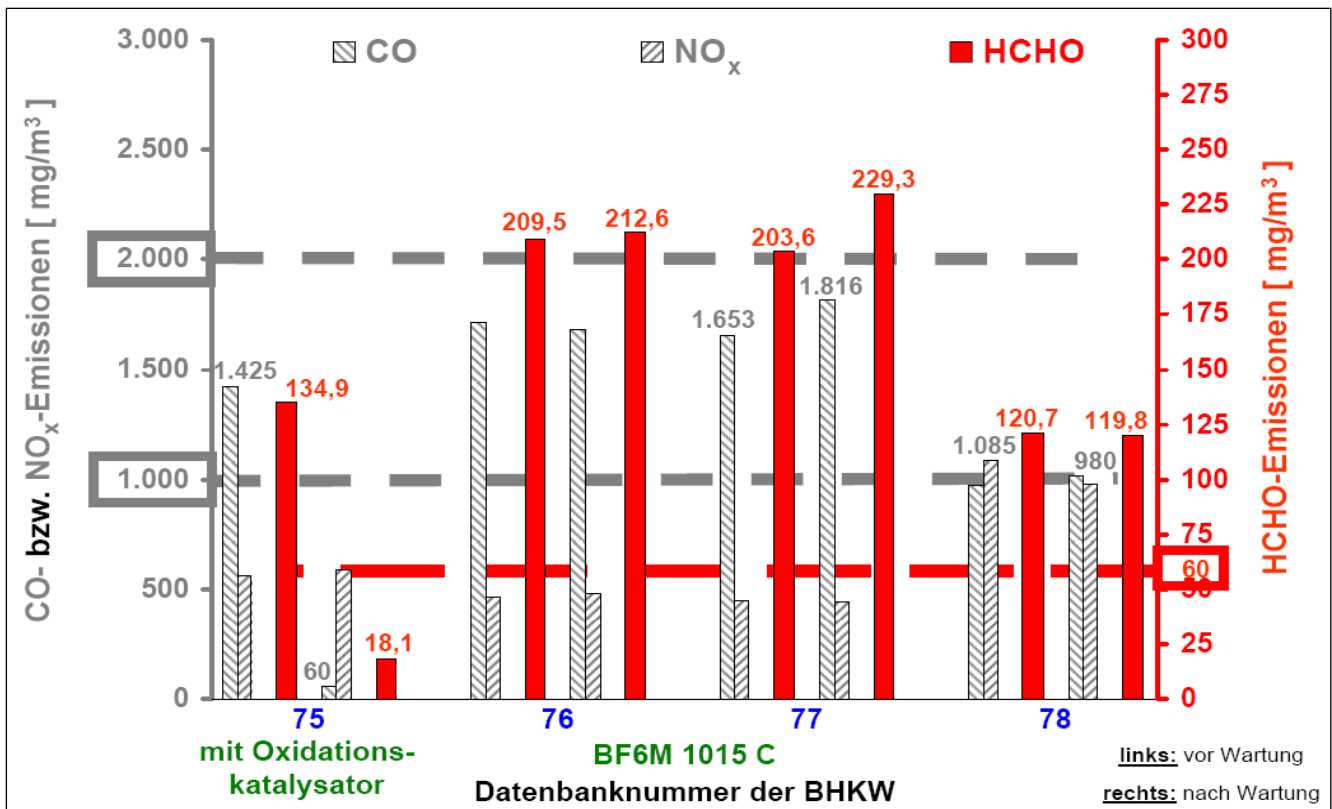


Abbildung 15: Abgasemissionen Deutz-Zündstrahlmotoren (6 Zylinder, V-Anordnung)

7.3 Wartungseinfluss

In der Studie „Maßnahmen zur Minderung ...“ /7/ wird teilweise auch auf die Ist-Zustände der ermittelten **HCHO-Emissionen** vor bzw. nach der Wartung hingewiesen. In Auswertung dieser Untersuchungen war einzuschätzen, dass der jeweilige Wartungszustand der BHKW von nicht zu vernachlässigender Bedeutung sein könnte (Abbildung 16). Dadurch wäre zumindest ein kleiner Beitrag zur **HCHO-Emissionsminderung** denkbar.

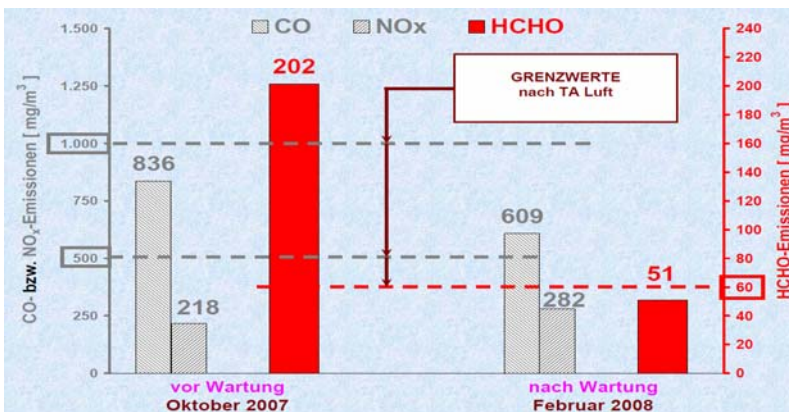


Abbildung 16: Maximale Emissionswerte für ein Gasotomotoren-BHKW vor und nach einer Wartung

(Wartungstätigkeiten und Teilewechsel nicht untersucht, da nicht bekannt) /7/

Vor dem Hintergrund sich weiter verschärfender Emissionsgesetze mit evtl. HCHO-Grenzwerten $< 40 \text{ mg/m}^3$ oder $< 1 \text{ mg/m}^3$ wird diese ggf. Vorgabe allein durch den Aspekt der Wartung wohl nicht einzuhalten sein. Je nach Herstellervorgabe sowie Wartungsintervall (z. B. 750 h) sind mehr oder minder abweichende Kontrollen und Einstellungen (z. B. Ventilspiel) sowie Teilewechsel (z. B. Filter) auszuführen (Abbildung 17).



Abbildung 17: Auswahl von Wartungstätigkeiten für Gasotto- und Zündstrahlmotoren

Die Untersuchungen zum Wartungseinfluss werden ausschließlich für die am häufigsten eingesetzten BHKW-Motorspezifikationen „G 3412 TA“ (Caterpillar), „TCG 2016 V12“ (MWM) und „BF6M 1015 C“ (Deutz) durchgeführt. Dementsprechend wurden die für Emissionsvergleichszwecke vermessenen BHKW-Motorspezifikationen „G 3406 TA“, „G 3408 TA“ und „TCG 2015 V6“ nicht berücksichtigt. Diese hätten lediglich ein- bzw. zweimal in die Untersuchungen einbezogen werden können. Damit würden diese Untersuchungen bzw. die resultierenden Ergebnisse keine Repräsentativität darstellen.

7.3.1 Caterpillar-Motoren „G 3412 TA“

In Auswertung von Abbildung 12 und Abbildung 13 ist kein Einfluss auf die Verbesserung der Formaldehydemissionen für die in diesen Abbildungen dargestellte BHKW-Caterpillargasottomotorspezifikation „G 3412 TA“ infolge der ausgeführten Wartungen ersichtlich.

In diesem Forschungsauftrag sind zur Einschätzung des möglichen Einflusses der Wartungen auf die Reduzierung von Formaldehydemissionen die jeweiligen Wartungsintervalle und Wartungstätigkeiten (Abbildung 17) für die in Abbildung 12 und Abbildung 13 dargestellten BHKW („40“, „42“, „43“, „45“, „47“ und „48“) näher zu untersuchen. Die für die jeweiligen BHKW ausgeführten Wartungstätigkeiten sind in der Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „G 3412 TA“

	Datenbanknummer – Wartungsintervall					
	40 49.500 h	42 21.750 h	43 39.000 h	45 24.000 h	47 25.500 h	48 16.500 h
Ölwechsel mit Filter	o. Angabe	nein	ja	ja	ja	ja
Luftfilter	gereinigt	nein	gereinigt	gereinigt	gereinigt	ja
Biogasfilter	ja	ja	ja	nein	ja	ja
Zündkerzen	ja	kontrolliert	ja	kontrolliert	ja	kontrolliert
Zündzeitpunkteinstellung	kontrolliert	nein	nein	nein	nein	ja
Ventilspieleinstellung	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Kompression messen	ja	nein	nein	nein	nein	nein
Endoskopie	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Besonderheiten	λ-Sonde	Oxikat	Oxikat		Oxikat	
HCHO_{max} [mg/m³]		ohne				
vor Wartung	86,6	Messung	25,8	111,7	19,2	111,1
nach Wartung	82,0	11,7	10,4	114,5	16,8	110,0

Aus der Tabelle 13 sind Gemeinsamkeiten hinsichtlich der durchgeführten Wartungstätigkeiten an den BHKW mit den Datenbanknummern „43“ und „47“ ersichtlich. Ein Einfluss dieser jeweils ausgeführten Wartungstätigkeiten auf die **Formaldehydemissionsreduzierung** ist jedoch nicht formulierbar. Es wird vermutet, dass die niedrigeren **HCHO-Werte** für diese beiden BHKW „43“ und „47“ sowie das BHKW „42“ aus der Abgasnachbehandlung mittels Oxidationskatalysator resultieren.

Beim Vergleich aller BHKW ist auffallend, dass **HCHO-Minderungen** an den BHKW festzustellen sind, wo die Zündkerzen gewechselt wurden („40“, „43“, „47“). Auch an BHKW „48“, an dem eine Zündkerzenkontrolle erfolgte, wurde nach der Wartung ein geringfügig niedrigerer Wert gegenüber vor der Wartung analysiert. Die **HCHO-Minderungen**, ausgenommen das BHKW „43“, sind als geringfügig einzuordnen. Aus diesem Grund erscheint eine Verkürzung des Zündkerzenwechselintervalls, insbesondere auch unter Berücksichtigung von logistischen und finanziellen Gründen, nicht sinnvoll. In Auswertung der Tabelle 13 lässt sich für kein BHKW ein wesentlicher Einfluss der Wartungen auf die Minderung von Formaldehydemissionen formulieren.

Bei den in der Tabelle 13 aufgeführten Wartungstätigkeiten handelt es sich überwiegend um Verschleißteile- und Betriebsstoffwechsel sowie Einstelltätigkeiten bzw. Kontrollen, die im Rahmen kleinerer Wartungsintervalle (z. B. 750 h, 1.500 h, 3.000 h) vorzunehmen sind. Die weiteren Überlegungen gingen davon aus, dass sich bei evtl. umfangreicheren Wartungen, welche nach 9.000 h oder 18.000 h auszuführen sind, Wartungseinflüsse auf die Formaldehydemissionen beim Vergleich von Messungen vor und nach der Wartung herausarbeiten lassen könnten.

Ausgehend von o. g. These wurden im Weiteren die derartigen Untersuchungen auf das BHKW mit der Datenbanknummer „40“ (Abbildung 18) bezogen. Für dieses BHKW liegen zurzeit vier Abgasemissionsmessberichte sowie ein lückenloser Nachweis (Wartungsscheine, Material- und Betriebsstoffnachweise) hinsichtlich der wartungs- und reparaturseitigen Historie dieses BHKW seit der Inbetriebnahme vor. Die Abbildung 19 zeigt die am 26.04.06, am 12.12.06, am 17.06.09 sowie am 25.08.09 und am 02.09.09 gemessenen Maximalwerte der CO-, NO_x- und HCHO-Emissionen.



Abbildung 18: BHKW mit der Caterpillar-Motorspezifikation „G 3412 TA“ (Datenbanknummer „40“)

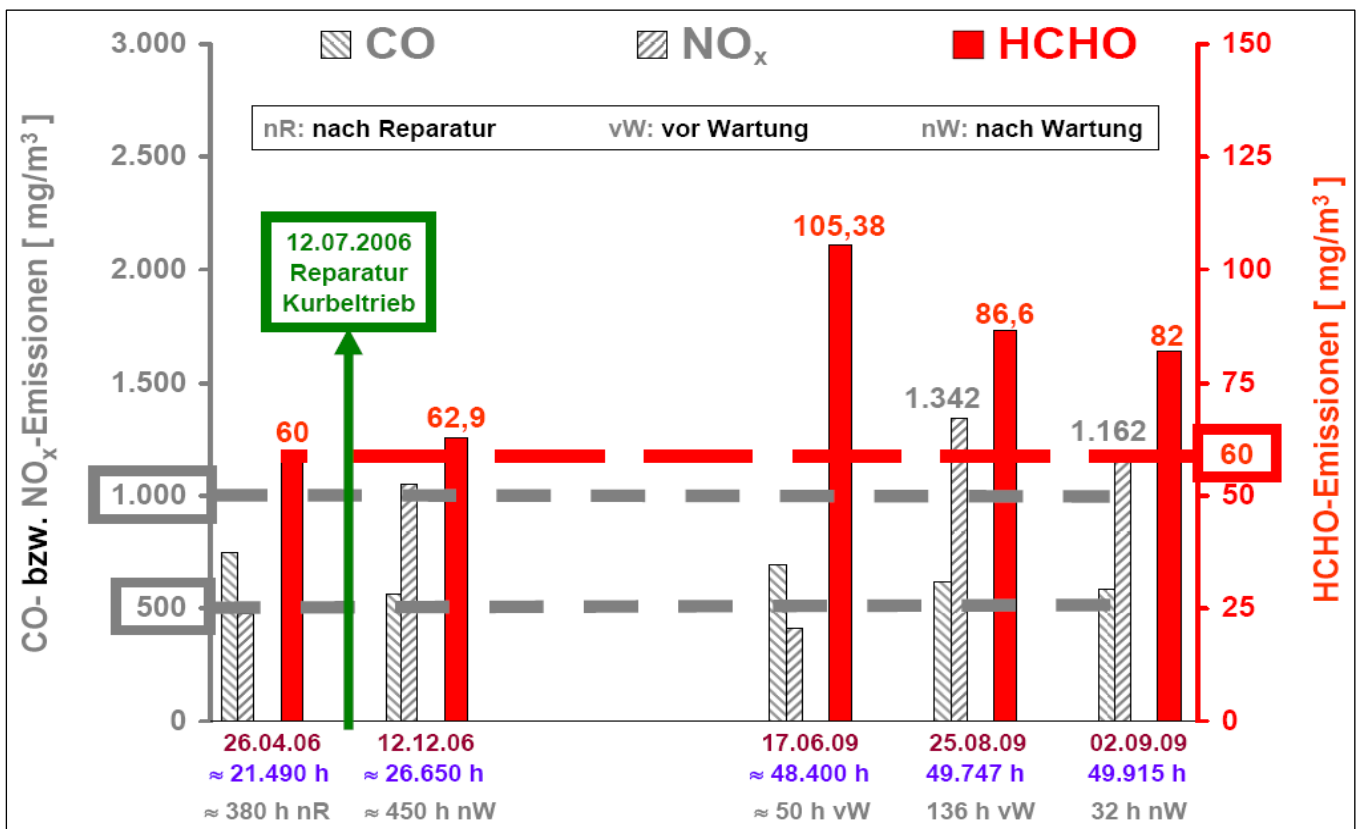


Abbildung 19: Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „40“ → „G 3412 TA“

Für die Betrachtungen ist insbesondere der Zeitraum zwischen den ersten beiden dargestellten Emissionswertereihen von Bedeutung. Hinsichtlich der **HCHO-Emissionen** ist ersichtlich, dass keine wesentlichen Veränderungen der gemessenen Maximalwerte zu verzeichnen waren. Besonderheit beim Vergleich dieser Maximalwerte stellt eine **Reparatur des Kurbeltriebs** am **12.07.2006** dar. Im Rahmen dieser **Kurbeltriebsreparatur**, die annähernd einer Generalrevision entspricht, wurden beispielsweise die in der Tabelle 14 aufgeführten Ersatzteile gewechselt bzw. Wartungstätigkeiten ausgeführt.

Tabelle 14: Auswahl von Wartungstätigkeiten und Teilewechselln am 12.07.2006 am BHKW „40“

Stückzahl und Bezeichnung	
2 Zylinderköpfe (vermutlich inkl. je 2 x neuer Ein- und Auslassventile pro Zylinder)	
12 Laufbuchsen, 36 Kolbenringe (je 3 x pro Kolben), 12 aufgearbeitete Kolben	
12 Lager (vermutlich Pleuellager)	

Aus der Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass auch die umfangreiche Kurbeltriebsreparatur (Tabelle 14) keinen wesentlichen Einfluss auf eine HCHO-Emissionsminderung hatte (siehe Messwerte **12.12.06**).

Für die anderen BHKW-Motoren „G 3412 TA“, ausgenommen das BHKW „45“, liegen weitere Emissionsmessberichte vor. Auch für diese BHKW sind lückenlose Nachweise hinsichtlich der realisierten Wartungen und Reparaturen sowie Angaben zu den jeweils ausgeführten Ersatz- bzw. Verschleißteile- und Betriebsstoffwechsel vorhanden. U. a. daraus resultierend war es möglich, die für das BHKW „40“ vollzogenen Untersuchungen auch für die BHKW „42“, „43“, „47“ und „48“ auszuführen. Die dementsprechenden Darstellungen und Auswertungen sind in den Anlagen 10a bis 10d ersichtlich. Allgemein lassen sich für diese betrachteten BHKW („42“, „43“, „47“ u. „48“) folgende Ergebnisse formulieren. Für den überwiegenden Teil der Emissionsmessungen, die an den BHKW ohne nachgeschalteten Oxidationskatalysator durchgeführt wurden, sind TA Luft-Grenzwert erfüllungen für CO und NO_x (NO₂) zu verzeichnen. Dem stehen jedoch **HCHO-Grenzwertüberschreitungen** zwischen **98,5 mg/m³** („43“) und **128,4 mg/m³** („48“) gegenüber. Ein möglicher Wartungseinfluss auf die **HCHO-Emissionen** ist nicht formulierbar, da keine Emissionsmesswerte vor den jeweiligen Wartungen zur Verfügung stehen. Hintergrund ist, dass es sich beispielsweise um Erstemissionsmessungen an den BHKW „42“, „47“ und „48“ handelt. Für das BHKW „43“ waren zwei zusätzliche Emissionsmessberichte auswertbar (Anlage 10b). Die Messungen erfolgten jedoch **194 h** bzw. **358 h** nach der Wartung (**02.02.07** bzw. **17.06.08**). Damit haben diese BHKW bereits Laufzeiten absolviert, die eine tiefgründigere Untersuchung zum Wartungseinfluss nicht sinnvoll erscheinen lassen.

Anzumerken ist, dass an allen in den Anlagen 10a bis 10d betrachteten BHKW ausschließlich kleinere Wartungen erfolgten. Dabei wurden Kontrollen und Einstellungen bzw. Öl mit Filter sowie ggf. Zündkerzen gewechselt. Nach Auswertung der zu BHKW „40“ vorgenommenen sowie o. g. Ausführungen wird eingeschätzt, dass für die Spezifikation „G 3412 TA“ kein Einfluss von Wartungstätigkeiten sowie Ersatzteil- und Betriebsstoffwechseln auf die HCHO-Emissionen formulierbar ist.

7.3.2 MWM-Motoren „TCG 2016 V12“

In der Tabelle 15 sind ausgewählte Wartungstätigkeiten, die an den BHKW mit den Datenbanknummern „53“ bis „57“ sowie „60“ und „64“ mit der Gasotomotorenspezifikation „TCG 2016 V12“ ausgeführt wurden, zusammengestellt.

Für die Untersuchungen zum evtl. Wartungseinfluss auf die HCHO-Bildung sind lediglich die BHKW ohne Oxidationskatalysator relevant. Seitens der Autoren wird unterstellt, dass die Emissionswerte der mit Katalysator ausgestatteten BHKW „54“ bis „57“ hauptsächlich durch diesen jeweiligen Katalysator beeinflusst wurden. Aus diesem Grund wird eingeschätzt, dass sich für diese BHKW kein Wartungseinfluss verifizieren lässt. Auffallend sind jedoch der sehr hohe HCHO-Wert für das BHKW „54“ (104,1 mg/m³) sowie die für die BHKW „55“ bis „57“ jeweils nach der Wartung höheren HCHO-Werte im Vergleich zu den jeweiligen HCHO-Maximalemissionen vor der Wartung. In diesem Zusammenhang könnten Untersuchungen zum Langzeitverhalten und zum Wartungsaufwand sowie zur Lebensdauer dieser Katalysatoren von besonderem Interesse sein, sodass ein entsprechendes Folgeprojekt grundsätzlich sinnvoll erscheint.

Tabelle 15: Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „TCG 2016 V12“

	Datenbanknummer – Wartungsintervall						
	53 19.500 h	54 22.500 h	55 15.000 h	56 19.500 h	57 28.500 h	60 33.000 h	64 25.500 h
Ölwechsel mit Filter	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Luftfilter	nein	gereinigt	ja	gereinigt	nein	gereinigt	gereinigt
Biogasfilter	nein	gereinigt	ja	gereinigt	nein	nein	ja
Zündkerzen	nein	gereinigt	ja	nein	nein	nein	nein
Zündzeitpunkteinst.	ja	nein	ja	nein	nein	ja	nein
Ventilspeleinst.	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Kompression messen	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein
Endoskopie	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein

Besonderheiten	Oxidationskatalysator							
HCHO_{max} [mg/m³]								
vor Wart.	144,8	104,1	19	48,8	13,2	136,6	60	
nach Wart.	140,1	21,6	22,3	56,8	24,5	142	49,9	

Auch für die berücksichtigten BHKW mit der **Gasotomotorenspezifikation** „TCG 2016 V12“ liegen weitere Emissionsmessberichte vor, sodass die jeweilige Historie dieser BHKW in die Untersuchungen einbezogen werden konnte. Für das BHKW mit der Datenbanknummer „57“ sind in der Abbildung 20 die aus den vorliegenden Emissionsmessberichten entnommenen Maximalmissionen für **CO**, **NO_x** bzw. **NO₂** und **HCHO** ersichtlich. Zu den Zeitpunkten der Emissionsmessungen am **01.02.2007** bzw. **18.06.2008** wurde dieses BHKW ohne Oxidationskatalysator betrieben. Auffallend ist, dass an diesen beiden Messtagen die TA Luft-Grenzwerte für **CO** und **NO_x** (angegeben als **NO₂**) erfüllt, jedoch der für **HCHO** überschritten wurde.

Für die im Ergebnis dieser beiden Messkampagnen ermittelten bzw. analysierten Emissionswerte ist kein Wartungseinfluss nachweisbar. Bei der am **13.06.2008** ausgeführten Wartung wurden lediglich das Schmieröl mit Filter gewechselt sowie ausgewählte Kontroll- und Einstelltätigkeiten (Tabelle 15) vorgenommen. Beispielhaft sind die Kontrolle der Zündkerzen und das Einstellen des Ventilspiels zu nennen. Für die Auswertung der Historie zu diesem BHKW ist interessant, dass im Zeitraum 08. bis 12.10.2007, nachdem das BHKW 12.330 Betriebsstunden absolviert hatte, die Zylinderköpfe gewechselt und der Kurbeltrieb (z. B. Kolben, Kolbenringe, Pleuellager) kontrolliert wurden. Diese Reparatur entspricht annähernd einer periodischen Wartung mit erweitertem Umfang /17/. Evtl. könnten die am **18.06.2008** um ca. 10 % niedrigeren **HCHO-Emissionen** im Zusammenhang mit den Zylinderkopfwechseln sowie dieser Kurbeltriebskontrolle stehen. Ein Nachweis ist jedoch nicht möglich, da keine Emissionswerte vor der am **13.06.2008** durchgeführten **Wartung** verfügbar sind. Ca. Mitte August 2009 wurde am BHKW „57“ ein Oxidationskatalysator installiert. Die mit dieser installierten Abgasnachbehandlungstechnik am **09.09.** sowie **12.10.** und **16.10.2009** ermittelten maximalen **CO-**, **NO_x-** und **HCHO-**Emissionen sind gleichfalls in der Abbildung 20 dargestellt. Für diese Messwerte lässt sich kein wesentlicher Wartungseinfluss ableiten, da unterstellt wird, dass die sehr niedrigen **CO-** und **HCHO-**Emissionen durch diesen Katalysator erreicht wurden.

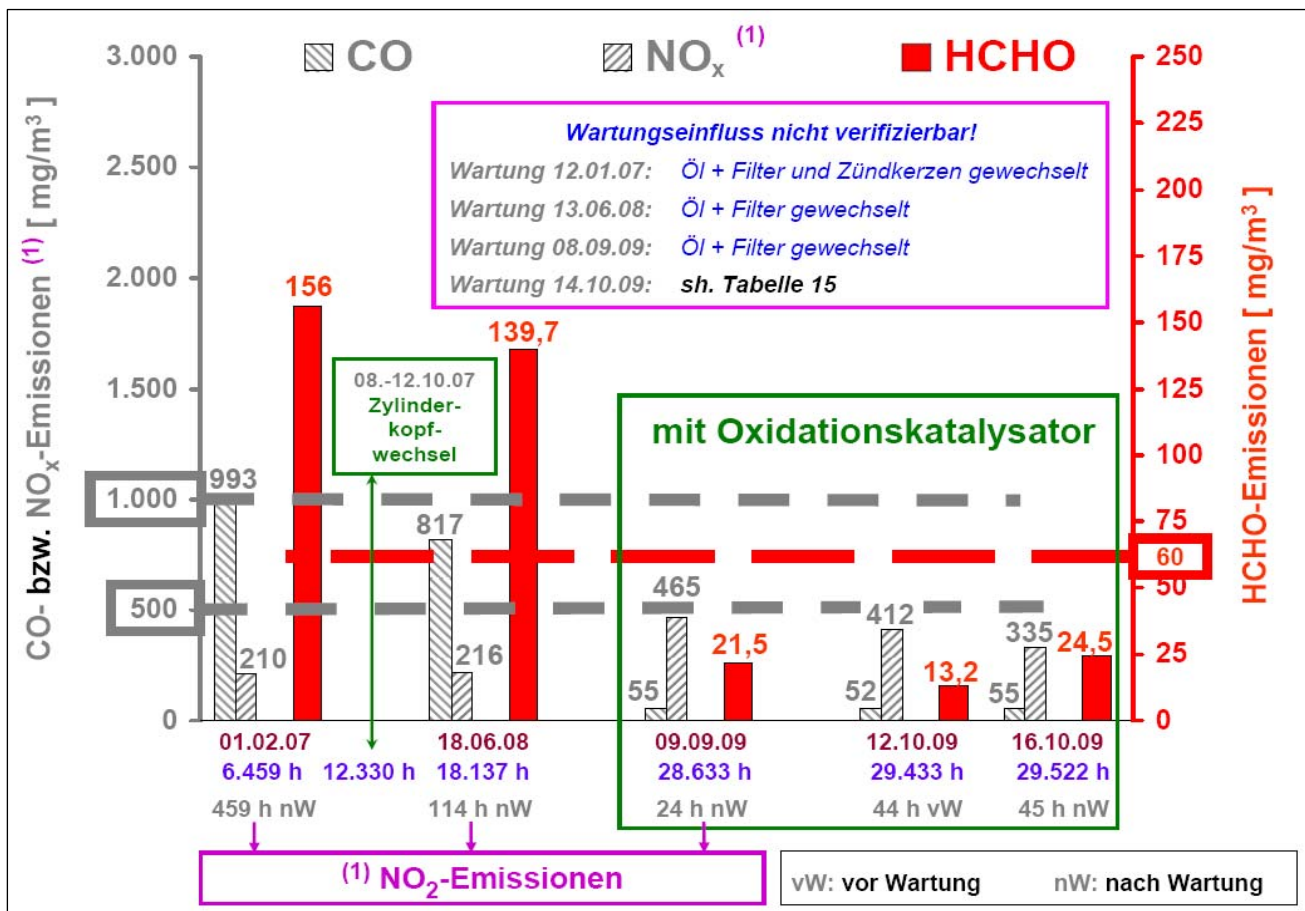


Abbildung 20: Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „57“ → „TCG 2016 V12“

Für die BHKW mit den Datenbanknummern „53“ bis „56“ sowie „60“ und „64“ wurden ähnliche Untersuchungen, wie vorab für das BHKW „57“ beschrieben, unter Berücksichtigung der jeweiligen Historie durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind den Anlagen 11a bis 11f zu entnehmen. Für keines dieser BHKW („53“ bis „56“, „60“, „64“) ist ein Wartungseinfluss definierbar. Die jeweils zusätzlich ausgewerteten Emissionswerte beruhen überwiegend auf Abgasemissionsmessberichte, die im Rahmen von Erstmessungen nach Inbetriebnahme gemäß §28 BImSchG erarbeitet wurden.

An den BHKW „53“ bis „56“ erfolgten die Abgasemissionsmessungen 20 h vor der Wartung (Anlage 11a) bzw. 63 h, ≈ 240 h sowie 48 h nach der Wartung (Anlagen 11b bis 11 d). Da jedoch keine Bezüge zu den Emissionen nach bzw. vor den jeweiligen Wartungen verfügbar sind, besteht keine Möglichkeit einen evtl. Wartungseinfluss herauszuarbeiten.

Die BHKW mit den Datenbanknummern „60“ und „64“ wurden bis zum jeweiligen Zeitpunkt der Emissionsmesskampagnen bereits ca. (600...950) Stunden betrieben (Anlagen 11 e bzw. 11f). Damit haben diese beiden BHKW bereits Laufzeiten erreicht, die keine Rückschlüsse auf evtl. Wartungseinflüsse zulassen.

Für die **HCHO-Emissionswerte** der BHKW „53“ bis „56“ sowie „60“ (Anlagen 11a bis 11e), die sich auf Messkampagnen beziehen, bei denen an den jeweils betreffenden BHKW noch keine Oxidationskatalysatoren nachgeschaltet waren, fällt auf, dass sich die maximalen **HCHO-Emissionen** im Bereich zwischen **124 mg/m³** und **144,8 mg/m³** bewegen. Damit stellen sich diese HCHO-Emissionen ähnlich dem bereits in der Studie „Maßnahmen ...“ /7/ für diese **Gasottomotorspezifikation „TCG 2016 V12“** vorgestellten Ergebnis dar.

Gegenüber den o. g. BHKW stellt sich für das BHKW mit der Datenbanknummer „64“ eine andere Tendenz dar. Beim Vergleich der für dieses BHKW vom **15.05.2005** mit den vom **01.12.** bzw. vom **03.12.2008** analysierten **HCHO-Emissionen** sind an den beiden zuletzt genannten Messkampagnen um **ca. (45...46) % niedrigere Werte** erreicht worden (Anlage 11f). Hierbei könnte evtl. ein Zusammenhang mit einer am 18.09.2008 gemäß Herstellervorgaben bei 24.000 Betriebsstunden ausgeführten Zwischenüberholung (E 60) bestehen. Im Rahmen dieser Zwischenüberholungen werden neben den bei kleineren Wartungen üblichen Verschleißteile- und Betriebsstoffwechsel sowie Kontroll- und Einstelltätigkeiten (Tabelle 15) u. a. auch die Zylinderköpfe überholt, die Laufbuchsen, die Kolben mit Kolbenringen und die Pleuellager erneuert sowie der Gemischkühler gereinigt. Zurzeit liegen keine detaillierten Angaben zur BHKW-Historie vor. Aus diesem Grund ist die o. g. These momentan nicht beweisbar. Abschließend ist zu diesem BHKW „64“ zu erwähnen, dass nicht von einer Ausstattung mit Oxidationskatalysator ausgegangen wird. In Auswertung der **CO-Emissionswerte** für die BHKW mit funktionstüchtigen Oxidationskatalysator („54“ bis „56“ → Anlagen 11b bis 11d) wird eingeschätzt, dass sich die **CO-Emissionen** bei Nachschaltung eines Oxidationskatalysators am BHKW „64“ hätten deutlich niedriger gestalten müssen.

Nach Auswertung aller für die **MWM-Gasottomotorspezifikation „TCG 2016 V12“** vollzogenen Untersuchungen (Anlagen 11a bis 11f) sowie der hierzu vorgenommenen Erläuterungen ist für die berücksichtigten BHKW **kein Einfluss auf die Minderung der HCHO-Emissionen infolge Ausführung der in der Tabelle 15 aufgeführten Verschleißteile- und Betriebsstoffwechsel** (z. B. Gasfilter, Schmieröl) **sowie Kontroll- und Einstelltätigkeiten** (z. B. Zündzeitpunkt, Ventilspiel) **formulierbar**. Der Nachweis hinsichtlich eines evtl. Einflusses auf die HCHO-Emissionen durch Kurbeltriebsreparaturen (z. B. Kolben mit Kolbenringen, Pleuellager) bzw. Zwischenüberholungen kann aufgrund zurzeit nicht verfügbarer Angaben zum Emissionsverhalten vor derartigen Reparatur- bzw. Verschleißteilwechseln sowie der BHKW-Historie („64“) nicht erbracht werden. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu erwarten, dass sich beispielsweise bei Verkürzung der Zwischenüberholungs- bzw. Generalüberholungsintervalle keine günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnisse darstellen lassen würden.

7.3.3 Deutz-Motoren „BF6M 1015 C“

Die Verbrennungsmotoren der in diesem Forschungsprojekt berücksichtigten BHKW mit der Motorspezifikation **„BF6M 1015 C“** (Datenbanknummern „75“ bis „78“) arbeiten nach dem Zündstrahlverfahren. Hinsichtlich dieses Verfahrens wird in der Literatur und Praxis auch von Zünd- bzw. Stützfeuerung gesprochen. Hierbei werden dem Biogasgemisch geringe Mengen Heizöl, Biodiesel oder Pflanzenöl zugemischt, um den selbstzündenden Verbrennungsbeginn einzuleiten. Eine gesetzliche Besonderheit ist, dass in Anlagen, die nach dem 31.12.2006 errichtet wurden, ausschließlich Biodiesel oder Pflanzenöl als Zündöl zu verwenden ist. Je nach technischem Entwicklungsstand der Biogas-BHKW ist von Zündölmengen im Bereich von (2...10) % auszugehen. Die hier untersuchten BHKW wurden im Zeitraum Oktober 2003 bis Oktober 2006 in Betrieb genommen. Als Zündöl verwenden diese BHKW „Heizöl extra leicht“ (HEL). Die Tabelle 16 zeigt ausgewählte Wartungstätigkeiten, die an den BHKW „75“ bis „78“ durchgeführt wurden.

Tabelle 16: Auswahl ausgeführter Wartungstätigkeiten an den vermessenen BHKW-Motoren „BF6M 1015 C“

	Datenbanknummer – Wartungsintervall			
	75 40.000 h	76 47.000 h	77 47.000 h	78 24.000 h
Ölwechsel mit Filter	ja	nein	nein	Ja
Luftfilter	gereinigt	gereinigt	gereinigt	gereinigt
Biogasfilter	ja	nein	nein	nein
Zündölfilter	ja	nein	nein	ja
Injektoren	ja	nein	nein	ja
Zündölanteil einstellen	o. Angabe	o. Angabe	o. Angabe	o. Angabe
Ventilspieleinstellung	ja	ja	ja	ja
Kompression messen	ja	nein	nein	nein
Endoskopie	ja	nein	nein	nein
Besonderheiten	Oxikat			
HCHO_{max} [mg/m³]				
vor Wartung	134,9	209,5	203,6	120,7
nach Wartung	18,1	212,6	229,3	119,8

Ursprünglich war geplant, fünf BHKW mit dieser Motorspezifikation „BF6M 1015 C“ zu untersuchen. Wegen eines defekten Oxidationskatalysators waren jedoch weder vor noch nach der Wartung Emissionsmesskampagnen an dem BHKW mit der Datenbanknummer „129“ möglich. U. a. aus diesem Grund sowie in Auswertung der Tabelle 16 und der für diese BHKW vorliegenden Informationen ist bereits an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse für die **Deutz-Motorspezifikation „BF6M 1015 C“** als nicht repräsentativ zu bewerten sind.

Für das BHKW mit der Datenbanknummer „75“ stellen sich die Wartungstätigkeiten gegenüber den anderen BHKW („76“ bis „78“) am umfangreichsten und vielfältigsten dar. Im Rahmen der Emissionsmesskampagne vor der Wartung wurden für dieses BHKW „75“ **ca. 125%-ige Überschreitungen** des TA Luft Grenzwertes für **HCHO** analysiert (Tabelle 16 → **134,9 mg/m³**). Bei der planmäßigen Wartung wurde festgestellt, dass der installierte Oxidationskatalysator nicht funktionstüchtig ist. Infolge dessen erfolgte während dieser Wartung ein Austausch dieses Katalysators. Der für dieses BHKW nach der Wartung als Maximum analysierte **HCHO-Wert** beträgt **18,1 mg/m³**. In diesem Zusammenhang schätzen die Autoren ein, dass dieser **HCHO-Emissionswert** hauptsächlich durch das in diesem Oxidationskatalysator nachbehandelte Abgas erreicht worden ist. Demzufolge lässt sich für dieses BHKW „75“ kein Einfluss der in der Tabelle 16 aufgeführten Wartungstätigkeiten auf die **HCHO-Reduzierung** verifizieren.

Der Tabelle 16 sind Gemeinsamkeiten hinsichtlich der durchgeführten Wartungstätigkeiten an den BHKW „76“ und „77“ zu entnehmen. Hintergrund ist u. a., dass sich beide BHKW am gleichen Standort befinden und im Normalbetrieb gleichzeitig laufen, sodass die Wartungsintervalle mit den entsprechend auszuführenden Tätigkeiten bzw. Ersatzteile- und Betriebsstoffwechsel zum gleichen Zeitpunkt anfallen (vgl. Tabelle 16 → **Wartungsintervall**). Die für diese beiden BHKW im Rahmen dieses Forschungsauftrages zu berücksichtigenden, planmäßig nach jeweils 47.000 Betriebsstunden, ausgeführten Wartungen konzentrierten sich hauptsächlich auf Kontroll-, Prüf- und Einstelltätigkeiten. Beispielsweise ist auf die Luftfilterreinigung und die Ventilspieleinstellungen zu verweisen (Tabelle 16, Abbildung 21). Aus diesen für diese beiden BHKW im Vergleich zum BHKW mit der Datenbanknummer „75“ geringfügiger realisierten Wartungsumfang ist kein Einfluss bestimmter Wartungstätigkeiten auf die **HCHO-Emissionen** ableitbar. Dies bestätigen auch die für die BHKW „76“ und „77“ analysierten **HCHO-Maximalemissionen** (Tabelle 16 → „77“ → **203,6 mg/m³** und **229,3 mg/m³**).



Abbildung 21: Zylinderköpfe vom BHKW mit der Datenbanknummer „76“ → „BF6M 1015 C“

Am BHKW mit der Datenbanknummer „78“ wurden im Rahmen der planmäßigen Wartung der Luftfilter gereinigt, das Ventilspiel eingestellt, das Motoröl mit Filter sowie die Injektoren und der Zündölfilter gewechselt (Tabelle 16). Die **HCHO-Werte** wurden aus den Emissionsmesskampagnen vor bzw. nach der Wartung auf annähernd gleichem Niveau ermittelt (Tabelle 16 → **120,7 mg/m³** bzw. **119,8 mg/m³**). In Auswertung dieser Analysewerte ist für dieses BHKW kein Einfluss der ausgeführten Wartungstätigkeiten auf die HCHO-Emissionsbildung definierbar.

Durch die Biogasanlagenbetreiber wurden weitere Abgasemissionsmessberichte für die jeweiligen BHKW „75“ bis „77“ zur Verfügung gestellt. Daraus resultierend wurden auch für diese drei BHKW die Untersuchungen unter Einbeziehung der jeweiligen Historie seit der Inbetriebnahme vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind für das BHKW „75“ in der Abbildung 22 und für die BHKW „76“ und „77“ in den Anlagen 12a und 12b vorgestellt. **Für keines der untersuchten BHKW mit der Motorspezifikation „BF6M 1015 C“ ist ein Einfluss bestimmter Wartungsintervalle bzw. -tätigkeiten auf die HCHO-Emissionsbildung erkennbar.**

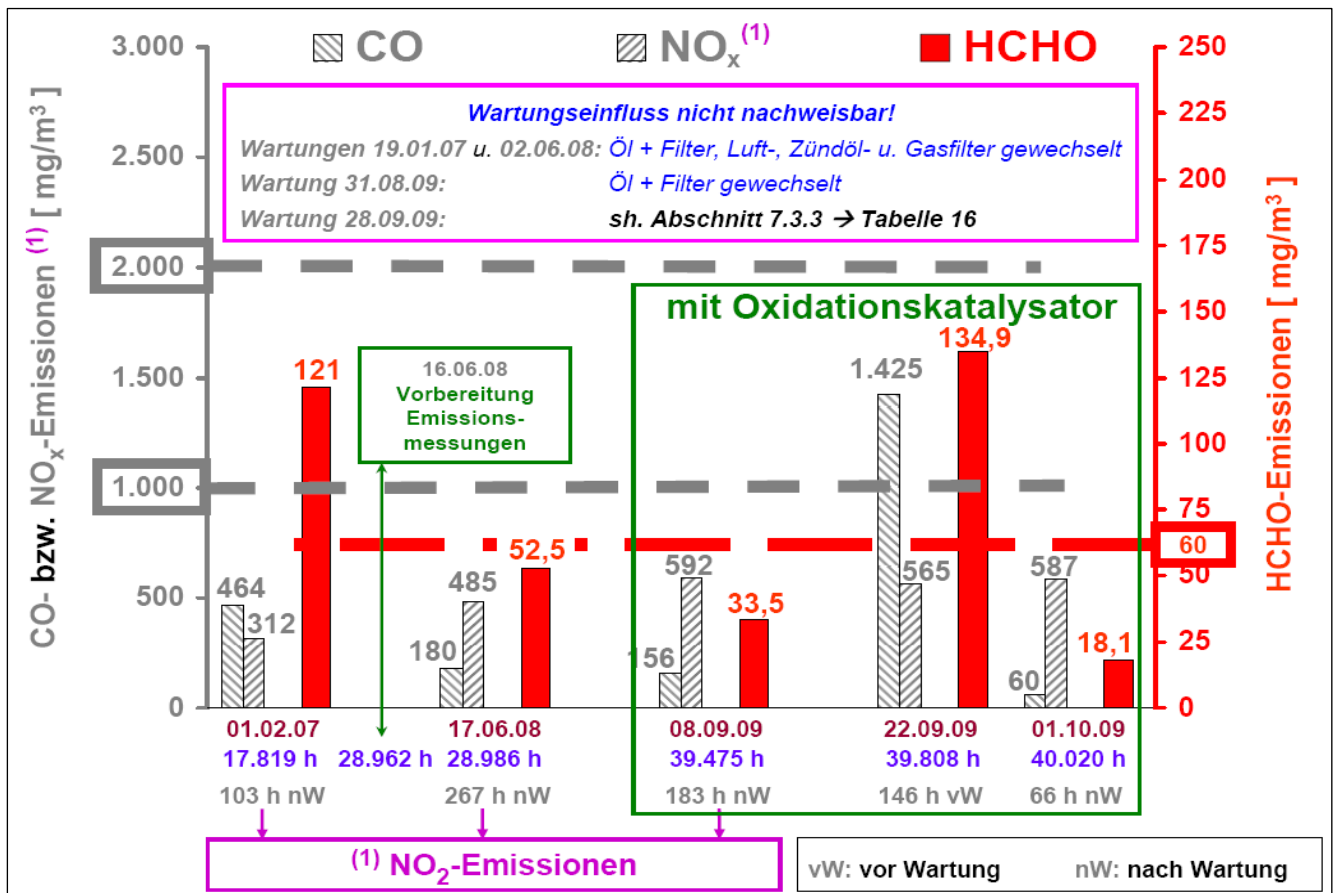


Abbildung 22: Abgasemissionen vom BHKW mit der Datenbanknummer „75“ → „BF6M 1015 C“

Die jeweils wartungsintervallbedingt am 19.01.07 bzw. 02.06.08, bei 103 bzw. 267 Betriebsstunden vor den Emissionsmessungen am 01.02.07 bzw. 17.06.08, ausgeführten Wartungen mit der entsprechend in der Abbildung 22 genannten Auswahl von Wartungstätigkeiten konnten nicht für die Untersuchung des möglichen Wartungseinflusses auf das Emissionsverhalten zugrunde gelegt werden, da keine Emissionswerte vor der jeweiligen Wartung ermittelt wurden. Sehr auffallend sind jedoch für dieses BHKW mit der Datenbanknummer „75“ die gegensätzlichen Tendenzen hinsichtlich des Emissionsverhaltens der Messkampagnen am 01.02.07 und 17.06.08. Aufgrund dieser Auffälligkeit wurden die Wartungen und Reparaturen im Zeitraum zwischen diesen beiden Emissionsmesskampagnen tiefgründiger untersucht. Innerhalb dieses Zeitraumes (01.02.07 bis 17.06.08) wurden beispielsweise am 14.03.07 die Einspritzpumpe und am 17.11.07 die Kopfdichtungen der Zylinder 4 bis 6 gewechselt. Da diese außerplanmäßigen Reparaturen ca. 10.300 bzw. ca. 4.700 Betriebsstunden vor den Messungen am 17.06.08 erfolgten, ist ein direkter Einfluss auf die an diesem Messtag ermittelten CO-, NO₂- und HCHO-Emissionen auszuschließen. Weitere nennenswerte Reparaturen, z. B. Zylinderkopf-, Kolben- und Laufbuchsenwechsel, wurden in dieser Zeit nicht realisiert. Erwähnenswert ist jedoch ein Serviceeinsatz am 16.06.08, also ein Tag vor den Messungen am 17.06.08. Zwecks Vorbereitung der Emissionsmessungen erfolgten laut Wartungsnachweis Kontrollen und Prüfungen sowie Einstellungen am Motor. Die Autoren dieses Berichtes vermuten, dass beispielsweise die Motorbetriebsparameter „Verbrennungsluftverhältnis“, „Zündölanteil“ oder „Förderbeginn“ unter Berücksichtigung möglichst niedriger CO- und NO₂-Emissionen verstellt worden sein könnten. Diese These kann nicht nachgewiesen werden, da den vorliegenden Unterlagen keine detaillierte Bezeichnung dieser Motoreinstelltätigkeiten zu entnehmen ist. Hierzu könnte eine

Durchführung des bereits vorgeschlagenen Folgeprojektes hinsichtlich der Untersuchungen zur Funktionalität und zum Wartungsaufwand sowie zur Lebensdauer von Katalysatoren Aufschluss geben. Denkbar ist vor Ort HCHO-Messungen mittels FTIR-Analysator (Anlage 5) durchzuführen und dabei Motoreinstellungen vorzunehmen.

7.4 Motorbetriebsparameter

Der Einfluss der Motorprozesse auf die Formaldehydentstehung ist ausführlich im Rahmen des FVV-Vorhabens Nr. 918 „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ unter dem Thema „Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter“ /18/ untersucht worden. Dabei wurden u. a. die Brennraumgeometrie, der Ladedruck, die Biogaszusammensetzung und die Ladungsbewegung (Drall) variiert und untersucht.

Nach Studium und Auswertung dieses FVV-Forschungsvorhabens /18/ gehen auch die Verfasser dieses Abschlussberichtes davon aus, dass durch die Einstellung bestimmter Motorbetriebsparameter die Formaldehydbildung beeinflusst werden könnte. Beispielhaft sind das Verbrennungsluftverhältnis und der Zündzeitpunkt zu nennen. Im Rahmen dieses Abschlussberichtes konzentrierten sich die Untersuchungen zu den Motorbetriebsparametern auf die Zylindertemperaturen und das Verbrennungsluftverhältnis. Hinsichtlich dieser Motorbetriebsparameter sind eine ausreichende Datenbasis (z. B. Anlagen 6a bis 6c) für die berücksichtigten BHKW-Motorspezifikationen „**G 3412 TA**“, „**TCG 2016 V12**“ sowie „**BF6M 1015 C**“ abrufbar und daraus resultierend repräsentative Ergebnisse darstellbar. Weitere Motorbetriebsparameter wie beispielsweise Ladedruck, Ansaugluft-, Gemisch- und Schmieröltemperatur sind vereinzelt verfügbar, wurden jedoch aus Effizienz- und Repräsentativitätsgründen nicht näher betrachtet.

7.4.1 Zylindertemperaturen

Ausgenommen die BHKW mit den Datenbanknummern „**37**“, „**38**“, „**40**“ und „**139**“ war für alle anderen BHKW parallel zu den Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen die Möglichkeit einer Erfassung der jeweiligen Zylindertemperaturen gegeben. Diese Erfassungen erfolgten überwiegend im 15-Minuten-Rhythmus.

Bei den **Caterpillar-Gasotomotor-BHKW „G 3412 TA**“ sowie den **Zündstrahlmotor-BHKW „BF6M 1015 C**“ war eine Ablesung der im Schaltschrankdisplay angezeigten Zylindertemperaturen (Abbildung 23) und daraus resultierende handschriftliche Aufnahme in speziell vorbereitete Datenblattmuster notwendig (z. B. Anlage 6a).



Abbildung 23: Schaltschrankdisplay zum Ablesen der Zylindertemperaturen

Für die **MWM-Gasottomotor-BHKW „TCG 2016 V12“** erfolgte der jeweilige Abruf dieser Zylindertemperaturen über eine Menüführung im Display des Schaltschranks mit jeweils anschließender Umwandlung in PDF-Dateien, die dann auf einem USB-Stick gespeichert wurden (Anlage 6b).

Aus /3/ ist bekannt, dass zu niedrige Zylindertemperaturen kalte Brennraumzonen entstehen lassen könnten. In diesen kalten Brennraumzonen könnte dann nur eine Teiloxidation des Methans erfolgen. Im Ergebnis dessen findet eine unvollständige Verbrennung statt, die zur Formaldehydbildung beitragen kann. U. a. aufgrund dieser Erkenntnisse wurden alle erfassten Zylindertemperaturen einer intensiven Auswertung unterzogen. Es war zu untersuchen, ob für die jeweils betrachteten BHKW-Motorspezifikationen **„G 3412 TA“**, **„TCG 2016 V12“** und **„BF6M 1015 C“** bestimmte Konzentrationen hinsichtlich niedriger Temperaturen in gleichen Zylindern an unterschiedlichen Standorten (z. B. **„40“** → A1, **„42“** → A1, **„43“** → A1), jedoch gleicher BHKW-Motorspezifikation, zu verzeichnen waren. Zwecks besserem Verständnis dieser Untersuchungen sowie der daraus resultierenden Ergebnisse veranschaulicht die Abbildung 24 die Zylinderbezeichnungen.

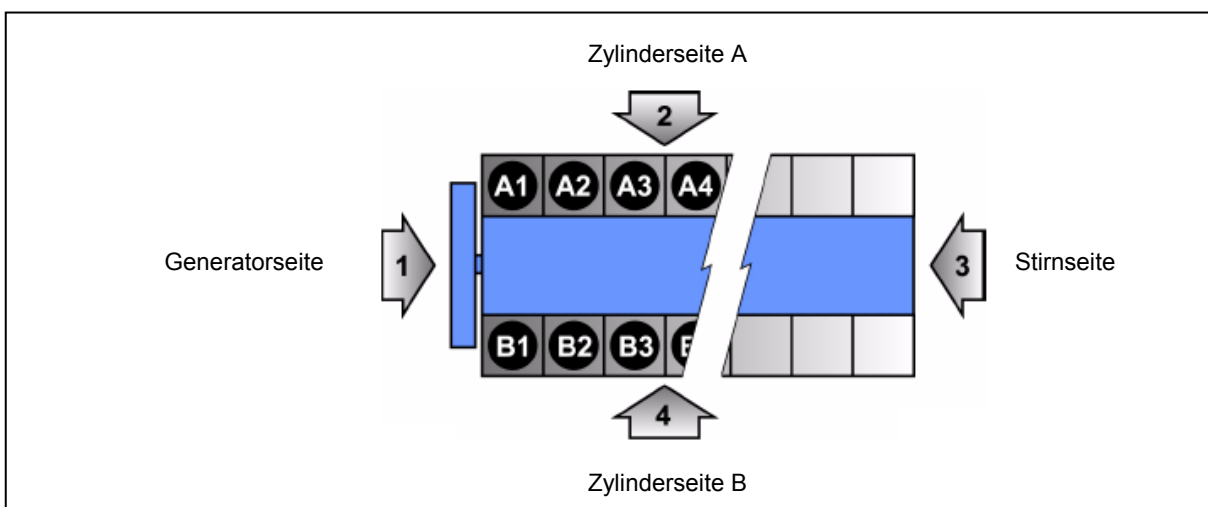


Abbildung 24: Zylinderbezeichnungen /17/

Die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich der aufgenommenen und ausgewerteten Zylindertemperaturen für die jeweiligen BHKW zeigen die Abbildung 25 sowie die Anlagen 13a bis 15d. Diesen Darstellungen sind jeweils die nachfolgend genannten Angaben zu entnehmen.

- Datenbanknummer
- BHKW-Motorspezifikation
- Termin der Messkampagne vor bzw. nach der Wartung
- maximaler HCHO-Emissionswert vor bzw. nach der Wartung
- Beginn der Messreihenaufnahme (z. B. **09:30 Uhr**, ...)
- Spezifikation der Entschwefelung
- Hinweis bei ggf. Ausrüstung mit Oxidationskatalysator
- Abszisse „Zylinderbezeichnung“
- Ordinate „Zylinder- bzw. mittlere Abgastemperatur (nur Anlage 14f)“
- niedrigste Temperatur(en) beider Messkampagnen
- höchste Temperatur(en) beider Messkampagnen

Anstatt Punkten, die der Temperatur für den jeweiligen Zylinder zum Zeitpunkt des Beginns der Messreihenaufnahme entsprechen würden, sind den Darstellungen Linienverläufe zu entnehmen. Diese Form der Darstellung ist eigentlich nicht korrekt und wurde lediglich zum Zwecke der besseren Veranschaulichung gewählt. Tatsächlich wurden für jeden Zylinder zu den in der jeweiligen Legende angegebenen Uhrzeiten die entsprechenden Temperaturen erfasst (Abbildung 25 → $T_{\min} = 571^{\circ}\text{C}$ für Zylinder B1, vor Wartung am 30.10.2009 um **11:45 Uhr**). Nachfolgend wird ein Ergebnis am Beispiel des BHKW „52“ erläutert (Abbildung 25).

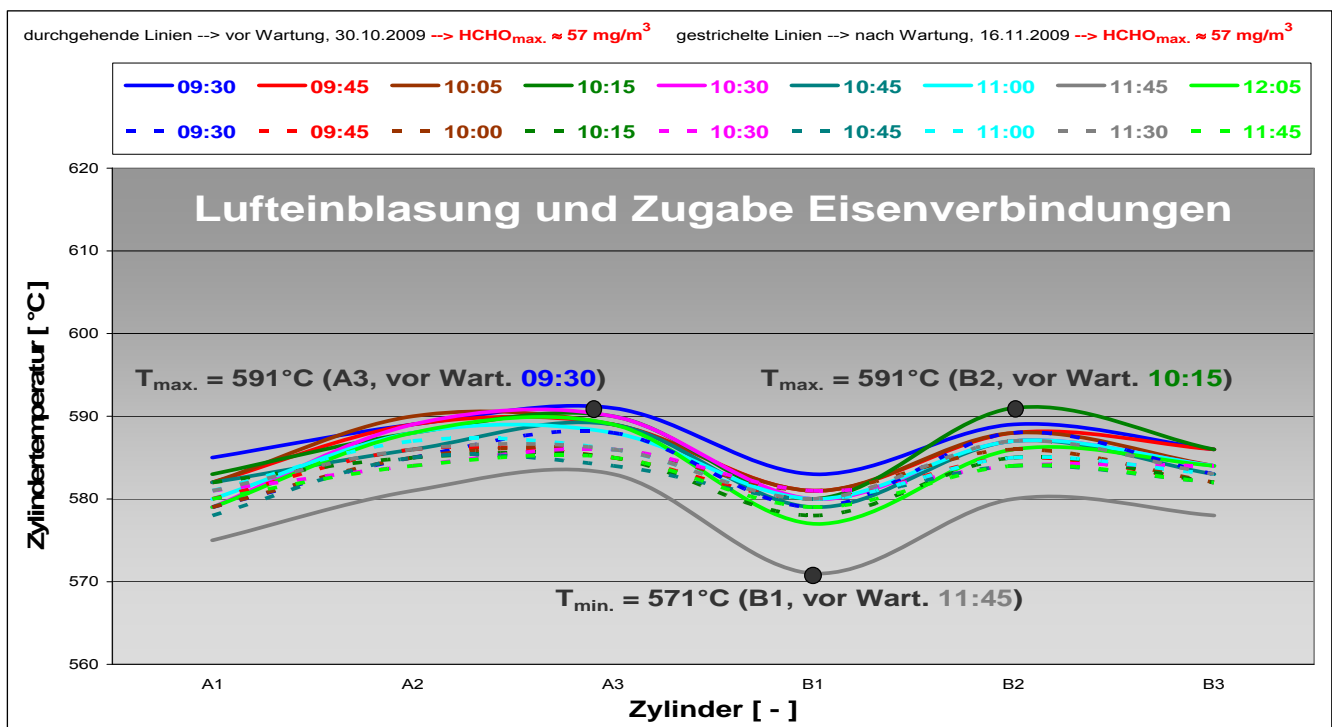


Abbildung 25: Zylindertemperaturen der Messkampagnen vor und nach der Wartung für das BHKW „52“ mit der BHKW-Gasottomotorenspezifikation „TCG 2015 V6“

Wie bereits in mehreren vorangegangenen Abschnitten erwähnt, gehört die **BHKW-Gasottomotorenspezifikation „TCG 2015 V6“** gemäß Auswertung der Studie „Maßnahmen ...“ /7/ nicht zu den am häufigsten in Sachsen eingesetzten BHKW-Motorspezifikationen. Diese Spezifikation ist jedoch im Rahmen dieses hier beschriebenen Vorhabens einmal berücksichtigt worden, indem jeweils am BHKW „52“ Emissionsmess- und Biogasanalysekampagnen vor und nach der Wartung erfolgten. Hintergrund dieser Berücksichtigung stellt ein gewollter Vergleich der Zylindertemperaturen dieses BHKW „52“ mit den Zylindertemperaturen der leistungsstärkeren BHKW „53“ bis „57“ und „60“ des Verbrennungsmotortyps **„TCG 2016 V12“** dar. Anzumerken ist jedoch, dass eine annähernde Vergleichbarkeit insbesondere motorspezifisch aufgrund der Hubvolumen- und Leistungs- sowie Bauteilunterschiede (z. B. Zündkerzen) nicht gegeben ist. Hinsichtlich der jeweils aufgenommenen Zylindertemperaturen könnte jedoch für das vermessene BHKW „52“ (Abbildung 25) im Vergleich zu den aufgenommenen Zylindertemperaturen für die BHKW „53“ bis „57“ und „60“ (Anlagen 13a bis 13f) von besonderem Interesse sein, dass für dieses BHKW „52“ bei der Messkampagne vor der Wartung Zylindertemperaturen im Bereich zwischen (571...591) °C erreicht wurden. Damit beträgt die Differenz zwischen der am niedrigsten und am höchsten gemessenen Zylindertemperatur bei der gesamten vor der Wartung ausgeführten Messkampagne maximal 20 °C.

In Auswertung aller vor der Wartung aufgenommenen Messreihen für das BHKW „52“ (z. B. **09:30 Uhr**, **09:45 Uhr** ... **12:05 Uhr**) ergibt sich eine maximale Zylindertemperaturdifferenz von 12°C für die um **12:05 Uhr** erfasste Messreihe (Tabelle 17). Für alle übrigen vor der Wartung aufgenommenen Messreihen wurden niedrigere Zylindertemperaturdifferenzen ermittelt. In der Tabelle 17 sind die im Rahmen einer Messkampagne vor bzw. nach der Wartung für die **BHKW-Gasottomotorenspezifikation „TCG 2015 V6“** („52“) und **„TCG 2016 V12“** („53“ bis „57“ und „60“) höchsten Zylindertemperaturdifferenzen zusammengestellt. Diese wurden aus der jeweiligen maximalen und minimalen Zylindertemperatur innerhalb der Messreihen ermittelt.

Tabelle 17: Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „52“ (TCG 2015 V6) und „53“ bis „57“ sowie „60“ (alle TCG 2016 V12) aufgenommenen Messreihen

Daten bank- nummer	Datum [TT.MM.JJJJ] vor Wartung			Datum [TT.MM.JJJJ] nach Wartung		
	Temperaturen [°C]					
	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz
52	30.10.2009			16.11.2009		
	589 A3	577 B1	12	588 A3 u. B2	579 A1 u. B1	9
53	28.09.2009			09.10.2009		
	467 A5	315 B4	152	485 B6	352 B4	133
54	16.12.2009			22.12.2009		
	465 B5	352 B3	113	441 B5	351 B3	90
55	05.10.2009			14.10.2009		
	436 B1	359 B3	77	440 B1	352 A1	88
56	05.11.2009			12.11.2009		
	450 B6	323 A1	127	keine Daten verfügbar, da USB-Stick- Zerstörung bei dessen Entfernung		
57	12.10.2009			16.10.2009		
	485 A4	316 A6	169	457 A2	303 A6	154
60	25.09.2009			07.10.2009		
	473 B6	341 B2	132	480 B6	357 B2	123
64	01.12.2008			03.12.2008		
	Keine Daten hinsichtlich der Motorbetriebsparameter verfügbar!					

Wie in der Tabelle 17 ersichtlich ist, wurden für die mit der Motorspezifikation „TCG 2016 V12“ berücksichtigten BHKW „53“ bis „57“ und „60“ maximale Zylindertemperaturdifferenzen innerhalb einer Messreihe im Bereich zwischen 77 °C („55“ vor der Wartung) und 169 °C („57“ vor der Wartung) ermittelt. In Auswertung aller aufgenommenen Messreihen hinsichtlich der Zylindertemperaturen wird vermutet, dass in den Zylindern mit sehr niedrigen Temperaturen (s. a. Anlagen 13a bis 13f) unvollständige Verbrennungsprozesse abgelaufen sind und diese dadurch die Formaldehydbildung beeinflusst haben könnten. Beim Vergleich der für das BHKW „52“ mit der Motorspezifikation „TCG 2015 V6“ als Maximum aufgenommenen Zylindertemperaturen gegenüber den für die Motorspezifikation „TCG 2016 V12“ erfassten maximalen Zylindertemperaturen fällt ein Zylindertemperaturunterschied bis zu 105 °C auf. Für dieses Ergebnis sind die Abbildung 25 („52“ → $T_{\max} = 591$ °C für Zylinder A3, vor Wartung um **09:30 Uhr** bzw. für Zylinder B2, vor der Wartung um **10:15 Uhr**) mit der Anlage 13e („57“ → $T_{\max} = 486$ °C für Zylinder A4, vor der Wartung um **13:45 Uhr**) miteinander verglichen worden. Auffallend ist auch, dass sich die Zylindertemperaturdifferenzen sowohl vor als auch nach der Wartung für das BHKW „55“ am niedrigsten gestaltet haben (Tabelle 17). Diese lagen bei 77 °C bzw. 88 °C. Damit lagen diese Zylindertemperaturdifferenzen deutlich unter den für die anderen BHKW „53“ bis „57“ und „60“ dieser Motorspezifikation „TCG 2016 V12“ innerhalb einer Messreihe ermittelten maximalen Zylindertemperaturdifferenzen. Außerdem lagen diese Zylindertemperaturdifferenzen zwischen vor und nach der Wartung am dichtesten beieinander (Tabelle 17 → 77 °C vor der Wartung, 88 °C nach der Wartung). In Auswertung des Ergebnisses für das BHKW „55“ wird ein evtl. Wartungseinfluss infolge der gemäß Tabelle 15 ausgeführten Wartungstätigkeiten auf die Zylindertemperaturen ausgeschlossen. An diesem BHKW „55“ wurden im Rahmen der planmäßigen Wartung das Schmieröl mit Filter, der Luft- und der Biogasfilter sowie die Zündkerzen gewechselt. Außerdem wurden der Zündzeitpunkt und das Ventilspiel eingestellt, Kompressionsdruck gemessen und eine Endoskopie durchgeführt (vgl. Tabelle 15). Nach der Wartung wurde jedoch eine höhere Zylindertemperaturdifferenz, nämlich 88 °C, gegenüber vor der Wartung mit 77 °C ermittelt.

In Auswertung der o. g. Ausführungen ist zumindest für die in diesem Forschungsvorhaben vorgestellten Untersuchungsergebnisse weder für das BHKW „55“ noch für die BHKW „52“ (TCG 2015 V6), „53“, „54“, „56“, „57“ und „60“ (alle TCG 2016 V12) kein direkter Wartungseinfluss auf die Zylindertemperaturen verifizierbar. Es wird jedoch eingeschätzt, dass für zukünftige Projekte bzw. daraus resultierende Untersuchungen der Einfluss der Zylindertemperaturen auf das Emissionsverhalten hinsichtlich der CO-, NO_x- und HCHO-Emissionen von besonderem Interesse sein dürfte. Die weiteren Überlegungen gehen davon aus, dass bestimmte Motoreinstellungen, z. B. Variation des Verbrennungsluftverhältnisses durch einen höheren Kraftstoffeintrag (Anfettung) zu einer besseren Verbrennung mit höheren Zylindertemperaturen beitragen könnten, wobei jedoch möglicherweise auch eine Erhöhung der NO_x-Emissionen zu beachten wäre. Die mögliche Realisierung hinsichtlich der Verstellung von bestimmten Motoreinstellungen erfordert jedoch die zwingende Einbeziehung der Motorhersteller bzw. der Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, welche die Installation der BHKW durchgeführt haben bzw. den After Sale Service ausführen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auf die Beachtung der thermischen Bauteilbelastungen zu verweisen.

Sowohl für die BHKW „42“, „43“, „45“, „47“ und „48“ mit der **Caterpillar-Gasottomotorspezifikation „G 3412 TA“** als auch für die **Deutz-Zündstrahlmotoren „BF6M 1015 C“** mit den BHKW-Datenbanknummern „75“ bis „78“ wurden ähnliche Untersuchungen, wie für die **MWM-Gasottomotoren „TCG 2015 V6“** bzw. „TCG 2016 V12“ realisiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 18 für die **Caterpillar-Gasottomotoren** bzw. in Tabelle 19 für die **Deutz-Zündstrahlmotoren** zusammengestellt. Für diese Motoren stellen sich ähnliche Tendenzen, wie für die **MWM-Gasottomotorenspezifikation „TCG 2016 V12“** dar, wobei sich jedoch die Zylindertemperaturdifferenzen gegenüber diesen „TCG 2016 V12“, ausgenommen das BHKW mit der Datenbanknummer „55“, deutlich niedriger gestalten. Auch für diese in Tabelle 18 bzw. Tabelle 19 aufgeführten BHKW ist zurzeit kein evtl. direkter Einfluss der in Tabelle 13 bzw. Tabelle 16 für die jeweiligen BHKW genannten Wartungstätigkeiten auf die Zylindertemperaturen nachweisbar. Auffallend sind jedoch beim Betrachten der Anlage 14c (Zylindertemperaturen BHKW „45“) und der Anlage 14e (Zylindertemperaturen BHKW „48“) die jeweils tendenziell geringfügig höheren Zylindertemperaturen nach der Wartung gegenüber vor der Wartung. Ob diese evtl. im Zusammenhang mit den gemäß Wartungsnachweisen (Tabelle 13) kontrollierten Zündkerzen mit dessen Reinigung und ggf. Elektrodenabstandseinstellung stehen könnten, ist nicht beweisbar.

Tabelle 18: Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „42“, „43“, „45“, „47“ und „48“ (alle G 3412 TA) aufgenommenen Messreihen

Daten bank-nummer	Datum [TT.MM.JJJJ] vor Wartung			Datum [TT.MM.JJJJ] nach Wartung		
	Temperaturen [°C]					
	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz
42	keine Messungen vor Wartung			21.10.2009		
				528 B1	483 B4	45
43	12.10.2009			16.10.2009		
	565 A6	493 A5	72	526 A6 u. B6	464 A2	62
45	13.08.2009			17.08.2009		
	514 B3	478 B6	36	519 B3	484 B6	35
47	21.08.2009			31.08.2009		
	521 B5	489 B4	32	520 B5	487 B4	33
48	04.08.2009			06.08.2009		
	499 A3	471 B4	28	506 A3	479 B4	27

Tabelle 19: Aufstellung der maximalen und minimalen Zylindertemperaturen mit resultierender maximaler Temperaturdifferenz von jeweils vor bzw. nach der Wartung für die BHKW „75“ bis „78“ (alle BF6M 1015 C) aufgenommenen Messreihen

Daten bank-nummer	Datum [TT.MM.JJJJ] vor Wartung			Datum [TT.MM.JJJJ] nach Wartung		
	Temperaturen [°C]					
	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz	Maximum Zylinder [-]	Minimum Zylinder [-]	Differenz
75	22.09.2009			01.10.2009		
	544 A2	483 B3	61	545 A2	493 B3	52
76	27.10.2009			03.11.2009		
	527 B2	475 A1	52	511 B2	474 A1	37
77	27.10.2009			03.11.2009		
	549 A2	493 B3	56	546 A2	459 B3	87
78	27.08.2009			04.09.2009		
	557 B2	529 A1	28	544 B3	517 A1	27

7.4.2 Verbrennungsluftverhältnis

In der Abbildung 26 sind die Ergebnisse für die untersuchten BHKW („53“ bis „57“, „60“ u. „64“) mit der Spezifikation „TCG 2016 V12“ hinsichtlich des Verbrennungsluftverhältnisses „ λ “ und des Emissionsverhaltens von HCHO, CO, NO_x bzw. NO₂ (nur „64“) dargestellt. Das einzige in dieses Vorhaben einbezogene BHKW „TCG 2015 V6“ („52“) wurde aus Effizienzgründen sowie zwecks Veranschaulichung gleichfalls in die Abbildung 26 aufgenommen. In dieser sind die für diese BHKW jeweils vor und nach der Wartung als Maximum analysierten HCHO-Werte sowie die ½-stündlich zu der jeweiligen HCHO-Probenahme gemessenen CO-, NO_x- bzw. NO₂-Werte aufgetragen. Demzufolge sind die jeweiligen CO-, NO_x- bzw. NO₂-Werte nicht mit den im Abschnitt 7.2.2 in Abbildung 14 aufgetragenen Emissionswerten identisch. Außerdem sind die zum jeweils ½-stündlichen Zeitbereich der HCHO-Probenahme auf der Basis der in den jeweiligen Messberichten ausgewiesenen O₂-Anteile im Abgas ermittelten Verbrennungsluftverhältnisse in dieser Abbildung 26 ersichtlich. Das BHKW „52“ mit der Spezifikation „TCG 2015 V6“ wurde vor der Wartung mit $\lambda \approx 1,44$ und nach der Wartung mit $\lambda \approx 1,45$ betrieben. Damit stellen sich diese Verbrennungsluftverhältnisse gegenüber den berücksichtigten BHKW mit der Spezifikation „TCG 2016 V12“ niedriger dar. Die BHKW mit dieser Spezifikation „TCG 2016 V12“ wurden überwiegend im λ -Bereich von (1,62...1,67) gefahren, wobei in diesem Zusammenhang von evtl. Bedeutung sein könnte, dass die BHKW „54“ bis „57“ mit Oxidationskatalysator ausgerüstet sind.

Auffallend sind die gegenüber den BHKW „54“ bis „57“ für die BHKW „53“ und „64“ abweichenden Verbrennungsluftverhältnisse. Während BHKW „53“ vor der Wartung mit $\lambda \approx 1,82$ und nach der Wartung bei $\lambda \approx 1,8$ betrieben wurde, betrug das Verbrennungsluftverhältnis für das BHKW „64“ vor der Wartung ca. 1,58 und nach der Wartung ca. 1,59. **In Auswertung der Abbildung 26 lassen sich keine allgemein gültigen Tendenzen hinsichtlich des Einflusses des Verbrennungsluftverhältnisses auf die HCHO-Emissionen formulieren.**

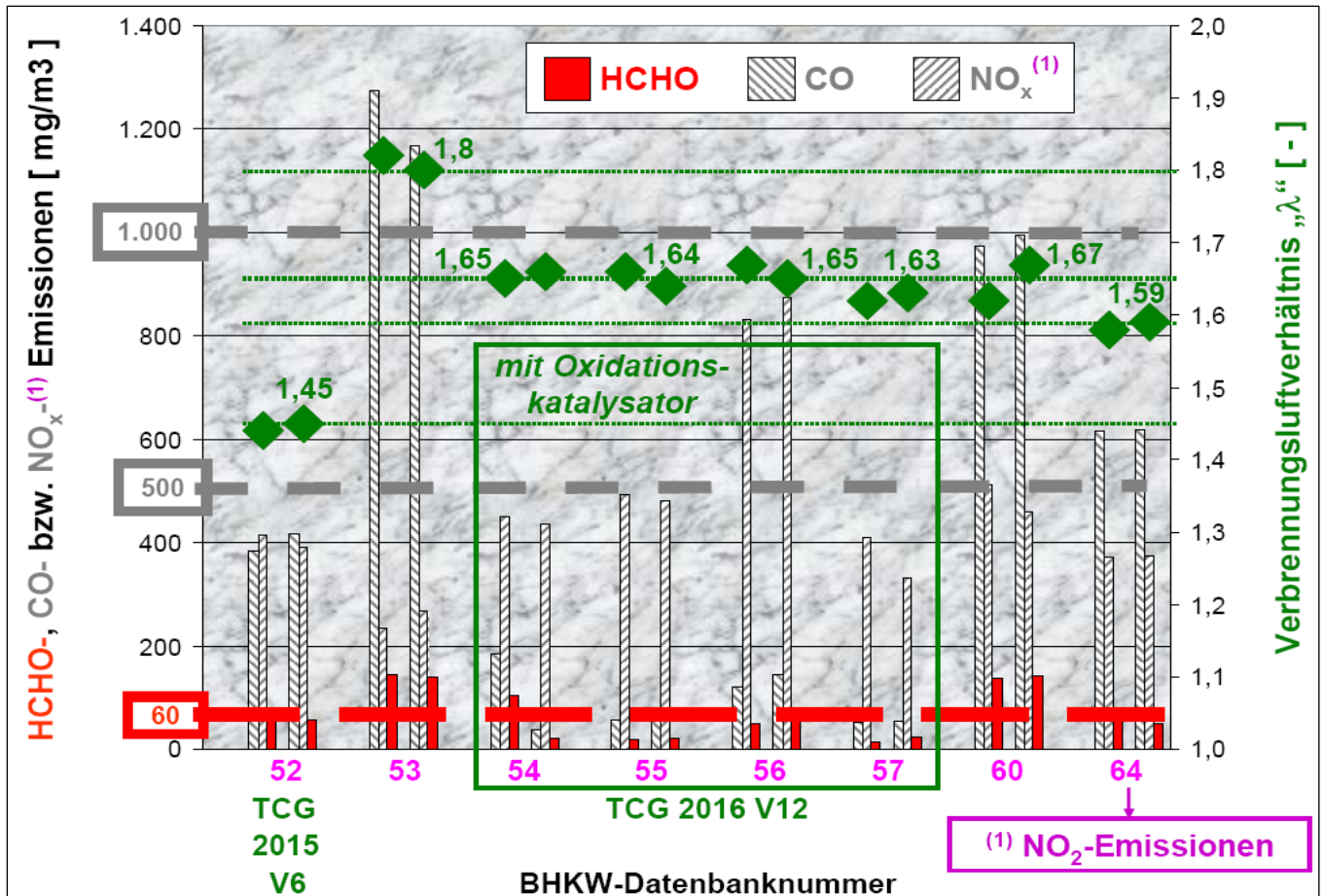


Abbildung 26: Ergebnisse der Untersuchungen zum Verbrennungsluftverhältnis für die MWM-Gasotomotoren

7.5 Biogasaufbereitung

Das Biogas wird zur Stromerzeugung mittels Verbrennungsmotoren in Blockheizkraftwerken eingesetzt. Um einen sicheren Betrieb dieser Motoren zu gewährleisten, muss das Biogas bestimmte Anforderungen erfüllen. Biogas enthält Schwefelwasserstoff und ist wasserdampfgesättigt. Der Schwefelwasserstoff reagiert mit Wasser und Luft zu aggressiven Agenzien, die zu schweren Korrosionsschäden an Leitungen und Motoren führt. Somit ist das Biogas vor der Einspeisung in das BHKW zu reinigen. Die gebräuchlichen Verfahren werden im Folgenden vorgestellt /19, 20, 21/.

7.5.1 Entschwefelung

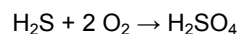
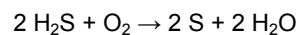
Für die Entschwefelung des Rohbiogases und die Auswahl einer geeigneten Reinigungsmethode ist die Schwefelkonzentration im Biogas von großer Bedeutung. Die Konzentration des Schwefelwasserstoffs zeigt eine Streuung von wenigen ppm bis über 5.000 ppm im Rohbiogas. Es können verschiedene Verfahrensprinzipien wie biologische, absorptive, chemische, adsorptive oder sorptionskatalytische Verfahren unterschieden werden.

7.5.1.1 Biologische Verfahren zur Entschwefelung

Das Prinzip der biologischen Entschwefelung kann sowohl intern im Gasraum des Fermenters als auch extern in nachgeschalteten Biowäschern erfolgen. Biologische Verfahren basieren auf dem Prinzip von Schwefelwasserstoff verzehrenden Mikroorganismen. Diese Verfahren können zur Grobentschwefelung von Biogasen eingesetzt werden und liefern bei der Verwertung in einem Gasmotor ausreichende Reinheiten. Dabei ist es erforderlich, einen Lufteintrag von (3...5) % in den Fermenter vorzunehmen. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff kann sich aber bereits negativ auf den anaeroben Biogasprozess auswirken. Aus Sicherheitsgründen ist es empfehlenswert, den O₂-Wert online (permanent) zu messen. Da das Biogas im Bereich der Vorentschwefelung mit Wasserdampf gesättigt ist, sollte bei der Leitungsführung (Analysegasleitung, Gas-Verbindungsleitungen) auf den Einbau eines Kondensatabscheiders und gegebenenfalls auf die Frostgefahr geachtet werden.

7.5.1.1.1 Entschwefelung im Fermenter durch Lufteinblasung

Dieses Verfahren wird auf allen an dieser Erhebung teilnehmenden Anlagen eingesetzt. Für den biologischen Abbau von Schwefelwasserstoff sind Mikroorganismen, die Thiobakterien, verantwortlich. Sie sind in jedem Reaktor vorhanden und müssen daher nicht zusätzlich eingebracht werden. Thiobakterien setzen Schwefelwasserstoff auf aerobem Weg zu Schwefelsäure und elementarem Schwefel um. Neben Schwefelwasserstoff benötigen die Bakterien auch Kohlenstoff, anorganische Salze (N, P, K) sowie Spurenelemente (Fe, Co, Ni). Diese Substanzen liegen im Fermenter normalerweise in ausreichendem Maße vor. Sauerstoff dagegen, der aufgrund der anaeroben Bedingungen im Reaktor nicht vorhanden ist, muss eigens in den Gasraum eingeblasen werden. Die erforderliche Menge wird durch die Stöchiometrie der Abbaureaktionen vorgegeben:



Diese Abbaureaktionen laufen unter Mitwirkung von Mikroorganismen ab. Bei richtiger Dosierung der eingeblasenen Luftmenge und ausreichender Besiedelungsfläche für die Bakterien ist dies eine einfache, ausgereifte, betriebssichere und dem Stand der Technik entsprechende Entschwefelung bei Biogasanlagen mit Gasverwertung im BHKW.

Der Nachteil an diesem Verfahren ist die sehr grobe Luftzudosierung, die insbesondere bei schwankenden Schwefelwasserstoffanteilen im Biogas nur eine unvollständige Entschwefelung ermöglicht. Bei ungenauer Luftzudosierung kommt es auch zu einem sehr hohen Luftanteil im Biogas. Dieser erhebliche Inertgas- bzw. Sauerstoffanteil beeinträchtigt die Biogasqualität. Ein Vorteil der biologischen Entschwefelung im Fermenter ist, dass der Schwefel über den Austrag der Gärreste wieder in den natürlichen Stoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Bei den chemischen und physikalischen Entschwefelungsmethoden ist dies nicht der Fall.

7.5.1.1.2 Entschwefelung mit Biotropfkörper

Dieses Verfahren wird zusätzlich auf der Anlage mit dem BHKW „54“ eingesetzt. Im Gegensatz zur Entschwefelung im Fermenter findet bei diesem Verfahren die mikrobiologische Reaktion in einem externen Biofilter bzw. Biotropfkörper statt (Abbildung 27). Bei dieser Methode wird dem Biogas die Luft zudosiert, bevor es in einen Reaktor, in dem sich Tropfkörper befinden, geführt wird. Die im Reaktor angesiedelten Bakterien werden ständig mit Nährstofflösung berieselt. Die Schwefelwasserstoffabsorption an die Flüssigkeit und mikrobiologische Oxidation finden am gleichen Ort statt. Bei diesem Verfahren wird ebenso wie bei dem der Entschwefelung im Fermenter (3...5) % Luft dem Biogasvolumenstrom zudosiert. Die Vorteile sind die niedrigen Betriebskosten des Verfahrens und die hohen Abbauraten von bis zu 99 %.

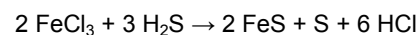
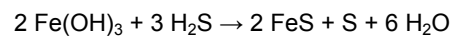


Abbildung 27: Tropfkörper-Biorieselbettreaktor

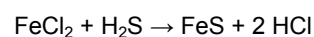
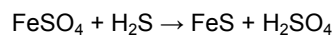
7.5.1.2 Adsorption und Fällung an eisenhaltigen Verbindungen

Bei einem seit langem angewandten Verfahren zur Entschwefelung werden Eisensalze oder Eisenhydroxide eingesetzt. An diese Stoffe bindet sich der Schwefelwasserstoff unter Bildung von Eisensulfiden.

Bei dreiwertigem Eisen:



Bei zweiwertigem Eisen:



Verfahren, wie die Adsorption oder Fällung an oder mit eisenhaltigen Materialien oder die Adsorption an Zinkoxiden, haben geringe Investitionskosten, können aber im Betrieb sehr hohe Kosten verursachen. Die Entschwefelung mittels Aktivkohle ist nur für die Feinentschwefelung geeignet, da bei höheren Schwefelwasserstoffgehalten die Aktivkohle zu schnell beladen wird.

Eisenverbindungen zur Entschwefelung werden auf den Anlagen mit den BHKW „40“, „52“, „60“, „76“, „77“ (Abbildung 28) und „139“ eingesetzt. Auf der Anlage mit dem BHKW „60“ wird hierzu Eisenhydroxid, das aus der Wasseraufbereitung eines hofeigenen Brunnens anfällt, verwendet.



Abbildung 28: Entschwefelung mittels Eisensalzen → Vorratsbehälter der Salzlösung (rechts)

7.5.1.3 Adsorption an Aktivkohle

Bei diesem Verfahren erfolgt die Entfernung des Schwefelwasserstoffes durch Adsorption an der Oberfläche der Aktivkohle. Durch die Imprägnierung der Aktivkohle kann der Reinigungseffekt verbessert werden. Ein sinnvoller Einsatz betrifft die Feinstreinigung bei erforderlichen Konzentrationen im Reingas < 1 ppm. Ein sinnvoller Einsatz erfolgt bei Schwefelkonzentrationen von $(200...400)$ mg/m^3 . Bei höheren Konzentrationen wird die Aktivkohle zu schnell beladen.

Die Aktivkohle kann mit verschiedenen Substanzen imprägniert werden. Am gebräuchlichsten ist eine Imprägnierung mit Kaliumjodid, Kaliumcarbonat oder mit Kaliumpermanganat. Bei der Entschwefelung mit Kaliumjodid (KI) imprägnierter Aktivkohle müssen sowohl Sauerstoff als auch Wasser vorhanden sein. Daher kann diese Aktivkohle für die Entfernung von Schwefel aus luftfreien Biogasen nicht verwendet werden.

Auch bei mit Kaliumcarbonat (K_2CO_3) imprägnierter Aktivkohle gilt, dass diese nicht zur Feinentschwefelung sauerstofffreier Biogase verwendet werden kann. Die Entfernung des Schwefelwasserstoffs findet bei Temperaturen über 50 °C unter der Anwesenheit von Wasserdampf und Sauerstoff statt. Bei einer mit Kaliumpermanganat (KMnO_4) imprägnierten Aktivkohleschüttung wird eine Schwefelwasserstoffkonzentration von 5 mg/m^3 erreicht.

Einen Nachteil der Entschwefelung mittels Aktivkohle stellen die hohen Betriebskosten dar, die sich durch die aufwändige Regenerierung (mit Dampf mit einer Temperatur über 450 °C) oder der notwendigen Deponierung der beladenen Aktivkohle ergeben. Aufgrund der hohen Betriebskosten sollte dieses Verfahren nur zur Feinentschwefelung verwendet werden.

Zusätzlich zur externen biologischen Entschwefelung wird auf der Anlage mit dem BHKW „54“ (Abbildung 29) dieses Verfahren eingesetzt. Welche Art der Imprägnierung im vorliegenden Fall angewandt wird, ist nicht bekannt.



Abbildung 29: Zusätzliche Entschwefelung mittels Aktivkohlefilter vor dem Gaseintritt in das BHKW „54“

7.5.2 Entfeuchtung

Ziel bei der Entfeuchtung ist, den Wasserdampftaupunkt durch verschiedene Behandlungsverfahren zu senken. Rohbiogas ist wasserdampfgesättigt. Eine Entfeuchtung ist zur Verlängerung der Wartungsintervalle und der Erhöhung der Standzeiten der Biogas-BHKW notwendig. Die Auswahl des Entfeuchtungsverfahrens hängt davon ab, welche Anforderungen zu berücksichtigen sind. Die Methode der drucklosen Kondensation erreicht einen Taupunkt von maximal 4 °C. Werte unter dieser Grenze können nur nach der PSA-Methode (gefüllt mit Zeolith oder Silikagel), einer mehrstufigen Behandlung mit Triethylenglykol oder mit der Membrantechnologie erreicht werden.

In der Praxis ist die Erdverlegung der Gasleitung weit verbreitet (Abbildung 30). Hierdurch wird ganzjährig eine Kühlung des Biogasstroms ermöglicht. Abhängig von der Länge der Erdleitung, des Gasvolumenstroms und der Bodentemperatur führt die Abkühlung dazu, dass ein Teil der im Biogas enthaltenen Feuchtigkeit auskondensiert. Die Flüssigkeit sammelt sich an der tiefsten Stelle der Gasleitung am Kondensatablauf. Die Trocknung des Gasstroms findet nur unvollständig statt.

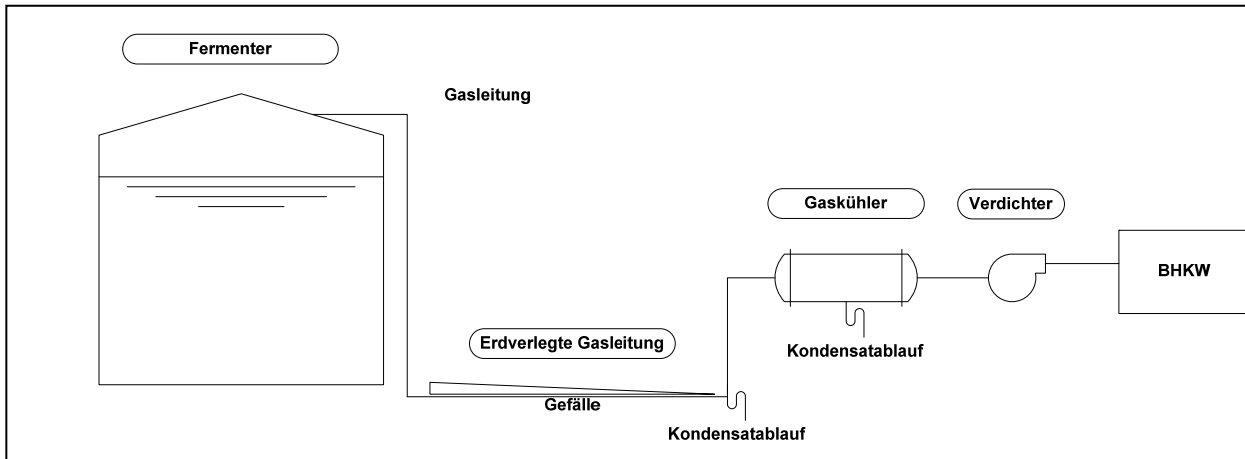


Abbildung 30: Schematische Darstellung der Gasleitung Fermenter/BHKW

Zusätzlich zur erdverlegten Gasleitung werden häufig Trocknungsverfahren eingesetzt, die eine Kühlung des Gasstroms durch Doppelmantel- oder Rohrbündelwärmetauscher vorsehen (Abbildung 31). Das Kühlwasser wird hierbei oftmals durch Kältemaschinen temperiert. Die notwendigen Anlageninvestitionen umfassen die Kältemaschine, den Wärmetauscher, eine Förderpumpe und den Wasserspeicher. Die zum Betrieb notwendige Kälte wird im Aggregat erzeugt. Über die entsprechenden Wärmetauscher wird das Gas zum Kondensieren gebracht.



Abbildung 31: Technische Gaskühlung (z. B. BHKW „60“)

7.6 Biogasanalysenkampagnen

Je BHKW erfolgten vier mobile Gasmessungen der Zusammensetzung, zwei Gasfeuchtemessungen, die Messung der Gastemperatur und die Entnahme von vier Gasproben. Weiterhin wurden Luftdruck und Lufttemperatur am Messtag erfasst. Entsprechend des Messplanes (Anlage 4) wurden bis zum Redaktionsschluss an den in der Anlage 16 nach Datenbanknummer verschlüsselten BHKW Messkampagnen durchgeführt und die entsprechend erhobenen Daten in dieser Anlage 16 zusammengestellt. Die Befragungsprotokolle sind als Anlagen 17a bis 17m und die Messprotokolle als Anlagen 18a bis 18o beigefügt. Alle nachfolgend wiedergegebenen Abbildungen 32 bis 46 enthalten die Mittelwerte der Gaszusammensetzung. Die dargestellten CH₄-, CO₂-, H₂S- und H₂-Werte wurden am AWITE-Standgerät aufgenommen. Die O₂-Messung erfolgte vor Ort, mittels tragbaren Ansyco-Gasmonitor. Spurengas wurde nicht berücksichtigt, sodass die Summen der Gaskomponenten stets ≤ 100 % sind.

7.6.1 BHKW „37“ und „42“

Auf dieser Anlage erfolgte planmäßig nur eine Messung nach Wartung des BHKW. Das Messprotokoll ist in der Anlage 18a ersichtlich. Der Fermenter wird (ein Rührkesselfermenter, ein Nachgärer und ein Gärrestlager) mit einer Substratmischung, bestehend aus 11 m³ Schweinegülle, 2,5 t Maissilage, 2,5 t Körnermais und 7 t Triticale/Gerste kontinuierlich beschickt. Täglich werden insgesamt 24 t Substrat zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit 51 Vol.% Methangehalt an. Durch das DBFZ wurden nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (48...50) Vol.% gemessen. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 772 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Laut Betreiber ist von 132 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Dieser Wert liegt unter den durch das DBFZ ermittelten Werten. Durch das DBFZ wurden Werte von (227...258) ppm Schwefelwasserstoff gemessen. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter als auch im Nachgärer (Oxidation mit Luftsauerstoff).

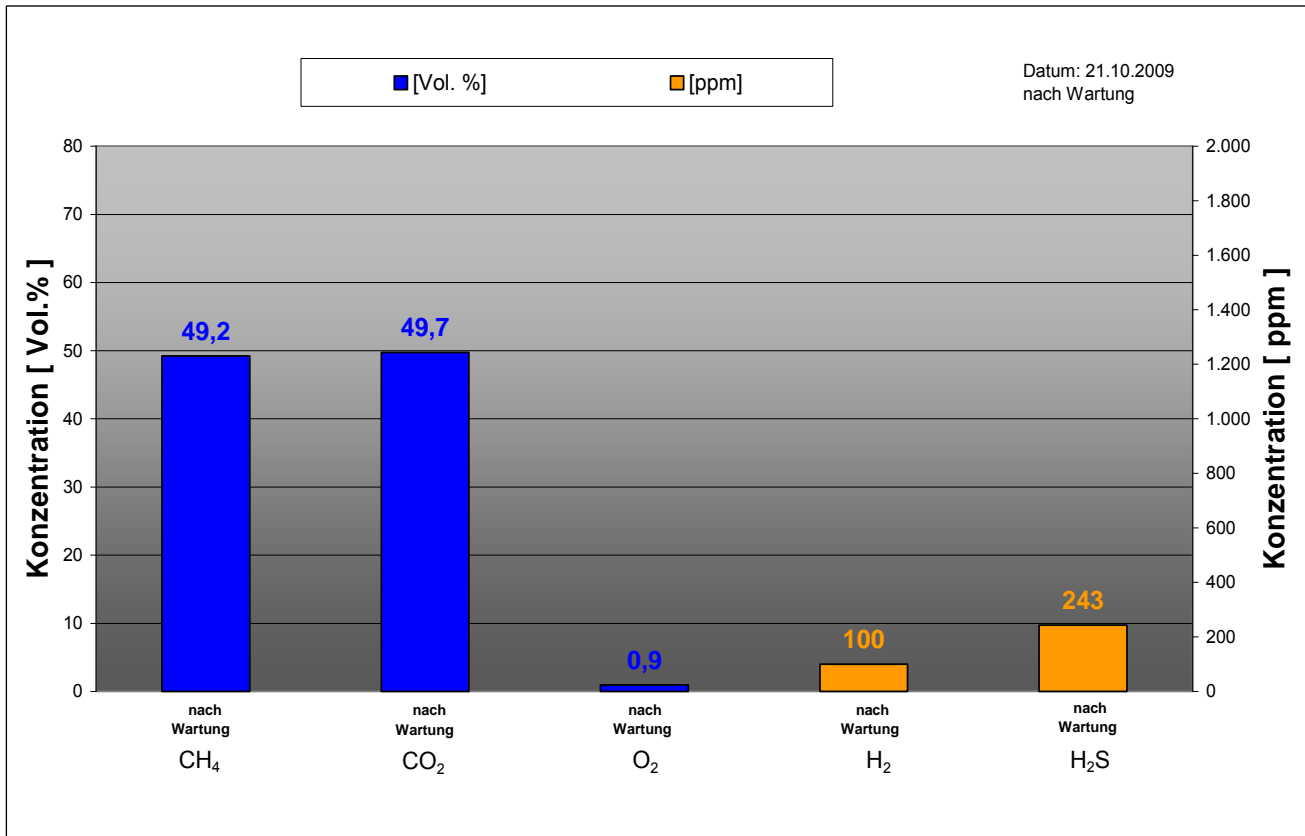


Abbildung 32: Biogaszusammensetzung für BHKW „37“ und „42“

7.6.2 BHKW „38“ und „48“

Auf dieser Anlage werden die Fermenter (zwei in Reihe geschaltete Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus 110 m³ Rindergülle, 4 t Maissilage und 4,5 t Getreideschrot mehrmals am Tage beschickt. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt für die Tage vor der Kampagne Werte zwischen (57...58) Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (54...55) Vol.% mit hoher Konstanz gemessen (Anlage 18b). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gassammellager mit einem Volumen von 2 x 380 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden.

Vom Betreiber wurden an den Tagen vor der Kampagne Schwefelwasserstoffgehalte von (86...160) ppm gemessen. Laut Betreiber ist von 150 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Das entspricht auch den Messungen durch das DBFZ. Nach der Wartung lagen die H₂S-Werte im Biogas im Mittel um 20 ppm niedriger als bei den Messungen vor der Wartung. Ursache können ganz normale Schwankungen der biologischen Entschwefelung sowie der Substratzusammensetzung sein.

Schwankungen dieser Größenordnung sind im Biogasprozess völlig normal und es ist von einem stabilen Betrieb des Fermenters auszugehen. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter (Oxidation mit Luftsauerstoff) und durch Zugabe von Eisenverbindungen.

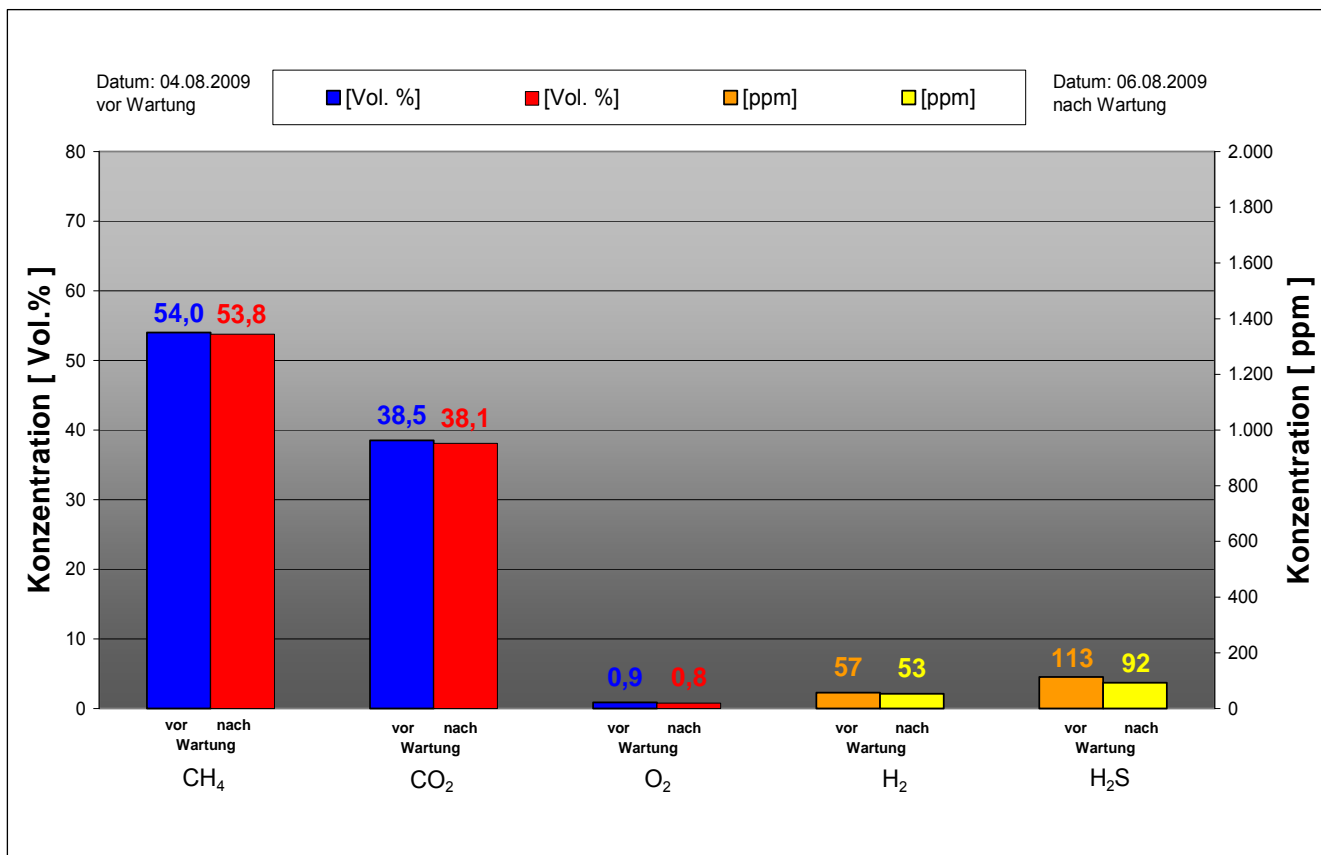


Abbildung 33: Biogaszusammensetzung für BHKW „38“ und „48“

7.6.3 BHKW „40“ und „139“

Auf dieser Anlage werden die Fermenter (zwei Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus Gülle, Getreideschrot und Grünschnitt mehrmals am Tage beschickt. Täglich werden insgesamt 66 t Substrat zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit 57 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW-Motors Methangehalte von (58...61) Vol.% mit hoher Konstanz gemessen. Die jeweiligen Messprotokolle der Mess- bzw. Analysekampagnen vor bzw. nach der Wartung sind als Anlage 18c beigefügt. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Es traten keine größeren Schwankungen des Methangehaltes während der Messung am Motor auf. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 1.000 m³ gesammelt. Somit dürften während der Fermentation auftretende Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Der erhöhte Wasserstoffanteil (140...330) ppm im Biogas deutet auf eine Hemmung der Methanbildner.

Durch die Methanbildner wird zu wenig Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Damit werden die Säurebildner durch ihre eigene Wasserstoffproduktion gehemmt. Somit steigt der Propionsäureanteil, da die geschwächten Säurebildner vorwiegend das energetisch günstigere Ethanol umsetzen. Ursache können eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes sein. Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Laut Betreiber ist von 50 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Das entspricht auch den Messungen vor Ort durch das DBFZ vor der Motorwartung. Die Schwefelwasserstoffkonzentrationen in den entnommenen Gasproben lagen nach der Motorwartung deutlich unter diesen Werten bei knapp 10 ppm. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter (Oxidation mit Luftsauerstoff) und durch Zugabe von Eisenverbindungen.

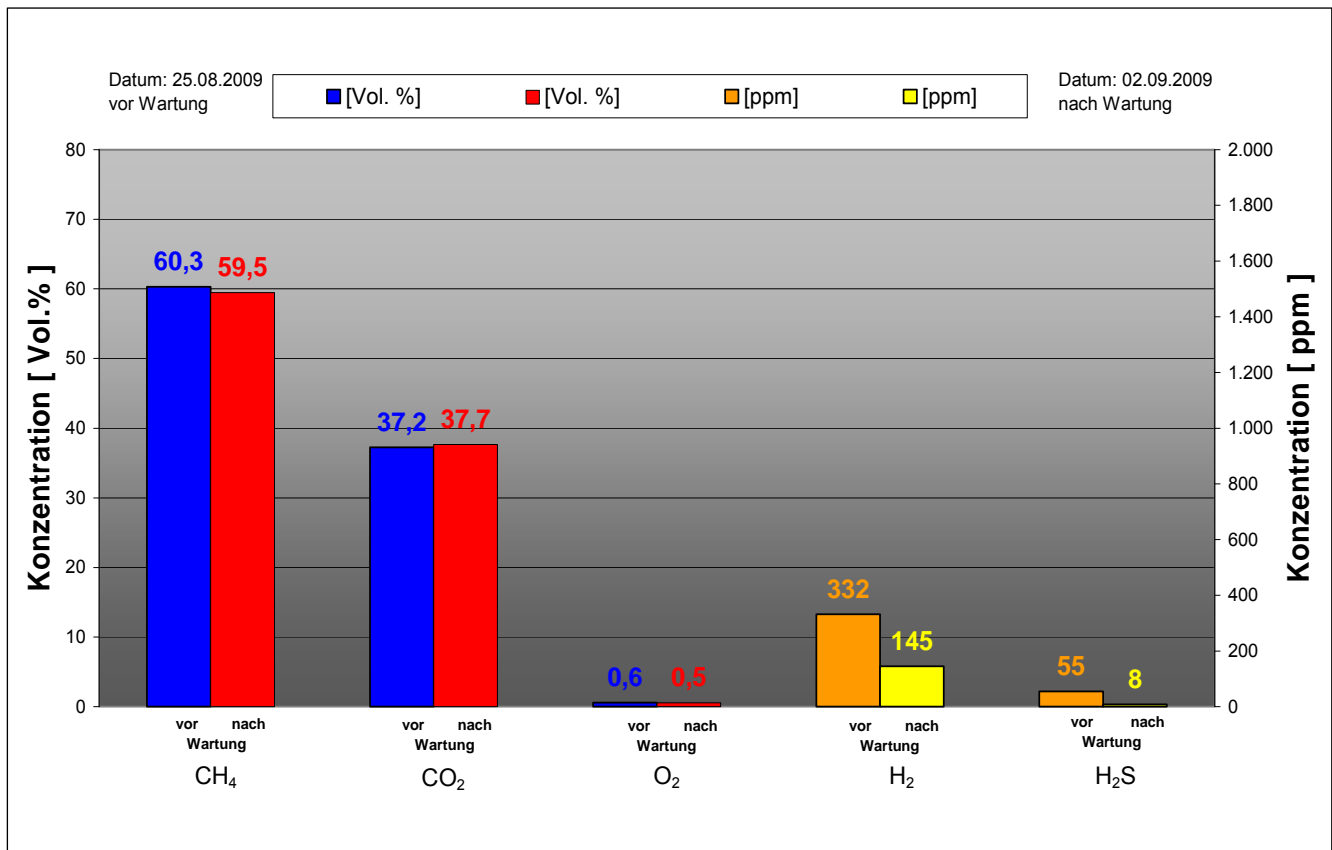


Abbildung 34: Biogaszusammensetzung für BHKW „40“ und „139“

7.6.4 BHKW „43“, „57“ und „75“

Da auf dieser Anlage sowohl Gasotomotoren als auch Zündstrahlmotoren betrieben werden, erfolgten hier zwei Messkampagnen. Die jeweils ermittelten Messdaten sind für die BHKW „43“ und „57“ in der Anlage 18d sowie für das BHKW „75“ in der Anlage 18e zusammengestellt. Auf dieser Anlage werden drei Fermenter (Rührkessel, in Reihe) mit einer Substratmischung, bestehend 70 m³ Rindergülle, 44 t Maissilage, 1 t Grassilage, 1 t Getreide und 1 t Luzernesilage kontinuierlich pro Tag beschickt. Die Gülle wird einmal täglich zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt für die Tage der Kampagne einen Wert von 52 Vol.% an.

Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (51...54) Vol.% mit hoher Konstanz gemessen. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Größere Schwankungen des Methangehaltes während der Messungen am Motor können ausgeschlossen werden. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 1.500 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Vom Betreiber wurden an den Tagen vor der Kampagne Schwefelwasserstoffgehalte von 41 ppm benannt. Während der Kampagne für BHKW „43“ und „57“ lagen die Werte vor der Wartung zwischen (124...182) ppm H₂S (Anlage 18d) und nach der Wartung zwischen (98...124) ppm H₂S (Anlage 18d). Ein unregelmäßiger Betrieb der Entschwefelung kann daher nicht ausgeschlossen werden. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter als auch im Nachgärer (Oxidation mit Luftsauerstoff).

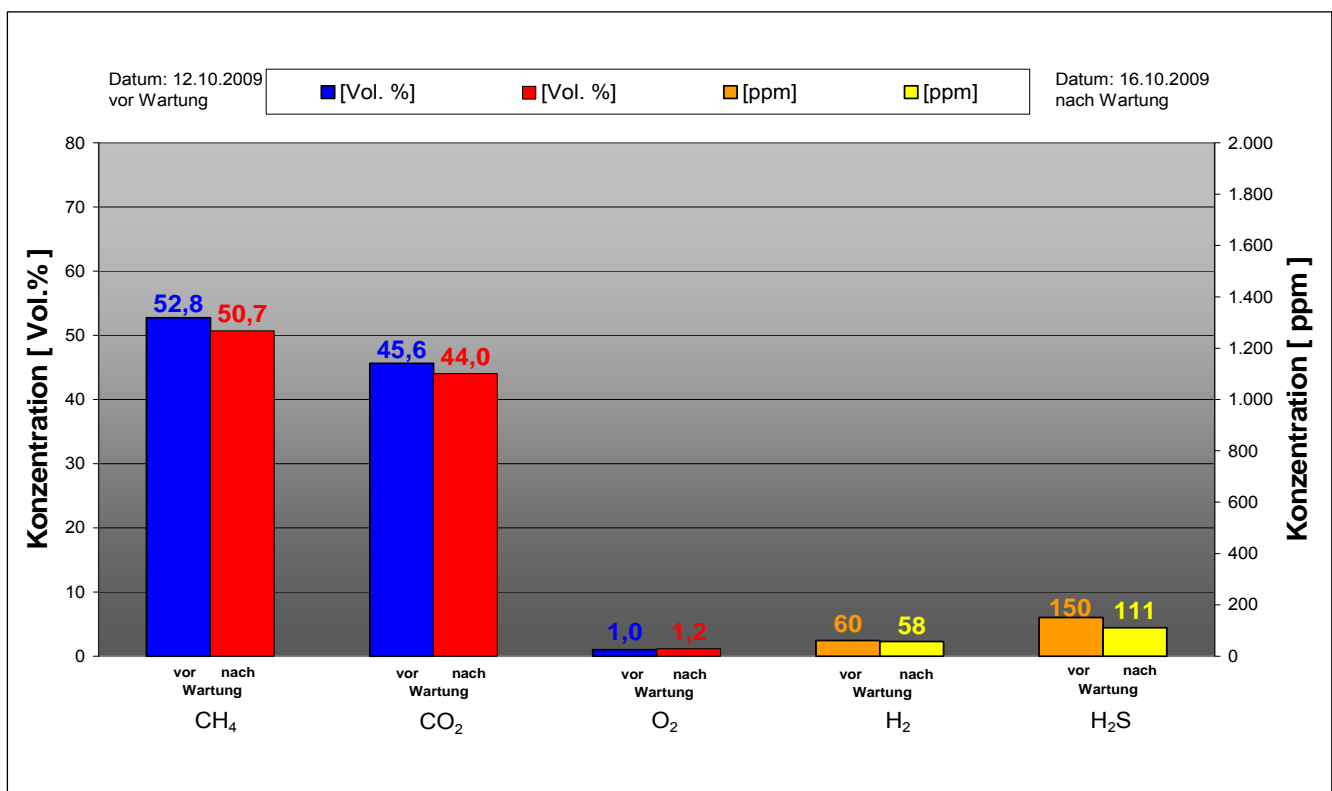


Abbildung 35: Biogaszusammensetzung für BHKW „43“ und „57“

Die Messungen durch das DBFZ ergaben während der Kampagne für BHKW „75“ vor der Wartung H₂S-Werte zwischen (106...220) ppm, nach der Wartung zwischen (92...151) ppm (Anlage 18e). Ein unregelmäßiger Betrieb der Entschwefelung kann daher nicht ausgeschlossen werden. Die Entschwefelung erfolgt sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer (Oxidation mit Luftsauerstoff) biologisch.

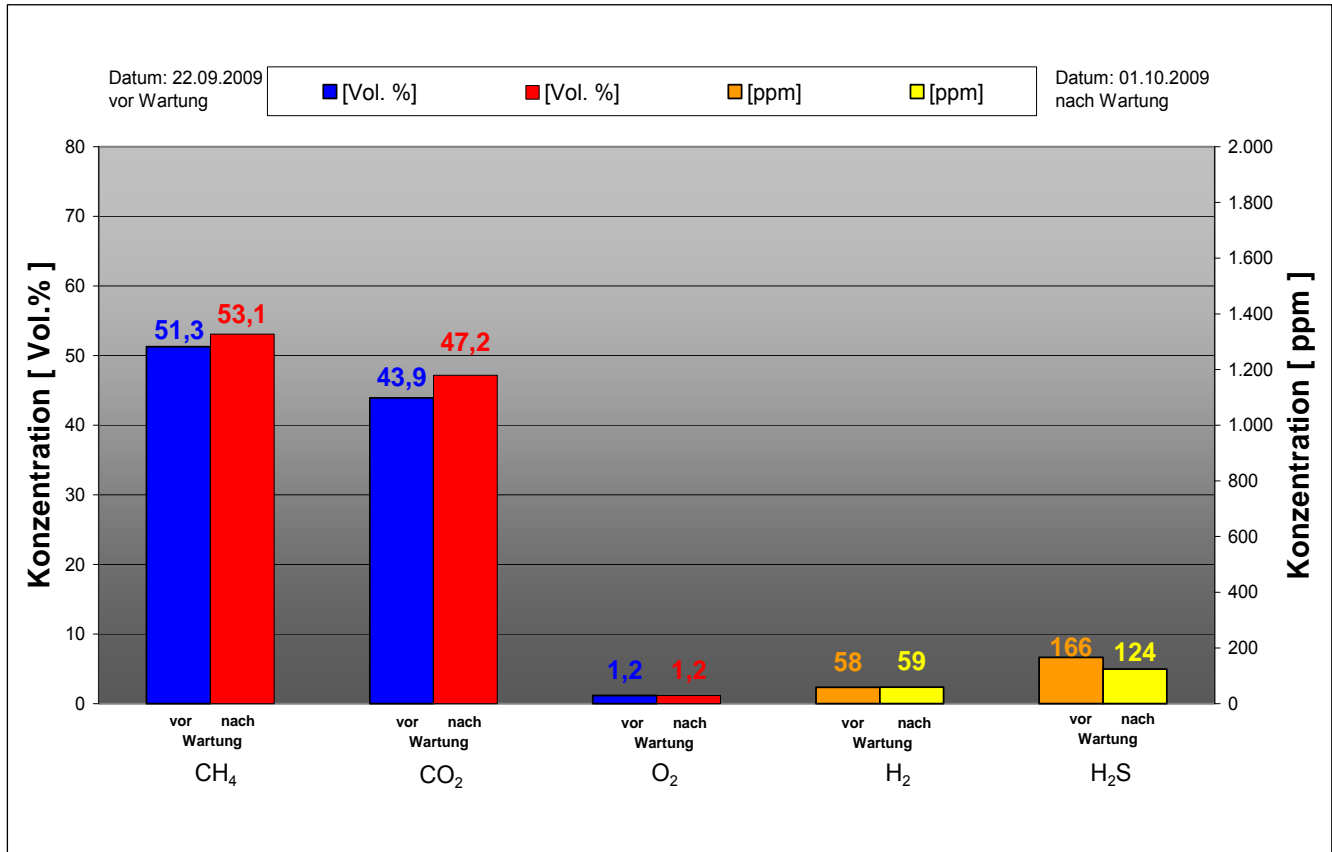


Abbildung 36: Biogaszusammensetzung für BHKW „75“

7.6.5 BHKW „45“ und „78“

Auf dieser Anlage wird ein Fermenter (Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus 25 m³ Rindergülle, 0,8 t Stalldung, 8 t Maissilage, 6 t Grassilage und 3 t Getreide kontinuierlich pro Tag beschickt. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt für die Tage vor der Kampagne einen Wert von 50 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW „45“ Methangehalte von (51...54) Vol% mit hoher Konstanz während der Kampagne gemessen (Anlage 18f). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Größere Schwankungen des Methangehaltes während der Messungen am Motor können ausgeschlossen werden. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 2.100 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden.

Die Messungen für BHKW „45“ ergaben die in der Anlage 18f aufgeführten Resultate. Der erhöhte Wasserstoffanteil von (162...204) ppm vor der Wartung und (208...845) ppm nach der Wartung im Biogas deutet auf eine Hemmung der Methanbildner. Durch die Methanbildner wird zu wenig Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Damit werden die Säurebildner durch ihre eigene Wasserstoffproduktion gehemmt. Somit steigt der Propionsäureanteil, da die geschwächten Säurebildner vorwiegend das energetisch günstigere Ethanol umsetzen. Ursache können eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes sein.

Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Vom Betreiber wurden an den Tagen vor der Kampagne Schwefelwasserstoffgehalte von 50 ppm benannt. Die Messungen durch das DBFZ ergaben vor der Wartung H₂S-Werte zwischen (75...122) ppm, nach der Wartung zwischen (159...462) ppm (Anlage 18f). Störungen der Entschwefelung sind sehr wahrscheinlich. Die Entschwefelung erfolgt biologisch (Oxidation mit Luftsauerstoff).

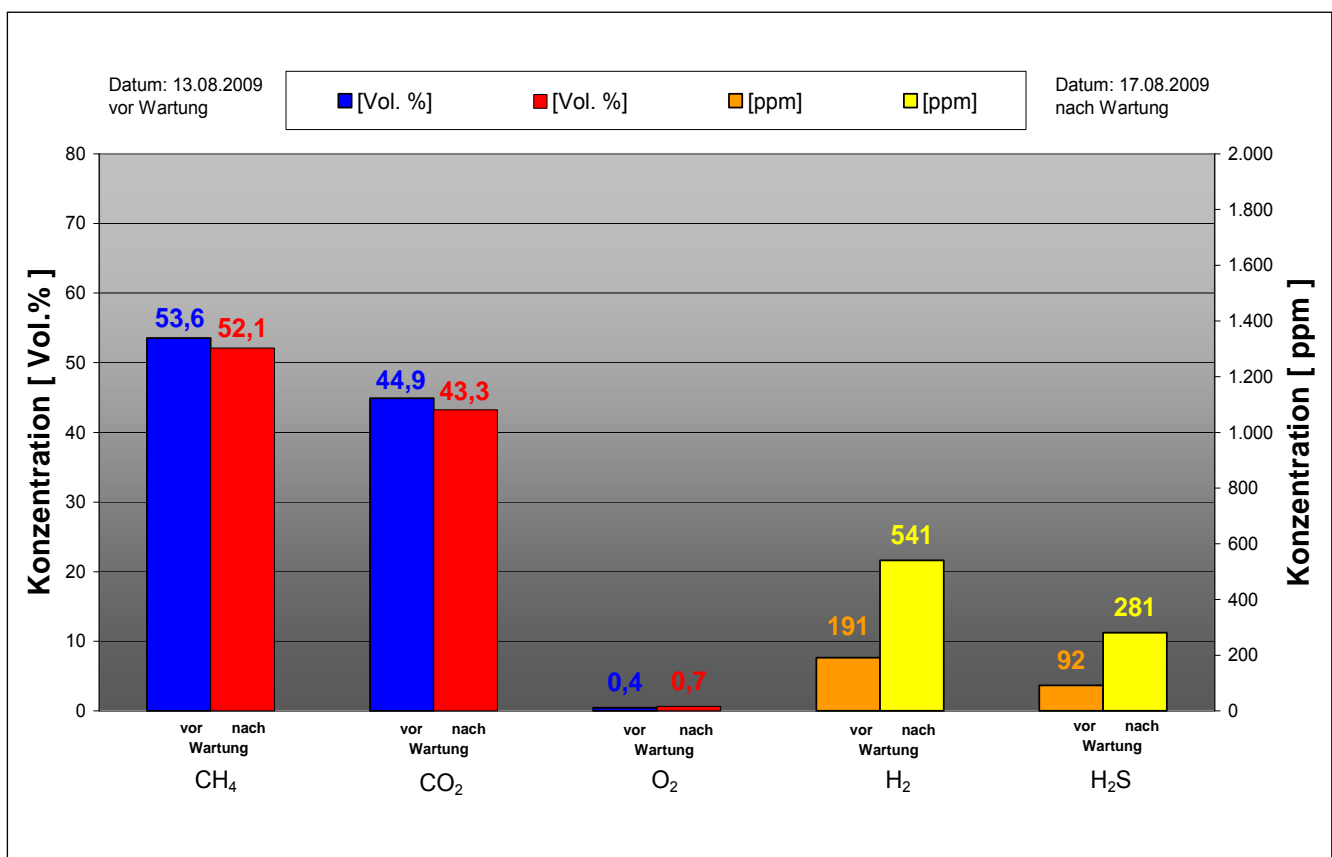


Abbildung 37: Biogaszusammensetzung für BHKW „45“

Die Messdaten für das BHKW „78“ sind in der Anlage 18g aufgeführt. Der erhöhte Wasserstoffanteil von (214...242) ppm vor als auch nach der Wartung im Biogas deutet auf eine Hemmung der Methanbildner. Durch die Methanbildner wird zu wenig Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Damit werden die Säurebildner durch ihre eigene Wasserstoffproduktion gehemmt. Somit steigt der Propionsäureanteil, da die geschwächten Säurebildner vorwiegend das energetisch günstigere Ethanol umsetzen.

Ursache können eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes sein. Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Vom Betreiber wurden an den Tagen vor der Kampagne Schwefelwasserstoffgehalte von 50 ppm benannt. Die Messungen durch das DBFZ ergaben vor der Wartung Werte zwischen (100...128) ppm H₂S (Anlage 18g) und nach der Wartung zwischen (67...113) ppm H₂S (Anlage 18g). Störungen der Entschwefelung sind sehr wahrscheinlich. Die Entschwefelung erfolgt biologisch (Oxidation mit Luftsauerstoff).

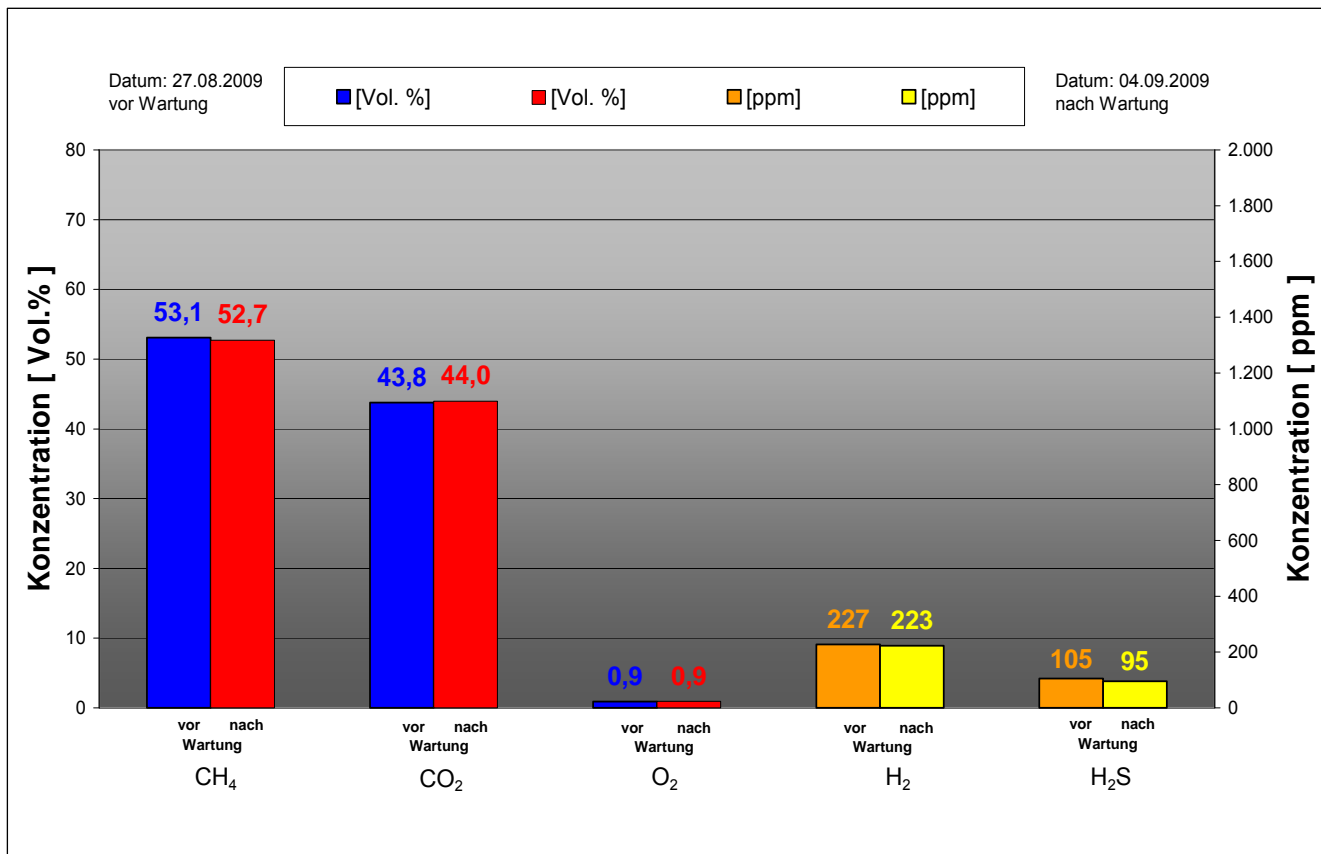


Abbildung 38: Biogaszusammensetzung für BHKW „78“

7.6.6 BHKW „47“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter (ein Fermenter und ein Nachgärer, Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus 30 m³ Gülle, 3 t Gras, 1 t Getreide, 9 t Maissilage und 3 t Mist mehrmals am Tage beschickt. Täglich werden insgesamt 16 t Substrat zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit 51 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (51...54) Vol.% gemessen (Anlage 18h). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Gas in die Motoren eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 3.547 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden.

Laut Betreiber ist von 4 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in die Motoren auszugehen. Das entspricht den ersten drei Messungen während der Emissionsmesskampagne vor der Motorenwartung durch das DBFZ. Die letzte Messung ergab 15 ppm Schwefelwasserstoff. Während der Messkampagne nach der Motorwartung wurden bei allen Messungen Werte von (34...43) ppm Schwefelwasserstoff ermittelt (Anlage 18h). Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter und im Nachgärer (Oxidation mit Luftsauerstoff).

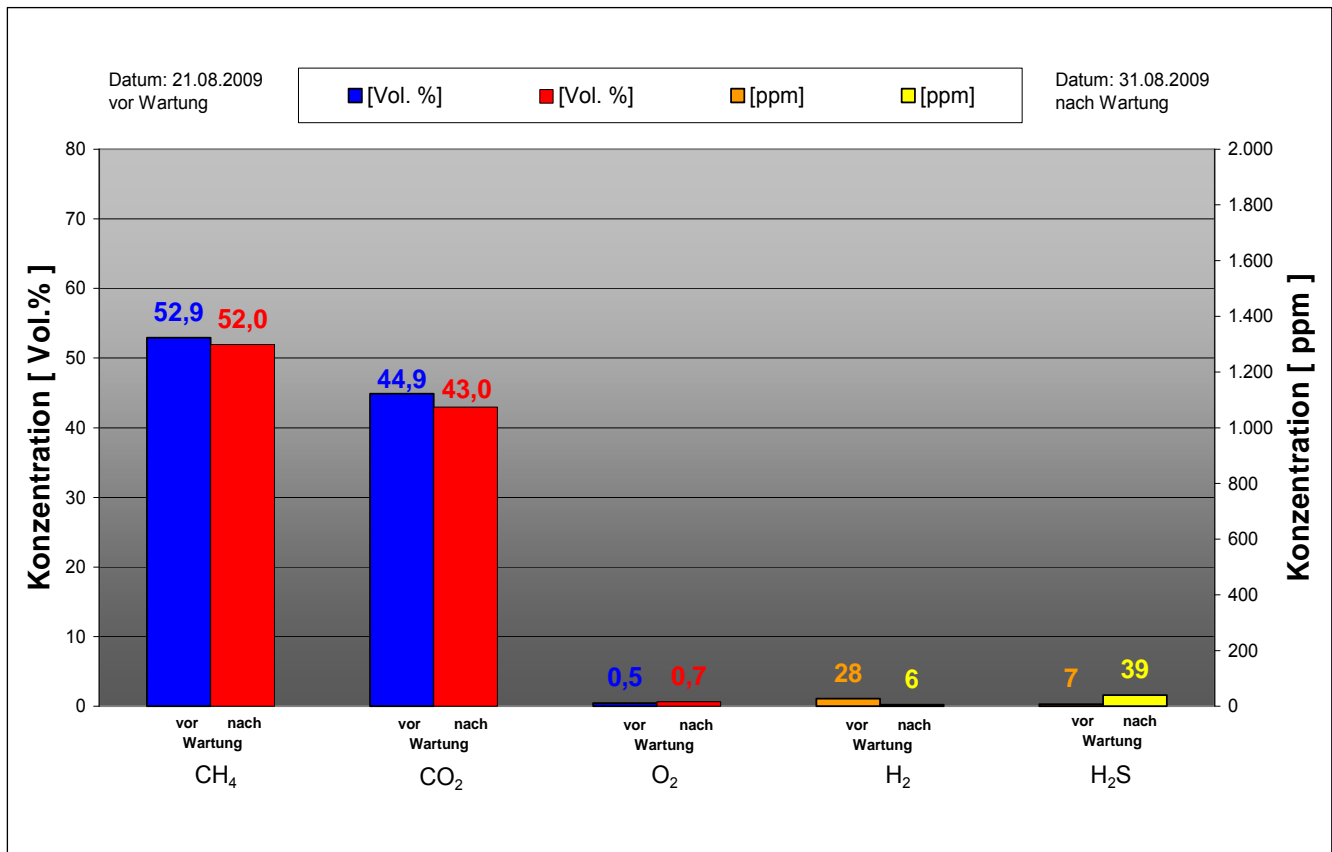


Abbildung 39: Biogaszusammensetzung für BHKW „47“

7.6.7 BHKW „52“

Auf dieser Anlage wird ein Fermenter (Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus 96 % Rindergülle, 3 % Silage und 1 % Getreide, kontinuierlich beschickt. Laut Betreiberbefragung schwankt die tägliche Substratzugabe zwischen 150 kg und 1.000 kg. Der Fermenter läuft nicht optimal. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt für die Tage der Kampagne einen Wert von (54...56) Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (52...55) Vol.% gemessen (Anlage 18i). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Größere Schwankungen des Methangehaltes während der Messungen am Motor können ausgeschlossen werden. Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 200 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden.

Vom Betreiber wurden an den Tagen vor der Kampagne Schwefelwasserstoffgehalte von (100...400) ppm benannt. Die Messungen durch das DBFZ ergaben während der Kampagne eine erhebliche Streuung. Vor der Wartung lagen diese Werte zwischen 58 ppm und 95 ppm H₂S (Anlage 18i). Nach der Wartung lag die Schwefelwasserstoffkonzentration zwischen (672...740) ppm (Anlage 18i). Eine Störung der Entschwefelung kann daher nicht ausgeschlossen werden. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter (Oxidation mit Luftsauerstoff) und durch Zugabe von Eisensalzen. Diese Eisensalzzugabe erfolgt wahrscheinlich unregelmäßig, denn diese Salze können den pH-Wert senken und damit die Fermentation negativ beeinflussen.

Nach Auskunft des Betreibers liegt der Wert für flüchtige organische Säuren mit 8.500 mg/l sehr hoch. Der Propionsäuregehalt liegt ebenfalls zu hoch. Der sehr hohe Wasserstoffanteil von (1.023...1.745) ppm (Anlage 18i) im Biogas weist auf eine Hemmung der Methanbildner. Durch die Methanbildner wird zu wenig Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Damit werden die Säurebildner durch ihre eigene Wasserstoffproduktion gehemmt. Der Propionsäureanteil steigt, da die geschwächten Säurebildner nunmehr vorwiegend das energetisch günstigere Ethanol umsetzen. Ursache ist eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes. Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Hohe Schwefelwasserstoffwerte weisen auf ein sehr sulfatreiches Substrat. Insgesamt ist der Fermentationsprozess während der Kampagne als gestört einzustufen.

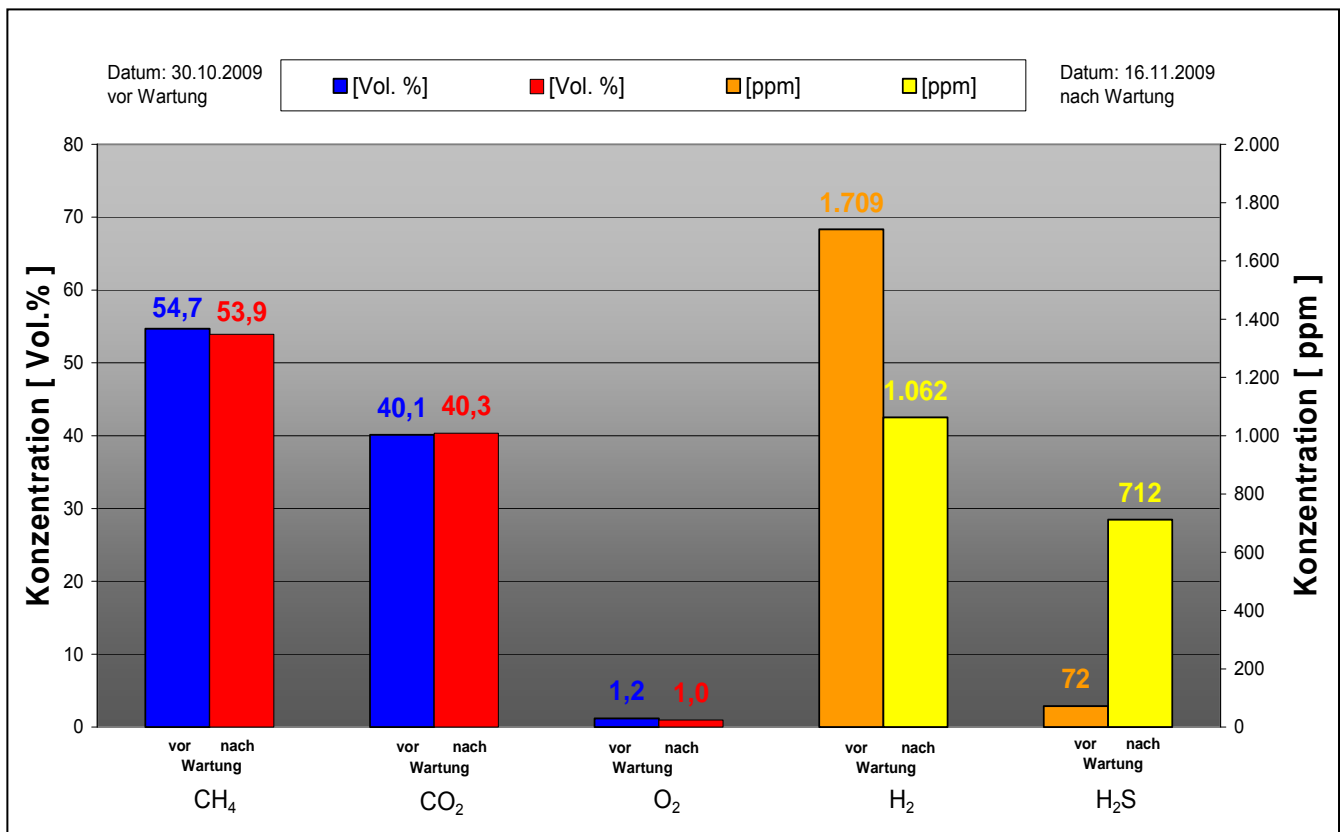


Abbildung 40: Biogaszusammensetzung für BHKW „52“

7.6.8 BHKW „53“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter mit einer Substratmischung, bestehend aus 120 m³ Gülle und 12 t Maissilage beschickt. Der Nachgärer wird täglich mit 40 m³ unvergorener Gülle beschickt. Diese Menge wird täglich in mehreren Portionen zugegeben (ein Rührkesselfermenter und ein gasdicht abgedeckter Nachgärer). Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit (54...56) Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW diese Methangehalte bestätigt (Anlage 18j). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Gas in den Motor gelangt, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 4.200 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Laut Betreiber bewegt sich der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas bei Einspeisung in den Motor zwischen (30...50) ppm. Vor der Motorwartung wurden durch das DBFZ Schwefelwasserstoffwerte zwischen (51...59) ppm ermittelt (Anlage 18j). Nach der Wartung lagen diese um den Faktor „10“ höher, zwischen (414...555) ppm H₂S (Anlage 18j)! Zwischen diesen Kampagnen gab es laut mündlicher Auskunft des Betreibers auf der Anlage eine Havarie, in deren Folge die Biogasanlage zwei Tage nicht in Betrieb war. Weitere Informationen waren nicht zu erhalten. Die Entschwefelung erfolgt sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer biologisch (Oxidation mit Luftsauerstoff).

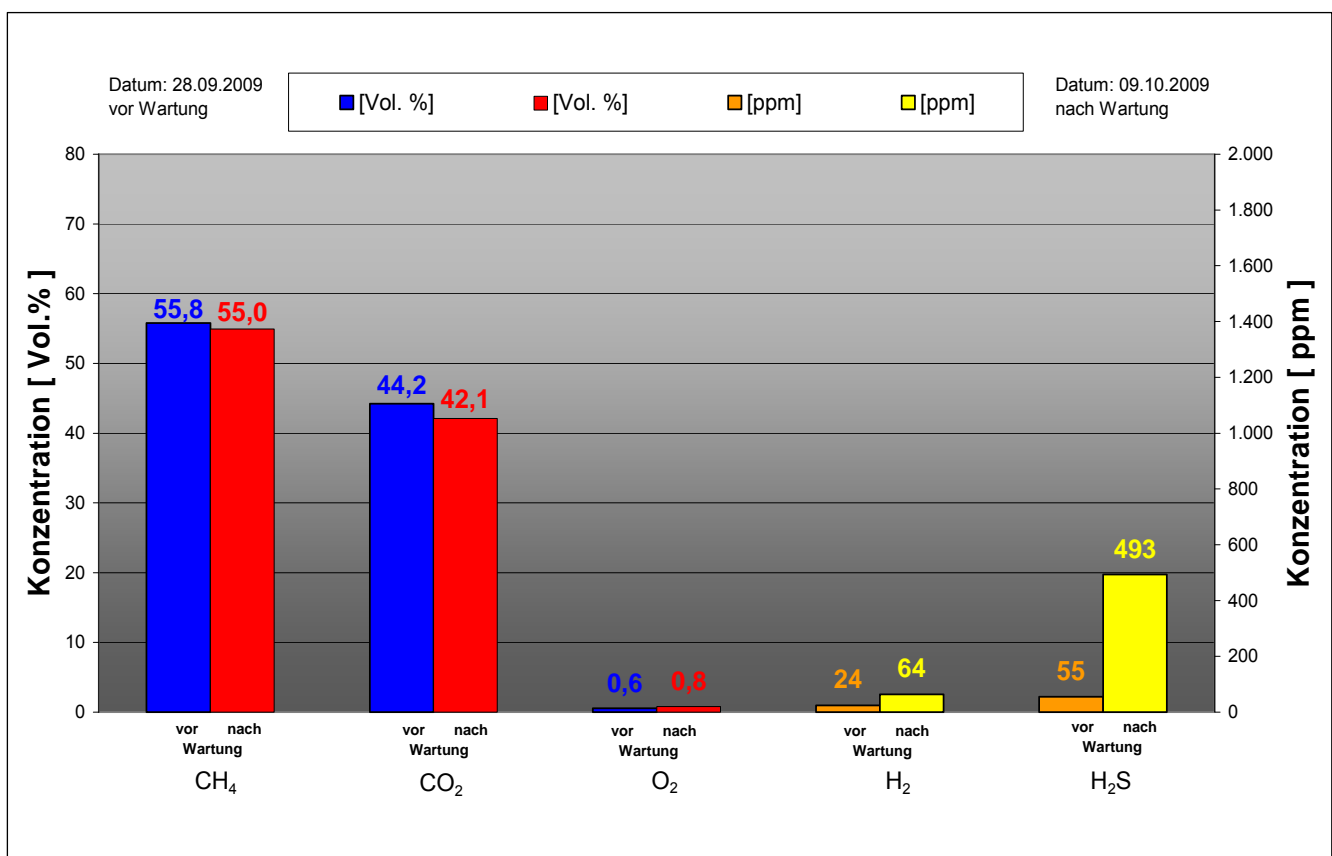


Abbildung 41: Biogaszusammensetzung für BHKW „53“

7.6.9 BHKW „54“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter (Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus (150...160) m³ Rindergülle, (2,5...3) t Roggenschrot und 2,5 t Maissilage kontinuierlich beschickt. Der Betreiber misst die Methankonzentration selbst und gibt diese mit 52 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW geringere Werte ermittelt. Die jeweils vor bzw. nach der Wartung ermittelten Messergebnisse sind in der Anlage 18k einsehbar. Demnach wurden vor und nach der Wartung Methankonzentrationen zwischen (46...50) Vol.% gemessen. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse beider Messkampagnen festgestellt. Bevor das Gas in die Motoren eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Laut Betreiber beträgt der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas bei Einspeisung in die Motoren weniger als 1 ppm. Vor der Motorwartung wurden durch das DBFZ Schwefelwasserstoffwerte zwischen (9...19) ppm ermittelt (Anlage 18k). Nach der Wartung lagen diese Werte zwischen (8...10) ppm (Anlage 18k). Die Entschwefelung erfolgt extern biologisch im Rieselbettreaktor (Oxidation mit Luftsauerstoff) mit nachfolgender Feinentschwefelung über Aktivkohlefilter. Die sehr niedrigen und somit sehr guten Werte für Schwefelwasserstoff sind Folge der gründlichen Entschwefelung.

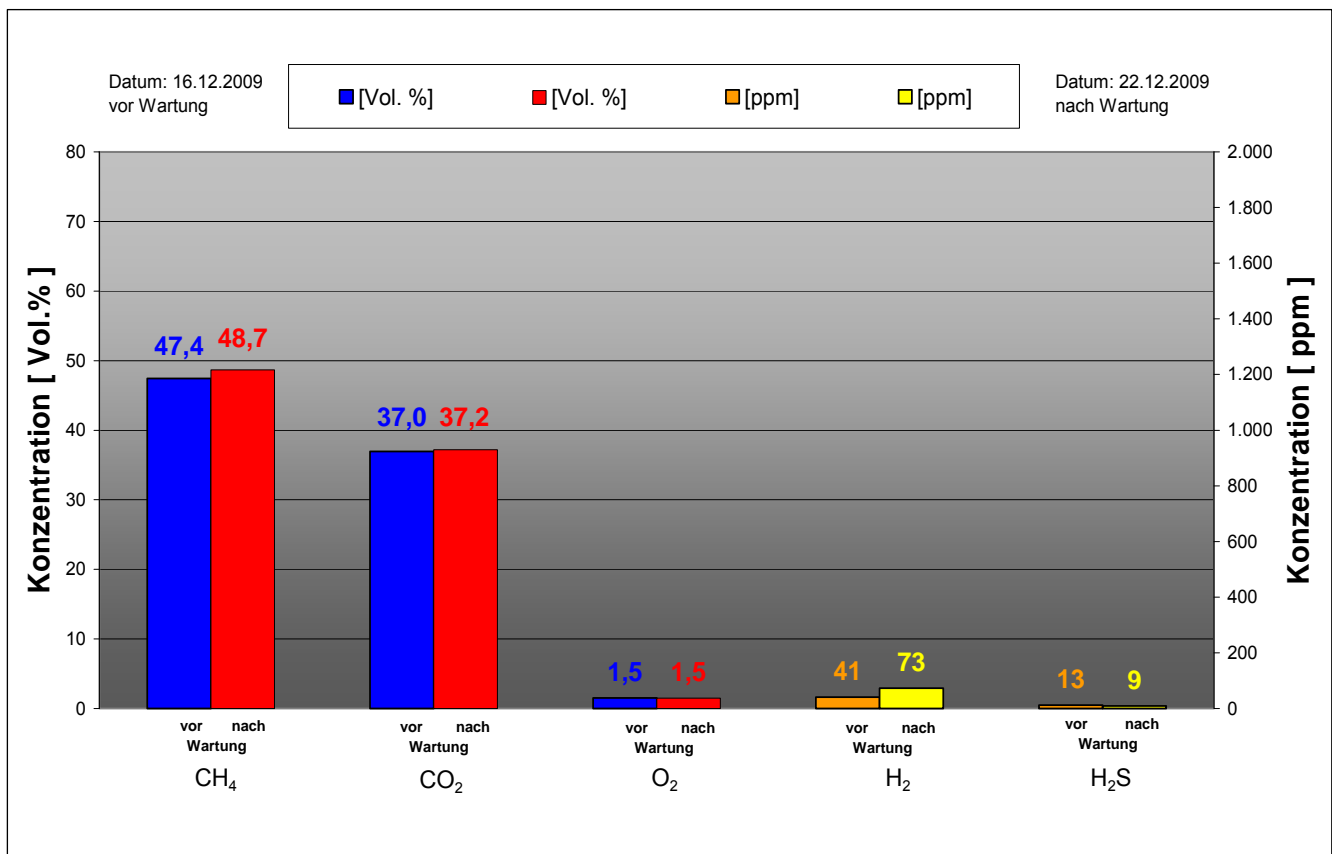


Abbildung 42: Biogaszusammensetzung für BHKW „54“

7.6.10 BHKW „55“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter (ein Rührkesselfermenter, ein Nachgärer, ein Gärrestlager, überdacht) mit einer Substratmischung, bestehend aus 59 % Gülle, 30 % Maissilage, 3 % Getreide und 8 % Anweilsilage stündlich beschickt. Täglich werden insgesamt 50,5 t Substrat zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit (51...54) Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW ebenfalls Methangehalte von (51...54) Vol.% gemessen (Anlage 18I). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt.

Bevor das Gas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 3.700 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden. Der erhöhte Wasserstoffanteil von (184...219) ppm im Biogas deutet auf eine Hemmung der Methanbildner. Durch die Methanbildner wird zu wenig Wasserstoff zu Methan umgesetzt. Damit werden die Säurebildner durch ihre eigene Wasserstoffproduktion gehemmt. Somit steigt der Propionsäureanteil, da die geschwächten Säurebildner vorwiegend das energetisch günstigere Ethanol umsetzen. Ursache können eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes sein. Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Laut Betreiber ist von (100...150) ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Durch das DBFZ wurden vor der Wartung Werte von (113...151) ppm H₂S gemessen (Anlage 18I), nach der Wartung wurden stets etwa doppelt so hohe Werte, und zwar (239...253) ppm H₂S, gemessen (Anlage 18I). Die Entschwefelung erfolgt sowohl im Fermenter als auch im Nachgärer (Oxidation mit Luftsauerstoff) biologisch.

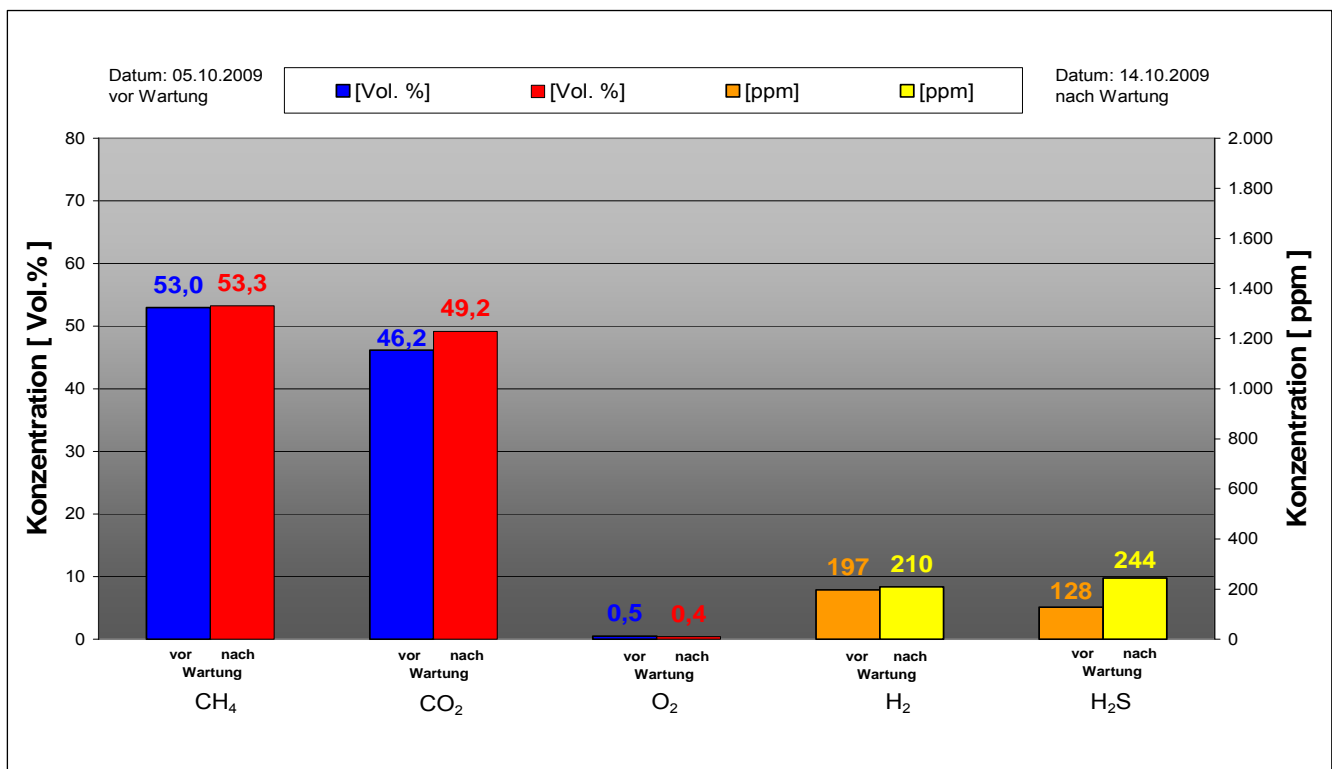


Abbildung 43: Biogaszusammensetzung für BHKW „55“

7.6.11 BHKW „56“ und „129“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter (Rührkessel) mit einer Substratmischung, bestehend aus Schweinegülle, Fettabscheiderfett und Hühnerkot beschickt. Mengenmäßige Angaben wurden von diesem Betreiber nicht gemacht. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit 70 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden sowohl vor als auch nach der Wartung des BHKW diese Methangehalte weitestgehend bestätigt (Anlage 18m). Es wurden vor der Wartung Methankonzentrationen zwischen (64...69) Vol.% und nach der Wartung zwischen (62...67) Vol.% gemessen. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Gas in die Motoren eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager ausgeglichen werden. Laut Betreiber bewegt sich der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas bei Einspeisung in den Motor zwischen (1...13) ppm. Vor der Motorwartung wurden durch das DBFZ Schwefelwasserstoffwerte zwischen (13...47) ppm ermittelt (Anlage 18m). Nach der Wartung lagen diese Werte zwischen (8...20) ppm (Anlage 18m). Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Fermenter (Oxidation mit Luftsauerstoff). Die sehr niedrigen und somit sehr guten Werte für Schwefelwasserstoff können auf das sulfatarme Substrat (Fette) zurückgeführt werden.

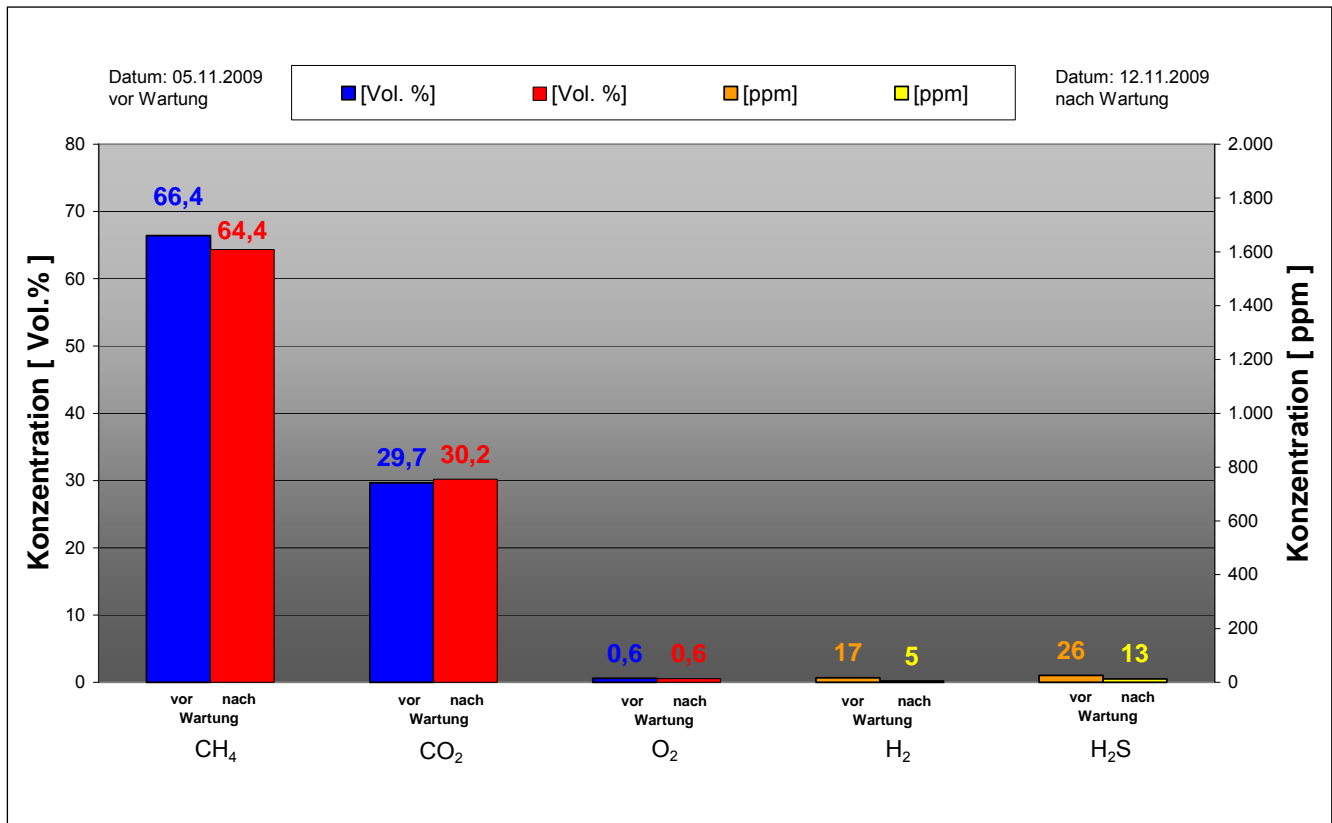


Abbildung 44: Biogaszusammensetzung für BHKW „56“

Für BHKW „129“ erfolgten keine Messungen, da dieses aufgrund einer Havarie nicht betriebsbereit war. Wie in bereits vorangegangenen Abschnitten erwähnt, war der Oxidationskatalysator an den Terminen zur Durchführung der Emissionsmess- und Biogasanalysekampagnen sowohl vor als auch nach der Wartung defekt.

7.6.12 BHKW „60“

Auf dieser Anlage wird der Fermenter (Doppelkammer nach Pfefferkorn) mit einer Substratmischung, bestehend aus 100 m³ Rindergülle, 10 m³ Schweinegülle, 23 m³ Rezirkulat, 3,5 t Maissilage, 3 t Anwelksilage und 1 t Getreideschrot verteilt auf bis zu 19 Portionen pro Tag beschickt. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit 57 Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte ebenfalls von (56,7...58,3) Vol.% gemessen. Die Messprotokolle sind als Anlage 18n beigefügt. Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und andererseits anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ. Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Es traten keine größeren Schwankungen des Methangehaltes während der Messungen an den Motoren auf. Bevor das Gas in die Motoren eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher mit einem Volumen von 600 m³ gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager gut ausgeglichen werden.

Laut Betreiber ist von 150 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Die Messungen während der Messkampagne durch das DBFZ ergaben vor der Motorwartung Werte zwischen (76...221) ppm (Anlage 18n), nach der Motorwartung zwischen 66 ppm und 160 ppm H₂S (Anlage 18n). Diese doch erheblichen Schwankungen der Konzentration von Schwefelwasserstoff können durch die Mischzyklen des nach dem Pfefferkorn-Prinzip arbeitenden Hauptfermenters verursacht werden. Die Entschwefelung erfolgt biologisch im Nachgärer und Gärrestbehälter (Oxidation mit Luftsauerstoff) sowie durch Zugabe von Eisensalzen, die hier bei der Aufbereitung eisenhaltigen Wassers anfallen.

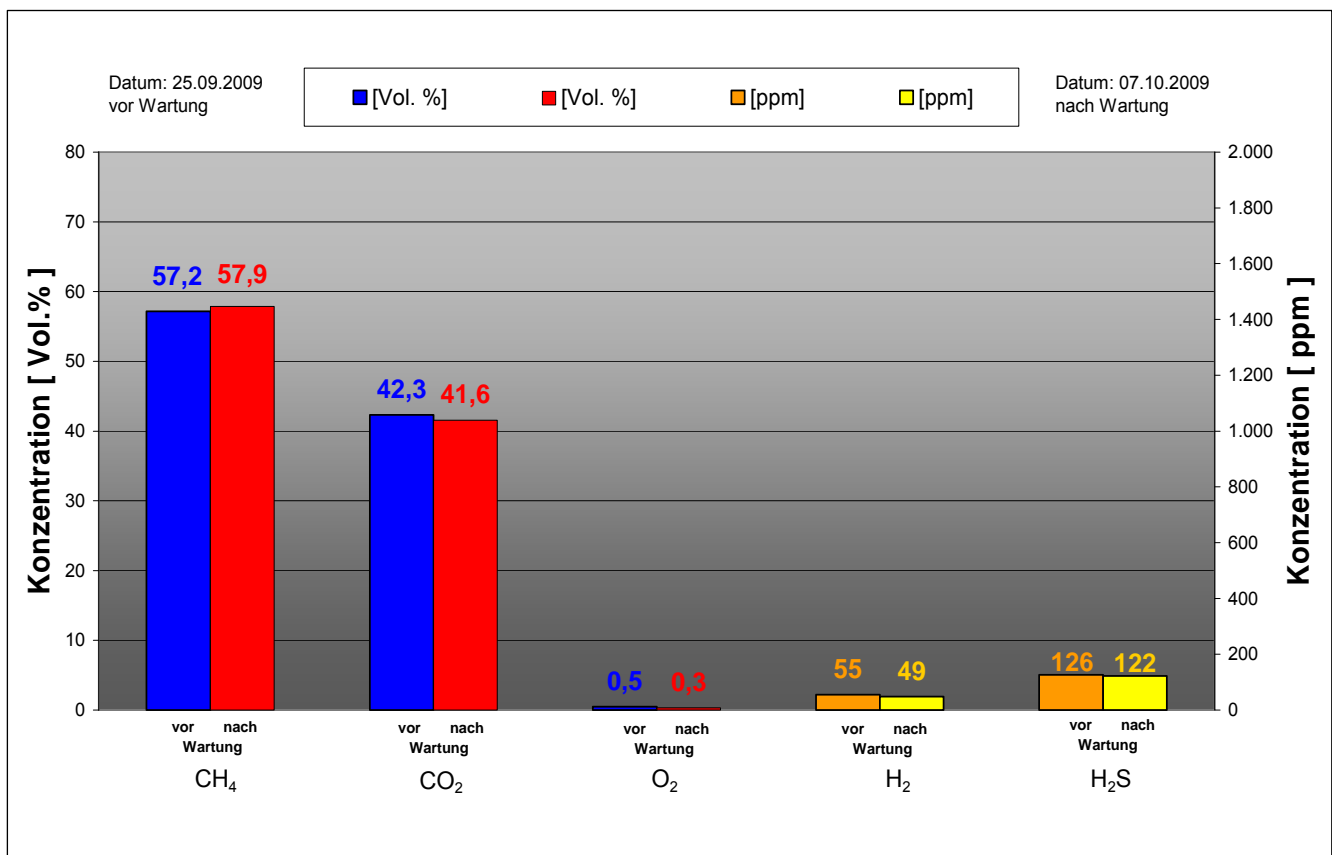


Abbildung 45: Biogaszusammensetzung für BHKW „60“

7.6.13 BHKW „76“ und „77“

Auf dieser Anlage wird der erste Fermenter (Fermenter 1 mesophil, Fermenter 2 thermophil → beide Rührkessel, ein offenes Gärrestlager) mit einer Substratmischung, bestehend aus 24,6 t Rindergülle, 2,7 t Maissilage, 3,5 t Anweilksilage, 0,6 t Restfutter, 3,5 t Abdecke, 0,8 t Kartoffeln und 1 t Getreide beschickt. Die Zugabe erfolgt stündlich. Täglich werden insgesamt 36,7 t Substrat zugegeben. Der Betreiber misst selbst die Methankonzentration und gibt diese mit (52...53) Vol.% an. Durch das DBFZ wurden vor als auch nach der Wartung des BHKW Methangehalte von (50...54) Vol.% gemessen (Anlage 18o). Diese Messungen erfolgten zum einen mit dem mobilen Gasmonitor vor Ort und zum anderen anhand gezogener Gasproben am AWITE-Standgerät in den Laboratorien des DBFZ.

Es wurde eine hohe Übereinstimmung der Messergebnisse festgestellt. Bevor das Biogas in den Motor eingespeist wird, wird es in einem Gasspeicher, einem Gassack mit einem Volumen von 300 m³, gesammelt. Somit dürften eventuell während der Fermentation auftretende geringe Schwankungen der Gaszusammensetzung durch das Gaslager ausgeglichen werden. Schwankungen durch Entmischung der Gase (unterschiedliche Dichte) können nicht ausgeschlossen werden. Ein leicht erhöhter Wasserstoffanteil im Biogas deutet auf eine Hemmung der Methanbildner. Ursache können eine verstärkte Hydrolyse durch zu reichliche Zugabe kohlenhydratreichen Substrates und/oder eine Störung des anaeroben Zustandes sein. Nährstoffmangel kann ausgeschlossen werden, da der Fermenter auch mit Gülle beschickt wird. Laut Betreiber ist von (120...150) ppm Schwefelwasserstoff im Biogas bei Einspeisung in den Motor auszugehen. Durch das DBFZ wurden vor der Wartung Werte zwischen (166...184) ppm H₂S (Anlage 18o) und nach der Wartung von (247...266) ppm (Anlage 18o) gemessen. Die Entschwefelung erfolgt biologisch (Oxidation mit Luftsauerstoff) im Fermenter sowie durch Zugabe von Eisensalzen, in diesem Fall von Eisensulfat. Ursachen können die diskontinuierliche Eisensalzzugabe als auch Schwankungen der konkreten Substratzusammensetzung sein.

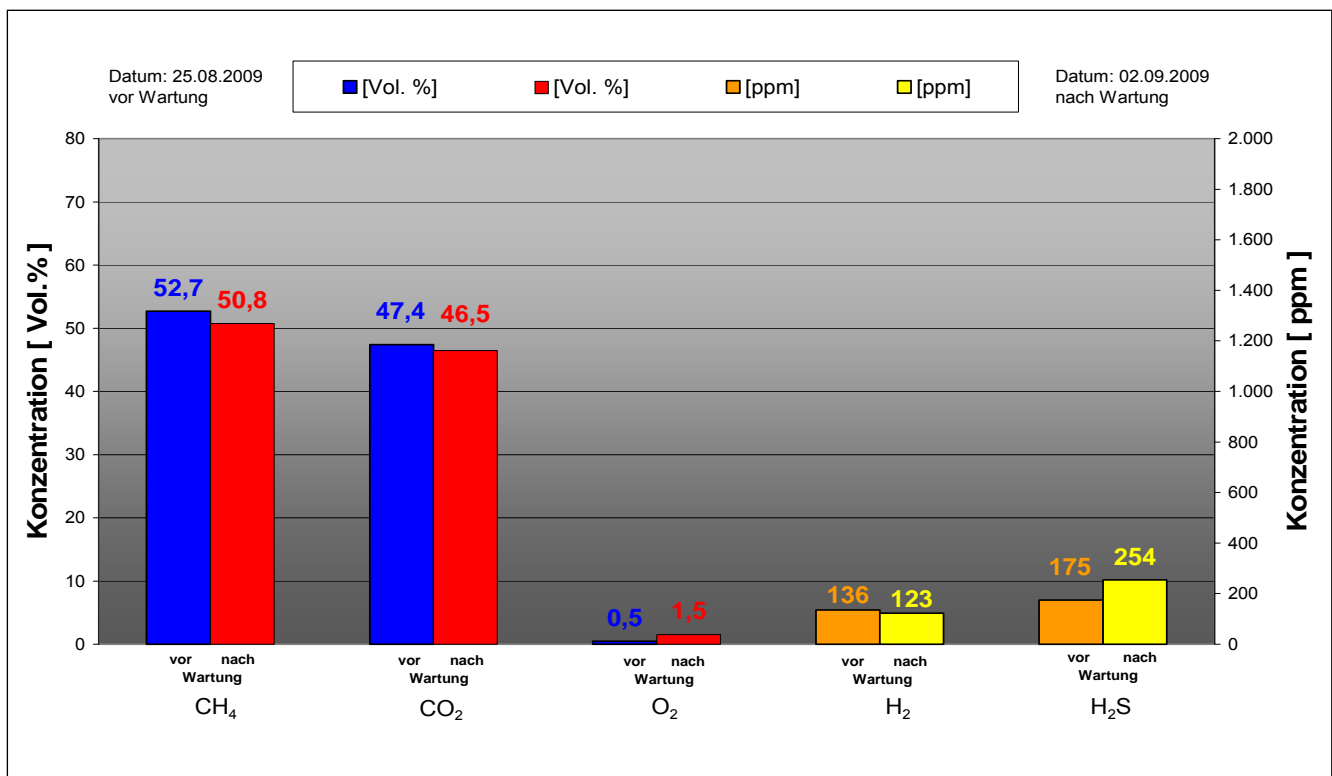


Abbildung 46: Biogaszusammensetzung für BHKW „76“ und „77“

7.7 Biogaszusammensetzung

In den vorangegangenen Abschnitten 7.6.1 bis 7.6.13 wurden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Biogaszusammensetzung vorgestellt und die jeweils aus den Biogasanalysekampagnen vor und nach der Wartung ermittelten Mittelwerte hinsichtlich der **CH₄**-, CO₂-, O₂-, H₂- und **H₂S**-Anteile in den Abbildungen 32 bis 46 dargestellt. Die Grundlage dieser Mittelwertbildungen stellten die in den Anlagen 18a bis 18o ersichtlichen Messprotokolle dar.

Die Bearbeiter des Forschungsvorhabens gehen davon aus, dass auch die Biogaszusammensetzung für einen vollständigen Verbrennungsablauf von besonderer Bedeutung sein könnte. Aus diesem Grund wurden im Weiteren Untersuchungen zum evtl. Einfluss der Biogaszusammensetzung auf den Verbrennungsprozess und die ggf. daraus resultierende Formaldehydemissionsbildung vorgenommen. Diese Untersuchungen beschränkten sich auf die **CH₄**- bzw. **H₂S**-Anteile im Biogas und werden nachfolgend vorgestellt.

7.7.1 Methananteil

Wie bereits in anderen vorgestellten Abschnitten dieses Abschlussberichtes erwähnt, sind die vermessenen BHKW u. a. aufgrund unterschiedlicher Arbeitsprinzipien und Motorspezifikationen sowie ggf. bereits realisierter Ausrüstung mit Abgasnachbehandlungstechnik, insbesondere hinsichtlich der gemessenen **CO**- und **HCHO**-Emissionen, nicht direkt miteinander vergleichbar. Unter Berücksichtigung des zuletzt genannten Aspektes wurde der evtl. Einfluss des Methananteils im Biogas auf den Verbrennungsprozess mit evtl. korrelierenden Formaldehydemissionen separat für die BHKW mit bzw. ohne Oxidationskatalysator untersucht. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 47 und Abbildung 48 dargestellt.

Wie Abbildung 47 und Abbildung 48 zu entnehmen ist, wurden durchschnittliche **CH₄-Anteile** im Biogas zwischen (47,4...66,4) Vol. % ermittelt. Beim Vergleich der durchschnittlichen **CH₄-Anteile** der Biogasanalysekampagnen vor der Wartung mit den Mittelwerten nach der Wartung sind größte Abweichungen des **CH₄-Anteils** mit $\approx 2\%$ an den BHKW „43“ und „57“ (beide: vW: 52,8 Vol.%, nW: 50,7 Vol.%), „57“ (vW: 66,4 Vol.%, nW: 64,4 Vol.%) sowie „76“ und „77“ (beide: vW: 52,7 Vol.%, nW: 50,8 Vol.%), aufgetreten. Werden hierzu die für die jeweiligen BHKW vor und nach der Wartung analysierten maximalen **HCHO-Werte** gegenübergestellt, fällt für die BHKW „57“, „76“ und „77“ auf, dass den nach der Wartung gegenüber vor der Wartung niedrigeren **CH₄-Anteile** auch höhere **HCHO-Emissionen** gegenüberstehen. Hier könnte der **CH₄-Anteil** von Bedeutung gewesen sein, was jedoch wegen zu geringerer Ergebnisrepräsentativität (drei BHKW an zwei Standorten) zurzeit nicht nachweisbar ist. Die Durchführung zukünftiger Projekte, in die auch Biogasanalysekampagnen einbezogen werden sollten, könnten weitere Erkenntnisse zu diesem Untersuchungsparameter präsentieren.

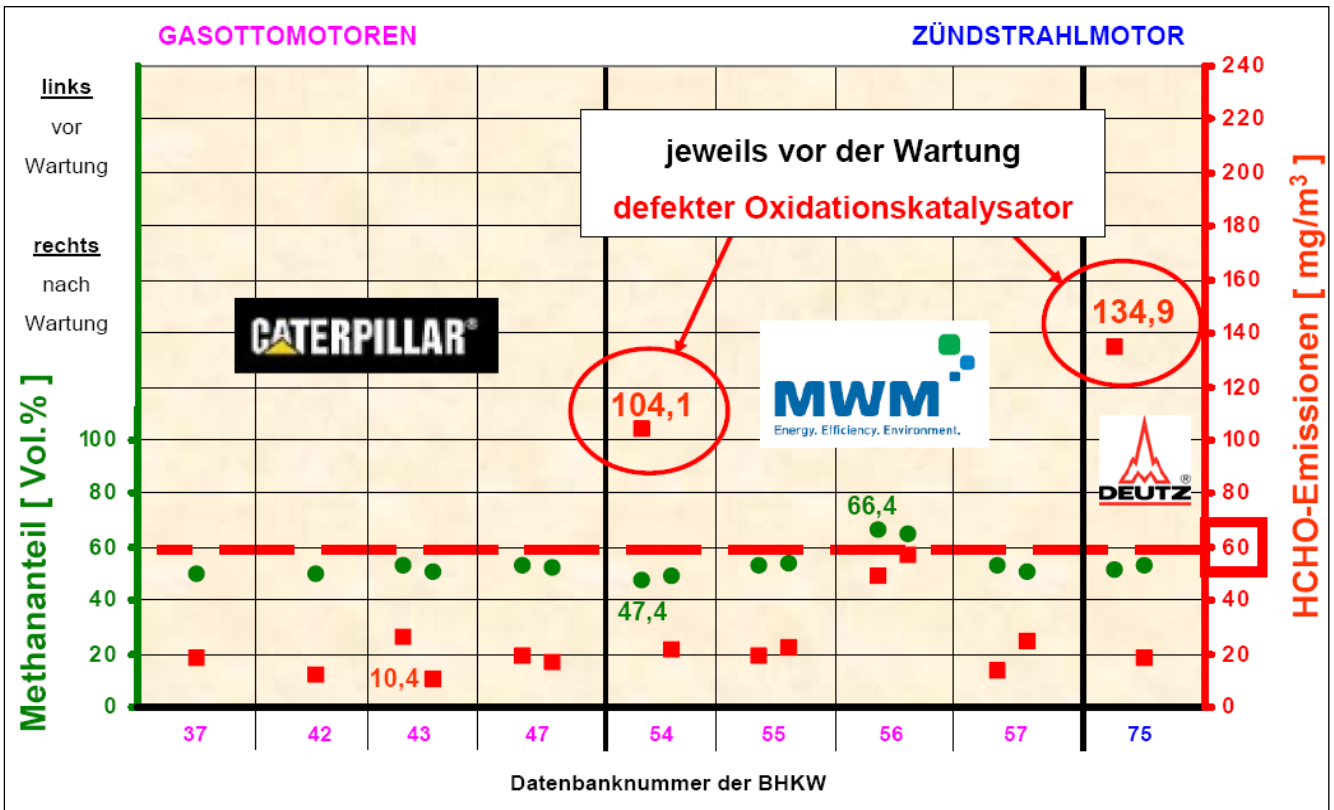


Abbildung 47: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten CH₄-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

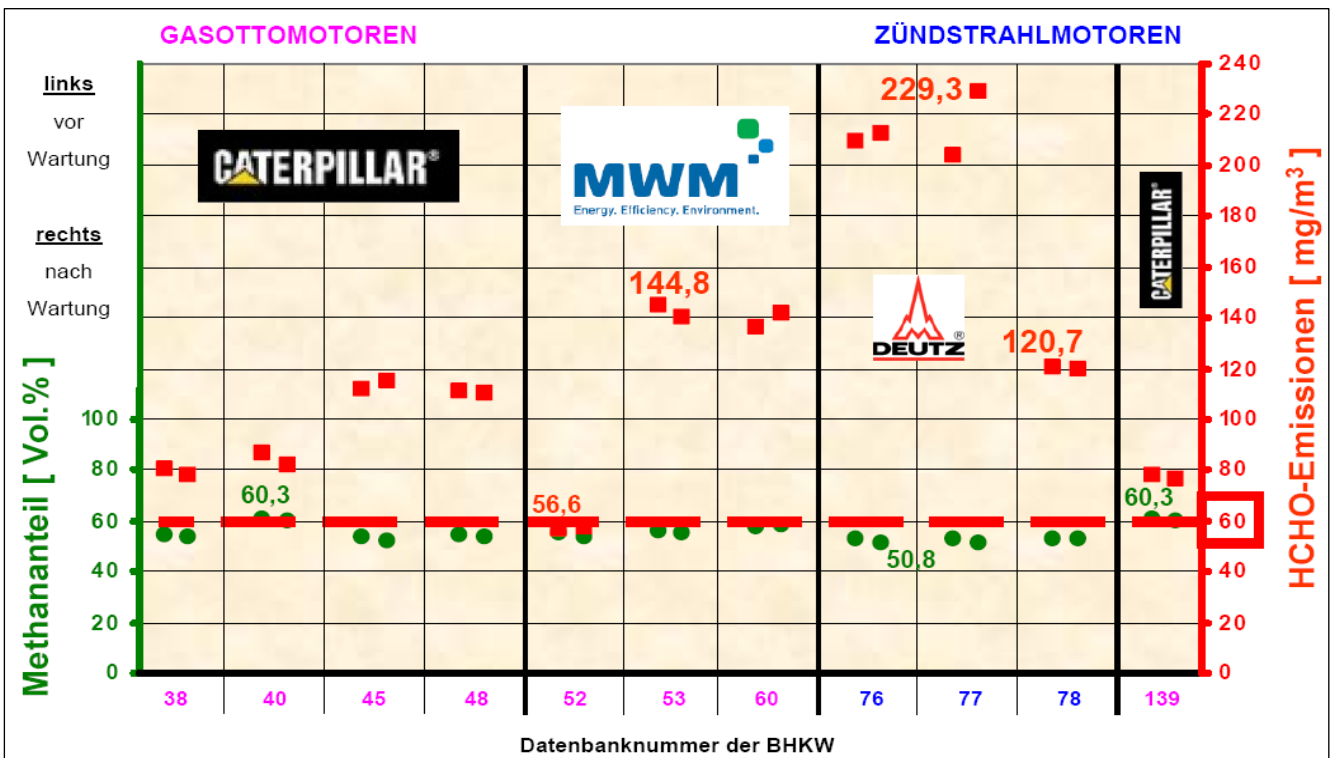


Abbildung 48: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten CH₄-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

7.7.2 Schwefelwasserstoffanteil

Da das gewonnene Biogas viele Begleitstoffe, wie z. B. Schwefelwasserstoff (H_2S) und Ammoniak (NH_3), enthält, ist der Entschwefelung eine besondere Bedeutung einzuräumen. Insbesondere die schwefelhaltigen Begleitstoffe müssen entfernt werden, da diese Schäden am Motor des BHKW sowie an der ggf. nachgeschalteten Abgasnachbehandlungstechnik verursachen können. In der Praxis werden hierfür interne und/oder externe Entschwefelungsanlagen, die auf biologischer und/oder chemischer Basis arbeiten, angewandt. In Abschnitt 7.5.1 wurden die an den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens berücksichtigten landwirtschaftlichen Biogasanlagen angewandten Entschwefelungsverfahren ausführlich vorgestellt. Zwecks Vergleichbarkeit und Überschaubarkeit sind diese für die jeweiligen BHKW auch in der Anlage 16 benannt sowie in den durch die Betreiber beantworteten Befragungsbögen (Anlagen 17a bis 17m, jeweils Seite 2 von 2) angegeben. Ausgenommen die Biogasanlage, an der das BHKW mit der Datenbanknummer „54“ betrieben wird, erfolgt an allen anderen untersuchten Biogasanlagen mindestens eine biologische Entschwefelung durch Luftzufuhr in den bzw. ggf. in die Fermenter. Dabei wird durch die Nutzung einer Aquarienpumpe, eines Kleinkompressors, eines Gebläses oder einer Doppelhubkolbenpumpe Luft in den bzw. ggf. in die Fermenter geblasen. Zusätzliche Entschwefelungen werden mittels Zugabe von Eisenverbindungen an vier Biogasanlagen („40“/„139“, „52“, „60“ und „76“/ „77“) sowie durch den Einsatz eines Aktivkohlefilters unmittelbar vor dem Gaseintritt in das Biogas-BHKW „54“ vorgenommen.

Eine Bewertung bzw. ein Vergleich der angewandten Entschwefelungsverfahren untereinander war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens. In diesem Forschungsvorhaben wurde untersucht, ob evtl. Korrelationen zwischen dem **H₂S-Anteil** im Biogas und den jeweils vor bzw. nach der Wartung analysierten **HCHO-Emissionswerten** bestehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 49 und Abbildung 50 ersichtlich. Analog des Vorgehens hinsichtlich der Untersuchungen zum **CH₄-Anteil** im Biogas war auch hier die Unterscheidung in BHKW mit Oxidationskatalysator bzw. in BHKW ohne diese Abgasnachbehandlungstechnik zweckmäßig, sodass diese dementsprechend realisiert wurde.

Aus Abbildung 49 und Abbildung 50 ist zu entnehmen, dass **H₂S-Anteile** im Biogas zwischen (**7...712 ppm**) analysiert wurden. Korrelationen zwischen den **H₂S-Anteilen** im Biogas und den ermittelten **HCHO-Emissionen** sind nicht zu erkennen. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf die nachfolgend erläuterten Beispielergebnisse verwiesen. Für das BHKW „55“ (Abbildung 49) wurden vor und nach der Wartung **HCHO-Maximalemissionen** auf annähernd gleichem Niveau (vW: **19 mg/m³**, nW: **22,3 mg/m³**) bestimmt. Die **H₂S-Anteile** gestalteten sich jedoch stark abweichend (Abbildung 49 → vW: **128 ppm**, nW: **244 ppm**). Das BHKW mit der Datenbanknummer „52“ (Abbildung 50) emittierte sowohl vor als auch nach der Wartung maximal **≈ 57 mg/m³ HCHO**. Die **H₂S-Anteile** lagen bei **72 ppm** vor der Wartung und bei **712 ppm** nach der Wartung. Eine ähnliche Tendenz ist für das BHKW „53“ (Abbildung 50) zu erkennen. Für dieses BHKW wurden vor der Wartung als **HCHO-Maximalwert 144,8 mg/m³** und nach der Wartung die maximalen **HCHO-Emissionen** mit **140,1 mg/m³** analysiert. Der **H₂S-Anteil** lag vor der Wartung bei **55 ppm** und nach der Wartung bei **493 ppm**. Die Beispiele verdeutlichen, dass sich für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Biogas-BHKW kein Zusammenhang zwischen **H₂S-Anteil** im Biogas und den **HCHO-Emissionen** herstellen lässt. Für die BHKW „47“ und „56“ (Abbildung 49) könnte im Zusammenhang mit evtl. zukünftigen Projekten von besonderem Interesse sein, dass niedrige **H₂S-Anteile** auch ohne den Einsatz von Aktivkohlefiltern erreicht wurden. Laut Informationen durch den Betreiber des BHKW „47“ werden in den Hauptfermenter 160 l/min, in den Nachgärer 50 l/min und in das Gaslager, aus dem das Gas dem BHKW zugeführt wird, 20 l/min eingeblasen. An der Biogasanlage mit dem BHKW „56“ wird ausschließlich eine interne biologische Entschwefelung vorgenommen. Die **H₂S-Anteile** betragen vor der Wartung **26 ppm** und nach der Wartung **13 ppm**.

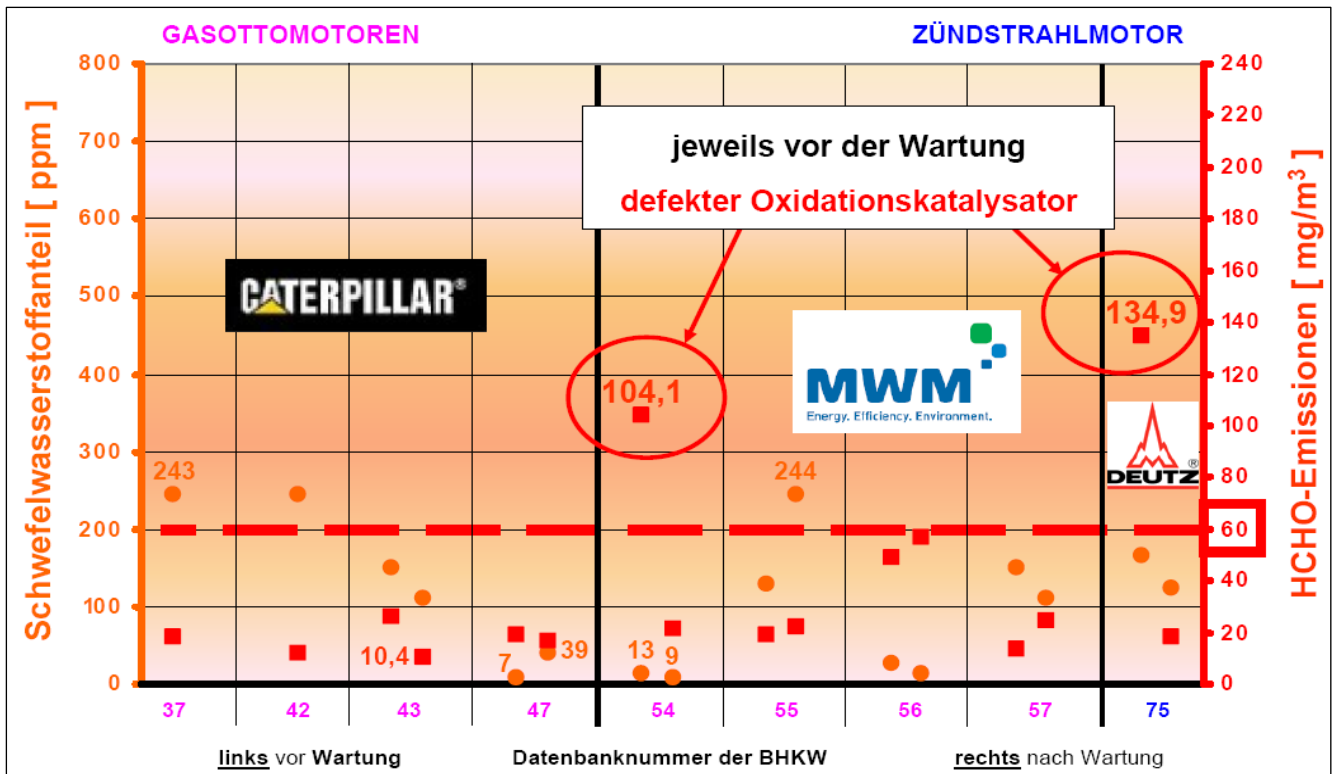


Abbildung 49: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten H₂S-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

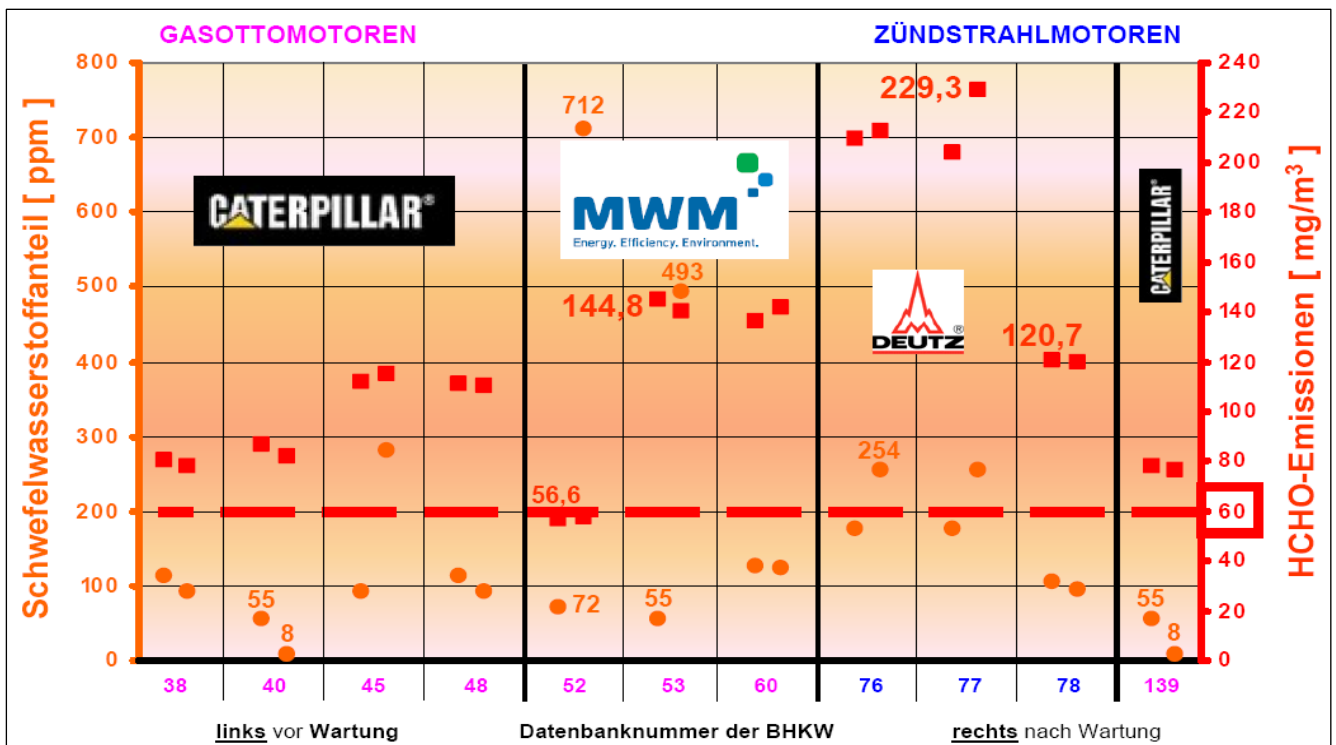


Abbildung 50: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten H₂S-Anteile sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

7.8 Biogasfeuchte

Das warme und feuchte Biogas wird aus dem Fermenter kommend über Rohrleitungen einem Biogaslager zugeführt oder direkt in den BHKW-Raum geleitet. Dabei kühlt sich das Biogas in der Rohrleitung ab. Die Rohrleitung ist mit einem Gefälle von mindestens 1 % auszulegen, damit das durch die Abkühlung anfallende Kondensat in einem tiefer liegenden Kondensatschacht gesammelt werden kann. Außerdem ist bei der Rohrleitungsverlegung darauf zu achten, dass eine leichte Zugänglichkeit gewährleistet wird.

Während der Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen wurde auch die Art der Gaskühlung für das dem jeweiligen BHKW zugeführte Biogas abgefragt. Bei allen in diesem Forschungsvorhaben berücksichtigten Biogasanlagen wird das Prinzip der Kondensatabscheidung mittels in der Erde verlegter Rohrleitungen umgesetzt. Ausgenommen die BHKW mit den Datenbanknummern „40“/„139“, „52“, „60“ und „76“/„77“, die an vier Standorten betrieben werden, sind alle anderen BHKW mit einer zusätzlichen technischen Gaskühlung (z. B. Kältetrockner, Prallplattenabscheider oder Kompressor) ausgestattet (s. a. Anlage 16 bzw. Befragungsbögen → Anlagen 17a bis 17m). Hinsichtlich der Spezifikationen dieser Gaskühlungen sind zurzeit keine nennenswerten Informationen verfügbar.

Im Rahmen der Messkampagnen wurde die Biogasfeuchte gravimetrisch unter Anwendung der EN 14790 ermittelt. Hierfür wurde dem Biogasstrom ein definiertes Normvolumen entnommen und über ein starkhygroskopisches Adsorbens geleitet. Die Masse des Adsorbens wurde vor und nach der Messung bestimmt. Aus der Differenz ergibt sich der Wassergehalt im Biogas.

Ausgenommen das BHKW mit der Datenbanknummer „75“ wurde für alle anderen BHKW die Biogasfeuchte jeweils vor und nach der Wartung für jede Biogasanalysekampagne mindestens doppelt bestimmt. Für die BHKW „37“, „40“, „42“, „43“, „52“, „57“, „76“, „77“ und „139“ wurden teilweise je vier Biogasfeuchtebestimmungen realisiert. Alle Biogasfeuchteanalyseprotokolle sind für die jeweiligen BHKW in den Anlagen 19a bis 19n einsehbar. Dem Leser wird beim Betrachten dieser Biogasfeuchteanalyseprotokolle auffallen, dass einige ermittelte Biogasfeuchtwerte „rot“ hervorgehoben sind (z. B. Anlage 19a → BHKW „37“ und „42“ → 4. Feuchtedaten bzw. -wert). Diese aufgenommenen Daten bzw. ermittelten Werte wurden aufgrund von unvorhergesehenen Ereignissen, wie z. B. „Ansaugung von Feststoffkrümel im Gasschlauch“, oder im Ergebnis von Plausibilitätsprüfungen nicht berücksichtigt. Aus den jeweils in den Anlagen 19a bis 19n für die jeweiligen BHKW aufgeführten Biogasfeuchtedaten bzw. den daraus resultierenden Biogasfeuchtwerten wurden die Mittelwerte für jede Biogasfeuchteanalysekampagne, also für jeweils vor bzw. nach der Wartung, berechnet.

Die Abbildung 51 zeigt die Mittelwerte der einzelnen Biogasfeuchteanalysen. Für die Biogas-BHKW mit den Datenbanknummern „38“ und „48“ wurden keine Biogasfeuchteanalysen realisiert. Hinsichtlich der Biogas-BHKW „37“ und „42“ erfolgten vor der Wartung keine Emissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen, sodass daraus resultierend für diese BHKW auch keine Biogasfeuchtwerte in der Abbildung 51 aufzutragen waren bzw. diese im Anlagenband nicht als separate Anlagen erscheinen.

Die jeweils vor bzw. nach der Wartung ermittelten Biogasfeuchtemittelwerte stellen sich beim Vergleich der Anlagen bzw. BHKW untereinander differenziert dar. Die niedrigsten Biogasfeuchtegehalte wurden am BHKW „47“, welches auch eine positive Auffälligkeit hinsichtlich niedriger Schwefelwasserstoffanteile (Abbildung 49) ohne zusätzliches Entschwefelungsverfahren aufwies, bestimmt. Vor der Wartung wurde als Biogasfeuchtemittelwert $\approx 11 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3$ (Abbildung 51) berechnet. Nach der Wartung betrug die Feuchte $13,3 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3$ (Abbildung 51). Die höchsten Biogasfeuchten stellten sich für die Analysekampagnen jeweils nach der Wartung an den BHKW „40“/„139“ ($26,6 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3$) und „60“ ($26,9 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3$) dar (Abbildung 51). Für diese BHKW fällt auch auf, dass sich die Biogasfeuchten gegenüber den Mittelwerten im Rahmen der jeweiligen Analysekampagnen vor der Wartung am ungünstigsten verschlechtert haben. Es handelt sich um Biogasanlagen, an denen keine zusätzliche technische Gaskühlung vorgenommen wird. An den übrigen Biogas-BHKW, ausgenommen das BHKW „75“, bewegen sich die jeweils aus den Analysekampagnen vor bzw. nach der Wartung bestimmten Biogasfeuchten auf annähernd gleichem Niveau.

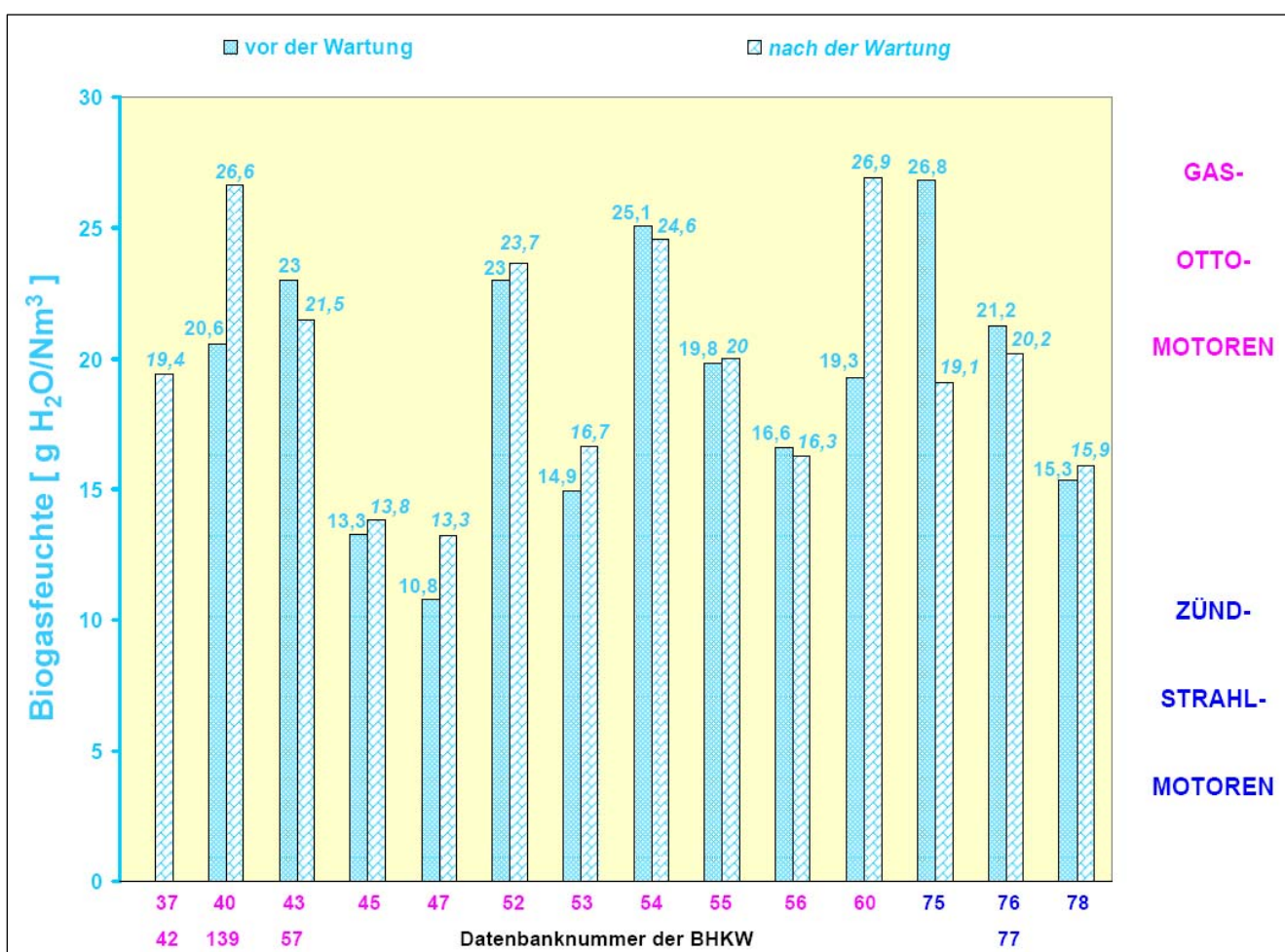


Abbildung 51: Biogasfeuchtemittelwerte der einzelnen Analysekampagnen

Eine Bewertung der jeweils angewandten Gaskühlungen war nicht Untersuchungsbestandteil des durchgeführten Forschungsvorhabens. Ausgehend von den Biogasfeuchtemittelwerten (Abbildung 51) wurde im Weiteren untersucht, ob evtl. Zusammenhänge bzw. Korrelationen zwischen den jeweils ermittelten Biogasfeuchtegehalten und den HCHO-Emissionen bestehen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Abbildung 52 für die BHKW mit Oxidationskatalysator bzw. für die BHKW ohne Abgasnachbehandlungstechnologie in der Abbildung 53 ersichtlich. Die Untersuchungen hinsichtlich möglicher Zusammenhänge zwischen den ermittelten Biogasfeuchtemittelwerten und evtl. resultierenden Korrelationen zu den Formaldehydemissionen lassen keine nennenswerten Auffälligkeiten erkennen. Die Ergebnisse stellen sich ähnlich der bereits vorgestellten Auswertungen für die anderen Untersuchungsparameter, z. B. Motorbetriebsparameter, Methan- und Schwefelwasserstoffanteil, dar. Dementsprechend sind keine Korrelationen zwischen den berechneten Biogasfeuchten und den Formaldehydemissionen feststellbar. Dieses Ergebnis ist anhand der nachfolgend vorgestellten Beispiele nachvollziehbar. Für das BHKW „56“ wurden aus den Analysekampagnen vor bzw. nach der Wartung Feuchtemittelwerte von $\approx 16,5 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3$ bestimmt (Abbildung 51 bzw. Abbildung 52).

Die analysierten HCHO-Maximalemissionen lagen bei $\approx 49 \text{ mg/m}^3$ vor der Wartung bzw. nach der Wartung bei $\approx 57 \text{ mg/m}^3$ (Abbildung 52). Im Vergleich dazu waren für das BHKW „55“, welches die gleiche Motorspezifikation „TCG 2016 V12“ aufweist, bei höheren Biogasfeuchten ($\approx 20 \text{ g H}_2\text{O/Nm}^3 \rightarrow$ Abbildung 52) niedrigere HCHO-Emissionen von $\approx 20 \text{ mg/m}^3$ zu verzeichnen. Damit stellt sich diese Auswertung gegenüber der Tendenz vom BHKW „56“ gegensätzlich dar. Ähnliche Tendenzen sind für die BHKW ohne Oxidationskatalysator in Abbildung 53 ersichtlich (z. B. BHKW „40“ und „45“).

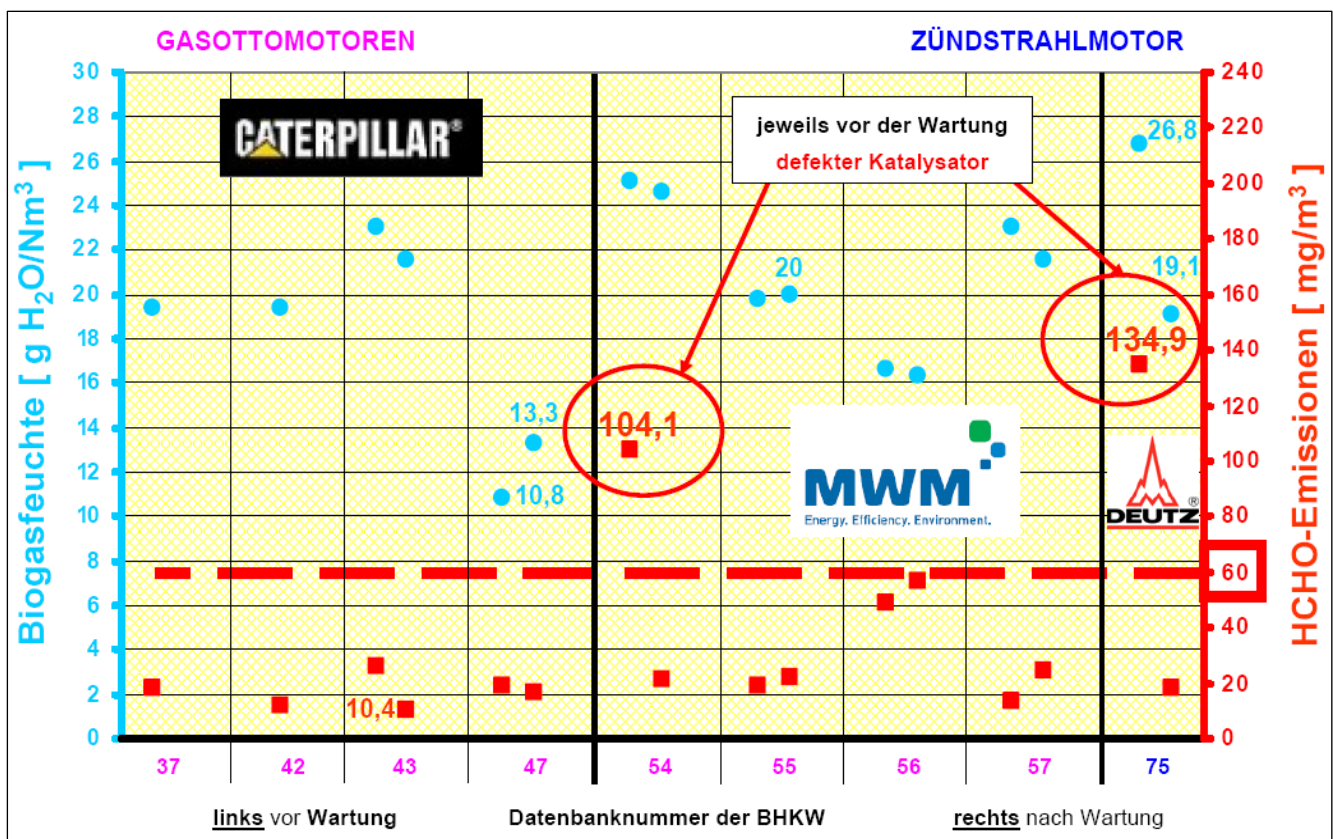


Abbildung 52: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten Biogasfeuchte sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der mit Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

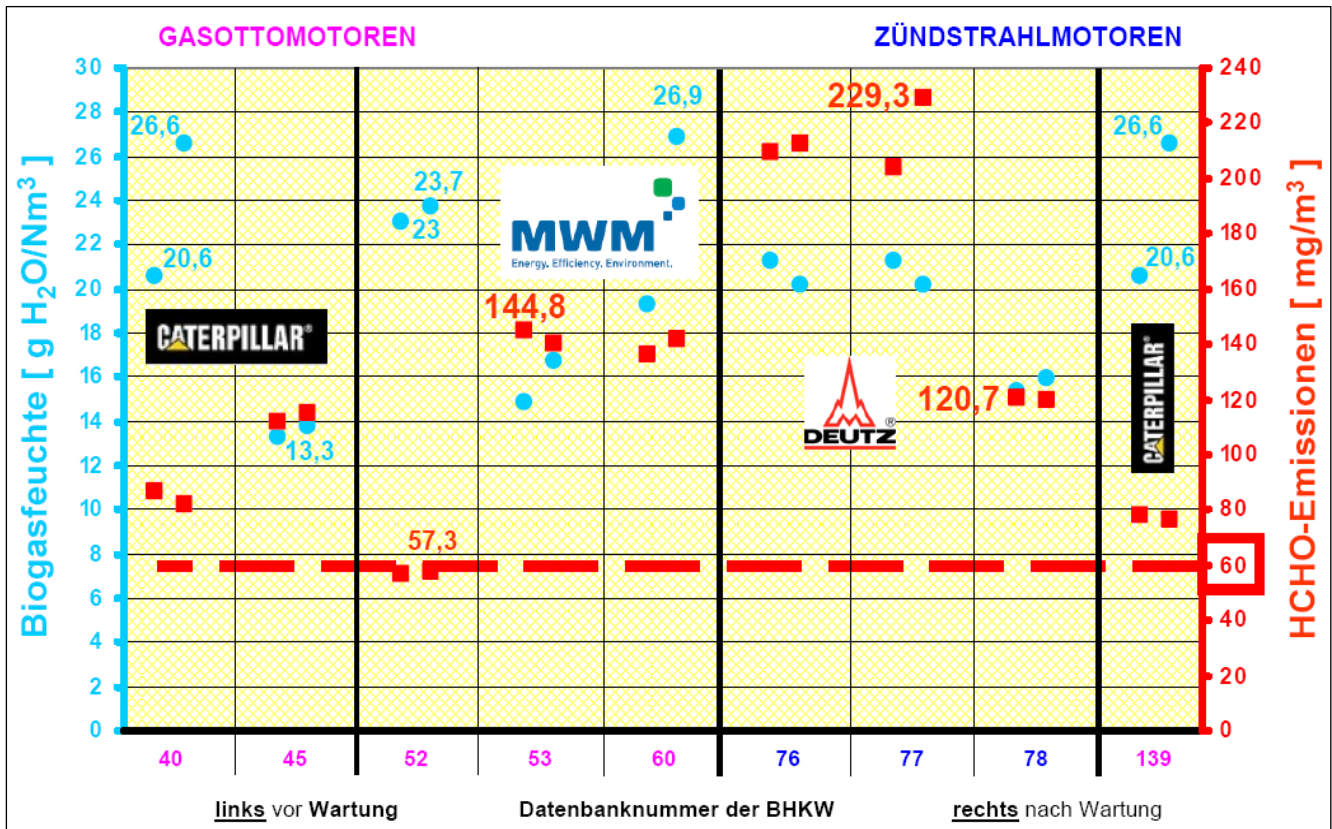


Abbildung 53: Mittelwerte der im Rahmen der Messkampagnen ermittelten Biogasfeuchte sowie der als Maximum analysierten HCHO-Werte der ohne Oxidationskatalysator vermessenen BHKW

8 Zusammenfassung und Ausblick

Als ein Teilergebnis einer Studie zu „Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ /7/ wurde herausgearbeitet, dass möglicherweise auch der Wartungseinfluss zur Emissionsminderung an Biogas-BHKW beitragen könnte. Aufgrund dieses Teilergebnisses wurde durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie ein Forschungsvorhaben „Ermittlung der optimalen Wartungsintervalle und Wartungsschritte für die in Sachsen am häufigsten eingesetzten BHKW-Motoren-Spezifikationen - Zusätzliche Ermittlung der Formaldehydemissionen aus BHKW-Motoren, welche über Abgasreinigungsanlagen verfügen“ ausgeschrieben. Den Zuschlag zur Ausführung des entsprechenden Forschungsauftrages hat das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik (FiF) der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden und das Deutsche BiomasseForschungsZentrum gGmbH Leipzig erhalten.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens waren Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen sowie Datenerfassungen hinsichtlich der Motorbetriebsparameter und zum Wartungszustand ausgewählter Biogas-BHKW auszuführen. Diese Kampagnen wurden jeweils vor und nach einer planmäßig anstehenden BHKW-Wartung realisiert. Die Abgasemissionsmessungen wurden von einem weiteren Projektpartner, der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft, vorgenommen.

Die Biogasanalysen wurden vom DBFZ durchgeführt. Das FiF hat überwiegend Koordinierungsaufgaben und Datenerfassungen mit entsprechenden Auswertungen hinsichtlich festgelegter Untersuchungsparameter, wie z. B. Einfluss von Wartungstätigkeiten, von Motorbetriebsparametern, der Biogaszusammensetzung und der Biogasfeuchte auf die Formaldehydemissionen, wahrgenommen.

Insgesamt haben 16 Agrarbetriebe, die in Summe 24 Biogas-BHKW betreiben, ihre Bereitschaft zur Teilnahme an diesem Forschungsvorhaben erklärt (Anlagenband: Anlage 1). Aus Effizienz- und Kapazitätsgründen konnten jedoch von diesen 24 BHKW nur 20, die durch 13 Landwirtschaftsbetriebe unterhalten werden, in den Untersuchungen berücksichtigt werden. Hierbei wurden gemäß Aufgabenstellung die am häufigsten in Sachsen angewandten BHKW-Motorspezifikationen in die Untersuchungen einbezogen. Die Grundlage für die Ermittlung der entsprechenden Häufigkeitsverteilung der BHKW-Motorspezifikationen bildete die o. g. Studie „Maßnahmen ...“ /7/. Nach Auswertung der Häufigkeitsverteilung wurden die Motorspezifikationen „**G 3412 TA**“ (Caterpillar), „**TCG 2016 V12**“ (MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH) und „**BF6M 1015 C**“ (Deutz AG Köln) festgelegt. Dabei wurden sowohl nach dem **Otto-Prinzip** als auch nach dem **Zündstrahlverfahren** arbeitende BHKW-Verbrennungsmotoren berücksichtigt. Besonderheit war, dass an einigen Biogasanlagenstandorten, an denen diese o. g. am häufigsten in Sachsen eingesetzten BHKW-Spezifikationen betrieben werden, auch ein zweites oder ggf. drittes BHKW unterhalten wird. Sofern für diese weiteren BHKW, die ggf. andere Spezifikationen als die am häufigsten ermittelten aufwiesen, planmäßige Wartungen zum gleichen Zeitpunkt wie für die ausgewählten BHKW anstanden, wurden auch diese BHKW in die Abgasemissionsmess- bzw. Biogasanalysekampagnen einbezogen. Auf diese Weise konnten für einige Untersuchungsparameter zu Vergleichszwecken auch die **Gasottomotorspezifikationen** „**G 3406 TA**“ und „**G 3408 TA**“ (beide Caterpillar) sowie „**TCG 2015 V6**“ (MWM) Berücksichtigung finden. Außerdem wurden, um die Ergebnisrepräsentativität zu erhöhen, auch Biogas-BHKW, die in Thüringen betrieben werden, in einigen Untersuchungen berücksichtigt. Vom 04.08.2009 bis einschließlich 22.12.2009 wurden 18 Abgasemissionsmess- und Biogasanalysekampagnen vor der Wartung und 20 derartige Kampagnen nach der Wartung realisiert. Die unterschiedliche Anzahl der Kampagnen vor und nach der Wartung ist darin begründet, dass zwei BHKW, die sich am gleichen Standort befinden, laut Ausschreibungsbedingungen vor der Wartung nicht zu vermessen waren.

Während der Projektbearbeitung hat sich die ursprüngliche Ausgangssituation verändert. Zum Zeitpunkt der Ausschreibung wurde davon ausgegangen, dass überwiegend Biogas-BHKW ohne Abgasnachbehandlungstechnik zu untersuchen sind. Ausnahmen waren für drei BHKW, die an zwei unterschiedlichen Biogasanlagenstandorten im Einsatz sind, vorgegeben. Diese drei BHKW sind mit jeweils einem Oxidationskatalysator ausgestattet, wobei eine Biogasanlage mit einem BHKW über eine zusätzliche Entschwefelung mittels Aktivkohlefiltereinheit verfügt. Unmittelbar nach Projektbeginn sowie im weiteren Bearbeitungsablauf hat sich während der fernmündlichen Terminkoordination die Situation dahingehend geändert, dass an sieben weiteren BHKW bereits je ein Oxidationskatalysator installiert wurde. Unter Berücksichtigung dieser Situation war für einige Untersuchungsparameter eine Unterscheidung in BHKW mit bzw. ohne Oxidationskatalysator vorzunehmen. Insgesamt wurden neun BHKW mit und elf ohne Oxidationskatalysator vermessen. Für **ein BHKW** konnte sowohl vor als auch nach der Wartung keine Abgasemissionsmesskampagne durchgeführt werden, da der **Katalysator einen Schaden** aufwies.

Hinsichtlich der eingesetzten Oxidationskatalysatoren sind weitere wesentliche Teilergebnisse von Bedeutung. Für **zwei BHKW** an zwei unterschiedlichen Standorten wurde im Rahmen der Emissionsmessungen **vor der Wartung** festgestellt, dass diese **Katalysatoren defekt** waren. Daraus resultierend waren diese Oxidationskatalysatoren auszutauschen, sodass bei den Messungen nach der Wartung **maximale Formaldehydemissionswerte** von **< 22 mg/m³** erreicht wurden. Von weiterem besonderem Interesse könnte eines dieser BHKW mit defektem Oxidationskatalysator sein, da dieses, wie seitens der Katalysatorhersteller gefordert, über einen zusätzlichen Aktivkohlefilter zur Entschwefelung verfügt. Die Ursachen, welche die Schäden an den Katalysatoren bewirkt haben könnten, sind nicht bekannt und waren auch nicht Bestandteil der Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben. An einem anderen BHKW mit Oxidationskatalysator wurden sowohl vor als auch nach der Wartung **maximale Formaldehydemissionen** im Bereich zwischen **(48,8...56,8) mg/m³** analysiert. Aus den erläuterten Teilergebnissen für die BHKW mit Oxidationskatalysator leiten die Autoren einen unbedingten Forschungsbedarf hinsichtlich der Funktionalität und zum Wartungsaufwand sowie der Lebensdauer dieser Abgasnachbehandlungstechnik ab. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, ein Folgeprojekt zu initiieren, das mindestens diese Untersuchungsparameter beinhaltet.

Für die Biogas-BHKW, die ohne Abgasnachbehandlungstechnik ausgerüstet sind, hat sich ein bereits in der Studie „Maßnahmen ...“ /7/ vorgestelltes Teilergebnis bestätigt. Auch im Ergebnis der Darstellung von maximalen Ist-Emissionswerten für Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Formaldehyd aus allen zur Verfügung gestellten Abgasemissionsmessberichten ist für einige Motoren eine evtl. Konzentration hinsichtlich der Erfüllung bzw. Überschreitung des derzeit gültigen TA Luftgrenzwertes (60 mg/m³) ersichtlich.

Bezüglich des Wartungs- bzw. Reparaturzustandes der BHKW wurden teilweise Erkenntnisse gewonnen, die auf einen möglichen Zusammenhang von umfangreicheren Wartungstätigkeiten auf das Emissionsverhalten hinweisen. Beispielhaft sind Zwischen- oder Generalüberholungen, im Rahmen derer auch Zylinderkopf- und Kolbenwechsel vorgenommen werden, zu nennen. Für ein BHKW konnte auch ein Einfluss durch Verststellung von Motorbetriebsparametern angedeutet, jedoch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Aufgrund dieser Teilergebnisse wird vorgeschlagen, die Teilleistung 2 dieses Forschungsvorhabens nicht durchzuführen. Stattdessen könnte das bereits vorgeschlagene Folgeprojekt realisiert werden.

Zu den Untersuchungsparametern Motorbetriebsparameter (z. B. Zylindertemperaturen, Verbrennungsluftverhältnis), Biogaszusammensetzung (z. B. Methan- und Schwefelwasserstoffanteil) und Biogasseuchte ist für die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten BHKW kein Einfluss mit evtl. Korrelationen auf die Formaldehydbildung verifizierbar.

Hinsichtlich von ggf. zukünftig niedrigeren HCHO-Grenzwerten ist sehr wahrscheinlich davon auszugehen, dass die zusätzlichen Technologien zur Biogasaufbereitung (z. B. Aktivkohlefilter) und zur Abgasnachbehandlung (z. B. Oxidationskatalysator, Thermoreaktor) zwingend notwendig sein dürften. In diesem Zusammenhang ist auch zu unterstellen, dass dem Methanschluß eine besondere Bedeutung beizumessen sein wird.

9 Literaturverzeichnis

- /1/ ENERGIE & MANAGEMENT Zeitung für den Energiemarkt „Biogas und das EEG“; Heft 1-2/2010, Energie & Management Verlagsgesellschaft mbH Herrsching, 01/2010
- /2/ Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft: „Biogasanlagen von landwirtschaftlichen Betrieben in Sachsen (Stand: 01.01.2010)“; www.landwirtschaft.sachsen.de, Dresden, 02/2010
- /3/ Schreier, W., Umweltanalytik RUK GmbH Longuich: „Formaldehydproblematik bei Gasmotoren – messtechnisches oder motorisches Problem?“; Fachtagung: Neue Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität; UMTK Nürnberg 2008, 24./25.06.2008
- /4/ Ebertsch, G., Bayerisches Landesamt für Umwelt: „Formaldehydemissionen aus Biogas-Motorenanlagen - Erfahrungen aus Bayern“; Fachgespräch Formaldehyd, Leipzig, 12/2008
- /5/ Moczigemba, T., Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: „Geruchsemissionen aus Abgasen von Blockheizkraftwerken (BHKW)“; Abschlussbericht zum Messprogramm, Dresden, 05/2008
- /6/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)“, Berlin, 07/2002
- /7/ Hofmann, U., Neumann, T., Zikoridse, G., HTW Dresden: „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“, Abschlussbericht, Dresden, 12/2008
- /8/ SICK AG (www.sick.de): „FID 3006: Gesamt-Kohlenstoff-Analysator“, Produktdatenblatt; Waldkirch, 02/2010
- /9/ ANSYCO Analytische Systeme und Komponenten GmbH (www.ansyco.de): „GASMET CR FTIR-Gasanalysator für Motorabgase, SYCOS P-HOT, beheiztes Probenahmesystem für die Gasanalytik sowie Labor-Gasanalysatoren FT-IR GASMET CR-2000i“; Technische Datenblätter; Karlsruhe, 11/2009
- /10/ ANSYCO Analytische Systeme und Komponenten GmbH (www.ansyco.de): „ATEX-Deponiegasmonitor – Tragbarer GA 2000 Advanced“; Technisches Datenblatt; Karlsruhe, 06/2007
- /11/ Caterpillar Inc. (www.cat.com): „Lieferprogramm Industriemotoren“ Produktinformation; Peoria (Illinois, USA), 2008
- /12/ MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH (www.mwm.net): „TCG 2015“ und „TCG 2016“, Produktinformationen; Mannheim, 08/2007 und 01/2008

- /13/ Deutz AG (www.deutz.de): „1013 – Der Gen Motor“ u. „1015 – Der Gen Motor“; Produktinformationen; Köln, 08/2008
- /14/ SEVA Energie AG (www.seva.de): „SEV-CA 180 BG“ , „SEV-CA 230 BG“ und „SEV-CA 370 BG“ Produktinformationen; Emstek, 21.07.2008
- /15/ AIR-SONIC Gesellschaft zur Luftreinhaltung und Lärmbekämpfung mbH (www.air-sonic.com): „Oxidationskatalysatoren“; Produktinformation; Sinntal, 02/2010
- /16/ SEVA Energie AG (www.seva.de): „SEV-DE 190 GZ“ , „SEV-DE 230 GZ“ und „SEV-DE 280 GZ“; Produktinformationen; Emstek, 09.07.2008
- /17/ MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH: „Betriebsanleitung TCG 2016 B“, Mannheim, 04/2008
- /18/ Bauer, M., Wachtmeister, G., TU München: „Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter“; FVV-Vorhaben Nr. 918 „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ Bericht zum Forschungsvorhaben Heft R547 – 2008, Frankfurt am Main, 10/2008
- /19/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow: „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“, Gülzow, 2006
- /20/ Bayerisches Landesamt für Umwelt: „Biogashandbuch Bayern“ (www.lfu.bayern.de), München, 2009
- /21/ Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e. V. Gülzow: „Gülzower Fachgespräche Band 30 - Gärrestaufbereitung für eine pflanzenbauliche Nutzung (Stand und FuE-Bedarf)“, Gülzow, 2009

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FIF)
Torsten Neumann
Telefon: +49 351 462-2452
Telefax: +49 351 462-3476
E-Mail: torsten.neumann@fif.mw.htw-dresden.de
Deutsches BiomasseForschungsZentrum gemeinnützige GmbH Leipzig
Dr. Volker Beer, Harald Wedwitschka
Telefon: +49 341 2434-517
Telefax: +49 341 2434-133
E-Mail: info@dbfz.de

Redaktion:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Referat Anlagenbezogener Immissionsschutz, Lärm
Torsten Moczigemba
Telefon: +49 351 2612-5208
Telefax: +49 351 2612-5299
E-Mail: torsten.moczigemba@smul.sachsen.de

Fotos:

HTW, DBFZ

Redaktionsschluss:

15.07.2010

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung. Die PDF-Datei ist im Internet unter www.smul.sachsen.de/lfulg verfügbar.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.