



Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen



MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Biogasanlagen Monitoring



Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen



MATERIALIEN

Umwelt & Entwicklung Bayern

Biogasanlagen - Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas - Blockheizkraftwerken

Abschlussbericht

Herausgeber: Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU)
Rosenkavalierplatz 2, 81925 München
Internet: <http://www.umweltministerium.bayern.de>
E-Mail: poststelle@stmlu.bayern.de

- Februar 2003 -

© StMLU, alle Rechte vorbehalten

Durchführung: Bayerische Landesanstalt für Landtechnik
Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Landnutzung

Projektleiter: Dr. agr. Andreas Gronauer

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. Mathias Effenberger
Dipl.-Ing. agr. MSc Felipe Kaiser
Markus Schlattmann

Fachliche
Begleitung: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg

Vorbemerkungen:

In der Reihe "Materialien" des StMLU erscheinen Dokumentationen, Studien, Untersuchungen, Gutachten und sonstige fachliche Ausarbeitungen der Abteilungen des StMLU, die einen breiteren Kreis von Bearbeitern vorwiegend im Geschäftsbereich und außerhalb des Geschäftsbereichs nur in sehr begrenzten Fällen auch direkt vom jeweiligen Thema Betroffenen sowie den an der Erarbeitung Beteiligten als Arbeitsmaterial zur Kenntnis gebracht werden sollen. Die Auflage ist daher sehr gering. Außenstehende Interessierte können in der Bibliothek des StMLU oder bei der fachlich zuständigen Abteilung des StMLU Einsicht nehmen.

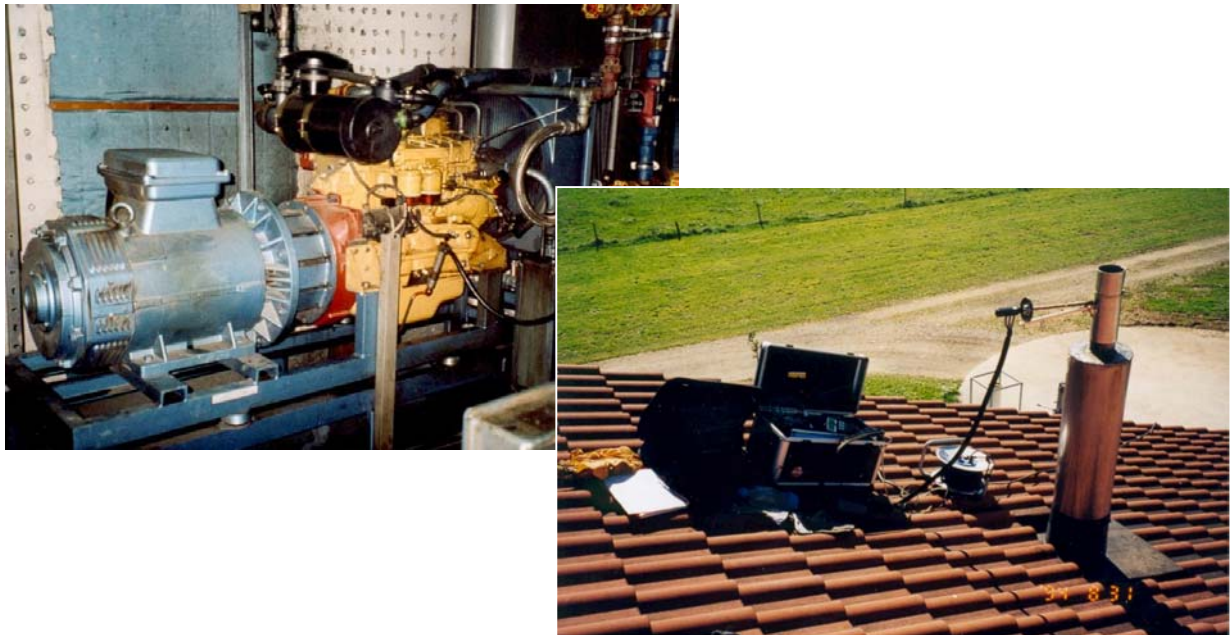
Die in den "Materialien" vertretenen Anschauungen und Gesichtspunkte sind Meinungen des oder der Verfasser und werden in der Regel nicht aufgrund ihrer Darstellung in dieser Reihe vom StMLU vertreten.

Die Verteilung der aufgrund finanzieller oder materieller Beteiligung an der Herstellung als Gegenleistung an Personen oder Institutionen abgegebenen Exemplare liegt nicht in der Verantwortung des StMLU.

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier
Umschlag aus Recyclingkarton

Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken

Abschlussbericht



**Bayerische Landesanstalt für Landtechnik,
Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Landnutzung**

Dr. agr. Andreas Gronauer

Dipl. –Ing. Mathias Effenberger

Dipl. –Ing. agr. MSc Felipe Kaiser

Markus Schlattmann



BAYER. LANDESANSTALT FÜR LANDTECHNIK

- Arbeitsgruppe Umwelttechnik der Landnutzung -

Endbericht zum Forschungsvorhaben:

Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas- Blockheizkraftwerken

Auftraggeber: Bayerisches Staatsministerium für
Landesentwicklung und Umweltfragen
Postfach 810140
81901 München

Auftragsdatum: 17.11.2000 Az.771c-8051.0-2000/2
Änderung vom 30.04.2001

Projektleitung: Dr. agr. Andreas Gronauer

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Mathias Effenberger
Dipl.-Ing. agr. MSc Felipe Kaiser
Dipl.-Ing. agr. Silvia Schattner (bis 30.06.2001)
cand. Ing. agr. Markus Schlattmann

Fachliche Begleitung: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
Abteilung Luftreinhaltung Ref. 1/3
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

Berichtsabschluss: 30.04.2002

Berichtsumfang: 134 Seiten

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens.....	2
3	Problemstellung und Zielsetzung.....	9
4	Umfragen zur Ermittlung des technischen Standes.....	11
4.1	Auswertung des Fragebogens I.....	11
4.1.1	Anlagendaten.....	11
4.1.2	Gasspeicherung und -aufbereitung.....	17
4.1.3	Biogasnutzung/BHKW.....	18
4.1.4	Verwertung des Gärrests und Betriebsdaten	24
4.2	Auswertung des Fragebogens II.....	26
4.2.1	Anlagendaten.....	27
4.2.2	Gasspeicherung und -aufbereitung.....	36
4.2.3	Biogasnutzung/BHKW.....	38
4.2.4	Verwertung des Gärrestes und Betriebsdaten	44
5	Emissionsmessungen an Blockheizkraftwerken ausgesuchter landwirtschaftlicher Biogasanlagen	47
5.1	Durchführung der Messungen	47
5.2	Beschreibung der untersuchten Biogasanlagen.....	49
5.2.1	Betrieb 1 (13 kW _{el} Gas-Otto-Motor).....	49
5.2.2	Betrieb 2 (22 kW _{el} Zündstrahler).....	50
5.2.3	Betrieb 3 (50 kW _{el} Zündstrahler).....	51
5.2.4	Betrieb 4 (80 kW _{el} Zündstrahler).....	52
5.2.5	Betrieb 5 (132 kW _{el} Zündstrahler).....	53
5.3	Messinstrumente.....	55
5.3.1	Abgasanalysegerät TESTO 350	55
5.3.2	ANSYCO GA 94.....	58
5.4	Datenverarbeitung und Auswertung.....	59
5.5	Ergebnisse	62

5.5.1	Gesamtüberblick.....	62
5.5.2	Einzelbetriebe im Zeitverlauf.....	65
5.5.2.1	Betrieb 1	65
5.5.2.2	Betrieb 2	67
5.5.2.3	Betrieb 3	68
5.5.2.4	Betrieb 4	70
5.5.2.5	Betrieb 5	71
5.5.2.6	Zusatzmessungen	73
5.5.3	Abweichung der Messwerte von den Grenzwerten der TA-Luft.....	74
5.5.4	Emissionen an CO und NO _x in Abhängigkeit von Motor und Messzeitpunkt.....	75
5.5.4.1	Kohlenmonoxid.....	75
5.5.4.2	Stickoxide.....	78
5.6	Diskussion	81
5.6.1	Gesamtbetrachtung.....	81
5.6.2	Einzelbetriebliche Betrachtung	85
5.6.2.1	Betrieb 1	85
5.6.2.2	Betrieb 2	85
5.6.2.3	Betrieb 3	86
5.6.2.4	Betrieb 4	87
5.6.2.5	Betrieb 5	87
5.6.3	Fazit.....	88
6	Emissionsmessungen an einem Biogas-BHKW durch eine § 26-	
	Messstelle.....	90
6.1	Beschreibung der Biogasanlage	90
6.2	Vorgehen	90
6.3	Messinstrumente.....	91
6.4	Ergebnisse	91
6.5	Diskussion	91
6.5.1	Abgas-Emissionen des BHKW-Moduls 3.....	93
6.5.2	Abgas-Emissionen der BHKW-Module 1 und 2.....	94

7 Untersuchungen zum Einsatz von Oxidationskatalysatoren an landwirtschaftlichen Biogas-Verbrennungsmotoren.....	96
8 Zusammenfassung.....	97
9 Ausblick.....	100
10 Literaturverzeichnis.....	101
Anhang.....	107
A Internet-Präsentation der Umfrageergebnisse	107
B Grafiken und Tabellen zu den Emissionsmessungen an BHKW ausgesuchter landwirtschaftlicher Biogasanlagen.....	108
B.1 Auswertungen der Einzelmessungen.....	108
B.1.1 Betrieb 1 (13 kW _{el.} Gas-Otto-Motor).....	108
B.1.2 Betrieb 2 (22 kW _{el.} Zündstrahler).....	109
B.1.3 Betrieb 3 (50 kW _{el.} Zündstrahler).....	111
B.1.4 Betrieb 4 (80 kW _{el.} Zündstrahler).....	113
B.1.5 Betrieb 5 (132 kW _{el.} Zündstrahler).....	115
B.2 Zusatzmessungen	117

Anlagen

- 1 Fragebögen zur Ermittlung des technischen Standes landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern**
- 2 LfU-Papier "Biogasanlagen mit Verbrennungsmotoren < 1 MW Feuerungswärmeleistung – Anforderungen zur Luftreinhaltung"**

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Zusammensetzung des Biogases aus zehn landwirtschaftlichen Anlagen in Bayern für verschiedene Substrate	6
Abbildung 2: Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas aus zehn landwirtschaftlichen Anlagen in Bayern für verschiedene Substrate	6
Abbildung 3: Umfrage I: Verteilung des Baujahres der erfassten Biogasanlagen	12
Abbildung 4: Umfrage I: Jahr der Erweiterung bestehender Biogasanlagen	12
Abbildung 5: Umfrage I: Größenverteilung der Vorgruben	13
Abbildung 6: Umfrage I: Prozesstemperatur der erfassten Biogasanlagen	15
Abbildung 7: Umfrage I: Substratvorbehandlung	15
Abbildung 8: Umfrage I: Zahl der Fermenter auf den erfassten Biogasanlagen	16
Abbildung 9: Umfrage I: Durchschnittliche hydraulische Verweilzeit in den erfassten Biogasanlagen	17
Abbildung 10: Umfrage I: Größenverteilung der installierten Gasspeicher	18
Abbildung 11: Umfrage I: Nutzung des Biogases	19
Abbildung 12: Umfrage I: Nutzung der anfallenden Wärme	20
Abbildung 13: Umfrage I: Verteilung der Stromerträge	20
Abbildung 14: Umfrage I: Vergleich zwischen dem erfragten und dem rechnerisch aus dem Gasertrag ermittelten jährlichen Stromertrag	21
Abbildung 15: Umfrage I: Verteilung der Netzanschlussleistung der Biogasanlagen	22
Abbildung 16: Umfrage I: Baujahr und elektrische Leistung installierter BHKW-Module auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern (n=183)	22
Abbildung 17: Umfrage I: Verteilung des Zündölanteils bei den erfassten Zündstrahlaggregaten	23
Abbildung 18: Umfrage I: Verteilung der Ölwechselintervalle bei den erfassten BHKW	24
Abbildung 19: Umfrage I: Verteilung der Endlagergröße der erfassten Biogasanlagen	24
Abbildung 20: Umfrage I: Nutzung des Gärrestes	25
Abbildung 21: Umfrage I: Verteilung der Betriebsflächengröße der befragten Betriebe	26
Abbildung 22: Umfrage II: Verteilung der Angaben zum Baujahr der Biogasanlagen (n=41)	27
Abbildung 23: Umfrage II: Planung der Biogasanlagen (n=32)	28
Abbildung 24: Umfrage II: Ersteller der Biogasanlagen (n=32)	28
Abbildung 25: Umfrage II: Verteilung der Prozesstemperatur der Biogasanlagen (n=41)	29
Abbildung 26: Umfrage II: Beschickung der Anlagen – Einzelgaben/Tag (n=31)	30

Abbildung 27: Umfrage II: Beschickung der Anlagen - Volumen der Einzelgaben (n=31)....	30
Abbildung 28: Umfrage II: Verteilung des Fassungsvermögens der Vorgrube (n=40)	31
Abbildung 29: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Ausstattung der Vorgrube mit Misch- /Zerkleinerungseinrichtung (n=23)	31
Abbildung 30: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Hygienisierung des Substrats (n=41)	32
Abbildung 31: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu den eingesetzten Substraten (n=30)..	32
Abbildung 32: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Wirtschaftsdünger (n=40)	33
Abbildung 33: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Co-Fermentaten (n=32)	33
Abbildung 34: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Nachwachsenden Rohstoffen (n=23)	34
Abbildung 35: Umfrage II: Größenverteilung des Gesamt-Fermentervolumens (n=40)	34
Abbildung 36: Umfrage II: Rührerbetrieb in den Biogasanlagen (n=32).....	35
Abbildung 37: Umfrage II: Dauer des Rührvorganges (n=32).....	36
Abbildung 38: Umfrage II: Verteilung des Gasspeichervolumens (n=41).....	37
Abbildung 39: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu Gasspeichermaterialien (n=32)	37
Abbildung 40: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Technik der Entfeuchtung des Biogases (n=29).....	38
Abbildung 41: Umfrage II: Verteilung der Motorleistung der BHKW-Aggregate (n=65)	39
Abbildung 42: Umfrage II: Verteilung des Baujahres der BHKW-Aggregate (n=62).....	39
Abbildung 43: Umfrage II: Verteilung der jährlichen Betriebsstunden der BHKW-Aggregate (n=53)	40
Abbildung 44: Umfrage II: Verteilung der Ausfallzeiten der BHKW (n=40).....	40
Abbildung 45: Umfrage II: Zündölanteil bei Zündstrahl-Aggregaten (n=24).....	41
Abbildung 46: Umfrage II: Verteilung des Jahresverbrauches an Zündöl (n=16)	42
Abbildung 47: Umfrage II: Verteilung der Ölwechselintervalle für die BHKW-Aggregate (n=35)	42
Abbildung 48: Umfrage II: In den Biogas-Motoren verwendetes Motorenöl (n=30)	43
Abbildung 49: Umfrage II: Verteilung des Altölanfalls (n=26)	43
Abbildung 50: Umfrage II: Verteilung der Intervalle für Wartungsarbeiten an den BHKW- Aggregaten (n=22)	44
Abbildung 51: Umfrage II: Verteilung des Fassungsvermögens des Gärrestendlagers (n=39)	45

Abbildung 52: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu Gärrestuntersuchungen (n=16)	45
Abbildung 53: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Ausbringtechnik des Gärrestes (n=41)	46
Abbildung 54: Umfrage II: Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche der ausgewählten Betriebe (n=41)	46
Abbildung 55: Schematischer Aufbau der Abgasmessungen am BHKW	48
Abbildung 56: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 1 (Foto vom 27.07.2001).....	50
Abbildung 57: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 3 (Foto vom 02.10.2001).....	51
Abbildung 58: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 4 (Foto vom 29.08.2001).....	53
Abbildung 59: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 5 (Foto vom 09.10.2001).....	54
Abbildung 60: Mittlere CO-Emissionen aller Betriebe über alle Messreihen	64
Abbildung 61: Mittlere NO _x -Emissionen (Angabe als NO ₂) aller Betriebe über alle Messreihen	64
Abbildung 62: Darstellung der gemessenen CO- und NO _x -Emissionen für Betrieb 1	66
Abbildung 63: Darstellung der gemessenen CO- und NO _x -Emissionen für Betrieb 2	68
Abbildung 64: Darstellung der gemessenen CO- und NO _x -Emissionen für Betrieb 3	69
Abbildung 65: Darstellung der gemessenen CO- und NO _x -Emissionen für Betrieb 4	71
Abbildung 66: Darstellung der gemessenen CO- und NO _x -Emissionen für Betrieb 5	73
Abbildung 67: Q-Q-Plot für die NO _x -Werte von Betrieb 5, Messreihe 2	84
Abbildung 68: Sauerstoffgehalt im Abgas auf Betrieb 2 in einer ausgewählten Zeitspanne ...	86
Abbildung 69: Grundriss der BHKW-Anlage und Versuchsanordnung für Messungen mit verdünntem Biogas	92
Abbildung 70: Messergebnisse der Emissionsmessungen am BHKW-Modul 3 bei unterschiedlichen Methangehalten im Biogas	93

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Mindestanforderungen an Brenngase für Gasmotoren (nach Prescher et al. 2001)	4
Tabelle 2: Grenzwerte der alten und „neuen“ TA-Luft für Emissionen im Abgas von mit Biogas betriebenen Verbrennungsmotoranlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von ≥ 1 bis < 3 MW.....	8
Tabelle 3: Umfrage I: Art und Häufigkeit der eingesetzten Substrate.....	13
Tabelle 4: Umfrage I: Verteilung der Tierarten, deren Exkremete als Basissubstrat in Biogasanlagen eingesetzt werden.....	14
Tabelle 5: Umfrage I: Jährliche Einsatzmengen von Substraten.....	14
Tabelle 6: Umfrage I: Gesamt-Fermentervolumen der erfassten Biogasanlagen.....	16
Tabelle 7: Umfrage I: Fermenterbauformen, Heizung und Mischeinrichtungen.....	16
Tabelle 8: Umfrage I: Angaben zur Biogaszusammensetzung.....	18
Tabelle 9: Umfrage I: Biogasaufbereitung.....	18
Tabelle 10: Umfrage I: Verteilung und Bewertung der eingesetzten Technik zur Ausbringung von Biogasl Gülle (Mehrfachnennungen möglich).....	25
Tabelle 11: Zusammenstellung der Fragen aus Umfrage II, die nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden.....	26
Tabelle 12: Klasseneinteilung der BHKW zur Anlagenauswahl.....	47
Tabelle 13: Zeitplan der einzelnen Versuchsabschnitte.....	48
Tabelle 14: Zusammenstellung von Daten zu den untersuchten Biogas-Motoren.....	54
Tabelle 15: Angaben zur CO-Messung (TESTO 350).....	55
Tabelle 16: Angaben zur NO-Messung (TESTO 350).....	55
Tabelle 17: Angaben zur NO ₂ -Messung (TESTO 350).....	56
Tabelle 18: Angaben zur NO _x -Messung (TESTO 350).....	56
Tabelle 19: Angaben zur SO ₂ -Messung (TESTO 350).....	56
Tabelle 20: Angaben zur O ₂ -Messung (TESTO 350).....	56
Tabelle 21: Mittelwerte der Messungen an Biogas bei verschiedener Brennstoffeinstellung des Messgerätes unter sonst gleichen Bedingungen.....	57
Tabelle 22: Angaben zur CH ₄ -Messung (ANSYCO GA 94).....	58
Tabelle 23: Angaben zur CO ₂ -Messung (ANSYCO GA 94).....	58
Tabelle 24: Angaben zur O ₂ -Messung (ANSYCO GA 94).....	58
Tabelle 25: Molgewicht und Mol-dichte der zu messenden Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung).....	60

Tabelle 26: Mittelwerte aus den Abgasmessungen der einzelnen Aggregate über den gesamten Messzeitraum	63
Tabelle 27: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 1	65
Tabelle 28: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 1	66
Tabelle 29: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 2	67
Tabelle 30: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 2	67
Tabelle 31: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 3	68
Tabelle 32: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 3	69
Tabelle 33: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 4	70
Tabelle 34: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 4	71
Tabelle 35: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 5	72
Tabelle 36: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 5	72
Tabelle 37: Ergebnisse der t-Tests der gemessenen Mittelwerte gegen den jew. Grenzwert der TA-Luft für CO	74
Tabelle 38: Ergebnisse der t-Tests der gemessenen Mittelwerte gegen die Grenzwert der TA-Luft für NO _x	75
Tabelle 39: Verteilung der in die Varianzanalyse eingehenden Messwerte für CO	76
Tabelle 40: Zweifaktorielle Varianzanalyse der CO-Emissionen	76
Tabelle 41: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für CO [mg/m ³] bezüglich der Messreihen	77
Tabelle 42: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für CO [mg/m ³] bezüglich des installierten Motors (ZS = Zündstrahlmotor, GM = Gas-Otto-Motor)	77
Tabelle 43: Einfaktorielle Varianzanalyse bezüglich CO speziell für Betrieb 3.....	78
Tabelle 44: Multipler Mittelwertvergleich bezüglich CO [mg/m ³] speziell für Betrieb 3	78
Tabelle 45: Verteilung der in die Varianzanalyse eingehenden Messwerte für NO _x	79
Tabelle 46: Zweifaktorielle Varianzanalyse der NO _x -Emissionen.....	79
Tabelle 47: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für NO _x [mg/m ³] bezüglich der Messreihen	80
Tabelle 48: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für NO _x [mg/m ³] bezüglich des installierten Motors (ZS = Zündstrahlmotor, GM = Gas-Otto-Motor)	80
Tabelle 49: Bildung homogener Untergruppen des NO _x -Emissionsverhaltens bezüglich des Motors	81
Tabelle 50: Bildung homogener Untergruppen des NO _x -Emissionsverhaltens bezüglich der Messreihe	81

Tabelle 51: Zündstrahl-Aggregate der BHKW-Anlage Pellmeyer zum Zeitpunkt der Messungen.....	90
Tabelle 52: Zusammenstellung der Messwerte und der entsprechenden Emissionsgrenzwerte nach TA-Luft (Novellierte Fassung vom 12.12.2001: Ziffern 5.2.1, 5.4.1.2.3 und 5.4.1.4) bzw. nach Empfehlung des LfU (siehe Anlage 1)	92

Verzeichnis der Anhangstabellen

Anhangstabelle 1: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 1 (5 Einzelmessungen)	108
Anhangstabelle 2: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 1 (6 Einzelmessungen)	108
Anhangstabelle 3: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 1 (7 Einzelmessungen)	109
Anhangstabelle 4: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)	109
Anhangstabelle 5: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)	110
Anhangstabelle 6: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)	110
Anhangstabelle 7: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)	111
Anhangstabelle 8: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 3 (7 Einzelmessungen)	111
Anhangstabelle 9: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)	112
Anhangstabelle 10: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)	112
Anhangstabelle 11: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)	113
Anhangstabelle 12: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 4 (7 Einzelmessungen)	113
Anhangstabelle 13: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 4 (6 Einzelmessungen)	114
Anhangstabelle 14: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 4 (7 Einzelmessungen)	114
Anhangstabelle 15: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 4 (6 Einzelmessungen)	115
Anhangstabelle 16: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 5 (6 Einzelmessungen)	115
Anhangstabelle 17: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)	116
Anhangstabelle 18: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)	116
Anhangstabelle 19: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)	117
Anhangstabelle 20: Auswertung der Einzelmessung eines 45 kW-Gasmotors	117
Anhangstabelle 21: Auswertung der Einzelmessung eines 75 kW-Gasmotors, Einzelmessung Sommer.....	118
Anhangstabelle 22: Auswertung der Einzelmessung eines 75 kW-Gasmotors, Einzelmessung Herbst.....	118
Anhangstabelle 23: Auswertung der Einzelmessung eines 160 kW-Zündstrahlmotors	119

Symbole und Abkürzungen

ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Datei-Standard für Texte ohne Steuerzeichen für Formatierungen)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIfA	Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und –technik GmbH
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
CO	Kohlen(stoff)monoxid
CO ₂	Kohlen(stoff)dioxid
E _B	Massenkonzentration bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt
E _M	Massenkonzentration, im Abgas gemessen
Gesamt-C	Gasförmige organische Kohlenstoffverbindungen
HC	Kohlenwasserstoffe
HCHO	Formaldehyd
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
kW _{el.}	Kilowatt elektrische Leistung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
λ	lambda, Luftverhältniszahl
LfU	Bayerisches Landesamt für Umweltschutz
NaWaRos	Nachwachsende Rohstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NO _x	Stick(stoff)oxide
O ₂	Sauerstoff
O _B	Bezugssauerstoffgehalt
O _M	Sauerstoffgehalt, im Abgas gemessen
PJ	Petajoule (10 ¹⁵ Joule)
PE	Polyethylen
ppm	parts per million, Teile pro Million (10 ⁻⁶)
ppb	parts per billion, Teile pro Milliarde (10 ⁻⁹)
ppt	parts per trillion, Teile pro Billion (10 ⁻¹²)
qA	Abgasverlust
SO ₂	Schwefeldioxid
SO _x	Schwefeloxide

StMLU	Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz)
TBN	Total Base Number

1 Einleitung

Mit dem Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im April 2001 hat der mit der Verabschiedung des Stromeinspeisegesetzes im Jahre 1991 ausgelöste Aufschwung beim Bau landwirtschaftlicher Biogasanlagen einen weiteren kräftigen Schub erfahren. War die Zahl der Anlagen zwischen 1995 und 2000 von 300 auf 1000 gestiegen, so waren Ende 2001 bereits etwa 1650 landwirtschaftliche Biogasanlagen in Betrieb (Schulz & Eder 2001; Fachverband Biogas 2002). Noch immer hält Bayern den größten Anteil an diesen Anlagen.

Wenn sich auch in jüngster Zeit vor allem für größere Biogasanlagen einzelne Bauformen zunehmend etablierten, so verlief doch die Entwicklung der Biogastechnologie lange Zeit sehr uneinheitlich. In der Praxis existiert daher eine Vielzahl unterschiedlicher Anlagenvarianten.

Das gesamte technische Primärenergiepotential aus der Vergärung von Gülle, pflanzlichen Nebenprodukten, Landschaftspflegematerialien und Energiepflanzen wird für Deutschland auf 353 bis 379 PJ/a geschätzt, was einem Anteil von 3,8 bis 4,1 % des Endenergieverbrauches bzw. von 11,5 bis 12,4 % des Primärenergieverbrauches an Naturgasen (hauptsächlich Erdgas) im Jahre 1999 entspricht (Kaltschmitt & Merten 2001).

Mit zunehmender Bedeutung des regenerativen Energieträgers Biogas rücken allerdings auch noch existierende technische und genehmigungsrechtliche Probleme im Bereich der Biogasverwertung in den Vordergrund. Hier sind insbesondere folgende Punkte zu nennen:

- Unklare Aussagen über die Effizienz von Biogas-Blockheizkraftwerken (BKHV),
- starke Schwankungen im Methangehalt des Biogases (in einzelnen und zwischen verschiedenen Anlagen),
- hohe Schwefelwasserstoff-Konzentrationen im Biogas,
- geringe Standzeiten von Katalysatoren in Biogas-BHKW und
- Probleme bei der Einhaltung der Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für mit Biogas betriebene Verbrennungsmotoren.

2 Stand des Wissens

Ein allgemeingültiger Stand der Technik landwirtschaftlicher Biogasanlagen ist angesichts der oben erwähnten Vielzahl von unterschiedlichen Bauformen und der rasanten Entwicklung der Branche kaum zu definieren. In der Vergangenheit wurden immer wieder Erhebungen durchgeführt, um einen Überblick über die zur Anwendung kommende Verfahrenstechnik und die Anlagenstruktur zu gewinnen.

Das Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) hat im Jahre 1995 eine Strukturanalyse der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland vorgenommen. Hierbei wurden unter anderem Daten zur geographischen Verteilung, der Rechtsform, der Anlagentechnik, den Einsatzstoffen, der Gaserzeugung und -verwertung sowie dem Investitionsaufwand erhoben (von Oheimb 1997). Eine von der Bayerischen Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur im Jahre 1997 durchgeführte Befragung diente der statistischen Erfassung aller landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern (Keymer et al. 1997). Dabei wurde nur von neueren Anlagen eine detailliertere Erhebung durchgeführt, um insbesondere die Datengrundlage für betriebswirtschaftliche Fragestellungen zu verbessern. Eine Evaluierung der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Baden-Württemberg Mitte 1997 wurde von Oechsner et al. (1999) vorgelegt. Mit Hilfe eines Fragenkataloges wurden Angaben zur Technik, den Leistungsdaten und dem Investitionsbedarf der Biogasanlagen ermittelt und zusätzlich Vorortbesuche und -messungen durchgeführt. Im folgenden soll im Hinblick auf die Zielstellung dieses Forschungsvorhabens lediglich kurz der Stand der Technik im Bereich der energetischen Biogasverwertung dargestellt werden.

Gemäß der erwähnten bundesweiten Erhebung an landwirtschaftlichen Biogasanlagen wurde im Jahre 1997 das erzeugte Biogas von 85 % der Betreiber in BHKW durch Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und nur auf 15 % der Anlagen lediglich thermisch verwertet (von Oheimb 1997). Im Vergleich zur Bereitstellung von Strom und Wärme aus getrennten Heizkessel- und Kraftwerksanlagen lassen sich in Blockheizkraftwerken mehr als 30 % an Primärenergie einsparen (Scholz 1995). Für die Nutzung des Biogases durch KWK kommen dabei derzeit praktisch ausschließlich Motoranlagen zum Einsatz. Diese haben für dezentrale Anwendungen gegenüber Heizkraftwerken oder Gasturbinen die Vorteile, dass sie:

- anlagentechnisch einfacher aufgebaut sind,
- auch im kleinen Leistungsbereich verfügbar sind,
- an den Wärmebedarf der Verbraucher gut angepasst werden können,
- mit hohem elektrischem Wirkungsgrad arbeiten und
- im Teillastbereich den Gasturbinen überlegen sind (Stein 1999).

Der Brennstoffzellentechnologie, die durch nochmals deutlich bessere elektrische Wirkungsgrade, äußerst geringe Emissionen und leisen Betrieb besticht, wird im Zusammenhang mit der dezentralen energetischen Biogasnutzung ein sehr großes Potential zugemessen. Diese Technologie ist derzeit jedoch noch nicht technisch ausgereift und wirtschaftlich konkurrenzfähig. Die mobile Nutzung von Biogas als Treibstoff in Fahrzeugen nach entsprechender Aufbereitung steckt in Deutschland noch in den Kinderschuhen, wird in Schweden und in der Schweiz jedoch bereits praktiziert (Weiland 2001). Ein weiterer möglicher Verwertungsweg, der allerdings eher für größere zentrale Anlagen in Frage kommt, ist die Einspeisung von aufbereitetem Biogas in das Erdgasnetz.

Bei den in Biogas-BHKW zum Einsatz kommenden Verbrennungsmotoren handelt es sich meist um auf Gas-Otto-Betrieb umgerüstete Benzinmotoren oder Diesel-Zündstrahlmotoren (Zündstrahlmotoren) für den kleineren bis mittleren Leistungsbereich (bis ca. 150 kW_{el.}) bzw.

auf Gas-Otto-Betrieb umgerüstete Dieselmotoren für die höheren Leistungsklassen. Beim Stirling-Motor, der aufgrund seiner externen Verbrennung prinzipiell für den Treibstoff Biogas sehr gut geeignet wäre, sind hingegen noch grundlegende technische Probleme zu lösen (Weiland 2001).

Oechsner et al. (1999) ermittelten unter landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Baden-Württemberg einen Anteil der Zündstrahlmotoren von 67 %. Bei der letzten in Bayern durchgeführten Erhebung betrug dieser Anteil 43 % (Keymer et al. 1997). Umgerüstete Benzinmotoren kommen vor allem bei sehr kleinen Maschinen zum Einsatz ($< 30 \text{ kW}_{\text{el}}$), da sie hier geringere Investitionskosten aufweisen (Dehl et al. 1999). Die elektrischen Wirkungsgrade¹ dieser Motoren im Leistungsbereich bis etwa $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ werden mit 27 bis 30 % angegeben (Martens, C. 1999).

Zündstrahlmotoren werden ab ca. 30 kW elektrischer Leistung bis in den MW-Bereich angeboten (Mohr 1997; Plautz 1997). Der elektrische Wirkungsgrad nimmt im für Biogas-BHKW relevanten Leistungsbereich von ca. 30 bis $300 \text{ kW}_{\text{el}}$ laut Herstellerangaben von 30-32 % für die kleinsten Aggregate auf 36-38 % zu (Plautz 1997; Pott 2001). Bei diesen Motoren wird zur Selbstzündung des Gemisches ein auf den Heizwert bezogener Anteil von 5 bis 10 % Zündöl eingespritzt, das heute noch meist aus fossilen Quellen stammt (Diesel oder Heizöl). Der Einsatz von Pflanzenöl ist grundsätzlich möglich, bringt jedoch noch einige technische Probleme mit sich (Schnell 2002). Dieser Motortyp bietet den Vorteil, dass bei einem Ausfall der Gasversorgung auch ein reiner Zündölbetrieb möglich ist.

Aufgrund der derzeit noch sehr eingeschränkten Verwertungsmöglichkeiten für die im BHKW anfallende thermische Energie („Abwärme“) in der Praxis kommt einem möglichst guten elektrischen Wirkungsgrad und damit einer hohen Stromproduktion vorrangige Bedeutung zu. Im allgemeinen kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die von den Herstellern unter optimalen Verhältnissen ermittelten Wirkungsgrade (Normgas, fabrikneues Aggregat, Vollastbetrieb, optimale Motorabstimmung etc.) auch in der Praxis erreicht werden (schwankende Biogasqualität, Alterung, Teillastbetrieb etc.). Messungen des elektrischen Wirkungsgrades an Praxisanlagen zeigten um 3 bis 4 Prozentpunkte geringere Werte als von den Herstellern angegeben (Mitterleitner 2001). Für $65 \text{ kW}_{\text{el}}$ -Zündstrahlmotoren wurden dort über einen längeren Zeitraum durchschnittliche elektrische Wirkungsgrade zwischen 27,3 und 29,2 % ermittelt. Wenn diese Befunde auch von vergleichsweise kleinen Motoren stammen (bis $65 \text{ kW}_{\text{el}}$), so können sie doch vermutlich auch auf größere Aggregate übertragen werden.

An das Brenngas werden zur Verwendung in Gasmotoren bestimmte Mindestanforderungen gestellt (Tabelle 1). Technische Probleme bei der Nutzung von Biogas in Motorenanlagen ergeben sich, wie bereits oben erwähnt, durch die schwankende Zusammensetzung des Biogases, insbesondere im Hinblick auf den Gehalt an Spurengasen (Abbildung 1). Die im Gas enthaltene Feuchte führt in Verbindung mit enthaltenem Schwefelwasserstoff (H_2S) zur Korrosion von Bauteilen im Motor sowie vor- und nachgeschalteten Anlagenteilen (Heinze et al. 2000). Außerdem kommt es zu einer raschen Versäuerung des Motorenöls. Zur Vermeidung von Motorschäden sollten deshalb die H_2S -Konzentrationen im Dauerbetrieb 200 ppm nicht überschreiten (Oechsner 1999). Grundanforderungen an Gasmotoren für die Nutzung von Biogas sind zudem

¹ Der elektrische Wirkungsgrad bezeichnet den Quotienten aus gewonnener elektrischer Leistung und eingesetzter Brennstoffleistung.

- korrosionsbeständige Werkstofflegierungen für Lager (kein Buntmetall),
- säurebeständige Gemischkühler (Ladeluftkühler) und
- aktive Kurbelgehäuseentlüftung.

Siliziumverbindungen, die allerdings nur bei Vergärung spezieller Co-Fermentate zu erwarten sind, können durch Ablagerungen in den Kolben zu einem stark erhöhten Verschleiß führen.

Die Problematik der im Biogas enthaltenen Spurengase hat insbesondere auch Auswirkungen auf die Maßnahmen zur Minderung der Abgasemissionen. Die für die Emissionen von biogasbetriebenen Motoranlagen relevante Vorschrift ist die „Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft“ (TA-Luft) als Verwaltungsvorschrift des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Eine Genehmigung von Biogasanlagen nach BImSchG ist zwar erst ab einer Gesamt-Feuerungswärmeleistung² der BHKW-Anlage von > 1 MW erforderlich, jedoch müssen auch nur nach dem Baurecht zu genehmigende BHKW dem sogenannten „Stand der Technik“ genügen, der von der TA-Luft repräsentiert wird (Stein 1999).

Tabelle 1: Mindestanforderungen an Brenngase für Gasmotoren (nach Prescher et al. 2001)

Unterer Heizwert	> 4kWh/m ³ _n
Methangehalt	> 40 Vol.-%
Gesamtschwefel	< 2.300 mg/m ³ _n CH ₄
Chlor	< 100 mg/m ³ _n CH ₄
Fluor	< 50 mg/m ³ _n CH ₄
Summe Chlor und Fluor	< 100 mg/m ³ _n CH ₄
Silizium	< 10 mg/m ³ _n CH ₄
Feststoffanteil (Teilchengröße < 1 µm)	< 30 mg/m ³ _n CH ₄
Schwefelwasserstoff	< 0,15 Vol.-%

Bei mit Erdgas betriebenen Gas-Otto-Motoren werden vor allem zwei Verfahren zur Emissionsminderung angewandt, die eine Unterschreitung der Schadstoffgrenzwerte im Abgas nach TA-Luft um bis zu 50 % ermöglichen: der geregelte Betrieb bei stöchiometrischem Luftverhältnis³ ($\lambda=1$) in Kombination mit einem 3-Wege-Katalysator und der extreme Magerbetrieb ($\lambda=1,8...2,1$) ohne Abgasnachbehandlung (Prescher et al. 2001). Ein extremer Magerbetrieb ist mit Biogas als Schwachgas aufgrund der geringen Brenngeschwindigkeit nicht realisierbar.

Über die Auswirkungen des Methangehaltes im Brenngas auf den motorischen Verbrennungsablauf berichten Prescher et al. (2001) aus Versuchen mit reinen Methan-Kohlendioxid-Mischungen an einem Gas-Otto-Motor. Demnach kommt es mit abnehmendem Methangehalt zu einer zunehmenden Verschleppung der Verbrennung, wodurch die

² Die Feuerungswärmeleistung bezeichnet den auf den unteren Heizwert bezogenen Wärmehalt der Brennstoffmenge, die dem BHKW im Dauerbetrieb pro Zeiteinheit zugeführt wird.

³ Die Luftverhältniszahl (λ) gibt das Verhältnis von eingestelltem Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu stöchiometrischem Verhältnis an. Gemische mit Luftüberschuss werden als „mager“, solche mit Kraftstoffüberschuss als „fett“ bezeichnet.

Emissionen an Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Kohlenwasserstoffen (HC) ansteigen. Die Stickoxid (NO_x)-Emissionen nehmen dagegen deutlich ab, da die thermische NO-Bildung, die für den Hauptteil der NO_x-Emissionen verantwortlich ist, stark positiv temperaturabhängig ist.

Ein geregelter Katalysatorbetrieb ist mit Biogas wegen der den Katalysator schädigenden Spurengasbestandteile (insbesondere H₂S, das im Motor zu Schwefeldioxid (SO₂) oxidiert wird) ebenfalls nicht praktikabel, wenn nicht eine sichere Entfernung dieser Komponenten durch entsprechende Gasaufbereitung gewährleistet ist. Dasselbe Problem stellt sich bei einem Magerbetrieb in Kombination mit einem Oxidationskatalysator. Nach Herstellerangaben kann ein Oxidationskatalysator im Dauerbetrieb nur eine maximale Konzentration an katalysatorschädigenden Spurengasen von 30 ppm verkraften (Schattner & Gronauer 2000). Mit dem auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen derzeit praktisch ausschließlich angewandten, biologischen Entschwefelungsverfahren durch Einblasung von Luft (oder Sauerstoff) können bei guter Betriebsführung H₂S-Konzentrationen < 50 ppm (70 mg/m³) erreicht werden (Geschwind & Dichtl 2001; dies entspricht im übrigen dem ab 2005 gültigen Richtwert für Kraftstoffe in der EU). In der Praxis ist dies jedoch nicht immer gewährleistet und können, wie auch in unveröffentlichten Untersuchungen der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik (Landtechnik Weihenstephan) festgestellt, kurzzeitige H₂S-Konzentrationsspitzen auftreten, die bereits zu einer irreversiblen Schädigung des Katalysators führen (Abbildung 2). Zur Reduktion von CO und HC ohne den Einsatz eines Katalysators kann eine thermische Abgasnachbehandlung erfolgen, die jedoch erst ab einer Feuerungswärmeleistung von ca. 1,5 MW wirtschaftlich ist (Jenbacher 2001).

Andere potentiell katalysatorschädigende Inhaltsstoffe außer H₂S im Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen sind organische Schwefelverbindungen (Thioether, Sulfide, Disulfide etc.) sowie Phosphin (Glindemann & Bergmann 1995; Glindemann et al. 1996). Siloxane bereiten vor allem in Deponie- und Klärgas Probleme durch Ablagerungen von SiO₂ im Motor und Katalysator (Waerdt 1996; Jenbacher 2001); im Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen sind diese höchstens bei Einsatz spezieller Co-Fermentate (Abwässer, Fettabscheiderinhalte) zu vermuten.

Die Einhaltung der TA-Luft-Grenzwerte für Stickoxide (NO_x) und CO kann nach Literatur- und Herstellerangaben mit modernen Magergemischmotoren in Verbindung mit innermotorischen Maßnahmen (verringertes Verdichtungsverhältnis, späterer Zündzeitpunkt und gekühlte Abgassammelrohre) ohne Abgasnachbehandlung erreicht werden, die jedoch mit Wirkungsgradeinbußen verbunden sind (Köhler 1997; Waerdt 2000; Pott 2001). Diese Aussagen beziehen sich zudem überwiegend auf Aggregate im Leistungsbereich von 100 kW_{el.} und mehr.

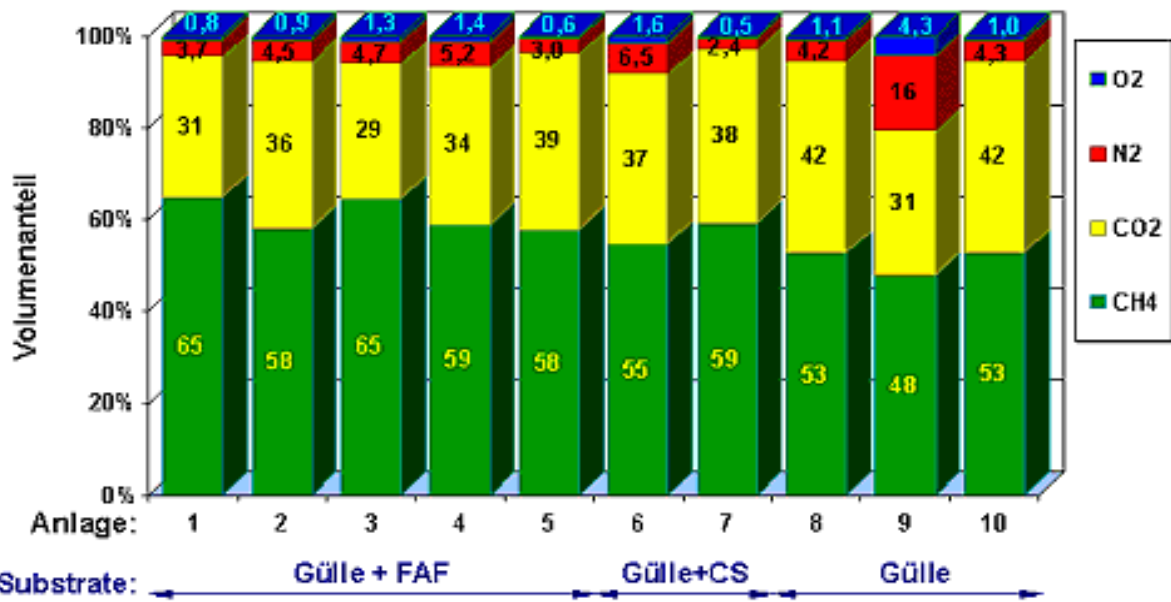


Abbildung 1: Zusammensetzung des Biogases aus zehn landwirtschaftlichen Anlagen in Bayern für verschiedene Substrate (FAF: Fettabscheiderflotat, CS: sonstige Co-Substrate, z.B. Pülpe, Gemüseabfälle); Quelle: Huber & Mair 1997

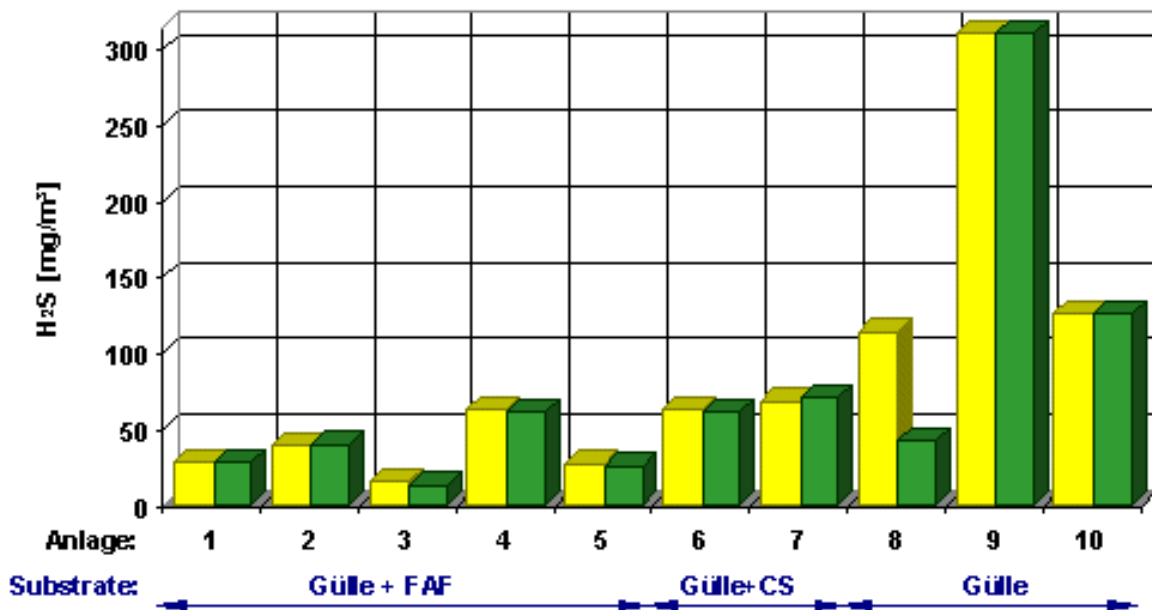


Abbildung 2: Schwefelwasserstoffgehalte im Biogas aus zehn landwirtschaftlichen Anlagen in Bayern für verschiedene Substrate (Nachweisgrenze 1 mg/m³. FAF: Fettabscheiderflotat; CS: sonstige Co-Substrate, z.B. Pülpe, Gemüseabfälle); Quelle: Huber & Mair 1997

Bei Zündstrahlmotoren ist zu beachten, dass die Rohemissionen während des laufenden Betriebes stark von variierenden Brenngaszusammensetzungen und der Betriebsart (Diesel oder Diesel/Gas) abhängig sind. Dieselmotoren werden mit hohem Luftüberschuss gefahren, um die Rußemissionen gering zu halten, die außerdem von der Vermischung von Brennstoff und Luft im Brennraum abhängen (Baumbach 1990). Weitere Einflussfaktoren auf die Abgaszusammensetzung sind Einspritzbeginn und -ende sowie der Zündverzug. Bei reinem

Dieselbetrieb sind die Emissionen an CO und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) gering. Der Ausstoß an NO_x ist bei Volllast jedoch relativ hoch, so dass der entsprechende Grenzwert der TA-Luft nur schwer und unter Inkaufnahme von Wirkungsgradverlusten erreicht werden kann (Mohr 1997).

Beim Betrieb mit Biogas kommen als unverbrannte Kohlenwasserstoffe überwiegend Methan (CH₄) und Produkte dessen unvollständiger Verbrennung wie Formaldehyd (HCHO) vor. Während die NO_x-Emissionen gegenüber dem reinen Dieselbetrieb stark absinken, nehmen die CO-Konzentrationen im Abgas zu. Eine möglichst geringe Zündölmenge bewirkt niedrige Emissionen an Ruß (und NO_x). Die Staubemissionen werden vom Staubgehalt der Luft und des Brenngases sowie dem Ascheanteil des eingesetzten Motorenöls bestimmt. Schmieröle mit hohem Aschegehalt (hohe TBN – Total Base Number) führen bei der Mitverbrennung im Zylinder zu mehr Staub im Abgas als solche mit niedriger TBN (Mohr 1997). Andererseits ist im Hinblick auf säurebildende Spurengase im Biogas eine hohe Neutralisationswirkung des Motorenöls wünschenswert (Heinze et al. 2000).

Die hier betrachteten Schadgase CO, NO_x und SO₂ haben unterschiedliche Schädwirkungen auf die Umwelt. Die Wirkung von Kohlenmonoxid betrifft nur Mensch und Tier; die Vegetation nimmt durch dieses Gas keinen Schaden. Dadurch, dass CO eine 250fach höhere Affinität zum Blut-Hämoglobin hat als Sauerstoff, wirkt sich dieses Gas auf den Sauerstofftransport im Blutkreislauf aus. Durch eine Unterversorgung mit Sauerstoff werden die Funktionen des Zentralnervensystems und des Herzkreislaufsystems gestört. Die Beeinträchtigung hängt von der CO-Konzentration der Atemluft sowie der Atemtiefe und der Einatemungszeit ab. Weitere Störungen können durch den Sauerstoffmangel an Organen wie Gehirn, Herz, Leber und Nieren auftreten (Lahmann 1990). Neben der oben beschriebenen direkten Wirkung auf Organismen hat CO auch eine mehr systemische Wirkung: es greift in der Atmosphäre Hydroxylradikale (OH) an, welche für den Abbau von Methan als Treibhausgas relevant sind. Der größte Teil der weltweiten CO-Emissionen stammt aus der unvollständigen Verbrennung von fossilen Brennstoffen sowie von Biomasse (Brandrodung). Das Gas hat in der Atmosphäre eine mittlere Verweilzeit von zwei Monaten (Nisbet 1994).

Die Relevanz der NO_x-Emissionen liegt hauptsächlich in der systemischen Schädwirkung. Unter NO_x werden Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid zusammengefasst. Ersteres ist farblos und in Wasser schwer löslich, Stickstoffdioxid ist rotbraun. Unter normalen atmosphärischen Bedingungen kommen Stickoxide nur in Form von NO₂ vor. Bei Verbrennungsprozessen wird der größte Teil der Stickoxide in Form von NO in die Atmosphäre emittiert und dort in Abhängigkeit von Verweilzeit, Konzentration und meteorologischen Bedingungen zu NO₂ oxidiert (Lahmann 1990). NO wirkt selbst nur in sehr hohen Konzentrationen giftig, ist jedoch in Ballungsgebieten für die Bildung von troposphärischem Ozon verantwortlich. NO₂ wirkt als Reizgas auf Schleimhäute und Atemwege und trägt zur Entstehung von saurem Regen bei.

SO₂ greift als Reizgas die Augen- und Atemschleimhäute des Menschen an. Geringe Konzentrationen können bereits die Atemfunktionen beeinträchtigen. Insbesondere Pflanzen reagieren empfindlich auf erhöhte SO₂-Konzentrationen, denn der Assimilationsvorgang der Photosynthese wird gestört. Das Ausmaß der Schädigung hängt von Dauer, Intensität und Zeitpunkt der Einwirkung ab. Anthropogene Quellen von SO₂ sind die Verbrennung von schwefelhaltigen fossilen Brennstoffen und Biomasse sowie die chemische und Metall-Industrie. Die Säurebildung aus SO₂ führt zu korrosiven Schädigungen an Baustoffen, Metallen, Kunststoffen, Textilien und Farben und ist mit den Stickoxiden für die Bildung von „Saurer Regen“ verantwortlich (Lahman 1990).

Tabelle 2: Grenzwerte der alten und „neuen“ TA-Luft für Emissionen im Abgas von mit Biogas betriebenen Verbrennungsmotoranlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von ≥ 1 bis < 3 MW

Parameter	Grenzwerte TA-Luft	
	1986	2001
Selbstzündungsmotoren		
CO	0,65 g/m ³	2,0 g/m ³
NO _x ¹⁾	4,0 g/m ³ ²⁾	1,0 g/m ³
SO _x	0,50 g/m ³ ³⁾	0,35 g/m ³ ³⁾
Staub	130 mg/m ³ ⁴⁾	20 mg/m ³
Viertakt-Fremdzündungsmotoren		
CO	0,65 g/m ³	1,0 g/m ³
NO _x ¹⁾	0,50 g/m ³	0,50 g/m ³
SO _x	0,50 g/m ³ ³⁾	0,35 g/m ³ ³⁾

¹⁾ Angabe als NO₂

²⁾ Ab 1991: 1,0 g/m³, möglichst durch SCR-Verfahren (selektive katalytische Reduktion)

³⁾ Eine weitere Emissionsminderung durch primärseitige Maßnahmen nach dem Stand der Technik ist anzustreben.

⁴⁾ Ab 1991: 80 mg/m³ für Motoren mit < 1 MW Feuerungswärmeleistung durch motorische Maßnahmen; der Einsatz von Rußfiltern ist anzustreben.

Alle Werte bezogen auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 5 Vol.-%.

Eine Sammlung von Emissionsdaten aus Abgasmessungen an BHKW landwirtschaftlicher Biogasanlagen hat ergeben, dass in den meisten Fällen die Grenzwerte der alten TA-Luft (Anon. 1986) von Zündstrahlmotoren ohne Abgaskatalysatoren für CO meist nicht und für NO_x in Einzelfällen nicht eingehalten wurden (Schattner 2000). Im Rahmen der Überarbeitung der TA-Luft (Tabelle 2) wurden die Grenzwerte für Emissionen von mit Biogas betriebenen Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren geändert, um diese an die momentane technische Praxis anzupassen (Anon. 2001). Zieht man die oben erwähnte Datensammlung heran, so wurden jedoch auch diese Grenzwerte nicht von allen untersuchten Aggregaten eingehalten. Vom LfU wurden daher für Anlagen mit weniger als 1 MW Feuerungswärmeleistung an der Praxis orientierte Grenzwerte empfohlen (siehe Anlage 1).

Für die Minderung der Schwefeloxid (SO_x)-Emissionen sind nach TA-Luft primärseitige Maßnahmen nach dem Stand der Technik anzuwenden, d. h. es ist eine Entschwefelung des Biogases vorzunehmen. Als Stand der Technik in der landwirtschaftlichen Biogastechnologie ist derzeit, wie oben erwähnt, die biologische Entschwefelung durch Lufteinblasung zu bezeichnen. Eine H₂S-Konzentration im Biogas von 0,15 Vol.-% (1500 ppm) resultiert nach Plautz (1997) in einer SO₂-Konzentration im Abgas von Zündstrahlmotoren von ca. 420 mg/m³. Die Emissionen an Schwefeloxid sind daher bei einer funktionierenden biologischen Entschwefelung vergleichsweise gering.

3 Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der in den letzten Jahren rasant und immer noch uneinheitlich verlaufenden Entwicklung der Biogastechnologie fehlt eine aktuelle Übersicht über den technischen Stand der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern. Dies umfasst vor allem die Bereiche Anlagentechnik, Biogasqualität und –nutzung sowie Verwertung der Gärreste.

Im Bereich der energetischen Verwertung des Biogases ist der Kenntnisstand über die tatsächlichen Emissionen von biogasbetriebenen Blockheizkraftwerken als mangelhaft anzusehen. Dies gilt insbesondere für kleinere Aggregate auf Anlagen, die keiner Genehmigungspflicht nach BImSchG unterliegen. In Einzelfällen wurden Abgasmessungen nach Inbetriebnahme mit funktionsfähigen, neuwertigen Katalysatoren durchgeführt. Da gebräuchliche Abgaskatalysatoren, wie oben dargelegt, durch die im Biogas enthaltenen Spurengase rasch inaktiviert werden, werden sie im Regelbetrieb jedoch derzeit nicht eingesetzt. Die wenigen vorliegenden Abgasmesswerte deuten darauf hin, dass die auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen ohne Abgasnachbehandlung betriebenen Gas-Otto- und vor allem Zündstrahlmotoren die Emissions-Grenzwerte nach TA-Luft in vielen Fällen nicht einhalten.

Forschungsbedarf besteht außerdem hinsichtlich der Kinetik der Katalysator-Inaktivierung sowie der bedeutsamen Konzentrationen einzelner Spurengase für den Funktionsverlust von Abgaskatalysatoren und wie diese zuverlässig aus dem Biogas entfernt werden können. Dabei liegen die Probleme weniger bei der technischen Machbarkeit, sondern im Spannungsfeld von technischen Möglichkeiten und der praktischen Umsetzbarkeit innerhalb der vor allem bei kleineren landwirtschaftlichen Biogasanlagen eng gesteckten wirtschaftlichen Grenzen.

Ziel des Projektes „Biogasanlagen-Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas-Blockheizkraftwerken“ ist es, detaillierte Informationen zum aktuellen Stand der landwirtschaftlichen Biogastechnik in Bayern zu erheben, wobei der Schwerpunkt im Bereich Abgasemissionen aus der energetischen Verwertung von Biogas in BHKW-Anlagen gelegt wurde. Das Vorgehen gliederte sich dabei in mehrere Phasen.

In Phase 1 und 2 wurde von der Landtechnik Weihenstephan ein Fragebogen zur Ermittlung des allgemeinen Standes der Technik landwirtschaftlicher Biogasanlagen erarbeitet und an alle Anlagenbetreiber in Bayern verschickt. Die Durchführung der Umfrage erfolgte durch den Fachverband Biogas e.V. als Unterauftragnehmer. Aus dem Rücklauf der ersten Fragebogenaktion wurden ca. 10 % der Gesamtanlagen aus verschiedenen Größenklassen ausgewählt, um von diesen in einer zweiten Umfrage detailliertere Informationen vor allem hinsichtlich Biogasqualität und BHKW-Technik zu erheben (Phase 3). Aus den erhobenen Anlagen wurde schließlich für die vierte Projektphase wiederum eine Auswahl nach der Leistung des BHKW getroffen, und auf diesen Anlagen wurden zu mehreren Zeitpunkten Abgasmessungen im normalen Betriebszustand durchgeführt.

In Ergänzung zu den oben dargestellten Projektinhalten wurde im April 2001 ein weiteres Vorhaben zum Thema „Luftreinhaltung bei biogasbetriebenen Zündstrahlmotoren – Messungen durch eine § 26-Messstelle“ zur Förderung genehmigt, das im Rahmen dieses zusammenfassenden Berichtes mit abgehandelt wird. Ziel dieses Vorhabens ist die Ermittlung von detaillierteren Emissionsdaten an einem biogasbetriebenen Zündstrahlaggregat in einer nach BImSchG genehmigungspflichtigen BHKW-Anlage. Die Abgasmessungen wurden durch eine nach § 26 BImSchG zugelassene Messstelle durchgeführt. Besonderes Augenmerk

wurde hierbei auf die Abhängigkeit der Abgasemissionen von der Brenngaszusammensetzung gelegt. Hierzu wurde der Methangehalt des Biogases für die Abgasmessungen durch Verdünnung künstlich variiert.

Die ermittelten Daten aus den Praxismessungen bilden die Grundlage, um beurteilen zu können, inwiefern die Emissionsgrenzwerte der überarbeiteten TA-Luft der Realität von Biogas-BHKW in der Landwirtschaft gerecht werden und wo technischer Handlungsbedarf besteht. Sie ermöglichen außerdem eine bessere Einordnung der Bedeutung von biogasbetriebenen BHKW als Quellen für Luftschadstoffe.

In Erweiterung des obigen Projektes wird die Landtechnik Weihenstephan in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Institut für Angewandte Umweltforschung und –technik GmbH (BIfA) unter dem Titel „Untersuchungen zum Einsatz von Oxidationskatalysatoren an landwirtschaftlichen Biogas-Verbrennungsmotoren“ detaillierte Informationen hinsichtlich des Einsatzes von Abgaskatalysatoren auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen erarbeiten. Die zum Zeitpunkt dieser Berichterstattung erfolgten Arbeitsschritte dieses Projektes werden im folgenden ebenfalls dokumentiert.

4 Umfragen zur Ermittlung des technischen Standes

Das Ziel dieser Umfragen war die Ermittlung des technischen Standes bei landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern, wobei der Schwerpunkt auf die derzeit praktisch ausschließlich in Blockheizkraftwerken (BHKW) mit Verbrennungsmotoren erfolgende energetische Verwertung des Biogases zu legen war. Hierzu wurde in einer ersten Umfrage („Fragebogen I“) zunächst ein Gesamtüberblick über alle nach Kenntnis des Fachverbandes Biogas e.V. zum Erhebungstermin in Bayern betriebenen landwirtschaftlichen Biogasanlagen ermittelt. Aus den erfassten Anlagen wurde dann für die zweite Umfrage („Fragebogen II“) eine kleinere Stichprobe von 41 Anlagen ausgewählt, um von diesen detailliertere Informationen zur Biogasproduktion und –qualität sowie den dort eingesetzten BHKW abzufragen.

Die Ergebnisse der Umfragen wurden in eine Datenbank eingearbeitet, grafisch aufbereitet und werden im Internet auf der Homepage des Bayerischen Landesamt für Umweltschutz unter <http://www.bayern.de/lfu> → Luftreinhaltung → Veröffentlichungen → Umweltforschung (oder direkt <http://www.bayern.de/lfu/luft/veroeffentlich/umweltforsch/>) veröffentlicht. In den folgenden Abschnitten folgt eine Zusammenfassung der Umfrageergebnisse.

4.1 Auswertung des Fragebogens I

In einer ersten Erhebung wurde Anfang November 2000 an alle dem Fachverband Biogas e.V. bekannten Biogasanlagenbetreiber in Bayern ein Fragebogen mit überwiegend „multiple-choice“-Fragen verschickt. Bei einer damaligen Zahl von 336 in Betrieb befindlichen Biogasanlagen in Bayern betrug der Rücklauf 150 Stück oder 45 % der verschickten Fragebögen. Die Fragen waren in die Bereiche Biogasanlage und Substrat, Gasspeicherung und -aufbereitung, Gasverwertung, BHKW und Verwertung des Gärrestes gegliedert.

4.1.1 Anlagendaten

Über 80 % der erfassten Anlagen wurden nach 1993 erstellt (Abbildung 1). Der deutliche Anstieg des Zubaus von Biogasanlagen ab diesem Jahr ist als verzögerte Reaktion auf das im Dezember 1990 verabschiedete Stromeinspeisungsgesetz zu sehen. Der verhaltene Bau von Neuanlagen im Jahr 2000 kann auf die Vorsicht potentieller Investoren im Vorfeld der Verabschiedung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im April 2000 zurückgeführt werden. Die Erweiterung bereits bestehender Biogasanlagen erreichte jedoch im selben Jahr ihren Höhepunkt (Abbildung 4). Ein Grund dafür ist die Tatsache, dass sogenannte „Altanlagen“ nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz den gleichen Stromeinspeisungstarif erhalten wie Neuanlagen.

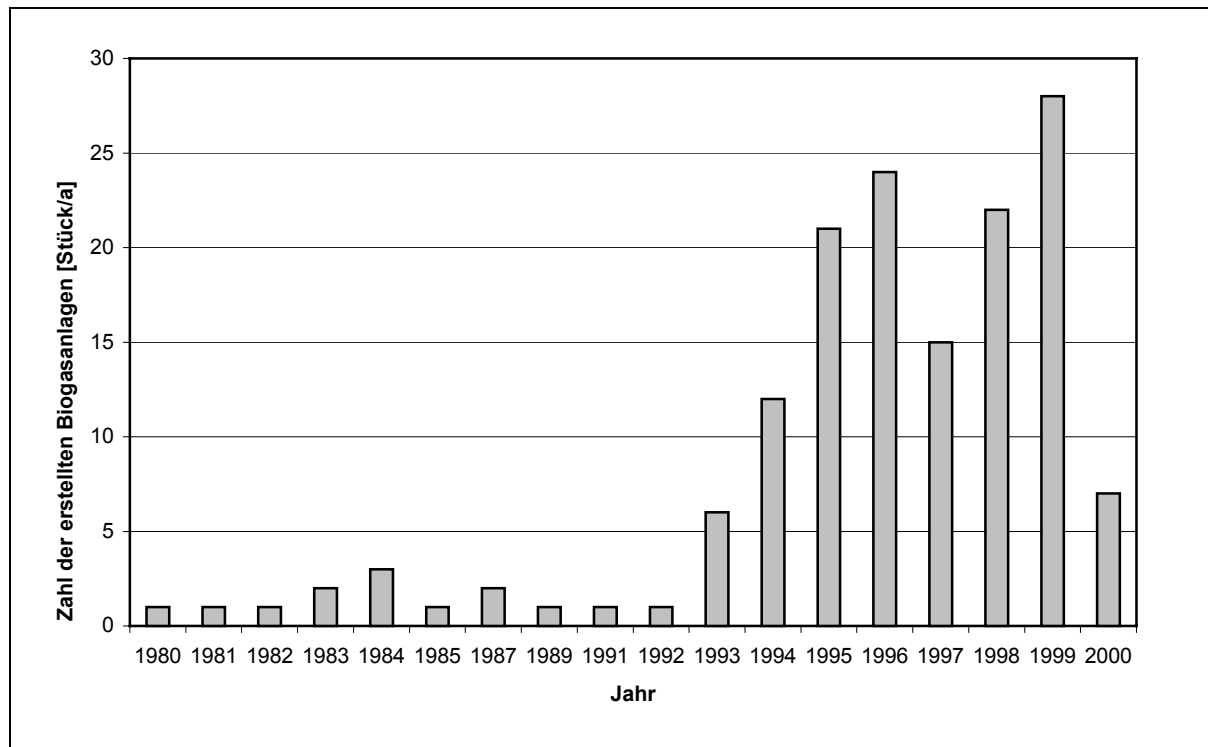


Abbildung 3: Umfrage I: Verteilung des Baujahres der erfassten Biogasanlagen

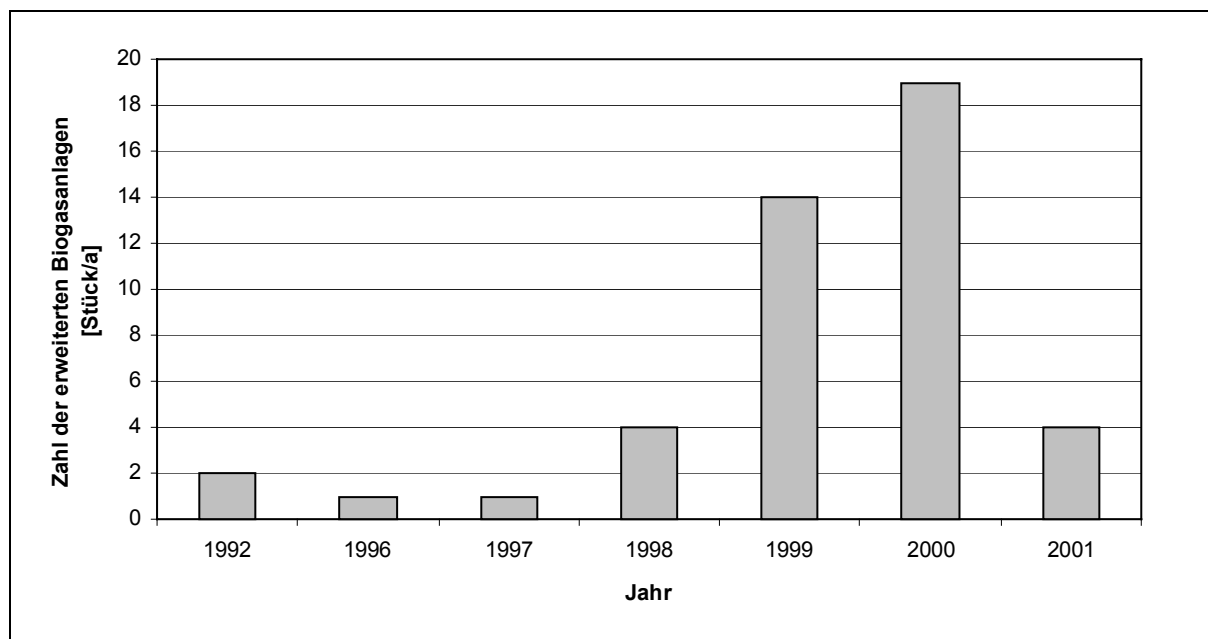


Abbildung 4: Umfrage I: Jahr der Erweiterung bestehender Biogasanlagen

Die Umfrage ergab, dass 92 % der Anlagen in Bayern einstufig (Hydrolyse und Methanbildung in einem Behälter) und 8 % zweistufig betrieben werden. Knapp 80 % der Anlagen werden „quasi-kontinuierlich“, d. h. mehrmals täglich mit Substrat beschickt, bei den restlichen Anlagen erfolgt ein kontinuierlicher Zustrom von Substrat in den Fermenter. Über eine Vorgrube zur Homogenisierung und Zerkleinerung des Substrats vor der Einbringung in den Fermenter verfügen 75 % der Anlagen, deren Fassungsvermögen bewegt sich zwischen 1 und 350 m³ (Abbildung 5). Fast alle Betreiber setzen Wirtschaftsdünger verschiedener Art als Basissubstrat ein, ca. 84 % der Anlagen verarbeiten zusätzlich Co-Fermentate

unterschiedlicher Art und Herkunft (Tabelle 3 und Tabelle 4). Die jährlich umgesetzten Substratmengen unterschieden sich sehr stark (Tabelle 5). Aus Tabelle 3 ist zu ersehen, dass die weit verbreitete Annahme, so gut wie alle landwirtschaftlichen Biogasanlagen würden Fettabseiderinhalte und Flotatfette mit verarbeiten, nicht stimmt. Summiert man die Anlagen, die diese beiden Stoffe einsetzen auf, so sind dies nur 20 % aller erfassten Anlagen.

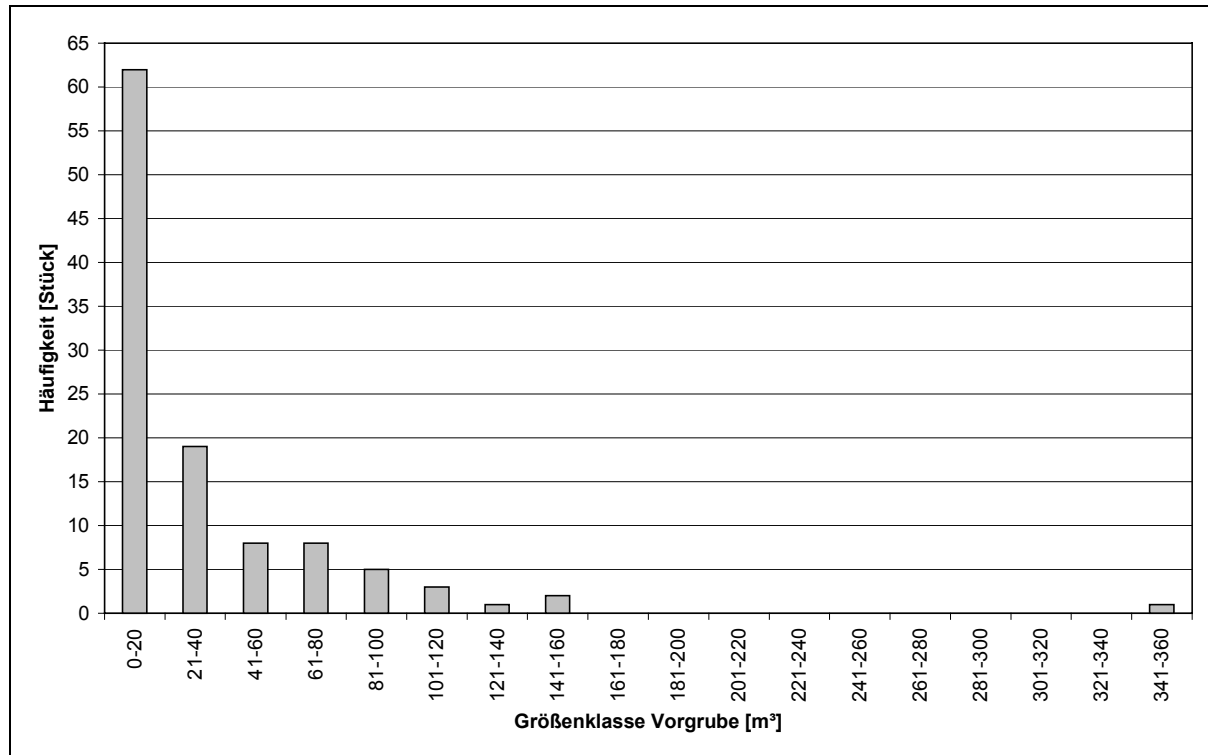


Abbildung 5: Umfrage I: Größenverteilung der Vorgruben

Tabelle 3: Umfrage I: Art und Häufigkeit der eingesetzten Substrate

Substrat	Zahl der Anlagen	Prozent	Substrat	Zahl der Anlagen	Prozent
Gülle/Mist	146	97,3	Getreideabputz	4	2,7
Maissilage	83	55,3	Glycerin	4	2,7
Grünschnitt / Mähgut	61	40,7	Altbrot	3	2,0
Grassilage	52	34,7	Trester	2	1,3
Stroh	22	14,7	Alkohol	2	1,3
Fettabseiderrückstand	22	14,7	Getreide	2	1,3
Ölsaatenrückstände	18	12,0	Frittierfett	2	1,3
Schlempe	11	7,3	Magen-/Panseninhalt	1	0,7
Gemüseabfälle	9	6,0	Apfelteig	1	0,7
Kartoffelabfall	9	6,0	Rapsabputz	1	0,7
Flotatschlamm	8	5,3	Milchpulver	1	0,7
Bioabfälle (kommunal)	7	4,7	Gelatine	1	0,7
Treber	5	3,3	pflanzliche Extrakte	1	0,7

Substrat	Zahl der Anlagen	Prozent	Substrat	Zahl der Anlagen	Prozent
<i>Speiseabfälle (Großküche)</i>	5	3,3	<i>Lactose</i>	1	0,7
Teig	5	3,3	Corn-Cob-Mix	1	0,7
Pülpe	5	3,3	Maistrockenabfälle	1	0,7
Rüben	4	2,7	<i>Schokoabfälle</i>	1	0,7
<i>Molke</i>	4	2,7	<i>Gewürzabfälle</i>	1	0,7

Tabelle 4: Umfrage I: Verteilung der Tierarten, deren Exkremente als Basissubstrat in Biogasanlagen eingesetzt werden

Tierart	Zahl der Betriebe [Stück]
Rinder	123
Schweine	42
Hühner	6
Pferde	4
Summe	175

Tabelle 5: Umfrage I: Jährliche Einsatzmengen von Substraten

	Wirtschaftsdünger [m ³ /a]	Co-Fermentate [t/a]	NaWaRo [m ³ /a]
Mittelwert	1829	1380	253
Minimum	200	1	5
Maximum	6000	22000	1000

Die meisten Anlagen arbeiten auf mesophilem Temperaturniveau (Abbildung 6), die mittlere Fermentertemperatur liegt bei 41°C. Über 80 % der Anlagen haben keine Hygienisierungseinrichtung für das Substrat. Etwa 18 % der Anlagen bekommen das Material hygienisiert angeliefert, haben eine eigene Möglichkeit der thermischen Vorbehandlung oder betreiben den Fermenter im thermophilen Temperaturbereich (Abbildung 7). Auf knapp 80 % der befragten Biogasanlagen ist nur ein Fermenter installiert, etwa 18 % der Anlagen sind mit zwei Fermentern bestückt, unter 3 % der Anlagen arbeiten mit drei Fermentern (Abbildung 8). Das Gesamtvolumen der Fermenter pro Biogasanlage unterscheidet sich genauso wie die verarbeitete Substratmenge von Anlage zu Anlage sehr stark (Tabelle 6). Bei den Bauformen haben sich im landwirtschaftlichen Bereich stehende Betonfermenter (i. d. R. modifizierte Güllelager) durchgesetzt, die zumeist zylindrisch ausgeführt sind (Tabelle 7). Beheizt werden diese Fermenter größtenteils mit Fußboden- und/oder Wandheizungen. Zur Homogenisierung werden auf über 90 % der Anlagen mechanische Rührwerke eingesetzt. Die kleinste der erfassten landwirtschaftlichen Biogasanlagen weist 30 m³ Fermentervolumen auf, die größte über 500 m³. Die hydraulischen Verweilzeiten des Substrats in den Biogasanlagen sind sehr unterschiedlich (Abbildung 9). Etwa 72 % der Anlagen weisen eine mittlere Verweilzeit des Substrats von mehr als 30 Tagen auf, davon 48 % zwischen 30 und 60 Tagen.

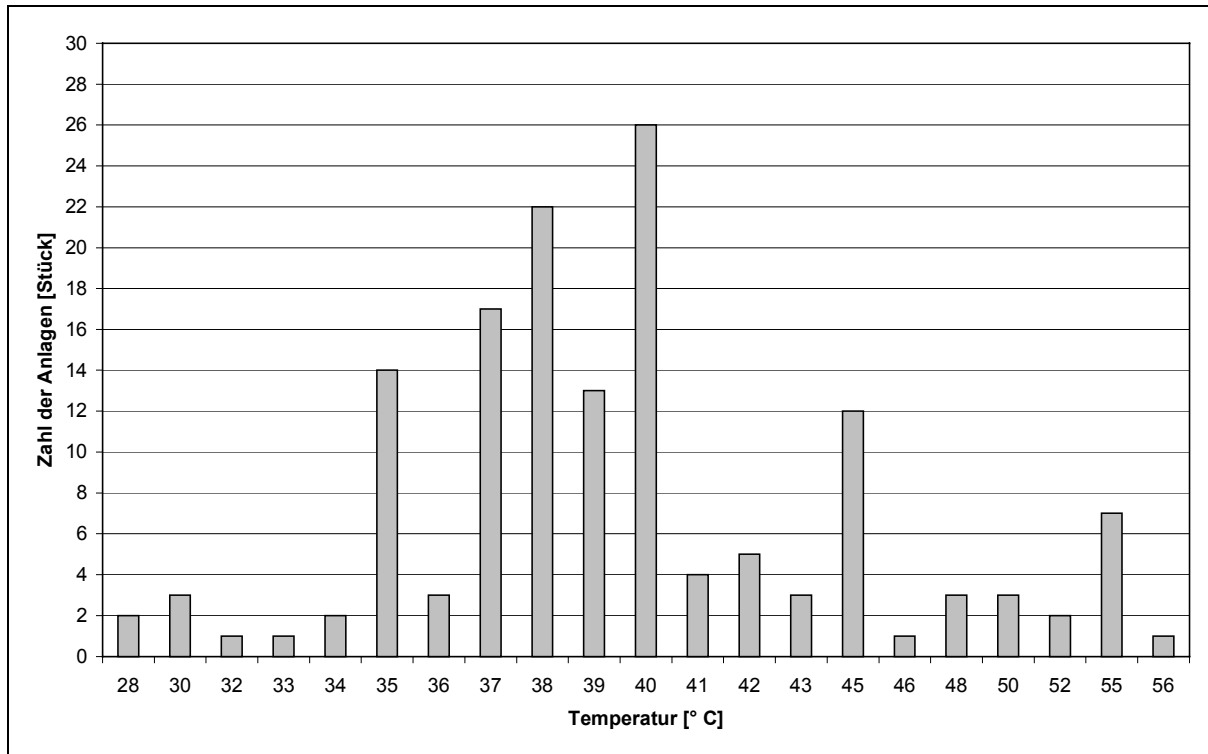


Abbildung 6: Umfrage I: Prozesstemperatur der erfassten Biogasanlagen

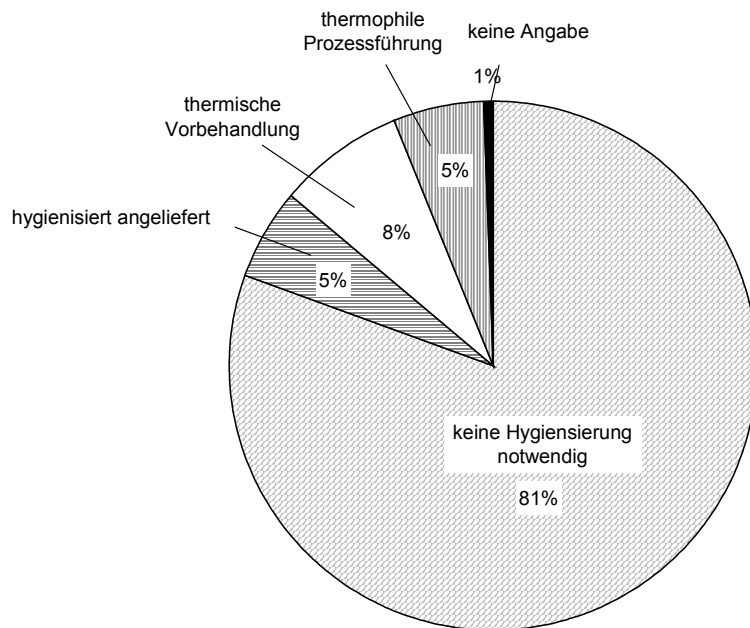


Abbildung 7: Umfrage I: Substratvorbehandlung

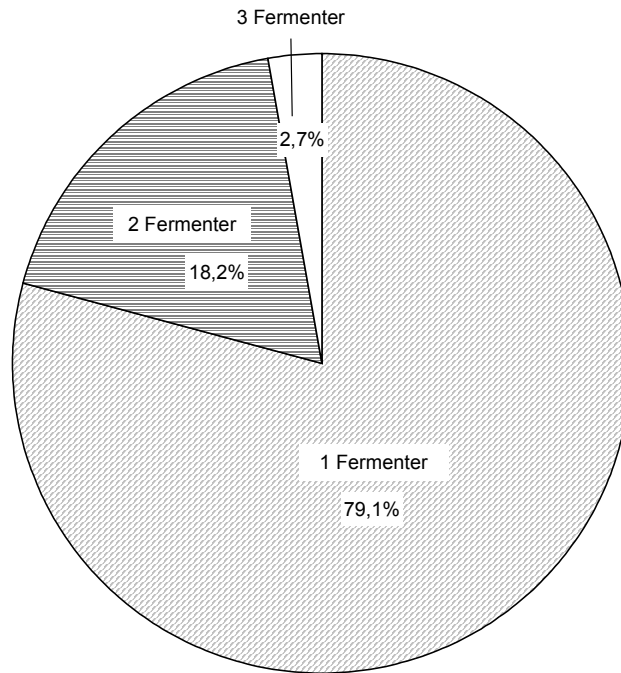


Abbildung 8: Umfrage I: Zahl der Fermenter auf den erfassten Biogasanlagen

Tabelle 6: Umfrage I: Gesamt-Fermentervolumen der erfassten Biogasanlagen

	Fermentervolumen [m³] (mit Abfallanlagen)	Fermentervolumen [m³] (ohne Abfall-Anlagen)
Mittelwert	557,15	522,92
Minimal	30	30
Maximal	3000	2200

Tabelle 7: Umfrage I: Fermenterbauformen, Heizung und Mischeinrichtungen

	Anzahl	Anteil [%]
Betonbehälter	137	90,1
Stahlbehälter	13	8,6
Sonstige Behälter	2	1,3

Eckiger Behälter	12	9,3
Zylindrischer Behälter	117	90,7

Wandheizung	95	63,3
Fußbodenheizung	95	63,3
Rührwellenheizung	11	7,3
außenliegender Wärmetauscher	2	1,3

Mechanisches Rührwerk	136	90,1
Hydraulisches Rührwerk	6	4,0
Pneumatisches Rührwerk	7	4,6
Schwerkraftmischung	2	1,3

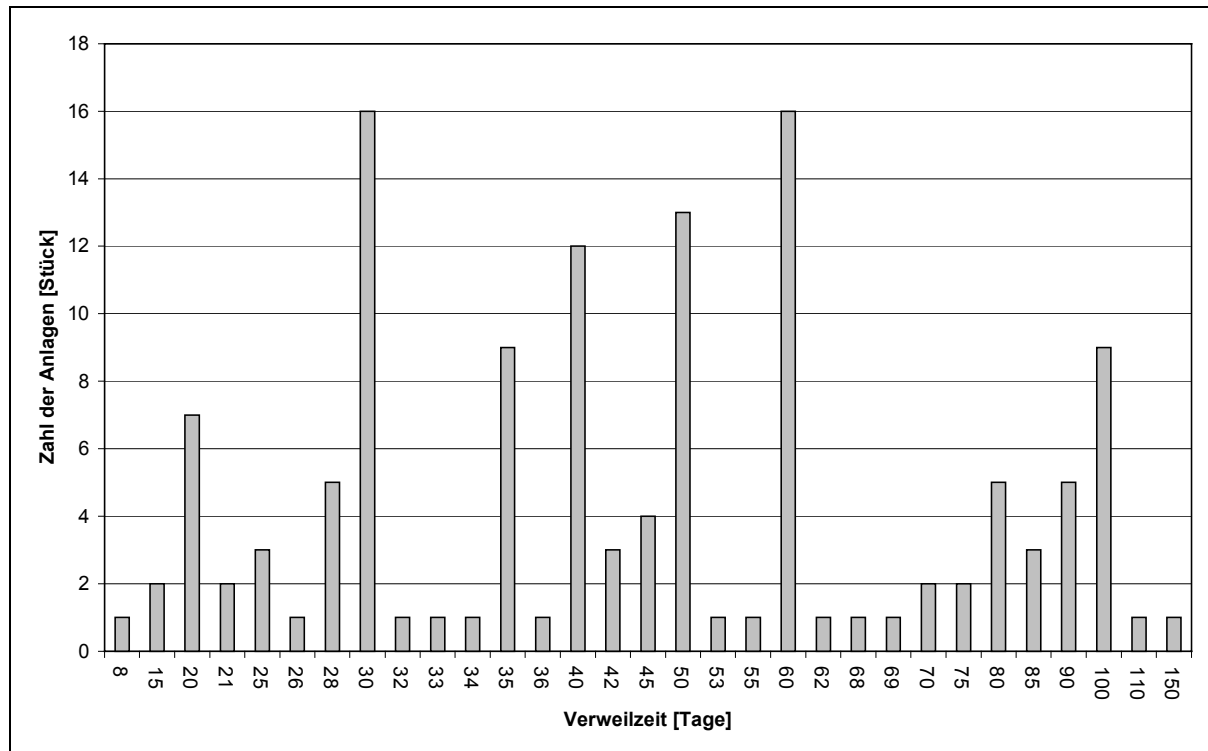


Abbildung 9: Umfrage I: Durchschnittliche hydraulische Verweilzeit in den erfassten Biogasanlagen

4.1.2 Gasspeicherung und -aufbereitung

Mit knapp 73 % ist der Großteil der Gasspeicher der erfassten landwirtschaftlichen Biogasanlagen als externer Gassack ausgeführt; die Speicherung des Biogases erfolgt drucklos. Das auf den Anlagen installierte Gasspeichervolumen beträgt zwei bis 600 m³, das mittlere Volumen beträgt 112 m³ (Abbildung 10). 49 der befragten Anlagenbetreiber machen Angaben über den Biogasertrag ihrer Anlage (Tabelle 8). Die Angaben zu Methan- und Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas sind jedoch sehr dürftig ausgefallen. Ebenso kann die Belastbarkeit dieser Angaben nicht abgeschätzt werden. Aus den Angaben von 34 Biogasanlagenbetreibern errechnet sich ein mittlerer Methangehalt im Biogas von ca. 63 % und ein mittlerer Schwefelwasserstoffgehalt von 114 ppm. Auf 92 % der Anlagen wird das produzierte Biogas entschwefelt, auf knapp 65 % der Anlagen auch entfeuchtet. Bei 99 % der Anlagen erfolgt die Entschwefelung biologisch durch das Einblasen von Luftsauerstoff zur Oxidation von Schwefelwasserstoff zu elementarem Schwefel; die Entfernung von Schwebstoffen und Kohlendioxid spielt im landwirtschaftlichen Bereich praktische keine Rolle (Tabelle 9).

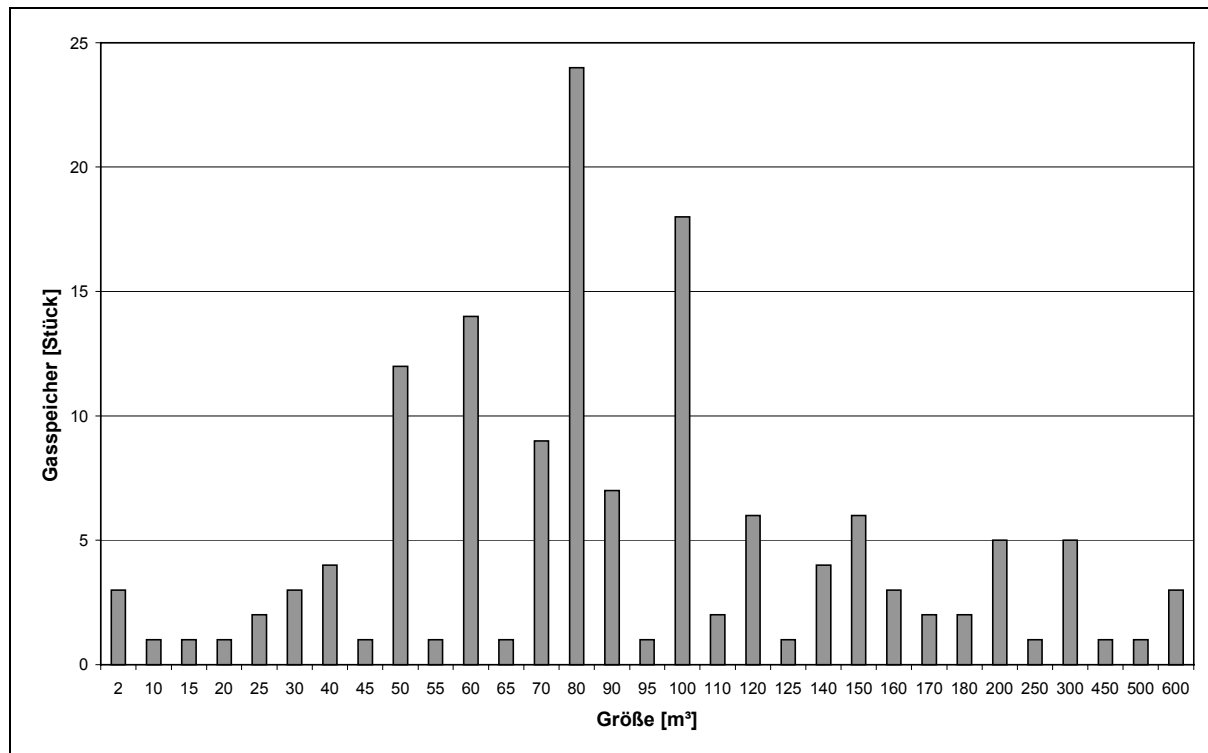


Abbildung 10: Umfrage I: Größenverteilung der installierten Gasspeicher

Tabelle 8: Umfrage I: Angaben zur Biogaszusammensetzung

Parameter	Zahl der Angaben	Minimum	Maximum	Mittelwert
Methangehalt Durchschnitt [%]	34	50	75	63,38
Methangehalt Minimum [%]	20	48	71	58,10
Methangehalt Maximum [%]	20	60	79	68,95
H ₂ S-Gehalt Durchschnitt [ppm]	38	0	500	114,13
H ₂ S-Gehalt Minimum [ppm]	33	0	300	39,97
H ₂ S-Gehalt Maximum [ppm]	33	20	5000	527,88

Tabelle 9: Umfrage I: Biogasaufbereitung

	Häufigkeit	Häufigkeit [%]
Entwässerung	97	64,7
Entschwefelung	138	92,0
Schwebstoffentfernung	1	0,7
Entfernung von CO ₂	0	0,0

4.1.3 Biogasnutzung/BHKW

Die Verwertung des Biogases erfolgt in 95 % der erfassten Anlagen in einem Blockheizkraftwerk zur kombinierten Erzeugung von elektrischer und thermischer Energie. Die rein thermische Nutzung des Gases spielt mit kaum mehr als 3 % eine sehr untergeordnete Rolle. Zur Nutzung der bei der Verstromung des Gases in Blockheizkraftwerken anfallenden Wärme außer für die Fermenterbeheizung wurden von

93 % der Anlagenbetreiber Angaben gemacht. Demnach verwenden 50 % der Betreiber die Wärme aus der Kraft-Wärme-Kopplung zur Wohnhausbeheizung, 42,5 % zusätzlich für andere Zwecke (z. B. Stallbeheizung) und 6,7 % nur für andere Zwecke. Die aus der Nutzung des Biogases in Blockheizkraftwerken anfallende Strommenge zeigt, analog zu Inputmengen und Fermentervolumen, eine sehr große Spannweite von 13.000 bis 1.750.000 kWh pro Anlage und Jahr (Abbildung 13). 90 % der Anlagen weisen einen jährlichen Stromertrag von 400.000 kWh und weniger auf. Im Gegensatz zur Strommenge (123 Angaben) werden die produzierten Gasmengen je Anlage weit weniger oft erfasst. Insgesamt konnten nur 49 Anlagenbetreiber Aussagen zu der auf ihren Anlage produzierten Gasmenge machen. Vergleicht man die angegebenen produzierten Strommengen mit den rechnerisch aus dem Gasertrag ermittelten Strommengen (Abbildung 14), so ergibt sich eine weitgehende Übereinstimmung. Bei der Umrechnung wurde von einem Energieinhalt von 6,3 kWh/m³ Biogas und einem elektrischen Wirkungsgrad der Blockheizkraftwerke von 28 % ausgegangen.

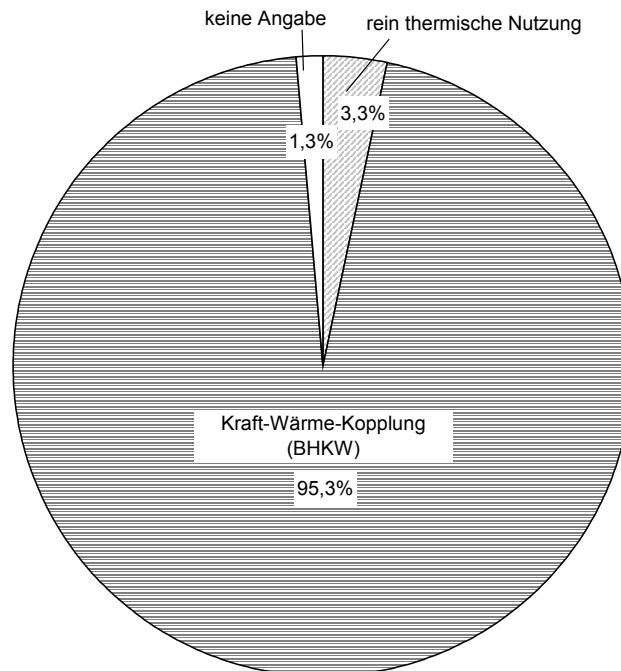


Abbildung 11: Umfrage I: Nutzung des Biogases

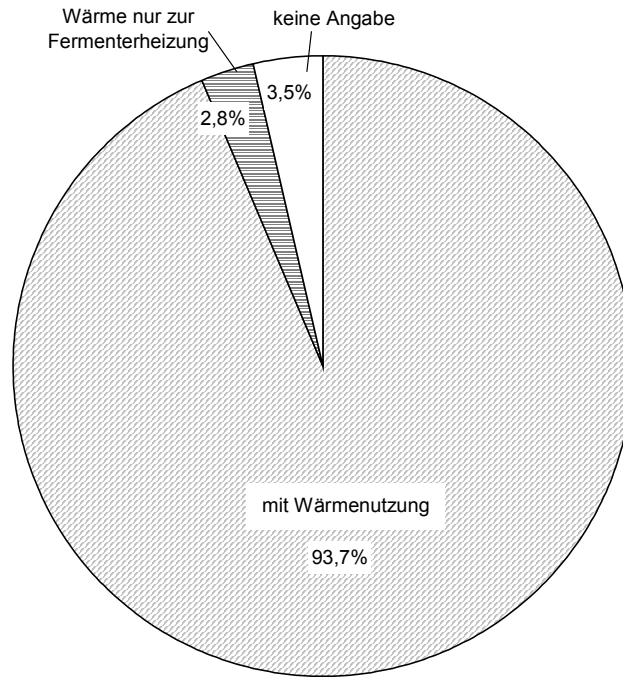


Abbildung 12: Umfrage I: Nutzung der anfallenden Wärme

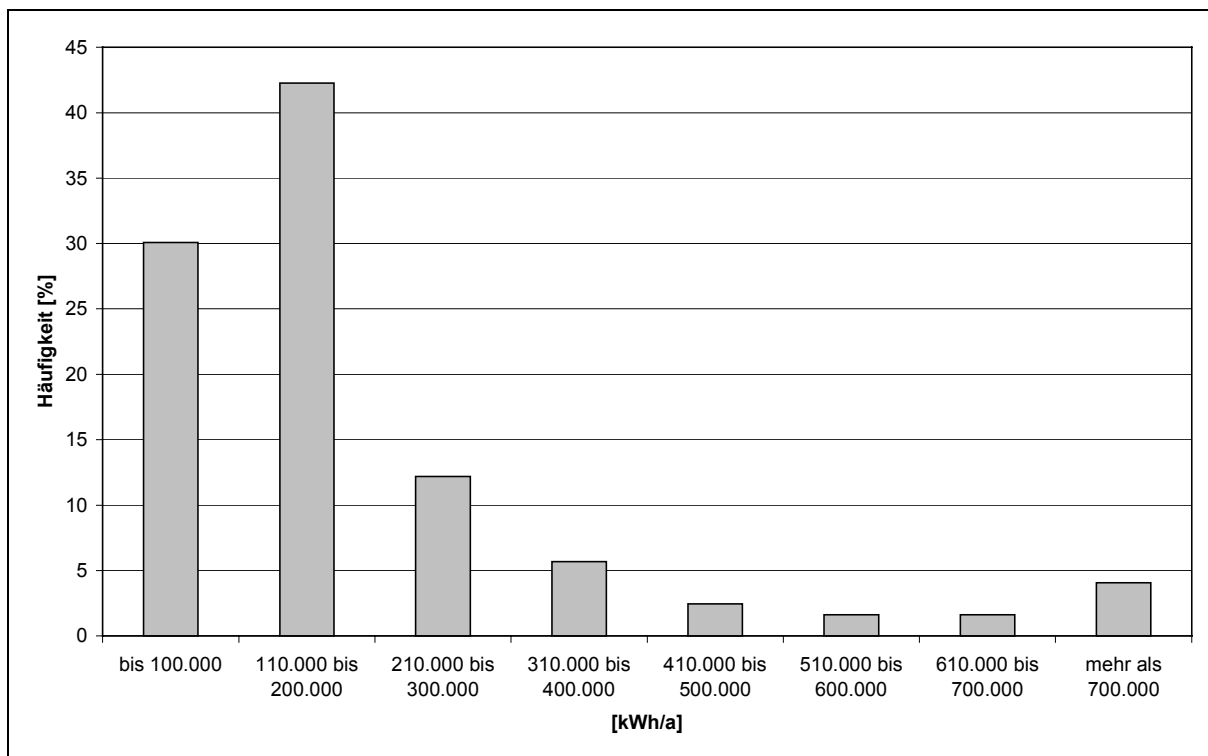


Abbildung 13: Umfrage I: Verteilung der Stromerträge

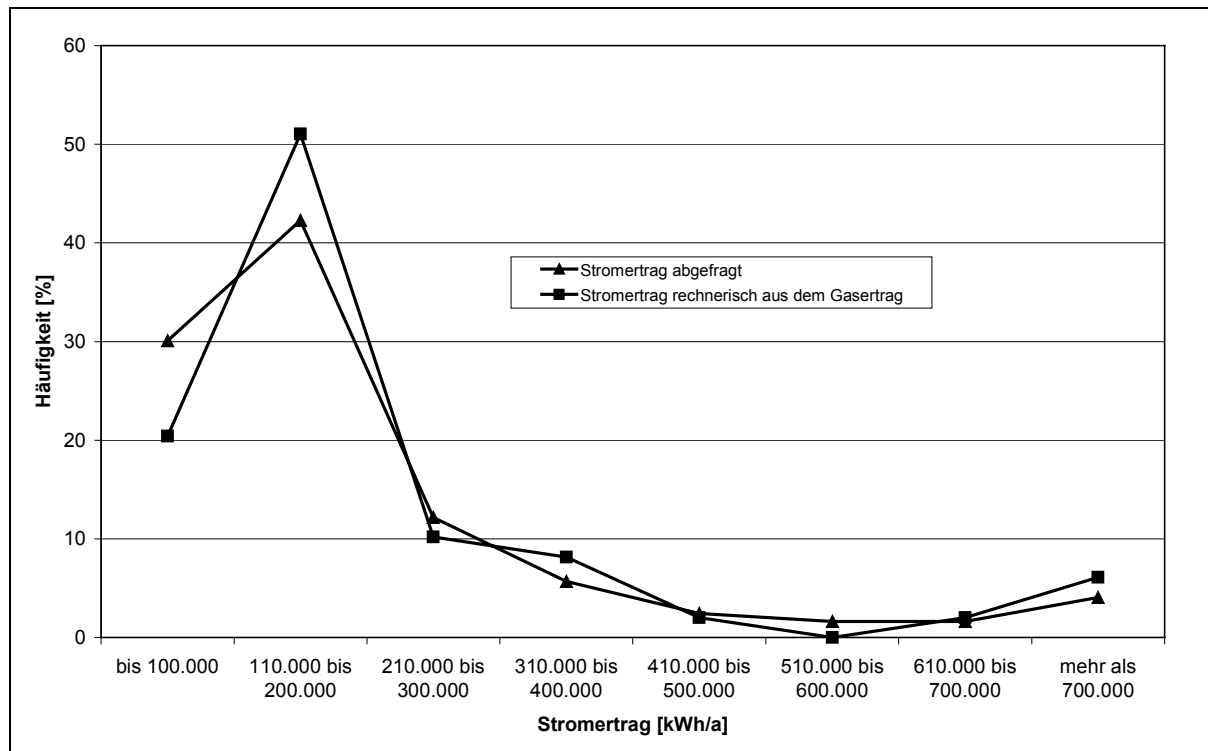


Abbildung 14: Umfrage I: Vergleich zwischen dem erfragten und dem rechnerisch aus dem Gasertrag ermittelten jährlichen Stromertrag

Die Zahl der Blockheizkraftwerke pro Biogasanlage ist unterschiedlich. 59 % der Betriebe betreiben ein, 36 % der Betriebe zwei und 5 % der Betriebe drei Blockheizkraftwerke. Mit knapp 53 % überwiegt der Anteil von Zündstrahlmotoren leicht über dem von Gas-Otto-Motoren. Der elektrische Wirkungsgrad wird für 50 von 200 erfassten Aggregaten auf der Basis von Herstellerangaben mit zwischen 20 und 38 % angegeben, der mittlere Wirkungsgrad errechnet sich daraus mit 30,8 %. Der thermische Wirkungsgrad wird mit 48 bis 70 % angegeben, daraus errechnet sich ein mittlerer thermischer Wirkungsgrad von 56,1 %, wobei der Anteil der genutzten Wärme am gesamten Wärmeaufkommen nicht erfasst werden konnte.

Das Leistungsspektrum der Einzelaggregate reicht von 5,5 bis 160 kW_{el.}, die Durchschnittsleistung beträgt 33 kW_{el.}. Die bei dieser Erhebung gewonnenen Daten zeigen, dass sowohl die Anzahl als auch die elektrische Leistung der installierten Aggregate einen aufwärtsgerichteten Trend aufweisen. Die Spannweite der installierten elektrischen Leistung der Gesamtanlage reicht von 5,5 bis 395 kW_{el.}, im Mittel ist eine Leistung von 48 kW_{el.} installiert. Die Netzanschlussleistung der befragten Anlagen bewegt sich zwischen 5,5 und 300 kW_{el.}, die mittlere Anschlussleistung beträgt 56 kW_{el.}. (Abbildung 15) Der bei Zündstrahlmotoren notwendige Zündölanteil bewegt sich zwischen 2 % und 30 % bei einem Mittelwert von 8,9 %.

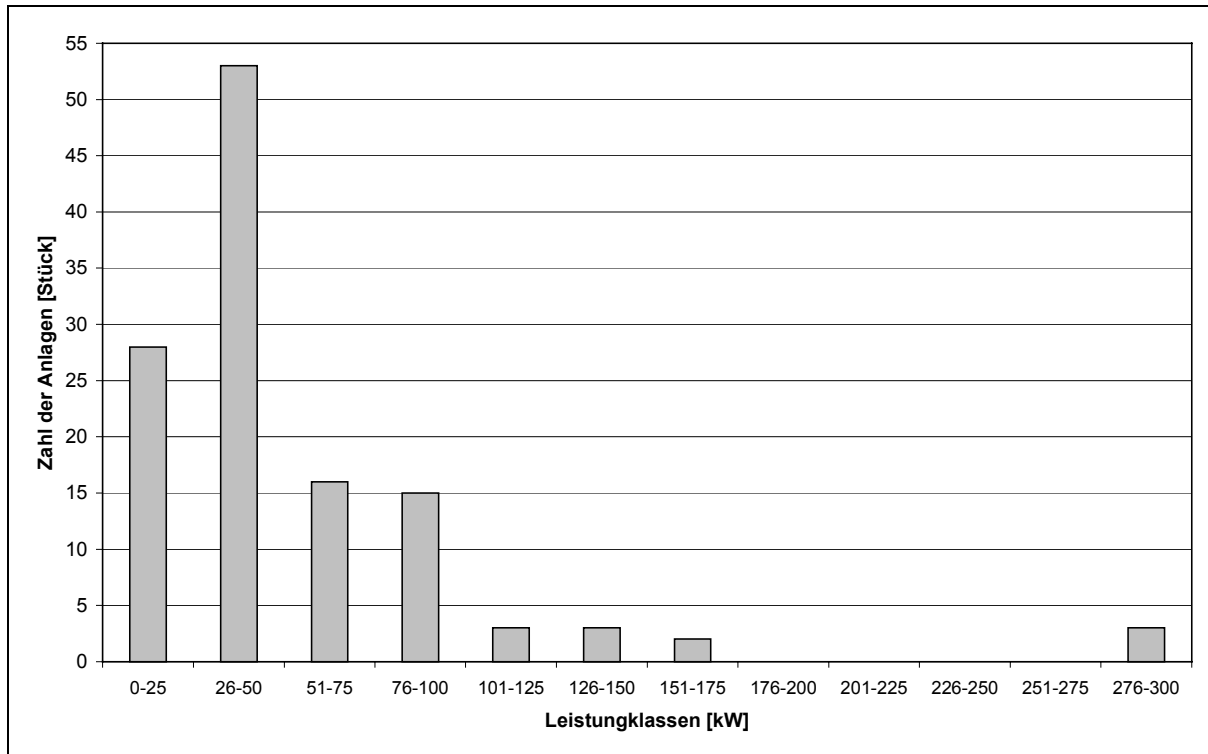


Abbildung 15: Umfrage I: Verteilung der Netzanschlussleistung der Biogasanlagen

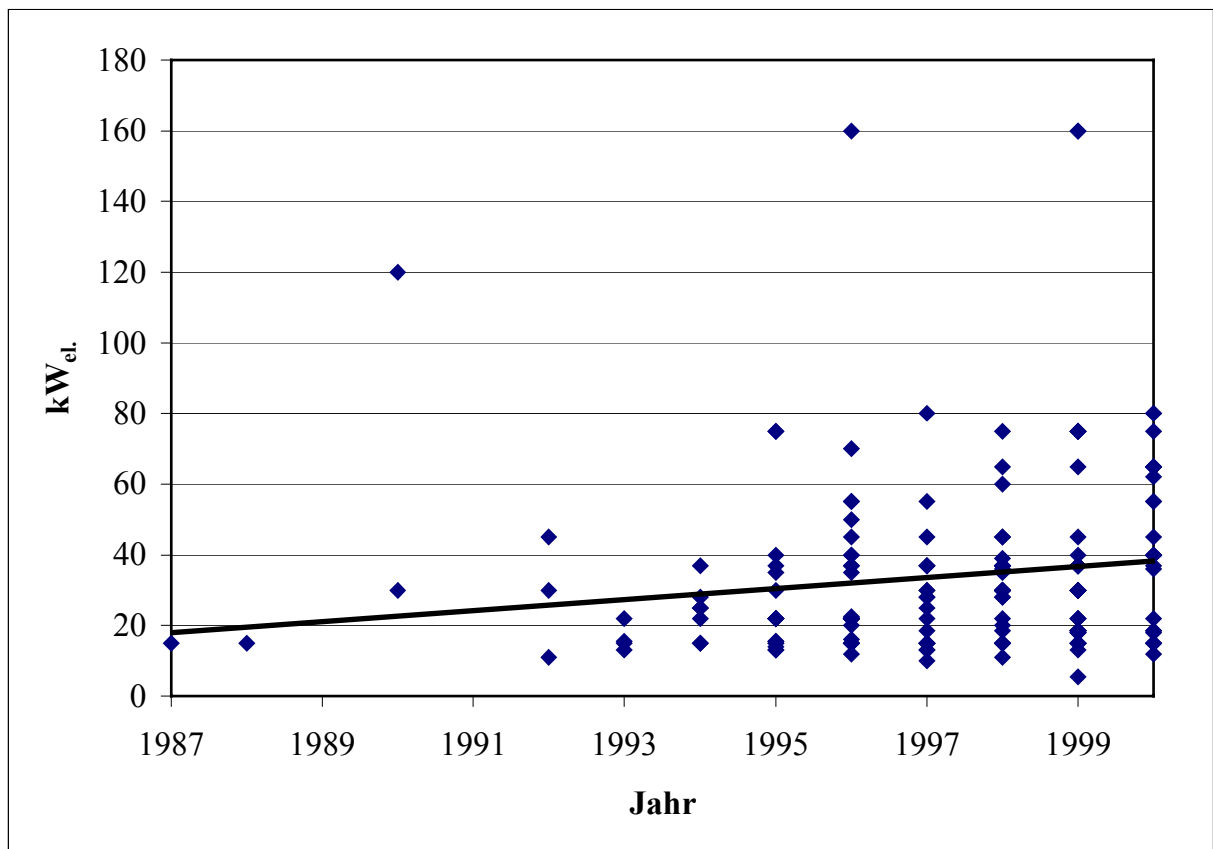


Abbildung 16: Umfrage I: Baujahr und elektrische Leistung installierter BHKW-Module auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern (n=183)

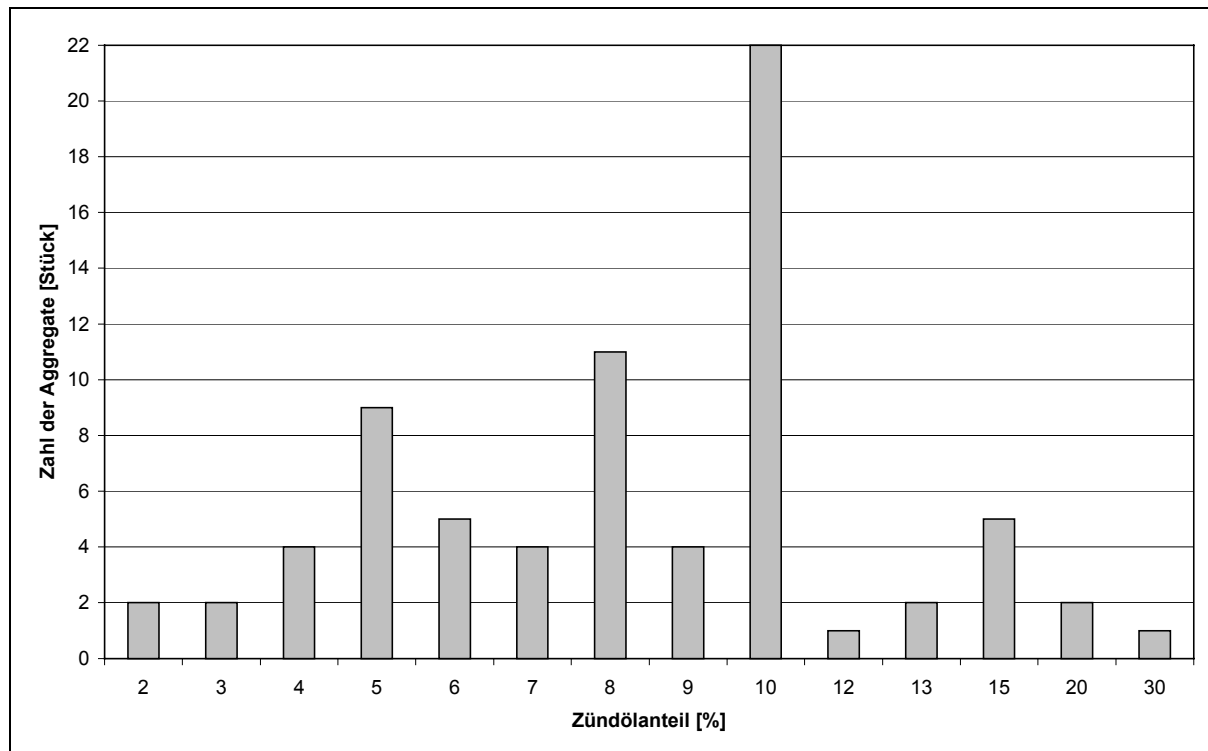


Abbildung 17: Umfrage I: Verteilung des Zündölanteils bei den erfassten Zündstrahlaggregaten

Die Frage nach Angabe der Hersteller der Blockheizkraftwerke zu Abgaswerten für ihre Aggregate konnte von den Betreibern der Biogasanlagen nicht verwertbar beantwortet werden. Oxidationskatalysatoren sind auf knapp 9 % der Anlagen dauerhaft eingebaut, 91 % der Anlagen setzen keinen Oxidationskatalysator ein. Hierbei ist anzumerken, dass in der Praxis Oxidationskatalysatoren i.d.R. bereits nach relativ kurzer Zeit inaktiv wurden bzw. sich mit Ruß- und Staubablagerungen zugesetzt hatten. Letzteres führte zu einer Erhöhung des Abgasgedruckes und die Abgastemperatur auf vom Motorenhersteller unzulässige Werte, so dass die Katalysatoren ausgebaut wurden, um den Motor nicht zu schädigen. Die genaueren Ursachen der Probleme mit Oxidationskatalysatoren werden derzeit in einem weiteren Forschungsvorhaben im Auftrag des LfU untersucht (siehe auch Kapitel 7).

Die Intervalle, in denen bei den Motoren das Schmieröl gewechselt wird, bewegen sich zwischen 160 und 2000 Betriebsstunden. Das mittlere Ölwechselintervall liegt bei 465 Betriebsstunden. Verrechnet mit den mittleren jährlichen Betriebsstunden (5833 Stunden) errechnet sich daraus eine Ölwechselhäufigkeit von 12,5 Ölwechseln pro Aggregat und Jahr.

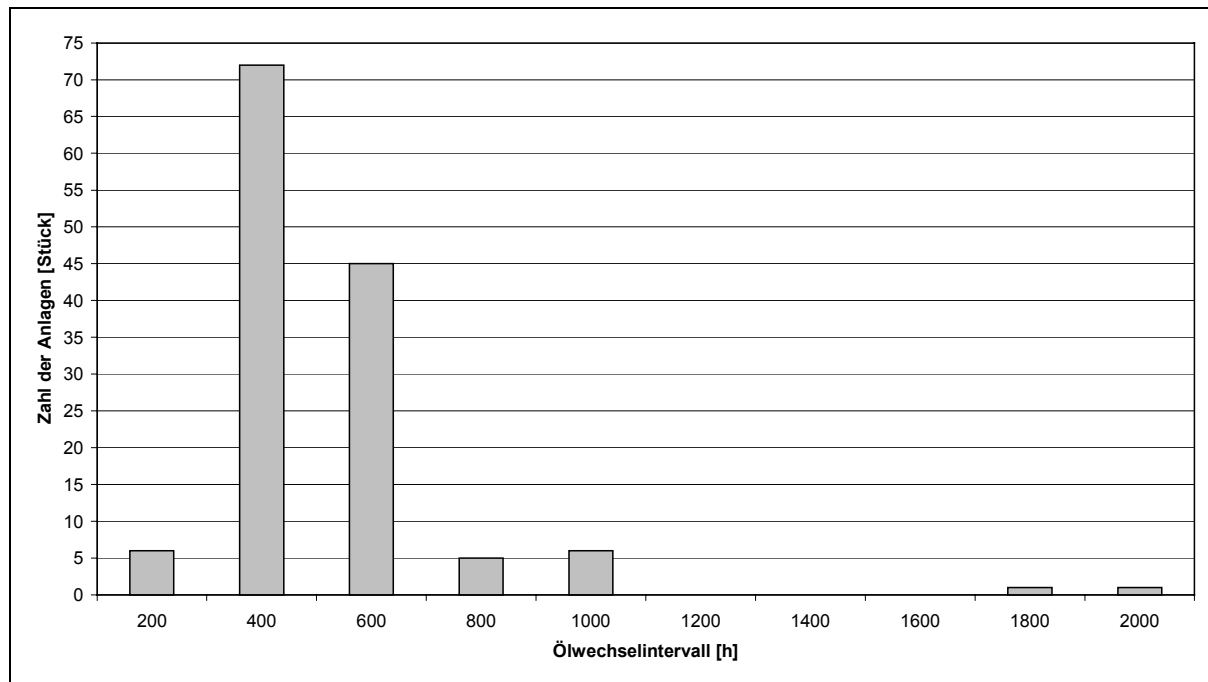


Abbildung 18: Umfrage I: Verteilung der Ölwechselintervalle bei den erfassten BHKW

4.1.4 Verwertung des Gärrests und Betriebsdaten

Die Endlagerung des Gärrests erfolgt bei den Anlagen, die ein Gärrestlager aufweisen, zu 60 % in einem geschlossenen und zu 40 % in einem offenen Endlager. Die Größenverteilung der erfassten Endlagerbehälter zeigt Abbildung 19. Bei knapp 95 % der Biogasanlagen wird der Gärrest als Dünger auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgebracht (Abbildung 20). Auf 2 % der Anlagen wird der Gärrest nachkompostiert, dazu ist i. d. R. eine Separierung des Gärrests notwendig. Die bei der Gärrestausrückführung eingesetzte Ausbringtechnik ist zu 53 % ein Schleppllauch- oder Schlepplschuh-Verteiler und zu 38 % ein Pralltellerverteiler. Andere Systeme spielen nur eine untergeordnete Rolle (Tabelle 10).

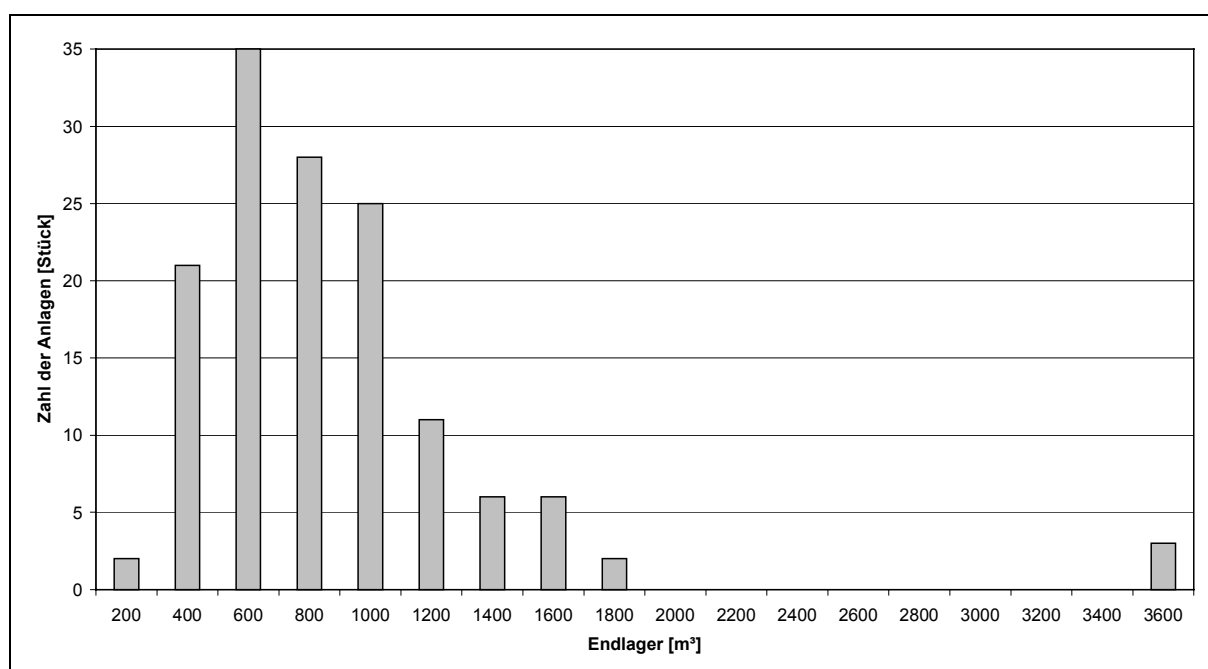


Abbildung 19: Umfrage I: Verteilung der Endlagergröße der erfassten Biogasanlagen

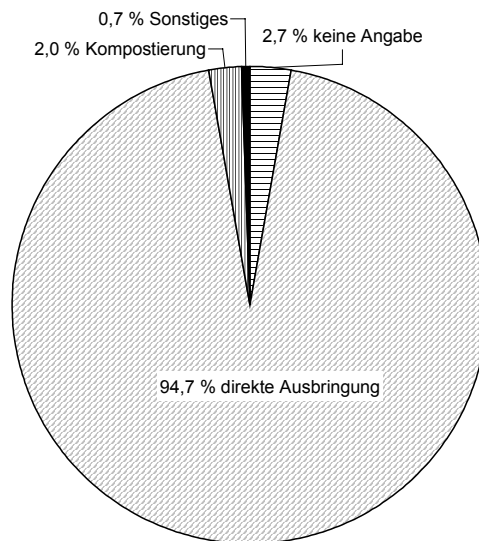


Abbildung 20: Umfrage I: Nutzung des Gärrestes

Tabelle 10: Umfrage I: Verteilung und Bewertung der eingesetzten Technik zur Ausbringung von Biogasgülle (Mehrfachnennungen möglich)

Ausbringtechnik	Emissionsminderung	Häufigkeit [Stück]	Häufigkeit [%]
Schleppschlauch/Schleppschuh	+	85	52,5
Prallteller	0	61	37,7
Schwanenhals-Vertikalverteiler	0	7	4,3
Güllegrubber	++	4	2,5
Streuwagen	0	2	1,2
Duplexverteiler	0	1	0,6
Exaktverteiler	0	1	0,6
Schwenkverteiler	0	1	0,6

Die ermittelten Betriebsdaten zeigen, dass die durchschnittliche Betriebsgröße bei landwirtschaftlichen Betrieben, die Biogasanlagen betreiben, ca. 67 ha beträgt und damit deutlich über der durchschnittlichen Betriebsgröße bayerischer Betriebe (20,5 ha in 1999) liegt. 75 % der Biogasanlagen sind auf Futterbaubetrieben, 21 % auf Veredelungsbetrieben und 4 % auf Marktfruchtbetrieben lokalisiert. Bis dato werden gut 97 % der Biogasanlagen als einzelbetriebliche Anlagen und nur 2 % als Gemeinschaftsanlagen betrieben.

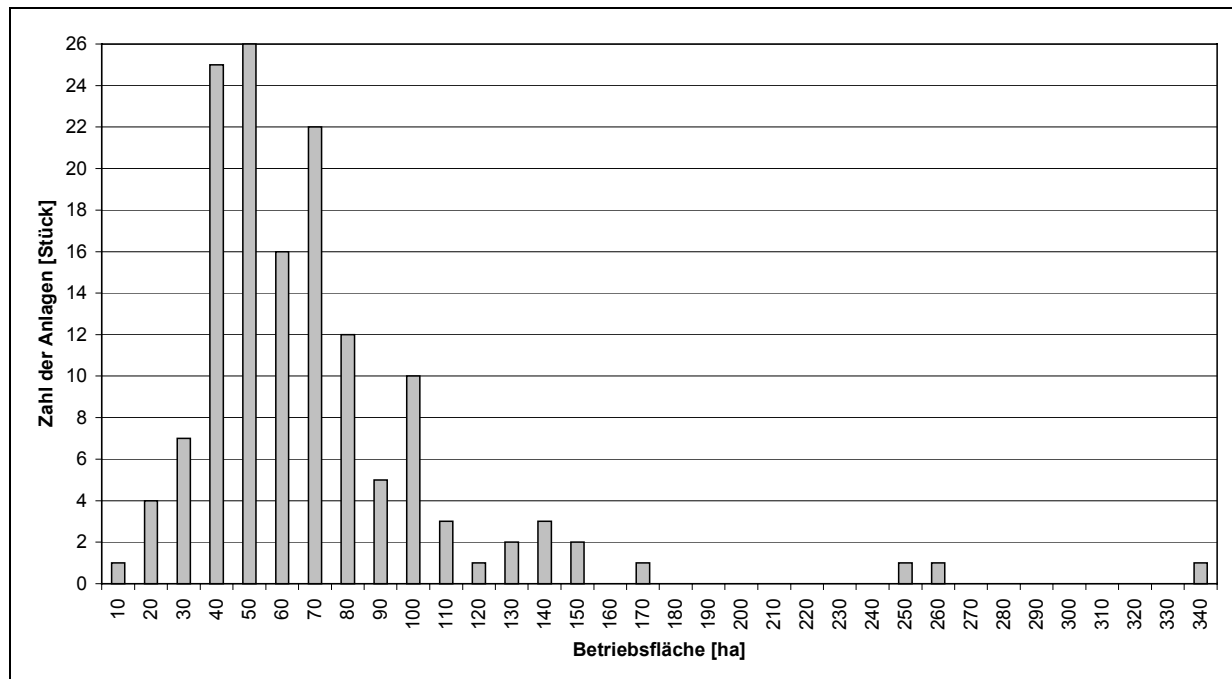


Abbildung 21: Umfrage I: Verteilung der Betriebsflächengröße der befragten Betriebe

4.2 Auswertung des Fragebogens II

Für die zweite Stichprobe wurden 41 Anlagenbetreiber angeschrieben. Die Auswahl erfolgte unter Ausschluss solcher Anlagen, die ausschließlich außerlandwirtschaftliche Abfälle behandeln, nach Einordnung in vier BHKW-Leistungsklassen (0-33, 34-66, 67-99 und 100-160 kW_{el}; siehe auch Tabelle 12). Außerdem wurden nur Anlagen ab Baujahr 1993 berücksichtigt. Der Rücklauf betrug 32 Fragebögen (78 %). Der Fragebogen II umfasste insgesamt 70 Fragen, wobei zwölf Fragen, zu denen weniger als fünf Angaben erhalten wurden, nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden (Tabelle 11). Soweit vorhanden, wurden für die Darstellung der Ergebnisse Daten aus der ersten Erhebung herangezogen. Im folgenden soll im Vergleich zur ersten Umfrage vor allem auf die zusätzlich gewonnenen Informationen eingegangen und auf Unterschiede in den Verteilungen hingewiesen werden.

Tabelle 11: Zusammenstellung der Fragen aus Umfrage II, die nicht in die Auswertung mit einbezogen wurden

Frage (Nr.)	Bemerkung
(4) Wie lauten die gesetzten Abgasgrenzwerte für Luftschadstoffe im Genehmigungsbescheid?	5 Angaben
(19) Welche Co-Substrate/NaWaRos werden wann eingesetzt?	Keine Angaben
(39) Wurden Abgaswerte für die BHKW beim Einsatz von Biogas vom Hersteller garantiert?	1 Angabe
(41-43) Hersteller, Standzeit, Garantie auf Oxidationskatalysator(en)?	Da keiner der Befragten einen Oxidations-katalysator einsetzte (Frage 40), erübrigten sich diese Fragen.
(45 und 46) Welche Abgaskomponenten wurden bei Emissionsmessungen bestimmt und wie hoch waren die Emissionen der einzelnen Komponenten?	Es werden nur auf 3 Betrieben Abgasemissionsmessungen durchgeführt (Frage 44).
(54) Vorlauf-/Rücklauftemperatur des Kühlwassers der BHKW?	Keine Angaben

(57) Welche Wirkungsgrade wurden für das/die BHKW ermittelt?	Auf den erhobenen Anlagen wurden keine Wirkungsgradmessungen durchgeführt (Frage 56) und somit keine Angaben gemacht.
(59) Welche Wärmemengen fallen jährlich an?	Nur auf 3 Anlagen sind Wärmemengenzähler installiert.
(62) Wesentliche Ursachen für Betriebsstörungen?	Keine Angaben

4.2.1 Anlagendaten

Die erhobenen Biogasanlagen wurden in den Jahren 1993 bis 2000 errichtet, die meisten davon (11 von 41) im Jahre 1996 (Abbildung 22). Angaben zur Genehmigung sowie zur Planung und zum Hersteller wurden für 32 Anlagen gemacht. Demnach wurden 25 Biogasanlagen (81 %) nach Baurecht genehmigt. Lediglich 5 Anlagen (16 %) unterlagen einer Genehmigungspflicht nach BImSchG, für eine weitere Anlage wurden Vorgaben hinsichtlich Abgasgrenzwerten gemacht. Die Planung der Anlagen erfolgte überwiegend durch ein Planungsbüro (15 Anlagen), einen Anlagenhersteller (6 Anlagen) oder durch den Anlagenbetreiber selbst in Zusammenarbeit mit einem professionellen Planer oder Anlagenhersteller (8 Anlagen). Demgegenüber wurden die weitaus meisten Anlagen im Eigenbau (8 Fälle) oder in Zusammenarbeit mit einem Komponentenhersteller (20 Fälle) errichtet.

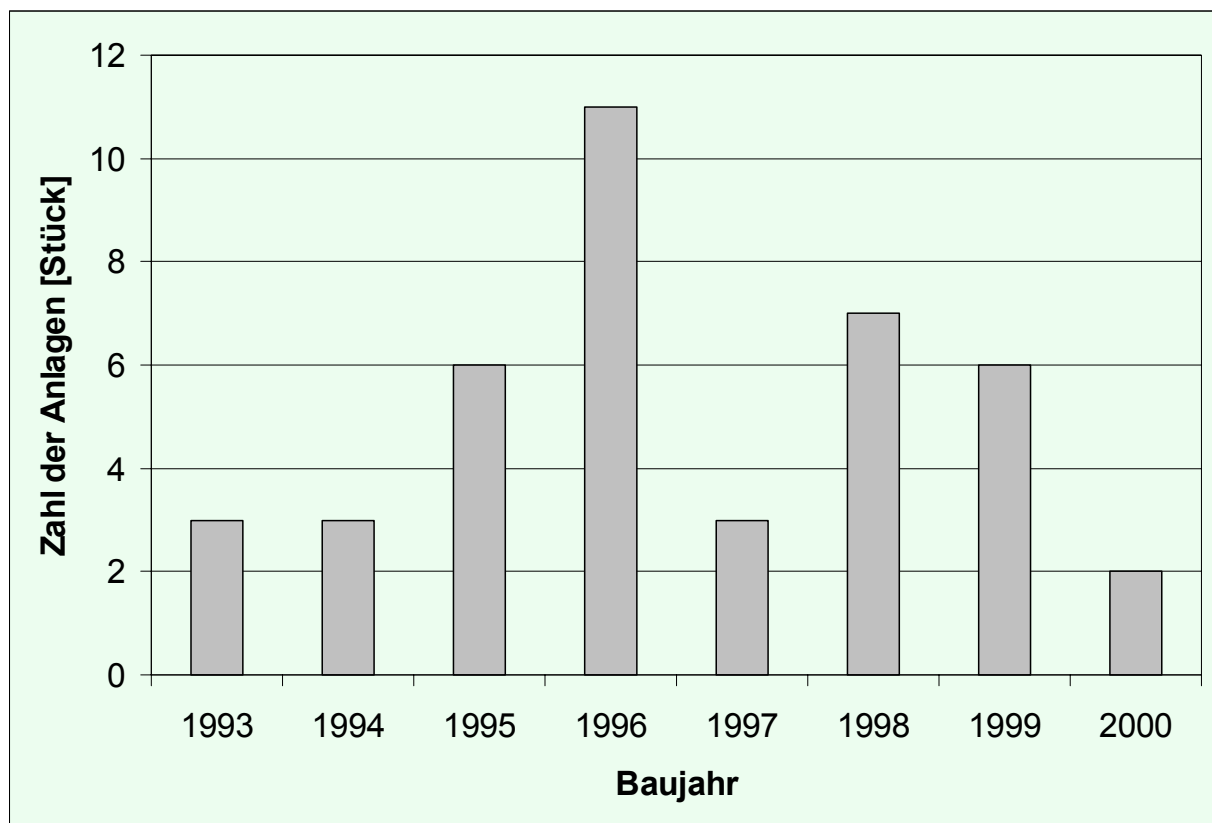


Abbildung 22: Umfrage II: Verteilung der Angaben zum Baujahr der Biogasanlagen (n=41)

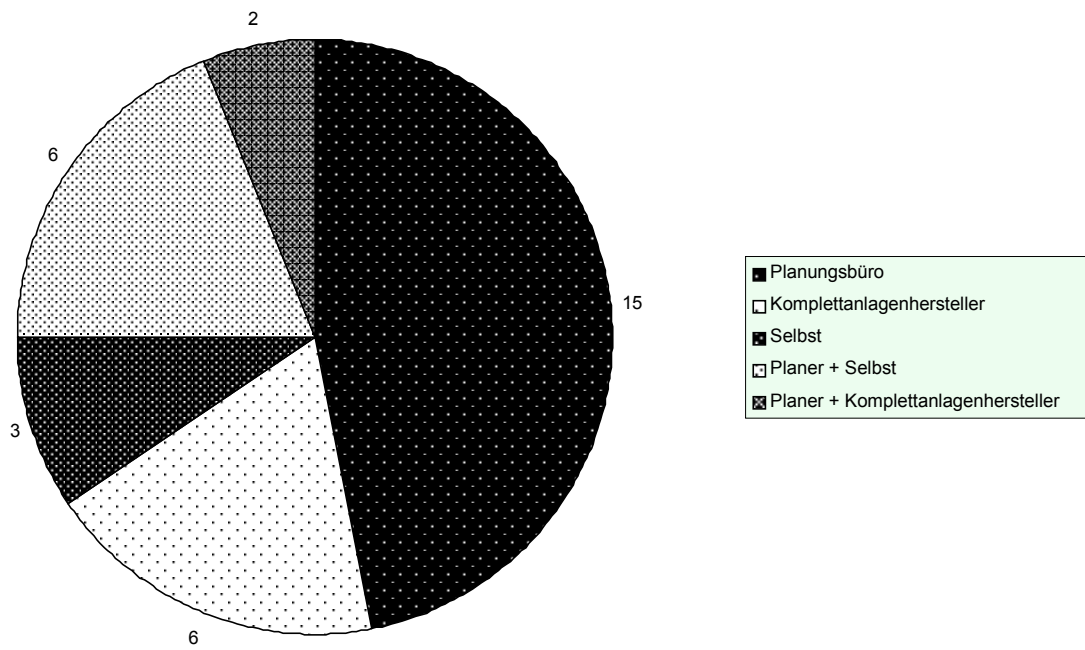


Abbildung 23: Umfrage II: Planung der Biogasanlagen (n =32)

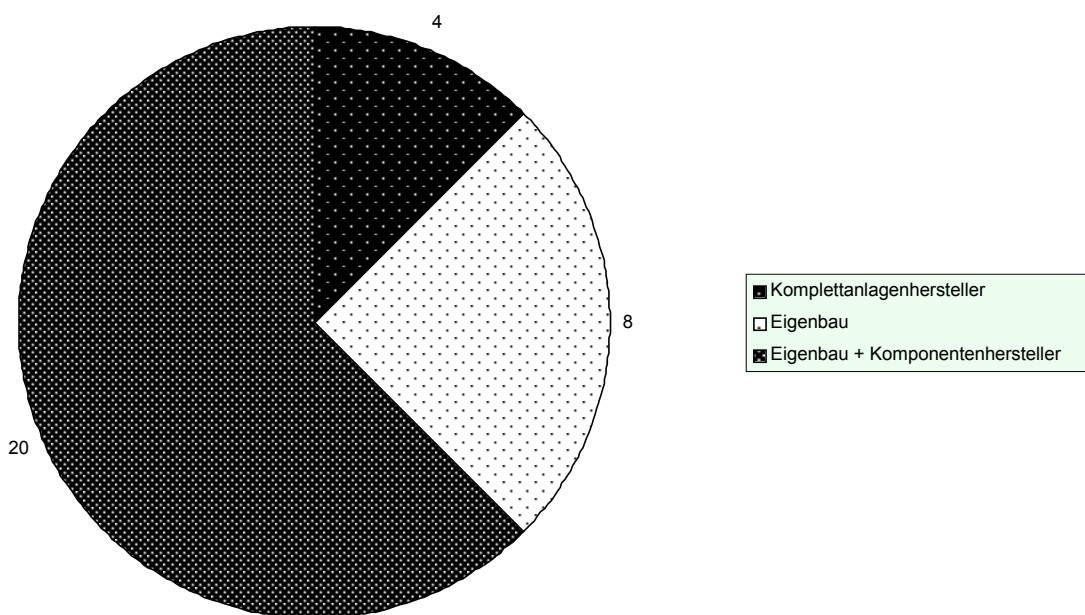


Abbildung 24: Umfrage II: Ersteller der Biogasanlagen (n=32)

Biogasanlagen mit einer Gärtemperatur von 40°C überwiegen deutlich und es sind keine Anlagen vertreten, die bei weniger als 35°C betrieben werden (Abbildung 25). Die Beschickung erfolgt bei 39 von 41 Anlagen quasi-kontinuierlich mit meist ein- oder zweimal täglicher Zugabe von Frischsubstrat (Abbildung 26); die durchschnittliche Einzelzugabe beträgt hierbei 5 m³ Substrat (Abbildung 27).

Die bei allen Anlagen vorhandene Vorgrube hat selten mehr als 100 m³ Fassungsvermögen (Abbildung 28) und ist in 18 von 30 ausgewerteten Fällen mit einer Abdeckung und in 23 von 30 Fällen mit einer Misch- / Zerkleinerungseinrichtung ausgestattet. Zur Verwendung kommen meist Schneidmixer (10 Anlagen) sowie andere mechanische Einrichtungen (9 Anlagen). Eine hydraulische Durchmischung durch Pumpenstrahl erfolgt auf 3 Anlagen (Abbildung 29). Störstoffe werden nur in 5 Biogasanlagen entfernt, obwohl 32 Anlagen neben nachwachsenden Rohstoffen auch potentiell stoffhaltige, außerlandwirtschaftliche Co-Fermentate verwerten. Nur 3 bzw. 5 Anlagen verarbeiten ausschließlich Wirtschaftsdünger bzw. Wirtschaftsdünger und nachwachsende Rohstoffe (Abbildung 31). Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 34 zeigen die Verteilung der eingesetzten Jahresmengen an Wirtschaftsdünger, Co-Fermentaten und NaWaRos. Der Einsatz von Co-Fermentaten erfolgt in 12 Fällen jahreszeitenabhängig. Über eine Hygienisierungseinrichtung verfügen 7 der 41 Anlagen der zweiten Stichprobe, davon in jeweils 3 Fällen über eine thermische Vorbehandlung bzw. thermophile Prozessführung und in einem Falle über eine thermische Nachbehandlung (Abbildung 30).

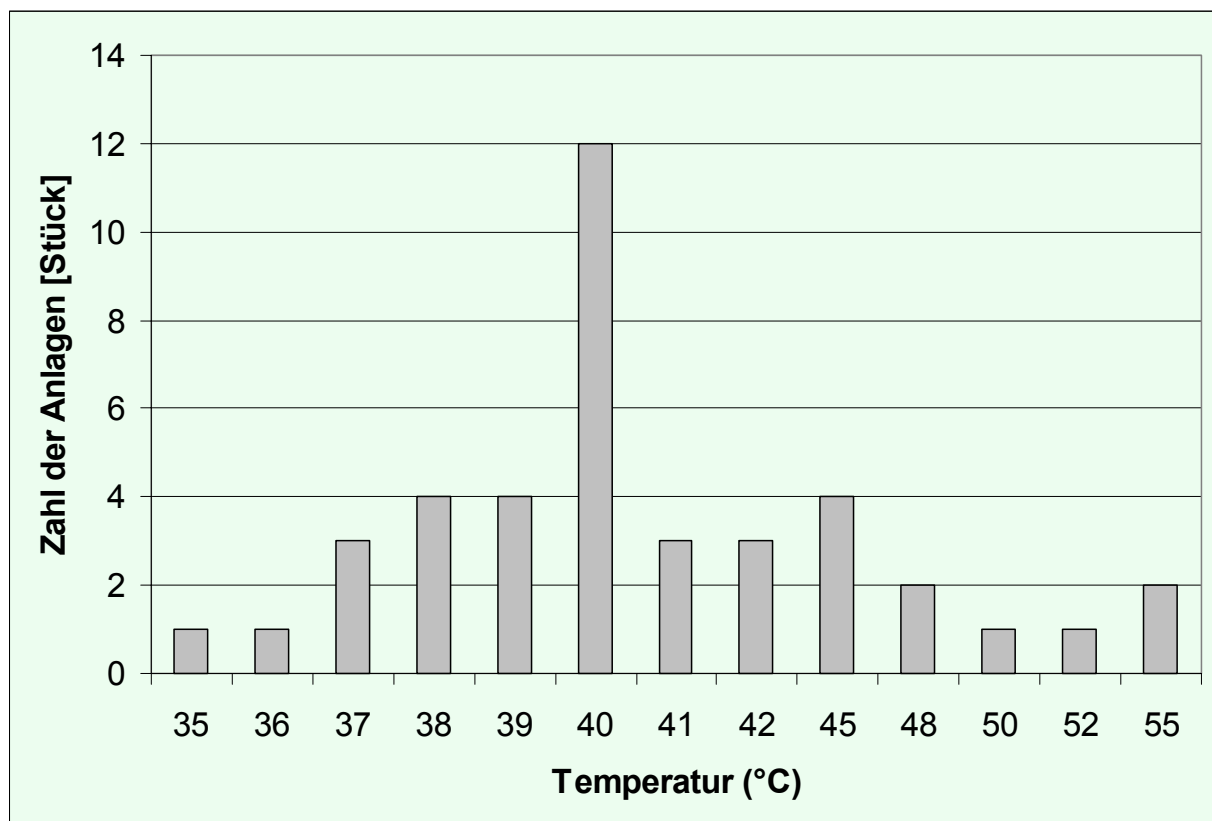


Abbildung 25: Umfrage II: Verteilung der Prozesstemperatur der Biogasanlagen (n=41)

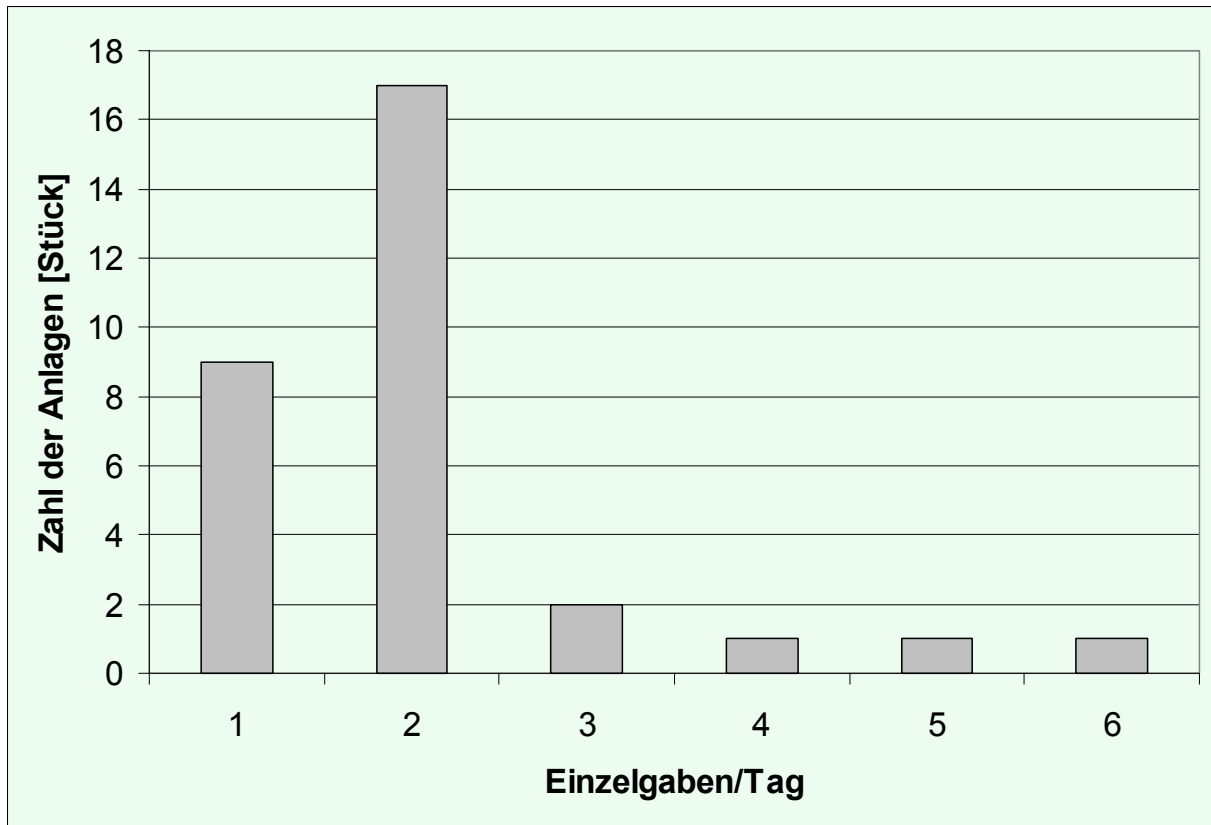


Abbildung 26: Umfrage II: Beschickung der Anlagen – Einzelgaben/Tag (n=31)

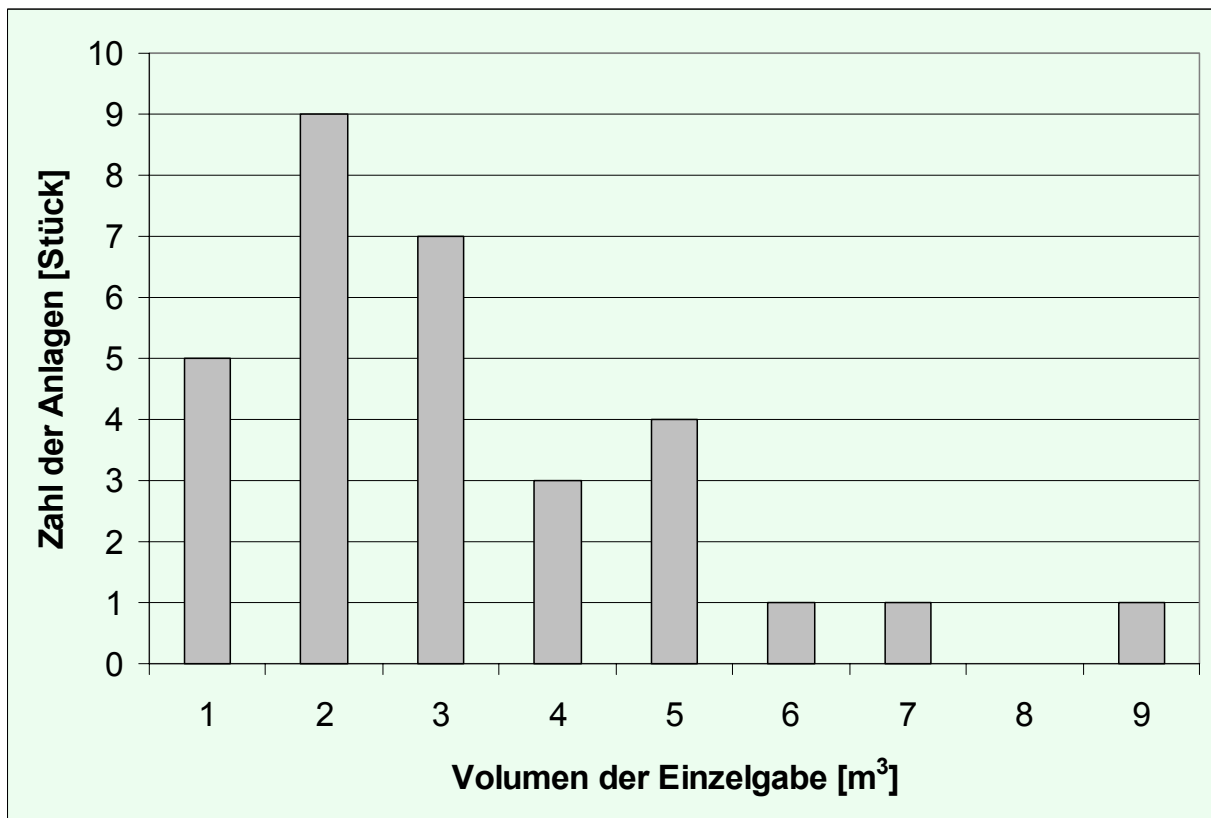


Abbildung 27: Umfrage II: Beschickung der Anlagen - Volumen der Einzelgaben (n=31)

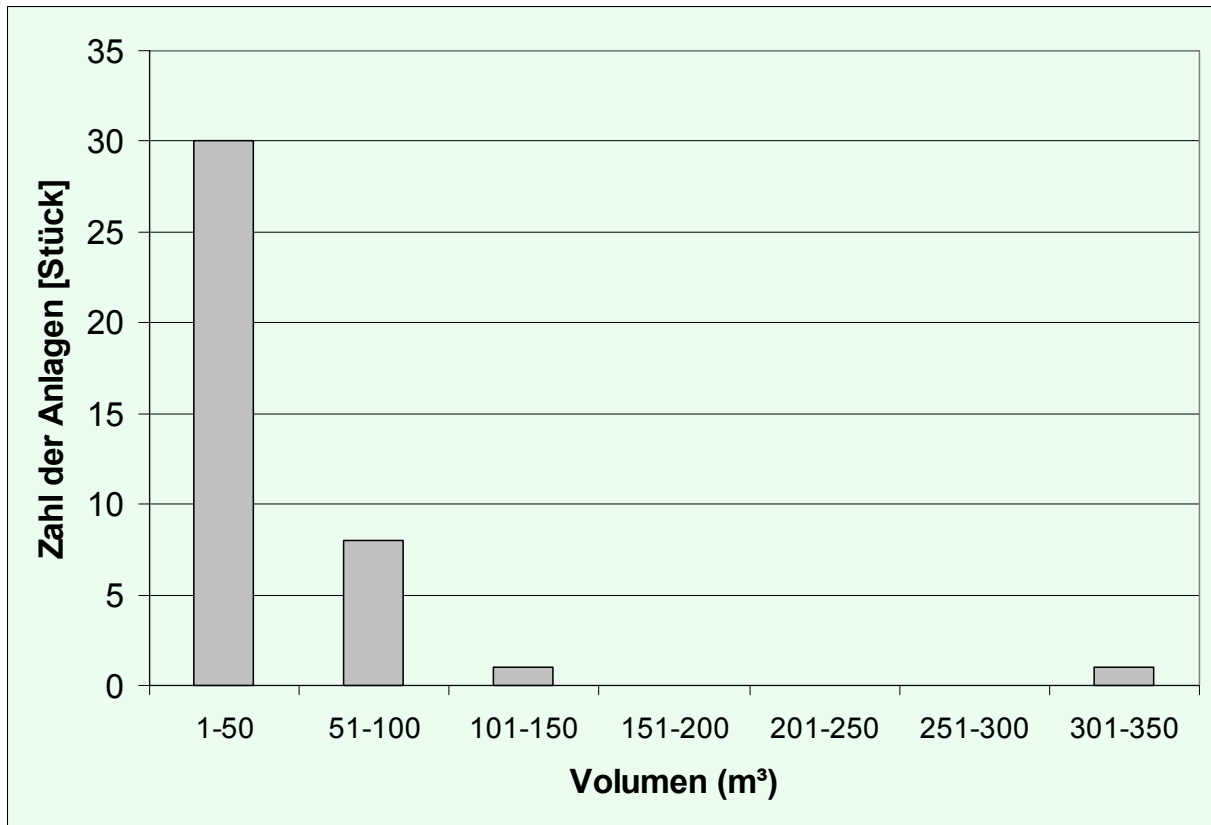


Abbildung 28: Umfrage II: Verteilung des Fassungsvermögens der Vorgrube (n=40)

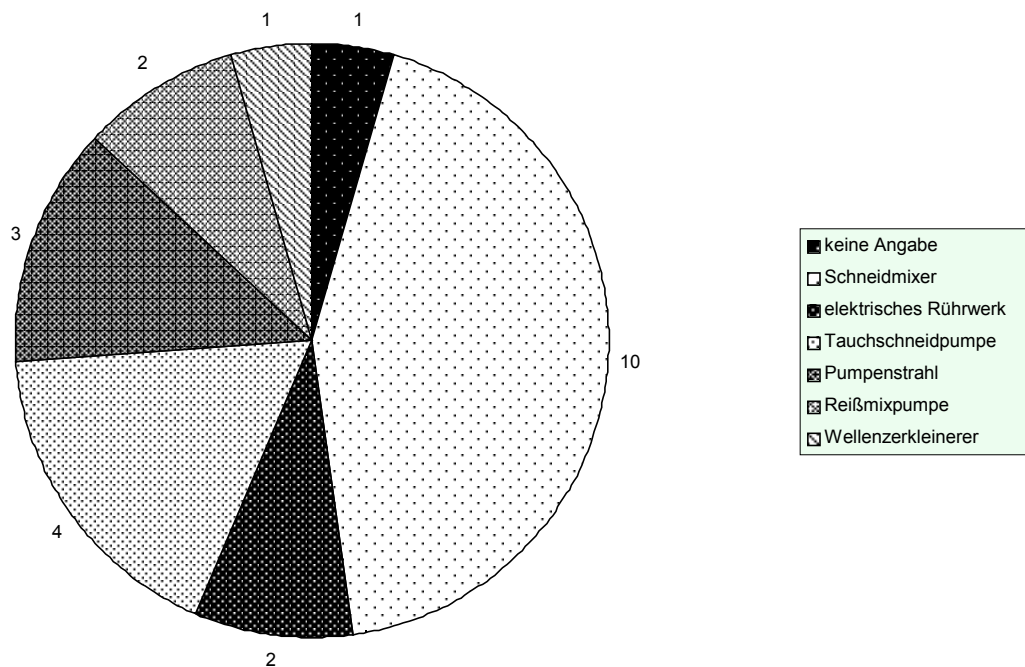


Abbildung 29: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Ausstattung der Vorgrube mit Misch-/Zerkleinerungseinrichtung (n=23)

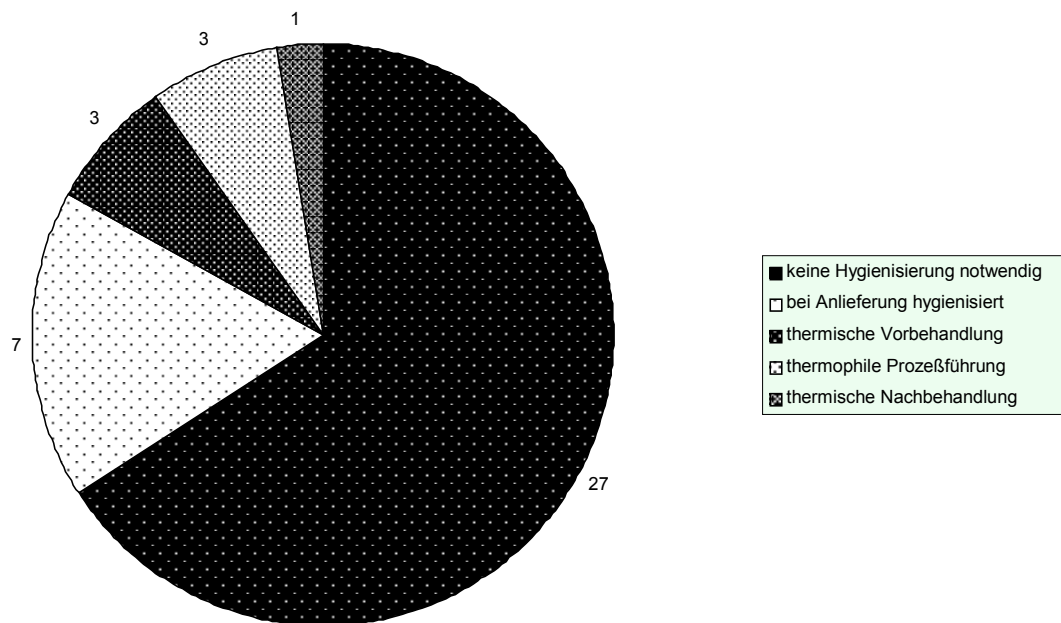


Abbildung 30: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Hygienisierung des Substrats (n=41)

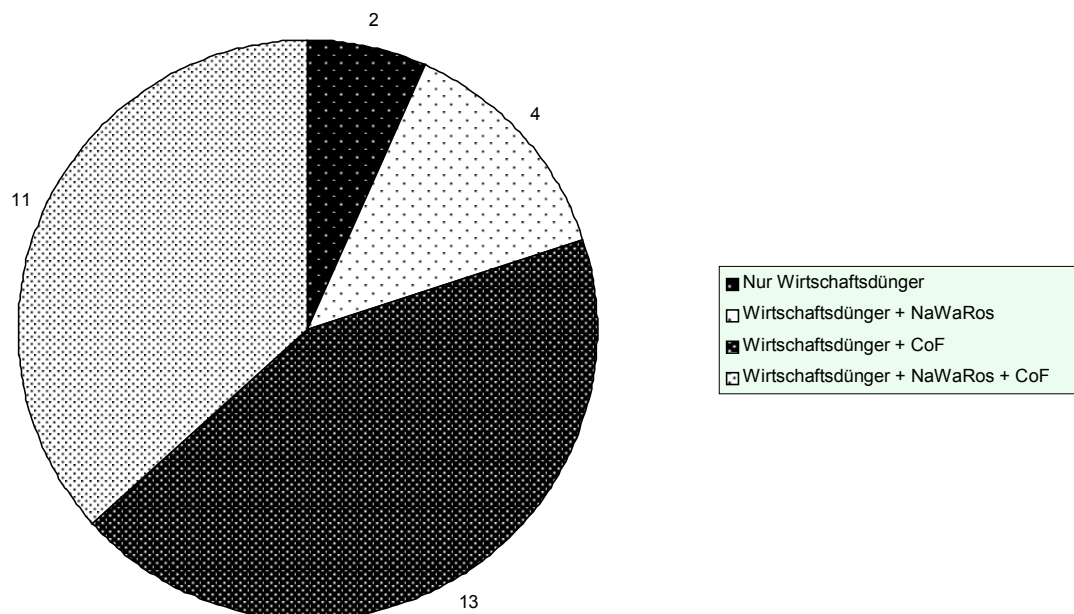


Abbildung 31: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu den eingesetzten Substraten (n=30)

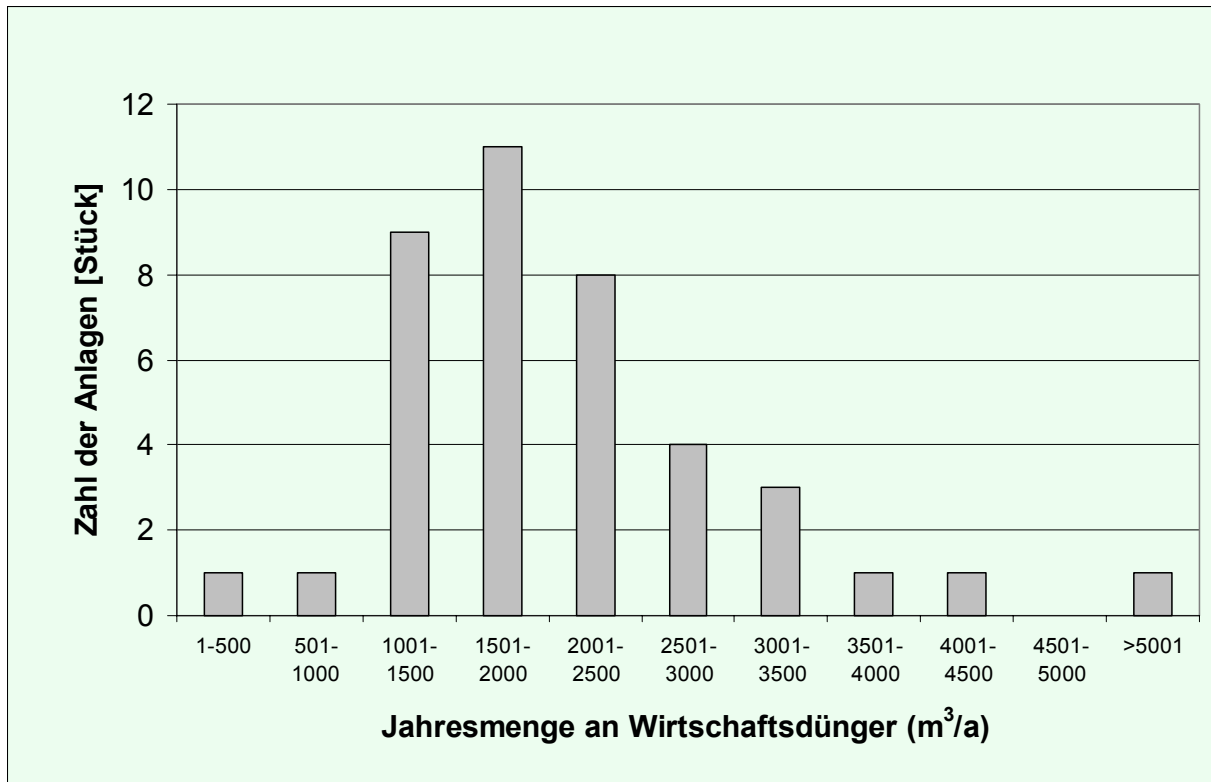


Abbildung 32: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Wirtschaftsdünger (n=40)

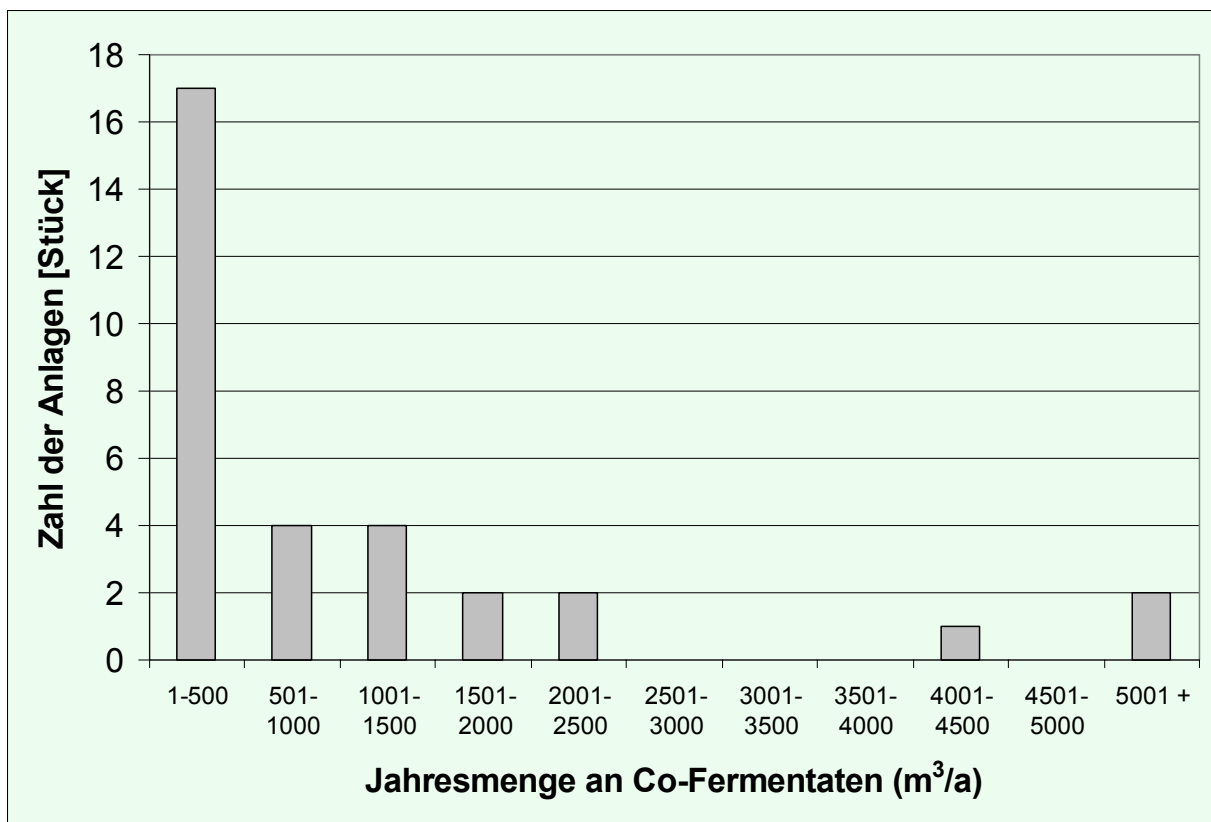


Abbildung 33: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Co-Fermentaten (n=32)

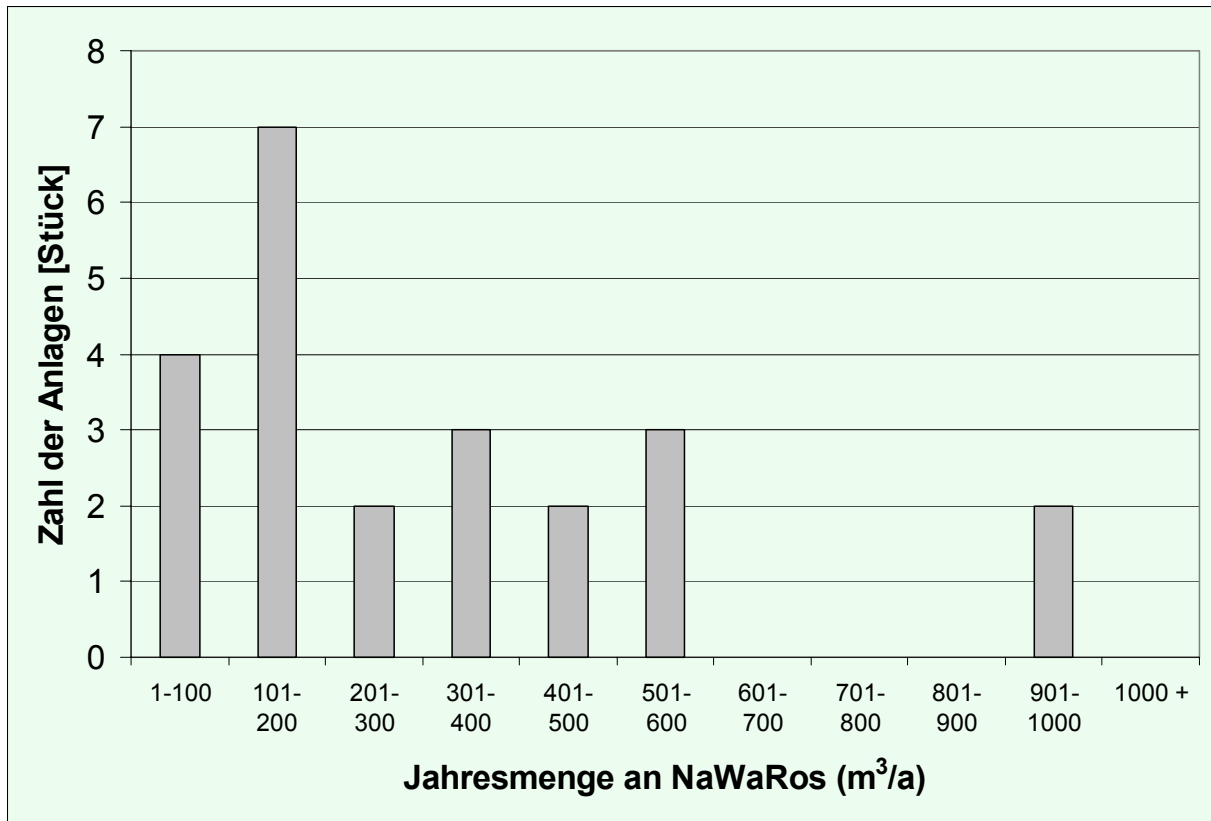


Abbildung 34: Umfrage II: Verteilung der eingesetzten Jahresmenge an Nachwachsenden Rohstoffen (n=23)

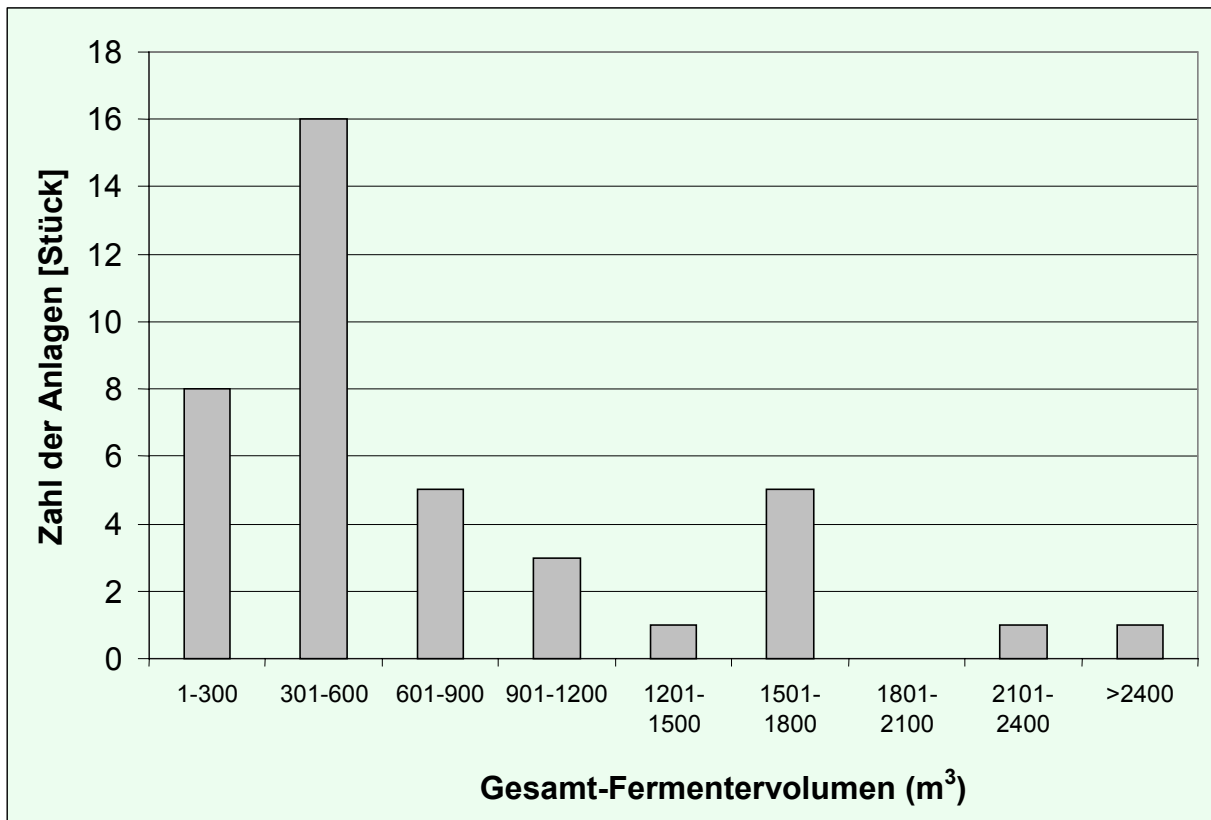


Abbildung 35: Umfrage II: Größenverteilung des Gesamt-Fermentervolumens (n=40)

Das durchschnittliche Fermenter-Gesamtvolumen liegt für die zweite Stichprobe mit 772 m³ deutlich höher als im Falle der ersten Erhebung (528 m³), was sich mit dem Trend zu größeren Gärraumvolumina bei neueren Anlagen deckt (Abbildung 35). Nähere Angaben wurden zur Fermenterdurchmischung erhoben, welche in 41 von 42 berücksichtigten Fällen mechanisch erfolgt. Im Gegensatz zur ersten Umfrage waren in der kleineren Stichprobe keine hydraulischen oder pneumatischen Rührwerke vertreten. Meist wird mehrmals am Tag für einige Minuten gerührt, seltener sind häufigere und längere Rührvorgänge (Abbildung 36 und Abbildung 37).

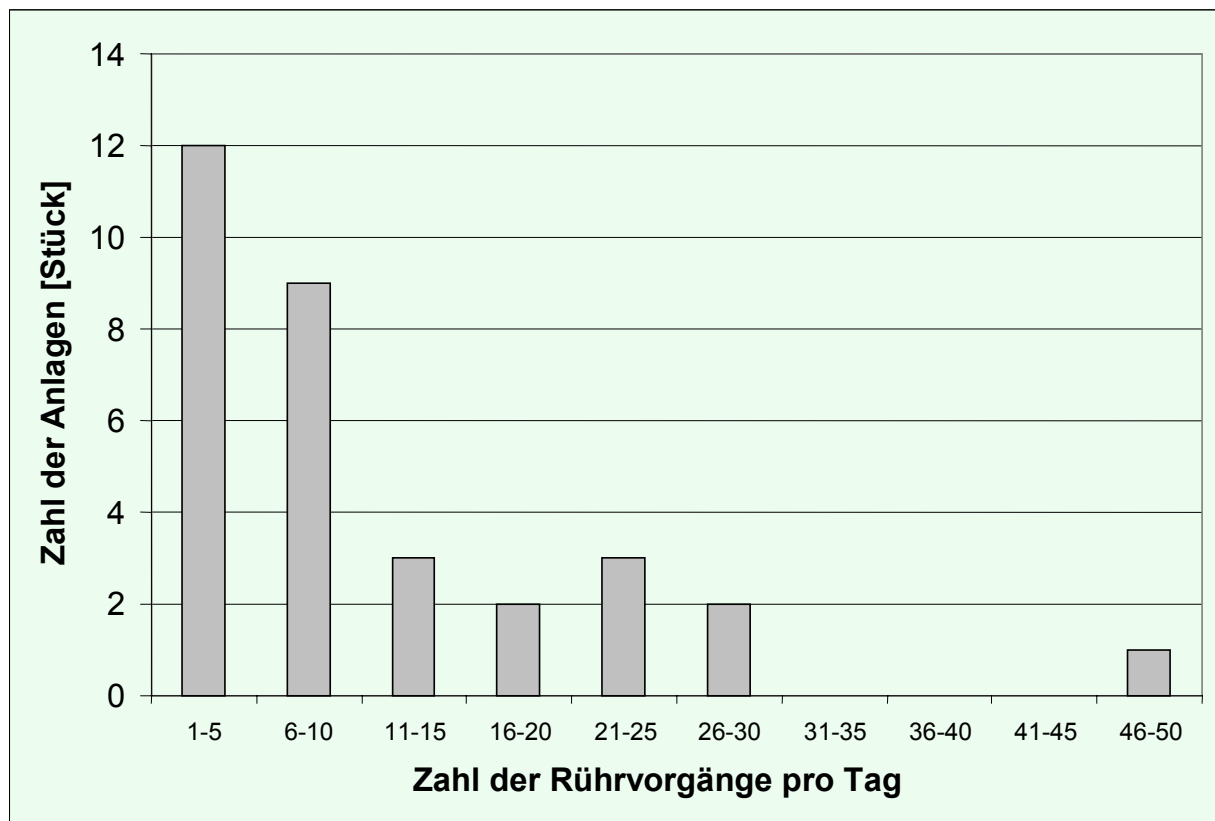


Abbildung 36: Umfrage II: Rührerbetrieb in den Biogasanlagen (n=32)

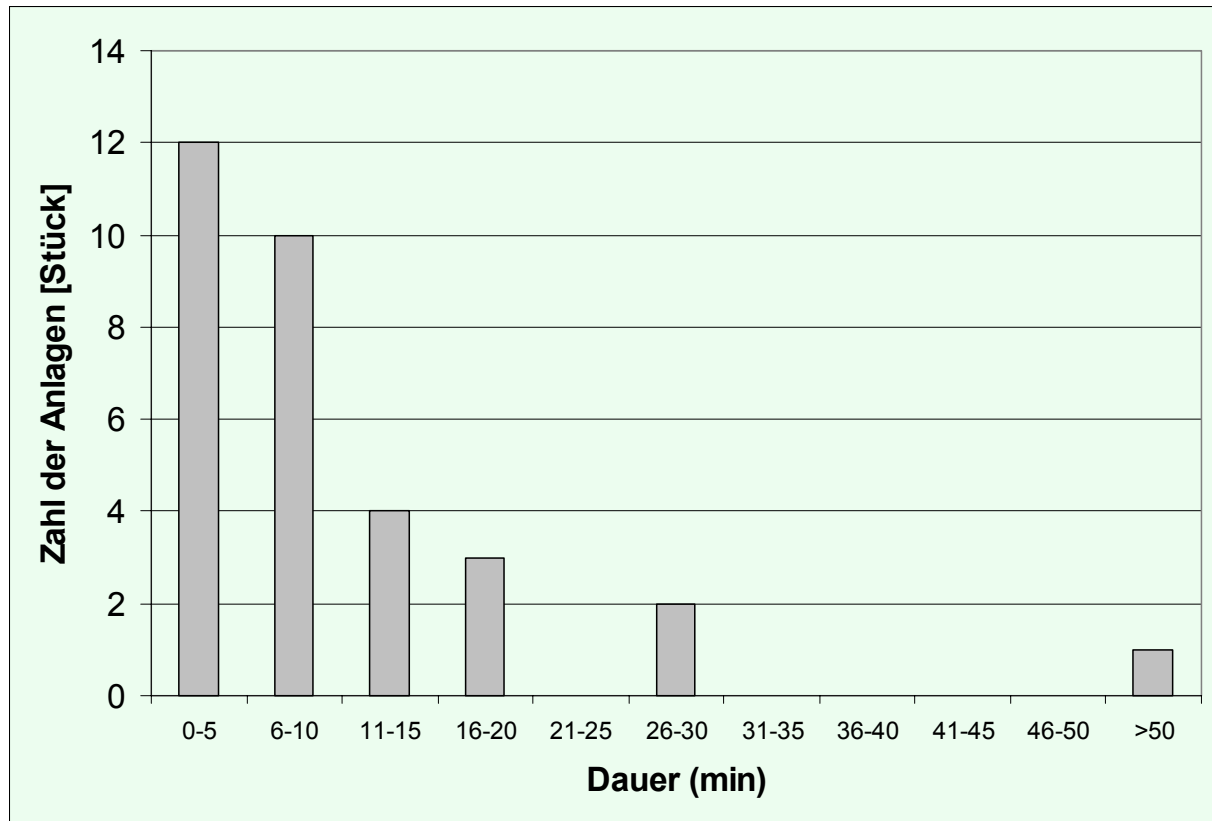


Abbildung 37: Umfrage II: Dauer des Rührvorganges (n=32)

4.2.2 Gasspeicherung und -aufbereitung

In Übereinstimmung mit dem größeren durchschnittlichen Fermenter-Gesamtvolumen ist auch das durchschnittliche Gasspeichervolumen mit 169 m^3 deutlich höher als bei der Umfrage unter allen Anlagenbetreibern (112 m^3), wobei die Spannweite mit 30 bis 1200 m^3 sehr groß ist (Abbildung 38). Beim Gasspeichermaterial überwiegt mit einem Anteil von 44 % (14 von 32 Fällen) PE-Folie (Abbildung 39). Eine Überdrucksicherung geben 29 von 32 Befragten an, 2 Anlagebetreiber besitzen diese grundlegende Sicherheitseinrichtung nach eigener Angabe nicht. Auf 40 von 41 ausgewerteten Anlagen wird das Biogas entschwefelt, auf 34 von 41 Anlagen entfeuchtet. Die Entschwefelung des produzierten Gases erfolgt ausschließlich nach dem sogenannten biologischen Verfahren, die Entfeuchtung geschieht meist in einer Kühlfalle/einem Kondensatabscheider (18 von 29 gültigen Angaben) oder in einer langen Gasleitung im Boden (4 Fälle) (Abbildung 40). Eine weitergehende Gasaufbereitung erfolgt nicht. 18 von 41 Befragten haben einen Gaszähler installiert. Angaben zu Biogasinhaltsstoffen waren relativ wenig verfügbar, am häufigsten noch für H_2S . Die durchschnittlichen H_2S -Gehalte streuen demnach zwischen 20 und 250 ppm, alle angegebenen Werte zwischen 0 und 5000 ppm. Der durchschnittliche angegebene Methan-Gehalt des Biogases beträgt 62,7 Vol.-%, der durchschnittliche Kohlendioxid-Gehalt 23,2 Vol.-%. Wie belastbar diese Angaben sind, konnte im Rahmen der Erhebung nicht überprüft werden.

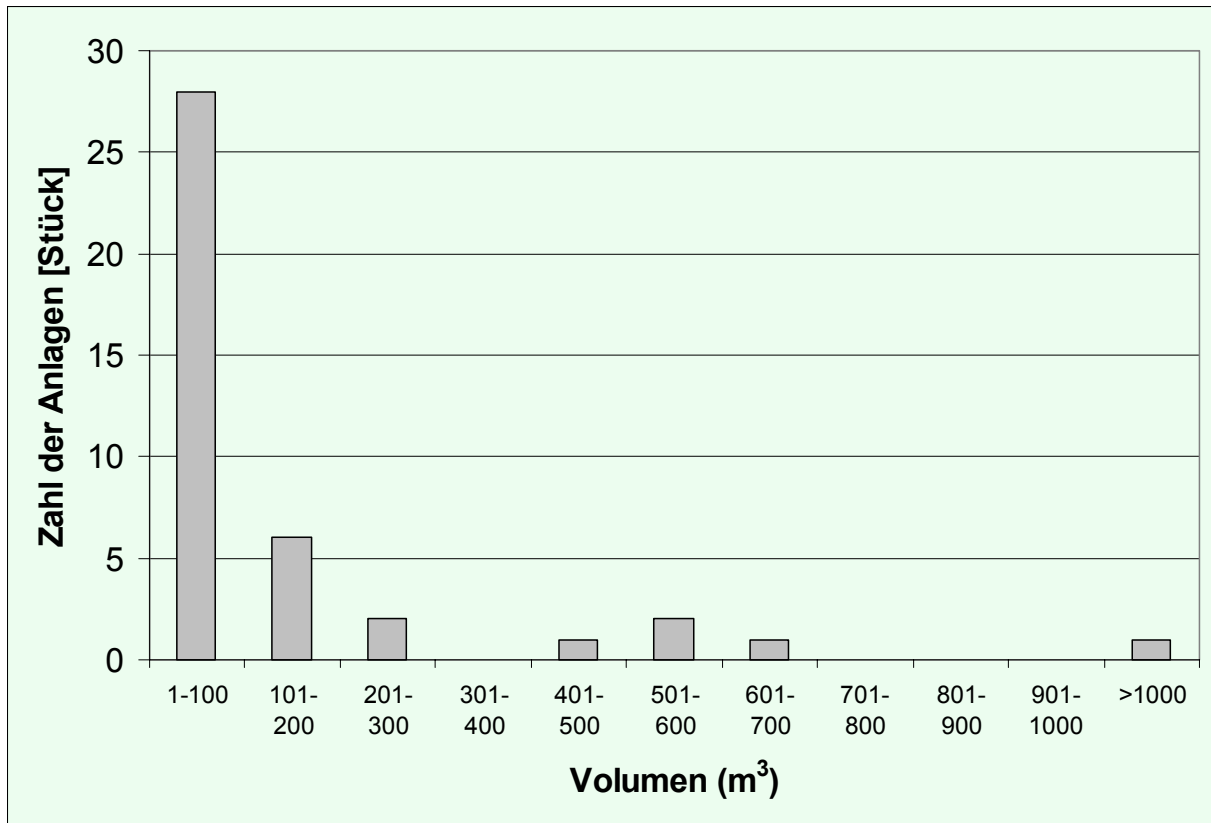


Abbildung 38: Umfrage II: Verteilung des Gasspeichervolumens (n=41)

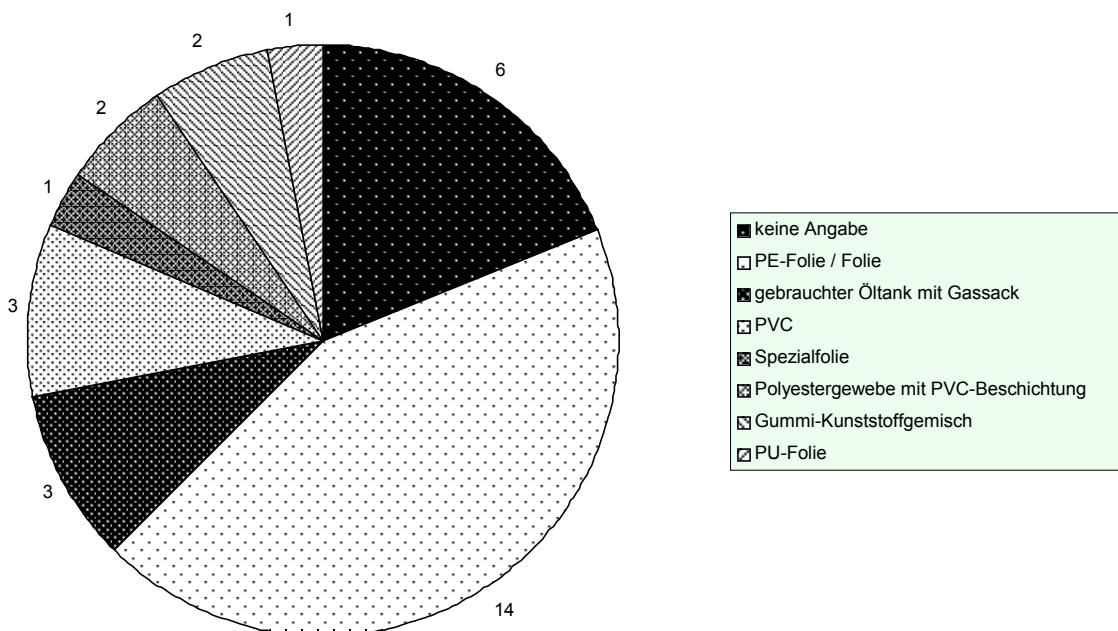


Abbildung 39: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu Gasspeichermaterialien (n=32)

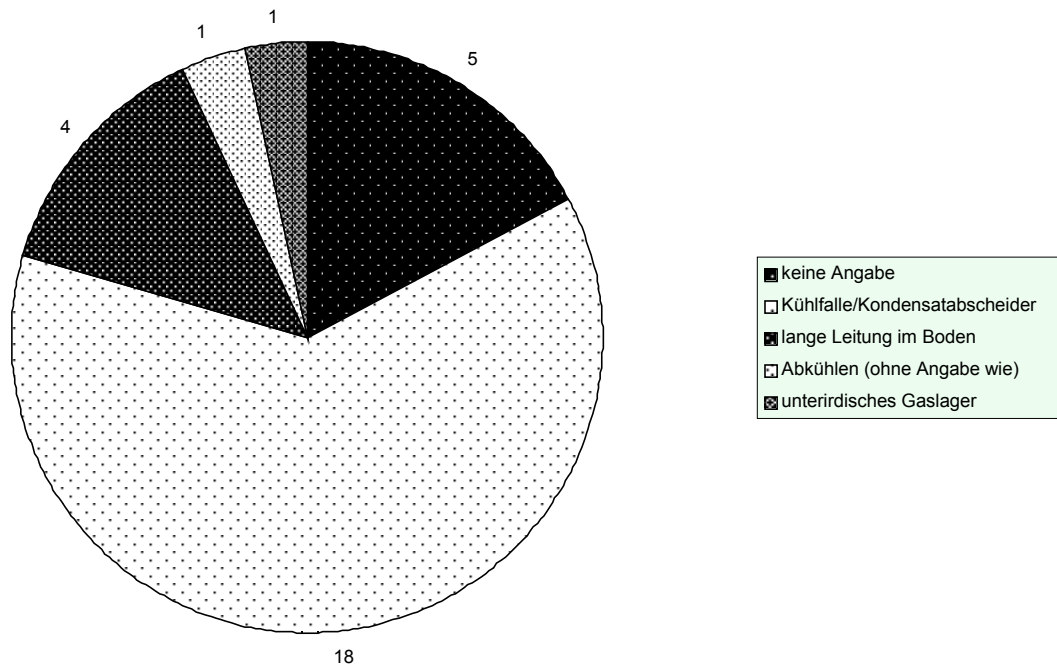


Abbildung 40: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Technik der Entfeuchtung des Biogases (n=29)

4.2.3 Biogasnutzung/BHKW

Die meisten zusätzlichen Informationen wurden im Bereich Biogasnutzung und BHKW/Motoren gesammelt. Gas-Otto- und Zündstrahlmotoren waren zu etwa gleichen Teilen vertreten. Die elektrische Leistung der erfassten Motoren (65 von 66) streut zwischen 11 und 300 kW (Abbildung 41). Der Anteil von 20 % der Motoren, die weniger als 3000 Betriebsstunden im Jahr aufweisen, deutet darauf hin, dass diese für Wartungsarbeiten in Reserve gehalten werden oder nur für den Spitzenlastbetrieb vorgesehen sind (Abbildung 43). Die Ausfallzeiten der BHKW (inkl. Zeiten für Wartungsarbeiten) belaufen sich bei 57,5% der Befragten auf unter 4 Tagen pro Jahr (Abbildung 44). Nur in 6 Fällen wurden vom BHKW-Hersteller Angaben zu den Emissionen an NO_x und CO gemacht. Lediglich ein Hersteller würde bei vorgegebenem Methangehalt im Biogas für diese Werte garantieren. Keine der ausgewählten Anlagen verfügt über einen Oxidationskatalysator, lediglich drei Anlagenbetreiber haben Abgasmessungen durchführen lassen.

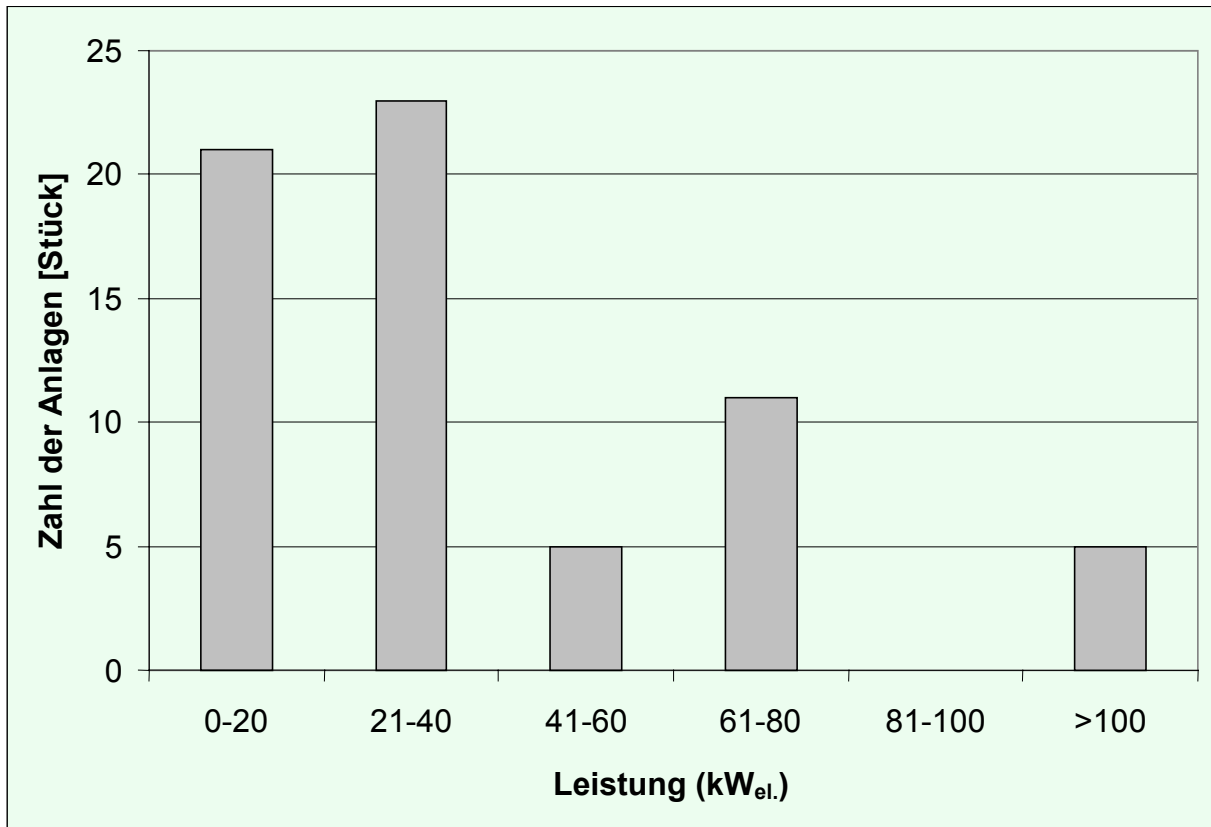


Abbildung 41: Umfrage II: Verteilung der Motorleistung der BHKW-Aggregate (n=65)

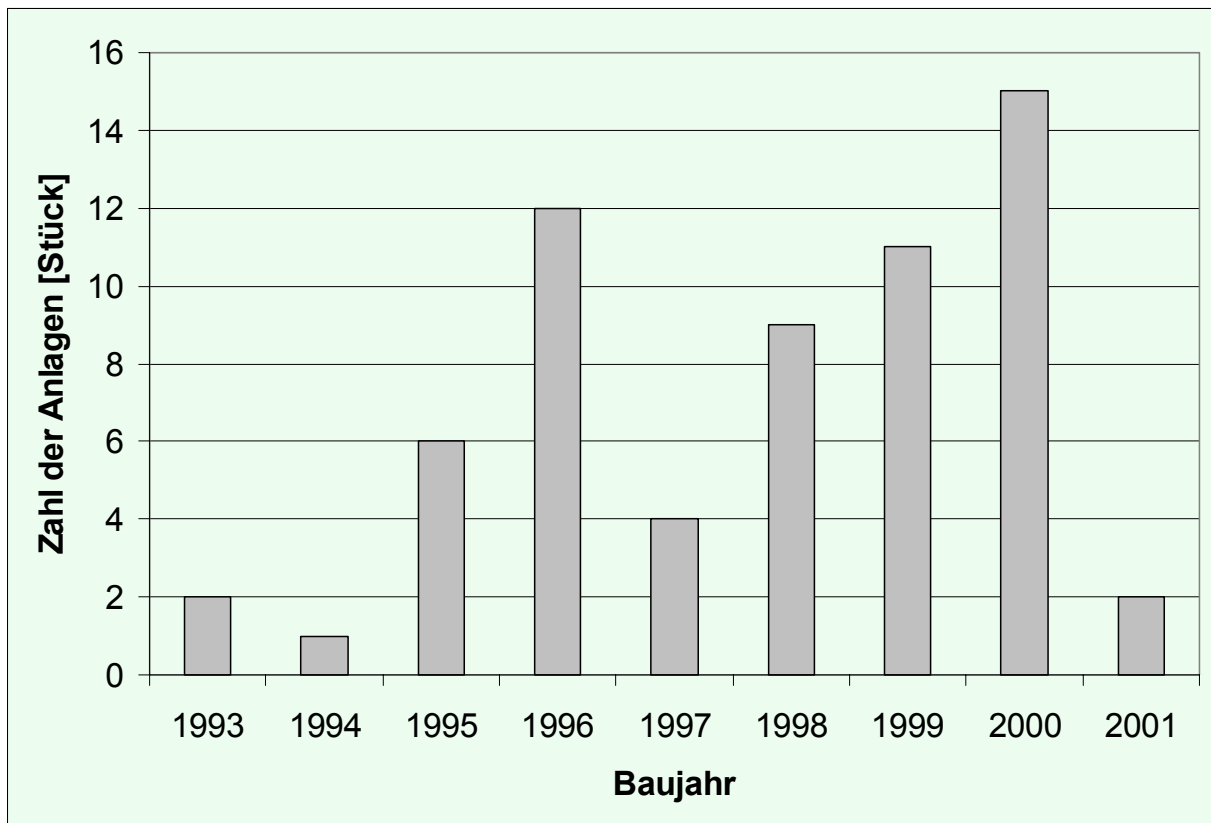


Abbildung 42: Umfrage II: Verteilung des Baujahres der BHKW-Aggregate (n=62)

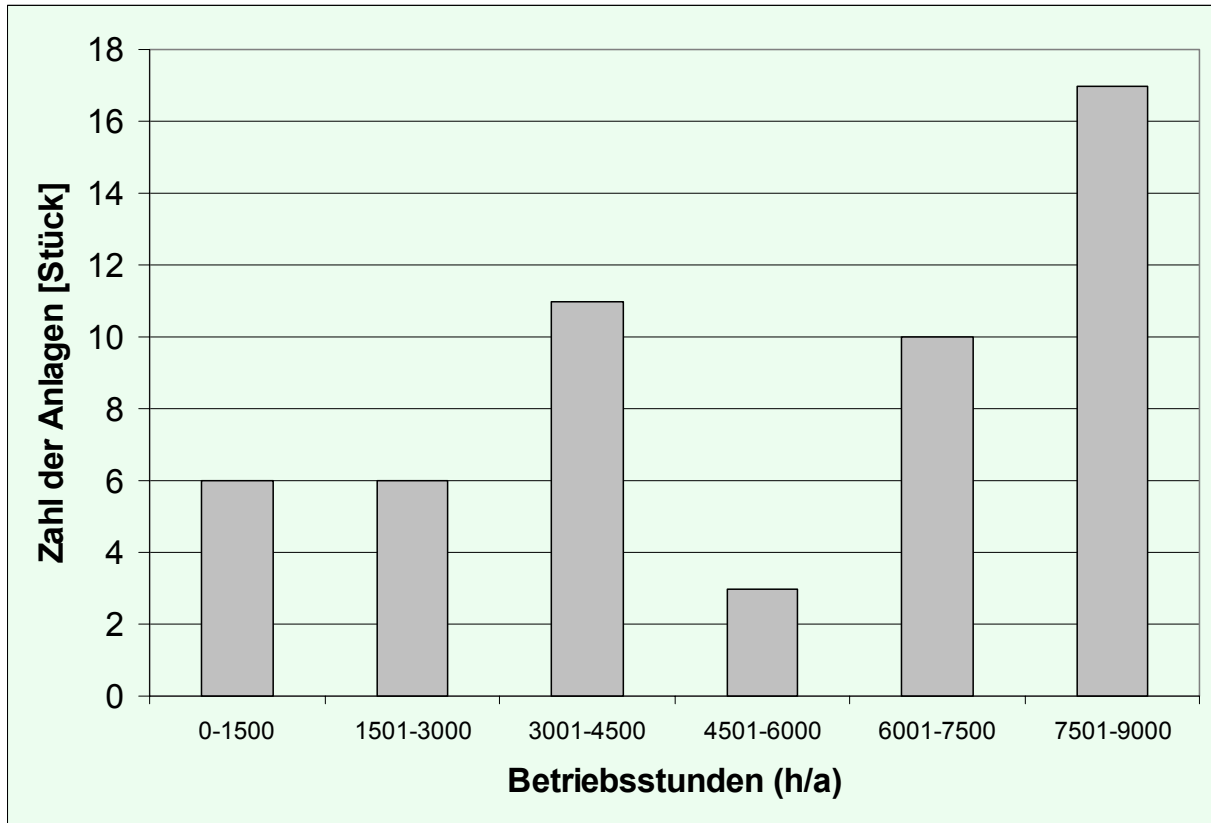


Abbildung 43: Umfrage II: Verteilung der jährlichen Betriebsstunden der BHKW-Aggregate (n=53)

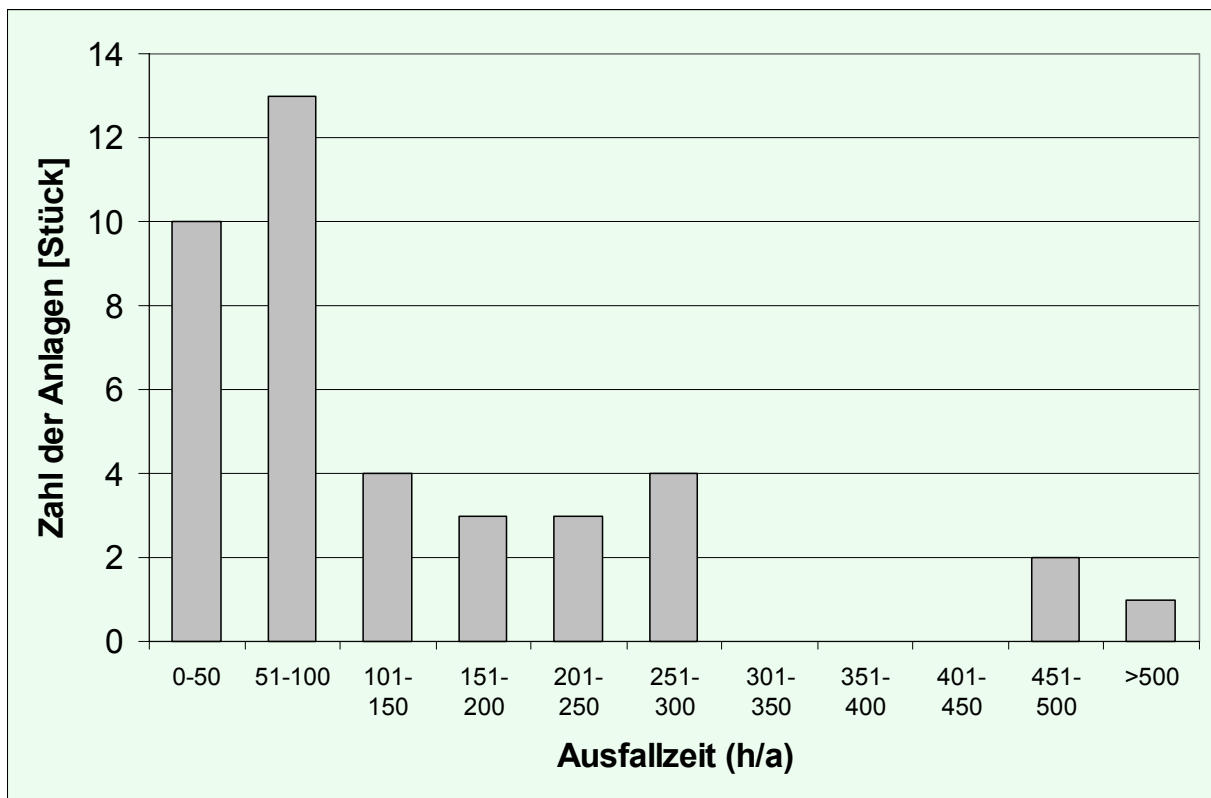


Abbildung 44: Umfrage II: Verteilung der Ausfallzeiten der BHKW (n=40)

Bei den Zündstrahlmotoren streuen die Angaben zum Zündölanteil zwischen 2 und 30 %. 21 von 24 erfassten Zündstrahlmotoren werden mit 10 % Zündölanteil oder weniger betrieben, 3 Motoren weisen mit 15 % und mehr einen deutlich zu hohen Zündölanteil auf (Abbildung 45). Als Zündöl wurde, wo angegeben, ausschließlich Heizöl verwendet. Die Tatsache, dass nur 16 Angaben zum Zündölverbrauch gemacht wurden, zeigt, dass diesem Wert in der Praxis eher zu wenig Aufmerksamkeit zuteil wird (Abbildung 46). Das Ölwechselintervall liegt sowohl bei Zündstrahl- als auch bei Gas-Otto-Motoren selten über 500 Betriebsstunden (Abbildung 47). Es werden vor allem Mehrbereichsöle eingesetzt, am häufigsten SAE 15W-40 (12 von 30 gültigen Angaben; Abbildung 48). Die Angaben zum Altölanfall schwanken abhängig von Motorentyp und -größe, Betriebsstunden sowie Ölwechselintervall zwischen 20 und 1000 l/a (Abbildung 49). Das Wartungsintervall für die Luftfilterreinigung ist bei den befragten Anlagen mit ca. 1900 Betriebsstunden am engsten gesetzt, gefolgt vom Zündkerzenwechsel bei ca. 2600 Betriebsstunden, der Motoreinstellung alle 3800 Betriebsstunden und dem Wechsel der Einspritzdüsen bei den Zündstrahlaggregaten alle 9000 Betriebsstunden. Auffallend sind die sehr großen Schwankungsbreiten bei allen Angaben (Abbildung 50).

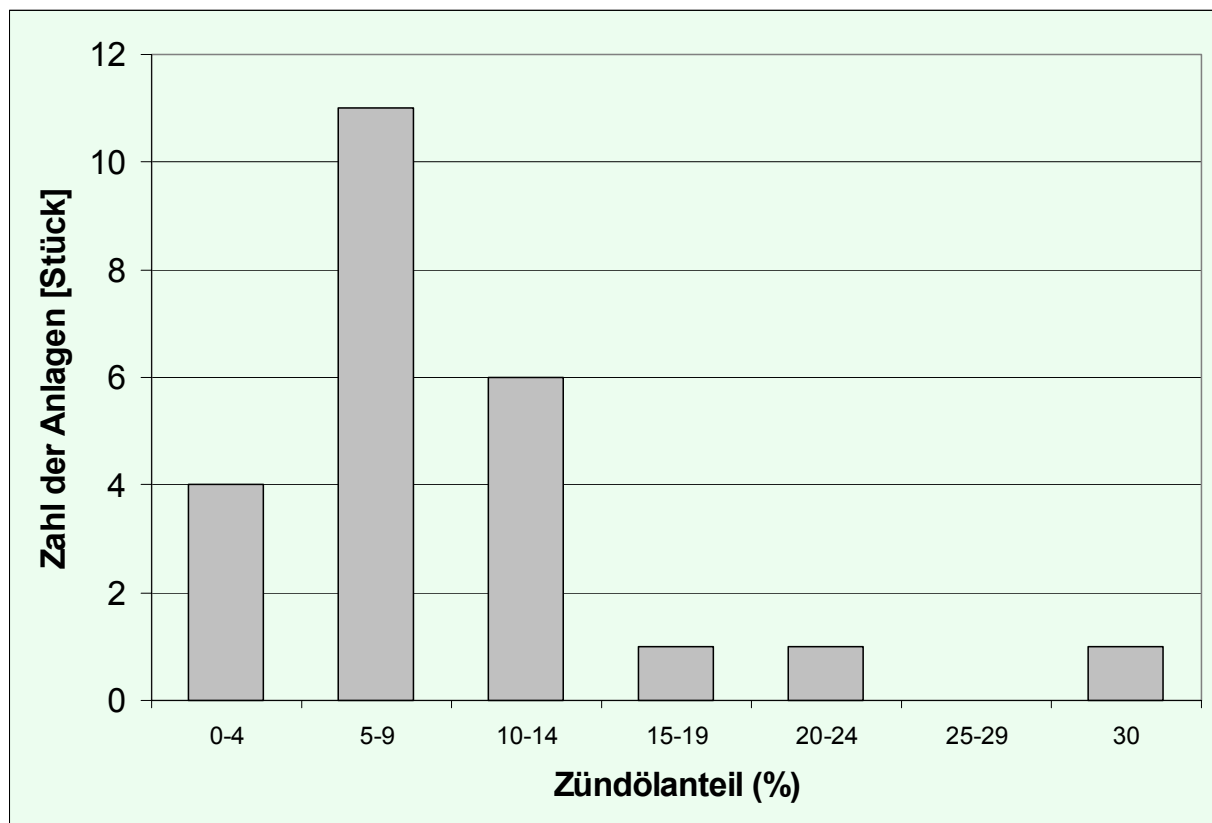


Abbildung 45: Umfrage II: Zündölanteil bei Zündstrahl-Aggregaten (n=24)

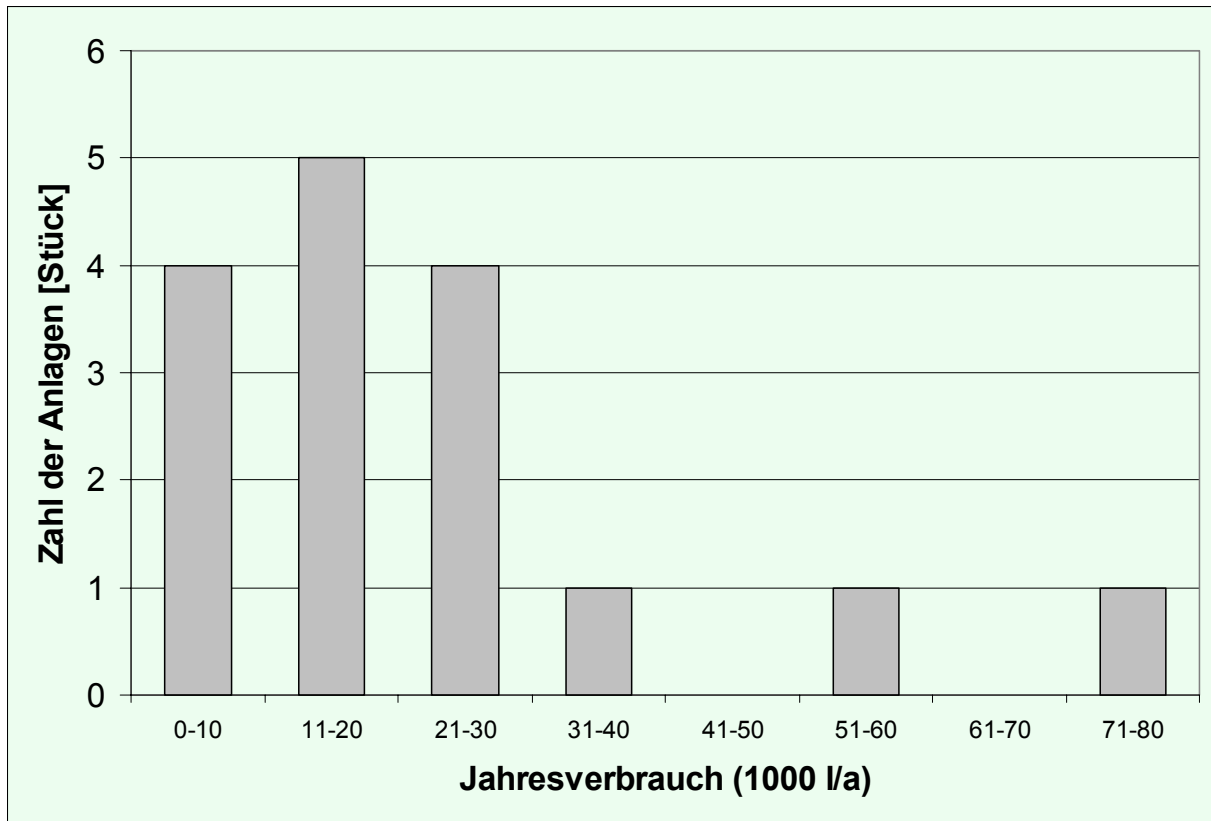


Abbildung 46: Umfrage II: Verteilung des Jahresverbrauches an Zündöl (n=16)

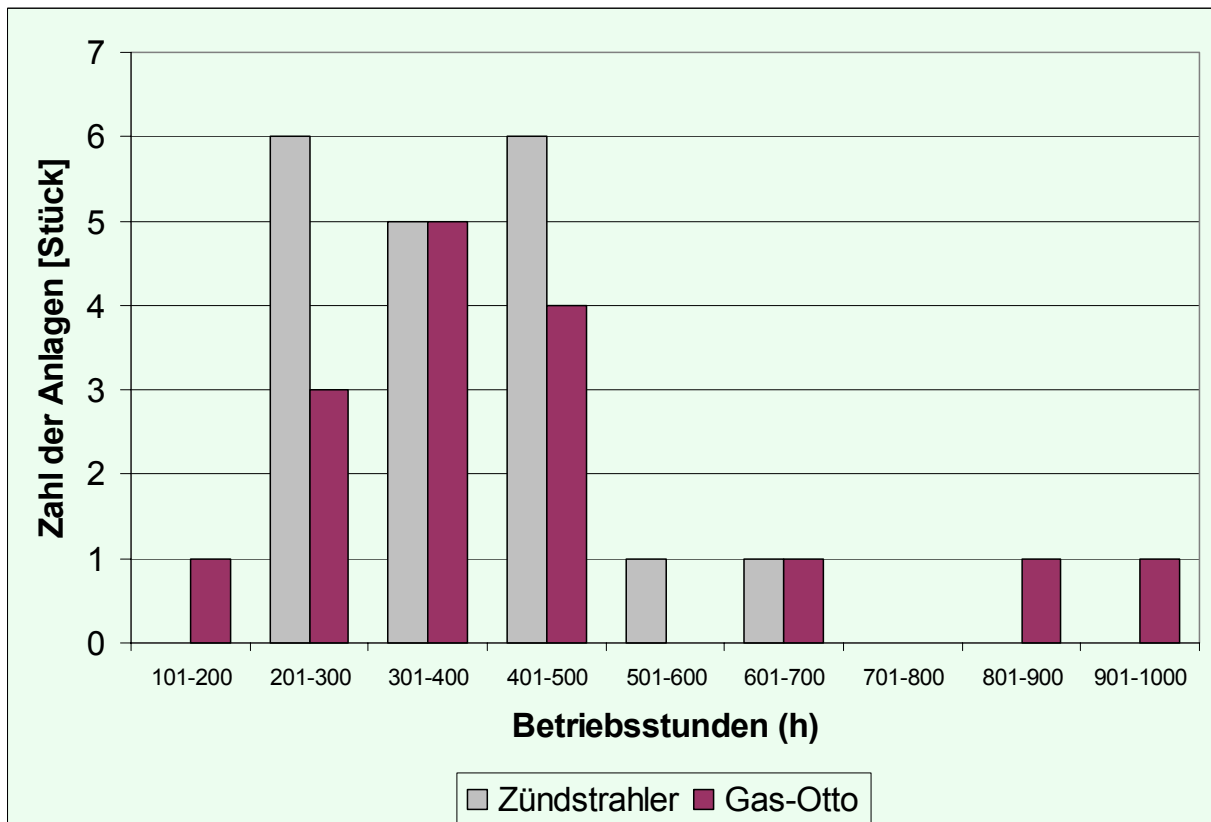


Abbildung 47: Umfrage II: Verteilung der Ölwechselintervalle für die BHKW-Aggregate (n=35)

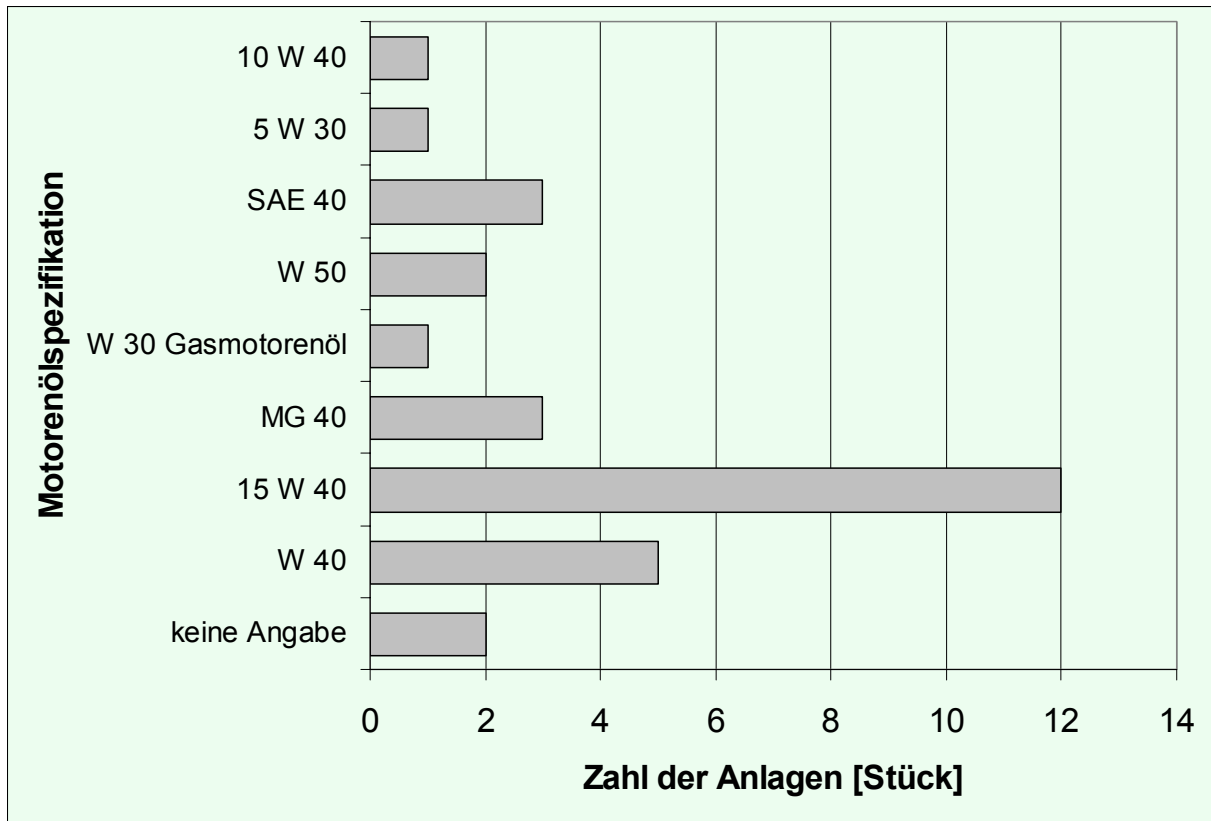


Abbildung 48: Umfrage II: In den Biogas-Motoren verwendetes Motorenöl (n=30)

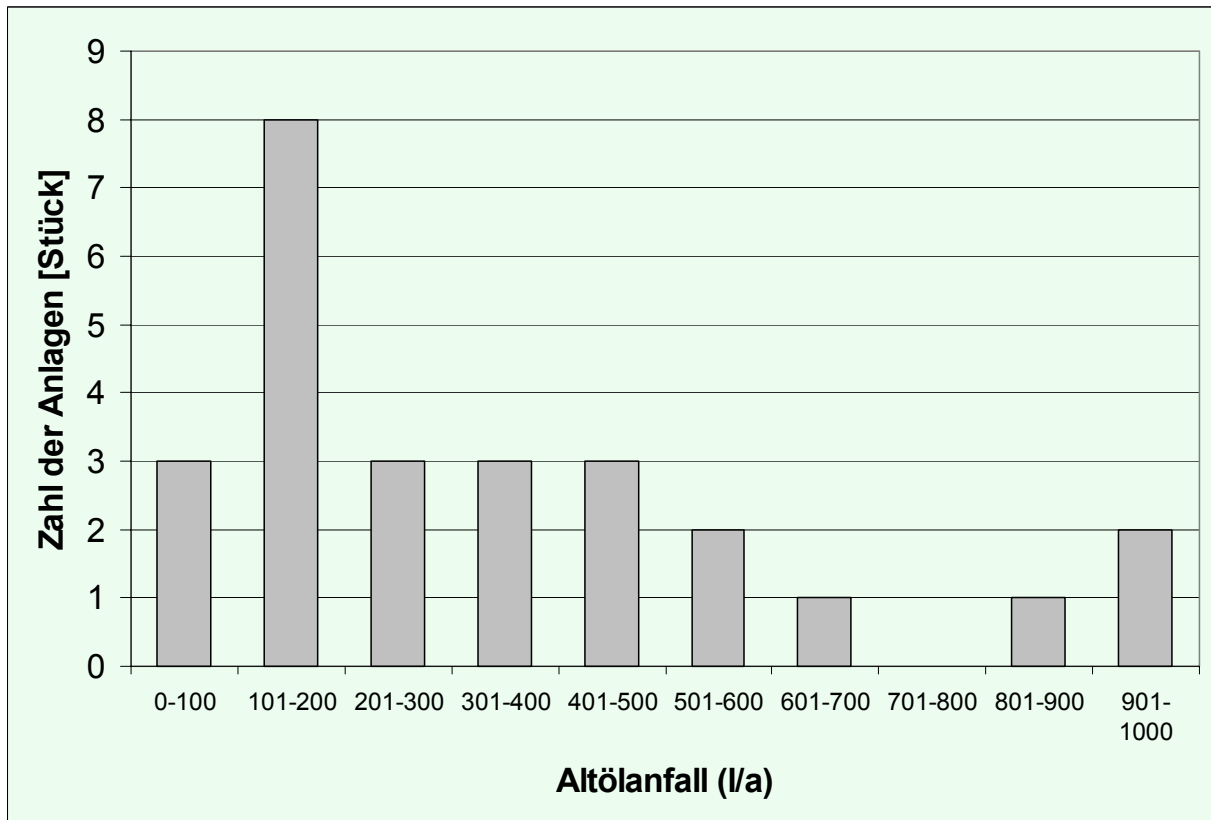


Abbildung 49: Umfrage II: Verteilung des Altölanfalls (n=26)

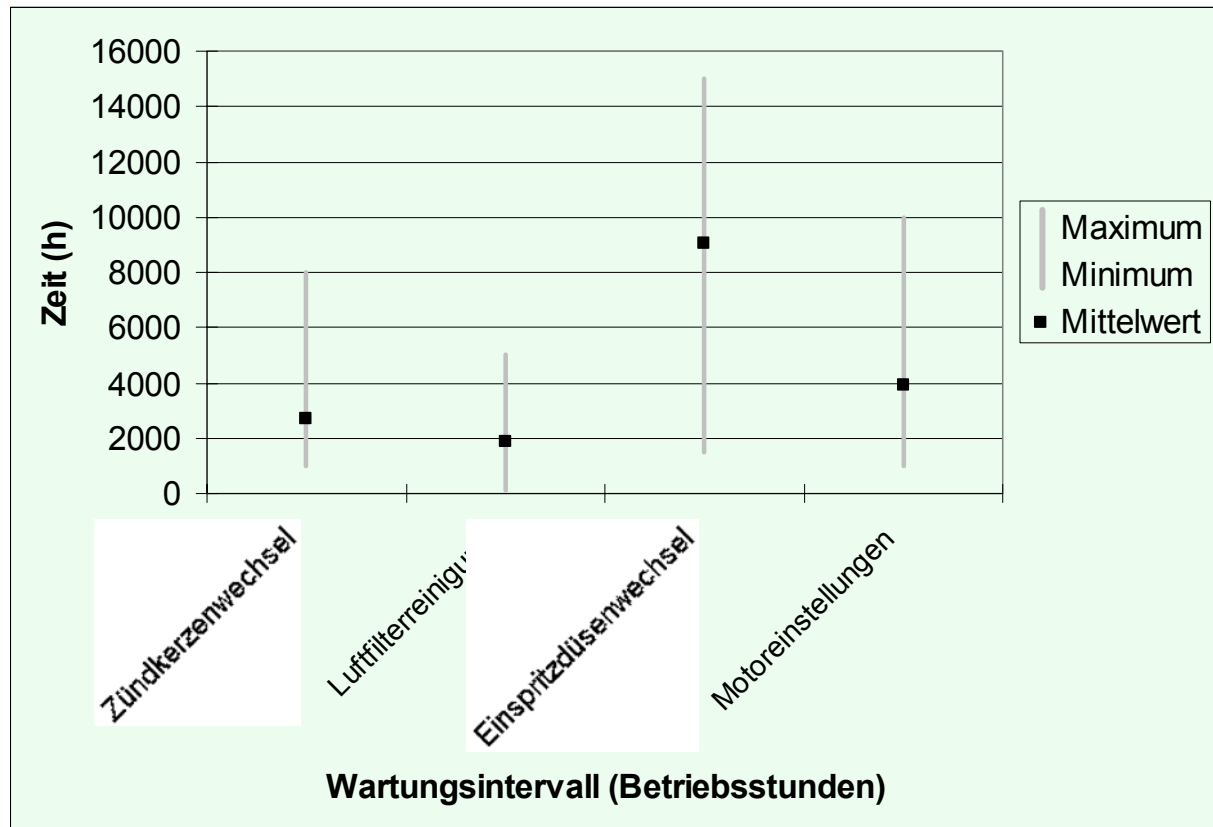


Abbildung 50: Umfrage II: Verteilung der Intervalle für Wartungsarbeiten an den BHKW-Aggregaten (n=22)

Keiner der befragten Anlagenbetreiber hat Wirkungsgradmessungen an seinem BHKW durchgeführt. Nur 13 Betreiber machten Angaben zur Abgastemperatur, wobei diese sehr weit zwischen 75 und 530°C streuen. Nur an 3 von 66 Motoren sind Wärmemengenzähler installiert. Hierin spiegelt sich auch die geringe Bedeutung der Wärmenutzung wider.

4.2.4 Verwertung des Gärrestes und Betriebsdaten

Auf 39 von 41 ausgewählten Anlagen ist ein Endlager vorhanden. Die Lagerkapazität streut zwischen 320 und 3600 m³, bei einem Mittelwert von 960 m³ (Abbildung 51). Die Mehrzahl der Endlagerbehälter ist abgedeckt (25 von 41). 16 von 32 ausgewählten Betreibern lassen nach eigenen Angaben den Gärrest chemisch untersuchen, meist jedoch nur auf den Gehalt an Nährstoffen und Trockensubstanz, lediglich in einem Fall auf den Gehalt an organischer Trockensubstanz (Abbildung 52). Der Gärrest wird fast ausschließlich direkt landwirtschaftlich ausgebracht, nur in einem Falle erfolgt eine Kompostierung. Bei der landwirtschaftlichen Ausbringung überwiegt der Anteil an den emissionsarmen Ausbringungstechniken Schleppschlauch- bzw. Schleppschuhverteiler mit 64 % (Abbildung 53). Die Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche der für die zweite Umfrage ausgewählten Betriebe zeigt Abbildung 54.

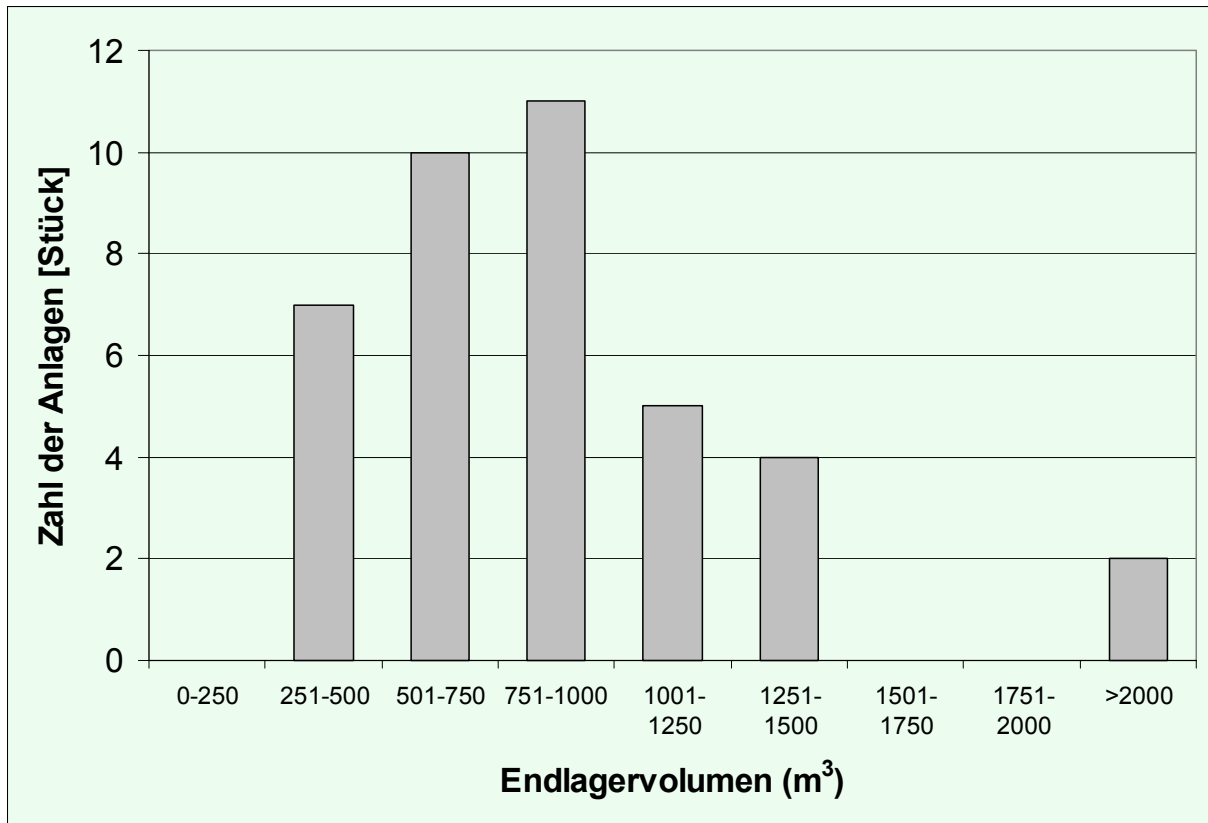


Abbildung 51: Umfrage II: Verteilung des Fassungsvermögens des Gärrestendlagers (n=39)

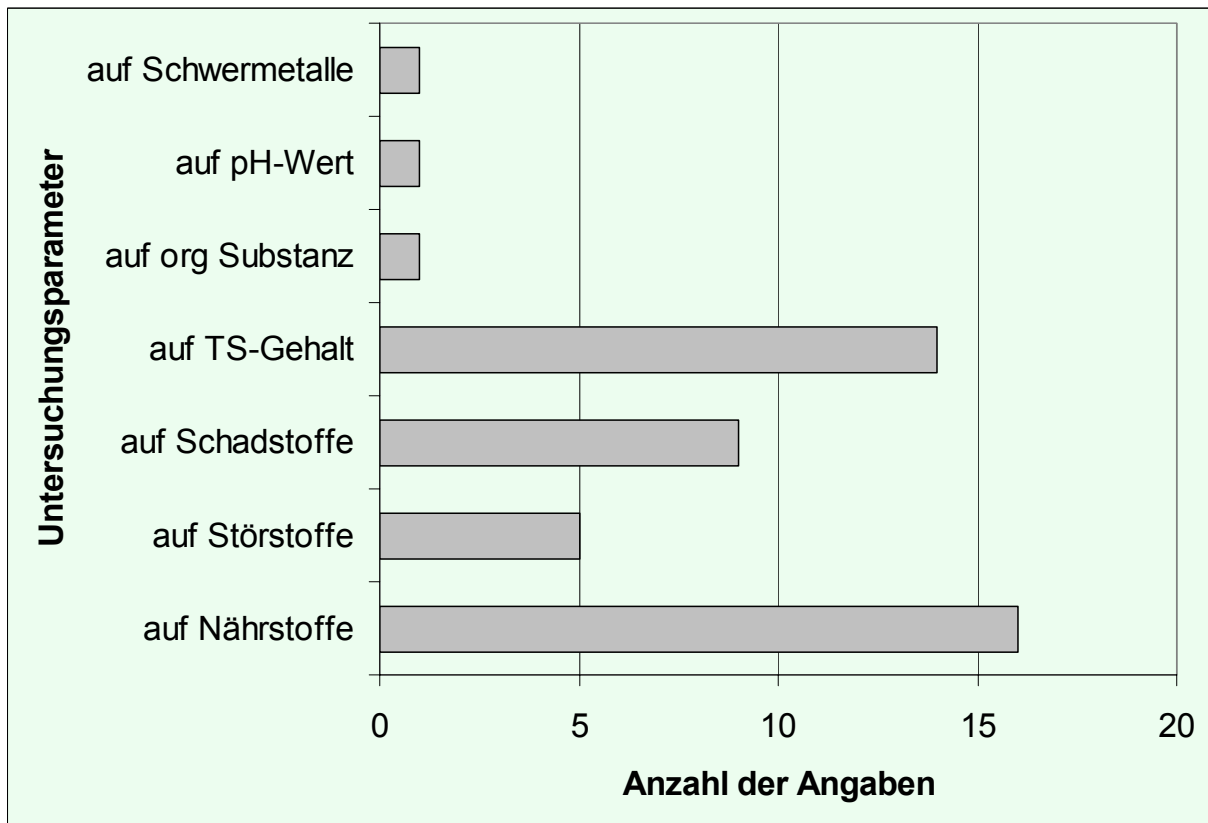


Abbildung 52: Umfrage II: Verteilung der Angaben zu Gärrestuntersuchungen (n=16)

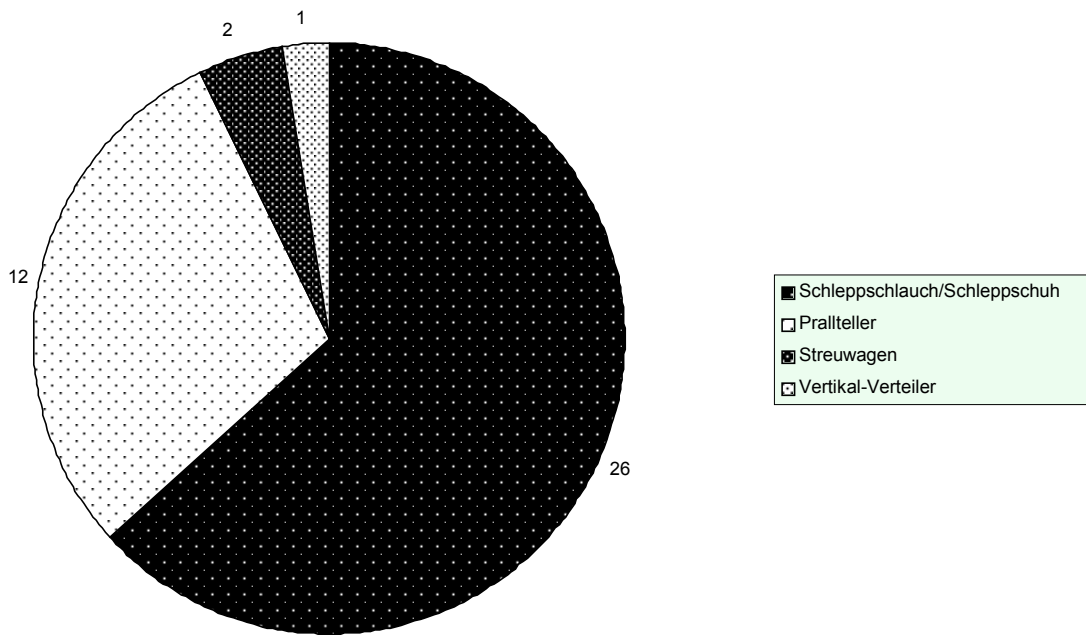


Abbildung 53: Umfrage II: Verteilung der Angaben zur Ausbringtechnik des Gärrestes (n=41)

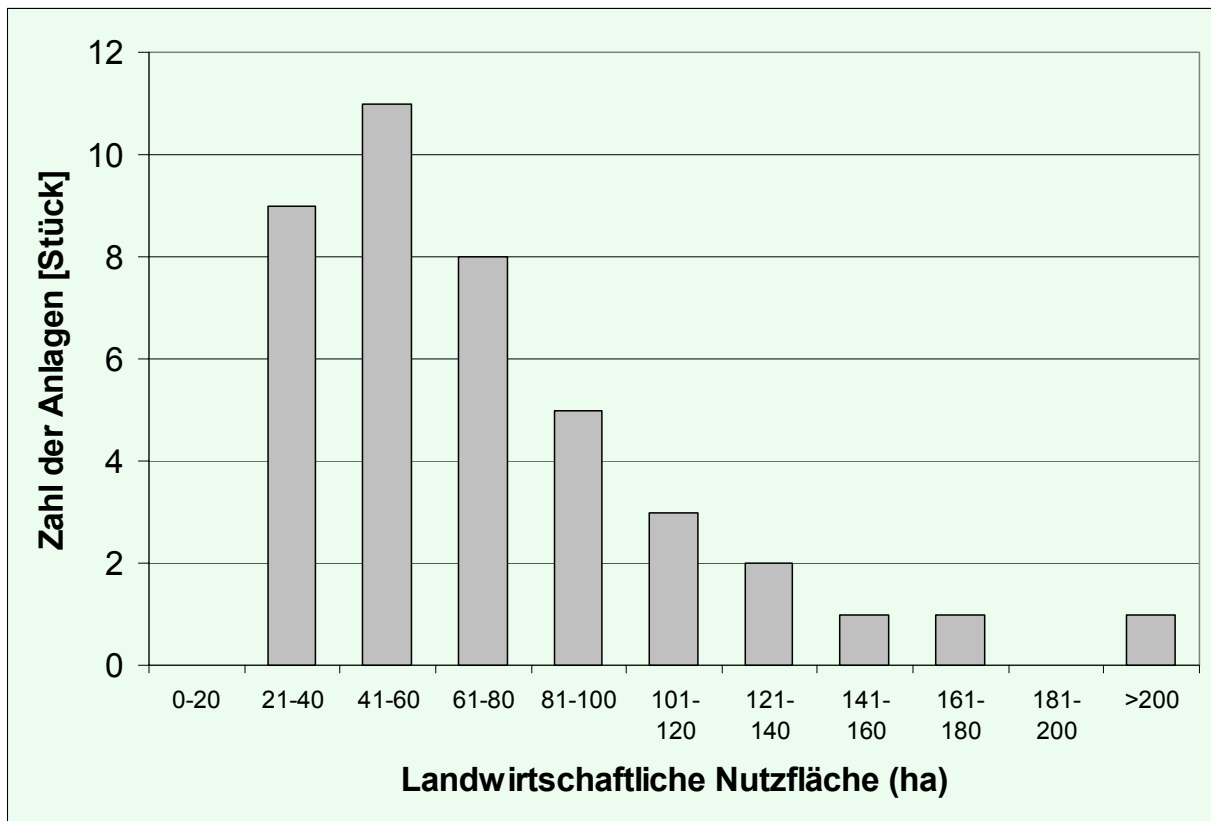


Abbildung 54: Umfrage II: Verteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche der ausgewählten Betriebe (n=41)

5 Emissionsmessungen an Blockheizkraftwerken ausgesuchter landwirtschaftlicher Biogasanlagen

Nach den Ergebnissen aus den Umfragen zur Ermittlung des Standes der Technik (Kapitel 4) erstreckt sich die Verteilung der elektrischen Leistung der erfassten BHKW-Module von 5,5 bis 160 kW, wobei die meisten Aggregate eine elektrische Leistung zwischen 10 und 50 kW aufweisen, aber auch zwischen 50 und 80 kW sind noch zahlreiche Aggregate zu finden. Es sollten Messungen an vier Zündstrahlaggregaten unterschiedlicher Leistung durchgeführt werden. Für die Auswahl der Anlagen wurden die BHKW daher in vier Klassen eingeteilt (Tabelle 12). Die ersten drei Klassen repräsentieren die BHKW bis 99 kW_{el.} in gleichen Klassengrößen, die vierte Klasse repräsentiert die wenigen großen Module ab 100 kW_{el.}.

Tabelle 12: Klasseneinteilung der BHKW zur Anlagenauswahl

Klasse	Elektr. Leistung [kW]
I	0-33
II	34-66
III	67-99
IV	100-160

In dem Anschreiben an die Anlagenbetreiber zur zweiten Umfrage (Kapitel 4.2) wurde auf eine zukünftig geplante Messung hingewiesen. Anlagenbetreiber, welche an einer Messung auf ihren Betrieben interessiert waren, konnten dieses bei der Rückantwort auf dem Fragebogen angeben. Hieraus wurde zu jeder der oben genannten Klassen ein Zündstrahl-BHKW-Modul ausgewählt. Von den vier ausgewählten Motoren ist jener der Klasse II zu Beginn der ersten Messperiode komplett ausgefallen, so dass ein anderes Aggregat mit ähnlicher elektrischer Leistung gefunden werden musste. Zusätzlich zu den vier Zündstrahl-Aggregaten wurde noch ein Gas-Otto-Motor der Leistungsklasse I untersucht, um vergleichende Emissionsdaten zu gewinnen. Alle Angaben zu den untersuchten Anlagen und Messergebnissen wurden anonymisiert.

Als abhängige Variablen wurden NO_x, CO und SO₂ im Abgas der BHKW-Module untersucht. Außerdem erfolgte die Erfassung und Auswertung der vom Abgasmessgerät zusätzlich ausgegebenen Größen wie Abgastemperatur und λ-Wert (Kapitel 5.3.1). Die unabhängigen Faktoren sind die Motoren sowie die Messreihen.

Die Messungen erfolgten jeweils zu einem Termin im Sommer bzw. Winter sowie zu zwei weiteren Terminen in der Übergangszeit, um jahreszeitliche Einflüsse beurteilen zu können. Jede der vier Messreihen pro Aggregat umfasste mindestens 5 Einzelmessungen. Einen zeitlichen Überblick über den geplanten Ablauf der einzelnen Abschnitte gibt Tabelle 13 wieder.

5.1 Durchführung der Messungen

Für die Durchführung der Messungen sollte das Wetter, insbesondere an Tagen, an denen auf Dächern gemessen wird, möglichst trocken und eisfrei sein, um das Risiko eines Abrutschens zu vermeiden. Zum vereinbarten Termin wurde der Betrieb angefahren und zunächst mit dem ANSYCO GA 94 der Methangehalt des Biogases bestimmt, nach welchem die Einstellung des TESTO-Messgerätes erfolgte. Die Gasqualität wurde je nach Betrieb und

Zugangsmöglichkeiten an den einzelnen Fermentern oder an der Gasleitung bestimmt und protokolliert. Wenn möglich wurden zusätzliche Daten wie Vor- und Rücklauftemperatur des Heizwasserkreislaufes an vorhandenen Apparaturen erhoben.

Tabelle 13: Zeitplan der einzelnen Versuchsabschnitte

Phase	2001						2002	
	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Jan	Feb
Vorbereitung Messablauf	■							
1. 4Messung: Sommer	■	■						
2. Messung: Übergang 1			■	■	■			
3. Messung: Übergang 2				■	■	■		
4. Messung: Winter						■	■	■
Messergebnisse aufbereiten		■			■			■
Tagesmessungen auswerten		■			■			■

Zum Aufbau der Abgas-Messtechnik wurde per Kabeltrommel für elektrische Anschlussmöglichkeiten in Kaminnähe gesorgt. Danach wurden das TESTO-Messgerät und der zur Datenaufzeichnung verwendete Laptop ans Stromnetz angeschlossen und miteinander verbunden. Als nächstes wurde am TESTO-Handgerät (Kapitel 5.3.1) die passende Brennstoffeinstellung ausgewählt, in der Regel „Brennstoff 1“ - Biogas mit 60 % Methangehalt. Mit der Computer-Software wurde eine Bezeichnung für die folgende Messung ins Handgerät übertragen, unter welcher die Messwerte der automatischen Messung abgelegt wurden. Nach diesen Vorbereitungen wurde die Sonde in den Abgasstrom gebracht und die automatische Messung gestartet. Einen schematischen Überblick über die Messanordnung gibt Abbildung 55.

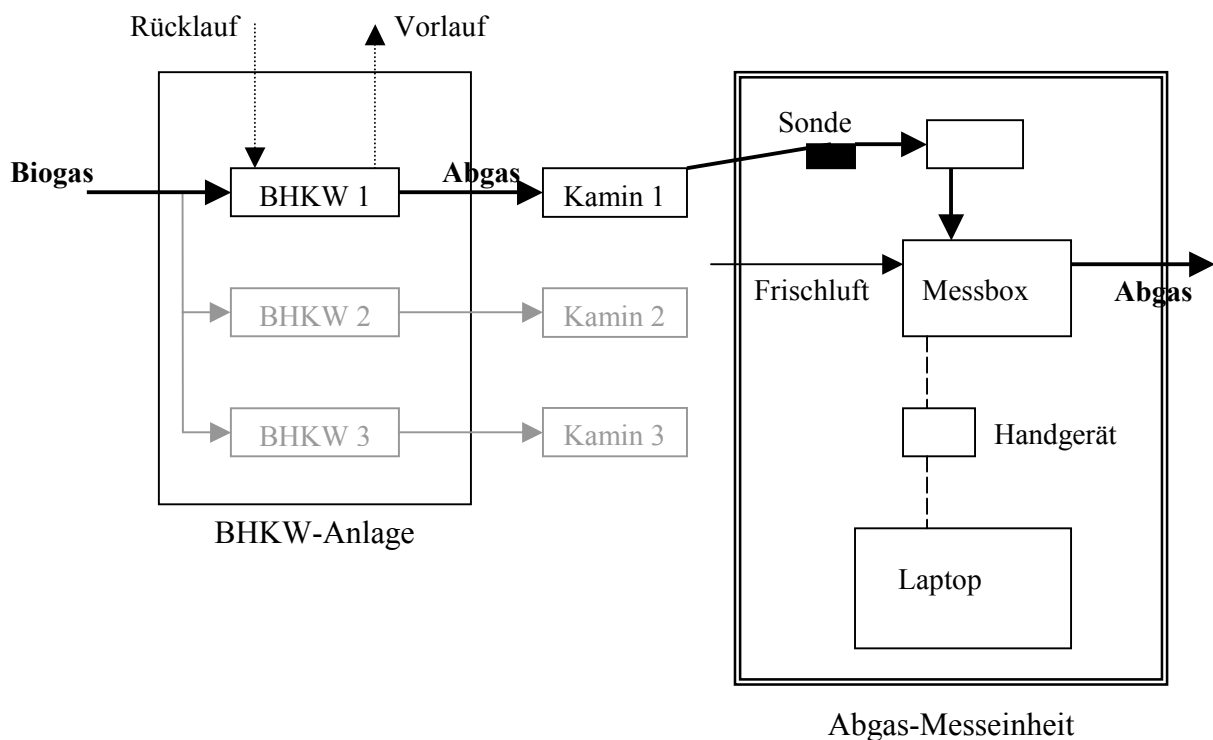


Abbildung 55: Schematischer Aufbau der Abgasmessungen am BHKW

Es wurde beim minimal möglichen Messzyklus von 10 s gemessen. Nach ca. 20 Minuten wurde die erste Messung gestoppt und die Sonde aus dem Kamin gezogen. Grober Ruß, der sich an der Sonde abgesetzt hatte, wurde mit einem Papiertuch entfernt. Anschließend wurde eine manuelle Messung an der Frischluft gestartet, um die Messzellen zu spülen und auf Nullniveau zu bringen.

Die im Handgerät gespeicherten Daten wurden auf den Laptop übertragen, wo eine erste Kontrolle stattfand, ob ordnungsgemäße Daten geliefert wurden. Die komplette Einzelmessung wurde schließlich auf der Festplatte des Rechners als ASCII-Datei abgelegt. Der Speicher des Handgerätes wurde nach jeder Messung gelöscht, da dieser bei einer Messzyklus von 10 Sekunden maximal 45 Minuten lang Daten aufnehmen kann und bei Erreichen eines überfüllten Speichers die aktuelle Messung abbricht. Nach Ein- und Ausschalten des Messgerätes zur Durchführung eines Selbsttests wurde die obige Prozedur für die weiteren Einzelmessungen des Messtages wiederholt. Nach Durchführung aller Einzelmessungen wurden sämtliche Daten des Messtages zusätzlich auf Diskette gesichert.

Ein Messtag (Messreihe) beanspruchte in etwa 4 bis 5 Stunden ohne An- und Abfahrtszeit. Da während der Warmlaufphase der Motoren, insbesondere bei kalter Witterung, erhöhte Emissionen auftreten, wurden die Betreiber darauf aufmerksam gemacht, dass am Messtag die Motoren bereits ein bis zwei Stunden vor Beginn der Messungen gestartet werden sollten. Die gewonnen Rohdaten wurden, wie im Ergebniskapitel 5.4 beschrieben, weiterverarbeitet.

5.2 Beschreibung der untersuchten Biogasanlagen

Im folgenden werden die landwirtschaftlichen Biogasanlagen sowie die BHKW-Module, an denen Abgasmessungen durchgeführt wurden, näher beschrieben. Die relevanten Motordaten sind nochmals in Tabelle 14 zusammengefasst.

5.2.1 Betrieb 1 (13 kW_{el.} Gas-Otto-Motor)

Die Anlage auf Betrieb 1, einem Futterbaubetrieb von 45 ha Größe, wurde 1993 errichtet und 1999 erweitert. Die Anlage arbeitet einstufig bei einer Gärtemperatur von 50°C und einer Verweilzeit von 30 Tagen. Die Beschickung des Fermenters erfolgt zweimal täglich mit jeweils etwa 2 t Substrat aus einer geschlossenen Vorgrube (4 m³). Es gelangen etwa 1000 m³/a Rindergülle und ca. 150 m³/a Festmist als Grundsubstrat in die Anlage, kofermentiert werden Spülmilch und Teigabfälle mit insgesamt ca. 600 t/a. Die Vergärung läuft in zwei Fermentern ab (100 m³ bzw. 700 m³). Der Hauptfermenter ist ein zylindrischer Betonbehälter mit mechanischem Rührwerk und Fußbodenheizung. Das Gas wird in einer 200 m³ großen Haube aus PE-Folie auf dem Hauptfermenter gespeichert. Der Gärrest wird in einem 600 m³ großen abgedeckten Endlager gesammelt. Die Ausbringung erfolgt auf landwirtschaftliche Flächen mit bodennaher Ausbringtechnik. Das entstehende Gas wird entwässert und durch Einblasen von Luft biologisch entschwefelt.

Ein Teil der bei der Verstromung des Biogases anfallenden Wärme wird im Wohnhaus genutzt. Auf dem Betrieb waren zu Messbeginn zwei Aggregate mit jeweils 13 kW_{el.} installiert. Während der Messperiode wurden diese durch Installation eines neuen 45 kW-Aggregates zu Ersatz-Modulen. Bei dem zusätzlich zu den vier Zündstrahl-Aggregaten unterschiedlicher Leistungsklassen (Betriebe 2 bis 4) untersuchten Motor handelt es sich um einen 15 kW_{el.}-Vierzylinder-Gas-Otto-Motor mit 2 l Hubraum, der bei 1500 U/min betrieben wird (Hochreiter 2002). Dieser Motor (Baujahr 1993) wird nur noch als Ersatzmotor mit 13 kW_{el.} betrieben und wurde vom Betreiber speziell für die durchzuführenden Messungen

eingeschaltet. Vom Betreiber wird ein elektrischer Wirkungsgrad von 20 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 50 % angegeben. Ein Abgas-Katalysator ist nicht vorhanden und Abgasmessungen wurden am Motor bisher nicht durchgeführt. Die Vor- bzw. Rücklauftemperatur wurde vom Betreiber mit 70°C bzw. 50°C angegeben. Die Laufzeit während der Nutzung als Hauptmotor betrug laut Betreiber ca. 7500 h/a, die Ausfallzeiten etwa 50 h/a. Häufiger auftretende Störungsursachen beim Betrieb des Motors sind Probleme mit dem Abgaswärmetauscher sowie einer defekten Zündung. Letzteres konnte im Messzeitraum bestätigt werden. Die Anordnung der Abgas-Messsonde am Kamin des untersuchten BHKW-Moduls zeigt Abbildung 56.

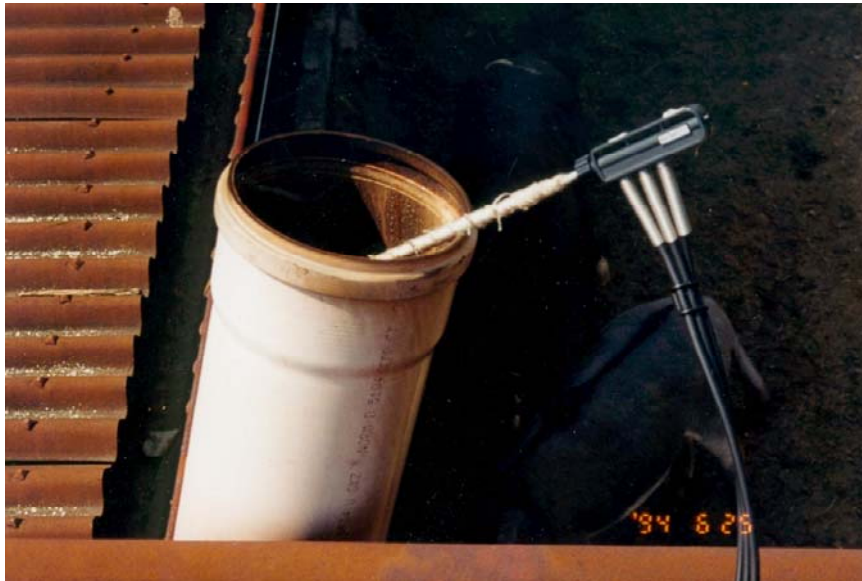


Abbildung 56: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 1 (Foto vom 27.07.2001)

5.2.2 Betrieb 2 (22 kW_{el.} Zündstrahler)

Betrieb 2 ist ein Futterbaubetrieb mit 57 ha. Die Biogasanlage wurde 1996 errichtet und im Jahr 2000 erweitert. Die Anlage arbeitet im einstufigen Verfahren bei einer Gärtemperatur von 40°C. Als Verweilzeit werden 100 Tage genannt. Der Fermenter wird zweimal am Tag mit etwa 6,5 m³ Material aus einer offenen Vorgrube von 30 m³ Volumen beschickt. Die Anlage verarbeitet insgesamt 3500 m³/a Wirtschaftsdünger und 1000 m³ Co-Fermentate in einem zylindrischen Betonfermenter mit einem Fassungsvermögen von 870 m³ mechanischem Rührwerk. Die Beheizung erfolgt über einen Wärmetauscher. Der Gärrest gelangt in ein nicht abgedecktes Endlager mit 350 m³ Fassungsvermögen. Die landwirtschaftliche Ausbringung des Gärrückstandes wird mit der Prallteller-Technik durchgeführt. Die Speicherung des produzierten Gases erfolgt in einem Gassack aus PE-Folie von 80 m³ Größe. Das Gas wird entwässert und durch Einblasen von Luft entschwefelt.

Die bei der Verstromung des Biogases anfallende Wärme in den BHKW wird zur Wohnhaus- und Stallbeheizung verwendet. Die Gesamtmenge an erzeugtem Strom liegt bei etwa 350.000 kWh/a. Auf dem Betrieb sind insgesamt drei Motoren im Einsatz. Der Hauptmotor ist ein 75 kW_{el.}-Gas-Otto-Motor aus dem Jahr 2001 und läuft ca. 8000 h/a. Ein zweiter Gasmotor des Baujahrs 1996 mit einer Leistung von 22 kW_{el.} läuft nur noch ca. 100 h/a. Das zu messende Aggregat ist ein 22 kW_{el.}- Zündstrahlmotor (Baujahr 1996), welcher ebenfalls nur noch 100 h/a in Betrieb ist. Der Zündölanteil beträgt etwa 15 %. Ein Katalysator zur Abgasreinigung ist nicht vorhanden. Die Vorlauftemperatur des Heizwasserkreislaufes beträgt

etwa 80 °C, die Rücklauf­temperatur schwankte während der Messungen zwischen 72 °C im Sommer und 46 °C am kältesten Messtag.

5.2.3 Betrieb 3 (50 kW_{el.} Zündstrahler)

Die Biogasanlage auf Betrieb 3, einem Futterbaubetrieb mit 33 ha, wurde 1996 errichtet und im Jahr 1997 erweitert. Auch diese Anlage arbeitet im einstufigen Verfahren. Die Gärtemperatur liegt bei 40°C und die Verweilzeit des Substrates im Fermenter beträgt 85 Tage. Die Beschickung des Fermenters erfolgt durch eine einmalige Zugabe von etwa 5 m³ Substrat pro Tag. Die Anlage besitzt eine geschlossene Vorgrube mit 10 m³ Volumen. Da in dieser Anlage Speisereste verwertet werden, ist eine thermische Vorbehandlungseinrichtung vorhanden, um krankheitserregende Keime abzutöten. Als Inputmaterial dienen etwa 1700 m³ Rindergülle pro Jahr als Grundsubstrat. Dieses wird durch Rasenschnitt, Speisereste und Pülpe in einer Gesamtmenge von etwa 300 m³ ergänzt. Der stehende, zylindrische Betonfermenter mit Betondecke und einem Volumen von 450 m³ verfügt über ein mechanisches Rührwerk wird mittels Fußbodenheizung beheizt. Der Gärrest wird in einem 900 m³ großen, abgedeckten Endlager gelagert und auf landwirtschaftliche Flächen bodennah ausgebracht. Das erzeugte Gas wird entwässert, entschwefelt und in einem gebrauchten Öltank von 80 m³ Volumen gespeichert.

Die Verwertung des Biogases im BHKW ergibt einerseits Erlöse durch Verstromung, andererseits kann die anfallende Wärme zum Beheizen des dem Betrieb zugehörigen Hotels mit Gaststätte verwertet werden. Es sind zwei Aggregate vorhanden. Das eine stammt aus der Erweiterung 1997 und hat eine Leistung von 30 kW_{el.} Der untersuchte Motor hat eine Leistung von 50 kW_{el.}, besitzt 4 Zylinder und einen Hubraum von 4,6 l (Hochreiter, 2002). Der Zündölanteil wird mit 30 % bis maximal sogar 60 % angegeben. Die jährliche Betriebsdauer beträgt etwa 4000 Stunden bei Ausfallzeiten von ca. 150 h/a. Bisher wurden keine Emissionsmessungen an diesem Aggregat vorgenommen und ein Katalysator zur Abgasreinigung ist nicht installiert. Die Vor- und Rücklauf­temperaturen werden mit 65 °C bzw. 55 °C. Bei diesem Betrieb wurde für die Abgasmessungen ein Aufsatz am Kamin angebracht, der es ermöglichte, die Sonde direkt in die Mitte des Abgasstromes zu bringen (Abbildung 57).



Abbildung 57: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 3 (Foto vom 02.10.2001)

5.2.4 Betrieb 4 (80 kW_{el.} Zündstrahler)

Diese Anlage wurde im Jahr 2000 errichtet und 2001 erweitert. Betrieben wird sie nicht von einem landwirtschaftlichen Betrieb, aber Futterbaubetriebe der Umgebung liefern ihre Gülle zur Fermentation als Grundsubstrat an. Im Gegensatz zu den anderen Anlagen wird hier das zweistufige Verfahren angewendet, d. h. Hydrolyse und Methanbildung laufen räumlich getrennt ab. Die Gärtemperatur beträgt 37°C und die Verweilzeit des Substrates im Fermenter 35 Tage. Die Beschickung des Fermenters erfolgt quasi-kontinuierlich mit stündlich 1 m³ zugegebenem Material aus einer 50 m³ fassenden Vorgrube. Bei dieser Anlage ist eine automatische Störstoffabscheidung vorhanden, die auf dem Prinzip der Schwimmtrennung beruht. Jährlich gelangen etwa 2500 m³ Rindergülle in die Anlage. Zusätzlich werden etwa 6000 t/a Speisereste, Fettabscheiderrückstände und überlagerte Lebensmittel kofermentiert. Zur Hygienisierung erfolgt eine thermische Nachbehandlung des Substrates. Es sind zwei Fermenter mit einem Gesamtvolumen von 1210 m³ im Einsatz. Auch hier findet das häufig anzutreffende Bauprinzip stehender, abgedeckter, zylindrischer Betonfermenter mit mechanischem Rührwerk sowie Fußboden- und Wandheizung Anwendung. Die Fermenter werden kontinuierlich gerührt. Der Gärrest wird in einem abgedeckten Endlager von 400 m³ Größe gespeichert und anschließend, anders als bei den anderen Anlagen, der Kompostierung zugeführt. Die landwirtschaftliche Ausbringung erfolgt mit Streuwagen auf landwirtschaftliche Flächen. Das produzierte Gas wird in einem Gassack von 50 m³ Inhalt gespeichert. Vor der Verbrennung wird das Gas entwässert und entschwefelt. Die Entschwefelung beruhte ursprünglich, wie in der Praxis üblich, auf dem Prinzip der biologischen Entschwefelung durch Einblasen von Luft. Während des Messzeitraumes wurde jedoch versuchsweise auf Entschwefelung durch Ausfällung mit Eisenchlorid umgestellt.

Die im BHKW anfallende Wärme wird zur Wohnhaus- und Bürobeheizung sowie zur Hygienisierung verwendet. Jährlich werden etwa 1.000.000 kWh Strom produziert. Es sind zwei baugleiche Aggregate von 80 kW_{el.} (Baujahr 2000) vorhanden, die beide nach dem Zündstrahlprinzip arbeiten. Ein Katalysator ist nicht vorhanden. Der Zündölanteil beträgt etwa 9 %. Untersucht wurde das im Zuge der Erweiterung neu installierte Aggregat, da dessen Kamin speziell für die Messungen mit einer entsprechenden Bohrung ausgestattet wurde. Die Sonde konnte somit ideal in den Abgasstrom gebracht werden. Der gemessene Motor ist ein 80 kW_{el.}-Aggregat von Perkins. Der elektrische Wirkungsgrad ist mit 36 % angegeben, der thermische Wirkungsgrad mit 48 %. Bei Volllast verbraucht dieser Motor bei einem Methangehalt im Biogas von 65 % 31 m³ Biogas pro Stunde. Der Zündölverbrauch liegt bei 2,2 l/h (Schnell 2000). Die Anordnung der Abgas-Messsonde am Kamin des untersuchten BHKW-Moduls zeigt (Abbildung 58).



Abbildung 58: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 4 (Foto vom 29.08.2001)

5.2.5 Betrieb 5 (132 kW_{el}, Zündstrahler)

Bei Betrieb 5 handelt es sich um einen Futterbaubetrieb von 45 ha Fläche. Die Biogasanlage wurde 1996 errichtet und 1999 erweitert. Wie die meisten landwirtschaftlichen Anlagen arbeitet sie nach dem einstufigen Verfahren. Die Gärtemperatur beträgt 45°C und die Verweilzeit 50 Tage. Die Anlage wird einmal am Tag beschickt. Insgesamt gelangen etwa 1800 m³/a Rindergülle in den Fermenter, zusätzlich werden insgesamt etwa 1000 t/a Brotabfälle und Maissilage kofermentiert. Das Material wird in einer 12 m³ großen, offenen Vorgrube angenommen. Störstoffe wie Plastikfolien in den angelieferten Brotabfällen werden manuell entfernt. Es sind drei Fermenter mit einem Gesamtvolumen von 1650 m³ in Betrieb. Die Bauweise entspricht auch hier wieder stehenden, abgedeckten, zylindrischen Betonfermentern mit mechanischen Rührwerken und Fußboden- und Wandheizung. Ein abgedecktes Endlager von 1200 m³ Größe nimmt das ausgefaulte Substrat auf, bevor es mit bodennaher Ausbringtechnik auf landwirtschaftliche Flächen verteilt wird. Der Gasspeicher besteht aus einem PE-Gassack mit einem Fassungsvermögen von 150 m³. Das Gas wird entwässert und biologisch entschwefelt.

Die jährlich produzierte Strommenge liegt bei 800.000 kWh. Die in den BHKW produzierte Wärme wird in zwei Wohnhäusern und dem Kälberstall genutzt. Auf dem Betrieb sind zwei Zündstrahlaggregate vorhanden. Das ältere Modul aus dem Jahr 1996 hat eine elektrische Leistung von 32 kW. Der elektrische Wirkungsgrad ist mit 32 % angegeben, die jährliche Laufzeit mit 8400 h/a. Der zu messende Motor hat eine Leistung von 132 kW_{el}. Dieses Aggregat stammt aus dem Jahr 1999 und wurde gebraucht aus einem ausgedientem Nutzfahrzeug entnommen. Auch hier ist ein elektrischer Wirkungsgrad von 32 % angegeben

sowie eine jährliche Laufzeit von 8400 Stunden. Der Zündölanteil fällt mit etwa 5 % relativ gering aus. Die Vorlauftemperatur lag während der Messperiode bei etwa 80 °C, die Rücklauftemperatur bei 70 °C. Die Anordnung der Abgas-Messsonde am Betonkamin von Betrieb 5 zeigt Abbildung 59.



Abbildung 59: Anordnung der Abgas-Messsonde auf Betrieb 5 (Foto vom 09.10.2001)

Tabelle 14: Zusammenstellung von Daten zu den untersuchten Biogas-Motoren

Standort	Betrieb 1	Betrieb 2	Betrieb 3	Betrieb 4	Betrieb 5
Motortyp	Gas-Otto	Zündstrahl	Zündstrahl	Zündstrahl	Zündstrahl
Hersteller	Opel	IVECO	Ford	Perkins	MAN
Baujahr	1993	1996	k. A.*	2000	1999
Zylinderzahl	4	3	4	6	6
Hubraum [l]	2,0	2,9	4,6	6,0	12,0
El. Leistung [kW]	13	22	55	80	132
Nenndrehzahl [U/min]	1500	1500	1500	1500	k. A.*
Verdichtungsverhältnis	k. A.*	17:1	k. A.*	16:1	15:1
Zündölanteil [%]	-	15	30-60	9	5
Elektrischer Wirkungsgrad [%]	20	k. A.*	k. A.*	36	32
Thermischer Wirkungsgrad [%]	50	k. A.*	k. A.*	48	k. A.*
Abgaskatalysator	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein

*) k. A. = keine Angabe

Quelle: Informationen der Anlagenbetreiber/-hersteller; Hochreiter 2002; IVECO AIFO 1990; MAN 2002; PERKINS, 2000; Schnell 2000

5.3 Messinstrumente

Zur Durchführung der Messungen wurden zwei Messgeräte benutzt. Das Kaminkehrermessgerät TESTO 350 diente der Erfassung gasförmiger Emissionen. Das ANSYCO GA 94 –Messgerät wurde zur Ermittlung der Biogaszusammensetzung eingesetzt.

5.3.1 Abgasanalysegerät TESTO 350

Das TESTO 350 ist ein tragbares Abgasanalysegerät für den mobilen Einsatz (Messbox: 294 x 163 x 158 mm, Gewicht: 2,8 kg; Handgerät zur Steuerung: 197 x 55 x 45 mm, Gewicht: 0,24 kg). Die zulässige Gerätetemperatur, ist mit + 4 bis + 40 °C angegeben. Eine begonnene Wintermessung bei Minusgraden führte zum Versagen des Gerätes und musste wiederholt werden.

Die eigentliche Analyse des Gases erfolgt in den Messzellen der Messbox. Messbereiche, Auflösungen und Messverfahren der einzelnen Zellen sind Tabelle 15 bis Tabelle 19 zu entnehmen.

Tabelle 15: Angaben zur CO-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...10000 ppm
Genauigkeit	< 5 ppm (bis 100 ppm), < 5 % vom Messwert (> 100 ppm)
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	elektrochemische Messzelle

Im Praxisbetrieb lag die Einstellzeit des CO-Wertes mit zwei bis drei Minuten deutlich höher als angegeben. Der Messbereich der CO-Zellen reicht zwar bis 10000 ppm, es wird jedoch ausdrücklich in der Betriebsanleitung darauf hingewiesen, dass die Messzellen bei zu hohen Konzentrationen zerstört werden. Da im Rahmen dieser Arbeit keine punktuellen, sondern Tagesmessungen vorgenommen werden, ist die Belastung der CO-Zellen entsprechend hoch. Die Abschaltgrenze ist werkseitig mit 2500 ppm festgelegt. Bei Überschreiten dieses Wertes wird die CO-Messzelle aus dem Gasweg getrennt und mit Frischluft gespült. Sinkt die CO-Konzentration in der Zelle wieder auf unter 30 % der Abschaltgrenze, nimmt sie die Abgasmessung wieder auf. Da sich bei anfänglichen Probemessungen herausstellte, dass dieser Messwert im BHKW-Abgas schnell erreicht wird, wurde die Abschaltgrenze nach Rücksprache mit der Firma TESTO auf 3000 ppm erhöht.

Tabelle 16: Angaben zur NO-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...3000 ppm
Genauigkeit	< 5 ppm (bis 100 ppm), < 5 % vom Messwert (> 100 ppm)
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	elektrochemische Messzelle

Tabelle 17: Angaben zur NO₂-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...500 ppm
Genauigkeit	< 5 ppm (bis 100 ppm), < 5 % vom Messwert (> 100 ppm)
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	elektrochemische Messzelle

Tabelle 18: Angaben zur NO_x-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...3000 ppm
Genauigkeit	< 7 ppm (bis 100 ppm), < 7 % vom Messwert (> 100 ppm)
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	Addition von NO- und NO ₂ -Wert

Tabelle 19: Angaben zur SO₂-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...5000 ppm
Genauigkeit	< 5 ppm (bis 100 ppm), < 5 % vom Messwert (> 100 ppm)
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	elektrochemische Messzelle

Tabelle 20: Angaben zur O₂-Messung (TESTO 350)

Messbereich	0...25 Vol.-%
Genauigkeit	< 0,8 Vol.-% vom Messwert
Auflösung	1 ppm
Einstellzeit	ca. 40 Sekunden
Messverfahren	elektrochemische Messzelle

Die Messsonde zur Gasaufnahme besitzt einen Durchmesser von 8 mm. Durch einen am vorderen Ende angebrachten Filter erweitert sich der Durchmesser jedoch auf ca. 17 mm, so dass gegebenenfalls am Kamin anzubringende Bohrungen mit 20 mm angesetzt wurden. Die Sonde ist mit einem Thermoelement NiCr-Ni Typ K nach DIN ausgestattet und hat einen Messbereich von -40°C bis +1200°C. Die Genauigkeit beträgt 0,5°C bei Temperaturen von 0-100°C bzw. 0,5 % des Messwertes bei Temperaturen oberhalb von 100°C. Bis 1000°C beträgt die Auflösung 0,1°C. Die Länge der Sonde ist so bemessen, dass eine Eintauchtiefe in den Kamin von maximal 39,5 cm möglich ist. Die Kabel zur Gasabführung in die Messbox haben eine Länge von 2,20 m.

Das Messgerät verlangt zum Betrieb die Angabe des verwendeten Brennstoffes. Die entsprechenden Parameter sind im Messgerät gespeichert und werden zur Berechnung von Größen herangezogen, welche vom TESTO-Gerät nicht gemessen werden. Da werkseitig für den Brennstoff „Biogas“ keine Parameter voreingestellt sind, wurden vom Messgerätehersteller die einzugebenden Parameter für Biogas mit 45 %, 60 % und 75 % Methangehalt angefordert und für den Praxisbetrieb folgendermaßen vorgegangen:

Der Methangehalt des zu verbrennenden Biogases wurde am Messtag mit dem ANSYCO-Gerät ermittelt. Je nachdem, ob sich der gemessene Methangehalt näher an 45 % oder an 60 % befand, wurde die entsprechende Einstellung übernommen. Die Entscheidung der Brennstoffwahl beruht rein auf dem jeweiligen Methangehalt, ohne Rücksicht auf gegebenenfalls zusätzlich eingebrachtes Zündöl. Geräteparameter zu entsprechenden Gemischen liegen auch nicht vor. Konnte der Methangehalt aufgrund eines Ausfalls des Methanmessgerätes nicht ermittelt werden, so wurde die Brennstoffeinstellung der vorangegangenen Messung übernommen.

Um die Auswirkung dieser Einstellung besser beurteilen zu können, wurde vor Beginn der eigentlichen Messreihen eine Probemessung durchgeführt. Hierbei handelte es sich um kurz hintereinander durchgeführte Messungen am selben Motor, betrieben mit dem gleichen Gas; nur die Brennstoffeinstellung wurde verändert. Die Brennstoffeinstellung hatte auf die für diese Arbeit wichtigsten Größen der gemessenen Schadgase keinen nennenswerten Einfluss (Tabelle 21). Die geringfügigen Abweichungen können von zufälligen Schwankungen herrühren. Deutliche Auswirkungen zeigen sich aber bei den Werten der Kohlendioxidkonzentration, da dieser Wert eine vom TESTO-Gerät nach folgender Gleichung berechnete Größe ist:

$$CO_2 = \frac{CO_{2,max} \cdot (21 - O_2)}{21}$$

$CO_{2,max}$: brennstoffspezifischer maximaler CO_2 -Wert

21: Sauerstoffgehalt der Luft (Vol.-%)

O_2 : gemessener Sauerstoffgehalt

Tabelle 21: Mittelwerte der Messungen an Biogas bei verschiedener Brennstoffeinstellung des Messgerätes unter sonst gleichen Bedingungen

Messgröße	Einheit	Biogas	
		4	7
CO	ppm	2130,4	2196,2
NO	ppm	64,5	62,6
NO ₂	ppm	17,9	18,6
NO _x	ppm	82,4	81,2
SO ₂	ppm	0,0	0,2
O ₂	Vol.-%	12,9	13,1
CO ₂	Vol.-%	5,8	7,9

Weitere berechnete Werte sind der Abgasverlust q_A und die Luftverhältniszahl λ :

$$q_A = [(AT - VT) \cdot \left[\frac{A_2}{21 - O_2} + B \right]] - K_K$$

AT: Abgastemperatur

VT: Verbrennungslufttemperatur

A₂: brennstoffspezifischer Faktor

B: brennstoffspezifischer Faktor

K_K: Kondensationsfaktor

21: Sauerstoffgehalt der Luft

O₂: gemessener Sauerstoffgehalt

$$\lambda = \frac{CO_{2,\max}}{CO_2}$$

CO_{2,max}: brennstoffspezifischer maximaler CO₂-Wert
 CO₂: berechneter CO₂-Wert

Die Temperatur der Umgebungsluft am Messtag wurde ebenfalls mit dem TESTO-Messgerät ermittelt. Hierzu wird vor Beginn der ersten Messung Frischluft anstatt Abgas gemessen und gewartet, bis sich ein Messwert der Anzeige „Abgastemperatur“ eingestellt hatte.

5.3.2 ANSYCO GA 94

Das Messgerät ANSYCO GA 94 dient zur begleitenden Bestimmung der Biogasqualität, bevor dieses im Motor verbrannt wird. Es handelt sich um ein tragbares, batteriebetriebenes Gerät (Abmessungen: 21 x 22 x 5 cm; Gewicht: 2,1 kg), welches den Gehalt an Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff messen kann. Der zulässige Betriebsbereich liegt zwischen 0°C und 40°C. Angaben zu den einzelnen Messparametern sind in Tabelle 22 bis Tabelle 24 zu finden.

Tabelle 22: Angaben zur CH₄-Messung (ANSYCO GA 94)

Messbereich	0...100 Vol.-%
Genauigkeit	± 0,5 % (bei 0–5 Vol.-%), ± 1,0 % (bei 5–15 Vol.-%), ± 3,0 % (bei 15–100 Vol.-%)
Messverfahren	Wellenlängen

Tabelle 23: Angaben zur CO₂-Messung (ANSYCO GA 94)

Messbereich	0...50 Vol.-%
Genauigkeit	± 0,5 % (bei 0–5 Vol.-%), ± 1,0 % (bei 5–15 Vol.-%), ± 3,0 % (bei 15–100 Vol.-%)
Messverfahren	Infrarotabsorption bei selektiven Wellenlängen

Tabelle 24: Angaben zur O₂-Messung (ANSYCO GA 94)

Messbereich	0...21 Vol.-%
Genauigkeit	± 1,0 % (bei 0–5 Vol.-%), ± 1,0 % (bei 5–15 Vol.-%); ± 3,0 % (bei 15–100 Vol.-%)
Messverfahren	Elektrochemische Zelle

5.4 Datenverarbeitung und Auswertung

Zu Beginn lag von jeder Einzelmessung eines Messtages eine ASCII-Rohdatei vor. Diese Dateien, je nach Anzahl der Einzelmessungen pro Tag fünf bis sieben Stück, wurden in das Tabellenkalkulationsprogramm MS Excel importiert. Die Daten wurden dazu in eine speziell für diesen Zweck angelegte Vorlage abgelegt. Diese Vorlage enthält eine schriftlich fixierte Vorgehensweise zur weiteren Behandlung der Daten und einige programmierte Makros, um so eine Gleichbehandlung aller Messreihen über den gesamten Messzeitraum zu gewährleisten. Nach dem Import der ASCII-Rohdaten der Messungen in diese Vorlage wurden sämtliche erfassten Daten eines Messtages in einer einzigen Datei übersichtlich gesammelt und konnten komfortabel weiter bearbeitet werden.

Bei Betrachtung der Rohdaten stellte sich heraus, dass sich ein Messwert erst nach einer gewissen Zeit stabilisierte, bis sich die Konzentration in der Messeinheit der Konzentration der Probeluft angepasst hatte. Dieses gilt im Besonderen für die CO-Werte, wo bis zur Einstellung eines stabilen Messwertes bis zu drei Minuten vergingen. Ein Einstellen des Messwertes für die Abgastemperatur kann insbesondere bei sehr heißen Abgasen noch viel länger dauern. Da diese offensichtlich zu niedrigen Startmesswerte nicht in die späteren Berechnungen eingehen sollten, wurden sie entfernt (Bsp. CO: Die ersten drei Messwerte wurden auf jeden Fall verworfen, weitere wurden verworfen, bis die Differenz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messwerten ≤ 0 ppm war.).

Wurde am Messtag der Messbereich des Messgerätes nach oben durchbrochen, so ist dieses in den Ergebnistabellen durch einen nach oben offenen Balken symbolisiert. In diesen Fällen wurde als Messwert 3000 ppm eingesetzt. Dieses entspricht der oberen Abschaltgrenze des Messgerätes. Auf diese Weise erhält man zumindest einen Mindestwert, wobei der tatsächliche Wert über dem angegebenen Mittel- bzw. Mindestwert liegt. Dieser tatsächliche Wert ist jedoch mit der vorhandenen Messtechnik nicht exakt zu bestimmen.

Das Messgerät wurde während der ersten Messreihe nach Messung an zwei Betrieben aufgrund von Funktionsstörungen an den Hersteller eingeschickt. Daraufhin wurde u.a. die SO₂-Messzelle ausgetauscht. Die zuvor ermittelten Daten wichen extrem von denen späterer Messungen nach dem Auswechseln der Messzelle ab. Somit muss davon ausgegangen werden, dass diese Daten aufgrund des Defekts an der Messzelle unbrauchbar sind, so dass sie daraufhin komplett verworfen wurden.

Die Grenzwerte der TA-Luft sind in der Einheit „mg/m³“ angegeben. Gemessen wurde in der Einheit „ppm“, um wie oben beschrieben die Messwerte der Größe NO zu erhalten sowie einen Überblick über die Emissionen in Volumenanteilen zu bekommen. Somit müssen die gemessenen Werte umgerechnet und aufgrund der verschiedenen Gaszustände auf einen gemeinsamen Nenner gebracht werden. Erst dann kann ein Vergleich der Werte miteinander und gegenüber den Grenzwerten der TA-Luft vorgenommen werden. Die Grundlage für diese Umrechnung gibt die TA-Luft für Grenzwertangaben, welche auf den Sauerstoffgehalt im Abgas bezogen sind, folgendermaßen vor (Anon. 2001):

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

Es bedeuten hier:

E_M gemessene Massenkonzentration im Abgas

E_B Massenkonzentration bezogen auf den Bezugssauerstoffgehalt

O_M gemessener Sauerstoffgehalt
 O_B Bezugssauerstoffgehalt

Der Bezugssauerstoffgehalt ist für die relevanten Grenzwerte in der TA-Luft mit 5 Vol.-% angegeben. Die diskutierten Grenzwerte gelten auf Basis dieses Bezugssauerstoffgehalts. Die Massenkonzentration kann nach der folgenden Formel ermittelt werden (nach Bank 2000, S. 439):

$$E_M \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{\text{Molmasse} \left[\frac{g}{mol} \right]}{\text{Molvolumen} \left[\frac{l}{mol} \right]} * E_V [ppm]$$

E_V stellt hier die gemessene Volumenkonzentration in ppm dar. Diese Konzentration wird mit einem Faktor multipliziert, der sich aus Molmasse und Molvolumen des jeweiligen Gases ergibt. Der Faktor ergibt sich durch Einsetzen der Molmasse und des molaren Gasvolumens von 22,4 l/mol (bei Normbedingungen: $\vartheta = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013 \text{ mbar}$), z. B. für das Gas NO_2 :

$$\frac{46 \frac{g}{mol}}{22,4 \frac{l}{mol}} = 2,05 \frac{g}{l} = 2,05 \frac{mg}{ml}$$

Das TESTO-Messgerät rechnet bei Anzeige von Werten in mg/m^3 ebenfalls auf dieser Berechnungsgrundlage. Dieses wurde durch kurzzeitige Messungen, wobei jeweils abwechselnd in ppm und mg/m^3 gemessen und in die andere Einheit umgerechnet wurde, nachgeprüft. Die entsprechenden Umrechnungsfaktoren können bis auf den Faktor für NO der Bedienungsanleitung entnommen werden und sind in Tabelle 25 aufgelistet.

Tabelle 25: Molgewicht und Moldichte der zu messenden Schadgase (Quelle: TESTO 2000 und eigene Berechnung)

Messgröße	Molmasse [g/mol]	Moldichte [mg/ml]
CO	28	1,25
NO	30	1,34
NO ₂	46	2,05
SO ₂	64	2,93

Somit lautet die Gesamtformel zur Umrechnung für das Beispiel der Umrechnung des NO_2 -ppm-Wertes in den entsprechenden mg/m^3 -Wert folgendermaßen:

$$\text{NO}_2 \left[\frac{mg}{m^3} \right] = \frac{21 - 5}{21 - O_M} * \text{NO}_{2, \text{ gemessen}} [ppm = \frac{ml}{m^3}] * 2,05 \left[\frac{mg}{ml} \right]$$

In die obige Formel geht nur noch der gemessene ppm-Wert sowie die aktuell zu diesem Zeitpunkt im Abgas herrschende O_2 -Konzentration (O_M) ein. Dieses Verfahren wird für jeden ppm-Wert von CO, NO und SO_2 in der Zeitreihe durchgeführt und man erhält die entsprechenden Wertereihen in den geforderten mg/m^3 -Werten. NO_x wird auf Basis von NO_2 angegeben: die ppm-Werte von NO und NO_2 werden addiert und die Summe mit dem Faktor 2,05 umgerechnet. Hieraus erklärt sich die Tatsache, dass ein Aufaddieren der in den

Ergebnistabellen angegeben NO- und NO₂-mg/m³-Werte nicht den NO_x-Wert ergibt, da die Einzelwerte für sich betrachtet und mit dem jeweils zugehörigen Faktor umgerechnet werden.

Aus den Messwerten jeder Einzelmessung wurden zunächst die Startdaten entfernt und anschließend die oben beschriebenen Umrechnungen durchgeführt. Jeder Datensatz ist durch die Nummer der Messreihe, des Betriebes, der Einzelmessung und der Uhrzeit eindeutig definiert. Alle Datensätze wurden zur weiteren Auswertung in einer Gesamtdatei in MS Excel zusammengefasst.

Die Auswertung der bearbeiteten Daten erfolgte mit dem Statistik-Programmpaket SPSS 10.0 für MS Windows. Die angewandten Methoden belaufen sich im Wesentlichen auf deskriptive Statistiken, um Mittelwerte und Verteilungen der Datenreihen zu analysieren. Des Weiteren dient die zweifaktorielle Varianzanalyse mit den unabhängigen Größen Messreihe und Betrieb sowie den Emissionswerten als abhängige Größen zur Prüfung auf Mittelwertunterschiede. Werden nur die Emissionswerte eines Betriebes verglichen, findet eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der unabhängigen Größe Messreihe und der abhängigen Größe Emissionswerte Anwendung. Durch multiple Mittelwertsvergleiche wird untersucht, auf welche Messreihen die vorher festgestellten Unterschiede zurückzuführen sind.

5.5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Abgasmessungen für die Messgrößen CO, NO_x und SO₂ sowie der weiteren Messgrößen dargestellt.

5.5.1 Gesamtüberblick

Die Verteilungen sämtlicher erfassten Größen sind unter Angabe von Minima, Maxima, Mittelwert und Standardabweichung nach Messreihe und Anlage gegliedert in Anhang A aufgeführt. In diesen Anhangstabellen ist auch die Anzahl der Einzelwerte aufgeführt, die jedem auf den folgenden Seiten angegebenen Mittelwert zugrunde liegen. Nach der wie oben beschriebenen Bearbeitung der mit dem TESTO-Gerät erhobenen Daten sind inklusive der ppm-Messwerte und umgerechneten mg/m³-Werte insgesamt 222.944 Einzelwerte in die Berechnungen eingegangen. Somit ergibt sich für den folgenden Gesamtüberblick, dass hinter jedem angegeben Mittelwert etwa 2970 Einzelwerte stehen. Bei der darauffolgenden näheren Differenzierung der einzelnen Messreihen für die verschiedenen Betriebe verbleiben etwa 740 Einzelwerte je angegebenem Mittelwert.

In Tabelle 26 sind die Mittelwerte der einzelnen Betriebe des gesamten Messzeitraumes zusammengefasst. Bei Betrieb 1 und 2 ist bezüglich des Kohlenmonoxids davon auszugehen, dass der Emissionswert höher als der angegebene Mittelwert ist, da bei diesen Anlagen zumindest zeitweise der Messbereich des Messgerätes nach oben überschritten wurde.

Die mittleren Kohlenmonoxid-Emissionen erreichen Werte von 1142 mg/m³ beim größten Aggregat bis hin zu nicht mehr messbaren höheren Werten von über 3350 mg/m³ bei den kleineren Motoren. Außer auf Betrieb 5 liegen alle Gesamtmittelwerte über dem in der TA-Luft (2001) festgesetzten Grenzwert von 2,0 g/m³ für Zündstrahl-Motoren bzw. 1,0 mg/m³ für Gas-Otto-Motoren.

Bei den NO_x-Emissionen liegen die Mittelwerte in einem Bereich von 687 mg/m³ bis hin zu 1719 mg/m³. Die beiden höchsten Werte von 1719 bzw. 1672 mg/m³ werden von denjenigen Aggregaten erreicht, bei denen die niedrigsten CO-Werte ermittelt wurden. Die Aufschlüsselung der NO_x-Werte in NO und NO₂ zeigt, dass der Hauptteil der Stickoxid-Emissionen den Abgaskamin in Form von NO verlässt.

Beim SO₂ sind die Maximalwerte ebenfalls bei den Anlagen zu finden, welche die höchsten NO_x-Emissionen aufweisen. Die Absolutbeträge liegen zwar allesamt unter den in der TA-Luft geforderten 0,35 g/m³, sind jedoch mit gewissen Unsicherheiten behaftet, wie unten diskutiert wird.

Der Sauerstoffgehalt im Abgas liegt zwischen 4,2 und 10 Vol.-%. Der sich dazu gegenläufig bewegende CO₂-Gehalt zwischen 8,8 und 15,8 Vol.-%. Analog dem Sauerstoffgehalt bewegt sich auch der λ-Wert zwischen 1,26 und 2,04.

Die Abgastemperatur ist von Betrieb zu Betrieb sehr unterschiedlich und reicht, im Mittel über die gesamte Messperiode gesehen, von durchschnittlich 50,6°C bis zu 307°C. Entsprechend der Abgastemperatur nehmen auch die Abgasverluste von 0,14 % auf 13,49 % zu.

Betrieb 4, der eines der größeren in der Praxis üblichen Aggregate betreibt, fällt mit relativ hohen CO-Werten bei extrem niedrigen NO_x- und SO₂-Emissionen auf. Auffällig ist hier

zudem das geringe Verhältnis von NO zu NO₂ im Abgas. Außerdem weist dieser Betrieb einen hohen λ -Wert und einen entsprechend hohen Sauerstoffgehalt im Abgas auf. Ein grafischer Gesamtüberblick der Emissionen von Kohlenmonoxid und Stickoxiden folgt in Abbildung 60 und Abbildung 61. In der Messreihe 3 ist die Messung am BHKW 1 wegen eines Defekts am Motor ausgefallen.

Wie zu sehen ist, hat eine abnehmende Außentemperatur, repräsentiert durch die Messreihen, offensichtlich keinen systematischen Einfluss auf das Abgasverhalten der Motoren. Während die CO-Konzentration bei Betrieb 5 kontinuierlich ansteigt, schwankt sie bei den anderen Betrieben in einem mehr oder weniger weiten Bereich. Auffallend ist jedoch, dass die CO-Emissionen mit steigender Motorleistung abnehmen. Dies ist sehr deutlich bei Messreihe 3 zu sehen. Auch bei den anderen Messreihen ist dieser Trend bis auf die Ausnahmewerte von Betrieb 4 zu erkennen. Die Stickoxidemissionen eines Betriebes schwanken innerhalb eines relativ engen Bereiches. Im Gegensatz zu den CO-Mittelwerten lässt sich kein Trend innerhalb einer Messreihe entlang der installierten Motorleistung ausmachen. Auffällig ist hier lediglich, dass Betrieb 3 und Betrieb 5 konstant die höchsten NO_x-Emissionen aufweisen.

Tabelle 26: Mittelwerte aus den Abgasmessungen der einzelnen Aggregate über den gesamten Messzeitraum

	Einheit	Betrieb 1 13 kW _{el.} GM	Betrieb 2 ZS	Betrieb 3 50 kW _{el.} ZS	Betrieb 4 80 kW ZS	Betrieb 5 132 kW _{el.} ZS
CO	mg/m ³	> 3354*	> 3549*	2511	3231	1142
NO	mg/m ³	618	708	1083	301	1062
NO ₂	mg/m ³	29	4	62	227	48
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	973	1086	1719	687	1672
SO ₂	mg/m ³	2	7	42	0	26
O ₂	Vol.-%	4,4	4,2	9,1	10,4	9,1
CO ₂	Vol.-%	15,8	14,2	10,2	8,8	10,1
Abgastemp.	°C	50,6	255,6	216,7	183,1	307,7
qA	%	0,14	10,24	10,46	8,70	13,49
λ	-	1,27	1,26	1,79	2,04	1,80

*) Messbereichsüberschreitung

Abkürzungen: GM = Gas-Otto-Motor, ZS = Zündstrahlmotor)

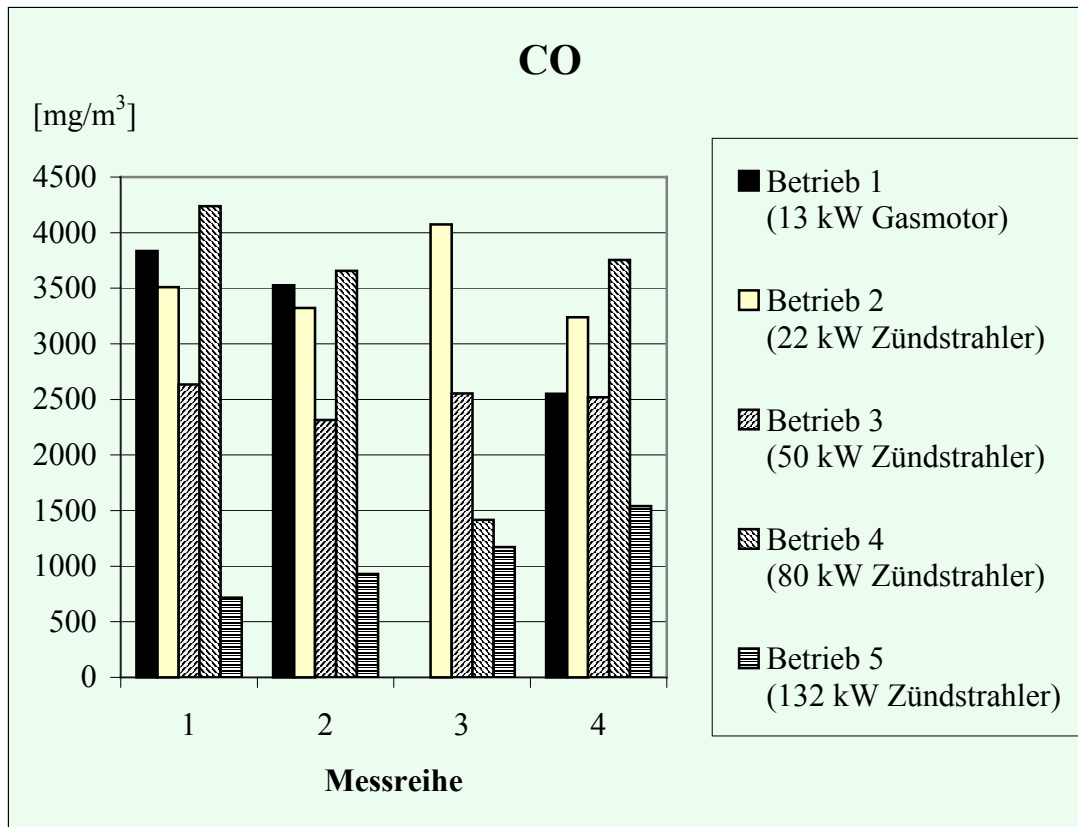


Abbildung 60: Mittlere CO-Emissionen aller Betriebe über alle Messreihen

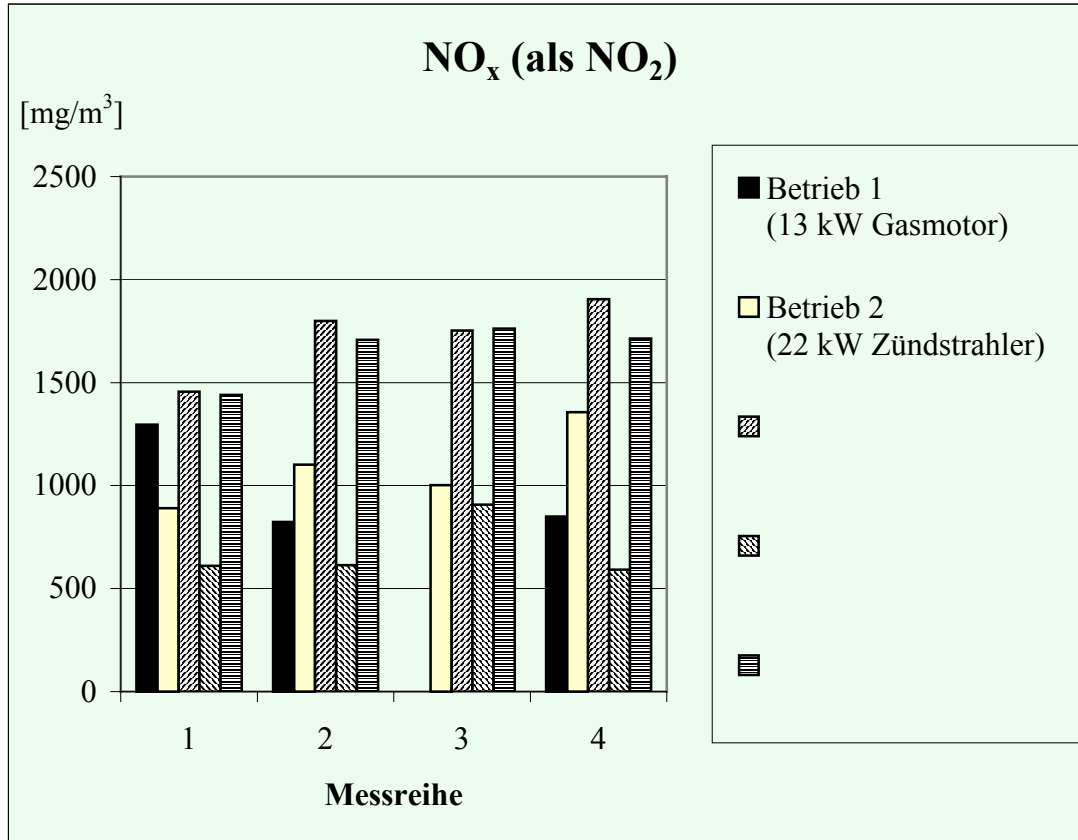


Abbildung 61: Mittlere NO_x-Emissionen (Angabe als NO₂) aller Betriebe über alle Messreihen

5.5.2 Einzelbetriebe im Zeitverlauf

Die Entwicklung der Emissionen der einzelnen Aggregate im Laufe des Messzeitraumes kann den folgenden Tabellen und Grafiken entnommen werden. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die Mittelwerte aller Einzelmessungen eines Gesamttagess. In den Diagrammen ist zusätzlich die Standardabweichung in den Balken eingetragen. Für weitere Daten wie Anzahl der eingegangenen Werte, ppm-Werte, Minima, Maxima und Standardabweichungen wird auf die Anhangstabellen hingewiesen.

5.5.2.1 Betrieb 1

Der Messzeitraum für Betrieb 1 erstreckte sich vom 27.07.01 bis zum 06.02.02. An diesem BHKW konnten wie erwähnt nur drei von vier Messreihen durchgeführt werden, da der Motor im Zeitraum der dritten geplanten Messreihe defekt war. Der durchschnittliche Methangehalt des Biogases beträgt über den gesamten Messzeitraum 48 Vol.-%. Die einzelnen Messwerte weichen nur geringfügig von diesem Wert ab (Tabelle 27).

Die CO-Emissionen übersteigen in den ersten Messreihen die Abschaltgrenze des Messgerätes von 3000 ppm. Um einen Mindestwert zu erhalten, werden diese 3000 ppm als Messwerte eingesetzt (Tabelle 28). Die unterschiedliche Angabe in mg/m^3 beruht darauf, dass der zu jedem Messzeitpunkt aktuelle Sauerstoffgehalt im Abgas mit in die Umrechnung einfließt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der CO-Ausstoß in der ersten Messreihe über 3835 mg/m^3 und in der zweiten Messreihe über 3527 mg/m^3 liegt. Alle Mittelwerte überschreiten deutlich den entsprechenden Grenzwert der TA-Luft für Fremdzündungsmotoren von $1,0 \text{ g/m}^3$.

Tabelle 27: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 1

	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
Datum		27.07.01	16.10.01	BHKW defekt!	06.02.02
CH ₄	Vol.-%	47	50		49
CO ₂	Vol.-%	38	39		43
O ₂	Vol.-%	1,4	2,5		0,9
Außentemp.	°C	39	21		15
Betriebsbed.		Volllast	Volllast		Volllast

Die NO_x-Emissionen variieren im gesamten Messzeitraum zwischen den Extremwerten 743 mg/m^3 und 5179 mg/m^3 . Letzterer hoher Wert kann jedoch als extremer Ausreißer betrachtet werden, denn die durchschnittliche Standardabweichung der einzelnen Messreihen liegt bei 137 mg/m^3 , wobei die erste Messreihe die ausgeprägtesten Schwankungen aufweist. Die Mittelwerte scheinen mit 824 mg/m^3 bis 1296 mg/m^3 den Anforderungen der TA-Luft ($0,50 \text{ g/m}^3$) für Fremdzündungsmotoren nicht zu genügen. Messreihe 1 zeigt ein insgesamt höheres Niveau der Messwerte. Die Messwerte für SO₂ wurden in der ersten Messreihe komplett gestrichen, da die Datenreihen ein sehr undurchsichtiges Bild aufwiesen und die SO₂-Messzelle kurz darauf überprüft wurde und ausgetauscht werden musste. Wie bei allen Anlagen liefern die angegebenen SO₂-Messwerte nur eine tendenzielle Aussage, da diese mit Unsicherheiten behaftet sind.

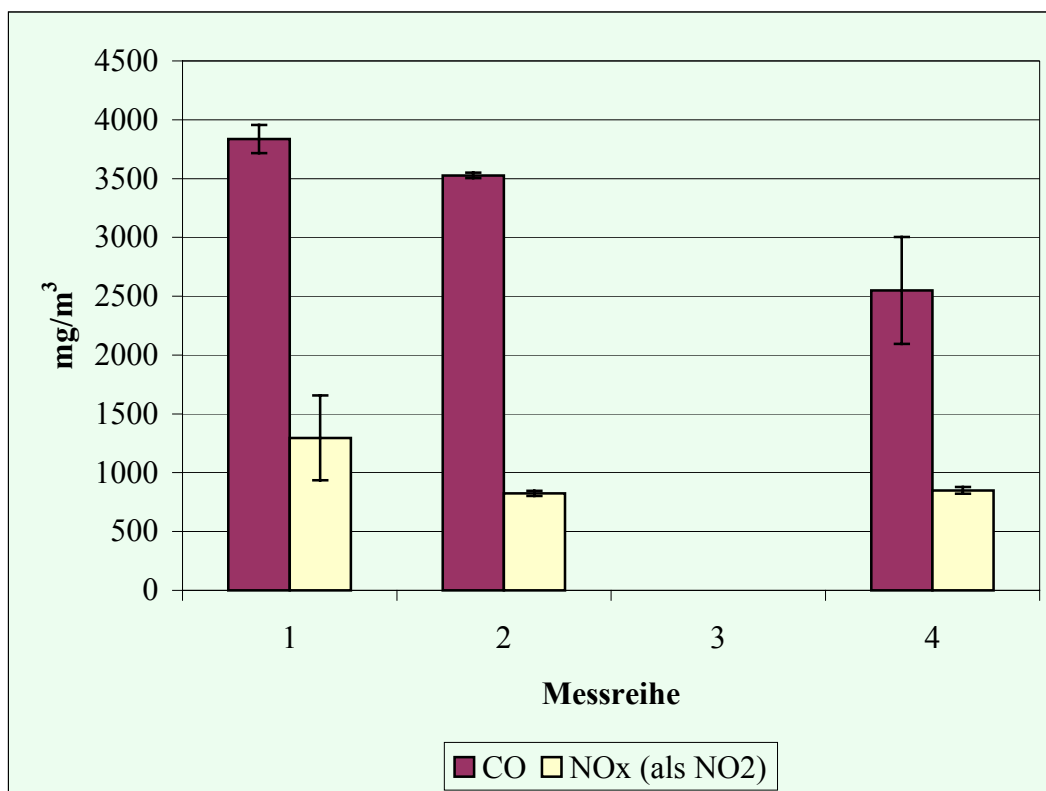
Die Abgastemperatur fällt mit ca. 50°C im Vergleich zu den anderen Betrieben sehr gering aus und wird im Lauf der Zeit sehr konstant gehalten. Das Minimum liegt im Gesamtzeitraum bei $46,3^\circ\text{C}$, die maximal gemessene Temperatur bei $54,9^\circ\text{C}$. Die Standardabweichungen fallen pro Messreihe mit $0,2^\circ\text{C}$ bis $1,2^\circ\text{C}$ sehr gering aus. Entsprechend gering sind hier auch

die jeweilig ermittelten Abgasverluste. Der λ -Wert schwankt auf Betrieb 1 im Gesamtzeitraum zwischen 1,19 und 1,47. In Abbildung 62 ist nochmals der Verlauf der relevanten Emissionen an CO und NO_x für die vier Messungen auf Betrieb 1 dargestellt. Zu erkennen ist das insgesamt höhere Niveau der ersten Messreihe. Detaillierte Angaben zu den Auswertungen sind Anhangstabelle 1 bis Anhangstabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 28: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 1

Messgröße	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
CO	mg/m ³	> 3836*	> 3527*	Keine Messung! BHKW defekt!	2550
NO	mg/m ³	819	524		541
NO ₂	mg/m ³	44	23		23
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	1296	824		850
SO ₂	mg/m ³	-	5		0
O ₂	Vol.-%	5,3	4,0		4,1
CO ₂	Vol.-%	13,1	17,0		16,9
Abgastemp.	°C	52,1	50,9		49,0
QA	%	0,57	0,45		-0,46
λ	-	1,34	1,23		1,24

*) Messbereichsüberschreitung

Abbildung 62: Darstellung der gemessenen CO- und NO_x-Emissionen für Betrieb 1

5.5.2.2 Betrieb 2

Die erste Messung auf Betrieb 2 fand am 30.08.01 statt, die letzte am 23.01.02. Der Methangehalt schwankt während der Versuchreihe zwischen 68 % und 61 %. Dies entspricht einem mittleren Methangehalt von 64 % (Tabelle 29). In den kälteren Monaten lässt die Gasqualität mit steigendem CO₂-Gehalt nach. Mit Außentemperaturen von 23°C bis 8°C wurde auf diesem Betrieb weder an extrem warmen Tagen noch an extrem kalten Tagen gemessen. Die Messung der Gasqualität konnte in der Messreihe 2 aufgrund eines Ausfalls des ANSYCO GA 94-Gerätes nicht erfolgen.

Tabelle 29: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 2

	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
Datum		30.08.01	17.10.01	21.11.01	23.01.02
CH ₄	Vol.-%	68	Akku- problem	63	61
CO ₂	Vol.-%	31		37	35
O ₂	Vol.-%	1		0,4	0,1
Außentemp.	°C	23	15	8	8
Betriebsbed.		Volllast	Volllast	Volllast	Volllast

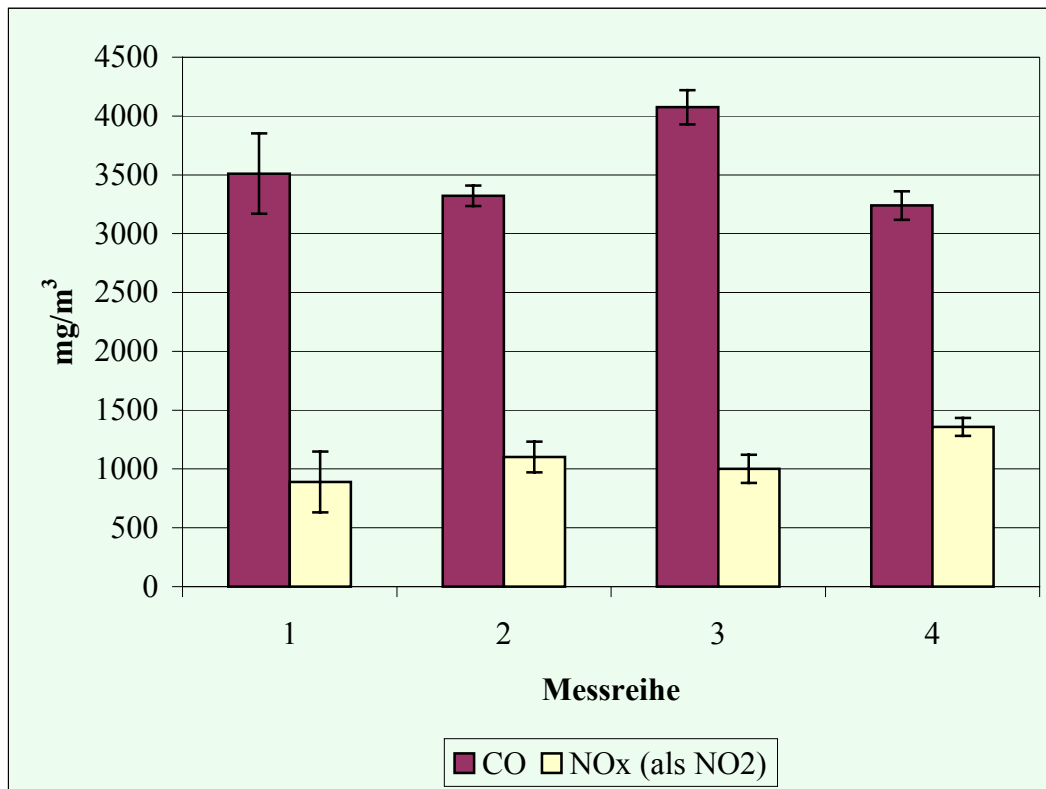
Wie auch bei Betrieb 1 kam es bei den CO-Messungen zur Überschreitung der Abschaltgrenzen des Messgerätes. Der NO_x-Gehalt des Abgases bewegt sich mal oberhalb, mal unterhalb des Grenzwertes der TA-Luft; die durchschnittliche Standardabweichung vom Mittelwert liegt über die verschiedenen Messreihen gesehen bei 146 mg/m³. SO₂ konnte mit der vorhandenen Messtechnik praktisch nur in der ersten Messreihe nachgewiesen werden.

Der mittlere Sauerstoffgehalt des Abgases zeigt sich auf sehr niedrigem Niveau vergleichsweise variabel zwischen 2,5 % und 6,3 %. Die Abgastemperatur erreicht Mittelwerte von 205°C bis 306°C, wobei die beiden letzten Messungen deutlich höhere Temperaturen anzeigen. Entsprechend der Abgastemperatur belaufen sich die Abgasverluste zwischen 7,4 % und 13,6 %. Der λ-Wert verhält sich wie der Sauerstoffgehalt und erreicht Werte von 1,13 bis 1,43. Tabelle 30 gibt sämtliche Mittelwerte der Messreihen wieder. Die CO- und NO_x-Emissionen sind in Abbildung 63 nochmals dargestellt. Hier ist deutlich das Schwanken der NO_x-Werte um den Grenzwert 1,0 g/m³ sowie das hohe Niveau der CO-Werte zu erkennen. Weitere Daten zu den Auswertungen der einzelnen Messreihen finden sich in Anhangstabelle 4 bis Anhangstabelle 7.

Tabelle 30: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 2

Messgröße	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
CO	mg/m ³	> 3511*	> 3323*	> 4074*	> 3240*
NO	mg/m ³	581	718	652	884
NO ₂	mg/m ³	2	3	5	5
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	890	1101	1002	1357
SO ₂	mg/m ³	28	0	0	0
O ₂	Vol.-%	4,8	2,9	6,3	2,5
CO ₂	Vol.-%	13,6	15,5	12,4	15,5
Abgastemp.	°C	209,6	204,5	299,6	305,6
qA	%	7,41	7,13	13,66	12,34
λ	-	1,31	1,16	1,43	1,13

*) Messbereichsüberschreitung

Abbildung 63: Darstellung der gemessenen CO- und NO_x-Emissionen für Betrieb 2

5.5.2.3 Betrieb 3

Die Messungen an Anlage 3 erstreckten sich vom 02.10.01 bis zum 25.01.02. Der festgestellte Methangehalt des Biogases schwankt mit Werten von 52 % bis 55 % um den Mittelwert von 54 % (Tabelle 31).

Tabelle 31: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 3

	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 1	Messreihe 3	Messreihe 4
Datum		02.10.01	24.10.01	27.11.01	25.01.02
CH ₄	Vol.-%	52	55	55	54
CO ₂	Vol.-%	42	38	39	38
O ₂	Vol.-%	0,4	0,3	1,5	1,5
Außentemp.	°C	27	20	4	6
Betriebsbed.		Volllast	Volllast	Volllast	Volllast

Im Gegensatz zu den BHKW niedriger Leistung tritt ab dieser Leistungsklasse kein Überschreiten der Abschaltgrenze des Messgerätes mehr auf. Somit kann für jede Messreihe ein konkreter Mittelwert der CO-Konzentration ermittelt werden. Die Tagesmittelwerte schwanken in einem Bereich um 2500 mg/m³. Dieses Niveau liegt deutlich über dem in der TA-Luft geforderten Wert von 2,0 g/m³. Die mittlere Standardabweichung der Messreihen liegt bei 191 mg/m³. Auch bei NO_x wird der Grenzwert von 1,0 g/m³ konstant überschritten. Die mittlere Standardabweichung beträgt ca. 71 mg/m³, d.h. die Einzelwerte schwanken in einem engen Bereich. Auch auf diesem Betrieb werden die SO₂-Messungen nicht für

aussagekräftig gehalten. Zu sehen ist nur, dass das Niveau der SO₂-Konzentration während der ersten Messreihe im Vergleich zu den anderen Reihen am höchsten erscheint.

Der Sauerstoffgehalt des Abgases reicht von durchschnittlich 8,2 % bis 10,7 %. Entsprechend bewegt sich der λ -Wert im Mittel in einem Bereich von 1,64 bis 2,10. Sauerstoffgehalt und λ -Wert liegen somit auf einem deutlich höheren Niveau als bei den BHKW geringerer Leistung. Entsprechend der Außentemperatur bewegt sich die Abgastemperatur zwischen 174°C am kältesten Tag und 272°C am wärmsten Tag. Die Abgasverluste liegen im Messreihenmittel bei 10,4 %. Tabelle 32 fasst die Mittelwerte der relevanten Größen jeder Messreihe zusammen. Abbildung 64 stellt den zeitlichen Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen dar. Ein genauer Überblick über die einzelnen Verteilungen findet sich in Anhangstabelle 8 bis Anhangstabelle 11.

Tabelle 32: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 3

Messgröße	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
CO	mg/m ³	2635	2314	2554	2520
NO	mg/m ³	950	1144	1073	1181
NO ₂	mg/m ³	4	49	111	98
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	1457	1800	1752	1905
SO ₂	mg/m ³	145	0	0	0
O ₂	Vol.-%	8,2	9,4	10,7	8,6
CO ₂	Vol.-%	10,7	9,7	9,8	10,4
Abgastemp.	°C	272,4	231,9	174,3	181,8
qA	%	9,75	10,47	10,02	11,50
λ	-	1,64	1,81	2,10	1,70

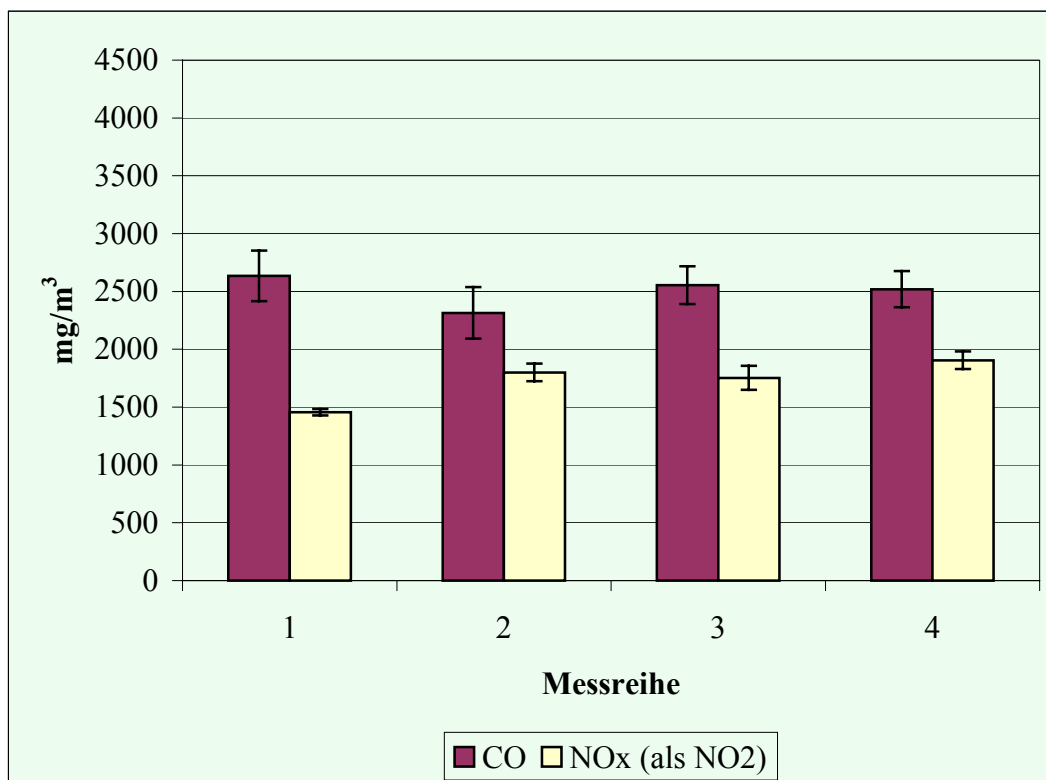


Abbildung 64: Darstellung der gemessenen CO- und NO_x-Emissionen für Betrieb 3

5.5.2.4 Betrieb 4

Die Messungen an dieser Anlage erstreckten sich vom 29.08.01 bis zum 25.01.02. Der durchschnittliche Methangehalt im Biogas beträgt 62 % und liegt in der Spitze bei 67 %. Dies stellt ein vergleichsweise hohes Niveau dar. Eigene Messungen zur Gasqualität konnten bei Durchführung der zweiten Messreihe nicht vorgenommen werden, da es Probleme mit dem ANSYCO-Gerät gab. Allerdings ist auf dieser Anlage eine Messeinrichtung zur Analyse der Gasqualität installiert, so dass an diesem Tag der Wert von 58 % ermittelt werden konnte. Zusätzlich zum Methangehalt wird bei dieser Einrichtung auch der Schwefelwasserstoffgehalt des Gases ermittelt. Die Werte an den jeweiligen Messtagen reichen von 85 ppm bis 658 ppm. Die Außentemperatur betrug zu Beginn 26°C und sank auf 6°C gegen Ende der Messung (Tabelle 33).

Tabelle 33: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 4

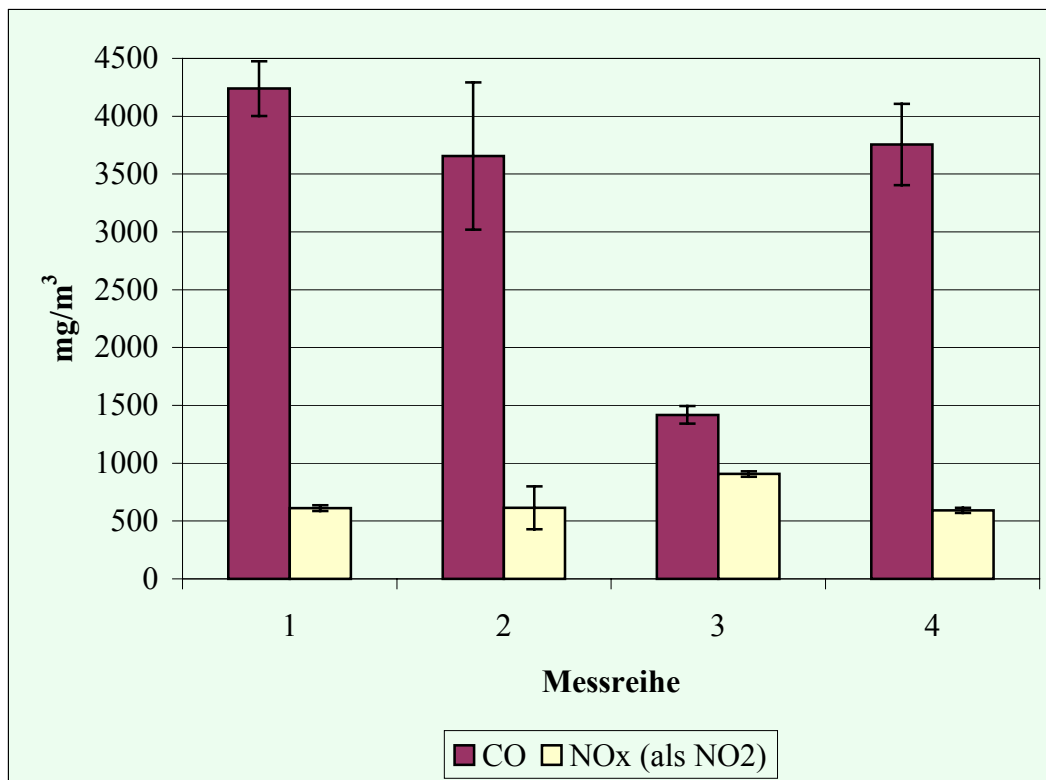
	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
Datum		29.08.01	23.10.01	27.11.01	25.01.02
CH ₄	Vol.-%	60	58	67	63
CO ₂	Vol.-%	39,5	Akku- problem	33	35
O ₂	Vol.-%	0,5		0,4	1,5
H ₂ S	ppm	195	85	272	658
Außentemp.	°C	26	k.A.	3	6
Betriebsbed.		Teillast		Volllast	Teillast

Die CO-Emissionen liegen insgesamt auf vergleichsweise hohem Niveau. Die durchschnittliche Standardabweichung beläuft sich auf 325,5 mg/m³, d. h. die Einzelwerte fallen recht unterschiedlich aus. Messreihe 3 fällt mit 1418 mg/m³ positiv aus der Reihe. Die NO_x-Emissionen liegen bis auf Messreihe 3 bei ca. 600 mg/m³, letztere weist mit einem Mittelwert von 907 mg/m³ ein deutlich höheres Niveau auf. Die durchschnittliche Standardabweichung liegt bei 64 mg/m³. SO₂ kann, wie bei den anderen Betrieben auch, mit der vorhandenen Messtechnik außer minimal in Messreihe 2 nicht nachgewiesen werden.

Der Sauerstoffgehalt liegt mit Werten um 11 % relativ hoch. Ein entsprechend hohes Niveau haben die λ-Werte, die von 1,70 bis zu 2,23 reichen. Die Abgastemperatur pendelt ohne größere Abweichungen um etwa 180°C. Tabelle 34 gibt die Durchschnittswerte der einzelnen Messreihen wieder. Abbildung 65 zeigt die entsprechenden CO- und NO_x-Emissionen im Zeitverlauf. Auffällig ist hier das markante Abweichen der dritten Messreihe von den anderen Reihen. Das Einbrechen der CO-Emissionen mit einem geringfügigen Anstieg der NO_x-Emissionen führt zu einer Kombination, bei der bei beiden Messgrößen die Grenzwerte der TA-Luft eingehalten werden. Diese Kombination ist bei keiner anderen Messreihe aufgetreten. Nähere Informationen zu den Messreihen können Anhangstabelle 12 bis Anhangstabelle 15 entnommen werden.

Tabelle 34: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 4

Messgröße	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
CO	mg/m ³	4239	3656	1418	3756
NO	mg/m ³	221	228	482	255
NO ₂	mg/m ³	273	265	169	201
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	611	614	907	592
SO ₂	mg/m ³	0	1	0	0
O ₂	Vol.-%	11,3	11,1	8,7	10,9
CO ₂	Vol.-%	8,2	8,3	10,3	8,4
Abgastemp.	°C	192,1	176,2	191,5	169,8
qA	%	6,97	7,21	8,01	13,16
λ	-	2,16	2,23	1,70	2,09

Abbildung 65: Darstellung der gemessenen CO- und NO_x-Emissionen für Betrieb 4

5.5.2.5 Betrieb 5

Die Messungen auf Betrieb 5 begannen am 02.08.01 und endeten am 22.01.02. Der ermittelte Methangehalt stellt bei diesem Betrieb den Durchschnitt aus drei Einzelmessungen dar. Diese konnten an jedem vorhandenen Fermenter durchgeführt werden. Der durchschnittliche Methangehalt liegt bei etwa 55 %, jedoch nimmt die Gasqualität im Laufe der Messzeit deutlich ab. Auch auf diesem Betrieb konnte die Gasqualität in der Messreihe 2 aufgrund eines Ausfalls des ANSYCO-Messgerätes nicht erfolgen (Tabelle 35).

Tabelle 35: Datum, Gasqualität und Außentemperatur für die Messungen auf Betrieb 5

	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
Datum		02.08.01	09.10.01	26.11.01	22.01.02
CH ₄	Vol.-%	59	Akku- problem	57	50
CO ₂	Vol.-%	39		43	47
O ₂	Vol.-%	0,1		0,1	0,1
Außentemp.	°C	47	25	3	9
Betriebsbed.		Volllast	Volllast	Volllast	Volllast

Die CO-Emissionen nehmen im Messreihenmittel von 716 mg/m³ bis 1539 mg/m³ kontinuierlich zu. Die mittlere Standardabweichung fällt mit 563 mg/m³ relativ hoch aus. Die Tagesmittelwerte der CO-Messungen liegen konstant unter dem Grenzwert der TA-Luft. Die NO_x-Werte übersteigen deutlich die Anforderungen der TA-Luft, wobei das gesamte Niveau der ersten Messreihe niedriger ausfällt als bei den anderen drei Messreihen. Für die SO₂-Messungen gilt bezüglich der Unsicherheit über die ermittelten Werte dasselbe wie bei den anderen Betrieben.

Der Sauerstoffgehalt des Abgases in der ersten Messung fällt mit etwa 6 % deutlich niedriger aus als bei den weiteren Messungen, in welchen der Gehalt zwischen 9 % und 10 % schwankt. Auffällig hoch sind die Abgastemperaturen, die zu Beginn bei über 430°C lagen. Mit sinkender Außentemperatur sinken auch die Abgastemperaturen, die mit ca. 270°C im Winter immer noch auf einem hohen Niveau liegen. Entsprechend hoch fallen die Abgasverluste mit 17,0 % im Sommer bzw. bis zu 12,5 % im Winter aus. Tabelle 36 gibt die Mittelwerte im einzelnen wieder.

Tabelle 36: Mittelwerte der gemessenen Abgasparameter für Betrieb 5

Messgröße	Einheit	Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3	Messreihe 4
CO	mg/m ³	716	931	1173	1539
NO	mg/m ³	938	1103	1108	1067
NO ₂	mg/m ³	6	20	67	82
NO _x (als NO ₂)	mg/m ³	1441	1708	1763	1714
SO ₂	mg/m ³	-	86	0	1
O ₂	Vol.-%	6,2	9,1	10,1	10,2
CO ₂	Vol.-%	12,4	9,9	9,2	9,5
Abgastemp.	°C	434,1	309,5	270,6	275,7
qA	%	17,03	12,08	13,54	12,46
λ	-	1,42	1,80	1,93	1,95

Den Verlauf der CO- und NO_x-Emissionen der einzelnen Messreihen im Vergleich stellt Abbildung 66 dar. Zu sehen ist deutlich das konstant niedrige Niveau der CO-Mittelwerte bei gleichzeitig hohem Niveau der NO_x-Emissionen. Der Verlauf der CO-Emissionen zeigt einen ansteigenden Trend im Verlauf der Messreihen. Auffallend ist die vergleichsweise geringe Standardabweichung während der ersten Messreihe. Genaue Angaben zu den Verteilungen der Messgrößen sind in Anhangstabelle 16 bis Anhangstabelle 19 zu finden.

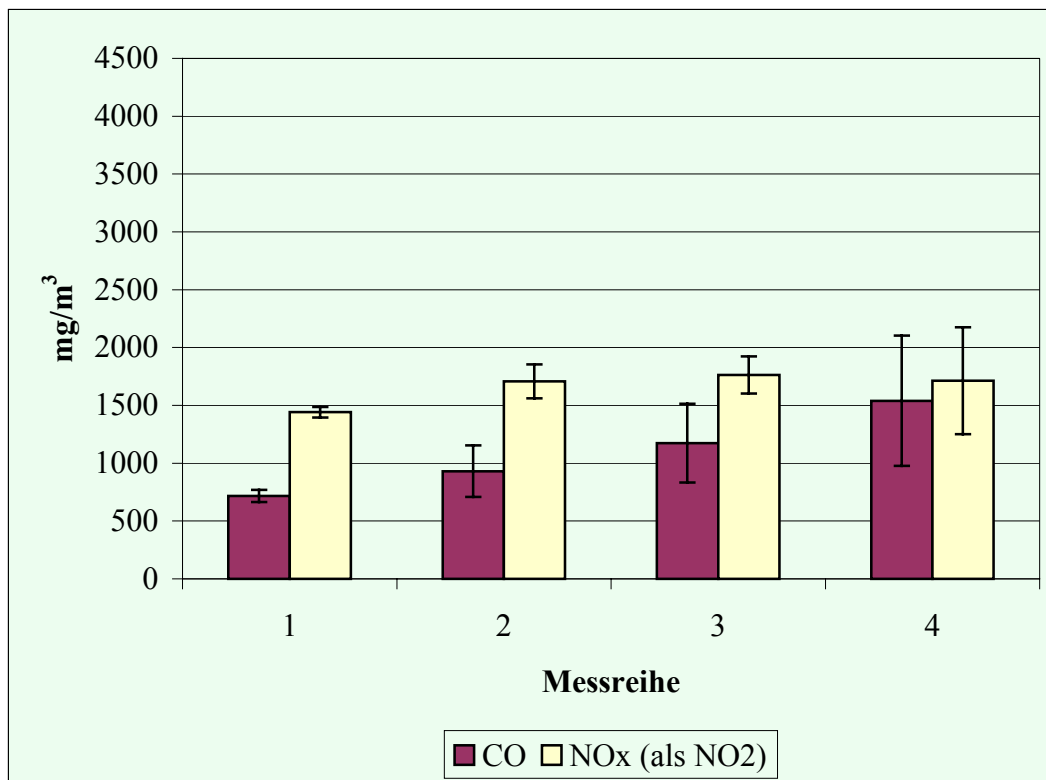


Abbildung 66: Darstellung der gemessenen CO- und NO_x-Emissionen für Betrieb 5

5.5.2.6 Zusatzmessungen

In den Anhang wurden noch die Auswertungen von Einzelmessungen zusätzlich gemessener Aggregate aufgenommen, um einen Überblick über die Größenordnung der Emissionen anderer in der Praxis eingesetzter Motoren zu erhalten (Anhangstabelle 20 bis Anhangstabelle 23). Die Ergebnisse dieser einmaligen Messungen sind nicht in die vergleichenden Statistiken dieser Arbeit eingeflossen, zumal eine sinnvolle statistische Aussage aufgrund der geringen Anzahl gültiger Messwerte nicht getroffen werden kann. Im Einzelnen handelt es sich um einen 45 kW-Gasmotor, einen 75 kW-Gasmotor sowie einen 160 kW-Zündstrahlmotor.

Vom 75 kW-Aggregat liegen zwei Messungen verschiedener Messtage vor. Dieses Aggregat war mit der Messsonde nur schwer zu erreichen. Aus diesem Grund gibt es hier nur wenige Einzelmesswerte. Bei der ersten Messung wurden die ersten vier, bei der zweiten Reihe die ersten drei Datensätze komplett gestrichen. Bis auf die Werte der Abgastemperatur scheinen jedoch bei Durchsicht der Einzelwerte die Messwerte, insbesondere CO und NO_x, das tatsächliche Niveau bereits in etwa erreicht zu haben. Die Werte der Zusatzmessungen sollen hier nicht näher erläutert werden. Es kann jedoch auch aus diesen Werten abgelesen werden, dass die CO- und NO_x-Grenzwerte der TA-Luft nicht eingehalten werden. Sehr deutlich ist auch der Zusammenhang erkennbar, dass hohe CO-Werte mit niedrigen NO_x- und hohen O₂-Werten im Abgas einhergehen und umgekehrt.

5.5.3 Abweichung der Messwerte von den Grenzwerten der TA-Luft

Die nachfolgenden Tests dienen der statistischen Absicherung der ermittelten Messergebnisse für CO und NO_x gegen die vorgegebenen Grenzwerte der TA-Luft. Die zu testenden Mittelwerte sind diejenigen Mittelwerte, die sich aus der Verteilung der Einzelwerte eines Gesamttagess auf einem bestimmten Betrieb für die obigen Abgaskomponenten ergeben. Das signifikante Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte wird mit dem „t-Test bei einer Stichprobe“ untersucht. Dieser Test prüft, ob der Mittelwert einer Variablen (hier: gemessene CO- bzw. NO_x-Emissionen) von einem konstanten, vorgegebenen Wert (hier: jeweiliger Grenzwert der TA-Luft) abweicht.

Die Ergebnisse der 19 Tests der einzelnen Messreihen für CO auf signifikante Abweichung vom Grenzwert 2,0 g/m³ der TA-Luft sind in der folgenden Tabelle 37 zusammengefasst. Es werden der zu testende Mittelwert sowie die Standardabweichung angegeben. In der Spalte „Niveau“ deutet ein Pfeil an, ob der Grenzwert über- oder unterschritten wird. In den folgenden drei Spalten finden sich die ermittelten Werte des jeweiligen Tests auf Abweichung vom Grenzwert. Der Gasmotor auf Betrieb 1 wurde gegen den entsprechenden Grenzwert für Fremdzündungsmotoren von 1,0 g/m³ getestet. Die ermittelten Werte weichen höchstsignifikant ($p < 0,0001$) vom geforderten Grenzwert ab. Dies ist insbesondere bei einer Grenzwertüberschreitung von Bedeutung, da somit auf ein signifikant höheres Niveau geschlossen werden kann. Somit ist ein erhöhter Mittelwert nicht auf eine „ungünstige Stichprobe“ am Messtag zurückzuführen und das Ergebnis statistisch abgesichert. Tabelle 38 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für die Verteilungen der NO_x-Emissionen (Grenzwert 1,0 g/m³ bzw. 0,50 g/m³).

Tabelle 37: Ergebnisse der t-Tests der gemessenen Mittelwerte gegen den jew. Grenzwert der TA-Luft für CO

Betrieb	Messreihe	Mittelwert CO [mg/m ³]	Std.-abw.	Niveau	Testgröße t	Freiheitsgrade df	Signifikanz P
1	1	3835,5	120,0	▲	389,97	649	0,000
	2	3527,3	24,2	▲	1661,84	695	0,000
	3	Keine Messwerte vorhanden, da Motor defekt!					
	4	2549,7	454,6	▲	28,04	537	0,000
2	1	3510,9	340,3	▲	129,83	854	0,000
	2	3322,6	87,8	▲	445,75	874	0,000
	3	4074,4	146,0	▲	443,11	972	0,000
	4	3239,7	121,0	▲	308,23	904	0,000
3	1	2634,8	219,5	▲	82,62	815	0,000
	2	2314,4	222,7	▲	36,33	661	0,000
	3	2553,7	163,6	▲	78,70	540	0,000
	4	2519,7	156,8	▲	89,02	720	0,000
4	1	4238,7	237,5	▲	257,68	746	0,000
	2	3655,9	636,0	▲	61,88	564	0,000
	3	1417,9	76,7	▼	-202,39	710	0,000
	4	3755,6	350,4	▲	119,20	565	0,000
5	1	716,2	53,3	▼	-576,68	572	0,000
	2	931,1	222,1	▼	-139,57	840	0,000
	3	1172,9	340,0	▼	-75,60	965	0,000
	4	1539,0	563,1	▼	-25,75	988	0,000

▲ : Überschreitung des Grenzwertes; ▼ : Unterschreitung des Grenzwertes

Tabelle 38: Ergebnisse der t-Tests der gemessenen Mittelwerte gegen die Grenzwert der TA-Luft für NO_x

Betrieb	Messreihe	Mittelwert NO _x [mg/m ³]	Std.-abw.	Niveau	Testgröße t	Freiheitsgrade df	Signifikanz p
1	1	1296,2	359,5	▲	56,16	642	0,000
	2	824,0	22,1	▲	386,78	692	0,000
	3	Keine Messwerte vorhanden, da Motor defekt!					
	4	850,2	28,8	▲	353,02	840	0,000
2	1	890,1	257,6	▼	-12,72	888	0,000
	2	1101,1	130,6	▲	22,87	872	0,000
	3	1001,7	119,2	▲	0,44	972	0,659
	4	1356,6	76,5	▲	140,15	902	0,000
3	1	1456,6	27,9	▲	481,88	869	0,000
	2	1799,6	75,5	▲	286,87	733	0,000
	3	1752,3	104,1	▲	178,17	607	0,000
	4	1905,4	77,1	▲	330,44	790	0,000
4	1	611,3	24,9	▼	-466,55	889	0,000
	2	614,0	186,4	▼	-55,15	708	0,000
	3	906,8	23,8	▼	-113,81	846	0,000
	4	591,8	21,8	▼	-494,70	697	0,000
5	1	1440,5	44,6	▲	263,72	713	0,000
	2	1707,9	147,4	▲	140,87	860	0,000
	3	1762,7	160,8	▲	149,58	993	0,000
	4	1714,2	462,0	▲	49,37	1019	0,000

▲: Überschreitung des Grenzwertes; ▼: Unterschreitung des Grenzwertes

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die CO-Emissionen der Betriebe 1 bis 4 bis auf eine Ausnahme höchstsignifikant über den Grenzwerten der TA-Luft liegen. Bei Betrieb 5 ist ein konstantes Unterschreiten dieser Grenze auf ebenfalls höchstsignifikantem Niveau nachzuweisen. Die NO_x-Emissionen weisen bei den drei größeren Motoren eine konstante signifikante Abweichung vom Grenzwert auf. Betrieb 4 fällt hier deutlich mit einer Unterschreitung aus der Reihe. Betrieb 2 liefert ein eher uneinheitliches Bild, was die Ergebnisse der einzelnen Messreihen angeht. Hier liegt in Messreihe 3 keine signifikante Abweichung vor, da die Verteilung der Messwerte um den Grenzwert streut.

5.5.4 Emissionen an CO und NO_x in Abhängigkeit von Motor und Messzeitpunkt

Im Rahmen der nachfolgend dargestellten Analysen wird geprüft, ob sich die BHKW-Klassen in ihrem Emissionsverhalten signifikant unterscheiden. Weiterhin wird analysiert, ob der Faktor Messzeitpunkt eine Rolle spielt, sich also über die verschiedenen Messreihen gesehen signifikante Unterschiede ergeben. Dieser Test wird als zweifaktorielle Varianzanalyse mit den Faktoren Betrieb (5stufig) und Messreihe (4stufig) durchgeführt. Als abhängige Variablen gehen jeweils die Emissionen von CO und NO_x ein.

5.5.4.1 Kohlenmonoxid

Die insgesamt 14.190 eingegangenen Messwerte für CO verteilen sich über die Messreihen bzw. Motoren wie in Tabelle 39 angegeben. Die zweifaktorielle Varianzanalyse liefert auf globalem Niveau das in Tabelle 40 angegebene Bild.

Tabelle 39: Verteilung der in die Varianzanalyse eingehenden Messwerte für CO

Kategorie	Aufschlüsselung	n	Summe
Messreihe	Messreihe 1	3641	14.190
	Messreihe 2	3639	
	Messreihe 3	3191	
	Messreihe 4	3719	
Motor	13 kW Gas-Otto	1884	14.190
	22 kW Zündstrahler	3608	
	50 kW Zündstrahler	2740	
	80 kW Zündstrahler	2589	
	132 kW Zündstrahler	3369	

Tabelle 40: Zweifaktorielle Varianzanalyse der CO-Emissionen

Quelle	Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	1,70,E+10	18	9,46,E+08	11393,2	0,000
Intercept	9,80,E+10	1	9,80,E+10	1181185,4	0,000
MESSREIHE	4,98,E+08	3	1,66,E+08	1998,0	0,000
MOTOR	1,22,E+10	4	3,05,E+09	36742,1	0,000
MESSREIHE * MOTOR	4,21,E+09	11	3,83,E+08	4609,2	0,000
Fehler	1,18,E+09	14171	8,30,E+04		
Gesamt	1,21,E+11	14190			

Es ist zu sehen, dass höchstsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$) bezüglich der CO-Emissionen zwischen den Messreihen einerseits und den Betrieben andererseits bestehen. Ebenso sind Interaktionseffekte zwischen den unabhängigen Variablen Messreihe und Motor auf ebenfalls höchstsignifikantem Niveau nachzuweisen. Dies bedeutet, dass es nicht nur Unterschiede der Mittelwerte über die Messreihen bzw. über die Betriebe hinweg gibt, sondern auch innerhalb der Betriebe über den Messzeitraum.

Es ist jedoch von zusätzlichem Interesse, welche Motoren sich voneinander abgrenzen lassen und welche ein ähnliches Emissionsverhalten aufweisen. Somit lassen sich einerseits die genauen Verursacher für die oben festgestellten Unterschiede ausmachen. Andererseits können gegebenenfalls homogene Untergruppen von Messreihen bzw. BHKW gebildet werden. Zu diesem Zweck wird ein multipler Mittelwertsvergleich durchgeführt. Die angewandte Prozedur ist hier das Scheffé-Verfahren, das für paarweise Vergleiche als sehr konservativ gilt (Precht 1993). Dies bedeutet, dass ein Unterschied im Vergleich zu anderen Verfahren vergleichsweise markant sein muss, um als solcher nachgewiesen zu werden. Tabelle 41 gibt die Auswertung dieses Tests bezüglich der Messreihen wieder.

Wie zu sehen ist, sind die Unterschiede für die jeweils paarweise durchgeführten Vergleiche höchstsignifikant ($p < 0,001$). Das bedeutet, dass sich jede Messreihe deutlich von jeder anderen unterscheidet. Der gleiche Test lässt sich auch bezüglich der installierten Aggregate durchführen. Wie auch hier zu sehen ist, sind höchstsignifikante ($p < 0,001$) Unterschiede für jeden paarweise durchgeführten Vergleich festzustellen (Tabelle 42). Daraus lässt sich ableiten, dass sich jedes einzelne Aggregat bezüglich der CO-Emissionen statistisch gesehen von den anderen deutlich unterscheidet.

Tabelle 41: Multipler Mittelwertsvergleich nach Scheffé für CO [mg/m³] bezüglich der Messreihen

Messreihe (I)	Messreihe (J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	99,9% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	404,61	6,75	0,000	377,37	431,86
	3	735,71	6,99	0,000	707,53	763,89
	4	455,50	6,72	0,000	428,41	482,60
2	1	-404,61	6,75	0,000	-431,86	-377,37
	3	331,10	6,99	0,000	302,91	359,29
	4	50,89	6,72	0,000	23,79	77,99
3	1	-735,71	6,99	0,000	-763,89	-707,53
	2	-331,10	6,99	0,000	-359,29	-302,91
	4	-280,21	6,95	0,000	-308,25	-252,16
4	1	-455,50	6,72	0,000	-482,60	-428,41
	2	-50,89	6,72	0,000	-77,99	-23,79
	3	280,21	6,95	0,000	252,16	308,25

Tabelle 42: Multipler Mittelwertsvergleich nach Scheffé für CO [mg/m³] bezüglich des installierten Motors (ZS = Zündstrahlmotor, GM = Gas-Otto-Motor)

(I) Motor	(J) Motor	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	99,9% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
13 kW GM	22 kW ZS	-194,7	8,2	0,000	-229,9	-159,5
	50 kW ZS	843,4	8,6	0,000	806,3	880,4
	80 kW ZS	123,2	8,7	0,000	85,7	160,7
	132 kW ZS	2212,1	8,3	0,000	2176,5	2247,7
22 kW ZS	13 kW GM	194,7	8,2	0,000	159,5	229,9
	50 kW ZS	1038,1	7,3	0,000	1006,7	1069,5
	80 kW ZS	317,9	7,4	0,000	286,0	349,8
	132 kW ZS	2406,8	6,9	0,000	2377,1	2436,5
50 kW ZS	13 kW GM	-843,4	8,6	0,000	-880,4	-806,3
	22 kW ZS	-1038,1	7,3	0,000	-1069,5	-1006,7
	80 kW ZS	-720,2	7,9	0,000	-754,1	-686,2
	132 kW ZS	1368,7	7,4	0,000	1336,9	1400,6
80 kW ZS	13 kW GM	-123,2	8,7	0,000	-160,7	-85,7
	22 kW ZS	-317,9	7,4	0,000	-349,8	-286,0
	50 kW ZS	720,2	7,9	0,000	686,2	754,1
	132 kW ZS	2088,9	7,5	0,000	2056,5	2121,3
132 kW ZS	13 kW GM	-2212,1	8,3	0,000	-2247,7	-2176,5
	22 kW ZS	-2406,8	6,9	0,000	-2436,5	-2377,1
	50 kW ZS	-1368,7	7,4	0,000	-1400,6	-1336,9
	80 kW ZS	-2088,9	7,5	0,000	-2121,3	-2056,5

Bei der Bildung von homogenen Untergruppen zeigt sich auf höchstsignifikantem Niveau ($p < 0,001$), dass eine Gruppe nur von jeweils einer Messreihe bzw. Motortyp gebildet werden kann. Dieses bedeutet im Umkehrschluss, dass keine Messreihe bzw. kein Motortyp statistisch einer anderen Messreihe bzw. Motortyp ähnlich ist. Diese Aussage ist aufgrund der

oben durchgeführten multiplen Mittelwertsvergleiche auch nicht anders zu erwarten. Die entsprechenden Tabellen sind nicht aufgeführt.

Da diese Tests unter Einbeziehung aller Daten durchgeführt wurden und somit für eine Gesamtaussage gültig sind, wurde zur Bestätigung von Signifikanzen auf einzelbetrieblicher Basis noch ein weiterer Test durchgeführt. Wie in Abbildung 64 zu sehen ist, weichen die Mittelwerte für CO des Betriebes 3 von Messreihe zu Messreihe scheinbar nicht in hohem Maße ab. Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes wurde für diesen Betrieb eine einfaktorielle Varianzanalyse mit der abhängigen Variable CO-Messwert und der unabhängigen Variable Messreihe durchgeführt. Hierbei ergibt sich speziell für diesen Betrieb immer noch ein höchstsignifikanter Mittelwertunterschied ($p < 0,001$), wie Tabelle 43 zeigt. Eine weitergehende Analyse mit multiplen Mittelwertsvergleichen zeigt (Tabelle 44).

Tabelle 43: Einfaktorielle Varianzanalyse bezüglich CO speziell für Betrieb 3

	Quadrat-summe	Df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Zwischen den Gruppen	39133189	3	13044396,3	11393,2	0,000
Innerhalb der Gruppen	104189669	2736	38081,0192	1181185,4	
Gesamt	143322858	2739		1998,0	

Tabelle 44: Multipler Mittelwertsvergleich bezüglich CO [mg/m^3] speziell für Betrieb 3

Messreihe (I)	Messreihe (J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	95% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	320,40	10,21	0,000	291,84	348,95
	3	81,11	10,82	0,000	50,85	111,38
	4	115,12	9,97	0,000	87,22	143,02
2	1	-320,40	10,21	0,000	-348,95	-291,84
	3	-239,29	11,31	0,000	-270,92	-207,65
	4	-205,28	10,50	0,000	-234,66	-175,90
3	1	-81,11	10,82	0,000	-111,38	-50,85
	2	239,29	11,31	0,000	207,65	270,92
	4	34,01	11,10	0,025	2,96	65,06
4	1	-115,12	9,97	0,000	-143,02	-87,22
	2	205,28	10,50	0,000	175,90	234,66
	3	-34,01	11,10	0,025	-65,06	-2,96

Hier ist zu sehen, dass die speziell zu betrachtenden, optisch zunächst ähnlich erscheinenden CO-Messungen auf Betrieb 3 aufgrund der hohen Messwertzahl immer noch hochsignifikant unterschiedlich ausfallen. Nur im Fall des Vergleichs zwischen Messreihe 3 und 4 ergibt sich bei dieser Betrachtung ein immer noch signifikanter Unterschied auf jedoch etwas geringerem Signifikanzniveau ($p = 0,025$).

5.5.4.2 Stickoxide

Die insgesamt 15.551 eingegangenen Messwerte für NO_x verteilen sich über die Messreihen bzw. Motoren wie in Tabelle 45 angegeben. Die zweifaktorielle Varianzanalyse ergibt höchstsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$) bezüglich der NO_x -Emissionen sowohl zwischen

den Messreihen als auch zwischen den Betrieben (Tabelle 46). Auch hier sind, ebenso wie bei Analyse der CO-Varianzen, Interaktionseffekte zwischen den Faktoren Messreihe und Motor zu erkennen.

Tabelle 45: Verteilung der in die Varianzanalyse eingehenden Messwerte für NO_x

Kategorie	Aufschlüsselung	n	Summe
Messreihe	Messreihe 1	4006	15.551
	Messreihe 2	3870	
	Messreihe 3	3422	
	Messreihe 4	4253	
Motor	13 kW Gas-Otto	2177	15.551
	22 kW Zündstrahler	3638	
	50 kW Zündstrahler	3003	
	80 kW Zündstrahler	3144	
	132 kW Zündstrahler	3589	

Tabelle 46: Zweifaktorielle Varianzanalyse der NO_x-Emissionen

Quelle	Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Korrigiertes Modell	2,96,E+09	18	1,64E+08	5291,8	0,000
Intercept	2,27,E+10	1	2,27E+10	730932,3	0,000
MESSREIHE	6,25,E+07	3	2,08E+07	670,5	0,000
MOTOR	2,48,E+09	4	6,21E+08	19992,3	0,000
MESSREIHE * MOTOR	3,24,E+08	11	2,94E+07	947,9	0,000
Fehler	4,82,E+08	15532	3,11E+04	5291,8	
Gesamt	2,76,E+10	15551		730932,3	

Die Ergebnisse des multiplen Mittelwertvergleiches nach dem oben erwähnten Scheffé-Verfahren gibt Tabelle 47 wieder. Für fast alle paarweise durchgeführten Vergleiche kann ein höchstsignifikanter ($p < 0,001$) Unterschied nachgewiesen werden. Ausnahmen bilden hier die Messreihen 3 und 4, die sich bezüglich der NO_x-Emissionen etwas ähnlicher sind. Der gleiche Test bezüglich der installierten Motoren zeigt, dass sich auch hier höchstsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$) für jeden paarweise durchgeführten Vergleich feststellen lassen (Tabelle 48). Das heißt, dass sich die Mittelwerte der NO_x-Emissionen jedes einzelnen Aggregates von jedem anderen untersuchten Motor statistisch gesehen signifikant unterscheiden.

Bei der Bildung homogener Untergruppen zeigt sich, dass eine Gruppe jeweils nur von einem Motor gebildet werden kann (Tabelle 49), d. h. kein Motor ist statistisch gesehen bezüglich der NO_x-Emissionen einem anderen Motor ähnlich. Bei Untersuchung der Messreihen auf homogene Untergruppen lässt sich jedoch feststellen, dass Messreihe 3 und 4 eine Gruppe bilden, d. h. ähnliche NO_x-Emissionswerte aufweisen (Tabelle 50).

Tabelle 47: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für NO_x [mg/m³] bezüglich der Messreihen

Messreihe (I)	Messreihe (J)	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	99,9% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-115,23	3,97	0,000	-131,26	-99,21
	3	-218,12	4,10	0,000	-234,67	-201,57
	4	-204,28	3,88	0,000	-219,93	-188,63
2	1	115,23	3,97	0,000	99,21	131,26
	3	-102,89	4,13	0,000	-119,57	-86,21
	4	-89,05	3,91	0,000	-104,84	-73,26
3	1	218,12	4,10	0,000	201,57	234,67
	2	102,89	4,13	0,000	86,21	119,57
	4	13,84	4,05	0,009	-2,49	30,16
4	1	204,28	3,88	0,000	188,63	219,93
	2	89,05	3,91	0,000	73,26	104,84
	3	-13,84	4,05	0,009	-30,16	2,49

Tabelle 48: Multipler Mittelwertvergleich nach Scheffé für NO_x [mg/m³] bezüglich des installierten Motors (ZS = Zündstrahlmotor, GM = Gas-Otto-Motor)

(I) Motor	(J) Motor	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz	99,9% Konfidenzintervall	
					Untergrenze	Obergrenze
13 kW GM	22 kW ZS	-194,7	8,2	0,000	-229,9	-159,5
	50 kW ZS	843,4	8,6	0,000	806,3	880,4
	80 kW ZS	123,2	8,7	0,000	85,7	160,7
	132 kW ZS	2212,1	8,3	0,000	2176,5	2247,7
22 kW ZS	13 kW GM	194,7	8,2	0,000	159,5	229,9
	50 kW ZS	1038,1	7,3	0,000	1006,7	1069,5
	80 kW ZS	317,9	7,4	0,000	286,0	349,8
	132 kW ZS	2406,8	6,9	0,000	2377,1	2436,5
50 kW ZS	13 kW GM	-843,4	8,6	0,000	-880,4	-806,3
	22 kW ZS	-1038,1	7,3	0,000	-1069,5	-1006,7
	80 kW ZS	-720,2	7,9	0,000	-754,1	-686,2
	132 kW ZS	1368,7	7,4	0,000	1336,9	1400,6
80 kW ZS	13 kW GM	-123,2	8,7	0,000	-160,7	-85,7
	22 kW ZS	-317,9	7,4	0,000	-349,8	-286,0
	50 kW ZS	720,2	7,9	0,000	686,2	754,1
	132 kW ZS	2088,9	7,5	0,000	2056,5	2121,3
132 kW ZS	13 kW GM	-2212,1	8,3	0,000	-2247,7	-2176,5
	22 kW ZS	-2406,8	6,9	0,000	-2436,5	-2377,1
	50 kW ZS	-1368,7	7,4	0,000	-1400,6	-1336,9
	80 kW ZS	-2088,9	7,5	0,000	-2121,3	-2056,5

Tabelle 49: Bildung homogener Untergruppen des NO_x-Emissionsverhaltens bezüglich des Motors

	n	Untergruppe				
		1	2	3	4	5
80 kW Zündstrahler	3144	687,18				
13 kW Gas-Otto	2177		973,60			
22 kW Zündstrahler	3638			1086,37		
132 kW Zündstrahler	3589				1671,68	
50 kW Zündstrahler	3003					1718,52
Signifikanz		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Tabelle 50: Bildung homogener Untergruppen des NO_x-Emissionsverhaltens bezüglich der Messreihe

Messreihe	n			
		1	2	3
1	4006	1114,49		
2	3870		1229,72	
4	4253			1318,77
3	3422			1332,61
Signifikanz		1,00	1,00	0,01

5.6 Diskussion

Die gewonnenen Daten über die Abgasemissionen der untersuchten Biogas-BHKW und die angewandte Methodik werden zunächst im Gesamten diskutiert. Es folgt eine Betrachtung der einzelnen Betriebe. Schließlich werden die gewonnenen Ergebnisse im Lichte der aktuellen Grenzwerte der TA-Luft und deren Anwendung in der Genehmigungspraxis betrachtet.

5.6.1 Gesamtbetrachtung

Die dargestellten Untersuchungen dienen der Ermittlung von Daten zu den Abgasemissionen biogasbetriebener Verbrennungsmotor-BHKW in der Landwirtschaft. Neben motorischen Einflüssen sollten mit der Durchführung mehrerer Messreihen auch Einflüsse der Außentemperatur und der Biogasqualität untersucht werden. Erfahrungsgemäß wirkt sich die Temperatur und Feuchte der Ansaugluft auf das Emissionsverhalten eines Motors aus. Erhöhte Emissionen an CO und Gesamt-C sind insbesondere bei kälteren Temperaturen beim Startvorgang des Motors zu erwarten. Aus diesem Grund wurden die Betreiber darauf aufmerksam gemacht, dass die Motoren am Messtag vor Beginn der Messung schon ein bis zwei Stunden in Betrieb sein sollten. Möglicherweise aufgrund dieses Vorgehens war bei den durchgeführten Messungen ein Einfluss der Außentemperatur nicht zu erkennen, da die Motoren i.d.R. Luft aus dem BHKW-Raum ansaugen, welcher durch den Motorenbetrieb erwärmt wird. Da die Fermenter konstant beheizt werden müssen, ist auch die Temperatur des Biogases unabhängig von der Außentemperatur weitgehend konstant und wirkt sich nicht verändernd auf den Verbrennungsprozess aus. Ein Einfluss des Methangehaltes auf die Schadstoffemissionen konnte mit den Daten dieser Messungen nur grob beurteilt werden (siehe Kapitel 5.6.2). Diese Fragestellung wurde jedoch in einer gesonderten Untersuchung näher betrachtet (siehe Kapitel 1).

Die Gesamtmittelwerte für CO im Abgas liegen außer für Betrieb 5 und einer Messreihe für Betrieb 4 über den Grenzwerten der TA-Luft (Tabelle 37). Betrachtet man Abbildung 60, ist

ein abnehmender Trend der CO-Emissionen mit steigender Aggregatgröße erkennbar. Eine Ausnahme bildet Betrieb 4, wie weiter unten erläutert wird. Die abnehmende Tendenz könnte mit dem besseren Verbrennungsverlauf aufgrund eines günstigeren Volumen-Oberfläche-Verhältnisses in größeren Motoren erklärt werden. Die genauen Messwerte der Betriebe 1 und 2 konnten allerdings aufgrund der Überschreitung der Abschaltgrenze des Messgerätes nicht ermittelt werden. Bei Betrieb 1 wurde kurzfristig die Abschaltgrenze ausgeschaltet, woraufhin Werte um 9000 ppm auftraten. Um das Messgerät zu schonen, musste daher die Abschaltgrenze sofort wieder aktiviert werden.

Die Gesamtmittelwerte für NO_x im Abgas liegen außer für Betrieb 4 und einer Messreihe für Betrieb 2 über den entsprechenden Grenzwerten der TA-Luft (Tabelle 38). Eine lineare Korrelationsanalyse zeigt, dass die NO_x -Werte mit steigender CO-Konzentration abnehmen ($r = -0,595$; $p = 0,000$). Der Hauptteil der NO_x -Emissionen erfolgt in Form von NO. Dies ist auf die hohen Verbrennungstemperaturen und die hohen λ -Werte zurückzuführen. Die Umsetzung zu NO_2 erfolgt später in der Atmosphäre. Ein Trend der NO_x -Werte in Abhängigkeit von der Motorgröße wie für CO ist nicht erkennbar. Bei Betrieb 4 fallen besonders die extrem niedrigen NO_x -Emissionen bei relativ niedrigem NO/ NO_2 -Verhältnis auf (Tabelle 34).

Die Messwerte für SO_2 sind sehr widersprüchlich. Bei den ersten zwei durchgeführten Messreihen konnte SO_2 nachgewiesen werden. Da jedoch nach Einschicken des Gerätes ein Defekt der SO_2 -Messzelle festgestellt und diese ausgetauscht wurde, wurden die entsprechenden Messwerte der ersten zwei Messreihen verworfen. Von diesem Zeitpunkt an zeigte das Messgerät relativ konstant den Wert „0 ppm“. Dies erscheint fragwürdig, da auf Betrieb 4 ein Schwefelwasserstoffmessgerät für das Biogas installiert ist und dieses Werte von 200 ppm bis über 600 ppm anzeigte. Bei diesen H_2S -Gehalten im Biogas müssten im Abgas SO_2 -Werte von etwa 50 bis 150 mg/m^3 enthalten sein. Die Messgenauigkeit des Messgerätes ist mit weniger als 5 ppm Abweichung bei Werten unter 100 ppm angegeben. Es wurde zusätzlich auch eine Testmessung an einem Prüfgas vorgenommen, die das Funktionieren der Messzelle bestätigte. Nun kann folgendermaßen über den Verbleib des Schwefels gemutmaßt werden: Ein kleiner Teil gelangt in den Motorölkreislauf und ist dort aggressiv wirksam und für Korrosion an Armaturen und Motor verantwortlich. Der wesentliche Anteil könnte mit dem Kondensatwasser (Bildung von schwefliger Säure) das Abgassystem verlassen. Eine Analyse des Kondensatwassers zum Zwecke der Überprüfung dieses Sachverhaltes wurde nicht durchgeführt.

Wie den Daten zur Außentemperatur im Ergebnisteil zu entnehmen ist, wurde im Winter an relativ warmen Tagen gemessen, Messungen bei Minusgraden konnten nicht erfolgen (siehe unten). Die Messung der Außentemperatur erfolgt stets nur punktuell vor Beginn der Messreihe. Eventuelle Schwankungen der Temperatur während der Messungen sind somit nicht dokumentiert. Soweit möglich wurden auch Vor- und Rücklauftemperaturen der BHKW-Heizkreisläufe erfasst. Die Rücklauftemperatur nimmt erwartungsgemäß mit sinkender Außentemperatur deutlich ab, da der Wärmebedarf der Fermenter (und anderer angeschlossener Wärmeverbraucher) bei geringen Temperaturen größer ist.

Wie die statistischen Tests ergeben haben, ist ein signifikanter Unterschied der Emissionswerte zwischen den Messreihen auch innerhalb der Betriebe festgestellt worden (Tabelle 41 und Tabelle 42). Das bedeutet, dass eine Einzelmessung an einem Tag nicht unbedingt aussagekräftig ist, da die Werte bei der nächsten Messung signifikant abweichen können. Dies ist insbesondere dann ausschlaggebend, wenn sich das Emissionsniveau der gemessenen Motoren in der Nähe der Grenzwerte befindet. Die Abweichungen können auf

verschiedenen unbekanntem Faktoren beruhen, z.B. kann sich die Motoreinstellung verändern oder der Methangehalt variieren. Somit sollte, um ein zuverlässiges Bild des Emissionsverhaltens eines Motors in der Praxis zu erhalten, auf jeden Fall an mehreren Tagen gemessen werden.

Messungen aus dem Jahre 1995, welche an sieben Zündstrahlmotoren und einem Gas-Otto-Motor durchgeführt wurden, ergaben folgendes Bild: Die CO-Emissionen der Zündstrahlmotoren erreichten Werte von 2199 mg/m^3 bis 12.482 mg/m^3 , bei einem Gesamtmittelwert von 4093 mg/m^3 . Die NO_x -Emissionen betragen durchschnittlich 1298 mg/m^3 . Die 27 Einzelwerte der Zündstrahlmotoren wurden innerhalb von 2 Tagen mit einem Gasanalysecomputer ermittelt. Die Leistung der untersuchten Zündstrahlmotoren liegt bis auf zwei Einzelmessungen an einem $100 \text{ kW}_{\text{el.}}$ -Aggregat zwischen 22 und $37 \text{ kW}_{\text{el.}}$ (Köberle 1996). Somit fallen die dort untersuchten Anlagen in etwa in die BHKW-Klasse I der vorliegenden Arbeit. Der hier untersuchte $22 \text{ kW}_{\text{el.}}$ -Motor erreichte Durchschnittswerte über den Gesamtzeitraum von mindestens $3549 \text{ mg/m}^3 \text{ CO}$ und $1086 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$.

Ein methodisches Problem dieser Untersuchungen stellt die uneinheitliche Anordnung der Abgas-Messsonde an den einzelnen BHKW-Anlagen dar, die sich jedoch aufgrund der unterschiedlichen baulichen Ausführung der einzelnen BHKW nicht vermeiden ließ (Abbildung 56 bis Abbildung 59). Das TESTO 350-Messgerät ist ein mobiles Abgasanalysegerät, welches für kurzzeitige Abgasuntersuchungen an häuslichen Kaminen entwickelt wurde („Kaminkehrer-Messgerät“). Erfahrungen mit dessen Verwendung als Messgerät für Langzeitmessungen an BHKW lagen zu Messbeginn nicht vor. Dies führte beispielsweise dazu, dass die Messsonde zu hohen Abgastemperaturen ausgesetzt wurde. Da ein Dauereinsatz ursprünglich nicht vorgesehen ist, sollte eine Einzelmessung nicht länger als 20 Minuten dauern; zwischen den Einzelmessungen ist das Gerät mit Frischluft zu spülen (Kapitel 5.1). Dadurch fallen zu Beginn jeder Einzelmessung zu entfernende Daten an, da sich die Messzellen und Fühler immer wieder neu auf das Niveau im Abgas einstellen müssen (Kapitel 5.4). Diese Spülvorgänge dauerten in der Regel nur wenige Minuten, vereinzelt waren deutlich längere Spülzeiträume erforderlich. Ein weiterer Diskussionspunkt ist der zulässige Einsatzbereich des TESTO-Gerätes bei einer Umgebungstemperatur von $+4 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $+40 \text{ }^\circ\text{C}$. Damit wären Messungen an sehr kalten Tagen zur weiteren Überprüfung des Einflussfaktors Außentemperatur ohne weitere Vorkehrungen zum Schutz des Messgerätes gar nicht möglich gewesen. Weil der Januar 2002 relativ warm war, konnten die „Wintermessungen“ nach einem Geräteversagen bei Minusgraden trotzdem erfolgreich zu Ende geführt werden. Der Einsatz des ANSYCO-Messgerätes zur Bestimmung der Gasqualität verlief bis auf Probleme mit dem Akku im Zeitraum der Messreihe 2 störungsfrei.

Zur Durchführung der statistischen Tests wird strenggenommen eine Normalverteilung der einzelnen Messwerte vorausgesetzt (Backhaus et al. 1987). Eine Überprüfung dieser Bedingung am Beispiel der NO_x -Werte der zweiten Messreihe auf Betrieb 5 zeigt Abbildung 67. Auf dem Q-Q-Plot sind die beobachteten Werte gegen die erwarteten Werte bei Normalverteilung aufgetragen. Bis auf wenige Ausreißer im Randbereich liegen die beobachteten Werte in einem engen Bereich um die Gerade der Normalverteilung. Wenn einzelne Messwerte, wie im Extremfall bei Betrieb 2 besprochen, auf verschiedenen Niveaus liegen, da sich im Laufe des Messtages eine Einstellung am Motor oder die Gasqualität ändert, ist jedoch nicht mehr von einer Normalverteilung auszugehen. Die ebenfalls zu fordernde Varianzhomogenität ist bei der vorliegenden Untersuchung verschiedenartiger Praxisanlagen nicht herzustellen, da außer den untersuchten Einflüssen von Motor und Gasqualität vermutlich weitere anlagenspezifische Faktoren die Abgasemissionen beeinflussen. Allerdings gilt die Varianzanalyse bei Verletzung dieser Voraussetzung als

relativ robust, da nur die Hypothese eines vorhandenen Unterschiedes getestet wird, nicht jedoch das Ausmaß dieses Unterschiedes (Backhaus et al. 1987). Als alternative Testverfahren böten sich weniger komfortable und schlechter interpretierbare non-parametrische Tests an. Ein abweichendes Ergebnis wird aufgrund der festgestellten hohen Signifikanzen hierfür jedoch nicht erwartet.

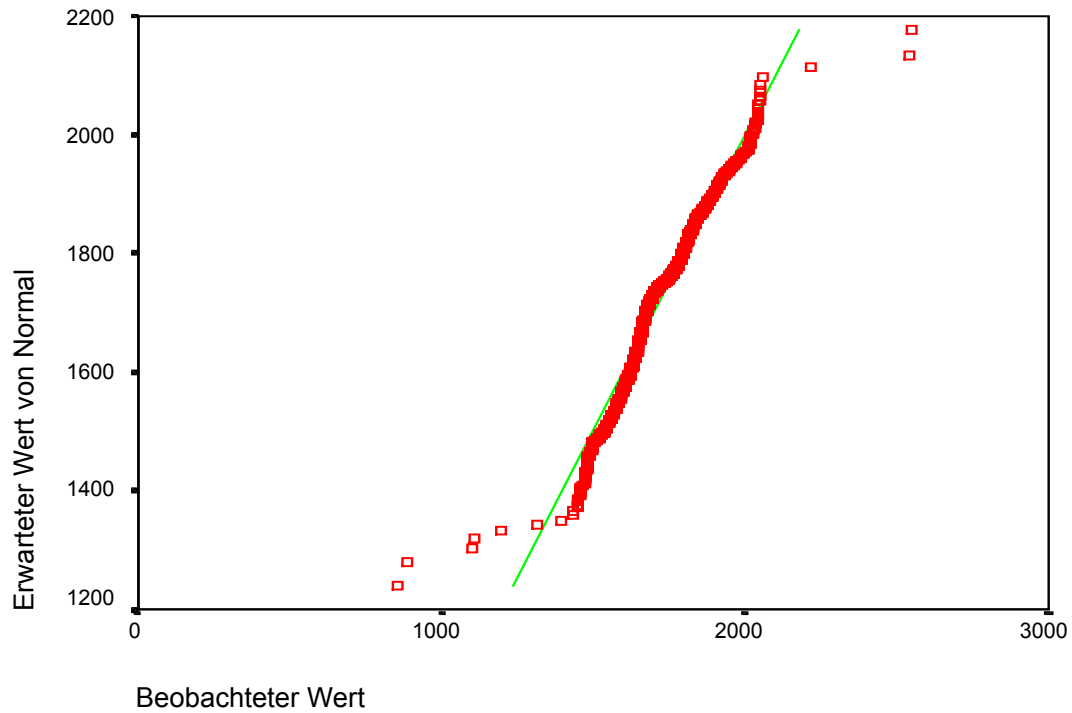


Abbildung 67: Q-Q-Plot für die NO_x -Werte von Betrieb 5, Messreihe 2

5.6.2 Einzelbetriebliche Betrachtung

5.6.2.1 Betrieb 1

Der zusätzlich zu den geplanten vier Zündstrahl-Motoren untersuchte Gas-Otto-Motor weist die niedrigsten Abgastemperaturen auf. Dies ist auf einen zusätzlich installierten Abgaswärmetauscher zurückzuführen. Bei dem untersuchten Aggregat ist vor allem auffällig, dass die Emissionen von CO in den ersten beiden Messreihen extrem hoch sind und sich nach dem Motorsausfall in Messreihe 3 auf einem deutlich niedrigeren Niveau befinden (Tabelle 28). Der Ausfall in Messreihe 3 beruhte auf einem Defekt der Zündkerzen. Diese wurden gereinigt, und in Messreihe 4 konnten daraufhin relativ bessere Ergebnisse bezüglich der Emissionen ermittelt werden. Dies zeigt, dass sich ein optimaler Pflege- und Wartungszustand positiv auf das Emissionsverhalten auswirkt und Grundvoraussetzung für einen ordnungsgemäßen Betrieb eines Verbrennungsmotor-BHKW ist.

5.6.2.2 Betrieb 2

Betrieb 2 betreibt den kleinsten untersuchten Zündstrahl-Motor. Bei diesem liegt an jedem Messtag mindestens eine Einzelmessung, meistens jedoch alle, über der Abschaltgrenze des Messgerätes (Tabelle 30). Somit können für die CO-Werte nur Mindestkonzentrationen angegeben werden. Die hohen CO-Emissionen beruhen auf einer unvollständigen Verbrennung im Motor. Eine grundsätzlich schlechtere Verbrennung bei kleineren Motoren wird vermutet und durch den oben beschriebenen Verlauf sinkender CO-Emissionen bei steigender Aggregatgröße unterstrichen.

Bei Betrieb 2 fällt die im Vergleich zu den übrigen Messreihen deutlich höhere Standardabweichung bei der ersten Messreihe auf (siehe Abbildung 63 und Anhangstabelle 12). Diese ist mit der Lockerung einer Schraube durch erhöhten Gasdruck zu erklären. Während der Einzelmessung 5 lief der Motor plötzlich hörbar unruhiger. Die hohe Standardabweichung stammt aus der plötzlich erhöhten Variabilität des Abgassauerstoffgehalts, der in die Berechnung der mg/m^3 -Werte auf 5 %-Bezugssauerstoffgehalt einfließt. Abbildung 68 zeigt den Verlauf des Sauerstoffgehaltes in der relevanten Zeitspanne. Es ist ein Abfallen des Sauerstoffgehaltes im Abgas zu erkennen, zuerst langsam, dann schneller. Gleichzeitig steigen die gemessenen NO_x - und CO-ppm-Werte deutlich an. Nachdem die Störung beseitigt wurde, steigt der Sauerstoffgehalt wieder sprunghaft auf ein konstantes Niveau an, welches jedoch unter demjenigen vor der Störung liegt. Die CO-Werte bewegten sich an diesem Messtag vor der Störung unterhalb der Abschaltgrenze des Gerätes von 3000 ppm, danach jedoch darüber. Dieser Verlauf zeigt, wie veränderte Einstellungen am BHKW-Modul das Emissionsverhalten maßgeblich beeinflussen können. Vor Messreihe 2 wurden vom Betriebsleiter Verbesserungen an der Einspritzung vorgenommen. Dies dürfte die Ursache für die leicht verringerten CO-Emissionen der zweiten Messreihe sein.

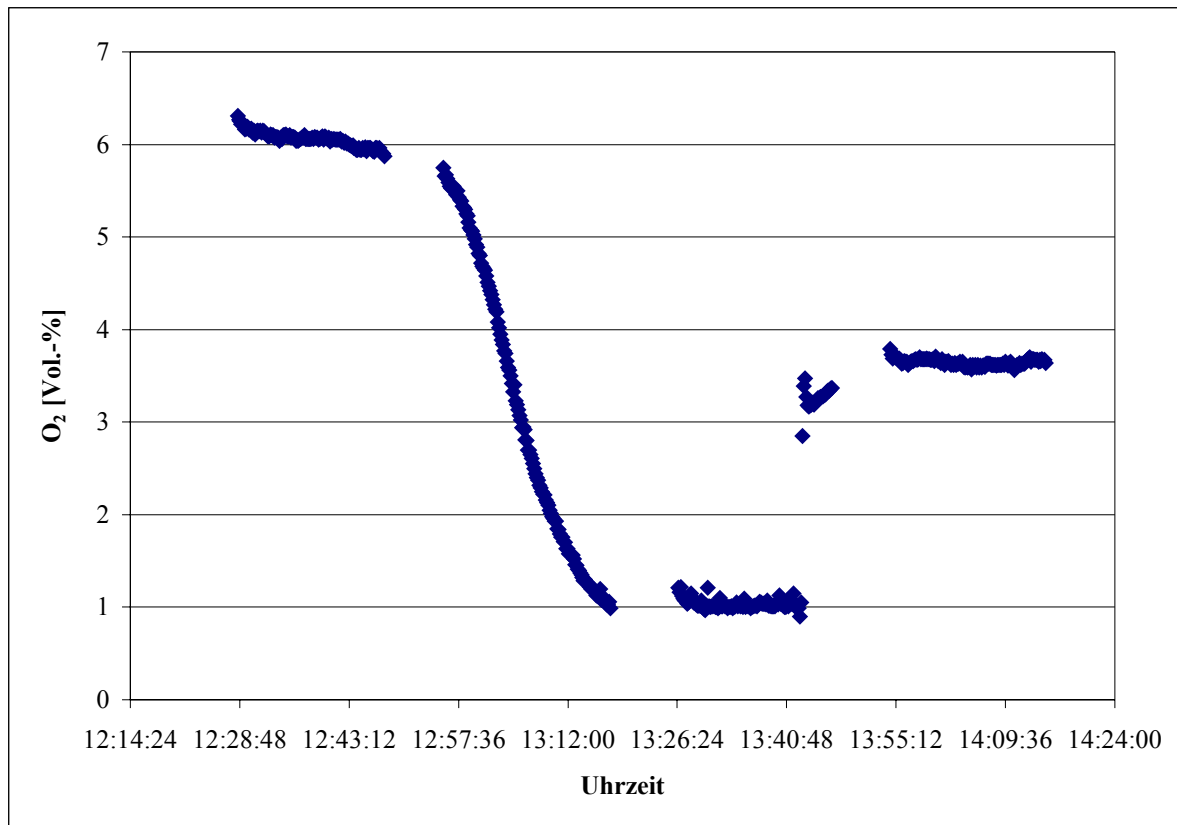


Abbildung 68: Sauerstoffgehalt im Abgas auf Betrieb 2 in einer ausgewählten Zeitspanne

5.6.2.3 Betrieb 3

Die späte Durchführung der ersten Messreihe auf diesem Betrieb ergab sich daraus, dass ursprünglich ein anderer Betrieb aus dieser BHKW-Leistungsklasse vorgesehen war, der jedoch nach einigen Verschiebungen komplett ausgefallen war. Dieser späte erste Messtag war jedoch für die Jahreszeit extrem warm und passte sich dem zu Folge sehr gut aufgrund der Außentemperaturbedingungen in die entsprechenden Messreihen der anderen Betriebe ein.

Bei diesem Betrieb fällt auf, dass der NO_x-Gehalt im Abgas im Verhältnis zum CO-Gehalt im Vergleich zu den anderen Betrieben relativ hoch ist (Tabelle 26). Bei den anderen Betrieben war bisher der Zusammenhang zu beobachten, dass hohe NO_x-Emissionen mit geringen CO-Emissionen einhergehen und umgekehrt. Ein möglicher Grund für den abweichenden Befund für Betrieb 3 könnte der hohe Zündölanteil sein. Während des Messzeitraumes wurden durch Abschalten der Gaszufuhr und Leistungskontrolle bei reinem Zündölbetrieb Zündölanteile von bis zu 60 % ermittelt. Hierdurch erklärt sich der hohe NO_x-Anteil im Abgas. Der hohe Zündölanteil wird vom Betrieb benötigt, da die Wärmeversorgung des Hotels und der Gaststätte vom BHKW aus erfolgt. Die Versorgung muss auch sichergestellt sein, wenn nicht genug Gas zum Betrieb des Motors vorhanden ist.

5.6.2.4 Betrieb 4

Dieser Betrieb weist konstant den höchsten Methangehalt im Biogas aller untersuchten Betriebe auf. Dies ist einerseits auf die Inputmaterialien zurückzuführen. Die in hohem Maße zugegebenen Co-Fermentate sind energiereich. Andererseits arbeitet die Anlage im zweistufigen Verfahren, d. h. der Methanbildungsprozess läuft räumlich getrennt von der Hydrolyse und damit effizienter ab.

Emissionsseitig fällt auf, dass sich das untersuchte 80 kW_{el}-Aggregat scheinbar nicht in die Reihe sinkender CO-Emissionen bei steigender Aggregatgröße einordnen lässt (Abbildung 60). Nur in Messreihe 3 scheint dieser Trend auch bei diesem Motor bestätigt. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass während der Messreihen 1, 2 und 4 zu wenig Biogas vorhanden war, so dass der untersuchte Motor im Teillastbetrieb gefahren werden musste. Zudem war während dieser Messungen der Methangehalt im Biogas geringer als während der bei Volllast durchgeführten Messreihe 3. Während Messreihe 3 wurden die geforderten Grenzwerte der TA-Luft sowohl für CO als auch NO_x unterschritten, was anzeigt, dass der Motor für einen Volllastbetrieb bei hohen Methangehalten optimal eingestellt ist. Allerdings war es an diesem Tag relativ kalt, so dass das TESTO-Messgerät am unteren Rand seiner zulässigen Betriebstemperatur eingesetzt wurde und somit die ermittelten Werte mit einem gewissen Unsicherheitsfaktor belegt sind. Bei den Messungen im Teillastbetrieb fällt auf, dass das Verhältnis von NO zu NO₂ relativ gering ist (Tabelle 34). Dies könnte wiederum damit erklärt werden, dass die Verbrennungstemperaturen im Teillastbetrieb geringer ausfallen und somit weniger von der Temperatur abhängiges („thermisches“) NO gebildet wird. Bei Messreihe 3 im Volllastbetrieb werden offensichtlich höhere Verbrennungstemperaturen erreicht, denn das NO/NO₂-Verhältnis erreicht hier ein auffällig höheres Niveau. Ebenso fallen die Standardabweichungen der Messwerte in Messreihe 3 deutlich geringer aus als bei den übrigen Messreihen. Dies kann mit dem gleichmäßigeren Verhalten des Motors im Volllastbetrieb im Gegensatz zum Teillastbetrieb erklärt werden. Somit scheinen auch die aus der Reihe fallenden Werte für Betrieb 4 plausibel und es bleibt festzuhalten, dass sich ein Teillastbetrieb eines Motors extrem negativ auf die Emissionen auswirkt.

5.6.2.5 Betrieb 5

Bei Betrieb 5 fällt auf, dass der Methangehalt im Laufe der Messperiode kontinuierlich abgenommen hat (Tabelle 35). Die Ursache kann in einem Rührwerksdefekt im Fermenter gefunden werden. Die Konsequenz ist, dass das Material schlechter homogenisiert wurde und somit keine optimalen Bedingungen mehr für die Methanproduktion herrschten. Mit dem sinkenden Methangehalt geht durch Verschleppung der Verbrennung und eine Absenkung der Verbrennungstemperatur aufgrund des höheren CO₂-Gehaltes im Brenngas eine Erhöhung der CO-Emissionen einher (siehe Kapitel 1). Dieser Sachverhalt ist auch bei Betrieb 3 erkennbar.

Am ersten Messtag auf Betrieb 5 war die Außentemperatur mit 47°C (in der Sonne) extrem hoch (Tabelle 35). Dies führte einerseits zu einer Erhitzung des TESTO-Gerätes auf über 50 °C, und somit über die maximal zulässige Gerätetemperatur. Auch wurde an diesem Tag nicht am Kamin gemessen, sondern vor Gaseintritt in den außenliegenden Kamin an einem unterirdischen Schacht. Dieser wurde durch Anheben des Deckels zugänglich gemacht, so dass die Messsonde dort eingeführt werden konnte. Trotz Isolation der Sonde hatte der Kunststoffgriff den hohen Abgastemperaturen nicht standgehalten und war geschmolzen. Nach sechs Einzelmessungen musste somit diese Messreihe abgebrochen werden. Um dieses Problem zu umgehen, wurde ab der zweiten Messung direkt am Betonkamin gemessen. Hierzu wurde ganz unten am Kamin eine Öffnung gebohrt, in welche die Sonde problemlos eingesetzt werden konnte. Ab diesem Zeitpunkt nahmen allerdings die Standardabweichungen

deutlich zu (Abbildung 66). Dies dürfte damit zusammenhängen, dass der Kamin einen extrem großen Durchmesser hat und daher ein vermehrter Lufteintritt von außen in den Messbereich erfolgte (Abbildung 59).

Bei diesem Betrieb ist wiederum zu sehen, dass ein niedriges Niveau der CO-Werte mit einem hohen Niveau der NO_x-Werte einhergeht (Tabelle 36). Die Ursache liegt auch hier in den hohen Verbrennungstemperaturen, welche eine Bildung von NO_x begünstigen. Betrieb 5 ist der einzige Betrieb, bei welchem der CO-Grenzwert der TA-Luft konstant unterschritten wird. Die NO_x-Werte sind jedoch sehr hoch. Auch dieser Betrieb fährt mit einem relativ geringen Zündölanteil, was sich ebenfalls positiv auf die CO-Emissionen auswirken dürfte. Der Einfluss des Zündölanteils auf die Emissionen wäre Thema einer weiteren möglichen Untersuchung, die bei Anlagen, welche mit entsprechenden Zählern ausgestattet sind, durchgeführt werden könnte.

5.6.3 Fazit

Verbrennungsmotor-BHKW auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen sind derzeit für die Nutzung des regenerativen Energieträgers Biogas bei einem hohen Gesamtwirkungsgrad unverzichtbar und ermöglichen die Substitution fossiler Energieträger. Da die meisten landwirtschaftlichen Biogasanlagen nach Baurecht genehmigt werden, ist die Anwendung der TA-Luft nicht zwingend vorgeschrieben. Es liegt jedoch im Ermessen der zuständigen Behörde, die darin enthaltenen Grenzwerte mangels anderer, gegebenenfalls geeigneterer Emissionsgrenzwerte als Stand der Technik auch auf nur nach Baurecht zu genehmigende Anlagen anzuwenden (Kapitel 1). Wie mit den vorliegenden Untersuchungen an biogasbetriebenen BHKW im Leistungsbereich von 13 bis 160 kW_{el.} gezeigt wird, werden die Grenzwerte der TA-Luft von diesen Anlagen in der Praxis meist nicht eingehalten. Die entsprechenden Emissionswerte für CO und/oder NO_x wurden jeweils auf vier von fünf untersuchten Anlagen signifikant überschritten. Keine der untersuchten Anlagen konnte beide Grenzwerte einhalten. Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung kommen praktisch nicht zum Einsatz. Auf Grundlage der hier vorgestellten Messergebnisse ist festzustellen, dass es insbesondere im Falle von Zündstrahlmotoren in der Praxis offensichtlich Schwierigkeiten bereitet, mit Motoren kleiner Leistung (bis ca. 130 kW_{el.}) die Grenzwerte der TA-Luft sicher einzuhalten. Dies dürfte zum Teil in einer nicht optimal auf die Brennstoffqualität abgestimmten Motorentechnik und –einstellung begründet sein. Ein wesentlicher Grund für die zum Teil drastisch erhöhten Schadstoffemissionen liegt jedoch auch in dem generell mangelhaften Wartungszustand (z. B. seltener bzw. kein Wechsel der Einspritzdüsen, fehlerhaftes Ventilspiel, schlechte Kompression, hoher Ölverbrauch). Insbesondere bei den kleinen, baurechtlich genehmigten Anlagen ist die Wartung durch den Betreiber teilweise mangelhaft, eine messtechnische Überwachung fehlt meist und eine Kontrolle durch die Behörden ist nicht gegeben. Auf eine Bewertung der Auswirkungen der Motoreinstellung und des generellen technischen Zustandes der hier untersuchten Motoren auf den elektrischen Wirkungsgrad kann hier nicht eingegangen werden, da die hierfür erforderlichen Messdaten und Angaben (Gasverbrauch und Stromproduktion während der Abgasmessung, Motoreinstellungen, Zeitpunkt der letzten Wartungsarbeiten) im Rahmen dieses Messprogrammes nicht verfügbar waren. Einrichtungen zur Erfassung des aktuellen Gasverbrauches und der Gesamtstromproduktion (ohne Abzug des Eigenbedarfs) sind in der Praxis insbesondere bei kleineren Anlagen meist nicht vorhanden.

Somit sollte bei Genehmigungsverfahren von Klein- und Kleinstanlagen auf eine strikte Anwendung der TA-Luft-Grenzwerte zu Gunsten praxisnaher Emissionswerte verzichtet werden und im Sinne einer Förderung der umweltfreundlichen Energiebereitstellung eine

weitere Anpassung der Grenzwerte an die vorhandenen Möglichkeiten erfolgen (siehe auch Anlage 1). Dementsprechend ließe sich eine Emissionsbegrenzung in g Schadstoff pro kWh erzeugter elektrischer und/oder Wärmeenergie festlegen. Dem geringeren Wirkungsgrad und problematischeren Abgasverhalten kleinerer Aggregate könnte dann durch eine entsprechende weitere Staffelung der Grenzwerte Rechnung getragen werden.

6 Emissionsmessungen an einem Biogas-BHKW durch eine § 26-Messstelle

Im Rahmen der hier erfolgten Emissionsmessungen auf der Biogasanlage „Pellmeyer“ (Eggertshof bei Freising) sollte insbesondere der Einfluss unterschiedlicher Methangehalte des Biogases auf die Abgaszusammensetzung und der Zusammenhang zwischen NO_x - und CO-Emissionen sowie sonstiger Abgaskomponenten - z. B. Formaldehyd - untersucht werden. Da die Funktionsfähigkeit von Oxidations-Katalysatoren, wie oben dargestellt, durch im Biogas enthaltene Spurengase beeinträchtigt wird, kommt einer Verringerung der Emissionen durch motorische Maßnahmen eine besondere Rolle zu. In diesem Zusammenhang ist eine optimale Einstellung des Motors entscheidend.

6.1 Beschreibung der Biogasanlage

In der Biogasanlage Pellmeyer werden neben Rindergülle (ca. 220 Stück Rinder) Obst- und Gemüseabfälle, Teigabfälle, Grasschnitt, Flotatfett sowie Getreide und Silomais vergoren. Das Substrat wird in der abgedeckten Vorgrube (80 m^3) durchmischt, von der aus die drei zylindrischen Betonfermenter (900 , 700 und 1000 m^3) täglich zweimal beschickt werden. Die Fermenter sind zwar in Reihe geschaltet, jedoch erfolgt eine Zugabe von frischem Substrat in alle drei Gärbehälter, weshalb kein allgemeingültiger Wert für die mittlere hydraulische Verweilzeit des Substrates angegeben werden kann. Das mit einer Wandisolation und einer Folienhaube versehene Endlager (3000 m^3) wird als Nachgärbehälter betrieben. Die Fermentertemperaturen liegen im mesophilen Bereich.

Das entstandene Biogas durchströmt den Gasraum aller Fermenter und des Endlagers (Biologische Entschwefelung durch Luftfeinblasung) und wird nach der Entfeuchtung in einer langen Erdleitung in einem Gassack zwischengespeichert, bevor es im BHKW verwertet wird (Pellmeyer, Stadtwerke Freising 1998). Zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen waren auf der Anlage drei Zündstrahlmotoren in Betrieb (Tabelle 51). Das kleinere Modul 2 wurde zwischenzeitlich durch einen Gas-Otto-Motor (MAN, ca. $350 \text{ kW}_{\text{el}}$) ersetzt. Die Abgaswärmetauscher waren während der Versuchstage nicht in Betrieb.

Tabelle 51: Zündstrahl-Aggregate der BHKW-Anlage Pellmeyer zum Zeitpunkt der Messungen

Bezeichnung	Hersteller	Baujahr	Zylinderzahl	Nenn-drehzahl	Generatorleistung
Modul 1	John Deere	1996	6	1500 U/min	160 kW
Modul 2	John Deere	1991	6	1500 U/min	75 kW
Modul 3	MAN	1999	6	1500 U/min	160 kW

6.2 Vorgehen

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Methangehalte im Biogas auf die Abgasemissionen wurden am Modul 3 Emissionsmessungen bei Betrieb mit unverändertem Biogas (Methangehalt ca. 60 %) sowie mit Biogas, das in einem mobilen Gasspeicher (Gassack, ca. 70 m^3) mit CO_2 verdünnt auf einen Methangehalt von ca. 40 bzw. 50 %, verdünnt wurde, durchgeführt (Abbildung 69). Hierzu wurde in die Gasleitung ein T-Stück eingesetzt, über welches ein Gassack über eine Pumpe mit Biogas befüllt werden konnte. Über eine zweite Öffnung am Gassack wurde eine Messsonde zur Bestimmung des

Methangehaltes in der Mischung eingeführt. An eine weitere Öffnung wurden CO₂-Gasflaschen angeschlossen und so das Biogas auf den gewünschten Methangehalt verdünnt.

Für die Emissionsmessungen am Modul 3 mit künstlich verdünntem Biogas wurde dieses Modul mit dem Gas aus dem Gassack bei Nennlast betrieben, womit eine Messdauer von ca. 45 bis 60 Minuten realisiert werden konnte. Die Module 1 und 2 wurden nur im Betrieb mit unverändertem Biogas untersucht. Da der BHKW-Hersteller entgegen vorheriger Vereinbarung nicht anwesend war, wurden während der Messungen keine Veränderungen an den Motoreinstellungen vorgenommen.

Die Installation des Gassacks sowie die Befüllung mit verdünntem Biogas erfolgte durch Mitarbeiter der Landtechnik Weihenstephan. Die Messungen der Abgasrandparameter sowie der Abgaskomponenten erfolgten *online* während der jeweiligen Messperiode durch den TÜV Süddeutschland, Umwelt Service, Niederlassung München.

6.3 Messinstrumente

Zur Messung der Gasqualität wurde ein Deponiegasmessgerät der Firma Ansyco, Typ GA 94 eingesetzt. Die Spezifikationen dieses Gerätes wurden bereits in Kapitel 5.3.2 ausführlich beschrieben.

6.4 Ergebnisse

In Tabelle 52 sind die Mittelwerte der wichtigsten Parameter zusammengestellt. Zum Vergleich sind außerdem die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft sowie die vom LfU für immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungspflichtige Biogasanlagen (< 1 MW Feuerungswärmeleistung) empfohlenen Emissionswerte (siehe Anlage 1) aufgeführt.

6.5 Diskussion

Die Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für Stickoxide und Formaldehyd wurden im Abgas des Moduls 3 in allen drei gemessenen Betriebszuständen im Mittel überschritten (Tabelle 52). Die durchweg geringen Werte an Schwefeloxiden deuten auf eine gute Funktion der biologischen Entschwefelung des Biogases hin. Das Modul 2 fiel durch sehr hohe Emissionen an CO (Überschreitung des Messbereiches), gasförmigen organischen Verbindungen (Gesamt-C) und Gesamtstaub auf. Lediglich Modul 1 lag bei allen gemessenen Parametern unter den Grenzwerten der TA-Luft.

Da an der BHKW-Anlage keine Vorrichtungen zur Messung des Biogasdurchsatzes der Motoren vorhanden war, konnte eine exakte Ermittlung des elektrischen Wirkungsgrades nicht durchgeführt werden. Aus dem Volumen des Gassackes (ca. 70 m³) lässt sich jedoch für das Modul 3 z. B. für einen mittleren Methangehalt von 48,4 Vol.-% (spezif. Heizwert = 0,484 x 10 kWh/m³ (spezif. Heizwert von Methan) = 4,84 kWh/m³) und einer erzielten Messdauer von 45 min bei einer Nennleistung von 160 kW_{el.} ein elektrischer Wirkungsgrad von ca. 35 % abschätzen.

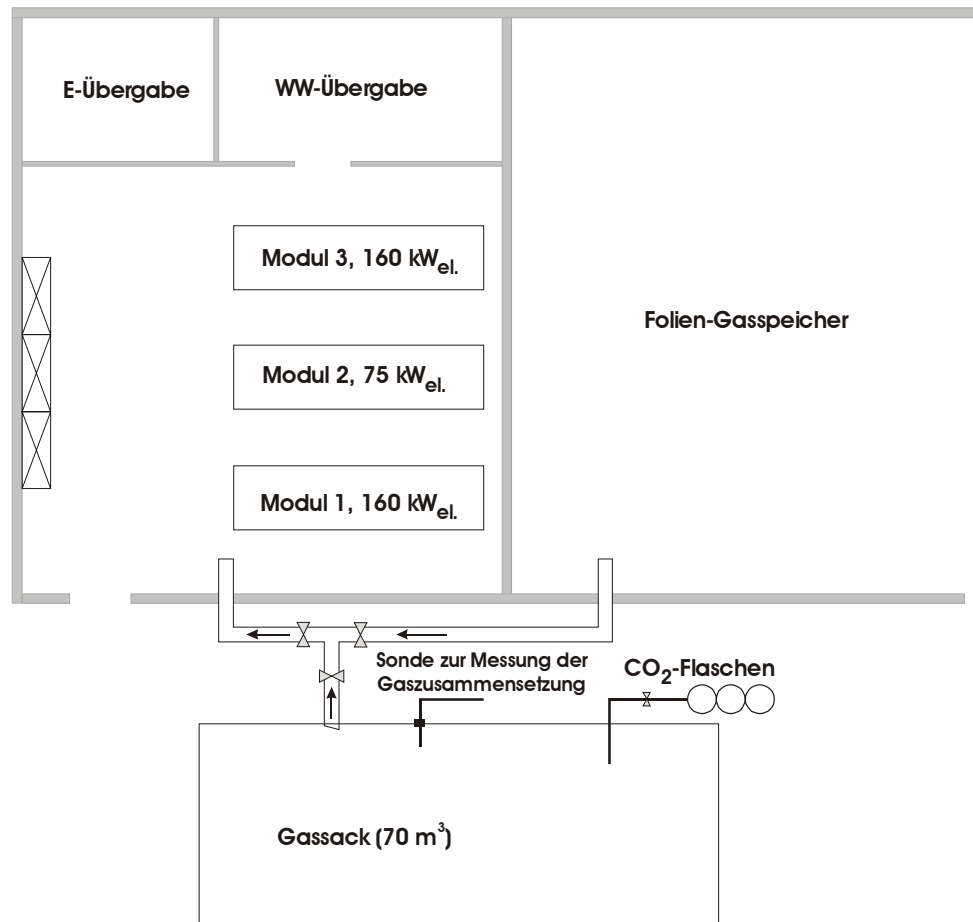


Abbildung 69: Grundriss der BHKW-Anlage und Versuchsanordnung für Messungen mit verdünntem Biogas

Tabelle 52: Zusammenstellung der Messwerte und der entsprechenden Emissionsgrenzwerte nach TA-Luft (Novellierte Fassung vom 12.12.2001: Ziffern 5.2.1, 5.4.1.2.3 und 5.4.1.4) bzw. nach Empfehlung des LfU (siehe Anlage 1)

Messwerte							TA-Luft	Empf. LfU
Parameter	Einheit	Modul					[g/m ³]	[g/m ³]
		3	3	3	2	1		
Methan im Biogas	Vol.-%	60,2	48,4	38,4	56,8	50,1	-	-
Sauerstoff	Vol.-%	7,5	7,4	7,2	10,6	7,7	-	-
Kohlendioxid	Vol.-%	14,1	16,8	18,3	n.b.*	n.b.	-	-
Kohlenmonoxid	mg/m ³	1009	1214	1306	> 4808	1121	2,0	2,0
Stickoxide (als NO ₂)	mg/m ³	1878	1326	1029	258	321	1,0	1,5
Gesamt-C	mg/m ³	1016	1329	1500	11.113	2509	-	-
Methan im Abgas	mg/m ³	898	1104	1218	n.b.	n.b.	-	-
Gesamtstaub	mg/m ³	8,4	4,9	4,9	52,2	11,8	20	50**
Schwefeloxide (als SO ₂)	mg/m ³	60,7	55,4	47,3	n.b.	n.b.	0,35	0,35
Formaldehyd	mg/m ³	111	87	131	n.b.	n.b.	60	-

*) n.b. = nicht bestimmt

***) Zielwert: 20 mg/m³

Die angegebenen Messwerte sind Mittelwerte bezogen auf trockenes Abgas (273 K, 1013 hPa) und 5 Vol.-% Sauerstoff. Grenzwertüberschreitungen sind durch Kursivdruck hervorgehoben.

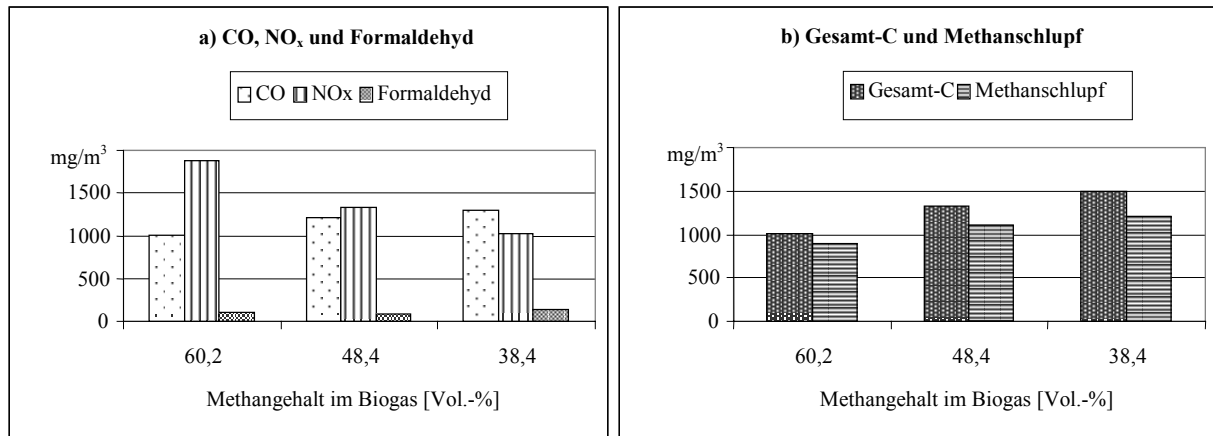


Abbildung 70: Messergebnisse der Emissionsmessungen am BHKW-Modul 3 bei unterschiedlichen Methangehalten im Biogas.

6.5.1 Abgas-Emissionen des BHKW-Moduls 3

Die Emissionsmessungen am Modul 3 sollten Informationen über den Einfluss des Methangehaltes im Biogas auf die Abgaswerte liefern. Abbildung 70a zeigt die Mittelwerte der Messungen von Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Formaldehyd für die drei unterschiedlichen Betriebszustände (Methangehalt ca. 60 Vol.-%, 50 Vol.-% bzw. 40 Vol.-%). Der Emissionsgrenzwert der TA-Luft für NO_x von 1,0 g/m³ wurde in allen drei Fällen im Mittel überschritten, wobei der günstigste Wert beim geringsten Methangehalt im Biogas nur knapp über dem TA-Luft-Grenzwert lag (Tabelle 52). Die mit abnehmendem Methangehalt im Brenngas sinkenden NO_x-Konzentrationen im Abgas können mit der mageren Verbrennung erklärt werden. Gleichzeitig nahmen die CO-Emissionen mit geringerem Methangehalt zu. Dies lässt sich mit der langsameren, kälteren und damit unvollständigeren Verbrennung erklären und deckt sich mit den Befunden von Prescher et al. (2001) an Gas-Otto-Motoren (siehe Kapitel 2). Denselben Trend zeigten die Emissionen an Gesamt-C und Methan (Methanschluß; Abbildung 70b). Die CO-Werte lagen alle deutlich unter dem entsprechenden Emissionsgrenzwert der novellierten TA-Luft von 2,0 g/m³. Auch die Gesamtstaub- und Rußemissionen zeigten günstige Werte.

Die Emissionen an Schwefeloxiden lagen bei allen Messungen im Mittel weit unter dem TA-Luft-Grenzwert von 0,35 g/m³. Eine Verknüpfung mit den Gehalten an Schwefelwasserstoff im Biogas ist wegen fehlender Messeinrichtungen nicht möglich. Unter Annahme der in Kapitel 1 zitierten Zahlen nach Plautz (1997) lässt sich der H₂S-Gehalt des unverdünnten Biogases grob auf etwa 200 ppm abschätzen.

Ein klarer Zusammenhang zwischen den Stickoxid-/Kohlenmonoxid- und Formaldehyd-Emissionen ist anhand der vorliegenden Daten nicht erkennbar. Formaldehyd ist ein Produkt der unvollständigen Verbrennung von Methan. Die Messwerte für Formaldehyd überschritten in allen Fällen den Grenzwert der TA-Luft. Die höchsten Formaldehydkonzentrationen im Abgas traten bei der geringsten Methankonzentration im Brenngas auf, was im Einklang mit den Messwerten von Gesamt-C und Methan im Abgas gesehen werden kann (Tabelle 52). Die mögliche Bildung von Formaldehyd durch Nachoxidation von Methan in den Abgassammelrohren konnte im Rahmen dieser Messungen nicht beurteilt werden. Die Variation des Methangehaltes im Brenngas hatte keinen erkennbaren Einfluss auf die Abgastemperaturen am Motor.

Acetaldehyd trat im Abgas des Moduls 3 nur in sehr geringen Konzentrationen auf (im Mittel 1,4-1,9 mg/m³). Dies ist bei der Verwendung von Biogas (also im wesentlichen Methan) als Brenngas auch zu erwarten, da Acetaldehyd aus höheren Kohlenwasserstoffen gebildet wird, im Falle von Zündstrahlmotoren also praktisch nur aus dem Zündölanteil. Der Zündölanteil der installierten Motoren wurde vom Hersteller mit 8-10 % angegeben. Dieser Wert konnte in der Praxis leider nicht überprüft werden, da keine entsprechenden Messeinrichtungen vorhanden waren. Weitere, im Messbericht quantifizierte organische Verbindungen im Abgas waren Buten, Penten, Aceton, Benzol und Toluol. Die Konzentrationen dieser Verbindungen bewegten sich durchwegs knapp oberhalb der Nachweisgrenze von 0,1 mg/m³.

Bei Betrachtung der Messwerte für Gesamt-C ohne Methan (Bestimmung mit FID) und für gasförmige organische Verbindungen (GC-MS-Übersichtsanalyse) fällt die Diskrepanz zwischen den beiden Summenwerten auf, wonach im Mittel 200 mg/m³ Gesamt-C (ohne Methan) und mehr nicht zuzuordnen sind. Nach Auskunft des Sachverständigen bei der durchführenden Messstelle geht diese Bilanzierung bei ähnlichen Anlagen meist nicht auf. Die durchgeführte Einkomponenten-Kalibrierung des FID (in diesem Falle mit 80 ppm Propan) ist für die Messung von Mehrkomponenten-Gemischen fehlerbehaftet. Zusätzlich unterlag der Verlauf von Gesamt-C und Methan im Abgas in der Messperiode starken Schwankungen (Werte nicht im Messbericht dokumentiert). Eine Nachkalibrierung während der Messungen konnte nicht durchgeführt werden. Nach Meinung des TÜV muss daher von einer höheren Messunsicherheit ausgegangen werden als im Messbericht angegeben. Unter diesen Gegebenheiten scheint damit der Parameter Gesamt-C für die absolute Bewertung der Emissionen von Biogas-BHKW wenig geeignet zu sein; er ist jedoch hilfreich für die Beurteilung der Verbrennungsgüte bzw. des technischen Zustandes des Motors.

Die Messergebnisse zeigen, dass Änderungen des Methangehaltes im Biogas einen deutlichen Einfluss auf die Abgasemissionen von Zündstrahlmotoren haben. Daher sollte der Motor auf den Methangehalt des Biogases abgestimmt werden, was aufgrund der in der Praxis schwankenden Biogasqualität jedoch nur eingeschränkt möglich ist. Dies bedeutet, dass sich ein stabiler Vergärungsprozess mit geringen Schwankungen der Biogasqualität auch positiv auf das Emissionsverhalten des BHKW auswirkt.

6.5.2 Abgas-Emissionen der BHKW-Module 1 und 2

Modul 1 zeigte bei den durchgeführten Messungen insgesamt die günstigsten Abgaswerte (Tabelle 52). Als einziges unterschritt es im Mittel deutlich die Grenzwerte der TA-Luft sowohl für Kohlenmonoxid als auch für Stickoxide. Lediglich die Emissionen an Staub und insbesondere Gesamt-C lagen über denen des leistungsgleichen Moduls 3, was möglicherweise durch das höhere Alter des Moduls 1 begründet ist.

Modul 2 ist das kleinste und älteste in der untersuchten BHKW-Anlage (Tabelle 51). Die sehr schlechten Abgaswerte deuten auf eine fehlerhafte Motoreinstellung hin. Aus der unvollständigen Verbrennung, auf die auch die vergleichsweise hohen Restsauerstoffgehalte im Abgas von > 10 Vol.-% und die im Vergleich zu den beiden anderen Modulen deutlich geringeren Abgastemperaturen hinweisen, resultieren sehr hohe Emissionen an CO (Messbereichsüberschreitung), Gesamt-C, Gesamtstaub und Ruß (Rußzahl 9). Änderungen an der Motoreinstellung im Rahmen der Abgasmessungen hätten hier Aufschluss über den Einfluss auf das Abgasverhalten liefern können, waren aber aufgrund der Abwesenheit von Fachpersonal des BHKW-Herstellers nicht möglich.

Die Messergebnisse für das Modul 1 deuten darauf hin, dass die Einhaltung der überarbeiteten Emissionsgrenzwerte der TA-Luft für biogasbetriebene Zündstrahlmotoren in der untersuchten Leistungsklasse (ca. 160 kW_{el.}) mit rein motorischen Maßnahmen möglich ist. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine optimale Motoreinstellung, die nur durch regelmäßige Wartung und Kontrolle sicher zu stellen ist. Die negativen Auswirkungen einer mangelhaften Motorabstimmung werden an den sehr schlechten Abgaswerten des untersuchten BHKW-Moduls 2 deutlich.

7 Untersuchungen zum Einsatz von Oxidationskatalysatoren an landwirtschaftlichen Biogas-Verbrennungsmotoren

Im Rahmen dieses vom StMLU beauftragten und vom LfU betreuten Projektes soll ein im Dauerbetrieb auf einer landwirtschaftlichen Biogasanlage inaktivierter Oxidationskatalysator instrumentalanalytisch untersucht werden, um orientierende Hinweise auf im Biogas enthaltene Schadstoffkomponenten zu erhalten. Nachdem sich bei Abgasmessungen der Landtechnik Weihenstephan eine signifikante Verringerung der Aktivität des Katalysators im Zusammenhang mit Konzentrationsspitzen an H_2S im Brenngas sowie einer starken Verrußung des Katalysators gezeigt hatte, wurde dieser im Juni 2001 ausgebaut. Da dieser dennoch eine beträchtliche Restaktivität aufwies, wurde beschlossen, den Katalysator noch nicht chemisch zu untersuchen, sondern nach Reinigung wieder einzusetzen und bis zur vollständigen Inaktivierung weiter zu betreiben. Diese Untersuchungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen.

Für die weiteren Untersuchungen zum Vorkommen katalysatorschädigender Spurengase im Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen sollen Messungen an insgesamt zehn Praxisanlagen erfolgen. Die Biogasanlagen sind so auszuwählen, dass sie ein möglichst breites Spektrum an Einsatzstoffen abdecken, um deren Einfluss auf die Zusammensetzung des produzierten Biogases zu beurteilen. Die Landtechnik Weihenstephan hat hierzu im Dezember 2001 eine Liste mit potentiell geeigneten Anlagen an das BfA und das LfU weitergeleitet. Von dieser Liste werden zehn Anlagen für systematische Messungen der Biogaszusammensetzung ausgewählt. Kurzfristig sind bereits auf einer Biogasanlage Voruntersuchungen angelaufen, um eine geeignete Methodik für die Messungen und Laboranalysen von Spurengaskomponenten zu etablieren.

8 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Umfragen unter Biogasanlagenbetreibern in Bayern liefern einen Überblick über den technischen Stand landwirtschaftlicher Biogasanlagen zum Zeitpunkt der Erhebung (November 2000). Es wurden Daten zu den Bereichen Anlagentechnik und Substrat, Gasspeicherung und –aufbereitung, Gasverwertung und Verwertung des Gärrestes erhoben. Zu einer kleineren Auswahl von Anlagen wurden detailliertere Informationen zu Biogasproduktion und –qualität und Gasverwertung im BHKW abgefragt.

Die Struktur der landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Bayern wird von relativ kleinen Anlagen geprägt (90 % mit $\leq 100 \text{ kW}_{\text{el.}}$), die meist über einen stehenden, zylindrischen Hauptfermenter in Betonbauweise verfügen, der bei mesophilen Temperaturen betrieben wird. Bei den Anlagen jüngerer Datums zeigt sich jedoch ein deutlicher Trend zu größeren Gärraumvolumina. Eigenleistungen des Betreibers spielen bei der Planung und insbesondere der Herstellung der kleineren Anlagen eine große Rolle.

Reine Güllevergärung ist sehr selten geworden, jedoch wird in mehr als 80 % der erhobenen Anlagen Wirtschaftsdünger (Gülle und Festmist) als Grundsubstrat für die Kovergärung von nachwachsenden Rohstoffen und/oder Abfallstoffen außerlandwirtschaftlicher Herkunft eingesetzt. Eine an die Verwertung von störstoffhaltigen Abfallstoffen angepasste Anlagentechnik ist nur in wenigen Fällen vorhanden.

Zuverlässige Angaben zur Qualität des produzierten Biogases sind schwer zu erhalten, da nur wenige Anlagenbetreiber über die entsprechenden Messeinrichtungen verfügen. Die biologische Entschwefelung des Biogases hat sich praktisch allgemein etabliert. Die Verwertung des Biogases erfolgt weitaus überwiegend in Blockheizkraftwerken mit Verbrennungsmotoren, wobei Gas-Otto- und Zündstrahl-Motoren in etwa zu gleichen Anteilen vertreten sind. Den Abgasemissionen dieser Maschinen wird im allgemeinen wenig Aufmerksamkeit zuteil, dies insbesondere, da die meisten Anlagen nach Baurecht genehmigt wurden. Eine Abgasnachbehandlung mit Katalysatoren erfolgt in der Praxis nur in seltenen Fällen, obwohl diese im Genehmigungsbescheid häufig gefordert wird. Das Leistungsspektrum der erfassten Einzelaggregate reicht von 5,5 bis $160 \text{ kW}_{\text{el.}}$. Die Netzanschlussleistung der erfassten Anlagen bewegt sich zwischen 5,5 und $300 \text{ kW}_{\text{el.}}$ bei einem Mittelwert von $56 \text{ kW}_{\text{el.}}$. Für Angaben zu den elektrischen und thermischen Wirkungsgraden der BHKW-Module ist man weitgehend auf Herstellerangaben angewiesen. Eine effiziente Nutzung der Wärme ist leider in vielen Fällen aufgrund fehlender Abnehmer und Verwertungsmöglichkeiten nicht gegeben.

Der Lagerbehälter für das ausgefaulte Material ist auf ca. 60 % der Anlagen mit einer Abdeckung versehen, um Emissionen von Geruchsstoffen und eventuell noch entstehendem Biogas zu vermeiden. Der Gärrest wird in 95 % der Fälle direkt landwirtschaftlich ausgebracht, wobei emissionsarme, bodennahe Ausbringtechniken sich zunehmend durchsetzen. Die mittlere Größe der von Biogasbauern bewirtschafteten Fläche beträgt nach den Ergebnissen dieser Umfrage etwa das Dreifache der durchschnittlichen Betriebsgröße in Bayern.

Bei der Verwertung des Biogases in Verbrennungsmotor-BHKW werden an Schadgasemissionen vor allem Kohlenmonoxid, Stickoxide und Schwefeldioxid sowie organische Kohlenstoffverbindungen, insbesondere Methan und Formaldehyd erzeugt. CO

und SO₂ wirken in erhöhten Konzentrationen direkt schädlich auf Organismen. Die Bedeutung der Stickoxide liegt hauptsächlich in den systemischen Umweltwirkungen der Eutrophierung und Versauerung von Ökosystemen und der Bildung von bodennahem Ozon. Auch SO₂ trägt zur Bildung von „Saurem Regen“ bei. Um die mangelhafte Datenlage hinsichtlich der Abgasemissionen von Blockheizkraftwerken auf landwirtschaftlichen Biogasanlagen zu verbessern, wurden Messungen an Praxisanlagen durchgeführt. Diese Anlagen wurden auf Grundlage der in den Umfragen erhobenen Informationen aus verschiedenen Leistungsklassen ausgewählt.

Die Abgasuntersuchungen wurden an vier Zündstrahl-Motoren verschiedener Leistung (22 kW_{el.}, 50 kW_{el.}, 80 kW_{el.} und 132 kW_{el.}) sowie an einem Gas-Otto-Motor mit geringerer Leistung (13 kW_{el.}) durchgeführt. Die jeweils vier Messreihen an jedem Aggregat erstreckten sich über einen Zeitraum von etwa sieben Monaten, um einen längerfristigen Überblick über das Emissionsverhalten zu bekommen. Die Emissionen wurden mit dem mobilen Abgasanalysegerät TESTO 350 analysiert; zusätzlich wurde die Qualität des Biogases mit dem mobilen Deponiegas-Messgerät ANSYCO GA 94 bestimmt. Die Auswertung und statistische Analyse des umfangreichen Datenmaterials (insgesamt 222.944 Einzelwerte) lieferten die folgenden wesentlichen Befunde:

- Die entsprechenden Grenzwerte der novellierten Fassung der TA-Luft für CO und NO_x wurden jeweils auf vier von fünf untersuchten Anlagen im Mittel überschritten; keines der untersuchten Aggregate konnte bei allen Messreihen gleichzeitig beide Grenzwerte einhalten.
- Die gemessenen Gesamtmittelwerte der CO-Konzentration im Abgas der untersuchten Motoren betragen zwischen 1142 und > 3350 mg/m³; außer beim größten Aggregat und für eine Messreihe beim zweitgrößten Aggregat liegen die Mittelwerte immer signifikant über den entsprechenden Grenzwerten.
- Die gemessenen Gesamtmittelwerte der NO_x-Konzentration im Abgas der untersuchten Motoren betragen zwischen 687 mg/m³ und 1719 mg/m³. Lediglich vom zweitgrößten untersuchten Aggregat (80 kW_{el.}) wird der entsprechende Grenzwert signifikant unterschritten (Messungen im Teillast- und Vollastbetrieb); die Emissionswerte des 50 kW_{el.}-Aggregates bewegen sich um den Grenzwert.
- Die Messergebnisse sind sowohl zwischen den untersuchten Motoren als auch zwischen den Messreihen aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren (schwankende Gasqualität, Lastabhängigkeit, Wartungszustand u. a.) signifikant unterschiedlich. Für eine zuverlässige Beurteilung des Emissionsverhaltens eines Motors sind daher mehrere Messreihen erforderlich.
- Es zeigt sich ein Trend im Mittel abnehmender CO-Konzentrationen im Abgas mit steigender Aggregatgröße.
- Für den einzelnen Motor zeigen sich steigende CO-Konzentrationen mit sinkenden NO_x-Konzentrationen im Abgas.
- Ein unmittelbarer Einfluss der Außentemperatur auf das Emissionsverhalten konnte nicht nachgewiesen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Motoren Luft aus dem BHKW-Raum ansaugen, welcher durch den Motorenbetrieb aufgewärmt wird.

- Der Teillastbetrieb eines Motors führte zu deutlich höheren Schadgas-Emissionen.
- Ein nennenswerter Ausstoß an SO₂ konnte mit der verwendeten Messtechnik nicht nachgewiesen werden, jedoch ist die Zuverlässigkeit dieser Messwerte eingeschränkt.
- Einzelne Motoreinstellungen und Wartungsarbeiten beeinflussen das Emissionsverhalten deutlich. Eine regelmäßige, fachmännische Wartung und Kontrolle ist daher Voraussetzung für einen ordnungsgemäßen, möglichst emissionsarmen Motorbetrieb.

Es ergaben sich weiterhin Hinweise auf eine Erhöhung der CO-Emissionen bei gleichzeitig sinkendem NO_x-Ausstoß mit abnehmendem Methangehalt im Biogas. Da allerdings nur punktuelle Messungen des Methangehaltes im Biogas erfolgten, konnte dieser Einfluss im Rahmen der beschriebenen Untersuchungen nicht genauer beurteilt werden. Dasselbe gilt hinsichtlich der beobachteten erhöhten NO_x-Emissionen bei hohem Zündölanteil.

Abgasuntersuchungen an einem biogasbetriebenen Zündstrahlmotor, die durch eine nach § 26 BImSchG zugelassene Messstelle erfolgten, zeigten einen deutlichen Einfluss des Methangehaltes im Biogas (Messungen bei ca. 60, 50 bzw. 40 Vol.-% Methan) auf die Emissionen des untersuchten Aggregates (160 kW_{el.}). Mit abnehmendem Methangehalt im Brenngas nahmen die Abgaskonzentration an NO_x ab, während die Konzentrationen an CO, HC und Gesamt-C zunahmen. Das untersuchte Aggregat unterschritt mit mittleren CO-Werten von 1009 bis 1306 mg/m³ deutlich den Emissionsgrenzwert für CO nach TA-Luft (2,0 g/m³), konnte die entsprechenden Grenzwerte für NO_x und Formaldehyd jedoch nicht einhalten. Ebenso nahm der Methanschluß im Abgas mit sinkendem Methangehalt im Brenngas zu. Die gemessenen Abgaskonzentrationen anderer aliphatischer sowie aromatischer Kohlenstoffverbindungen (Benzol, Toluol, Phenole) waren unbedeutend. Die Emissionen an SO_x lagen weit unterhalb des TA-Luft-Grenzwertes, deuteten jedoch trotzdem auf eine nicht optimal funktionierende biologische Entschwefelung des Biogases hin. Eine Ermittlung des tatsächlichen elektrischen Wirkungsgrades des untersuchten BHKW-Moduls war aufgrund fehlender Messeinrichtungen nicht möglich.

Die Abgasuntersuchungen an zwei weiteren Zündstrahl-BHKW-Modulen derselben Anlage ergaben für das ältere 75 kW-Aggregat sehr hohe Emissionen an CO, Gesamt-C und Staub. Dies wurde auf eine fehlerhafte Motoreinstellung und unvollständige Verbrennung zurückgeführt. Dagegen unterschritt das neuere 160 kW-Aggregat als einziges im Mittel deutlich die TA-Luft-Grenzwerte für CO und NO_x (und Staub). Der Einfluss einer Veränderung der Motoreinstellung während der Abgasmessungen konnte jedoch nicht direkt untersucht werden. Für ein optimales Abgasverhalten scheint es unentbehrlich, dass die Motoren optimal gewartet und soweit möglich auf den Methangehalt des Biogases abgestimmt werden. Ein stabiler Vergärungsprozess mit geringen Schwankungen der Biogasqualität wirkt sich demnach auch positiv auf das Abgasverhalten des BHKW aus.

9 Ausblick

Die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführten Umfragen unter Anlagenbetreibern haben wertvolle Informationen über die Struktur und den technischen Stand landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern geliefert. Aufgrund der dynamischen Entwicklung dieser Branche ist es jedoch unverzichtbar, entsprechende Erhebungen in angemessenen Zeitabständen zu wiederholen, um aktuelle Trends zu identifizieren.

Die gewonnenen Daten zu den Abgasemissionen biogasbetriebener BHKW liefern eine wichtige Grundlage zur Beurteilung der Umsetzbarkeit der TA-Luft-Grenzwerte in der Praxis. Forschungsbedarf besteht insbesondere zum durch Motorenoptimierung realisierbaren Emissionsminderungspotential sowie zu Fragen der Biogasqualität im Zusammenhang mit einer Verringerung der Emissionen durch Katalysatortechnik, wie z. B.: Wie kann das Biogas sicher und kostengünstig entschwefelt werden? Wie schnell erfolgt die Inaktivierung von Oxidationskatalysatoren durch H_2S im Biogas? Welche weiteren Spurengase im Biogas aus landwirtschaftlichen Anlagen wirken sich katalysatorschädigend aus und welche Substrate sind hierfür kritisch?

Einigen dieser Fragestellungen wird im Rahmen eines vom LfU betreuten, gemeinsamen Projektes des Bayerischen Institutes für Angewandte Umweltforschung und –technik GmbH (BIfA) und der Landtechnik Weihenstephan nachgegangen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden in einem ersten Abschnitt Untersuchungen an einem im Dauerbetrieb inaktivierten Oxidationskatalysator durchgeführt, um orientierende Hinweise auf die Schadgaskomponenten im Biogas und deren Schadwirkungen zu erhalten. Des Weiteren werden an zehn ausgewählten Praxisanlagen die Zusammensetzung und Konzentration dieser Schadgaskomponenten in Abhängigkeit von den eingesetzten Gärsubstraten (Wirtschaftsdünger und Co-Fermentate landwirtschaftlicher und außerlandwirtschaftlicher Herkunft) untersucht.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeiten sollen in einem zweiten Projektabschnitt an zwei der untersuchten Anlagen Messungen zum Dauerverhalten von Oxidationskatalysatoren durchgeführt werden. Hierzu wird an diesen Anlagen jeweils ein neuer Oxidationskatalysator installiert und unter kontinuierlicher Überwachung der Biogas- und Abgaszusammensetzung bis zur Inaktivierung betrieben. Die Auswahl dieser Versuchsanlagen erfolgt durch das BIfA in enger Abstimmung mit der Landtechnik Weihenstephan und dem LfU. Ziel dieses Projektabschnittes ist es, den Prozess der Katalysatorinaktivierung in Abhängigkeit vom zeitlichen Verlauf der Konzentration von Spurengasen (insbesondere von H_2S) zu klären. Zudem werden - in Ergänzung zum ersten Projektabschnitt - die lokalen Elementvergesellschaftungen auf der Oberfläche der inaktivierten Katalysatoren analysiert. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse über die Zusammensetzung von Spurengasen im Biogas aus unterschiedlichen Gärsubstraten und deren katalysatorschädigende Wirkung sollen Ansatzpunkte für primärseitige Maßnahmen (z. B. Ausschluss bestimmter Co-Fermentate) und Sekundärmaßnahmen (Biogasaufbereitung, Abgasreinigung, Motor- und Prozessoptimierung) zur Reduktion der Abgasemissionen biogasbetriebener Verbrennungsmotoren liefern.

10 Literaturverzeichnis

- Anonymus (1986): Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA-Luft) vom 27. Februar 1986 (GMBI. S. 95, ber. S. 202).
- Anonymus (1990): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz – BImSchG) in der Fassung vom 14. Mai 1990 (BGBl. I S. 880).
- Anonymus (2001): Kabinettsbeschluss vom 12. Dezember 2001 zur Novellierung der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [<http://www.bmu.de>].
- Backhaus et al. (1987): *Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung*. 4. neu bearb. und erw. Aufl., Berlin: Springer-Verlag.
- Bank, M. (2000): *Basiswissen Umwelttechnik - Wasser, Luft, Abfall, Lärm und Umweltrecht*. 4., komplett neu bearb. Aufl., Würzburg: Vogel Buchverlag.
- Baumbach, G. (1990): *Luftreinhaltung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1990.
- Dehl, W., Himmelstoß, A., Holzapfel, J. Keymer, U., Maierhofer, H., Mitterleitner, H., Schilcher, A. und Schmack, C. (1999): Biogaspraxis in Bayern – Praxisbeispiele, Auswertung von Betriebsdaten, Verstromung. Ausarbeitung im Rahmen des LTV-Arbeitskreises „Biogas“. Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan.
- Fachverband Biogas e.V. (2002): Biogas-Nutzung in Deutschland, Entwicklung der Anlagenzahl seit 1992. In: *Neue Energie* 3/2002, S. 70.

- Geschwind, S., Dichtl, N. (2001): Technische Voraussetzung zur Einspeisung von Biogas in das Gasnetz. In: Biogas - mit neuer Energie Ressourcen schonen, 10.Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. (Borken bei Kassel); S. 71-76.
- Glindemann, D., Bergmann, A. (1995): Spontaneous emission of phosphane from animal slurry treatment processing. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin* 198: 49-56.
- Glindemann, D., Stottmeister, U., Bergmann, A. (1996): Free phosphin from anaerobic biosphere. *Environ. Sci. & Poll. Res.* 3: 17-19.
- Heinze, U., Rockmann, G., Sichting, J. (2000): Energetische Verwertung von Biogasen. *Bauen für die Landwirtschaft* Heft 3/2000: 25-29.
- Hochreiter, J. (2002). Motorkennzahlen, Fax vom 17.03.2002, Johann Hochreiter, Hermann in der Steinau 1, 83530 Schnaitsee.
- Huber, S., Mair, K. (1997): Energetische Nutzung von Biogas aus der Landwirtschaft – Untersuchung der Biogaszusammensetzung bei Anlagen aus der Landwirtschaft. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (LfU), Augsburg. [<http://www.bayern.de/lfu/luft/biogas/index.html>]
- IVECO AIFO (1991): 8001. 3.4.5 cylinders. Industrial Engines. Betriebsanleitung.
- Jenbacher (2001): Emissionsminderung bei Deponie-, Klär- und Biogasverstromung. Firmenpapier der Jenbacher Energiesysteme GmbH, Mannheim (unveröffentlicht).
- Kaltschmitt, M., Merten, D. (2001): Biogas als regenerative Energie im Energiesystem. In: Biogas als regenerative Energie – Stand und Perspektiven, VDI-GET Tagung, Hannover, 19./20.06.2001. VDI-Berichte 1620. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf 2001
- Keymer, U., Schilcher, A., Rintelen, H.-M. (1997): Biogas - Ergebnisse einer Umfrage in Bayern. Bayerische Landesanstalt für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, Infanteriestr. 1, 80797 München.

- Köberle, E. (1996): Verstromung von Biogas im BHKW. Vortragsmanuskript für das Seminar Biogas in Luxemburg, Larochette, 15.02.1996.
- Köhler, H. (1997): Stand der Entwicklung von Blockheizkraftwerken mit kleineren Gas-Otto-Motoren. In: Biogas, Verwertung und Aufbereitung; ATV-Schriftenreihe Bd. 9, S. 339-357; Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Hennef.
- Lahmann, E. (1990): Luftverunreinigung, Luftreinhaltung. Eine Einführung in ein interdisziplinäres Wissensgebiet. Berlin, Hamburg: Parey Verlag.
- MAN (2001): Auszug aus der Betriebsanleitung für den Motor MAN D2866 LFZ/290. Fax des MAN Doku-Service vom 05.02.2002.
- Martens, C. (1999): Blockheizkraftwerke für Hofbiogasanlagen: Erfahrungen aus der Praxis – Wohin geht der Trend? In: Medenbach, M. C. (Hrsg.): Jahrbuch 2. Tarnstedter Forum 1999 „Erneuerbare Energie in der Landwirtschaft“. Fachberatung Umweltschutztechnik & EDV, Zeven.
- Mitterleitner, H. (2001): Wirkungsgrade bei der Verstromung von Biogas. In: Tagungsband 10. Jahrestagung „Biogas in der Landwirtschaft“, 12./13.12.2001, Schwäbisch Hall: S. 67-78. Informationszentrum Energie, Landesgewerbeamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Mohr, H. (1997): Technischer Stand und Potentiale von Diesel-/Gasmotoren. *Brennstoff Wärme Kraft* 49: S.49-52 + S.50-53.
- Nisbet, E. G. (1994): Globale Umweltveränderungen. Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten, Klima, Energie, Politik. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Oechsner, H., Weckenmann, D., Buchenau, C. (1999): Erhebung von Daten an landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Baden-Württemberg. Agrartechnische Berichte: Heft 28, Institut für Agrartechnik und Landesanstalt für landwirtschaftliches Maschinen- und Bauwesen der Universität Hohenheim.

- Pellmeyer, J. (1998): Biogasanlage Pellmeyer, Freising. Anlagendokumentation in Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Freising (unveröffentlicht).
- PERKINS (2000): Perkins Serie 1000, Modelle AA bis AH und YA bis YD, Betriebsanleitung Vier- und Sechszylinder-Dieselmotoren für den landwirtschaftlichen und industriellen Einsatz.
- Plautz, M. (1997): Technik der DML Dieselmotorenwerk Leipzig GmbH zur energetischen Verwertung von Biogasen. In: A. Mennerich (Hrsg.): Biogas, Verwertung und Aufbereitung, Bd. 9, ATV-Schriftreihe, Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV), Hennef.
- Pott, J. (2001): Wirkungsgrade verschiedener Motorentypen. In: Biogas - mit neuer Energie Ressourcen schonen, 10. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V. (Borken bei Kassel); S. 52-58.
- Precht, M. (1993): *Bio-Statistik 2*. Hypothesentests – Varianzanalyse – Nichtparametrische Statistik – Analyse von Kontingenztafeln – Korrelationsanalyse – Regressionsanalyse – Zeitreihenanalyse. 5. völlig überarb. Aufl., München: R. Oldenbourg Verlag.
- Prescher, K., Golisch, J., Wichmann, V. (2001): BHKW-Module bei Biogasanlagen – Entwicklungen und zukünftige Trends. In: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Gülzower Fachgespräche: Band 15, S. 87-100; Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Gülzow.
- Schattner, S. (2000): Sammlung von Emissionsdaten von Abgasmessungen an landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising Weihenstephan (unveröffentlicht).
- Schattner, S., Gronauer, A. (2000): Schwefelwasserstoff im Biogas – Probleme bei der Abgasreinigung landwirtschaftlicher Blockheizkraftwerke. Bayerische Landesanstalt für Landtechnik, Freising-Weihenstephan (unveröffentlicht).

- Schnell, H.-J. (2000): Technische Daten von Perkins-Motoren der Leistung von 30 kW bis 80 kW, Stand: Januar 2000. Dipl.-Ing. H.-J. Schnell, Schattbucherstr. 11, 88279 Amtzell.
- Schnell, H.-J. (2002): Möglichkeiten der Verwendung von Pflanzenöl im Zündstrahlmotor. In: Biogas – die universelle Energie von morgen, 11. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Borken bei Kassel: S.127.
- Scholz, W. (1995): Optimierung der Nutzung von Deponiegas in Blockheizkraftwerken - Deponiegasnutzung im Hinblick auf die Ausführungstechnik. In: Rettenberger (Hrsg.): Deponiegas 1995 - Nutzung und Erfassung. Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft Bd. 9, Economica Verlag, Bonn.
- Schulz, H., Eder, B. (2001): *Biogas-Praxis*. 2. überarbeitete Auflage. Ökobuch-Verlag, Freiburg 2001. ISBN 3-922964-59-1
- Stein, R. (1999): Blockheizkraftwerke: ein Leitfaden für den Anwender. Hrsg. Fachinformationszentrum Karlsruhe, Gesellschaft für Wissenschaftlich-Technische Information mbH; 4., erweiterte und völlig überarbeitete Auflage; TÜV-Verlag, Köln 1999.
- TESTO (2000): TESTO 350 Rauchgas-Analysegerät. Bedienungsanleitung mit Wartungsbuch. Testo GmbH & Co., Testostr. 1, 79853 Lenzkirch.
- Von Oheimb, R. M. (1997): Strukturanalyse der landwirtschaftlichen Biogasanlagen für die Bundesrepublik Deutschland. In: Tagung „Biogas in der Landwirtschaft – Planung, Bau und Betrieb“, 07.-10.01.1997, Bauernschule Hohenlohe, Kirchberg a. d. Jagst-Weckelweiler.
- Waerdt, S. (1996): Silicium-Verbindungen im Deponiegas – Auswirkungen und Maßnahmen bei der ottomotorischen Nutzung. In: Rettenberger (Hrsg.): Deponiegas 1995 – Nutzung und Erfassung, Trierer Berichte zur Abfallwirtschaft 9: 25-32, Economica Verlag, Bonn.
- Waerdt, S. (2000): Biogas-Blockheizkraftwerke – Abgasemissionen. Persönliche Mitteilung der Firma Pro2 Anlagentechnik GmbH, H.-M.-Schleyer-Str. 8, 47877 Willich.

Weiland, P. (2001): Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und –erzeugung in Deutschland. In: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, Weimar, 26./27.Oktober 2000. Gülzower Fachgespräche: Band 15. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2001.

Anhang

A Internet-Präsentation der Umfrageergebnisse

Die Ergebnisse der Umfragen wurden in eine Datenbank eingearbeitet, grafisch aufbereitet und werden im Internet auf der Homepage des Bayerischen Landesamt für Umweltschutz unter <http://www.bayern.de/lfu> →Luftreinhaltung →Veröffentlichungen →Umweltforschung (oder direkt <http://www.bayern.de/lfu/luft/veroeffentlich/umweltforsch/>) veröffentlicht.

B Grafiken und Tabellen zu den Emissionsmessungen an BHKW ausgesuchter landwirtschaftlicher Biogasanlagen

B.1 Auswertungen der Einzelmessungen

B.1.1 Betrieb 1 (13 kW_{el} Gas-Otto-Motor)

Anhangstabelle 1: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 1 (5 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	650	3000	3000	3000	-
NO	ppm	644	416	2658	599,5	187,0
NO ₂	ppm	650	15	76	21,0	5,3
NO _x	ppm	643	436	2727	620,6	191,6
SO ₂	ppm	0	-	-	-	-
CO	mg/m ³	650	3302	4193	3835,5	120,0
NO	mg/m ³	644	563	3300	818,5	229,1
NO ₂	mg/m ³	650	30	157	44,0	10,8
NO _x	mg/m ³	643	902	5179	1296,2	359,5
SO ₂	mg/m ³	0	-	-	-	-
O ₂	Vol.-%	650	2,8	6,7	5,3	0,5
CO ₂	Vol.-%	650	12,0	15,2	13,1	0,4
Abgastemp.	°C	628	49,6	54,9	52,1	1,2
qA	%	638	-0,62	1,71	0,57	0,43
λ	-	650	1,16	1,47	1,34	0,04

Anhangstabelle 2: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 1 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	696	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	693	375	446	415,5	10,7
NO ₂	ppm	696	5	16	11,9	2,4
NO _x	ppm	693	388	460	427,4	11,5
SO ₂	ppm	696	0	56	1,8	7,0
CO	mg/m ³	696	3472	3628	3527,3	24,2
NO	mg/m ³	693	469	563	523,7	13,4
NO ₂	mg/m ³	696	10	31	22,9	4,6
NO _x	mg/m ³	693	743	889	824,0	22,1
SO ₂	mg/m ³	696	0	156	5,0	19,3
O ₂	Vol.-%	696	3,7	4,5	4,0	0,1
CO ₂	Vol.-%	696	16,5	17,3	17,0	0,1
Abgastemp.	°C	629	49,7	52,5	50,9	0,6
qA	%	635	-0,05	1,4	0,45	0,28
λ	-	696	1,22	1,27	1,23	0,01

Anhangstabelle 3: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 1 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	538	1324	2988	2153,3	391,1
NO	ppm	840	385	474	426,3	16,7
NO ₂	ppm	841	5	15	11,8	1,4
NO _x	ppm	841	395	487	438,1	16,6
SO ₂	ppm	841	0	7	0,0	0,4
CO	mg/m ³	538	1574	3513	2549,7	454,6
NO	mg/m ³	840	502	597	540,8	19,0
NO ₂	mg/m ³	841	10	29	22,9	2,8
NO _x	mg/m ³	841	788	939	850,2	28,8
SO ₂	mg/m ³	841	0	19	0,1	1,0
O ₂	Vol.-%	841	3,3	4,6	4,1	0,1
CO ₂	Vol.-%	841	16,4	17,7	16,9	0,1
Abgastemp.	°C	776	48,3	49,7	49,0	0,2
qA	%	787	-0,97	0,14	-0,46	0,16
λ	-	841	1,19	1,28	1,24	0,01

B.1.2 Betrieb 2 (22 kW_{el.} Zündstrahler)

Anhangstabelle 4: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	
CO	ppm	855	2128	3000	2836,2	223,7
NO	ppm	889	267	889	453,6	187,2
NO ₂	ppm	891	0	3	0,9	0,6
NO _x	ppm	889	268	890	454,4	187,3
SO ₂	ppm	891	0	146	11,7	28,5
CO	mg/m ³	855	2868	4112	3510,9	340,3
NO	mg/m ³	889	388	989	580,8	168,3
NO ₂	mg/m ³	891	0	7	1,8	1,2
NO _x	mg/m ³	889	596	1515	890,1	257,6
SO ₂	mg/m ³	891	0	344	27,7	66,9
O ₂	Vol.-%	891	0,9	6,6	4,8	2,0
CO ₂	Vol.-%	891	12,1	16,9	13,6	1,7
Abgastemp.	°C	672	164,2	234,5	209,6	16,1
qA	%	784	5,04	9,45	7,41	1,03
λ	-	891	1,04	1,45	1,31	0,15

Anhangstabelle 5: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum		Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	875	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	873	492	905	606,9	90,2
NO ₂	ppm	875	1	3	1,8	0,4
NO _x	ppm	873	493	908	608,6	90,3
SO ₂	ppm	875	0	11	0,0	0,4
CO	mg/m ³	875	3009	3550	3322,6	87,8
NO	mg/m ³	873	602	986	717,7	85,3
NO ₂	mg/m ³	875	2	6	3,3	0,7
NO _x	mg/m ³	873	923	1513	1101,1	130,6
SO ₂	mg/m ³	875	0	26	0,1	1,1
O ₂	Vol.-%	875	1,1	4,1	2,9	0,5
CO ₂	Vol.-%	875	14,6	17,7	15,5	0,9
Abgastemp.	°C	731	140,2	225,5	204,5	13,5
qA	%	781	5,16	10,14	7,13	0,91
λ	-	875	1,05	1,24	1,16	0,03

Anhangstabelle 6: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	973	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	973	393	1384	450,5	90,4
NO ₂	ppm	973	1	4	2,1	0,6
NO _x	ppm	973	395	1386	452,6	90,4
SO ₂	ppm	973	0	5	0,0	0,2
CO	mg/m ³	973	2920	4295	4074,4	146,0
NO	mg/m ³	973	595	1458	651,6	77,9
NO ₂	mg/m ³	973	2	7	4,7	1,3
NO _x	mg/m ³	973	914	2234	1001,7	119,2
SO ₂	mg/m ³	973	0	11	0,0	0,4
O ₂	Vol.-%	973	0,5	7,0	6,3	0,7
CO ₂	Vol.-%	973	11,7	17,2	12,4	0,6
Abgastemp.	°C	762	277,9	305,8	299,6	4,2
qA	%	866	9,77	17,13	13,66	1,99
λ	-	973	1,02	1,5	1,43	0,05

Anhangstabelle 7: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 2 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	905	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	903	509	889	764,1	49,1
NO ₂	ppm	905	1	5	2,6	0,5
NO _x	ppm	903	514	892	766,7	49,1
SO ₂	ppm	905	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	905	3145	5988	3239,7	121,0
NO	mg/m ³	903	764	1089	883,7	49,9
NO ₂	mg/m ³	905	2	16	4,6	1,1
NO _x	mg/m ³	903	1175	1683	1356,6	76,5
SO ₂	mg/m ³	905	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	905	1,9	11,0	2,5	0,5
CO ₂	Vol.-%	905	8,4	16,0	15,5	0,4
Abgastemp.	°C	694	296,2	314,7	305,6	4,3
qA	%	811	10,11	19,02	12,34	0,87
λ	-	905	1,1	2,1	1,13	0,04

B.1.3 Betrieb 3 (50 kW_{el} Zündstrahler)

Anhangstabelle 8: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 3 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	816	1348	2096	1687,3	140,5
NO	ppm	869	535	607	567,2	13,8
NO ₂	ppm	871	1	3	1,6	0,6
NO _x	ppm	870	536	609	568,7	13,8
SO ₂	ppm	865	0	64	39,6	12,8
CO	mg/m ³	816	2128	3263	2634,8	219,5
NO	mg/m ³	869	900	992	949,6	18,2
NO ₂	mg/m ³	871	3	8	4,1	1,4
NO _x	mg/m ³	870	1382	1520	1456,6	27,9
SO ₂	mg/m ³	865	0	237	145,0	47,2
O ₂	Vol.-%	871	7,6	8,9	8,2	0,2
CO ₂	Vol.-%	871	10,1	11,2	10,7	0,2
Abgastemp.	°C	639	267,6	279,7	272,4	3,2
qA	%	758	6,64	16,31	9,75	2,94
λ	-	871	1,57	1,74	1,64	0,03

Anhangstabelle 9: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	662	1052	1891	1345,6	165,3
NO	ppm	734	574	650	617,9	11,8
NO ₂	ppm	735	5	29	17,3	5,1
NO _x	ppm	734	588	665	635,1	12,1
SO ₂	ppm	738	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	662	1869	2842	2314,4	222,7
NO	mg/m ³	734	964	1237	1144,2	43,0
NO ₂	mg/m ³	735	12	86	49,3	15,4
NO _x	mg/m ³	734	1492	1972	1799,6	75,5
SO ₂	mg/m ³	738	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	738	7,5	10,0	9,4	0,4
CO ₂	Vol.-%	738	9,2	11,3	9,7	0,3
Abgastemp.	°C	556	216,3	253,8	231,9	6,6
qA	%	646	7,34	15,22	10,47	2,37
λ	-	738	1,56	1,91	1,81	0,06

Anhangstabelle 10: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	541	869	1652	1323,9	272,4
NO	ppm	608	372	915	516,0	104,4
NO ₂	ppm	609	24	37	33,4	2,5
NO _x	ppm	608	407	947	549,4	102,5
SO ₂	ppm	610	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	541	1799	2971	2553,7	163,6
NO	mg/m ³	608	975	2165	1073,1	76,6
NO ₂	mg/m ³	609	67	147	110,5	24,6
NO _x	mg/m ³	608	1630	3428	1752,3	104,1
SO ₂	mg/m ³	610	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	610	9,1	13,0	10,7	1,6
CO ₂	Vol.-%	610	7,6	11,9	9,8	1,4
Abgastemp.	°C	491	151,3	199,5	174,3	15,5
qA	%	544	7,55	16,38	10,02	1,88
λ	-	610	1,76	2,61	2,10	0,35

Anhangstabelle 11: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 3 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	721	1243	1724	1556,2	85,2
NO	ppm	791	603	854	681,4	22,2
NO ₂	ppm	803	12	44	37,2	4,3
NO _x	ppm	791	631	892	718,7	21,1
SO ₂	ppm	804	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	721	1986	2944	2519,7	156,8
NO	mg/m ³	791	685	1573	1180,8	51,5
NO ₂	mg/m ³	803	19	118	98,4	11,9
NO _x	mg/m ³	791	1087	2514	1905,4	77,1
SO ₂	mg/m ³	804	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	794	8,2	10,1	8,6	0,2
CO ₂	Vol.-%	794	9,2	10,7	10,4	0,2
Abgastemp.	°C	663	175,0	206,7	181,8	6,2
qA	%	747	10,22	13,45	11,50	0,49
λ	-	794	1,64	1,92	1,70	0,03

B.1.4 Betrieb 4 (80 kW_{el} Zündstrahler)

Anhangstabelle 12: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 4 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	747	1860	2268	2064,4	97,8
NO	ppm	890	84	128	100,8	10,3
NO ₂	ppm	889	76	85	81,0	1,7
NO _x	ppm	890	165	207	181,7	9,6
SO ₂	ppm	890	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	747	3741	4682	4238,7	237,5
NO	mg/m ³	890	187	272	221,4	19,6
NO ₂	mg/m ³	889	248	293	272,6	8,8
NO _x	mg/m ³	890	560	672	611,3	24,9
SO ₂	mg/m ³	890	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	890	10,9	11,5	11,3	0,1
CO ₂	Vol.-%	890	8,0	8,5	8,2	0,1
Abgastemp.	°C	708	188,9	198,3	192,1	1,9
qA	%	812	4,2	13,97	6,97	2,94
λ	-	890	2,07	2,21	2,16	0,03

Anhangstabelle 13: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 4 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	565	1493	2351	1842,7	231,6
NO	ppm	710	40	143	101,1	13,7
NO ₂	ppm	705	44	96	77,8	7,8
NO _x	ppm	709	122	221	178,9	12,3
SO ₂	ppm	710	0	6	0,1	0,6
CO	mg/m ³	565	2746	5040	3655,9	636,0
NO	mg/m ³	710	153	852	227,8	89,3
NO ₂	mg/m ³	705	225	781	265,3	65,4
NO _x	mg/m ³	709	526	1844	614,0	186,4
SO ₂	mg/m ³	710	0	87	1,4	9,4
O ₂	Vol.-%	710	10,0	18,5	11,1	1,3
CO ₂	Vol.-%	710	2,1	9,2	8,3	1,1
Abgastemp.	°C	575	125,2	186,7	176,2	15,1
qA	%	636	5,06	21,16	7,21	1,55
λ	-	710	1,92	8,34	2,23	0,93

Anhangstabelle 14: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 4 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum		Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	711	751	1052	874,2	41,1
NO	ppm	847	232	335	277,2	9,1
NO ₂	ppm	847	60	71	63,5	1,8
NO _x	ppm	847	296	402	340,7	9,8
SO ₂	ppm	849	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	711	1060	1790	1417,9	76,7
NO	mg/m ³	847	425	557	482,2	14,1
NO ₂	mg/m ³	847	157	193	169,0	5,3
NO _x	mg/m ³	847	829	1022	906,8	23,8
SO ₂	mg/m ³	849	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	849	6,7	9,3	8,7	0,1
CO ₂	Vol.-%	849	9,8	12,0	10,3	0,1
Abgastemp.	°C	624	181,6	195,1	191,5	3,1
qA	%	751	6,18	11,81	8,01	1,36
λ	-	849	1,47	1,79	1,70	0,02

Anhangstabelle 15: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 4 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	566	1517	2185	1881,2	129,3
NO	ppm	698	81	140	120,1	12,0
NO ₂	ppm	699	58	70	61,6	2,0
NO _x	ppm	698	151	198	181,6	10,7
SO ₂	ppm	701	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	566	2857	4585	3755,6	350,4
NO	mg/m ³	698	181	284	255,4	19,8
NO ₂	mg/m ³	699	180	239	201,1	11,0
NO _x	mg/m ³	698	515	624	591,8	21,8
SO ₂	mg/m ³	701	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	701	10,3	13,0	10,9	0,3
CO ₂	Vol.-%	701	6,7	9,0	8,4	0,2
Abgastemp.	°C	574	50,8	180,3	169,8	15,1
qA	%	646	3,44	13,8	13,16	1,04
λ	-	701	1,96	2,61	2,09	0,06

B.1.5 Betrieb 5 (132 kW_{el} Zündstrahler)

Anhangstabelle 16: Auswertung Messreihe 1 / Betrieb 5 (6 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	573	459	619	529,4	37,4
NO	ppm	713	548	696	646,6	25,0
NO ₂	ppm	717	1	12	2,8	2,3
NO _x	ppm	714	555	697	649,4	23,6
SO ₂	ppm	0	-	-	-	-
CO	mg/m ³	573	613	841	716,2	53,3
NO	mg/m ³	713	822	998	937,6	31,1
NO ₂	mg/m ³	717	2	27	6,2	5,1
NO _x	mg/m ³	714	1277	1529	1440,5	44,6
SO ₂	mg/m ³	0	-	-	-	-
O ₂	Vol.-%	720	6,0	6,8	6,2	0,1
CO ₂	Vol.-%	720	11,9	12,6	12,4	0,1
Abgastemp.	°C	346	429,8	437,5	434,1	2,5
qA	%	565	11,91	21,37	17,03	3,46
λ	-	720	1,4	1,48	1,42	0,01

Anhangstabelle 17: Auswertung Messreihe 2 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	841	299	1235	544,1	82,8
NO	ppm	861	147	772	608,6	61,2
NO ₂	ppm	861	2	26	7,1	4,2
NO _x	ppm	861	153	785	615,6	62,0
SO ₂	ppm	862	0	37	21,9	10,6
CO	mg/m ³	841	655	3868	931,1	222,1
NO	mg/m ³	861	526	1643	1103,3	93,3
NO ₂	mg/m ³	861	8	131	20,0	12,7
NO _x	mg/m ³	861	859	2547	1707,9	147,4
SO ₂	mg/m ³	862	0	143	85,7	39,9
O ₂	Vol.-%	863	7,4	19,0	9,1	1,0
CO ₂	Vol.-%	863	1,7	11,4	9,9	0,8
Abgastemp.	°C	560	289,5	325,7	309,5	9,7
qA	%	781	4,52	35,06	12,08	4,48
λ	-	863	1,54	10,65	1,80	0,48

Anhangstabelle 18: Auswertung Messreihe 3 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	966	435	1543	633,6	134,5
NO	ppm	997	208	897	566,4	74,4
NO ₂	ppm	991	15	74	22,3	5,7
NO _x	ppm	994	230	941	588,9	74,5
SO ₂	ppm	998	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	966	748	4749	1172,9	340,0
NO	mg/m ³	997	829	1794	1107,8	104,3
NO ₂	mg/m ³	991	46	237	67,4	19,0
NO _x	mg/m ³	994	1366	2979	1762,7	160,8
SO ₂	mg/m ³	998	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	998	8,0	16,5	10,1	0,7
CO ₂	Vol.-%	998	3,8	10,9	9,2	0,6
Abgastemp.	°C	624	263,8	276,7	270,6	2,4
qA	%	898	7,69	27,89	13,54	2,40
λ	-	998	1,62	4,63	1,93	0,17

Anhangstabelle 19: Auswertung Messreihe 4 / Betrieb 5 (7 Einzelmessungen)

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	989	533	2332	817,7	212,5
NO	ppm	1020	311	998	536,9	132,2
NO ₂	ppm	1020	14	85	26,5	12,3
NO _x	ppm	1020	352	1058	563,4	140,9
SO ₂	ppm	1023	0	5	0,1	0,6
CO	mg/m ³	989	899	6042	1539,0	563,1
NO	mg/m ³	1020	806	1972	1067,0	280,7
NO ₂	mg/m ³	1020	40	289	81,8	42,1
NO _x	mg/m ³	1020	1320	3201	1714,2	462,0
SO ₂	mg/m ³	1023	0	23	0,5	2,6
O ₂	Vol.-%	1023	8,4	13,5	10,2	0,7
CO ₂	Vol.-%	1023	6,3	11,7	9,5	0,8
Abgastemp.	°C	674	265,7	282,8	275,7	4,0
qA	%	932	4,86	26,64	12,46	3,38
λ	-	1023	1,66	2,81	1,95	0,14

B.2 Zusatzmessungen

Anhangstabelle 20: Auswertung der Einzelmessung eines 45 kW-Gasmotors

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	81	262	270	265,5	2,2
NO	ppm	85	886	1000	934,1	30,5
NO ₂	ppm	88	24	41	34,1	5,4
NO _x	ppm	85	915	1040	968,5	34,9
SO ₂	ppm	88	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	81	298	304	300,6	1,6
NO	mg/m ³	85	1083	1208	1133,9	33,0
NO ₂	mg/m ³	88	47	76	63,3	9,7
NO _x	mg/m ³	85	1711	1922	1798,5	57,8
SO ₂	mg/m ³	88	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	88	3,2	4,1	3,4	0,1
CO ₂	Vol.-%	88	16,9	17,8	17,6	0,1
Abgastemp.	°C	84	56,2	65,8	59,2	2,6
qA	%	88	2,46	2,95	2,61	0,13
λ	-	88	1,18	1,24	1,19	0,01

Anhangstabelle 21: Auswertung der Einzelmessung eines 75 kW-Gasmotors, Einzelmessung Sommer

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	5	124	143	137,6	7,9
NO	ppm	5	2262	2616	2373,8	146,8
NO ₂	ppm	5	111	118	113,6	3,0
NO _x	ppm	5	2373	2734	2487,4	149,7
SO ₂	ppm	5	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	5	197	262	242,4	26,2
NO	mg/m ³	5	4430	4525	4460,2	37,3
NO ₂	mg/m ³	5	307	336	327,1	12,0
NO _x	mg/m ³	5	7102	7260	7150,6	62,7
SO ₂	mg/m ³	5	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	5	8,4	10,1	9,6	0,7
CO ₂	Vol.-%	5	9,1	10,6	9,6	0,6
Abgastemp.	°C	5	153,6	192,8	174,8	15,5
qA	%	5	4,07	7,46	6,00	1,36
λ	-	5	1,67	1,93	1,85	0,11

Anhangstabelle 22: Auswertung der Einzelmessung eines 75 kW-Gasmotors, Einzelmessung Herbst

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	11	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	11	493	592	536,4	32,1
NO ₂	ppm	11	3	3	3,0	0,0
NO _x	ppm	11	495	595	539,1	32,3
SO ₂	ppm	11	48	97	72,2	16,3
CO	mg/m ³	11	5046	5865	5485,2	267,1
NO	mg/m ³	11	1017	1069	1048,6	19,6
NO ₂	mg/m ³	11	8	10	9,0	0,4
NO _x	mg/m ³	11	1565	1643	1612,4	29,4
SO ₂	mg/m ³	11	216	418	309,6	73,3
O ₂	Vol.-%	11	9,1	10,8	10,0	0,5
CO ₂	Vol.-%	11	8,6	10,0	9,2	0,5
Abgastemp.	°C	11	158,9	198,3	183,3	12,9
qA	%	11	9,69	12,48	11,52	0,81
λ	-	11	1,77	2,05	1,92	0,09

Anhangstabelle 23: Auswertung der Einzelmessung eines 160 kW-Zündstrahlmotors

Messgröße	Einheit	n	Minimum	Maximum	Mittelwert	Std.-abw.
CO	ppm	32	3000	3000	3000,0	0,0
NO	ppm	32	63	66	64,6	0,8
NO ₂	ppm	32	16	19	18,2	0,7
NO _x	ppm	32	79	84	82,8	1,0
SO ₂	ppm	32	0	0	0,0	0,0
CO	mg/m ³	32	7335	7509	7410,6	52,3
NO	mg/m ³	32	167	174	171,1	1,9
NO ₂	mg/m ³	32	65	78	73,7	3,2
NO _x	mg/m ³	32	320	341	335,4	4,6
SO ₂	mg/m ³	32	0	0	0,0	0,0
O ₂	Vol.-%	32	12,8	13,0	12,9	0,1
CO ₂	Vol.-%	32	5,7	5,8	5,8	0,0
Abgastemp.	°C	32	260,6	263,5	262,6	0,7
qA	%	32	21,79	22,43	22,14	0,19
λ	-	32	2,57	2,63	2,59	0,02

Anlage 1

Fragebögen zur Ermittlung des technischen Standes landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern (Umfrage I und II)

Fragebogen zur Erfassung von Eckdaten landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern

I. Anlagendaten

1) In welchem Jahr wurde Ihre Anlage errichtet bzw. erweitert?

Baujahr: _____

Erweiterung (Jahr): _____

2) Nach welchem Verfahren arbeitet Ihre Anlage?

(bitte nur eine Antwort ankreuzen)

Einstufiges Verfahren
(Hydrolyse/Versäuerung und Methanbildung laufen räumlich zusammen ab)

Zweistufiges Verfahren
(Hydrolyse/Versäuerung und Methanbildung sind räumlich getrennt)

3) Wie hoch sind Gärtemperatur und Verweilzeit?

Gärtemperatur: _____ °C

Verweilzeit: _____ Tage

4) Wie erfolgt die Beschickung?

(bitte nur eine Antwort ankreuzen)

Quasi-kontinuierlich
(ein- bis mehrmalige Zugabe/Tag)

Kontinuierlich
(konstanter Einstrom)

5) Ist eine Vorrube vorhanden?

Nein

Ja. Größe: _____ m³

6) Wird das Material, das in Ihre Anlage kommt, hygienisiert?

(mehrere Antworten möglich)

Nein, keine Hygienisierung notwendig

bei Anlieferung bereits hygienisiert

Thermische Vorbehandlung

Thermophile Prozessführung (55°C)

7) Welches Material wird in Ihrer Anlage verarbeitet?

(mehrere Antworten möglich)

Gülle / Mist

Grassilage

Maissilage

Rüben

Stroh

Schlempe

Trester

Treber

Molke

Gemüseabfälle

Ölsaatenrückstände

Bioabfälle (Kommunal)

Grünschnitt / Mähgut

Flotatschlamm

Fettabscheiderrückstand

Magen-/Panseninhalt

Speiseabfälle (Großküche)

Sonstige: _____

Sonstige: _____

Sonstige: _____

Sonstige: _____

Sonstige: _____

8) Welche Tierarten liefern in welchem Umfang (GV) Inputmaterial?

(Bitte entsprechende Tierart ankreuzen, wobei die erste Zeile jeweils den Gesamtbesatz des Betriebes angibt, die folgenden Angaben diejenige GV angeben, deren Exkremente tatsächlich in die Anlage gelangen. Mehrere Antworten möglich)

<input type="checkbox"/>	Rinder	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Gülle	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Mist	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Schweine	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Gülle	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Mist	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Hühner/Broiler	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Gülle	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Mist	_____	GV
<input type="checkbox"/>	Sonstige	_____	GV
	_____	_____	GV
	_____	_____	GV
	_____	_____	GV

9) Welche Mengen werden jährlich in der Anlage verarbeitet?

(Angabe in t oder m³, nicht zutreffendes bitte streichen)

Mist/Gülle: _____ t oder m³
Co-Fermentate: _____ t oder m³
Nachw. Rohstoffe: _____ t oder m³

10) Wie viele Fermenter sind im Einsatz?

Zahl der Fermenter: _____

11) Wie groß ist das Fermenter-gesamtvolumen?

(ohne Nachgärbehälter!)

Gesamtvolumen: _____ m³

12) Welche Eigenschaften treffen auf den/die Hauptfermenter zu?
(mehrere Antworten möglich)

Liegend
 Stehend

Beton
 Stahl
 Sonstiges Material

Eckig
 Zylindrisch

Mechanisches Rührwerk
 Hydraulisches Rührwerk
 Pneumatisches Rührwerk
 Schwerkraftmischung

Wandheizung
 Fußbodenheizung
 Rührwellenheizung
 Außenliegender Wärmetauscher

13) Wieviel Biogas kann der Gasspeicher aufnehmen?

Gasspeicher: _____ m³

14) Welche Bauform entspricht Ihrem Gasspeicher?

(bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

Haube
(Gasspeicherung direkt über dem Substrat bzw. Gärrest (z.B. Folienhaube))

Gassack
(Gasspeicherung in externer Einrichtung, z.B. Folienschlauch)

15) **Welchen Behandlungen wird das Biogas unterzogen?**
(mehrere Antworten möglich)

- Entwässerung
- Entschwefelung
- Schwebstoffentfernung
- Entfernung von CO₂

16) **Falls entschwefelt wird, auf welchem Prinzip beruht die Entschwefelung?**
(bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

- Einblasen von Luft
(biologisches Verfahren)
- Raseneisenerz
(Durchleitung durch Eisenhydroxid)
- Eisenchlorid-Zugabe
(Ausfällung als Fe₂S₃)
- Aktivkohle-Filterung
- Nasse Gaswäsche

II. Biogasnutzung/Motor

17) **Wie wird das Biogas verwertet?**

- rein thermische Nutzung
(Wasser, Heizung, Trocknung,...)
- Kraft-Wärme-Kopplung
(BHKW)
- mit Wärmenutzung
 - Wohnhausheizung
 - Sonstige Wärmenutzung
- ohne Wärmenutzung
(nur Fermenterbeheizung)

18) **Wieviel Strom wird jährlich erzeugt?**

Strommenge: _____ kWh

19) **Falls bekannt, wie hoch sind die Gehalte und Schwankungsbreiten folgender Biogasinhaltsstoffe?**

Methan: (Ø) _____ %

(CH₄) Von _____% bis _____ %

Schwefelwasserstoff: (Ø) _____ ppm

(H₂S) Von _____ ppm bis _____ ppm

20) **Wird die jährliche Biogasmenge durch einen Zähler erfaßt?**

- Nein
- Ja. Menge: _____ m³

21) **Welche und wie viele BHKWs werden eingesetzt?**

(Tragen Sie bei Motortyp bitte folgenden Code ein:

1 = Benzinmotor Gas-Otto

2 = Dieselmotor Zündstrahl)

	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3
Motortyp (1 oder 2)			
Baujahr			
Leistung (kW _{elektr.})			
Elektr. Wirkungsgrad	%	%	%
Therm. Wirkungsgrad	%	%	%
Jährliche Betriebst.	h	h	h

22) Welche Herstellerangaben zu Abgaswerten liegen für die einzelnen BHKWs vor?

	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3
NO _x			
CO			
Gesamt-C			
Staub			
Ruß			

23) Wird ein **funktionsfähiger Oxidationskatalysator** eingesetzt?

- Nein
 Ja

24) Wie hoch ist die Netzanschlussleistung?

Anschlußleistung: _____ kW

25) Wie hoch ist der Zündölanteil?

Zündölanteil: _____ %

26) In welchen Intervallen erfolgt ein Ölwechsel?

nach _____ Betriebsstunden

III. Gärrest

27) Ist ein Endlager vorhanden?

- Nein
 Ja. Größe: _____ m³

28) Ist das Endlager, falls vorhanden, abgedeckt?

- Nein
 Ja

29) Welchem Zweck wird der Gärückstand zugeführt?
 (bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

- Direkte Ausbringung
 Kompostierung
 Verbrennung
 Sonstiges: _____

30) Mit welcher Technik erfolgt gegebenenfalls eine direkte Ausbringung?

- Schleppschuh/-schlauch
 Prallteller
 Sonstiges: _____

IV. Betriebsdaten

31) Wie groß ist Ihre gesamte Betriebsfläche, inklusive Wirtschaftsflächen, Pachtland und Gebäudeflächen?

Betriebsfläche: _____ ha

32) Wie ist Ihre Betriebsform?
 (bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

- Marktfruchtbetrieb
 (Getreide, Zuckerrüben,...)
 Futterbaubetrieb
 (Milchkühe, Mastrinder, Pferde,...)
 Veredelungsbetrieb
 (Mastschweine, Zuchtsauen,...)
 Dauerkulturbetrieb
 (Obst, Wein, Hopfen,...)

33) Betriebsart Biogasanlage?

- Einzelbetrieblich
 Gemeinschaftsanlage

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Fragebogen zur Erfassung von Eckdaten landwirtschaftlicher Biogasanlagen in Bayern

I. Anlagendaten

1) In welchem Jahr wurde Ihre Anlage errichtet bzw. erweitert?

Baujahr _____
 Erweiterung (Jahr) _____

2) Wie wurde die Anlage genehmigt?

Genehmigung nach Baurecht
 Genehmigung nach BImSchG

3) Wurden im Genehmigungsbescheid/Baubescheid Abgasgrenzwerte für Luftschadstoffe gesetzt?

Nein
 Ja

4) Wenn ja, wie lauten die gesetzten Grenzwerte?

Abgaskomponente	Grenzwert	Einheit
NO _x		
CO		
Ges.-C		
SO _x		
Staub		
Ruß		
Sonstige, welche?		

5) Wer hat die Anlage geplant?

Planungsbüro
 Komplettanlagenhersteller
 Selbst
 Sonstige, wenn ja, wer?

6) Wer hat die Anlage erstellt?

Komplettanlagenhersteller
 Eigenbau
 teilweise Eigenbau /teilweise Komponentenhersteller
 Sonstige, wenn ja, wer?

7) Nach welchem Verfahren arbeitet Ihre Anlage?

(bitte nur eine Antwort ankreuzen)

- Einstufiges Verfahren
 (Hydrolyse/Versäuerung und Methanbildung laufen räumlich zusammen ab)
- Zweistufiges Verfahren
 (Hydrolyse/Versäuerung und Methanbildung sind räumlich getrennt)

8) Wie hoch sind Gärtemperatur und Verweilzeit?

Gärtemperatur _____ °C
mittlere Verweilzeit _____ Tage

9) Wie erfolgt die Beschickung?
(bitte nur eine Antwort ankreuzen)

- Quasi-kontinuierlich
(ein- bis mehrmalige Zugabe/Tag)
- Kontinuierlich
(konstanter Einstrom)

10) Wie groß (m³/t) sind die Einzelgaben bei quasi-kontinuierlicher Beschickung?

Zahl der Einzelgaben/Tag _____ pro Tag
Substrat pro Einzelgabe _____ t oder m³

(unzutreffendes bitte streichen)

11) Ist eine Vorgrube vorhanden?

- Nein
- Ja. Größe: _____ m³

12) Falls ja, ist die Vorgrube offen oder geschlossen?

- offen
- geschlossen

13) Hat die Vorgrube eine Misch-/Zerkleinerungseinrichtung?

- ja
- nein

14) Wenn ja, welche Art der Misch-/Zerkleinerungseinrichtung ist vorhanden?
(Beschreibung)

15) Werden vor der Verarbeitung Störstoffe entfernt?

- Nein
- Ja. Wie?

16) Wird das Material, das in Ihre Anlage kommt, hygienisiert?
(mehrere Antworten möglich)

- Nein, keine Hygienisierung notwendig
- bei Anlieferung bereits hygienisiert
- Thermische Vorbehandlung
- Thermophile Prozessführung (55°C)

17) Welches Material wird in Ihrer Anlage verarbeitet?

(bei den Mengenangaben bitte die Einheit, t oder m³ pro Jahr, mit angeben)

Art	Menge	Einheit (t/a oder m ³ /a)
Wirtschaftsdünger		
Gesamt Wi.- Dünger		
Co-Fermentate		
Gesamt Co- Fermentate		
nachwachsende Rohstoffe		
Gesamt Na- WaRo		

18) Wenn Co-Fermentate/NaWaRos eingesetzt werden, ist der Einsatz jahreszeitabhängig?

Ja
 Nein

19) Wenn ja, welche Co-Substrate/NaWaRos werden wann eingesetzt?

Stoff	Einsatzzeitraum (Monat)

20) Wie viele Fermenter sind im Einsatz?

Zahl der Fermenter: _____

21) Wie groß ist das Volumen der einzelnen Fermenter?
(ohne Nachgärbehälter!)

Fermenter 1: _____ m³
 Fermenter 2: _____ m³
 Fermenter 3: _____ m³
 Fermenter 4: _____ m³
Summe _____ m³

22) Welche Eigenschaften treffen auf den/die Hauptfermenter zu?
(mehrere Antworten möglich)

Liegend
 Stehend
 Beton
 Stahl
 Sonstiges Material, welches:

-
- Eckig
 Zylindrisch
 Sonstige Form, welche:
-

- Mechanisches Rührwerk
 Hydraulisches Rührwerk
 Pneumatisches Rührwerk
 Schwerkraftmischung

- Wandheizung
 Fußbodenheizung
 Rührwellenheizung
 Außenliegender Wärmetauscher
 Sonstige Heizung, welche?
-

23) Art der Fermenterabdeckung?

- Betondecke
 Folie
 liegender Fermenter
 Sonstige, welche:
-

24) Wie oft wird im Fermenter homogenisiert (gerührt)?

mal pro Tag

25) Dauer der Homogenisierung/des Rührens?

min pro Rührvorgang

26) Welche Bauform hat Ihr Gasspeicher?

(bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

- Haube
(Gasspeicherung direkt über dem Substrat bzw. Gärrest (z.B. Folienhaube))
 Gassack
(Gasspeicherung in externer Einrichtung, z.B. Folienschlauch)

27) Wie viel Biogas kann der Gasspeicher aufnehmen?

Gasspeicher: _____ m³

28) Aus welchem Material ist der Gasspeicher erstellt?

Der Gasspeicher besteht aus:

29) Ist der Gasspeicher mit einer Überdrucksicherung ausgestattet?

- Ja
 Nein

30) Welchen Behandlungen wird das Biogas unterzogen?

(mehrere Antworten möglich)

- Entwässerung
 Entschwefelung
 Schwebstoffentfernung
 Entfernung von CO₂

31) Falls entschwefelt wird, auf welchem Prinzip beruht die Entschwefelung?

- Einblasen von Luft
(biologische Entschwefelung)
- Raseneisenerz
(Durchleitung durch Eisenhydroxid)
- Eisenchlorid-Zugabe
(Ausfällung als Fe_2S_3)
- Aktivkohle-Filterung
(Durchleitung durch Aktivkohle)
- Nasse Gaswäsche

32) Falls das Biogas entwässert wird, wie erfolgt die Entwässerung

- Kühlfalle
- Sonstiges, wie:

33) Wird die jährliche Biogasmenge durch einen Zähler erfasst?

- Nein
- Ja _____ $m^3/Jahr$

34) Falls bekannt, wie hoch sind die Gehalte und Schwankungsbreiten folgender Biogasinhaltsstoffe?

Methan	Ø	_____	%
(CH_4)	von _____ bis _____	_____	%
Kohlendioxid	Ø	_____	%
(CO_2)	von _____ bis _____	_____	%
Schwefelwasserstoff	Ø	_____	ppm
(H_2S)	von _____ bis _____	_____	ppm

II. Biogasnutzung/Motor

35) Wie wird das Biogas verwertet?

- rein thermische Nutzung
(Wasser, Heizung, Trocknung,...)
- Kraft-Wärme-Kopplung
(BHKW)
- mit Wärmenutzung
 - Wohnhausheizung
 - Sonstige Wärmenutzung, welche?
- ohne Wärmenutzung
(nur Fermenterbeheizung)

36) Wie viel Strom wird jährlich erzeugt?

Strommenge: _____ kWh/a

37) Welche und wie viele BHKWs werden eingesetzt?

(Tragen Sie bei Motortyp bitte folgenden Code ein:

- 1 = Benzinmotor Gas-Otto
- 2 = Dieselmotor Zündstrahl)

	BHKW 1	BHKW 2	BHKW 3
Motortyp (1 oder 2)			
Baujahr			
Leistung ($kW_{elektr.}$)			
elektr. Wirkungsgrad	%	%	%
therm. Wirkungsgrad	%	%	%

elektr. Anschlussleistung	kW	kW	kW
Jährliche Betriebst.	h/a	h/a	h/a

(bitte die Angaben auf den Typenschildern der jeweiligen Aggregate angeben)

38) Welche Herstellerangaben zu Abgaswerten liegen für die einzelnen BHKWs vor?

	BHKW 1		BHKW 2		BHKW 3	
	Menge	Einheit	Menge	Einheit	Menge	Einheit
NO _x						
CO						
Ges.-C						
Staub						
Ruß						

39) Sind die in Frage 38) angegebenen Werte vom Hersteller beim Einsatz von Biogas garantiert?

Ja
 Nein

40) Wird ein funktionsfähiger Oxidationskatalysator eingesetzt?

Nein
 Ja

41) Wenn ja, wer ist/sind der/die Hersteller des/der Katalysator(en)?

42) Wie hoch ist die Standzeit des/der Katalysator(en)?

(Einheit: Tag, Monat, Jahr)

	Einheit
Standzeit Kat BHKW 1	
Standzeit Kat BHKW 2	
Standzeit Kat BHKW 3	
Standzeit Kat BHKW 4	

43) Wurden vom Kat-/BHKW-Hersteller Garantien auf den Kat gegeben?

Nein
 Ja, wie lange?
 BHKW 1 _____ Jahre
 BHKW 2 _____ Jahre
 BHKW 3 _____ Jahre
 BHKW 4 _____ Jahre

44) Wurden an Ihrem BHKW Abgasemissionsmessungen durchgeführt?

Nein
 Ja

45) Wenn ja, welche Abgaskomponenten wurden bestimmt?

Abgaskomponente	Ja	Nein
NO _x (Stickoxide)		

CO (Kohlenmonoxid)		
Ges.-C (Gesamtkohlenstoff)		
SO _x (Schwefeloxide)		
Formaldehyd		
HC (Kohlenwasserstoffe)		
Phenol		
Acetaldehyd		
Staub		
Ruß		
Sonstige, welche?		

46) Wie hoch waren die Emissionen der einzelnen Komponenten?

Abgaskomponente	Menge	Einheit (ppm / Vol.-%)
NO _x		
CO		
Ges.-C		
SO _x		
Formaldehyd		
HC (Kohlenwasserstoffe)		
Phenol		
Acetaldehyd		
Staub		
Ruß		
Sonstige, welche?		

47) Wie hoch ist die elektrische Netzanschlussleistung?

Anschlussleistung _____ kW

48) Wie hoch ist der Zündölanteil?
(Bei Zündstrahlmotoren)

Zündölanteil _____ %

49) Wie hoch ist der Zündölverbrauch?
(Bei Zündstrahlmotoren)

Zündölverbrauch _____ l/Jahr

50) Welche Kraftstoffsorte wird eingesetzt?
(Bei Zündstrahlmotoren)

Kraftstoffsorte _____

51) In welchen Intervallen erfolgt ein Ölwechsel?

nach _____ Betriebsstunden

52) Welches Motorenöl wird eingesetzt?
(Spezifikation)

53) Wie hoch ist der jährliche Altölanfall?

Altölanfall _____ l/Jahr

54) Vorlauf-/Rücklauftemperatur des Kühlwassers der BHKW's

Vorlauftemp. BHKW 1 _____ °C

Rücklauftemp. BHKW 1 _____ °C

Vorlauftemp. BHKW 2 _____ °C

Rücklauftemp. BHKW 2 _____ °C
 Vorlauftemp. BHKW 3 _____ °C
 Rücklauftemp. BHKW 3 _____ °C
 Vorlauftemp. BHKW 4 _____ °C
 Rücklauftemp. BHKW 4 _____ °C

55) Abgastemperatur der BHKW's

Abgastemp. BHKW 1 _____ °C
 Abgastemp. BHKW 2 _____ °C
 Abgastemp. BHKW 3 _____ °C
 Abgastemp. BHKW 4 _____ °C

56) Wurden an Ihren BHKW's Wirkungsgradmessungen durchgeführt?

(elektr./therm./gesamter Wirkungsgrad)

Nein
 Ja

57) Wenn ja, welche Wirkungsgrade wurden ermittelt?

(Verhältnis von im Biogas enthaltener Energie zu produzierter elektrischer Energie)

therm. Wirkungsgrad: _____ %
 elektr. Wirkungsgrad: _____ %
 Gesamtwirkungsgrad: _____ %

58) Sind an Ihren BHKW's Wärmemengenzähler installiert?

Nein
 Ja

59) Wenn ja, welche Wärmemengen fallen jährlich an?

Wärmemenge BHKW 1 _____ kWh/a
 Wärmemenge BHKW 2 _____ kWh/a
 Wärmemenge BHKW 3 _____ kWh/a
 Wärmemenge BHKW 4 _____ kWh/a
 Summe _____ kWh/a

60) Wie hoch sind die Ausfallzeiten der BHKW's (inkl. Wartungsarbeiten)?

BHKW 1 _____ h/Jahr
 BHKW 2 _____ h/Jahr
 BHKW 3 _____ h/Jahr
 BHKW 4 _____ h/Jahr

61) Häufigkeit und Umfang der durchgeführten Wartungsarbeiten?

Motorölwechsel _____ × jährlich
 Zündkerzenwechsel _____ × jährlich
 Luftfilterreinigung _____ × jährlich
 Einspritzdüsenwechsel _____ × jährlich
 Motoreinstellung _____ × jährlich

62) Wesentliche Ursachen für Betriebsstörungen?

(Kurze Beschreibung)

III. Gärrest

63) Ist ein Endlager vorhanden?

<input type="checkbox"/>	Nein
<input type="checkbox"/>	Ja Größe _____ m ³

64) Ist das Endlager, falls vorhanden, abgedeckt?

<input type="checkbox"/>	Nein
<input type="checkbox"/>	Ja

65) Wird der Gärrest untersucht?

<input type="checkbox"/>	Nein
<input type="checkbox"/>	Ja, auf:
<input type="checkbox"/>	Nährstoffe
<input type="checkbox"/>	Störstoffe
<input type="checkbox"/>	Schadstoffe
<input type="checkbox"/>	TS-Gehalt
<input type="checkbox"/>	Sonstiges

66) Welchem Zweck wird der Gärückstand zugeführt?

(bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

<input type="checkbox"/>	Direkte Ausbringung
<input type="checkbox"/>	Kompostierung
<input type="checkbox"/>	Verbrennung
<input type="checkbox"/>	Sonstiges:

67) Mit welcher Technik erfolgt gegebenenfalls eine direkte Ausbringung?

<input type="checkbox"/>	Schleppschuh/-schlauch
<input type="checkbox"/>	Prallteller
<input type="checkbox"/>	Sonstiges:

IV. Betriebsdaten

68) Wie groß ist Ihre gesamte Betriebsfläche, inklusive Wirtschaftsflächen, Pachtland und Gebäudeflächen?

Betriebsfläche _____ ha

69) Wie ist Ihre Betriebsform?

(bitte nur 1 Antwort ankreuzen)

<input type="checkbox"/>	Marktfruchtbetrieb (Getreide, Zuckerrüben,...)
<input type="checkbox"/>	Futterbaubetrieb (Milchkühe, Mastrinder, Pferde,...)
<input type="checkbox"/>	Veredelungsbetrieb (Mastschweine, Zuchtsauen,...)
<input type="checkbox"/>	Dauerkulturbetrieb (Obst, Wein, Hopfen,...)

70) Betriebsart Biogasanlage?

<input type="checkbox"/>	Einzelbetrieblich
<input type="checkbox"/>	Gemeinschaftsanlage

Anlage 2

LfU-Papier "Biogasanlagen mit Verbrennungsmotoren < 1 MW Feuerungswärmeleistung – Anforderungen zur Luftreinhaltung"

Biogasanlagen mit Verbrennungsmotoren < 1 MW Feuerungswärmeleistung – Anforderungen zur Luftreinhaltung –

Franz Reitberger (Tel.: 0821/9071-5205; e-mail: franz.reitberger@lfu.bayern.de)

Bernhard Zell (Tel.: 0821/9071-5206; e-mail: bernhard.zell@lfu.bayern.de)

Die Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV) wurde im Rahmen des Artikelgesetzes vom 27. Juli 2001 geändert. Für die immissionsschutzrechtliche Genehmigung von Biogasanlagen wurde im Anhang der Verordnung die Leistungsschwelle in Ziffer 1.4 b Spalte 2 „Verbrennungsanlagen für den Einsatz von Biogas“ von 350 kW auf 1 MW Feuerungswärmeleistung heraufgesetzt. Gleichzeitig wurde in Ziffer 8.6 für Anlagen zur biologischen Behandlung für nicht besonders überwachungsbedürftige Abfälle eine Mengenschwelle von 10 Tonnen je Tag eingeführt. Dies kann dazu führen, dass Biogasanlagen auch < 1 MW Feuerungswärmeleistung immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig sind. Nachfolgend sind die auch unabhängig vom Genehmigungsverfahren (immissionsschutzrechtlich, baurechtlich) aus der Sicht der Luftreinhaltung einzuhaltenden Anforderungen und Rahmenbedingungen entlang der Prozesskette der Biogaserzeugung in Stichpunkten dargestellt.

1. Substratlagerung

Die Festlegung der speziellen Anforderungen an die Lagerung ist stoffspezifisch in Abhängigkeit der eingesetzten Substrate bzw. Kosubstrate und deren Eigenschaften sowie der örtlichen Gegebenheiten vorzunehmen.

- ⇒ Z.B. sollten Altfette, Speisereste in geschlossene Tanks (siehe auch Hygieneanforderungen) gelagert werden.

2. Vorgruben und Substrat-Eingabetrichter

- ⇒ Durch Abdeckung sind geruchsintensive Emissionen möglichst zu vermeiden (gegebenenfalls mittels verschließbarer Zugabeöffnungen).

3. Zugabe von nachwachsenden Rohstoffen (z.B. Grassilage)

- ⇒ Die Zugabe sollte möglichst mit Förderschnecken, Stempelpressen, usw. erfolgen
- ⇒ und möglichst nicht mit Einspülverfahren (Geruchsemissionen durch Gülle-Spülstrahl, insbesondere bei benachbarter Wohnbebauung).

4. Gasspeicher

Das Austreten von Biogas ist wegen Geruchs- und Klima-relevanter Emissionen (CH₄) auch bei einem Ausfall eines Motors sichergestellt zu vermeiden, durch z.B.:

- ⇒ abgestimmte Auslegung (Verhältnis Speichervolumen zu Gasproduktion),
- ⇒ Einsatz eines Reservemotors,
- ⇒ gegebenenfalls - sofern eine Gasverwertung vorübergehend und kurzfristig nicht möglich sein sollte - durch den Einsatz von Gasfackeln. Der Einsatz eines Reservemotors zur Gasnutzung ist aufgrund der energetischen Verwertung des Biogases aus gesamtökologischer Sicht aber einer Fackel vorzuziehen.

5. Gasreinigung

Die Installation einer geeigneten und auf die Betriebsbedingungen der Anlage hin optimierten Gasreinigungseinrichtung für das produzierte Biogas zur Vermeidung der Schädigung von Motoren, Katalysatoren und Wärmetauschern durch saure Biogasbestandteile wie Schwefelwasserstoff ist grundsätzlich zu fordern wie z.B. durch:

- ⇒ abgestimmte Luftzudosierung in den Fermenterraum und Einbau ausreichender Besiedelungsflächen für die Entschwefelungsbakterien (mikrob. Abbau von H₂S),
- ⇒ biologische Entschwefelung (Biogaswäscher) und
- ⇒ Entschwefelung durch Raseneisenerz, Aktivkohlefilter usw..

6. Emissionsbegrenzung

Anlehungsweise können im Einzelfall auch die Grenzwerte von immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftigen Biogasmotoranlagen (> 1 MW Feuerungswärmeleistung) herangezogen werden. Bei baurechtlich zu genehmigenden Anlagen werden folgende Emissionsbegrenzungen empfohlen (O₂-Bezug 5 %):

- ⇒ Staub: Zielwert: 20 mg/m³; Grenzwert 50 mg/m³ (Begrenzung nur für Zündstrahlmotor)
- ⇒ NO_x als NO₂: 0,50 g/m³ bei Gas-Otto-Motoren
1,5 g/m³ bei Gas-Diesel-Motoren bzw. Zündstrahlmotoren
- ⇒ CO: 1,0 g/m³ bei Gas-Otto-Motoren
2,0^a g/m³ (Zielwert: 1,5 g/m³) bei Gas-Diesel-Motoren bzw. Zündstrahlmotoren
- ⇒ SO₂: Zielwert 0,35^a mg/m³

^a Diese Anforderungen unterliegen einer Dynamisierung.

(Auf die Einrichtung geeigneter Messöffnungen für die Emissionsmessungen sollte bereits bei der Errichtung der Anlage geachtet werden).

7. Oxidationskatalysatoren

Den Einsatz von Oxidationskatalysatoren und deren Haltbarkeit bei Biogasanlagen lässt das LfU derzeit im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersuchen. Bei Zündstrahlmotoren sollte vorsorglich ausreichend Platz für die Nachrüstung eines Oxidationskatalysators vorgesehen werden.

8. Gülleendlager

Je nach Anlagenauslegung (Verweilzeit, Abbaugeschwindigkeit der eingesetzten Substrate) und Lagerdauer des ausgegorenen Substrats können im Endlager noch erhebliche Mengen Biogas (Methan, H₂S) gebildet werden (Nachvergärung). Daher ist eine

- ⇒ Abdeckung des Gülleendlagers obligatorisch zu fordern.

9. Anlagenüberwachung, Wartungs- bzw. Betriebsbuch

Zum Nachweis des ordnungsgemäßen Betriebes der Biogasanlage wird das Führen eines Wartungs- bzw. Betriebsbuchs empfohlen, das alle für den ordnungsgemäßen Betrieb der Biogasanlage wesentlichen Daten enthalten sollte, insbesondere:

- ⇒ Herkunft, Menge und Art der eingesetzten Substrate,
- ⇒ besondere Vorkommnisse, vor allem Betriebsstörungen (z.B. Gasaustritt etc.) einschließlich der möglichen Ursachen und erfolgter Abhilfemaßnahmen,
- ⇒ Wartungsarbeiten z.B. Zündkerzenwechsel (Gasmotor), Einspritzdüsenwechsel (Zündstrahlmotor) und wesentliche Reparaturarbeiten sowie sämtliche Änderungen der Motoreinstellung,
- ⇒ Ergebnisse der orientierenden Emissionsmessung, die üblicherweise im Rahmen der mindestens 1 mal jährlich durchzuführenden Motor- bzw. Anlagenwartung durchgeführt werden sollte (i.d.R. für NO_x und CO ggf. auch Abgastrübung (RZ)). Die Messprotokolle sollten in das Betriebsbuch eingeordnet und der Genehmigungsbehörde auf Verlangen vorgelegt werden.
- ⇒ Ergebnisse der möglichst regelmäßigen Überwachung des H₂S-Gehaltes des Biogases bzw. des SO₂-Gehaltes im Motorabgas. Diese Überprüfung sollte von Betreibern zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion der Entschwefelungseinrichtung auch aus gesamtökologischer Sicht (z.B. optimierte

gestreckte Ölwechselintervalle, verminderter Motorverschleiß etc.) durchgeführt werden.