



Das Lebensministerium



## Formaldehydemissionen aus Biogas-BHKW

Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Heft 8/2009

Freistaat  Sachsen

Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

**Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft**

vertreten durch das

**Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie**

**Sachgebiet: Anlagenbezogener Immissionsschutz, Lärm**

<b>Abschlussbericht:</b>	Nr.:	1
	Berichtszeitraum:	01.05. – 16.12.2008
	Seitenzahl:	118
	Tabellen (Anzahl):	23
	Abbildungen (Anzahl):	65
	Sonst. Anlagen:	9 ( <b>Anlagenband</b> )

**zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben:**

**TITEL DES VORHABENS**

Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW

**Aktenzeichen:** 13-8802.3521/69

von:

**Autoren:**

Dipl.-Ing. Torsten Neumann, Dr. rer. nat. Uwe Hofmann

**Durchführende Institution:**

Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)

**Projektleiter:**


Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse

Hochschule für Technik und  
Wirtschaft Dresden (FH)  
FB Maschinenbau/Verfahrenstechnik  
Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik  
Friedrich-List-Platz 1  
01069 Dresden

16.12.2008

**Datum**

**Unterschrift**

  
Prof. Dr.-Ing. G. Zikoridse  
Institutsdirektor

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>Vorwort und Danksagung</b>	3
<b>Abkürzungen</b>	4
<b>Einheiten</b>	5
<b>Formelzeichen, Indizes, Einzelziffern und -buchstaben</b>	5
<b>Tabellenverzeichnis</b>	6
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	7
<b>1 Ausgangssituation – Aufgabenstellung</b>	11
1.1 Beispiele der Biogasnutzung in Deutschland und in Sachsen	11
1.2 Auswahl rechtlicher Rahmenbedingungen für Biogas-BHKW	13
<b>2 Vorgehensweise – Bearbeitungsablauf</b>	13
<b>3 Methodische Umsetzung</b>	16
<b>4 Ergebnisse</b>	18
4.1 Datenbestand	18
4.2 Allgemeine Angaben der Anlagenstandorte	20
4.3 Biogasproduktion	20
4.3.1 Nass- und Trockenfermentation	20
4.3.2 Fermenter	22
4.3.3 Methananteil im Biogas	25
4.3.4 Prozessstufen	27
4.3.5 Prozesstemperatur	31
4.3.6 Beschickung und Zerkleinerung	34
4.3.7 Verweilzeiten	36

	<b>Seite</b>	
4.3.8	Fermenterheizungen	38
4.3.9	Hygienisierung	38
4.3.10	Rührwerke	42
4.3.11	Substrate	46
4.3.12	Entschwefelung	50
4.3.13	Gastrocknung	54
4.3.14	Brenngaszusammensetzung	54
4.4	BHKW-Spezifikationen	62
4.4.1	Arbeitsprinzipien, Brennverfahren	62
4.4.2	Verbrennungsmotorenhersteller	62
4.4.3	Ist-Zustand ermittelter Formaldehydemissionen	64
4.4.3.1	MAN-Gasottomotoren	65
4.4.3.2	MDE-Motoren	70
4.4.3.3	Jenbacher-Motoren von GE	72
4.4.3.4	Caterpillar-Motoren	76
4.4.3.5	MWM-Motoren (DEUTZ Power Systems-Motoren)	80
4.4.3.6	Tedom Motory-Motoren	86
4.4.3.7	Liebherr-Motoren	88
4.4.3.8	MAN-Zündstrahlmotor	90
4.4.3.9	Deutz-Motoren	92
4.4.3.10	Scania-Schnell-Motoren	96
4.4.3.11	Perkins-Motoren	98
4.4.3.12	Daewoo-Motor	101
4.4.3.13	Volvo Penta-Motor	102
4.4.4	Motorprozesse	104
4.4.5	Inspektion und Wartung	105
4.4.6	Leistung (Lastanforderungen)	106
4.4.7	Einfluss anderer Emissionsbestandteile	108
<b>5</b>	<b>Maßnahmenvorschläge zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“</b>	 109
<b>6</b>	<b>Kosten-Nutzen-Analysen</b>	110
<b>7</b>	<b>Weiteres Vorgehen</b>	111
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	112
	<b>Literaturverzeichnis</b>	114

## Vorwort und Danksagung

Diese Studie „Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ wurde durch das Sächsische Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL), vertreten durch das Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), beauftragt und finanziert. Dafür bedankt sich der Auftragnehmer, die Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH), vertreten durch das Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik, ganz herzlich bei diesem Ministerium bzw. dieser Institution.

Unser besonderer Dank richtet sich an die Projektbetreuer vom LfULG, den Herren Peter Gamer und Torsten Moczigemba, für die hervorragende Zusammenarbeit, die unterstützende Anleitung und Koordination sowie die Bereitstellung von Fachliteratur und Emissionsmessberichten aus dem Messprogramm „Geruchsemissionen aus Abgasen von Blockheizkraftwerken (BHKW)“. U. a. war dadurch ein optimaler Beginn der Projekt- bzw. Studierarbeit mit daraus resultierender Abstimmung des weiteren Bearbeitungsablaufes gegeben.

Die hier vorgestellte Studie basiert hauptsächlich auf Angaben bzw. Daten, die von 71 beteiligten Agrarbetrieben (**Anlagenband: Anlage 1**) in Form von ausgefüllten Datenblättern und Emissionsmessberichten per Post, Mail oder Fax bzw. im Rahmen von Vor-Ort-Terminen zur Verfügung gestellt wurden. Eine weitere Grundlage bildeten Betriebsanleitungen für einige in dieser Studie berücksichtigte Verbrennungsmotorenspezifikationen. Diese wurden durch die in der **Anlage 2** aufgeführten Motorenhersteller bzw. Maschinen- und Anlagenbauunternehmen unkompliziert und in effizienter Form zur Verfügung gestellt. In diesem Zusammenhang ist ausdrücklich hervorzuheben, dass insbesondere die sowohl durch die Agrarbetriebe als auch durch die Motorenhersteller bzw. Maschinen- und Anlagenbauunternehmen übermittelten Daten, Informationen und Unterlagen wesentlich zur Erstellung dieser Studie beigetragen haben. Dafür allerherzlichsten Dank an diese Unternehmen.

In diese Studie wurden auch einige im Freistaat Thüringen installierte Biogasanlagen einbezogen. Im Ergebnis dessen war es möglich, die Ergebnisse für einige Untersuchungsparameter repräsentativer darzustellen. In diesem Zusammenhang richtet sich unser Dank für die sehr gute und kooperative Zusammenarbeit sowie die Bereitstellung von für die Untersuchungen benötigten Informationen an das Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie (TLUG) sowie die Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL).

Dem Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA), vertreten durch Herrn Markus Heseding, danken wir für die wertvollen Hinweise und Anregungen sowie Informationen, die uns sowohl im Rahmen von persönlichen Gesprächen als auch in Form von Unterlagen zugänglich wurden.

Eine Besonderheit dieser Studie ist, dass die Ergebnisse ausschließlich auf die Auswertung von durch Dritte bereitgestellten Angaben und Werten aus Datenblättern, Emissionsmessberichten sowie Betriebsanleitungen beruhen. Diese entsprechend zum Ansatz gebrachten Angaben bzw. Werte lassen sich durch eine umfangreiche Vielfalt der Anlagenspezifikationen sowohl hinsichtlich der angewandten Biogaserzeugungsprozesse als auch der eingesetzten Verbrennungsmotoren charakterisieren. Für die jeweiligen Untersuchungen waren Plausibilitätsprüfungen notwendig, die jedoch aus Effizienzgründen nicht für jeden Anlagenstandort bzw. für jedes BHKW gleichermaßen realisiert werden konnten. Den Autoren dieser Studie könnten evtl. Fehler bei der Übertragung der Daten aus den Datenblättern bzw. Emissionsmessberichten in die Datenbank und der daraus resultierenden Ergebnisdarstellung unterlaufen sein. Sofern dies der Fall sein sollte, danken die Autoren im Voraus für das diesbezügliche Feedback. Aus vorgenannten Gründen wird keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit der berücksichtigten Daten, Werte und Spezifikationen übernommen.

## Abkürzungen

AG	Aktiengesellschaft
AHMT	4-Amino-3-hydrazino-5-mercapto-1, 2, 4-triazol
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG / BImSchV	Bundes-Immissionsschutzgesetz / -verordnung
BioAbfV	Bioabfallverordnung
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CO	Kohlenmonoxid
Co.	Company = Gemeinschaft, Handelsgesellschaft
CSSR	Tschechoslowakische Sozialistische Republik
DEKRA	Deutscher Kraftfahrzeug-Überwachungsverein
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNPH	Dinitrophenylhydrazin
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.
e. G.	eingetragene Genossenschaft
elektr.	elektrisch(e), (er)
EN	Europa-Norm
e. V.	eingetragener Verein
FAME	fetty acid methyl ester (Fettsäuremethylester)
FiF	Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik
GE	General Electric Company (Weltkonzern, Stammsitz USA)
Ges-C	Gesamtkohlenstoff
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Grundspez.	Grundspezifikation(en)
HCHO	Formaldehyd
H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
Inc.	Incorporated = Namenszusatz für amerikanische Konzerne
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
KG	Kommanditgesellschaft
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
KrW-/AbfG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
KW	Kalenderwoche
LfULG	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MAN	Maschinenfabrik Augsburg Nürnberg
MDE	Firmenvorsatz zum Unternehmen MDE Dezentrale Energieerzeugung GmbH Augsburg
mech.	mechanische(e), (er)
MTU	Motoren- und Turbinen-Union
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NL	Niederlande
NMHC	nichtmethanhaltige Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid(e)
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid

OEM	Original Equipment Manufacturer (Originalausrüstungshersteller)
OT	Ortsteil
O <sub>2</sub>	Sauerstoff
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid
TA	Technische Anleitung
therm.	thermische(e), (er)
V	V-Form (Kurzzeichen in der Motortypbezeichnung für die Zylinderanordnung im Motorenbau)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
Zyl.	Zylinder

## Einheiten

Bh	Betriebsstunden
°C	Grad Celsius
GV/ha LF	Großvieheinheiten pro Hektar Landwirtschaftsfläche
kg/h	Kilogramm pro Stunde
km	Kilometer
kPa	Kilopascal
kW(h)	Kilowatt(stunde)
kWh/Nm <sup>3</sup>	Kilowattstunde pro Normkubikmeter
l/h	Liter pro Stunde
mbar	Millibar
mg/m <sup>3</sup>	Milligramm pro Kubikmeter
min <sup>-1</sup>	Umdrehungen pro Minute
MW	Megawatt
m <sup>3</sup> /d	Kubikmeter pro Tag
Nm <sup>3</sup>	Normkubikmeter
t/d	Tonnen pro Tag
t FM/d	Tonnen Frischmasse pro Tag
Vol. %	Volumenprozent

## Formelzeichen, Indizes, Einzelziffern- und -buchstaben

AZ <sub>RV</sub>	Anzahl Rührvorgänge
br	Klassenbreite
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert
max	Maximum
min	Minimum
T	Prozesstemperatur
t <sub>RD</sub>	Rührdauer
t <sub>v</sub>	Verweilzeiten
λ	Verbrennungsluftverhältnis
...(1. ... 2. Messung)	Hinweis auf 1. bzw. 2. Messung
I, II, III	Blockheizkraftwerk 1, 2 bzw. 3

## Tabellenverzeichnis

- Tabelle 1:** Auswahl von Emissionsgrenzwerten für Biogas-BHKW gemäß TA Luft
- Tabelle 2:** Bearbeitungsablauf zur Erarbeitung der „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“
- Tabelle 3:** Datenbankregistratur unter Berücksichtigung der Motorenhersteller
- Tabelle 4:** Datenbestand der für Thüringen zu untersuchenden Biogasanlagen-BHKW
- Tabelle 5:** Klassifizierungen zur Untersuchung der Dauer u. zur Anzahl der Rührvorgänge
- Tabelle 6:** Klassifizierungen zur Untersuchung des Substrateinsatzes an 31 Anlagen (43 BHKW)
- Tabelle 7:** Klassifizierungen zur Untersuchung der Entschwefelungsverfahren
- Tabelle 8:** Beispielhafter Vergleich der Zusammensetzung von „**Biogas**“ und „**Erdgas**“
- Tabelle 9:** Übersicht Motorhersteller mit Standort-, BHKW- u. Grundspezifikationsanzahl
- Tabelle 10:** Technische Angaben ausgewählter MAN-Gasotomotorspezifikationen
- Tabelle 11:** Technische Angaben zu berücksichtigender MDE-Motorspezifikation
- Tabelle 12:** Technische Angaben zu berücksichtigender Jenbacher-Motorspezifikationen
- Tabelle 13:** Technische Angaben zu berücksichtigender Caterpillar-Motorspezifikationen
- Tabelle 14:** Technische Angaben ausgewählter MWM-Motorspezifikationen
- Tabelle 15:** Technische Angaben zu berücksichtigender Tedom Motory-Motorspezifikation
- Tabelle 16:** Technische Angaben zu berücksichtigender Liebherr-Motorspezifikation
- Tabelle 17:** Technische Angaben zu berücksichtigender Deutz-Motorspezifikationen
- Tabelle 18:** Technische Angaben zu berücksichtigender Scania-Schnell-Motorspezifikation
- Tabelle 19:** Technische Angaben einer ausgewählten Perkins-Motorspezifikation
- Tabelle 20:** Technische Angaben zu berücksichtigender Daewoo-Motorspezifikation
- Tabelle 21:** Technische Angaben zu berücksichtigender Volvo Penta-Motorspezifikation
- Tabelle 22:** Angaben zu Inspektions- u. Wartungstätigkeiten an **Gasotomotoren (Auswahl)**
- Tabelle 23:** Maßnahmenvorschläge zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“



# Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Wendländer BioGas-Tankstelle Raiffeisen Waren-genossenschaft eG Jameln
- Abbildung 2:** BioErdgas-Aufbereitungsanlage der agri.capital GmbH Münster in Könnern (Salzlandkreis, Sachsen-Anh.) → Einspeisung in das Erdgasnetz der MIT-GAS - Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH Kabelsketal (Saalekreis, Sachsen-Anhalt)
- Abbildung 3:** Lösungsansätze zur Untersuchung der Ursachen erhöhter Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW
- Abbildung 4:** Landwirtschaftliche Biogas-BHKW in Sachsen
- Abbildung 5:** Anzahl der **Standorte**, der **BHKW** und der **Spezifikationen** (Stand: 31.08.08)
- Abbildung 6:** Datenbestand der für Sachsen zu untersuchenden Biogasanlagen-BHKW
- Abbildung 7:** Abgasemissionen von zwei GE Jenbacher-Motoren-BHKW (Baureihe 3 → 12 Zyl., V-Form)
- Abbildung 8:** Gaslager und Pfefferkornfermenter an der Biogasanlage der MKH Agrar-Produkte GmbH Kotten (bei Wittichenau, Landkreis Bautzen, Sachsen)
- Abbildung 9:** Pfropfenstrom- und Rührkesselfermenter sowie Gärrestlager an der Biogasanlage der Agrargenossenschaft Krippelna e. G. Zschepplin (Landkreis Nordsachsen)
- Abbildung 10:** Biogaserzeugungsverfahren und Fermenterarten für die in dieser Studie in Sachsen und Thüringen zu berücksichtigenden Biogasanlagen an 66 Standorten
- Abbildung 11:** Untersuchung Methananteile / Fermenterarten (Datenbasis: 61 Standorte → 91 BHKW)
- Abbildung 12:** Beispiele stationärer Gasanalysegeräte in Pöhsig und in Kotten
- Abbildung 13:** Vergleich der bei **Emissionsmessung** erfassten Methananteile mit dem **Ø laut Datenblättern**
- Abbildung 14:** Untersuchung Prozessstufen / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen** (31 Standorte → 43 BHKW)
- Abbildung 15:** Prozesstemperaturen für 58 zu berücksichtigende Biogasanlagenstandorte
- Abbildung 16:** Untersuchung Prozesstemp. / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen** (31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 17:** Mischstation der Firma Trioliet Mullos B. V. Oldenzaal (NL)

**Abbildung 18:** Zerkleinerer „RotaCut 5000“ der Firma Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH Essen (bei Oldenburg)

**Abbildung 19:** Untersuchung **Beschickung** / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 20:** Fermenterverweilzeiten für 55 zu berücksichtigende Biogasanlagenstandorte

**Abbildung 21:** Untersuchung Verweilzeit / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 22:** Auswahl von Fermenterheizungsspezifikationen bei der Agrargenossenschaft Beerendorf e. G. in Selben und bei der Agrargenossenschaft Krippelna e. G. Zscheplin sowie bei der Multi-Agrar Claußnitz GmbH

**Abbildung 23:** Hygienisierungseinrichtung „ARCHEA ThermDes®-Anlage“ der Firma ARCHEA Biogastechnologie GmbH Hessisch Oldendorf

**Abbildung 24:** Abgasemissionen an zwei mit „Hygienisierung“ ausgelegten Biogasanlagenstandorten (5 BHKW)

**Abbildung 25:** Abgasemissionen an zwei Anlagenstandorten (3 BHKW), die mit „Hygienisierung“ ausgelegt sind

**Abbildung 26:** Höhenverstellbares BioProp-Fermenterrührwerk der ROTARIA Energie- und Umwelttechnik GmbH Rerik und hydraulisch angetriebenes Tauchmotorrührwerk für die Biogasanlage beim Landwirtschaftsbetrieb Philipp GbR Großweitzschen, OT Strölla (Landkreis Mittelsachsen)

**Abbildung 27:** Untersuchung **Rührdauer** / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 28:** Untersuchung **Anzahl der Rührvorgänge** / **CH<sub>4</sub>-Anteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 29:** Untersuchung Substrate / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

**Abbildung 30:** Beispiele externer Entschwefelungsanlagen (Tropfkörper-/Biorieselbettreaktor der LAWI Agrar GmbH Hirschfeld (Landkreis Zwickau), Aktivkohlefilter beim Landwirtschaftsbetrieb Philipp GbR Großweitzschen, OT Strölla (Landkreis Mittelsachsen), Gaswäscher bei Biogas und Landtechnik Trieb (Vogtlandkreis, Sachsen))

**Abbildung 31:** Untersuchung Entschwefelung / **CH<sub>4</sub>-Anteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)

- Abbildung 32:** Untersuchung **H<sub>2</sub>S-Gehalt** / **CH<sub>4</sub>-Anteile** / **HCHO-Emissionen**  
(31 Standorte → 43 BHKW)
- Abbildung 33:** Biogasrohrleitung vom Fermenter in den BHKW-Raum der Biogasanlage bei der Tobias Barthel und Christian Landwehr GbR Geithain, OT Wickershain (Kreis Leipzig)
- Abbildung 34:** Gaskühler an der Biogasanlage beim Agrarbetrieb Landtechnik und Biogas Trieb (Vogtlandkreis, Sachsen)
- Abbildung 35:** Prozessüberwachungsdisplays an den Biogasanlagen der MKH Agrar Produkte GmbH in Kotten (Landkreis Bautzen, Sachsen) bzw. der Agrargenossenschaft Krippelna e. G. in Zscheplin (Kreis Nordsachsen)
- Abbildung 36:** **Methananteil** und analysierte **Formaldehydemissionen** für **33 Biogas-BHKW (Gasotomotoren)**
- Abbildung 37:** **Ø Methananteil** und analysierte **Formaldehydemissionen** für **46 Biogas-BHKW (Gasotomotoren)**
- Abbildung 38:** **Methananteil** und analysierte **Formaldehydemissionen** für **10 Biogas-BHKW (Zündstrahlmotoren)**
- Abbildung 39:** **Ø Methananteil** und analysierte **Formaldehydemissionen** für **27 Biogas-BHKW (Zündstrahlmotoren)**
- Abbildung 40:** Standortanteile der angewandten Arbeitsprinzipien hinsichtlich der in Sachsen u. in Thüringen für diese Studie zu berücksichtigenden Anlagenstandorte
- Abbildung 41:** Abgasemissionen MAN-Motoren  
(Datenbank-Nr. „1“ **Saugmotor, übrige Magermotoren**)
- Abbildung 42:** Abgasemissionen MAN-Motoren (alles **Magermotoren** an 7 Standorten)
- Abbildung 43:** Abgasemissionen MDE-Motoren  
(„AB bzw. **MB 3042 L 1 ... L 5**“ → **12 Zyl.-V-Form**)
- Abbildung 44:** Abgasemissionen GE Jenbacher-Motoren „**Baureihe 2**“  
(**8 Zyl. Reihe** bzw. **12 Zyl., V-Form**)
- Abbildung 45:** Abgasemissionen GE Jenbacher-Motoren „**Baureihe 3**“  
(**12 Zylinder, V-Anordnung**)
- Abbildung 46:** Abgasemissionen Caterpillar-Motoren  
(**6 Zyl. Reihe** u. **8** bzw. **12 Zyl. V-Form**, 3 Standorte)
- Abbildung 47:** Biogas-BHKW „**Caterpillar G 3412 TA**“  
der Agrargenossenschaft e. G. Hainichen-Pappendorf

- Abbildung 48:** Abgasemissionen Caterpillar-Motoren  
(12 Zylinder, V-Anordnung, 7 Standorte)
- Abbildung 49:** Abgasemissionen MWM/DEUTZ Power Systems-Motoren  
(Baureihe 616 → 12 bzw. 16 Zyl., V)
- Abbildung 50:** Abgasemissionen MWM/DEUTZ Power Systems-Motoren  
(Baureihe 2015 → 6 Zyl., V)
- Abbildung 51:** Abgasemissionen MWM/DEUTZ Power Systems-Motoren  
(Baureihe 2016 → 12 Zyl., V)
- Abbildung 52:** Abgasemissionen MWM/DEUTZ Power Systems-Motoren  
(Baureihe 2016 → 16 Zyl., V)
- Abbildung 53:** Abgasemissionen Tedom Motory-Motoren  
(6 Zyl. Reihe, Turbolader mit Ladeluftkühlung)
- Abbildung 54:** Abgasemissionen Liebherr-Motor  
(6 Zylinder-Reihenmotor mit Turboaufladung)
- Abbildung 55:** Abgasemissionen MAN-Motor „D 2842 LE 20212“  
(12 Zylinder, V-Anordnung)
- Abbildung 56:** Abgasemissionen Deutz-Motoren mit der Bauart „BF6M 1013 EC“
- Abbildung 57:** Abgasemissionen Deutz-Motoren mit der Bauart „BF6M 1015 C“
- Abbildung 58:** Abgasemissionen Deutz-Motoren mit der Bauart „BF8M 1015 C“
- Abbildung 59:** Abgasemissionen Scania-Schnell-Motor  
(6 Zyl.-Reihenmotor mit Abgasturbolader)
- Abbildung 60:** Abgasemissionen Perkins-Motoren „1006 TG“ (6 Zylinder in Reihe)
- Abbildung 61:** Abgasemissionen Perkins-Motoren „2006 TAG 2“ und Daewoo-Motor
- Abbildung 62:** Abgasemissionen Volvo Penta-Motor  
(6 Zylinder-Reihenmotor mit Abgasturboaufladung)
- Abbildung 63:** Einflussparameter für Motorprozesse (z. B. Gemischbildung, Verbrennung)
- Abbildung 64:** Untersuchung Lastanforderung / Formaldehydemissionen  
für 7 Standorte (7 BHKW)
- Abbildung 65:** Vorschlag zum weiteren Vorgehen

# 1 Ausgangssituation – Aufgabenstellung

U. a. aufgrund stetig steigender Anforderungen sowohl an den globalen als auch an den lokalen Umwelt- und Klimaschutz sowie der zunehmend knapp werdenden Primärenergieressourcen gewinnen alternative Antriebsvarianten (z. B. Hybrid, Brennstoffzelle) und Kraftstoffe für den Betrieb von Fahrzeugen, Maschinen und Anlagen zunehmend an Bedeutung. Hierbei werden auch Biokraftstoffe, wie z. B. Pflanzenöl, Bioethanol, Fettsäuremethylester (FAME) und „Biogas“, in verschiedenen und vielfältigen Anwendungsbereichen eingesetzt. Resultierend aus der durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie definierten Aufgabenstellung zur Erarbeitung einer „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ beschränken sich alle weiteren Ausführungen auf den biogenen Alternativkraftstoff „Biogas“.

## 1.1 Beispiele der Biogasnutzung in Deutschland und in Sachsen

Für „Biogas“ sind mit der Nutzung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren von Blockheizkraftwerken zum Zwecke der Energieerzeugung in Kombination mit der Abwärmenutzung (Kraft-Wärme-Kopplung) vielfältige Anwendungsmöglichkeiten gegeben. Als Beispiel ist das Freizeitbad „Platsch“ in Oschatz zu nennen. Die Energieversorgung dieses Freizeitbades wurde Anfang November 2008 auf Biogas umgestellt /1/. Dabei wurden 150.000 € investiert, um die Blockheizkraftwerke mit Biogas betreiben zu können, wobei die Abwärme u. a. zur Erwärmung des Wassers und zur Beheizung eines in der Nähe befindlichen Gymnasiums genutzt wird /1/.

Eine weitere nennenswerte Einsatzmöglichkeit stellt die Aufbereitung zu Biomethan (auch BioErdgas genannt) für den direkten Einsatz als Kraftstoff in Straßenfahrzeugen und der Einspeisung in das Erdgasrohrleitungsnetz der Gasversorgungsunternehmen dar. Die direkte Verwendung als Kraftstoff in CNG-betriebenen Straßenfahrzeugen (CNG – Compressed Natural Gas) und die Einspeisung in das Erdgasrohrleitungsnetz sind in Deutschland noch nicht weit verbreitet. Komprimiertes „BioErdgas“ kann seit 22.06.2006 in Deutschland ausschließlich in Jameln (Landkreis Lüchow-Dannenberg, Niedersachsen) betankt werden.



**Abbildung 1:** Wendländer BioGas-Tankstelle Raiffeisen Warengenossenschaft eG Jameln



Die Biogaseinspeisung in das Erdgasrohrleitungsnetz wird u. a. seit Dezember 2006 durch die E.ON Bayern AG Regensburg in Pliening (Landkreis Ebersberg, ca. 20 km östlich von München), die Stadtwerke Aachen AG in Straelen (Nordrhein-Westfalen) sowie seit 8. November 2008 durch die EWE Aktiengesellschaft Oldenburg in Werlte (Niedersachsen) praktiziert. Die erste Biogasaufbereitungsanlage in den neuen Bundesländern hat Ende 2007 in Könnern (Salzlandkreis, Sachsen-Anhalt) ihren Betrieb aufgenommen. Dort speist die MITGAS – Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH Kabelsketal (Saalekreis, Sachsen-Anhalt) Biogas in ihr Netz ein. Dieses wird u. a. auch zum Betrieb der beiden BHKW des Freizeitbades „Platsch“ in Oschatz genutzt /1/.



**Abbildung 2:**

BioErdgas - Aufbereitungsanlage der agri.capital GmbH Münster in Könnern (Salzlandkreis, Sachsen-Anhalt) /2/ → Einspeisung in das Erdgasnetz der MITGAS - Mitteldeutsche Gasversorgung GmbH Kabelsketal (Saalekreis, Sachsen-Anhalt)

Säulen im Hintergrund: Druckwasserwäsche zur Abtrennung von Wassertröpfchen, Schwebstoffen, Schwefelwasserstoff und Kohlendioxid

U. a. durch die genannten Beispiele zur Biogaseinspeisung in Erdgasrohrleitungsnetze von Erdgasversorgungsunternehmen kann an ca. 8,5 % der derzeit in Deutschland betriebenen Erdgastankstellen (Stand: 29.10.2008 = 811) dem Erdgas beigemischt Biomethan getankt werden /3/. Dabei liegt der Anteil des beigemischten Biomethans bei (10...20)%. Für den Freistaat Sachsen sind zurzeit keine Projekte hinsichtlich der Errichtung von BioErdgas-Tankstellen bzw. der Einspeisung in das Erdgasrohrleitungsnetz öffentlich bekannt.

Im Freistaat Sachsen beschränkt sich der momentane „Biogaseinsatz“ hauptsächlich auf die Verwendung in Verbrennungsmotoren von Blockheizkraftwerken. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass das erste Biogas-Blockheizkraftwerk 1994 im Rahmen eines Pilotprojektes in Oberlungwitz bei der Agrargenossenschaft Lungwitztal e. G. Bernsdorf in Betrieb genommen wurde /4/. Der gegenwärtige Stand der Biogasanwendung im Freistaat Sachsen in durch Agrarbetriebe unterhaltenen Blockheizkraftwerken wird im Rahmen dieses Abschlussberichtes erläutert.

## 1.2 Auswahl rechtlicher Rahmenbedingungen für Biogas-BHKW

Bei der Installation und dem Betrieb von Biogas-Blockheizkraftwerken sind genehmigungs- und sicherheitsrelevante Gesetze, Verordnungen, Vorschriften, Normen, Richtlinien und Regeln zu beachten. Beispielhaft werden die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV), das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG), das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), die Bioabfallverordnung (BioAbfV) sowie die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) genannt. U. a. ist in diesen Gesetzen und Vorschriften geregelt, dass Biogas-Blockheizkraftwerke turnusmäßigen Prüfungen und Messungen zu unterziehen sind. Im Rahmen derartig durchgeführter turnusmäßiger Emissionsmessungen wurde an mehreren in Sachsen und auch in anderen Bundesländern betriebenen Biogas-Blockheizkraftwerken festgestellt, dass der in der TA Luft vorgeschriebene Grenzwert für Formaldehydemissionen (**Tabelle 1**) teilweise erheblich überschritten wird. So wurden beispielsweise nach Schreier /5/ durch die Umweltanalytik RUK GmbH Longuich in den Jahren 2006/07 ca. 500 Formaldehydemissionsmessungen ausgewertet. Hierbei wurde analysiert, dass bei ca. 100 bis 125 Messungen der Formaldehydgrenzwert von  $60 \text{ mg/m}^3$  überschritten wurde. Bei weiteren ca. 50 bis 75 Messungen lagen die Formaldehydmesswerte oberhalb  $50 \text{ mg/m}^3$ . U. a. resultierend aus o. g. Untersuchungen sowie den Ergebnissen eines durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie durchgeführten Messprogrammes „Geruchsemissionen aus Abgasen von Blockheizkraftwerken (BHKW)“ ergibt sich Forschungsbedarf zu den Ursachen für diese Formaldehydemissionen sowie zu Maßnahmen, welche die Einhaltung der gemäß TA Luft festgelegten Emissionsgrenzwerte ermöglichen könnten.

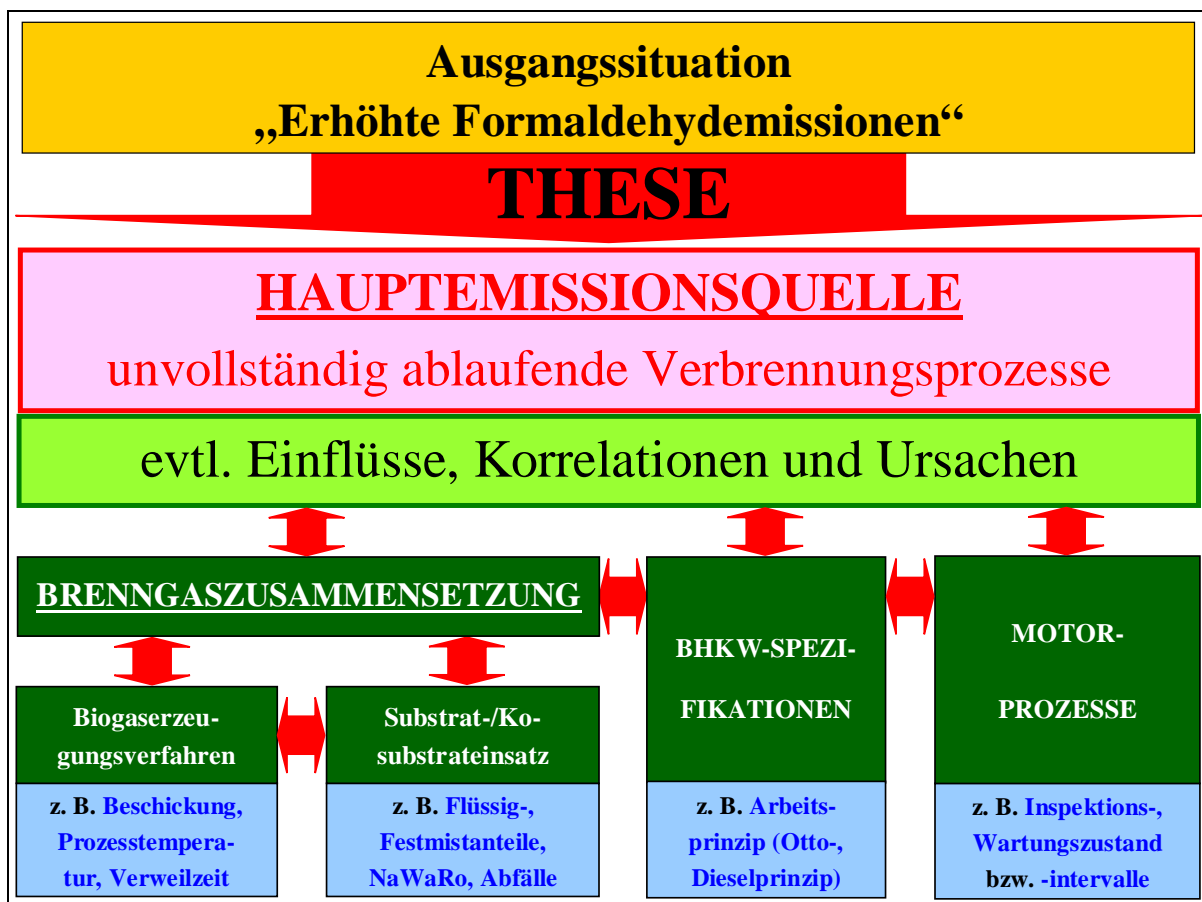
**Tabelle 1:** Auswahl von Emissionsgrenzwerten für Biogas-BHKW gemäß TA Luft /6/

Abgas-emissionsbestandteil	Emissionsgrenzwerte [ $\text{mg/m}^3$ ] bezogen auf 5 Vol.% $\text{O}_2$			
	Fremdzündungsmotoren (z. B. 4-Takt-Otto-Motoren)		Selbstzündungsmotoren (z. B. Zündstrahlmotoren)	
	FEUERUNGSWÄRMELEISTUNG			
	< 3 MW	= > 3 MW	< 3 MW	= > 3 MW
Kohlenmonoxid (CO)	1.000	650	2.000	650
Stickstoffoxide $\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$ (angegeben als $\text{NO}_2$ )	500		1.000	500
<b>Formaldehyd (HCHO)</b>	<b>60</b>			

## 2 Vorgehensweise – Bearbeitungsablauf

Zu den Ursachen dieser Formaldehydemissionsbildungen liegen zurzeit noch keine zweifelsfreien und eindeutigen Erkenntnisse vor. Nach Schreier /5/ entstehen bei der Kohlenwasserstoffverbrennung auch Formaldehyde als Zwischenprodukte, welche im weiteren Verbrennungsablauf bei vollständig ablaufender Verbrennung zu Kohlenmonoxid und Kohlendioxid weiteroxydieren. Gleichfalls nach Schreier /5/ können unvollständig ablaufende Verbrennungsprozesse, beispielsweise infolge Verzögerung oder Abbruch der Verbrennung (z. B. Zündaussetzer), die Bildung von „kalten Brennraumzonen“ begünstigen, welche wiederum ihre Ursache in zu niedrigen Brennraumtemperaturen, geometrisch bedingten Totzonen oder

partieller Flammenlöschung haben können. Dadurch könnte evtl. nur eine Teiloxidation der Kohlenwasserstoffe erfolgen, so dass auch unverbranntes Biogas über die Auslassventile in den Abgasstrang gelangen kann. Als eine evtl. weitere theoretische, jedoch noch nicht nachgewiesene, Ursache für die Formaldehydbildung wird in /5/ der Methanschluß genannt. Dieser kann bei der verbrennungsmotorisch bedingten Ventilüberschneidung der Ein- und Auslassventile bei Ansaugbeginn bzw. Ausstoßende eintreten. Dabei könnte beispielsweise angesaugtes und damit unverbranntes Kraftstoff-Luft-Gemisch in das Abgas gelangen, was nicht vollständig nachoxydiert und eine Formaldehydbildung verursachen könnte. U. a. auch in Auswertung vorab erläuteter Aspekte ist zunächst davon auszugehen, dass mehrere verschiedene Einflüsse, z. B. Brenngaszusammensetzung sowie Motorprozesse, als evtl. Ursachen für die unvollständig ablaufenden Verbrennungsprozesse lokalisiert werden könnten. Ausgehend von diesen Überlegungen wurde im Zeitraum 01.05.-31.10.2008 der Ist-Zustand hinsichtlich einiger in Sachsen und Thüringen betriebener Biogas-Blockheizkraftwerke (z. B. **Anlage 3**) erfasst. Wesentliche Grundlagen bei diesen Erfassungen bildeten sowohl das im Ergebnis von bereits durchgeführten Untersuchungen verfügbare Datenmaterial (z. B. Emissionsmessberichte) als auch die zwischen dem Auftraggeber (LfULG) und dem Auftragnehmer (FiF) abgestimmten Datenblattmuster (**Anlage 4**). Parallel zu diesen Erfassungen sowie resultierend aus diesen Daten wurden ab 01.10.-30.11.2008 die Korrelationen bezüglich der Formaldehydbildungen in Abhängigkeit der verschiedensten Ausgangs- und Einflussparameter (z. B. Brenngaszusammensetzung, Blockheizkraftwerkspezifikation) analysiert (**Abbildung 3**).



**Abbildung 3:** Lösungsansätze zur Untersuchung der Ursachen erhöhter Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW

Resultierend aus allen Untersuchungen werden Maßnahmen herausgearbeitet und vorgeschlagen, welche die Einhaltung des Formaldehydgrenzwertes gemäß TA Luft ermöglichen könnten. Den bei der Erarbeitung dieser Studie realisierten Bearbeitungsablauf zeigt die **Tabelle 2**.

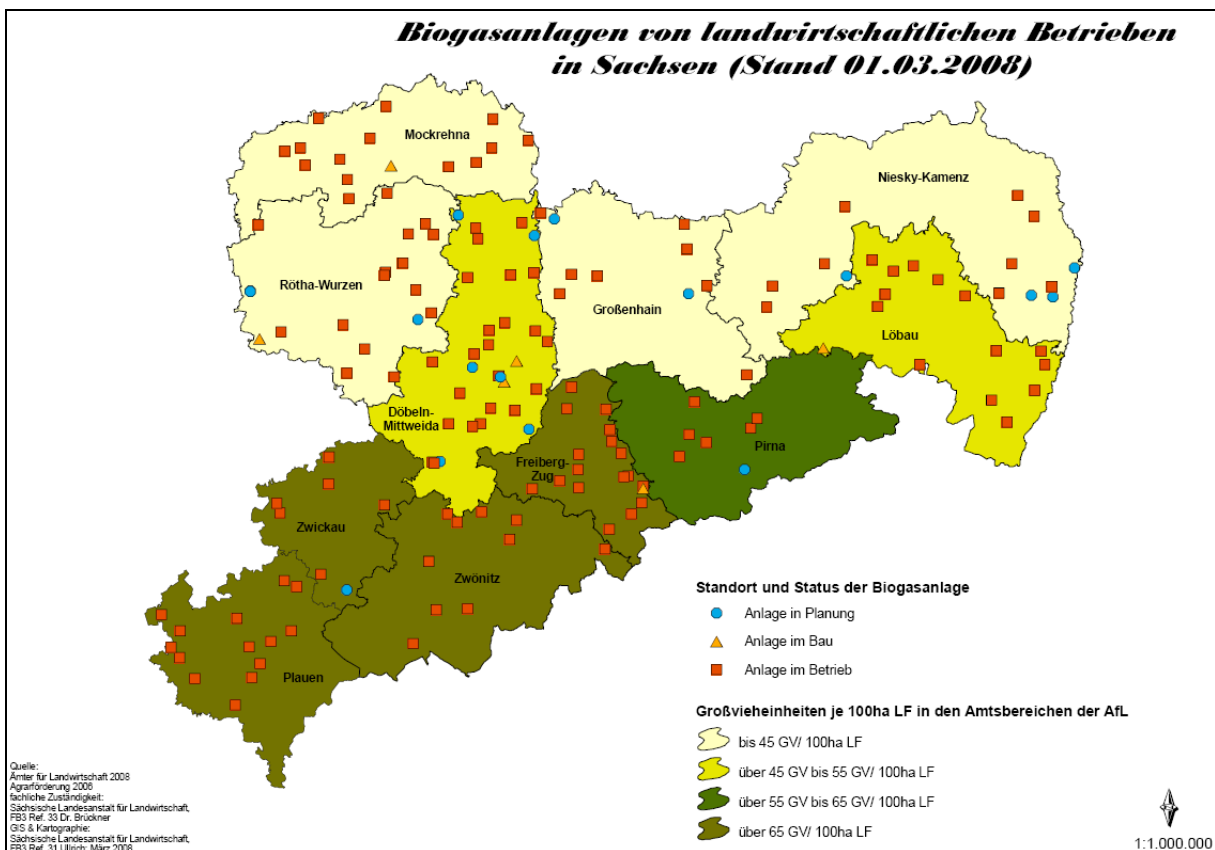


**Tabelle 2:** Bearbeitungsablauf zur Erarbeitung der "Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW"

KW	Zeit- raum	Arbeitsschritte																			
		1	2	3	4	5	6	7	Zwischenbericht	8	9	10	11	12	13	Übergabe der Studie					
		1. BEARBEITUNGSZEITRAUM 01.05. bis 31.08.2008							2. BEARBEITUNGSZEITRAUM 01.09. bis 16.12.2008												
18	01.-04.05.	<b>02.05.</b>	Literatur- u. Internetrecherchen (z. B. Grundlagen Kraftwerke)																		
19	05.-11.05.		<b>08.05.</b>	Literatur- und Internetrecherchen (z. B. Grundlagen Biogas)																	
20	12.-18.05.			<b>16.05.</b>	Literatur-/Internetrecherchen, Erarbeitung Präsentation Anlaufberatung																
21	19.-25.05.				<b>23.05.</b>	Vorbereitung Anlaufberatung (22.05.), Übergabe Emissionsmessberichte															
22	26.05.-01.06.					<b>30.05.</b>	Literatur-/Internetrecherchen (z. B. Biogaserzeugung), 1. Analyse BHKW-Motoren, Legitimation														
23	02.-08.06.						<b>06.06.</b>	Vorstellung 1. Analyseergebnisse (9 Motorhersteller --> mindestens 15 Spez.)													
24	09.-15.06.							<b>13.06.</b>	Versand der Datenblattmuster an 135 Biogasanlagenbetreiber im Freistaat Sachsen												
25	16.-22.06.								<b>16.06.</b>  bis  <b>31.08.</b>	lfd. Eingang Datenblattmuster und Emissionsmessberichte (Brief, Fax, Mail)											
26	23.-29.06.										laufende Datenbankerstellung und -aktualisierung										
27	30.06.-06.07.										lfd. Auswertungen und Analysen für die zu untersuchenden Biogas-BHKW										
28	07.-13.07.										(Basis Datenbestand: Ist-Zustand --> <b>keine Ursachenuntersuchungen</b> )										
29	14.-20.07.										<b>Beginn der Erstellung des Zwischenberichtes</b>										
30	21.-27.07.										<b>Abgabe Zwischenbericht (Termin 31.08.2008)</b>										
31	28.07.-03.08.																				
32	04.-10.08.																				
33	11.-17.08.																				
34	18.-24.08.																				
35	25.-31.08.																				
36	01.-07.09.	Erarbeitung Zwischenergebnispräsentation für Workshop 10.09.2008 in Leipzig							<b>01. bis</b>												
37	08.-14.09.	Zwischenergebnispräsentation 10.09.2008 in Leipzig und Vorbereitung Vor-Ort-Termine zur Datenerfassung							<b>12.09.</b>												
38	15.-21.09.		Vorbereitung und Realisierung der Vor-Ort-Termine zur Datenerfassung an ausgewählten Biogasanlagen mit lfd. Datenbestandsaktualisierung und -ergänzung												<b>15.09.</b>						
39	22.-28.09.														<b>bis</b>						
40	29.09.-05.10.		Voruntersuchungen hinsichtlich der evtl. Einflüsse, Zusammenhänge und Korrelationen der Untersuchungsparameter zur Biogaserzeugung sowie zu den BHKW-Spezifikationen																		
41	06.-12.10.																				
42	13.-19.10.		(z. B. Prozesstemperatur, Verweilzeit, Motorprozesse (z. B. $\lambda$ ), Lastanforderungen, Wartung, Emissionsbestandteile) und Kostenrecherchen (z. B. Aktivkohlefilter)																		
43	20.-26.10.																				
44	27.10.-02.11.														<b>30.10.</b>						
45	03.-09.11.														<b>03.11.</b>  <b>bis</b>  <b>16.12.</b>						
46	10.-16.11.																				
47	17.-23.11.																				
48	24.-30.11.		laufende Auswertungen und Analysen für alle zu berücksichtigenden Biogasanlagen-BHKW und <b>redaktionelle Erstellung des Abschlussberichtes</b>																		
49	01.-07.12.																				
50	08.-14.12.																				
51	15.-16.12.																				

### 3 Methodische Umsetzung

Mit Stand zum 01.03.2008 befanden sich im Freistaat Sachsen 139 landwirtschaftliche Biogasanlagen in Betrieb /7/ (**Abbildung 4**). Weitere 17 Biogasanlagen sind in der Bau- bzw. in der Planungsphase. Entsprechend Umweltbericht 2007 /8/ des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft, der sich dabei auf eine Studie des Sächsischen Landesamtes für Landwirtschaft beruft, wird das landwirtschaftliche Potenzial so eingeschätzt, dass in Sachsen zukünftig ca. 420 Biogasanlagen mit einer durchschnittlichen elektrischen Leistung von 500 kW betrieben werden könnten. Ausgehend von diesen Überlegungen ist mit einer mittelfristigen Zunahme der Installation derartiger Biogas-Blockheizkraftwerke (im Weiteren „Biogas-BHKW“) zu rechnen.



**Abbildung 4:** Landwirtschaftliche Biogas-BHKW in Sachsen /7/

In Auswertung der ersten Literatur- und Internetrecherchen /9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19/ hinsichtlich des o. g. Bestandes landwirtschaftlicher Biogas-BHKW in Sachsen, war einzuschätzen, dass sich die Spezifikationen dieser Biogasanlagen sowohl hinsichtlich der angewandten Biogaserzeugungsprozesse als auch der installierten Verbrennungsmotoren vielfältig gestalten werden. Beispielhaft sind der Substrateinsatz (z. B. Flüssig- u. Festmistherkunft bzw. -anteile) und die Prozesstemperaturen und die Verweilzeiten im Fermenter sowie die Arbeitsprinzipien, die Motorkonzepte und die Inspektions- bzw. Wartungsintervalle der Verbrennungsmotoren zu nennen. Diese Erwartungen wurden durch die erste Auswertung von 17 durch das LfULG bereitgestellten Emissionsmessberichten bestätigt. Aus diesen Emissionsmessberichten war zu analysieren, dass an diesen 17 verschiedenen Standorten ca. 15 bis 20 verschiedene Motorspezifikationen von 9 unterschiedlichen Motorenherstellern installiert sind. Weitere motorspezifische Unterscheidungsmerkmale waren mit den Arbeitsprinzipien (Otto-, Dieselprinzip) sowie ggf. resultierenden Anpassungen dieser OEM-Motoren (OEM – Original Equipment Manufacturer) durch spezielle Maschinen- und Anlagenbaufr-

men gegeben. Nach Auswertung dieser ersten Analyse war einzuschätzen, dass die weitere detaillierte Auswertung hinsichtlich der zu diesem Zeitpunkt für diese 17 landwirtschaftlichen Biogasanlagen (25 Biogas-BHKW) vorliegenden Daten keine repräsentativen Ergebnisse erwarten lassen. Aus diesem Grunde erschien die Datenerfassung von weiteren Biogasanlagen grundsätzlich sinnvoll. Deshalb wurde, um eine möglichst hohe Wahrscheinlichkeit der Anlagenvergleichbarkeit zu gewährleisten, gemeinsam mit dem LfULG entschieden, alle Biogasanlagenbetreiber in Sachsen anzuschreiben. Unmittelbar nach dieser Entscheidung wurden in Abstimmung mit dem LfULG ein Datenblattmuster (z. B. **Anlage 4**) sowie ein Legitimationsschreiben zur Datenerfassung (**Anlage 5**) erarbeitet. Wesentliche Parameter dieser Datenerfassungen bildeten die Biogaserzeugungsprozesse, die BHKW-Spezifikationen mit der Angabe von jeweils definierten Inspektions- und Wartungsintervalltätigkeiten sowie die Emissionswerte (z. B. CO, NO<sub>x</sub>, HCHO). Die Anschreiben mit den Datenblattmustern und der Legitimation wurden im Zeitraum 09.-16.06.2008 an insgesamt 135 sächsische Unternehmen bzw. Institutionen versandt. Wie bereits erwähnt, wurden auch in anderen Bundesländern Formaldehydgrenzwertüberschreitungen gemessen. Auf Grund dieser Erkenntnis wurde, auch um die Repräsentativität der Ergebnisse zu erhöhen, mit dem LfULG abgestimmt, bereits vorhandene Daten für ausgewählte Thüringer Anlagen in den Untersuchungen zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang wird bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass aus Zweckmäßigkeitsgründen für alle nachfolgenden Untersuchungen keine Unterscheidung nach Bundesland Sachsen bzw. Thüringen vorgenommen wird. Die bis zum 31.08.2008 erfasste Anzahl der **Standorte**, der **BHKW** und der **Spezifikationen** ist in der **Abbildung 5** ersichtlich.



**Abbildung 5:** Anzahl der **Standorte**, der **BHKW** und der **Spezifikationen** (Stand: 31.08.08)

## 4 Ergebnisse

Alle durch die Betreiber an den Auftragnehmer (FiF) in den jeweiligen Datenblättern und Emissionsmessberichten enthaltenen Angaben bzw. alle ggf. persönlich vor Ort erfassten Daten wurden in eine EXCEL-Datenbankdatei aufgenommen. Diese bildet eine wesentliche Grundlage für alle durchzuführenden Untersuchungen. Bereits zum Zeitpunkt der Erstellung des Zwischenberichtes /20/ war einzuschätzen, dass sich die Vergleichbarkeit hauptsächlich auf die BHKW-Spezifikationen beziehen wird. Aus diesem Grunde sowie zwecks besserer Überschaubarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse wird die Datenbankregistratur, nicht wie im Zwischenbericht nach Standorten sondern, unter Berücksichtigung der Motorhersteller (**Tabelle 3**) und der jeweiligen herstellerabhängigen Motorspezifikationen (z. B. Motortyp) vorgenommen. Demnach erhält jedes BHKW eine Datenbanknummer. Die insbesondere wegen fehlenden Formaldehydemissionswerten in dieser Studie nicht berücksichtigten 41 BHKW wurden mit den **Datenbanknummern 98. bis 138.** registriert (**Anlage 6**).

**Tabelle 3:** Datenbankregistratur unter Berücksichtigung der Motorenhersteller

Datenbank-Nr.	Motorhersteller	Verfahren	
1. bis 10.	MAN Nutzfahrzeuge AG München	Gas-Otto	
11.		Zündstrahl	
12. bis 17.		Gas-Otto	
18. bis 24.	MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH Augsburg		
25. bis 36.	GE Energy <b>Jenbacher</b> Gasmotoren <b>Österreich</b>		
37. bis 48.	<b>Caterpillar</b> Inc. Peoria (Illinois, USA)		
49. bis 66.	MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH (bis 30.09.08 → <b>Deutz Power Systems</b> GmbH Mannheim)		
67. und 68.	<b>TEDOM</b> s.r.o. divize MOTORY Jablonec nad Nisou (CZ)		
69. und 70.	<b>Liebherr</b> – Machines Bulle S.A. (CH)		
71. bis 83.	<b>Deutz</b> AG Köln		Zündstrahl
84. bis 86.	<b>Scania</b> CV AB Södertälje (Schweden)		
87. bis 95.	<b>Perkins</b> Engines Company Limited Peterborough (GB)		
96.	GM <b>Daewoo</b> Auto & Technology (Südkorea)		
97.	<b>Volvo</b> Penta AB Göteborg (Schweden)		

Im Weiteren werden die Ergebnisse hinsichtlich des Ist-Zustandes für die jeweiligen Untersuchungen (z. B. **Abbildung 3** → Biogaserzeugung, BHKW-Spezifikationen) erläutert. Die Basis für diese Untersuchungen bildet der nachfolgend vorgestellte Datenbestand.

### 4.1 Datenbestand

Die **Abbildung 6** veranschaulicht die allgemeinen Ergebnisse zur durchgeführten Datenerfassung für die im Freistaat Sachsen installierten landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Des Weiteren ist der resultierende Unterlagen- und Datenbestand hinsichtlich der im Weiteren vorzustellenden Untersuchungsergebnisse unter Berücksichtigung der Aspekte des Vorliegens der Angaben zu den BHKW-Spezifikationen und den Formaldehydemissionen ersichtlich. Die

Differenz zwischen dem Istbestand von 139 landwirtschaftlichen Biogasanlagen am 01.03.2008 und den Anschreiben an 135 Unternehmen bzw. Institutionen erklärt sich aus der Tatsache, dass einige Agrarunternehmen zwei oder drei landwirtschaftliche Biogasanlagen an jeweils verschiedenen Standorten betreiben. Beispielhaft ist die Landwirtschaftsgenossenschaft e. G. Ottendorf/Krumbach mit Sitz in Lichtenau zu nennen. Diese betreibt Biogasanlagen-BHKW sowohl in Ottendorf als auch in Krumbach.

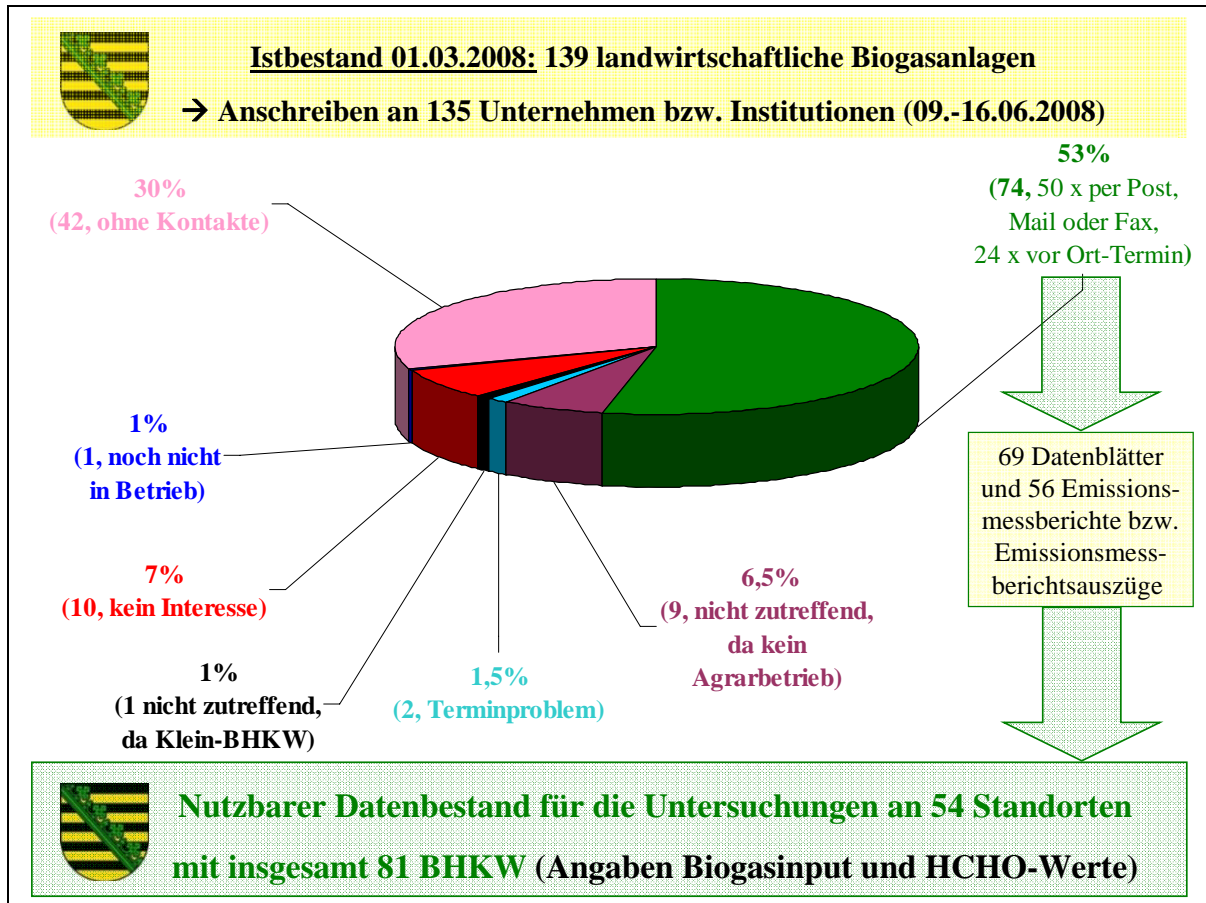


Abbildung 6: Datenbestand der für Sachsen zu untersuchenden Biogasanlagen-BHKW

Das Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie hat Daten von 19 Anlagenstandorten, mit insgesamt 28 Biogas-BHKW, übermittelt. Den für die Untersuchungen resultierenden nutzbaren Datenbestand, also Angaben sowohl zum Biogasinput als auch zu den Formaldehydemissionen, zeigt die **Tabelle 4**.

**Tabelle 4:** Datenbestand der für Thüringen zu untersuchenden Biogasanlagen-BHKW

<b>FREISTAAT THÜRINGEN</b>	
Datenbestand	19 Standorte → 28 BHKW
Datenbasis	19 Datenblätter
<b>mit Formaldehydemissionswerten und BHKW-Spezifikationen</b>	<b>12 Anlagen → 16 BHKW</b>
<b>ohne Formaldehydemissionswerte, aber mit BHKW-Spezifikationen</b>	<b>7 Anlagen → 12 BHKW → ohne Untersuchungen</b>



## 4.2 Allgemeine Angaben der Anlagenstandorte

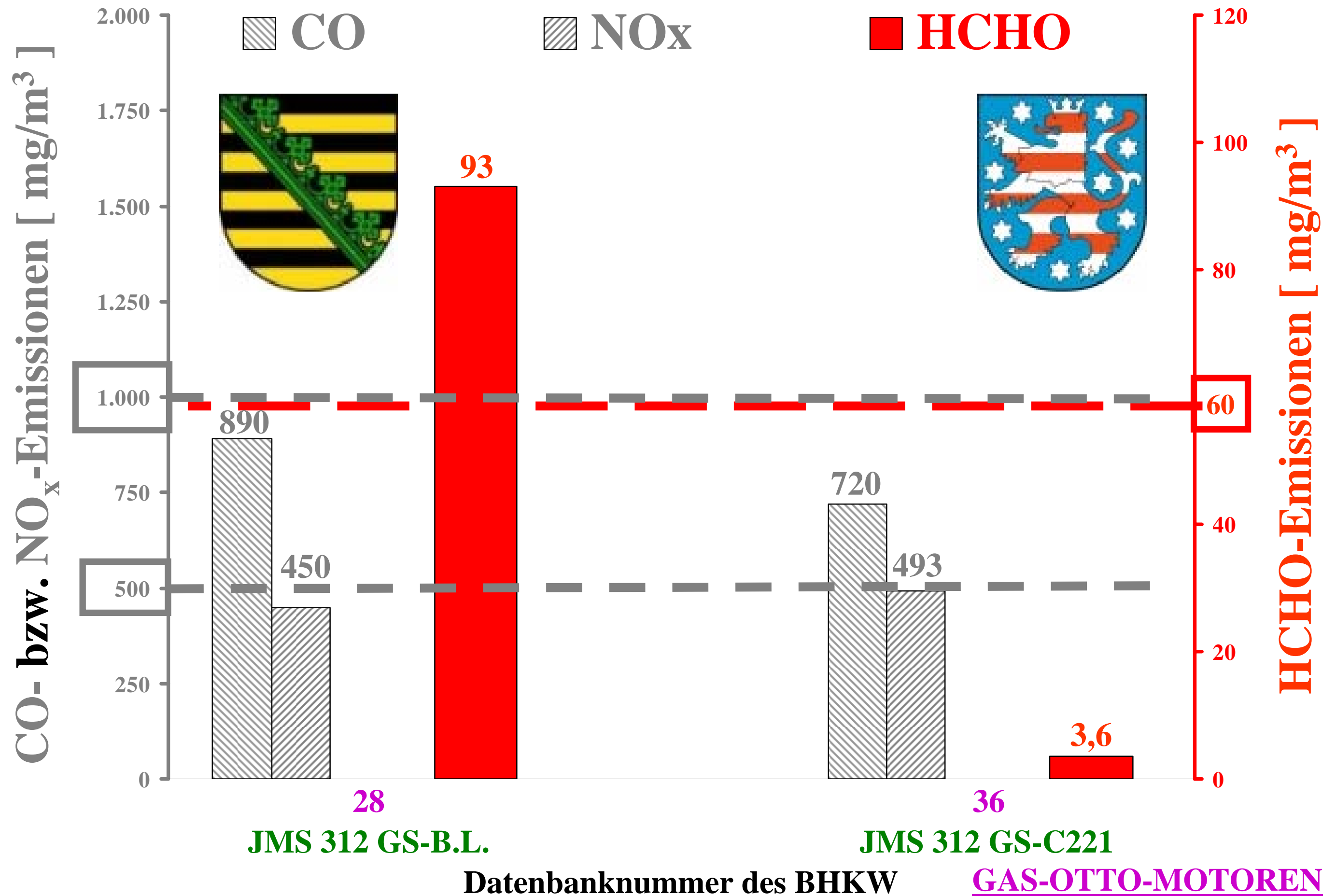
Gemäß Angaben in den Datenblättern bzw. Emissionsmessberichten sind in Sachsen Anlagen zu untersuchen, die im Zeitraum Dezember 1994 bis einschließlich Januar 2008 in Betrieb genommen wurden. Hinsichtlich der Thüringer Anlagen ist den Datenblättern zu entnehmen, dass diese zwischen 1996 und 2006 den Betrieb aufgenommen haben. Auf Grund unterschiedlicher Inbetriebnahmezeitpunkte dürfte von unterschiedlichen Entwicklungsständen der eingesetzten Technik auszugehen sein. Auf diesen Aspekt wird teilweise im **Abschnitt 4.4**, in dem die BHKW-Spezifikationen erläutert werden, eingegangen. Die in dieser Studie zu berücksichtigenden Biogasanlagen wurden durch bis zu ca. 20 verschiedene Maschinen- und Anlagenbauunternehmen bzw. Ingenieurbüros geplant und errichtet (**Anlage 7**).

## 4.3 Biogaserzeugung

### 4.3.1 Nass- und Trockenfermentation

Ausgenommen je eine landwirtschaftliche Biogasanlage in Sachsen (Datenbanknummer „28“) bzw. in Thüringen (Datenbanknummer „36“), die nach dem Prinzip der Trockenfermentation arbeiten, wird laut Datenblattangaben bei allen übrigen zu untersuchenden Anlagen die Nassfermentation angewendet. Hinsichtlich des Anlagentyps sind diese als NaWaRo-Anlagen mit Wirtschaftsdünger einzuordnen. Anzumerken ist jedoch, dass im Datenblatt für die Thüringer Anlage mit o. g. Datenblattnummer „Nassfermentation“ angegeben war. Laut Datenblatt werden als Substrate keine Wirtschaftsdünger, sondern ausschließlich NaWaRo´s bei einer Fermenterverweilzeit von 170 Tagen, eingesetzt. Deshalb wurde eingeschätzt, dass diese der Verfahrensspezifikation „Trockenfermentation“ zuzuordnen ist.

Unter Berücksichtigung o. g. Aspekte sowie in Auswertung der jeweiligen Datenblätter bietet sich eine Untersuchung zur Trockenfermentation an. Gemäß Datenblättern sind die jeweils betreffenden Standorte in Sachsen bzw. in Thüringen (Datenbanknummern „28“ u. „36“) mit je einem GE Jenbacher-Motor-BHKW ausgelegt. Hierbei dürfte es sich um die annähernd gleiche Motorspezifikation (**Abbildung 7**) handeln. Ein Unterschied ist zurzeit lediglich anhand der Motorbezeichnungen (**JMS 312 GS-B.L.**, **JMS 312 GS-C221**) erkennbar. Die in den Datenblättern angegebenen Motordaten (z. B. elektr. Leistung  $\approx$  545 kW) lassen auf diese annähernde Vergleichbarkeit schließen. In der **Abbildung 7** sind die übermittelten Emissionswerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffoxid- (NO<sub>x</sub>) und Formaldehyd (**HCHO**) dieser beiden BHKW dargestellt. Für die NO<sub>x</sub>- bzw. CO-Emissionen wird ersichtlich, dass die TA Luftgrenzwerte eingehalten wurden. Sehr auffallend sind die stark gegensätzlichen HCHO-Werte. Es wird eingeschätzt, dass als evtl. Ursachen für den hohen HCHO-Ausstoß durch das BHKW mit der Datenbanknummer „28“ unvollständige Verbrennungsprozesse lokalisiert werden könnten. Hierbei könnten sowohl die Brenngaszusammensetzung (Biogasinput) als auch die motorischen Prozesse und die Verbrennungsmotorenkonfiguration (z. B. Zündanlage) sowie der Wartungszustand der jeweils eingesetzten BHKW-Spezifikation von besonderer Bedeutung sein. Ausgehend von diesen Überlegungen werden zunächst nachfolgend sowie in den **Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.14** die evtl. Einflüsse ausgewählter Parameter der Biogaserzeugung auf die Brenngaszusammensetzung (Biogasqualität) untersucht. Dabei erfolgen überwiegend Darstellungen bezüglich des Methananteils im Biogas und teilweise mit Bezug auf die vorliegenden HCHO-Werte. Die Reihenfolge der jeweiligen Untersuchungsparameter wurde überwiegend bewusst an das Datenblatt (**Anlage 4**) angepasst. Je nach vorgestelltem Parameterergebnis (z. B. Verweilzeit) wird, sofern sinnvoll, auf die Untersuchungen zu den BHKW-Spezifikationen (**Abschnitt 4.4**) hingewiesen. Die Datenbanknummern für **Gasotomotoren** werden „ROSA“ und die für **Zündstrahlmotoren** „BLAU“ hervorgehoben.



**Abbildung 7:** Abgasemissionen von 2  **GE Jenbacher** -Motoren-BHKW (Baureihe 3 → 12 Zyl., V-Form)

### 4.3.2 Fermenter

Hinsichtlich der Fermenterbauarten kann in voll durchgemischte Rührkessel-, Pfropfenstrom- und Doppelkammerfermenter (z. B. Pfefferkornfermenter → **Abbildung 8**) unterschieden werden.



**Abbildung 8:** Gaslager (links) u. Pfefferkornfermenter (rechts) an der Biogasanlage der MKH Agrar-Produkte GmbH Kotten (bei Wittichenau, Landkreis Bautzen, Sachsen)

Die Volldurchmischung in Rührkesselfermentern, die überwiegend stehend installiert werden, erfolgt hauptsächlich mechanisch mittels Tauchmotor-, Paddel- bzw. Großflügelrührwerken, Gaseindüsung oder Umwälzsystemen.

Pfropfenstromfermenter werden liegend aufgestellt, wobei die Rührvorgänge gleichfalls mechanisch durch Haspel- bzw. Längswellenrührwerke realisiert werden (**Abbildung 9**).

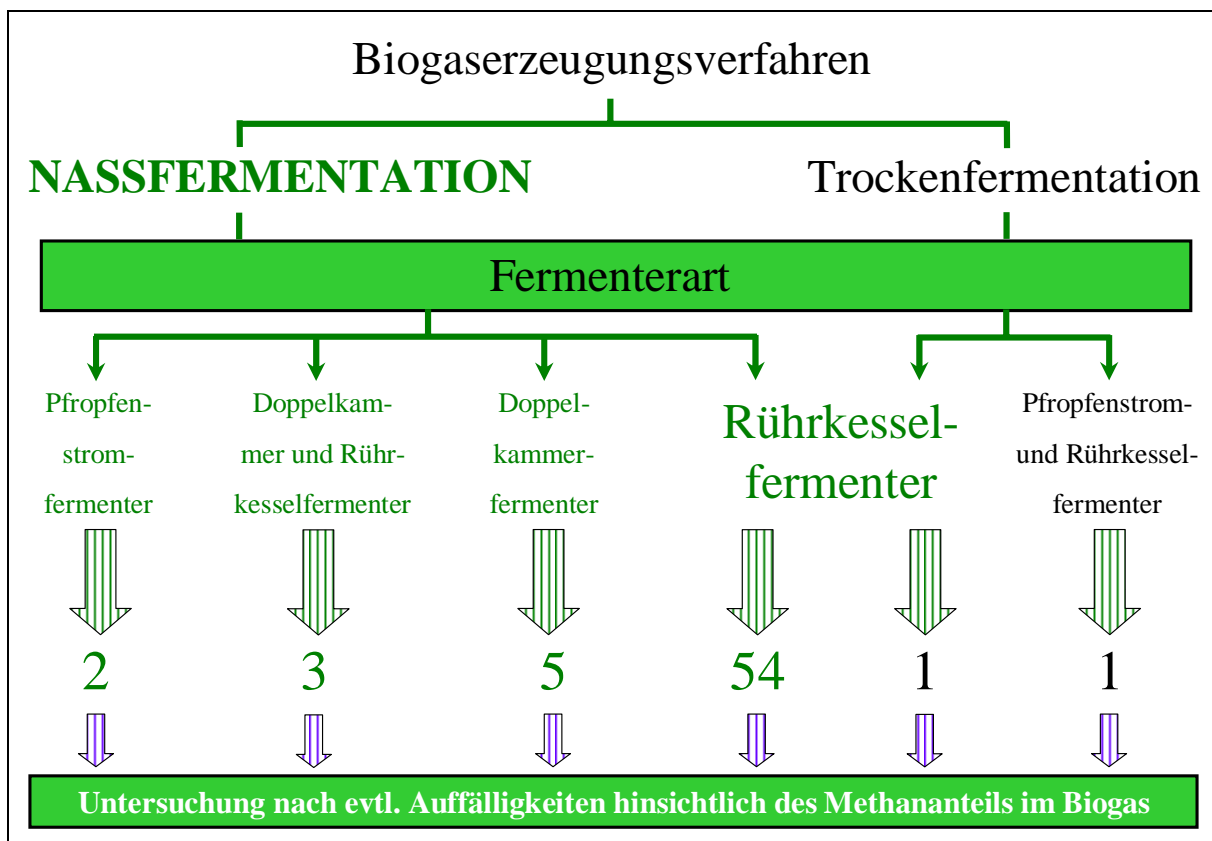


**Abbildung 9:** Pfropfenstrom- u. Rührkesselfermenter sowie Gärrestlager an der Biogasanlage der Agrargenossenschaft Krippelna e. G. Zschepplin (Landkreis Nordsachsen)



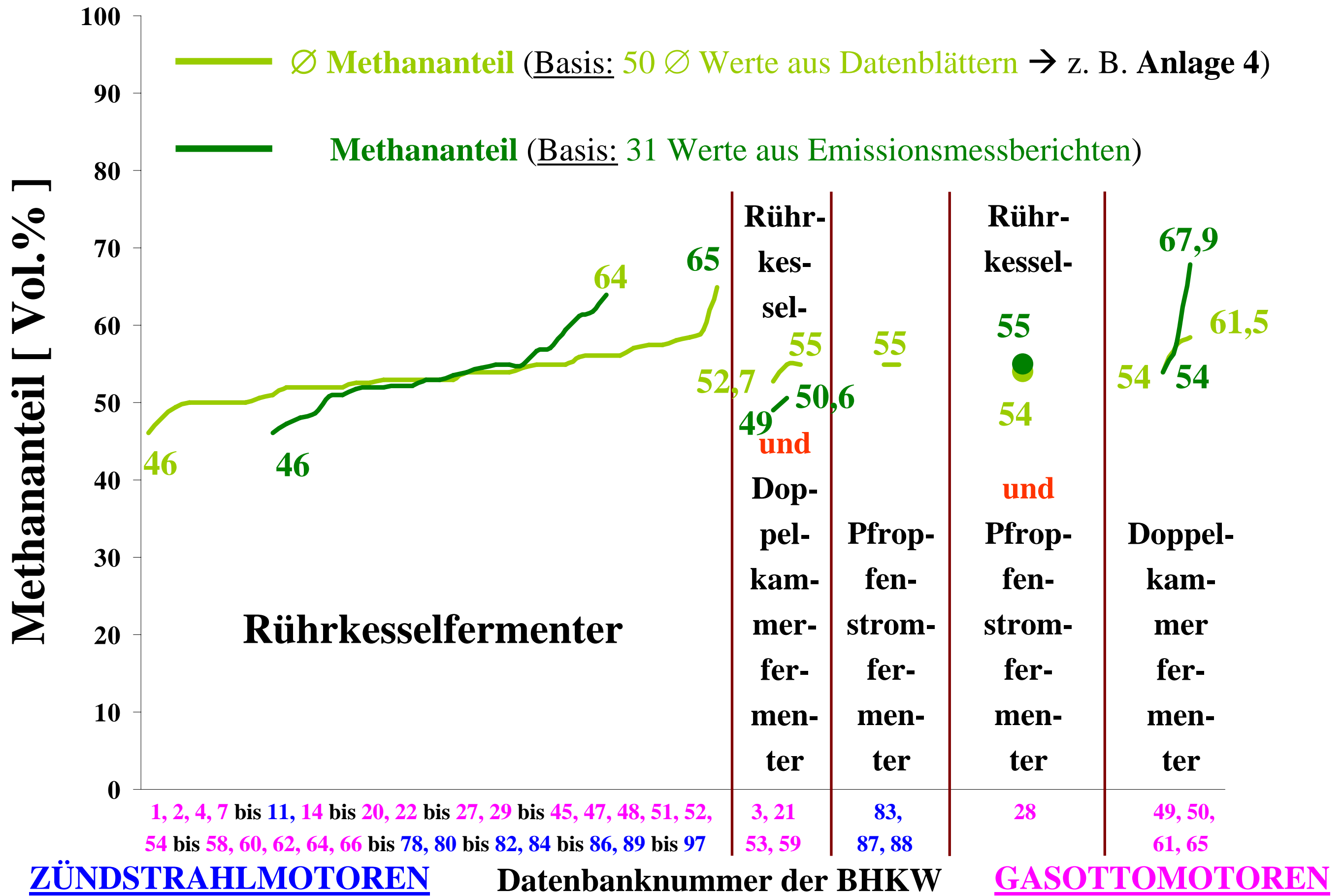
Doppelkammerfermenter sind in eine Hauptgärkammer und eine Trennkammer unterteilt. Bei der Vergärung wird das physikalische Prinzip der Flüssigkeitsverdrängung ausgenutzt. Dementsprechend handelt es sich um eine hydraulische Durchmischung. Hinsichtlich der Funktionsweise wird auf die Quelle /21/ hingewiesen. Die Auslegung mit Doppelkammerfermenter, in der Ausführung als Pfefferkornfermenter, wird beispielsweise oft durch die AgroNet Gesellschaft für modernes Agrarmanagement und -technik mbH Dresden realisiert.

Die **Abbildung 10** gibt einen Überblick über die Biogaserzeugungsverfahren und die eingesetzten Fermenterarten an den in dieser Studie für Sachsen bzw. für Thüringen zu berücksichtigenden Biogasanlagen (66 Standorte). Hierbei ist anzumerken, dass in den durch die Betreiber übermittelten Datenblättern voneinander abweichende Eintragungen vorgenommen wurden. Aus diesem Grunde waren Plausibilitätsprüfungen notwendig. Im Ergebnis dessen wurden die Angaben „Volldurchmischung“ den Rührkesselfermentern zugeordnet. Außerdem ist zu erwähnen, dass die Anlagenstandorte, an denen ggf. Nachgärer gleicher Bauart in Reihe oder parallel betrieben werden, nur einmal berücksichtigt wurden.



**Abbildung 10:** Biogaserzeugungsverfahren und Fermenterarten für die in dieser Studie in Sachsen und Thüringen zu berücksichtigenden Biogasanlagen an 66 Standorten

Die **Abbildung 11** veranschaulicht den jeweiligen Methananteil im Biogas für 61 Standorte. Diese wurden aufsteigend, ohne Berücksichtigung der Datenbankreihenfolge der BHKW, aneinandergereiht dargestellt. Für 5 Standorte sind weder aus den Datenblättern noch aus den Emissionsmessberichten Angaben zum Methananteil im Biogas zu entnehmen. Die Darstellung zeigt keine nennenswerten Auffälligkeiten beim Vergleich der eingesetzten Fermenterarten, wobei die Ergebnisse für die Kombinationen von Rührkessel- mit Doppelkammer- bzw. mit Pfropfenstromfermenter sowie für die beiden Pfropfenstromfermenter als nicht repräsentativ zu bewerten sind.



**Abbildung 11:** Untersuchung Methananteile / Fermenterarten (Datenbasis: 61 Standorte → 91 BHKW)

### 4.3.3 Methananteil im Biogas

Die Überlegungen zu den evtl. Ursachen von unvollständig ablaufenden Verbrennungsprozessen und infolge dessen der evtl. erhöhten Formaldehydbildungen gingen u. a. davon aus, dass auch der Brenngaszusammensetzung eine besondere Bedeutung beizumessen ist. Dieser Untersuchungsparameter wird separat in **Abschnitt 4.3.14** behandelt. Für die nachfolgenden Untersuchungen ist es jedoch unerlässlich an dieser Stelle, abweichend von der Datenblatteintragsreihenfolge, den Methananteil näher zu betrachten. Dieser bildet die Grundlage für alle auszuführenden Betrachtungen im Zusammenhang mit den Fermentationsprozessen.

Durch den überwiegenden Teil der Betreiber wurden in den Datenblättern entweder die Eintragungen zur Brenngaszusammensetzung hinsichtlich des CH<sub>4</sub>-, CO<sub>2</sub>-, O<sub>2</sub>- sowie H<sub>2</sub>S-Gehaltes vorgenommen oder es wurde angegeben, dass die Brenngaszusammensetzung gemessen wird. Diese Messung erfolgt an den Anlagen sehr differenziert. Ein einheitliches Messprogramm für die Anlagen ist nicht erkennbar. Laut Eintragungen erfolgen die Messungen, z. B. alle 2, 3, 4 oder 6 Stunden, halbtägig oder pro Tag. Hierbei kommen stationäre oder mobile Gasanalysegeräte der verschiedensten Hersteller zur Anwendung. Beispielhaft sind „SR 2-Bio“ von der Hermann Sewerin GmbH Gütersloh, „ExTox IMC 4D“ von der ExTox Gasmesssysteme GmbH Unna, „BC 20“ von der CHEMEC GmbH Bielefeld, „SSM 2000“ von der PRONOVA Analysetechnik GmbH & Co. KG Berlin (z. B. **Abbildung 12, links**) und „TRM 816“ von AWITE Bioenergie GmbH Langenbach (z. B. **Abbildung 12, rechts**) zu nennen.



**links**

„SSM 2000“  
von der Firma  
PRONOVA

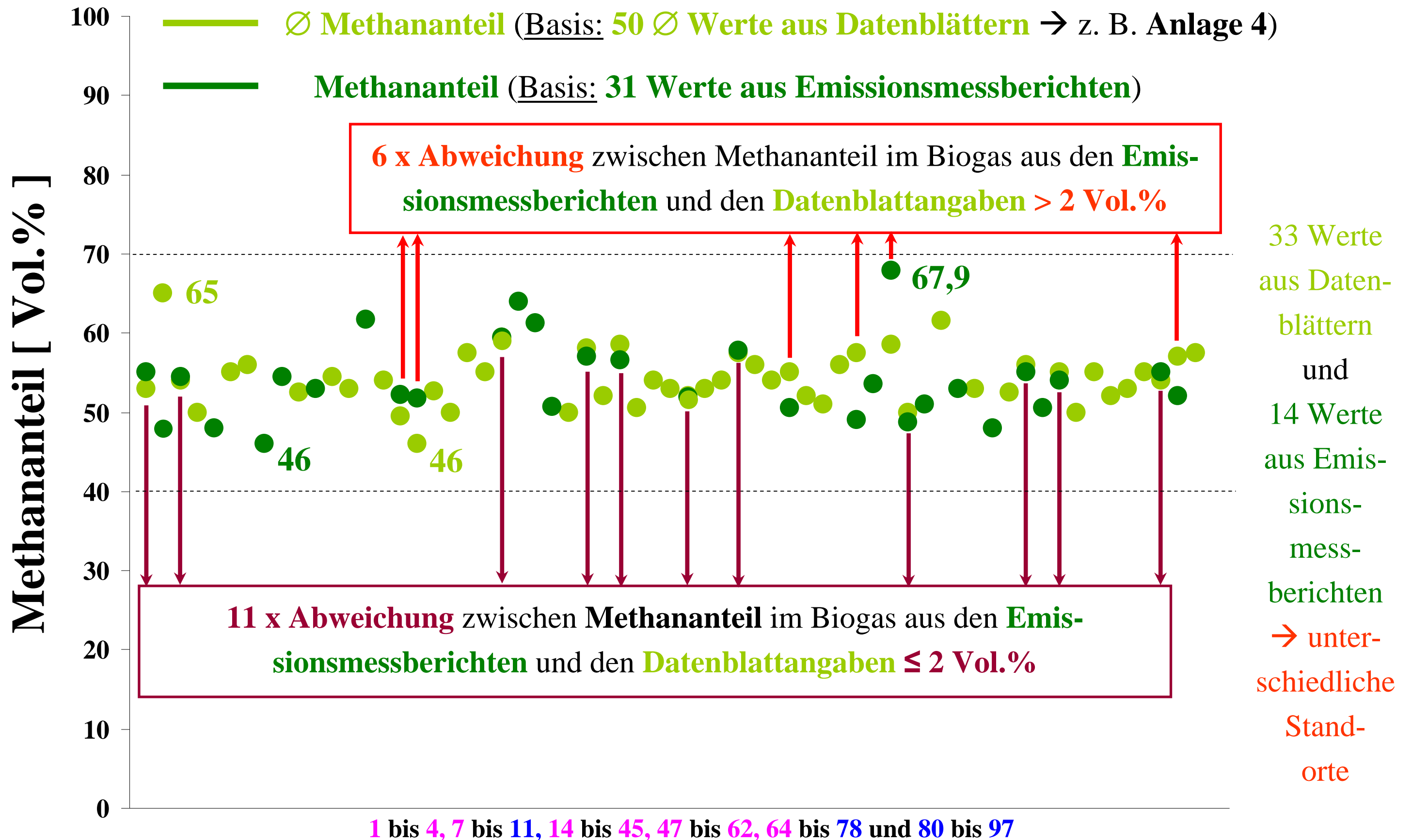


**rechts**

„TRM 816“  
von der Firma  
AWITE

**Abbildung 12:** Beispiele stationärer Gasanalysegeräte in Pöhsig (**links**) u. in Kotten (**rechts**)

Die laut Datenblättern angegebenen CH<sub>4</sub>-Anteile waren Plausibilitätsprüfungen zu unterziehen, da teilweise Bereiche mit Abweichungen bis zu 15 Vol.% ausgewiesen wurden. Hierfür bot sich ein Vergleich mit den in 31 Emissionsmessberichten enthaltenen Angaben an, die am Tag der Messung mit erfasst wurden (**Abbildung 13**). Es sind 6 Abweichungen > 2 Vol.% und 11 Abweichungen ≤ 2 Vol.% zwischen Datenblattangaben und Emissionsmessberichten ersichtlich. Um Ergebnisverfälschungen zu vermeiden, werden die nachfolgenden Untersuchungen (Biogasinput) hauptsächlich auf die Daten am Emissionsmesstag bezogen (31 Standorte → 43 BHKW).



(5, 6, 12, 13, 46, 63 und 79 ohne Berücksichtigung, da keine Angaben vorliegen!)

**ZÜNDSTRAHLMOTOREN**

Datenbanknummer der BHKW

**GASOTTOMOTOREN**

Abbildung 13: Vergleich der bei Emissionsmessung erfassten Methananteile mit dem Ø laut Datenblättern

#### 4.3.4 Prozessstufen

Die Vergärung der eingesetzten Wirtschaftsdünger und NaWaRo's erfolgt in vier Stufen. Dabei handelt es sich um die Hydrolyse, die Versäuerung, die Essigsäurebildung und die Methanbildung. Die Beschreibung des Prozessverlaufes in den jeweiligen Stufen ist nicht Bestandteil dieser Studie. Diese können beispielsweise ausführlich in /10/, /11/ und /12/ nachvollzogen werden.

In der Praxis kann eine Unterscheidung in ein-, zwei- oder mehrstufige Verfahren vorgenommen werden. Dabei werden den einstufigen Verfahren die Biogasanlagen zugeordnet, bei denen alle vier Stufen weder zeitlich noch räumlich voneinander getrennt ablaufen. Dementsprechend laufen alle Stufen, beginnend mit der Hydrolyse bis zur letzten Stufe, der Methanbildung, in einem Fermenter ab. Sofern die vier Prozessstufen in zwei oder mehreren räumlich von einander getrennten Behältern stattfinden, können diese als zwei- oder mehrstufige Verfahren definiert werden.

Bestandteil der Untersuchungen in dieser Studie ist, ob der Vergärungsprozess in Abhängigkeit der jeweils angewandten ein-, zwei- oder mehrstufigen Verfahren die Methananteile im Biogas beeinflusst und dieser evtl. mit den Formaldehydemissionen korreliert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der **Abbildung 14** (Seite 30) aufgetragen. Zwecks Feststellung evtl. Korrelationen zwischen Methananteil im Biogas und den Formaldehydemissionen wurde eine Klassifizierung nach ein-, zwei- und dreistufigen Verfahren realisiert. Dabei konnten die Daten für 29 Standorte, an denen insgesamt 40 BHKW betrieben werden, Berücksichtigung finden. Für die BHKW mit den Datenbanknummern „7“, „19“ und „20“, welche an zwei verschiedenen Standorten in Sachsen installiert sind, ist zurzeit wegen nicht ausreichender Datenbasis keine Klassifizierung nach Prozessstufen möglich. Da für diese beiden Standorte jedoch im Rahmen der Abschlussberichtserstellung zur Studie evtl. kurzfristige Datenblattübermittlungen erfolgen könnten, wurde zwecks ggf. notwendiger Aktualisierung entschieden, diese in die Betrachtungen und diese resultierende Darstellung zu den Prozessstufen sowie in alle weiteren Untersuchungen zum Biogasininput einzubeziehen. Wie aus der **Abbildung 14** ersichtlich wird, gelangt überwiegend das einstufige Verfahren zur Anwendung. An zehn für diese Untersuchung zu berücksichtigenden Standorten (= 11 BHKW) wird das zweistufige Verfahren angewandt. Hierbei erfolgt an zwei Standorten mit je einem BHKW („22“, „24“) eine externe Hydrolyse außerhalb des Hauptfermenters, an sechs Biogasanlagen ein Reihenbetrieb von zwei Fermentern gleicher Bauart als Rührkesselfermenter und an zwei Standorten die Kombination von Doppelkammer- und Rührkesselfermenter („3“, „21“ und „53“). Für die Untersuchungen war insbesondere interessant, ob die Hydrolyse außerhalb des Fermenters zu evtl. höheren Methananteilen beitragen kann und sofern eine Korrelation zwischen Methananteil zu den Formaldehydemissionen feststellbar ist, eine evtl. Maßnahme zur Minderung dieser Emissionen darstellen könnte.

Die **Abbildung 14** veranschaulicht, dass keine evtl. Einflüsse und Korrelationen sowohl zwischen der Anwendung ein- bzw. zweistufiger Verfahren als auch bei der Betrachtung des Fermenterreihenbetriebes bzw. der externen Hydrolyse für die untersuchten BHKW wahrzunehmen sind. An den Standorten mit externer Hydrolyse werden ca. 47 Vol.% („22“) bzw. ca. 62 Vol.% („24“) Methananteil im Biogas erreicht. Beim Vergleich zwischen ein- und zweistufigen Verfahren sind keine wesentlichen Methananteilsunterschiede nur wegen Anwendung dieser unterschiedlichen Verfahren zu erkennen. Der Standort mit dreistufigem Verfahren wird nicht näher behandelt, da dieser keine Repräsentativität darstellt und sofern zwingend notwendig einer weiteren Plausibilitätsprüfung zu unterziehen wäre.



In Auswertung der **Abbildung 14** wird eingeschätzt, dass je nach standortspezifischen Gegebenheiten Optimierungen der Biogaserzeugung zu höheren Methananteilen führen könnten, jedoch keine direkten Korrelationen zwischen Prozessstufen, Methananteil und Formaldehyd-emissionen zu analysieren sind. Beispielhaft sind die BHKW mit den Datenbanknummern „61“ und „22“ zu nennen. Bei gegensätzlichen Methananteilen von  $\approx 68$  Vol.% („61“) und  $\approx 47$  Vol.% („22“) sind maximale Formaldehydemissionswerte von  $189,4 \text{ mg/m}^3$  („61“) bzw.  $42,6 \text{ mg/m}^3$  („22“) analysiert worden.

Zum besseren Verständnis der in diesem Abschnitt bzw. nachfolgend für die jeweiligen **Abschnitte 4.3.5 bis 4.3.14** vorgestellten Untersuchungsergebnisse und Abbildungen werden zunächst anhand der **Abbildung 14** einige allgemeine Ausführungen vorgenommen.

1. In den **Anlagen 8a** und **8b** sind in Form von tabellarischen Zusammenstellungen die Ausgangsdaten, Ansätze, Spezifikationen und Werte, die den Datenblättern bzw. Emissionsmessberichten entnommen wurden, ersichtlich. Diese wurden nicht unter Berücksichtigung der Datenbanknummern, sondern nach erfassten Methananteil im Biogas geordnet und bilden eine der wesentlichsten Grundlagen der nachfolgenden Untersuchungen zu den Biogaserzeugungsprozessen. Durch diese Aufstellungen ist die Nachvollziehbarkeit der jeweiligen Untersuchungen gegeben.
2. Die Untersuchungen betreffen auch Standorte, an denen 2 bzw. 3 BHKW installiert sind (z. B. Datenbank-Nr. „3“ u. „21“ sowie „91“, „92“ u. „93“ → **Abbildung 14**). Dementsprechend bewegen sich die dargestellten Methananteile auf gleichem Niveau (**Abbildung 14**, z. B. „14“ u. „15“ → **46 Vol. %**). Demgegenüber werden jedoch hinsichtlich der Formaldehydemissionsmesswerte Abweichungen ersichtlich, da auch unterschiedliche Werte analysiert wurden.
3. Die ersten Datenauswertungen haben ergeben, dass sowohl die Anlagenauslegungen als auch die Ausgangsdaten der jeweils zu untersuchenden Parameter (z. B. Methananteil in Abhängigkeit der Prozesstemperaturen, der Fermenterverweilzeiten, der Rührdauer bzw. der Rühranzahl) sehr stark streuen (z. B. **Anlagen 8a** und **8b**). Aus diesem Grunde werden abweichend von der ursprünglichen Planung keine statistischen Betrachtungen durchgeführt. Das Ziel dieser statistischen Betrachtungen bestand darin, Gemeinsamkeiten mehrerer Untersuchungsparameter für verschiedene Anlagenstandorte herauszuarbeiten und daraus resultierend Vergleichsanlagen zu definieren. Dabei wird jedoch die direkte Betrachtung der vorliegenden Formaldehydemissionswerte mit Bezug auf die jeweiligen Prozessparameter als nicht zielführend angesehen. Es ist davon auszugehen, dass sich die jeweils zu betrachtenden Prozessparameter, z. B. Fermentertemperatur, zunächst auf die Methanbildung und, sofern Korrelationen feststellbar sind, daraus resultierend die Methananteile im Biogas auf die Formaldehydbildung auswirken könnten. Dementsprechend wären für statistische Auswertungen beispielsweise folgende Fragestellungen von Bedeutung gewesen:

„Welcher  $\text{CH}_4$ -Anteil im Biogas wird bei welcher Prozesstemp. am Häufigsten erreicht?“

„Welcher  $\text{CH}_4$ -Anteil im Biogas wird bei welcher Verweilzeit am Häufigsten erreicht?“

„Welcher  $\text{CH}_4$ -Anteil im Biogas wird bei welcher Rührdauer am Häufigsten erreicht?“

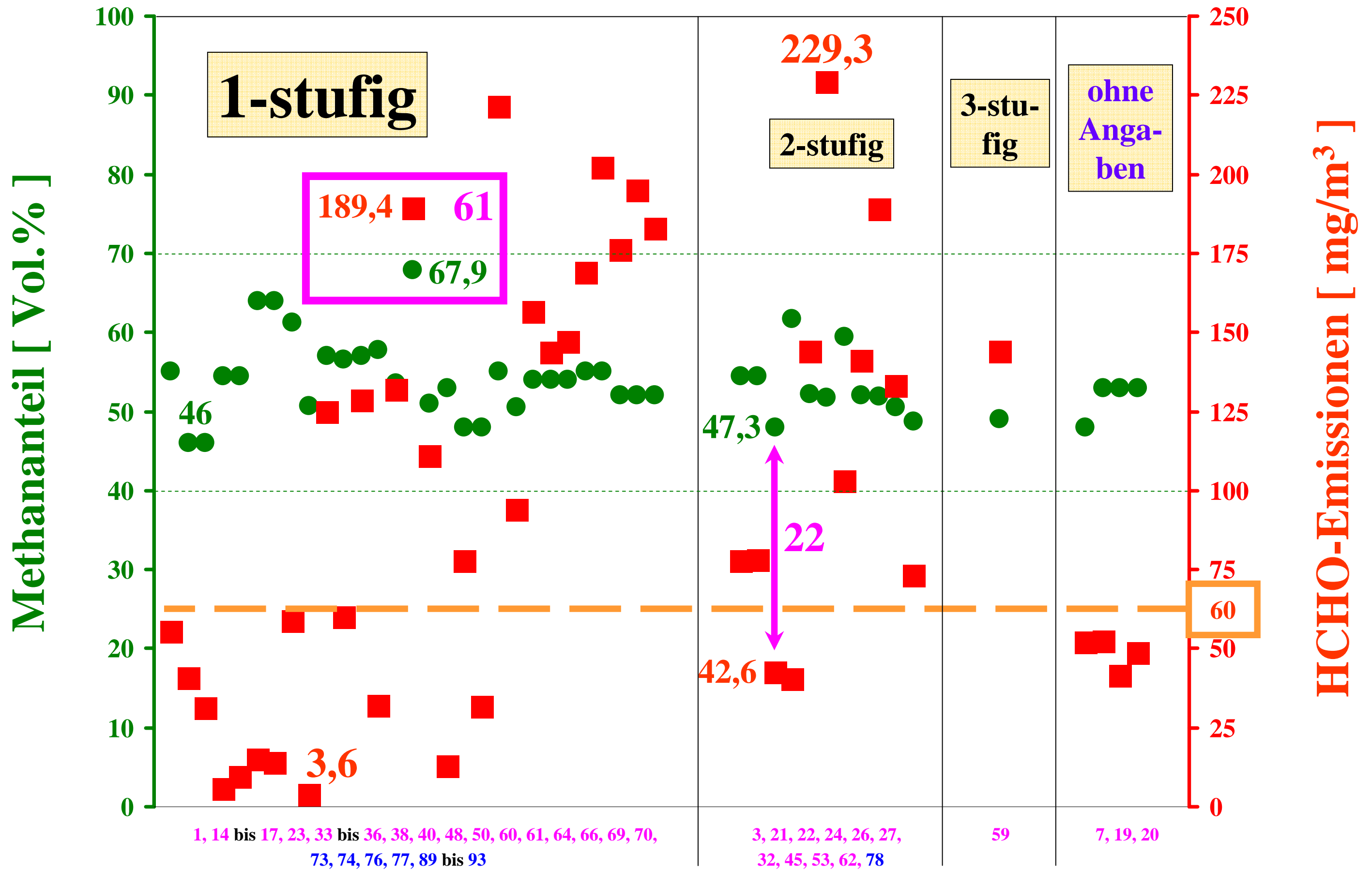
Das Ergebnis dieser ersten o. g. theoretischen Betrachtungen hat sich mit abweichenden Methananteilen dargestellt. Es war festzustellen, dass keine Herausarbeitung von repräsentativen Vergleichsanlagen möglich sein wird.

4. Ausgehend von den unter 3. genannten Aspekten wurde überlegt, auf welche Weise Klassifizierungen der jeweiligen Untersuchungsparameter (z. B. Methananteil / Prozesstemperatur) definiert werden können. Im Ergebnis dieser Überlegungen wurde festgelegt, die Klassen in Anlehnung an /22, 23, 24/ nach **Formel (1)** einzuteilen, wo dies sinnvoll erscheint. Dies betrifft vor allem die Untersuchungsparameter für die auch Werte vorliegen. In diesem Zusammenhang sind die Prozesstemperatur, die Fermenterverweilzeit sowie die Anzahl und die Dauer der Rührvorgänge zu nennen.

$$br = \sqrt{\max - \min} \quad (1)$$

br	[ ... ]	Klassenbreite
max	[ ... ]	Maximum
min	[ ... ]	Minimum

5. Die Klasseneinteilung für die Untersuchungsparameter, in denen keine Werte, sondern Spezifikationen relevant sind, erfolgt unter Berücksichtigung dieser jeweiligen Auslegungen. Beispielhaft ist auf die Anzahl der arbeitstäglichen Beschickungen und auf die verwendeten Substrate hinzuweisen.
6. Für einige Klassen weicht die Anzahl der dargestellten Werte von der Anzahl der auf der x-Achse benannten Datenbanknummern ab. Diese Abweichung resultiert daraus, dass für einige BHKW Formaldehydemissionswerte von verschiedenen Messtagen oder nach unterschiedlichem Analyseverfahren vorliegen. Beispielhaft ist die Klassifizierung „ohne Angaben“ in **Abbildung 14** (4 Methananteils- und Formaldehydemissionswerte für „7“, „19“ und „20“) zu nennen. Für den Standort mit den Datenbanknummern (= BHKW-Nr.) „19“ und „20“ wurden Formaldehydanalysen für „20“ sowohl nach dem AHMT- als auch nach dem DNPH-Verfahren ermittelt.
7. Teil- oder Volllastbetrieb wurden nicht berücksichtigt. In den **Abbildungen 14, 16, 19, 21, 24, 25, 27 bis 29, 31, 32 und 36 bis 39** sind ausschließlich aus den Messberichten entnommene Maximalwerte für Formaldehyd sowie ggf. für Kohlenmonoxid und Stickstoffoxid dargestellt. Die Darstellung von teilweise auch in den Messberichten ausgewiesenen Mittelwerten würde zum Verfälschen der Ergebnisse führen. Die Untersuchungen zum evtl. Einfluss der Lastanforderungen (Voll- bzw. Teillast) werden teilweise für die jeweiligen BHKW-Spezifikationen im **Abschnitt 4.4** vorgestellt.
8. Für einige in dieser Studie zu berücksichtigende Standorte bzw. BHKW fehlen einige Angaben. Je nach Untersuchungsparameter (z. B. Fermenterverweilzeit) werden diese jeweils betreffenden BHKW dennoch in den Abbildungen dargestellt. Hierbei handelt es sich überwiegend um Anlagen, von denen demnächst bzw. nach dem Projektende die entsprechenden Angaben erwartet werden, so dass möglichst zeitnah und effizient eine ggf. Aktualisierung unter Berücksichtigung der jeweiligen Klassifizierung unmittelbar nach dem Dateneingang realisiert werden kann. Dadurch wird gewährleistet, dass für alle zum Biogasinput zu betrachtenden Untersuchungsparameter **Abschnitte 4.3.4 bis 4.3.14 (Abbildungen 14 bis 39)** eine Ergebnissicherheit gegeben ist. Dementsprechend können in jeden dieser Untersuchungsparameter die zum Zeitpunkt der Formaldehydprobenahme tatsächlich erfassten Methananteile für 31 Standorte mit insgesamt 43 BHKW einfließen.
9. Dem Leser wird auffallen, dass sich die nachfolgenden Abbildungen für die jeweiligen Untersuchungsparameter ähnlich darstellen. Dies ist verständlicherweise in der Nutzung der jeweils gleichen Datenbasis für diese 31 Standorte (43 BHKW) begründet. Die Unterschiede zwischen den Abbildungen ist in der jeweiligen Anordnung der zusammengehörigen Werte nach entsprechenden Klassifizierungen für den jeweiligen Untersuchungsparameter zu erkennen.



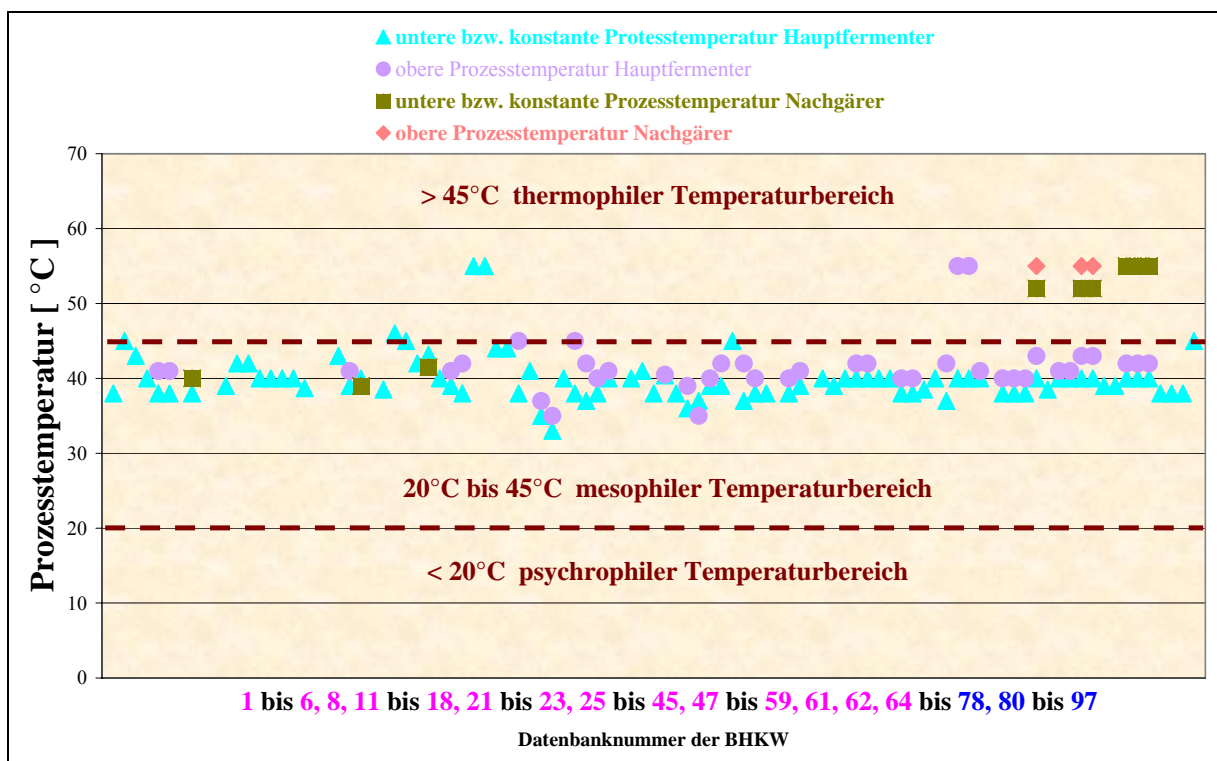
**ZÜNDSTRAHLMOTOREN** Datenbanknummer der BHKW **GASOTTOMOTOREN**

**Abbildung 14:** Untersuchung Prozessstufen / Methananteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)



#### 4.3.5 Prozesstemperatur

Die **Abbildung 15** veranschaulicht die erfassten Prozesstemperaturen für 58 in dieser Studie zu berücksichtigende Biogasanlagenstandorte. Demnach arbeiten diese Anlagen überwiegend im mesophilen Temperaturbereich. Der Fachliteratur sind keine vereinheitlichten Definitionen zum Prozesstemperaturbereich zu entnehmen. Nach Eder und Schulz /11/ sowie Görtsch und Helm /12/ verläuft der Übergang vom psychrophilen zum mesophilen Temperaturbereich bei 25°C. Demgegenüber erfolgte die Charakterisierung der Temperaturbereiche im Rahmen dieser Studie in Anlehnung an Jäckel und Mau /25/. Für einige Anlagen sind sowohl untere als auch obere Prozesstemperaturen sowohl für den Hauptfermenter als auch den Nachgärer angegeben (**Abbildung 15**). Diese Darstellung wurde für die Anlagen gewählt, an denen durch die Betreiber Temperaturbereiche (z. B. 38°C bis 41°C → Datenbanknummern „5“ und „6“) eingetragen wurden. Für die Anlagen, an denen die BHKW mit den Datenbanknummern „7“, „9“, „10“, „19“, „20“, „24“, „46“, „60“, „63“ und „79“ betrieben werden, liegen keine Angaben zur Prozesstemperatur vor, so dass diese nicht in **Abbildung 15** berücksichtigt sind.



**Abbildung 15:** Prozesstemperaturen für 58 zu berücksichtigende Biogasanlagenstandorte

An einigen Standorten werden Hauptfermenter und Nachgärer betrieben. Dabei arbeiten die jeweiligen Hauptfermenter im Temperaturbereich von (40...43)°C. In den jeweils nachgeschalteten Nachgärern läuft die Vergärung thermophil ab, wobei die Anlagenbetreiber den Temperaturbereich von (52...55)°C angegeben haben.

Wie die Erläuterungen zeigen, wird das Biogas unter verschiedenen Randbedingungen erzeugt. Damit stellt auch die Prozesstemperatur einen weiteren Untersuchungsparameter hinsichtlich evtl. Einflüsse auf den Methananteil und den evtl. Korrelationen zur Formaldehydbildung dar. Wie der **Abbildung 15** zu entnehmen ist, sind für diese Untersuchungen Prozesstemperaturen in den Hauptfermentern im Bereich von (33...55)°C sowie einige Sonderfälle, bei denen eine Nachgärung mit höheren Prozesstemperaturen ((52...55)°C) erfolgt, zu betrachten. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte ist für die durchzuführenden Untersuchun-

gen eine entsprechende Klassifizierung vorzunehmen. Für diese Klassifizierung sowie für die Untersuchungen gelten weitere folgende Festlegungen:

1. Die Klasseneinteilung erfolgt ausschließlich für die Hauptfermenter. An den Anlagenstandorten, wo die BHKW mit den Datenbanknummern „22“, „53“, „76“ und „77“ sowie „91“ bis „93“ installiert sind, werden Hauptfermenter mit je einem Nachgärer betrieben. Diese sind in **Abbildung 16** als Sonderfälle 1 bis 4 ersichtlich. Entsprechend Auswertung des Datenbestandes für 66 Standorte mit insgesamt 97 BHKW (vgl. **Abschnitt 4.1**) gibt es weitere Biogasanlagen, an denen Kombinationen aus Hauptfermenter und Nachgärer stationiert sind (vgl. **Abbildung 11** → z. B. Datenbanknummer „59“, **Abbildung 14** → z. B. Datenbanknummern „26“ und „27“). Für diese wurde jedoch nur ein Temperaturbereich bzw. eine konstante Temperatur angegeben. Aus diesem Grunde wurde unterstellt, dass diese Angabe sowohl für den Hauptfermenter als auch den Nachgärer gleichermaßen gilt. Für diese Auslegungen wurde kein Sonderfall berücksichtigt, da die Prozesstemperatur, und nicht die Investition für einen 2. Fermenter (275 € je m<sup>3</sup> Fermentervolumen /11/) den entscheidenden Parameter als evtl. Maßnahme zur Minderung der HCHO-Emissionen darstellen dürfte.
2. Für einige der zu berücksichtigenden Anlagenstandorte wurden sowohl für den Hauptfermenter als auch den Nachgärer Temperaturbereiche mit Abweichungen von bis zu 7°C bzw. 3°C angegeben (**Abbildung 15**). Damit ist nicht zweifelsfrei, ob beispielsweise der jeweilige Hauptfermenter überwiegend mit 38°C oder mit 45°C temperiert ist. Unter Berücksichtigung dieses Aspektes wird zwecks Vermeidung von Ergebnisverfälschungen im Falle von Temperaturbereichsangaben zur Ermittlung der Klassenbreite von den Durchschnittswerten ausgegangen. Der niedrigste Temperaturbereich wurde für die Anlage, an der das BHKW mit der Datenbanknummer „40“ betrieben wird, mit (33...35)°C ausgewiesen. Daraus resultierend ergibt sich mit dem Durchschnittsansatz von 34°C auch das Minimum mit der gleichen Temperatur. Das Maximum der gefahrenen Prozesstemperaturen in den Hauptfermentern liegt für die BHKW mit den Datenbanknummern „33“ und „34“ bei 55°C. Mit Ansatz der entsprechenden Werte in **Formel (1)** ergibt sich die Klassenbreite wie folgt:

$$br = \sqrt{\max - \min} = \sqrt{55^{\circ}\text{C} - 34^{\circ}\text{C}} = 4,58^{\circ}\text{C}$$

Mit der Klassenbreite für die Prozesstemperatur (**T**) = 4,58°C ergeben sich folgende Klassen:

$$\begin{array}{lll} 34^{\circ}\text{C} \leq \mathbf{T} < 38,58^{\circ}\text{C} & 38,58^{\circ}\text{C} \leq \mathbf{T} < 43,16^{\circ}\text{C} & 43,16^{\circ}\text{C} \leq \mathbf{T} < 47,74^{\circ}\text{C} \\ 47,74^{\circ}\text{C} \leq \mathbf{T} < 52,32^{\circ}\text{C} & 52,32^{\circ}\text{C} \leq \mathbf{T} < 56,90^{\circ}\text{C} & \end{array}$$

Die Untersuchungsergebnisse (**Abbildung 16**) zeigen, dass die Hauptfermenter überwiegend im Prozesstemperaturbereich von ca. (38,5...43)°C gefahren werden. Ein direkter evtl. Einfluss der Prozesstemperatur auf den CH<sub>4</sub>-Anteil mit Korrelationen hinsichtlich des HCHO-Ausstosses ist nicht erkennbar. Dies betrifft sowohl die jeweiligen Klassen als auch die Sonderfälle. Beispielhaft wird auf die Standorte mit den Datenbanknummern „32“, „76“/„77“ und „89“/„90“ hingewiesen.

„32“: Temp. (38...42)°C ; **CH<sub>4</sub>-Anteil 59,4 Vol.%** ; **HCHO-Emissionen 103 mg/m<sup>3</sup>**

„76“/„77“: Temperatur Hauptfermenter 40°C, Nachgärer 55°C ; **CH<sub>4</sub>-Anteil 54 Vol.%**; **HCHO-Emissionen (143,6...156,6) mg/m<sup>3</sup>** → „76“ (DNPH- u. AHMT) und **147,1 mg/m<sup>3</sup>** für „77“

„89“/„90“: Temperatur 39°C ; **CH<sub>4</sub>-Anteil 55 Vol.%** ; **HCHO-Emissionen 169,1 mg/m<sup>3</sup>** bzw. **202,7 mg/m<sup>3</sup>**

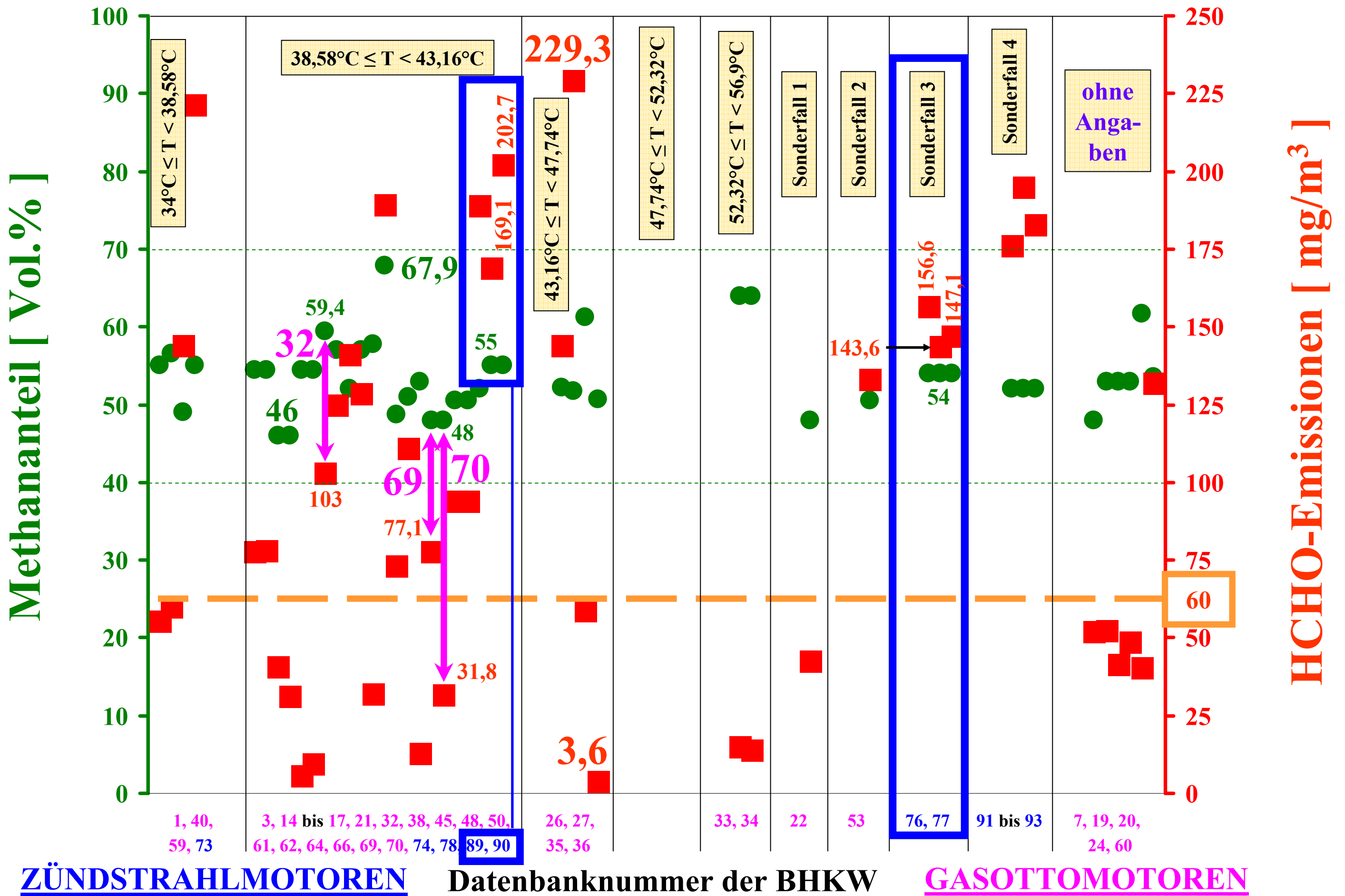


Abbildung 16: Untersuchung Prozesstemp. / Methananteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)

#### 4.3.6 Beschickung und Zerkleinerung

Hinsichtlich der Beschickung wird durch die Mehrheit der Betreiber angegeben, dass diese hauptsächlich quasikontinuierlich bzw. kontinuierlich erfolgt. In Auswertung des Datenbestandes wurden überwiegend Beschickungen mittels Feststoffeintrag in den Fermenter analysiert. Dabei gelangen Dosier- oder Mischstationen verschiedener Anlagenbauunternehmen (z. B. **Abbildung 17**) zur Anwendung. Zur Zerkleinerung der Feststoffe (z. B. Stallung, Mais) werden verschiedene Geräte, Maschinen oder Anlagen eingesetzt. Als Beispiele sind Häcksler, Messer, Reißwalzen, Magnetextruder und Hammermühlen zu erwähnen. Diese Zerkleinerer (z. B. **Abbildung 18**) befinden sich meist in diesen vor dem Fermenter befindlichen Dosier- bzw. Mischstationen, Vor- bzw. Anmischgruben oder Anmischbehältern.



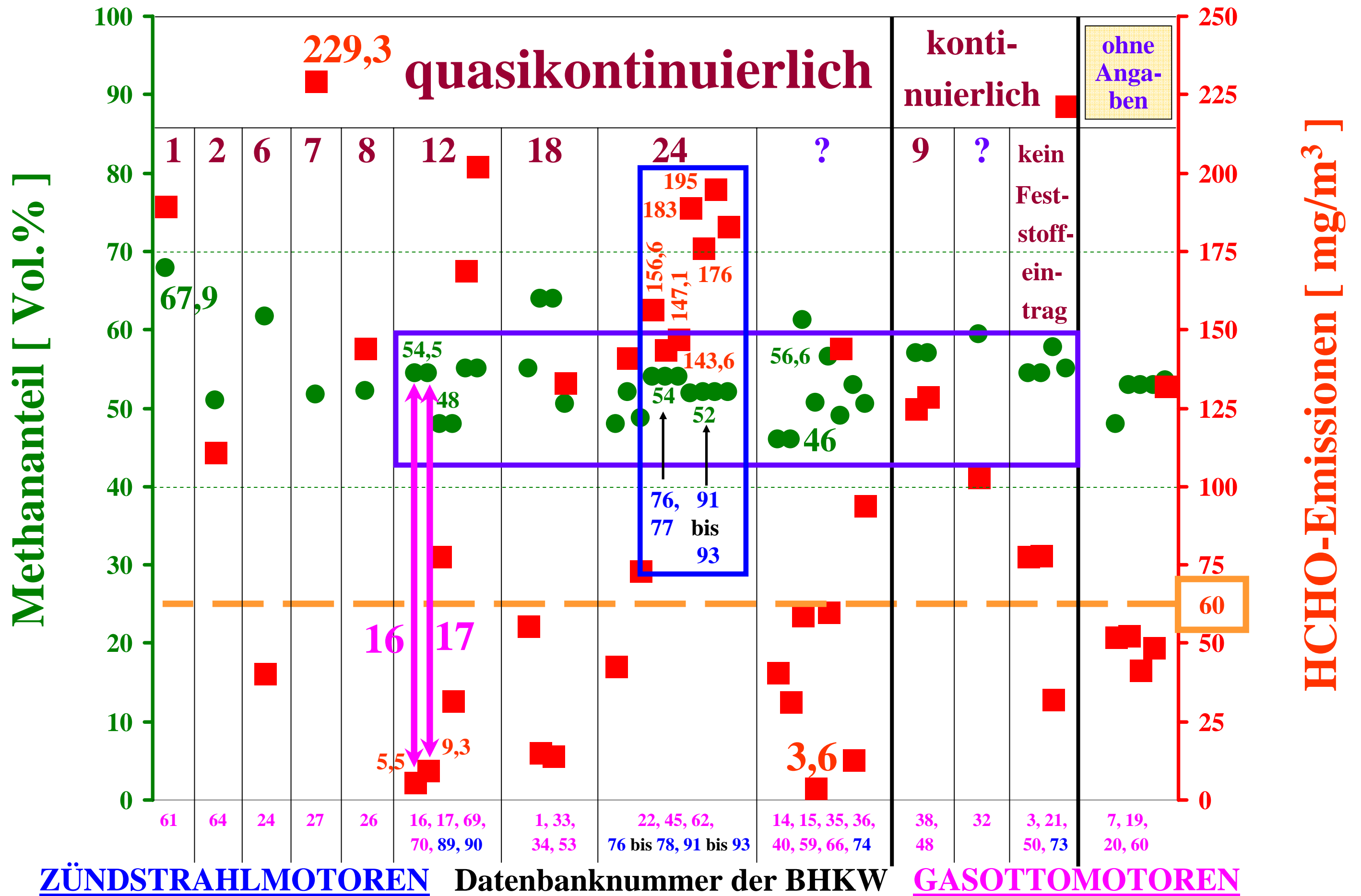
**Abbildung 17:** Mischstation der Firma Trioliet Mullos B. V. Oldenzaal (Niederlande)



**Abbildung 18:** Zerkleinerer „RotaCut 5000“ der Firma Hugo Vogelsang Maschinenbau GmbH Essen (bei Oldenburg)



Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Beschickung sind in der **Abbildung 19** dargestellt. Wie ersichtlich wird, erfolgen an den zu berücksichtigenden 31 Standorten (43 BHKW) hauptsächlich quasikontinuierliche Beschickungen, wobei sich die  $\emptyset$  Anzahl der täglichen Futterzyklen auf 12, 18 bzw. 24 konzentriert. Dafür werden Dosier- bzw. Mischstationen unterschiedlicher Unternehmen (z. B. Konrad Pumpe GmbH, B. Strautmann & Söhne GmbH & Co. KG) eingesetzt. In Auswertung der Untersuchungen (**Abbildung 19**) sind keine Einflüsse des  $\text{CH}_4$ -Anteils im Biogas mit evtl. Korrelationen zur  $\text{HCHO}$ -Bildung in direkter Abhängigkeit zur  $\emptyset$  Anzahl der täglichen Futterzyklen bzw. zur kontinuierlichen bzw. quasikontinuierlichen Beschickung festzustellen. Dabei sind die Ergebnisse für 1, 2, 6, 7, 8 und 9 Futterzyklen als nicht repräsentativ einzuordnen, da diese Klassifizierungen nur ein- bzw. maximal zweimal in die Betrachtungen einfließen. Sowohl in den Klassen bei der  $\emptyset$  Anzahl von 9, 12, 18 bzw. 24 Beschickungen als auch bei den Beschickungen ohne Feststoffeintrag in den Fermenter bewegen sich die  $\text{CH}_4$ -Anteile im Biogas überwiegend auf annähernd gleichem Niveau, im Bereich zwischen (48...57) Vol.%. Auffallend sind die **HCHO-Werte** für die BHKW mit den Datenbanknummern „16“ ( $5,5 \text{ mg/m}^3$ ) und „17“ ( $9,3 \text{ mg/m}^3$ ) bei einem  **$\text{CH}_4$ -Anteil** von  $\approx 55 \text{ Vol.}\%$  gegenüber den BHKW „76“ und „77“ mit  $54 \text{ Vol.}\%$  und den **HCHO-Werten** von ( $143,6 \dots 156,6 \text{ mg/m}^3$ ). Diese werden in **Abschnitt 4.4** behandelt. Ähnliche Auffälligkeiten sind für die BHKW mit den Datenbanknummern „91“ bis „93“ ersichtlich.

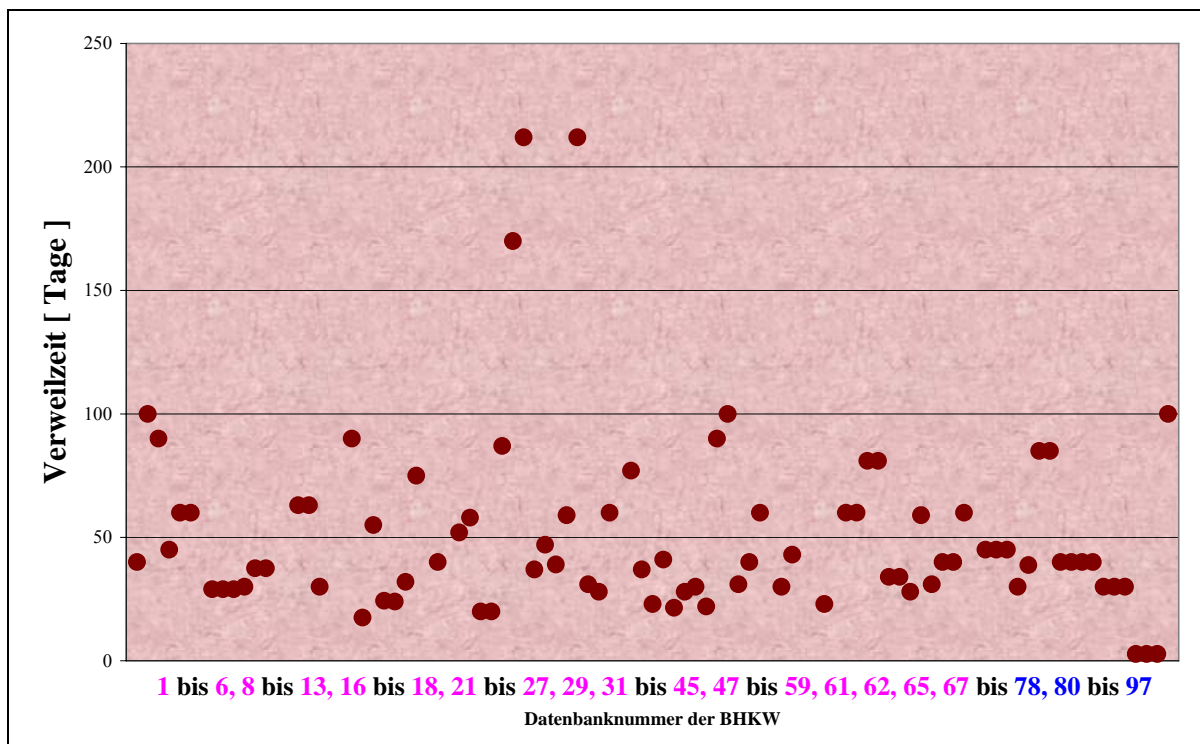


**Abbildung 19:** Untersuchung **Beschickung** / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen** (31 Standorte → 43 BHKW)



### 4.3.7 Verweilzeiten

Neben der Prozesstemperatur beeinflussen auch die Fermenterverweilzeiten die Gasausbeute und die Brenngaszusammensetzung. Dabei sind bestimmte Zusammenhänge und Wechselwirkungen dieser beiden Parameter von Bedeutung. Je höher die Prozesstemperatur, desto schneller läuft auch die Biogasbildung ab [11]. In der **Abbildung 20** sind die erfassten  $\varnothing$  Verweilzeiten für 55 in dieser Studie zu berücksichtigende Anlagenstandorte dargestellt. Dabei wurde keine Unterscheidung unter Berücksichtigung des jeweiligen Substrateinsatzes und der Prozesstemperaturen vorgenommen. Für elf Anlagenstandorte (= 13 BHKW) wurden die Verweilzeiten nicht mitgeteilt. Dies betrifft die BHKW mit den Datenbanknummern „7“, „14“, „15“, „19“, „20“, „28“, „30“, „46“, „60“, „63“, „64“, „66“ und „79“.



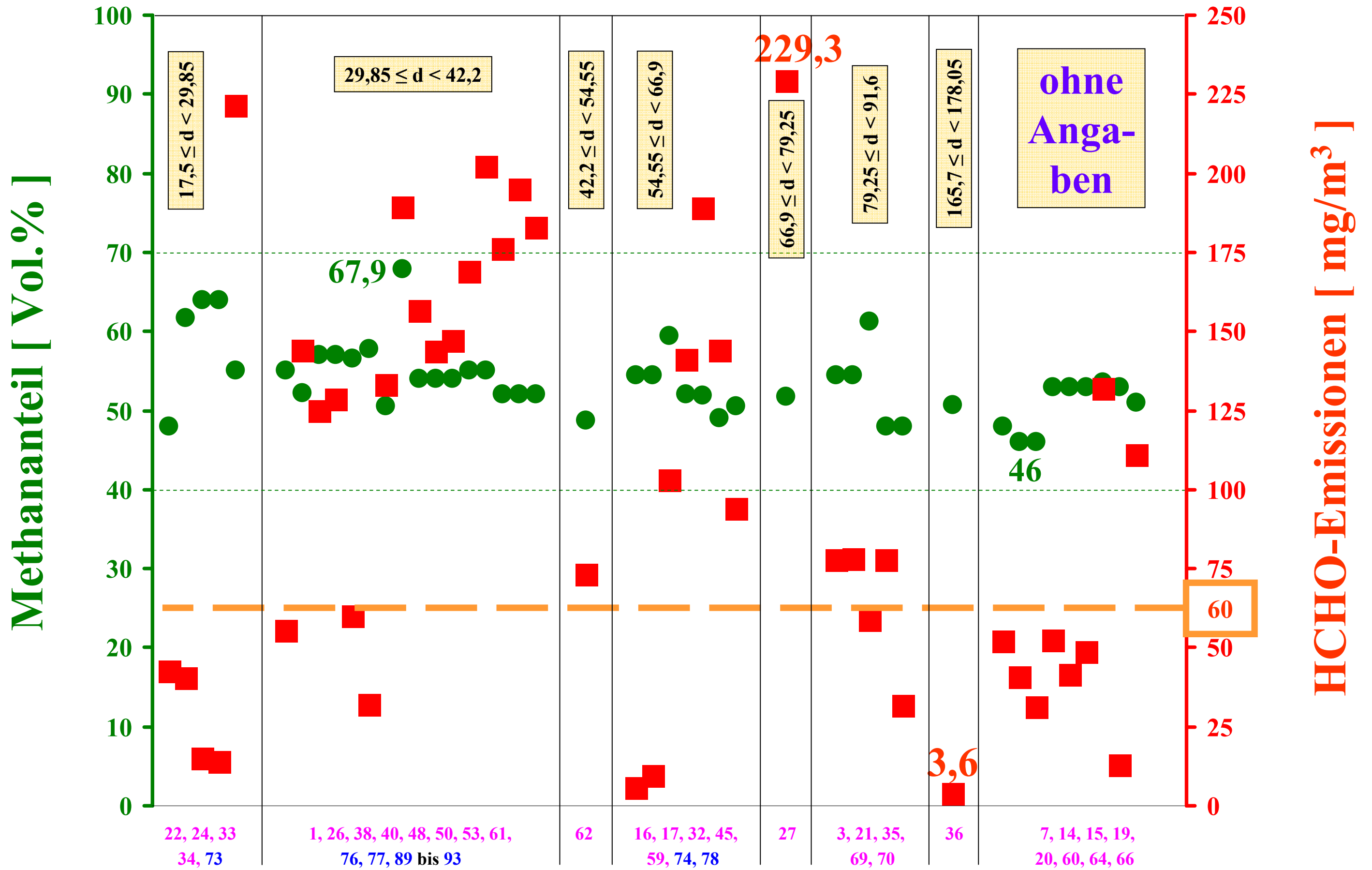
**Abbildung 20:** Fermenterverweilzeiten für 55 zu berücksichtigende Biogasanlagenstandorte

Unter Anwendung der **Formel (1)** werden für die Verweilzeiten ( $t_v$ ) nachfolgende Klassen definiert:

$$br = \sqrt{\max - \min} = \sqrt{170 \text{ Tage} - 17,5 \text{ Tage}} = 12,35 \text{ Tage}$$

17,5 Tage  $\leq t_v <$  29,85 Tage    29,85 Tage  $\leq t_v <$  42,2 Tage    42,2 Tage  $\leq t_v <$  54,55 Tage  
 54,55 Tage  $\leq t_v <$  66,9 Tage    66,9 Tage  $\leq t_v <$  79,25 Tage    79,25 Tage  $\leq t_v <$  91,6 Tage  
 91,6 Tage  $\leq t_v <$  103,95 Tage    103,95 Tage  $\leq t_v <$  116,3 Tage    116,3 Tage  $\leq t_v <$  128,65 Tage  
 128,65 Tage  $\leq t_v <$  141 Tage    141 Tage  $\leq t_v <$  153,35 Tage    153,35 Tage  $\leq t_v <$  165,7 Tage  
 165,7 Tage  $\leq t_v <$  178,05 Tage

Bei den für diese Untersuchungen berücksichtigten Standorten beträgt die Fermenterverweilzeit überwiegend 30 bis 42 Tage. Auch aus diesen Untersuchungsergebnissen (**Abbildung 21**) lassen sich keine direkten Abhängigkeiten, Einflüsse und Korrelationen zwischen Methananteil und HCHO-Emissionen bei Verkürzung oder Verlängerung von Fermenterverweilzeiten ableiten. Es gibt keine Klasse, in der auffallend konstante Methananteile im Biogas zu verzeichnen sind.



**ZÜNDSTRAHLMOTOREN** Datenbanknummer der BHKW **GASOTTOMOTOREN**

**Abbildung 21:** Untersuchung Verweilzeit / Methananteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)

### 4.3.8 Fermenterheizungen

Die Datenauswertung hat ergeben, dass hauptsächlich Wandheizungen zur Aufrechterhaltung der gewünschten Prozesstemperaturen im Hauptfermenter bzw. ggf. im Nachgärer installiert sind. Bei den meisten in dieser Studie zu berücksichtigenden Biogasanlagen sind diese als in den Beton integrierte oder vor der Behälterwand installierte Rohrschlangenwärmetauscher ausgeführt. Dabei werden Rohre aus Kunststoff (z. B. **Abbildung 22** → links) oder Edelstahl verwendet. In einigen Fällen werden zusätzlich auch Fußbodenheizungen und beheizte Rührwerkswellen (z. B. **Abbildung 22** → Mitte) angewandt. An einigen Anlagen sind auch externe Wärmetauscher installiert (z. B. **Abbildung 22** → rechts).



**Abbildung 22:** Auswahl von Fermenterheizungsspezifikationen bei der Agrargenossenschaft Beerendorf e. G in Selben (links) und bei der Agrargenossenschaft Krippenhna e. G. Zschepplin (Mitte) sowie bei der Multi-Agrar Claußnitz GmbH (rechts)

Eine Untersuchung und Bewertung hinsichtlich der eingesetzten Fermenterheizungsspezifikationen (z. B. Heizleistung, Prozessenergieverbrauch) ist nicht Bestandteil dieser Studie. Derartige Betrachtungen wären, wenn zwingend erforderlich zum gegebenen Zeitpunkt separat durchzuführen. Dabei wäre die Erfassung weiterer Grunddaten (z. B. Wärmeübergangszahl, Rohrdimension) unerlässlich.

### 4.3.9 Hygienisierung

Entsprechend europäischen und nationalen Vorschriften (z. B. EU-HygieneVO 1774, AbfallVO) ist die Verwendung von bestimmten Substraten einer Hygienisierung zu unterziehen. Dies betrifft beispielsweise Speise- und Küchenreste, Abfälle aus der Fleisch- und Fischverarbeitung sowie Schlämme aus der Abwasserbehandlung. Für diese Hygienisierungen sind je nach verwendetem Substrat bestimmte Zeiten vorgegeben. So sind z. B. beim Einsatz von Speiseresten diese vor dem Einbringen in den Fermenter auf 70°C zu erhitzen und für mindestens 60 Minuten bei dieser Temperatur zu halten.

An den in dieser Studie zu berücksichtigenden 66 Standorten (97 BHKW) sind an vier Biogasanlagen Hygienisierungseinrichtungen installiert. Dabei handelt es sich um die BHKW-Standorte mit den Datenbanknummern „2“ / „56“ / „97“ (1. Standort), „33“ / „34“ (2. Standort), „83“ (3. Standort) und „87“ / „88“ (4. Standort).



Während am 1. Standort neben Schweinegülle, Mais und Gras auch Fettabscheide- und Rapsölrückstände sowie Altbrot als Substrate eingesetzt werden, gelangen am 2. Standort Rindergülle, Mais, Getreide, Kartoffeln, Zuckerrüben sowie Fettabscheidereste und Glycerin zur Anwendung. Die Spezifikationen der an diesen beiden Standorten installierten Hygienisierungseinrichtungen sind nicht bekannt.

Die Biogasanlagen mit den BHKW-Datenbanknummern „83“ und „87“ / „88“ werden durch denselben Agrarbetrieb an zwei verschiedenen Standorten unterhalten. Dabei wird jeweils eine „ARCHEA ThermDes®-Anlage“ (Thermische Desintegration) der Firma ARCHEA Biogastechnologie GmbH Hessisch Oldendorf verwendet (**Abbildung 23**). Gemäß Produktinformation /26/ gelangt das vorgewärmte, pumpfähige und homogenisierte Substrat vom Hauptfermenter in die „ARCHEA ThermDes®-Anlage“. In dieser Anlage wird das Substrat auf 70°C erhitzt und bei dieser Temperatur konstant gehalten und von dort dem Nachgärer zugeführt. Für die Aufheizung der Desintegrationsanlage wird die BHKW-Abwärme genutzt. Durch den Einsatz dieser Anlage können bis zu 25% höhere Biogausbeuten erreicht werden /26/. Eine Prüfung bzw. Bewertung dieser Angabe kann nicht erfolgen, da für diese beiden Anlagen keine Angaben zum Methananteil im Biogas während der Emissionsmessungen vorliegen.



**Abbildung 23:** Hygienisierungseinrichtung „ARCHEA ThermDes®-Anlage“ der Firma ARCHEA Biogastechnologie GmbH Hessisch Oldendorf /26/

**links:** Hauptfermenter

**rechts:** Nachgärer

In den **Abbildungen 24** und **25** sind die ermittelten maximalen **CO**-, **NO<sub>x</sub>**- und **HCHO**-Emissionen für die vier Standorte, an denen eine „Hygienisierung“ vorgenommen wird, aufgetragen. Aus diesen Abbildungen ist zu entnehmen, dass es sich an den vier Standorten um insgesamt sechs verschiedene BHKW-Spezifikationen handelt. Besonders auffallend ist der sächsische Standort mit den BHKW „2“, „56“ und „97“. Für diesen wurden sowohl Erfüllungen als auch Überschreitungen der TA Luftgrenzwerte ermittelt. Dabei ist jedoch zu beachten, dass hinsichtlich des Biogasinput nur die beiden Gasotomotoren „2“ und „56“ direkt vergleichbar sind. Die dargestellten Emissionen beziehen sich für „2“ (1.-3. Maximalwert) und „56“ auf den gleichen Messtag, so dass die annähernd gleiche Brenngaszusammensetzung für beide BHKW zu unterstellen ist. Besonders auffallend sind die stark abweichenden HCHO-Werte. Da annähernd gleicher Biogasinput vorhanden sein dürfte, ist zunächst die Brenngaszusammensetzung als Ursache zur erhöhten Formaldehydbildung auszuschließen. Auffallend sind auch die unterschiedlich analysierten HCHO-Werte beim Vergleich der Motorspezifikationen untereinander. Auf Grund der genannten Aspekte wird eingeschätzt, dass den jeweiligen BHKW-Spezifikationen besondere Bedeutung beizumessen ist. Einige Erläuterungen zu evtl. Zusammenhängen mit den unterschiedlich angewandten BHKW-Spezifikationen und dem Betriebszustand erfolgen in **Abschnitt 4.4.**

Ob die ermittelten bzw. analysierten Emissionswerte durch die „Hygienisierung“ (ggf. Brenngaszusammensetzung) beeinflusst wurden, kann zurzeit nicht eingeschätzt werden.

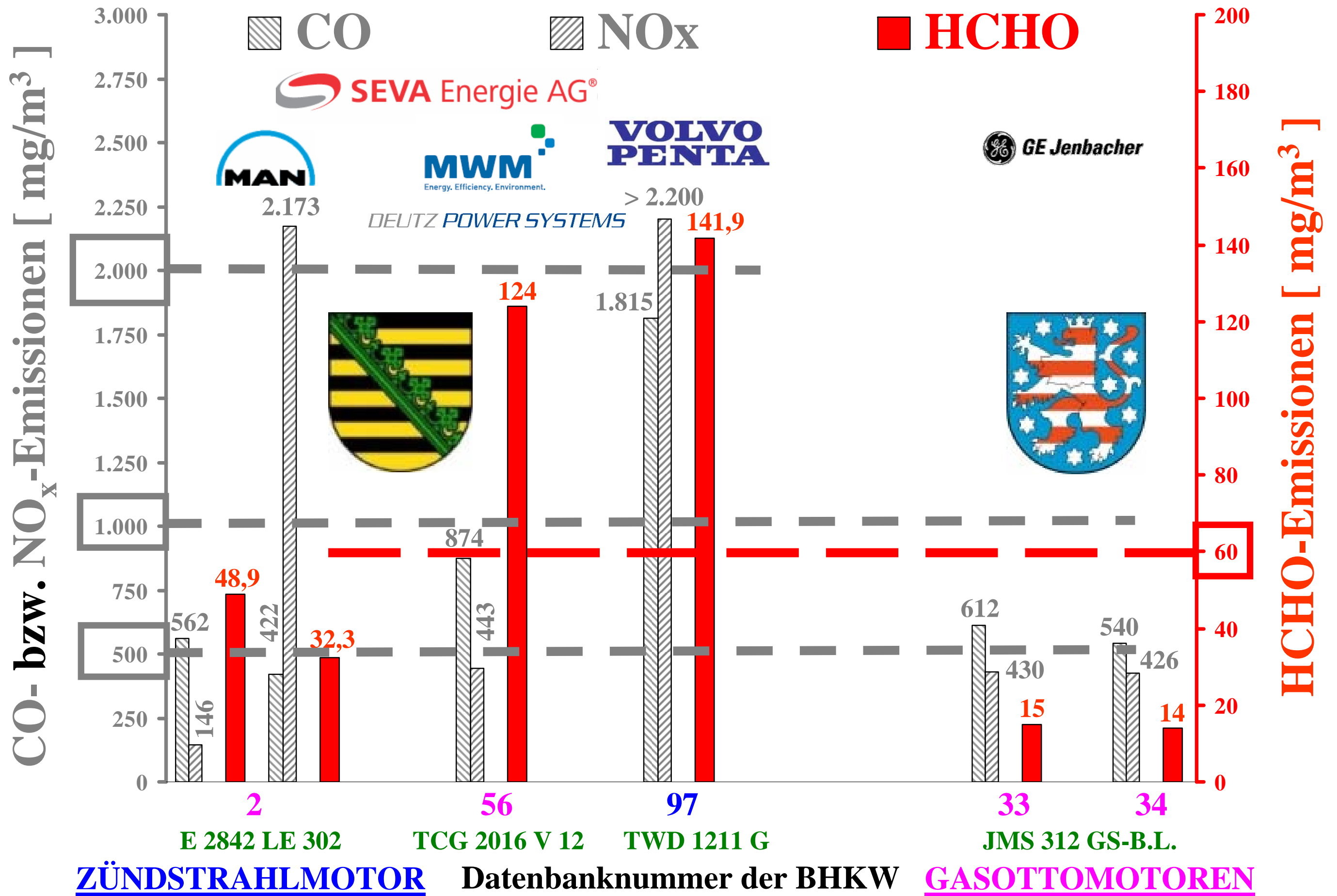
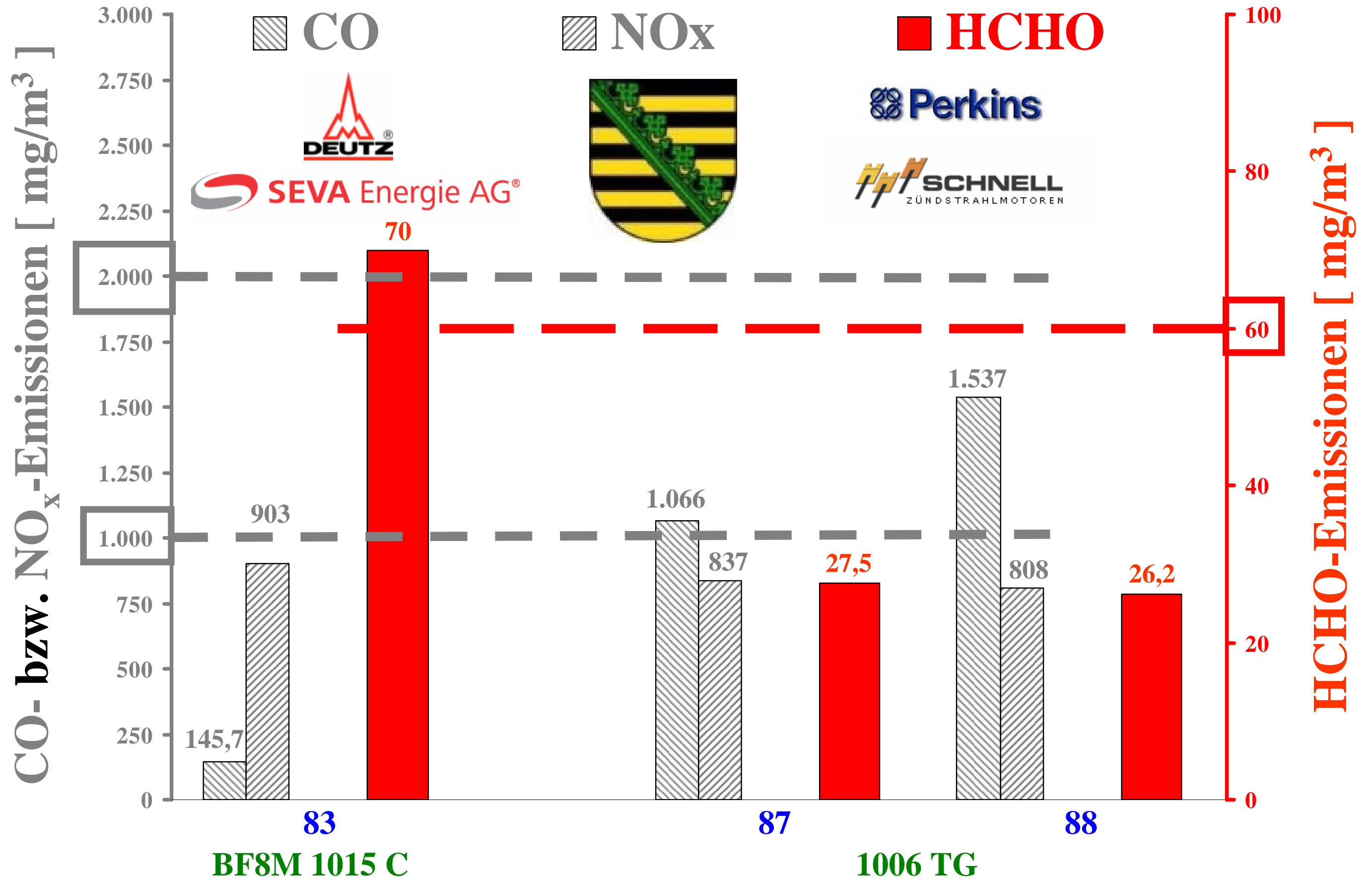


Abbildung 24: Abgasemissionen an zwei mit „Hygienisierung“ ausgelegten Biogasanlagenstandorten (5 BHKW)



Datenbanknummer der BHKW ZÜNDSTRAHLMOTOREN

Abbildung 25: Abgasemissionen an zwei Anlagenstandorten (3 BHKW), die mit „Hygienisierung“ ausgelegt sind

#### 4.3.10 Rührwerke

Zwecks Vermeidung bzw. ggf. Zerstörung von sich evtl. bildenden Schwimmdecken und Sinkschichten sowie zur Gewährleistung einer möglichst gleichmäßigen Prozesstemperatur im Fermenter ist es erforderlich, das Substrat mehrmals am Tag durchzumischen. Außerdem soll auf diese Weise die Vermischung des frischen Substrates mit dem bereits faulenden Substrat ermöglicht werden. Ausgenommen, die Doppelkammerfermenter, in denen die Vergärung nach dem Prinzip der Flüssigkeitsverdrängung und damit einer hydraulischen Durchmischung erfolgt, werden sowohl in den Rührkessel- als auch in den Pfropfenstromfermentern überwiegend mechanische Rührwerke, die über einen elektrischen oder hydraulischen Antrieb verfügen, eingesetzt. Hierbei werden verschiedene Ausführungen bevorzugt. Als Beispiele sind Paddel-, Haspel-, Großflügel- und Tauchmotorrührwerke (z. B. **Abbildung 26**) zu nennen.



**Abbildung 26:** Höhenverstellbares BioProp-Fermenterrührwerk der ROTARIA Energie- und Umwelttechnik GmbH Rerik /27/ ([links](#)) und hydraulisch angetriebenes Tauchmotorrührwerk ([rechts](#)) für die Biogasanlage beim Landwirtschaftsbetrieb Philipp GbR Großweitzschen, Ortsteil Strölla (Landkreis Mittelsachsen)

In den Rührkessel- bzw. Propfenstromfermentern (Hauptfermenter, Nachgärer) der in dieser Studie zu berücksichtigenden Biogasanlagenstandorte werden sowohl hinsichtlich der Rührwerksarten und -anzahl als auch der jeweiligen Dauer und Anzahl der arbeitstäglichen Rührvorgänge stark voneinander abweichende Spezifikationen angewandt. Dies betrifft den Vergleich der Anlagenstandorte untereinander. Eine Bewertung hinsichtlich dieser jeweiligen Rührwerksspezifikationen ist nicht Bestandteil dieser Studie. In den folgenden Untersuchungen zu den Rührwerken werden ausschließlich die Anzahl und die Dauer der arbeitstäglichen Rührvorgänge betrachtet. Auf Grund der Vielfältigkeit dieser jeweiligen Spezifikationen wurden zwecks Vereinfachung dieser Untersuchungen die nachfolgend aufgeführten Festlegungen getroffen:

1. Die Untersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Anlagen, für die sowohl die  $\text{CH}_4$ -Anteile im Biogas zum Zeitpunkt der Probenahme als auch die an diesem Messtag ermittelten HCHO-Werte vorliegen. Demzufolge sind 31 Standorte (43 BHKW) zu betrachten.
2. Es erfolgt keine auf das einzelne Rührwerk bezogene Untersuchung. Dementsprechend wird weder die Rührwerksart noch der Rührwerkstyp sowie die Anordnung im Hauptfermenter bzw. ggf. im Nachgärer berücksichtigt.

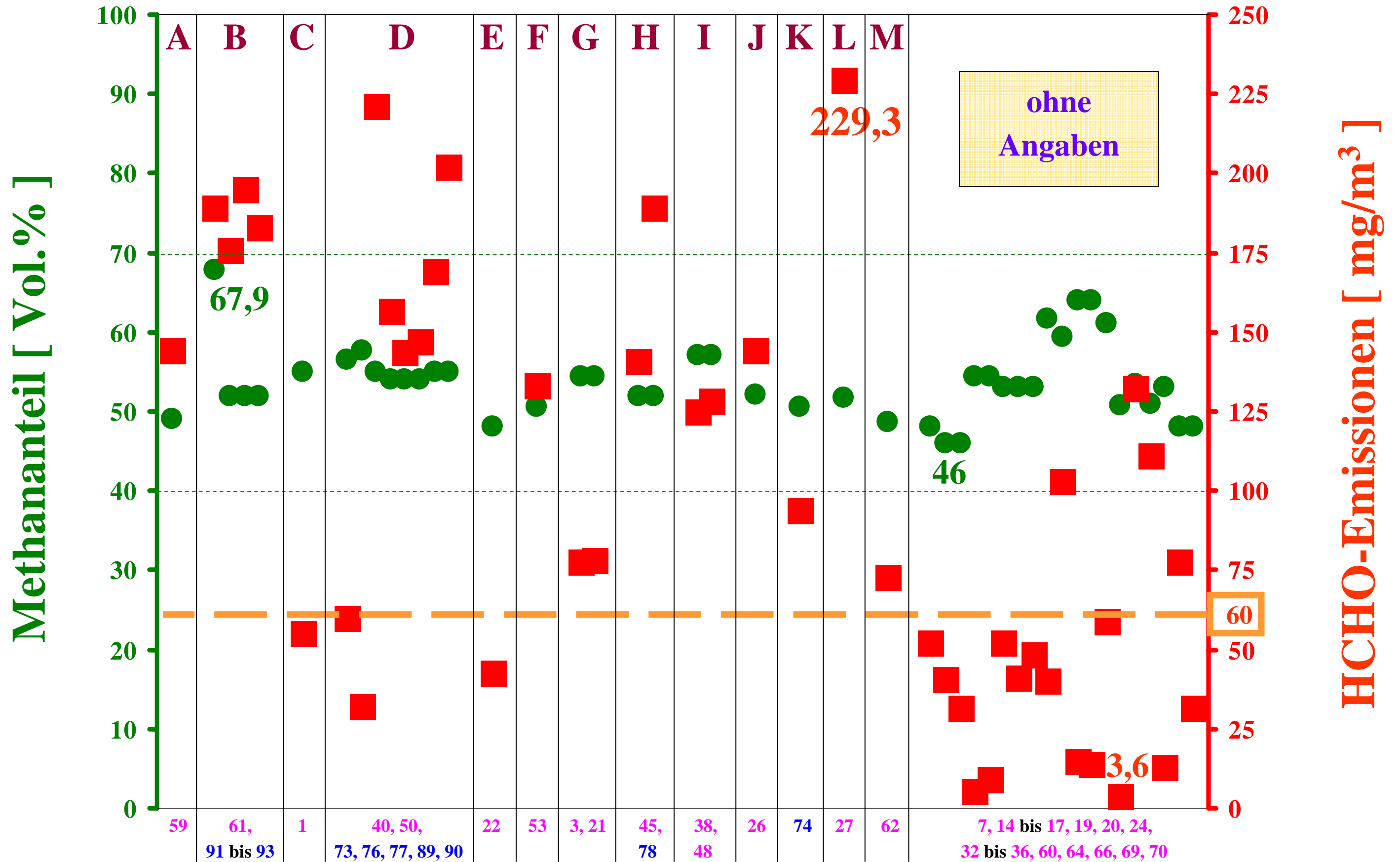


3. Alle angegebenen Rührvorgangszeiten sowie die Anzahl dieser Rührvorgänge werden als gesamte Rührdauer ( $t_{RD}$ ) und gesamte Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ ) für den jeweiligen Standort betrachtet. Demnach erfolgt keine Unterscheidung in Hauptfermenter und ggf. ersten bzw. ggf. zweiten Nachgärer.
4. Für die Doppelkammerfermenter wurden überwiegend die Anzahl der Umschläge pro Tag mit entsprechenden Zeiten angegeben. Diese Umschläge werden zum Zwecke der Untersuchung als Anzahl definiert, wobei ein Umschlag der Anzahl = 1 entspricht.
5. In der **Abbildung 27** (Rührdauer ( $t_{RD}$ )) bzw. in der **Abbildung 28** (Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ )) werden ausschließlich die Klassen dargestellt, für welche die Darstellung sinnvoll erscheint. D. h. die Klassen, für die keine Zuordnung vorgenommen wurde, da keine Untersuchungsergebnisse für die jeweilige Betrachtung ermittelt wurden, sind nicht in diesen **Abbildungen 27** und **28** ersichtlich. Das Gleiche betrifft die **Tabelle 5**.
6. Nach Anwendung von **Formel (1)** „ $br = \sqrt{\max - \min}$ “ sowie unter Berücksichtigung des jeweiligen Maximum bzw. Minimum (Rührdauer:  $t_{RD_{\max}} = 2.700$  min,  $t_{RD_{\min}} = 160$  min; Anzahl Rührvorgänge:  $AZ_{RV_{\max}} = 240$ ,  $AZ_{RV_{\min}} = 16$ ) ergeben sich die in der **Tabelle 5** aufgeführten Klassifizierungen:

**Tabelle 5:** Klassifizierungen zur Untersuchung der Dauer und zur Anzahl der Rührvorgänge

Klassenbezeichnung	Klasse Rührdauer $t_{RD} \rightarrow br = 50$ min	Klasse Anzahl Rührvorgänge $AZ_{RV} \rightarrow br = 14$
<b>A</b>	$160 \text{ min} \leq t_{RD} < 210 \text{ min}$	$16 \leq AZ_{RV} < 30$
<b>B</b>	$210 \text{ min} \leq t_{RD} < 260 \text{ min}$	$30 \leq AZ_{RV} < 44$
<b>C</b>	$310 \text{ min} \leq t_{RD} < 360 \text{ min}$	$44 \leq AZ_{RV} < 58$
<b>D</b>	$460 \text{ min} \leq t_{RD} < 510 \text{ min}$	$58 \leq AZ_{RV} < 72$
<b>E</b>	$560 \text{ min} \leq t_{RD} < 610 \text{ min}$	$72 \leq AZ_{RV} < 86$
<b>F</b>	$610 \text{ min} \leq t_{RD} < 660 \text{ min}$	$86 \leq AZ_{RV} < 100$
<b>G</b>	$1.410 \text{ min} \leq t_{RD} < 1.460 \text{ min}$	$128 \leq AZ_{RV} < 142$
<b>H</b>	$1.460 \text{ min} \leq t_{RD} < 1.510 \text{ min}$	$142 \leq AZ_{RV} < 156$
<b>I</b>	$1.660 \text{ min} \leq t_{RD} < 1.710 \text{ min}$	$240 \leq AZ_{RV} < 254$
<b>J</b>	$1.810 \text{ min} \leq t_{RD} < 1.860 \text{ min}$	-
<b>K</b>	$1.860 \text{ min} \leq t_{RD} < 1.910 \text{ min}$	-
<b>L</b>	$2.610 \text{ min} \leq t_{RD} < 2.660 \text{ min}$	-
<b>M</b>	$2.660 \text{ min} \leq t_{RD} < 2.710 \text{ min}$	-

Dass die „Rührdauer ( $t_{RD}$ )“ und die „Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ )“ den Biogaserzeugungsprozess und damit auch die  $CH_4$ -Bildung beeinflussen können, dürfte zweifelsfrei sein. In Auswertung der **Abbildungen 27** u. **28** sind jedoch für die in dieser Studie berücksichtigten Anlagen (31 Standorte, 43 BHKW) kein direkter Einfluss der „Rührdauer ( $t_{RD}$ )“ und der „Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ )“ mit Korrelation zur HCHO-Bildung feststellbar. Es ist keine Konzentration zur Gewinnung eines bestimmten  $CH_4$ -Anteils bei bestimmter „Rührdauer ( $t_{RD}$ )“ bzw. „Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ )“ zu analysieren. Auffallend sind lediglich die in beiden Abbildungen unter „ohne Angaben“ mehrfach unterhalb des TA Luftgrenzwertes ersichtlichen HCHO-Werte. Diese Anlagen können jedoch nicht weiter betrachtet werden, da zurzeit weder zur „Rührdauer ( $t_{RD}$ )“ noch zur „Anzahl Rührvorgänge ( $AZ_{RV}$ )“ Daten vorliegen. Sofern diese demnächst eingehen sollten, könnte eine Aktualisierung vorgenommen werden. Hierbei ist davon auszugehen, dass diese dann einer bereits vorhandenen Klasse oder neuen noch nicht dargestellten Klasse(n) zuzuordnen wäre(n). Ein anderes Analyseergebnis wird nicht erwartet.



**ZÜNDSTRAHLMOTOREN**

Datenbanknummer der BHKW

**GASOTMOTOREN**

Abbildung 27: Untersuchung **Rührdauer** / **Methananteile** / **HCHO-Emissionen** (31 Standorte → 43 BHKW)



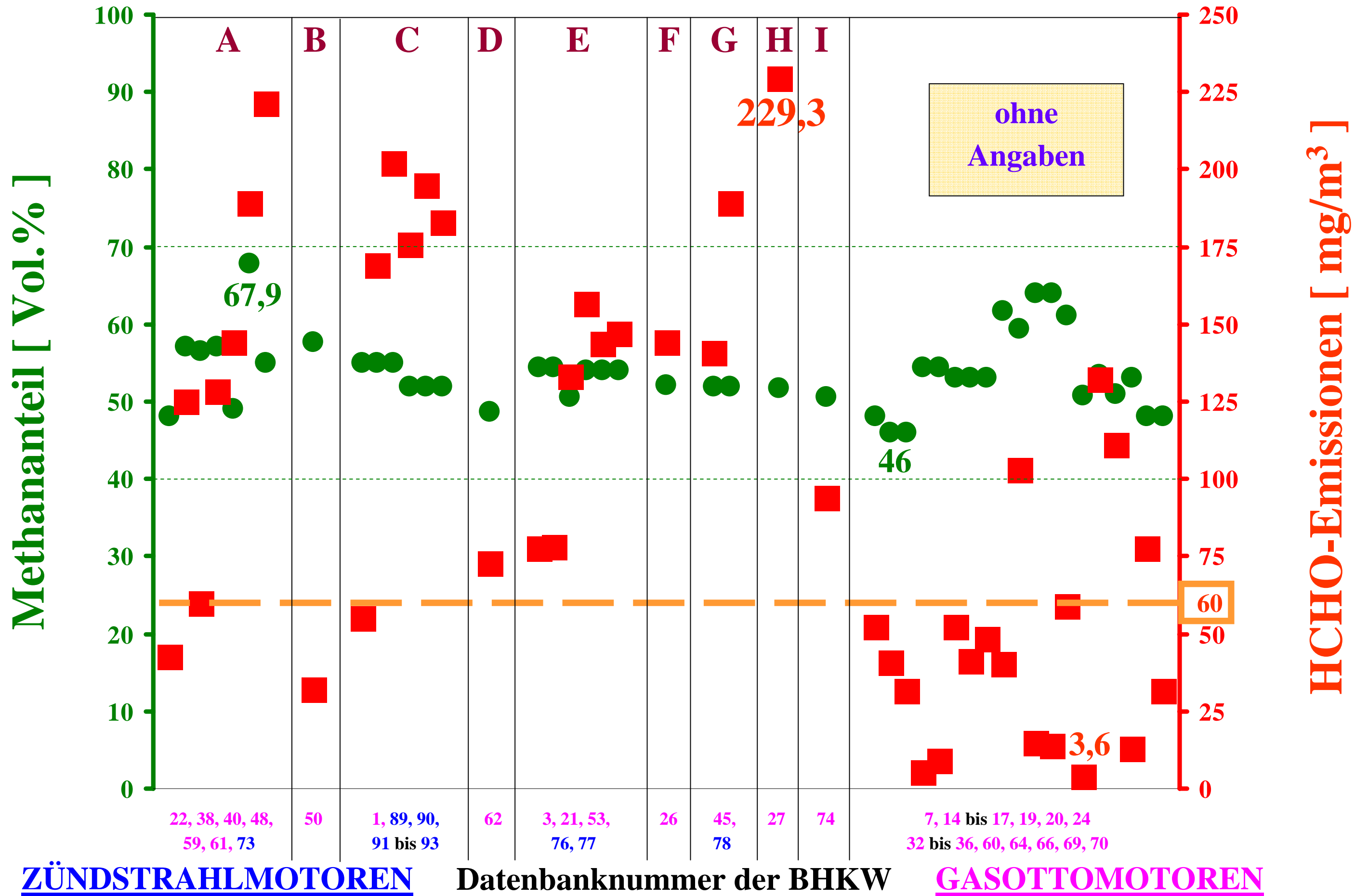


Abbildung 28: Untersuchung Anzahl der Rührvorgänge / CH<sub>4</sub>-Anteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)

### 4.3.11 Substrate

An den in dieser Studie für die Untersuchungen zum Substrateinsatz zu berücksichtigenden 31 Anlagenstandorten (43 BHKW) wird hauptsächlich Rindergülle in verschiedenen Kombinationen mit NaWaRo's (z. B. Mais-, Grassilage, Getreide) vergärt. An einigen Biogasanlagen werden auch Schweinegülle bzw. Geflügelkot eingesetzt. Die Klassifizierungen für die Untersuchungen zum evtl. Einfluss der Substrate auf den Methananteil und die evtl. korrelierenden Formaldehydemissionen sind in der **Tabelle 6** zusammengestellt.

**Tabelle 6:** Klassifizierungen zur Untersuchung des Substrateinsatzes an 31 Anlagen (43 BHKW)

BHKW in Klasse	Rinder-gülle	Schweine-gülle	Geflügel-kot	Fest-mist	Rest-futter	Mais	Gras	Ge-treide	Sonstige
A									Speise-, Fett-, Ind.-abf., Abwässer, Glyc.
B									
2 in C									Luzerne
8 in D									
4 in E									Kart., Rüben, Fettabscheidefette, Glyc.
3 in F									
3 in G									
3 in H									
2 in I									Silosickersaft
2 in J									
2 in K									
4 in L									z. T. Sonnenblumensilage
M									
2 in N									
O									
P									Kartoffeln
Q									
R									
S									

In der **Abbildung 29** (Seite 49) sind die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich eines evtl. Einflusses des Substrateinsatzes auf den CH<sub>4</sub>-Anteil und die evtl. korrelierenden HCHO-Emissionen ersichtlich. Für diese Untersuchungen konnten die Angaben zum Substrateinsatz an 31 Standorten (= 43 BHKW) berücksichtigt werden (**Tabelle 6**). In dieser **Abbildung 29** wurden die CH<sub>4</sub>-Anteile, welche am jeweiligen Messtag parallel zur Emissionsmessung bzw. zur Probenahme erfasst wurden, sowie die jeweils ermittelten HCHO-Emissionswerte aufgetragen. Im Ergebnis der Auswertung dieser **Abbildung 29** sind keine Korrelationen zwischen Substrateinsatz, CH<sub>4</sub>-Anteil und HCHO-Emissionen zu erkennen. Es gibt keine Klasse aus der formuliert werden könnte, dass sich bei einer definierten Substratkombination ein be-

stimmter CH<sub>4</sub>-Anteil erzielen lässt. Hierbei sind jedoch die Klassen „A“, „B“, „J“ und „K“ sowie „M“ bis „S“ als nicht repräsentativ einzuordnen. Bei den diesen jeweiligen Klassen zugeordneten BHKW handelt es sich jeweils um den gleichen Standort (z. B. Klasse „J“ → „16“ u. „17“ = 1 Standort), so dass keine Vergleichbarkeit innerhalb dieser Klassen gegeben ist. Demgegenüber bieten sich beispielsweise die Klassen „C“ und „D“ sowie „E“ und „F“ für die annähernde Vergleichbarkeit an. Auffallend ist dabei, dass sich bei annähernd gleicher Substratkombination (**Tabelle 6**) teilweise gegensätzliche Tendenzen für den jeweils erfassten CH<sub>4</sub>-Anteil und die entsprechend ermittelten HCHO-Werte formulieren lassen. So könnte beispielsweise für zukünftige Untersuchungen (Projekte) interessant sein, ob sich der Einsatz von „Luzerne“ (Klasse „C“) bzw. von „Kartoffeln, Zuckerrüben, Fettabscheidefette und Glycerin“ (Klasse „E“) (vgl. **Tabelle 6**) auf die Brenngaszusammensetzung auswirken. Im Rahmen dieser Studie ist diese Untersuchung wegen zu geringer Datenbasis nicht möglich. Für derartige Untersuchungen bietet sich an, evtl. Pilotprojekte unter Einbeziehung des Deutschen Biomasseforschungszentrums zu initiieren. Sofern Zusammenhänge herausgearbeitet werden könnten, würde sich die Anpassung der Biogaserzeugungsprozesse (z. B. Fermentertemperatur, Verweilzeit) für die jeweils betreffenden Standorte (Klasse „C“ → BHKW „27“ bzw. Klasse „E“ → BHKW „26“ u. „66“) an die Randbedingungen der Anlagenstandorte, an denen zusätzlich „Luzerne“ (BHKW „22“) bzw. „Kartoffeln, Rüben, Fettabscheidefette und Glycerin“ (BHKW „33“ u. „34“ = 1 Standort) vergärt wird, empfehlen.

Nachfolgend werden die Tendenzen für die Untersuchungen zum Substrateinsatz in den Klassen „C“, „D“, „E“ und „F“ erläutert.

#### **Klasse „C“ → Rindergülle + Festmist sowie Mais + Getreide**

Für diese Klassifizierung wurde je ein BHKW („22“, „27“) an zwei verschiedenen Standorten berücksichtigt. Die Tendenz stellt sich gegensätzlich dar (**Abbildung 29**). Einem niedrigerem CH<sub>4</sub>-Anteil (≈ 47 Vol.%) und der Erfüllung des TA Luftgrenzwertes für HCHO am Standort mit dem BHKW „22“ (**HCHO = 42,6 mg/m<sup>3</sup>**) stehen für BHKW „27“ sowohl ein höherer CH<sub>4</sub>-Anteil von ca. 52 Vol.% und ein höherer **HCHO-Wert** von **229,3 mg/m<sup>3</sup>** gegenüber. Für den Standort mit BHKW „22“ ist bekannt, dass das Biogas nach zweistufigem Verfahren mit externer Hydrolyse bei (28...30)°C und der Fermentertemperatur von (39...41)°C bei einer Verweilzeit von ca. 18 Tagen erzeugt wird. Am Standort mit dem BHKW „27“ wird gleichfalls ein zweistufiges Verfahren, jedoch mittels in Reihe geschalteten Hauptfermenter und Nachgärer, angewandt. Die Prozesstemperatur beträgt 45°C und die Verweilzeit ca. 75 Tage. Damit stellen sich auch die Biogaserzeugungsprozessparameter teilweise gegensätzlich dar. Im Rahmen dieser Studie kann auf Grund zu geringer Datenbasis für den Untersuchungsparameter Substrateinsatz nicht definiert werden, ob diese gegensätzliche Tendenz im Zusammenhang mit den unterschiedlichen Prozessbedingungen, dem Kosubstrat „Luzerne“ oder den installierten BHKW-Spezifikationen („22“ → MDE Dezentrale Energiesysteme; „27“ → GE Jenbacher) zu betrachten sind. Hinsichtlich der BHKW-Spezifikationen werden entsprechende Ausführungen in **Abschnitt 4.4** vorgenommen. In einem Pilotprojekt könnten die wechselseitigen Zusammenhänge der einzelnen Prozessparameter sowie des Substrateinsatzes untersucht und formuliert werden.

#### **Klasse „D“ → Rindergülle sowie Mais + Gras + Getreide**

Die Untersuchungen in dieser Klasse beziehen sich auf sechs Standorte, an denen insgesamt acht BHKW betrieben werden (**Abbildung 29**). In dieser Klasse liegt der CH<sub>4</sub>-Anteil im Biogas zwischen 50,5 Vol.% („74“) und ca. 68 Vol.% („61“). Auffallend ist, dass, ausgenommen das BHKW „50“ (**HCHO = 32 mg/m<sup>3</sup>**), der HCHO-Grenzwert gemäß TA Luft (**60 mg/m<sup>3</sup>**) an den anderen fünf Standorten überschritten wird (z. B. „61“ → **189,4 mg/m<sup>3</sup>**, „74“ → **93,7 mg/m<sup>3</sup>**). Da kein direkter Zusammenhang zwischen Substrateinsatz, Methananteil und For-

maldehydemissionen zu erkennen ist und auch im Ergebnis der bereits vorgestellten Untersuchungsparameter (z. B. Prozesstemperatur, Rührdauer) keine Korrelationen feststellbar waren, wurde auf der Grundlage der für diese Standorte vorliegenden Angaben geprüft, ob evtl. Gemeinsamkeiten hinsichtlich der eingesetzten BHKW-Spezifikationen bestehen. Dabei stellt sich die Situation folgendermaßen dar:

1. Standort: „45“ → Caterpillar „3412 TA“ und „78“ → Deutz „BF6M 1015 C“
2. Standort: „50“ → MWM (Deutz Power Systems) „TBG 616 V“
3. Standort: „60“ → MWM (Deutz Power Systems) „TCG 2016 V 12“
4. Standort: „61“ → MWM (Deutz Power Systems) „TCG 2016 V 12“
5. Standort: „74“ → Deutz „BF6M 1015 C“
6. Standort: „76“ → Deutz „BF6M 1015 C“ und „77“ → Deutz „BF6M 1015 C“

An diesen sechs Standorten (8 BHKW) sind vier verschiedene BHKW-Spezifikationen installiert. Dabei handelt es sich um drei Spezifikationen, die nach dem Gasottoprinzip arbeiten und eine Spezifikation, deren Verbrennung nach dem Zündstrahlprinzip erfolgt. Resultierend aus o. g. Aufstellung ist einzuschätzen, dass den jeweiligen BHKW-Spezifikationen sowie den entsprechenden Inspektions- und Wartungstätigkeiten besondere Bedeutung beizumessen sein wird (**Abschnitt 4.4**).

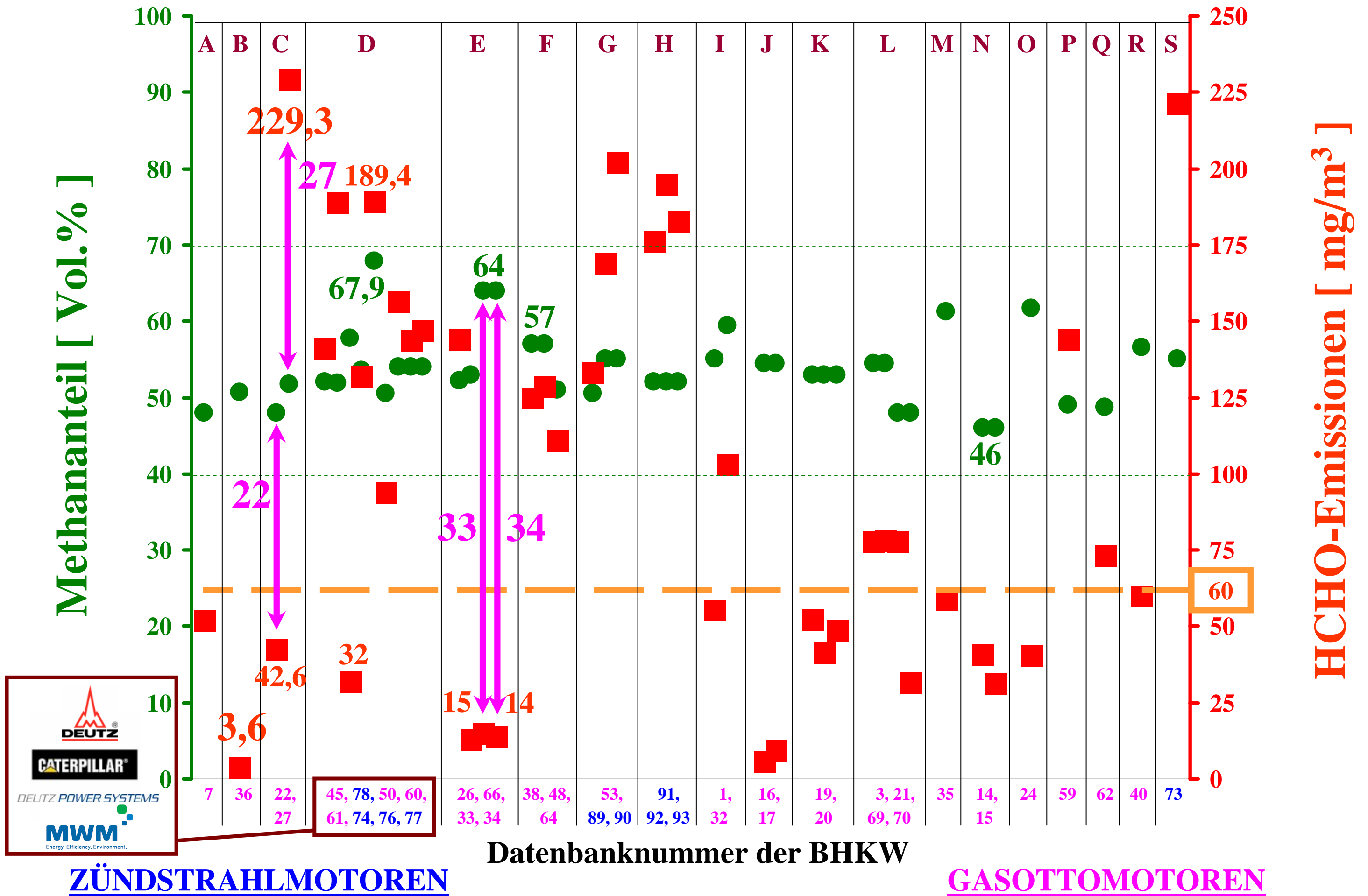
#### **Klasse „E“ → Rindergülle sowie Mais + Getreide**

In dieser Klasse konnten drei Standorte (4 BHKW) Berücksichtigung finden. Im Vergleich zur Klasse „C“ ist eine entgegengesetzte Tendenz ersichtlich (**Abbildung 29**). Am Standort mit den BHKW „33“ u. „34“ sind niedrige **Formaldehydemissionen** ( $15 \text{ mg/m}^3$ ,  $14 \text{ mg/m}^3$ ) bei einem zum Zeitpunkt der Probenahme erfassten **Methananteil** von **64 Vol.%** ermittelt wurden. Im Vergleich dazu sind gegensätzliche **HCHO-Werte** für „26“ und „66“ ( $144,1 \text{ mg/m}^3$ ,  $12,9 \text{ mg/m}^3$ ) bei annähernd gleichem **Methananteil** (**52,2 Vol.%**, **53 Vol.%**) analysiert worden. Der Standort mit BHKW „33“ u. „34“ ist, wie bereits in **Abschnitt 4.3.9** (**Seite 38**) ausgeführt und in **Abbildung 24** (**Seite 40**) dargestellt, mit Hygienisierungseinrichtung ausgestattet. Es ist zu vermuten, dass diese Installation u. a. wegen der eingesetzten Kosubstrate „Kartoffeln, Zuckerrüben, Fettabscheidefette und Glycerin“ (**Tabelle 6**) erfolgte. Für die o. g. Substratkombination könnte in zukünftigen Projekten untersucht werden, ob Zusammenhänge zwischen Hygienisierung, Substrateinsatz und Methananteil sowie evtl. resultierenden Formaldehydemissionen bestehen. Sollte dies der Fall sein, könnte die Hygienisierung sowie die Anpassung der Biogaserzeugungsprozessbedingungen des Standortes mit dem BHKW „26“ an die des Standortes mit BHKW „33“ und „34“ eine Maßnahme zur Minderung von Formaldehydemissionen an Biogas-BHKW darstellen. Hinsichtlich der BHKW-Spezifikationen („26“, „33“ u. „34“ → alle GE Jenbacher; „66“ → Deutz Power Systems (**TCG 2016 V 12**)) wird auf den **Abschnitt 4.4** hingewiesen.

#### **Klasse „F“ → Rindergülle + Mais**

Die Klasse „F“ stellt sich ähnlich der für die Klasse „C“ erläuterten Tendenz dar. Am Standort mit den BHKW „38“ u. „48“ sind zwei Caterpillar-Motoren mit unterschiedlicher Leistung installiert. Dort wurden bei einem **Methananteil** von **57 Vol.%** die **HCHO-Emissionen** mit  $124,9 \text{ mg/m}^3$  bzw.  $128,4 \text{ mg/m}^3$  ermittelt. Für das BHKW „64“, welches die Spezifikation „TCG 2016 V 12“ (siehe auch oben) aufweist, wurden die **HCHO-Emissionen** mit  $111 \text{ mg/m}^3$  ermittelt und der **Methananteil** mit **51 Vol.%** erfasst. Auch diese Untersuchungen im Zusammenhang mit den BHKW-Spezifikationen werden in **Abschnitt 4.4** vorgestellt.

Die Substratmengen (z. B.  $\text{m}^3/\text{Tag}$ ) bzw. -massen (z. B.  $\text{t}/\text{Tag}$ ) wurden nicht betrachtet, da die Angaben zu sehr streuen und teilweise unvollständig bzw. nicht plausibel sind. Diese könnten auch von Bedeutung sein und in einem ggf. zukünftigen Projekt (s. o.) behandelt werden.



**Abbildung 29:** Untersuchung Substrate / Methananteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)



### 4.3.12 Entschwefelung

Da das gewonnene Biogas viele Begleitstoffe, wie z. B. Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), enthält, ist der Entschwefelung eine besondere Bedeutung einzuräumen. Insbesondere die schwefelhaltigen Begleitstoffe müssen entfernt werden, da diese Motorschäden am BHKW verursachen können. In der Praxis werden interne und/oder externe Entschwefelungsanlagen, die auf biologischer und/oder chemischer Basis arbeiten, angewandt. Im Ergebnis der Datenblattauswertungen ist einzuschätzen, dass an den in dieser Studie zu berücksichtigenden Anlagen (66 Standorte, 97 BHKW) überwiegend die interne biologische Entschwefelung zur Anwendung gelangt. Dabei wird mittels Aquarienpumpe, Kleinkompressor, Gebläse oder Doppelhubkolbenpumpe Luft in den Fermenter geblasen. An einigen Anlagen sind auch Tropfkörper-/Biorieselbettreaktoren (**Abbildung 30** → **links**) oder Aktivkohlefilter (**Abbildung 30** → **Mitte**) oder Gaswäscher (**Abbildung 30** → **rechts**) installiert. Bei den Gaswäschern handelt es sich um eine Kombination aus chemischer und biologischer Entschwefelung. Den vier Säulen werden Bakterien unter Zugabe von Eisen-(II)-chlorid zugeführt. Dabei findet eine Adsorption am Eisen-(II)-chlorid statt, wodurch elementarer Schwefel entsteht, der separat aus dem System ausgeschieden wird.



**Abbildung 30:** Beispiele externer Entschwefelungsanlagen (**links** → Tropfkörper-/Biorieselbettreaktor der LAWI Agrar GmbH Hirschfeld (Landkreis Zwickau), **Mitte** → Aktivkohlefilter beim Landwirtschaftsbetrieb Philipp GbR Großweitzschen, OT Strölla (Landkreis Mittelsachsen), **rechts** → Gaswäscher bei Biogas und Landtechnik Trieb (Vogtlandkreis, Sachsen))

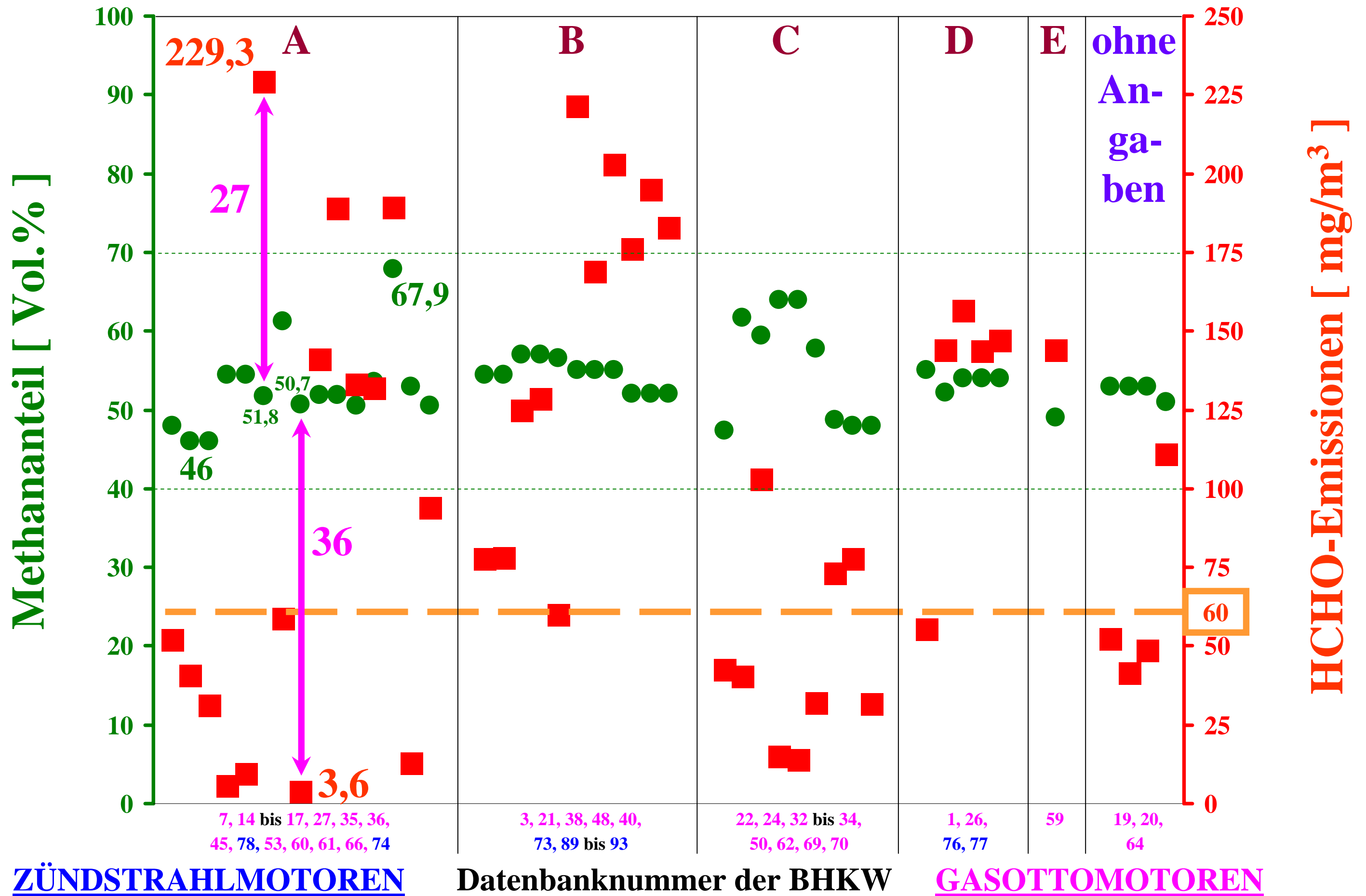
Zunächst wurde untersucht, ob es evtl. Zusammenhänge zwischen den angewandten Entschwefelungsverfahren und bestimmten Methananteilen im Biogas gibt. Hierzu wurde eine Klassifizierung unter Berücksichtigung der Entschwefelungsspezifikationen an den 31 Standorten (43 BHKW) vorgenommen, für die am Emissionsmesstag die Methananteile erfasst wurden. Die daraus resultierende Klassifizierung zeigt die **Tabelle 7**. In dieser **Tabelle 7** sind auch die je nach Klasse minimal bzw. maximal erfassten Schwefelgehalte mit jeweiliger BHKW-Angabe ersichtlich. Diese Schwefelgehalte wurden an einigen Anlagen gleichfalls parallel zur Emissionsmessung bzw. Methananteilserfassung aufgenommen und dementsprechend in den jeweiligen Emissionsmessberichten ausgewiesen.



**Tabelle 7:** Klassifizierungen zur Untersuchung der Entschwefelungsverfahren

<b>Klasse</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>ohne Angaben</b>
<b>Art der Entschwefelung</b>	intern biologisch	intern biologisch und extern chemisch	extern biologisch	intern biologisch und chemisch	extern biologisch und chemisch	
<b>Spezifikation der Entschwefelung</b>	Lufteinblasung in den Fermenter	Lufteinblasung in den Fermenter und Zugabe von Eisen-(II)-chlorid oder Deuto-Clear® Sulfo in Vorgrube (2 Anlagen zusätzlich Aktivkohlefilter)	Gaswäscher	Lufteinblasung und Zugabe von Eisen-(II)-chlorid in den Fermenter	Gaswäscher und Zugabe von Eisen-(II)-chlorid	
<b>BHKW-Nr. niedrigster Schwefelwasserstoffgehalt</b>	<b>74</b>  <b>13 ppm</b>	<b>89 und 90</b>  <b>38 ppm</b>	<b>62</b>  <b>17 ppm</b>	<b>1</b>  <b>14 ppm</b>	<b>59</b>	<b>64</b>  <b>9 ppm</b>
<b>BHKW-Nr. höchster Schwefelwasserstoffgehalt</b>	<b>35</b>  <b>1.000 ppm</b>	<b>73</b>  <b>730 ppm</b>	<b>22</b>  <b>582 ppm</b>	<b>76 und 77</b>  <b>150 ppm</b>	<b>35 ppm</b>	<b>19 und 20</b> <b>102,5 ppm</b>

Die Untersuchungsergebnisse hinsichtlich der angewandten Entschwefelungsverfahren sind in der **Abbildung 31** dargestellt. In Auswertung dessen sind keine Auffälligkeiten bzw. Zusammenhänge zwischen den unterschiedlich zur Anwendung gelangenden Entschwefelungsverfahren und den **Methananteilen** im Biogas zu analysieren. Es werden keine Konzentrationen bestimmter Methananteile im Biogas innerhalb der Klassen ersichtlich. In allen Klassen werden sowohl streuende Methananteile als auch **HCHO-Emissionswerte** mit bzw. ohne Überschreitung des TA Luftgrenzwertes (**60 mg/m<sup>3</sup>**) ersichtlich. Beispielhaft ist auf die Standorte mit den BHKW „27“ und „36“ hinzuweisen. Einer **Methananteils**abweichung an diesen beiden Standorten von **ca. 1 Vol.%** stehen **HCHO-Emissionen** von **3,6 mg/m<sup>3</sup>** u. **229,3 mg/m<sup>3</sup>** gegenüber. Ähnliche Tendenzen lassen sich auch für die **Klassen B, C und D** beschreiben. Die **Klasse E** ist als nicht repräsentativ anzusehen, da es sich um nur einen Standort handelt. Im Ergebnis der erläuterten Aspekte sind auch keine Korrelationen zur Formaldehydbildung herauszuarbeiten (**Abbildung 32 → Skalierung beachten**). Auffallend sind einige **H<sub>2</sub>S-Gehalte > 200 ppm**. Diese sind als sehr hoch einzuschätzen, denn von besonderer Bedeutung ist, dass Motorenhersteller zwecks Schutz der Motoren meistens **H<sub>2</sub>S-Gehalte unter 200 ppm** fordern /16/. Eine Bewertung bzw. ein Vergleich der Entschwefelungsverfahren untereinander ist nicht Gegenstand dieser Studie. Diese sind u. a. in Reinhold /28/ und Polster, Brummack /29/ beschrieben. Für die in dieser Studie berücksichtigten Anlagen könnten diese in einem zukünftigen Projekt untersucht werden. Dabei dürften evtl. auch die Volumenströme (z. B. Lufteinblasung → m<sup>3</sup>/h, Eisen-(II)-chlorid → l/h) von Bedeutung sein.



**Abbildung 31:** Untersuchung Entschwefelung / CH<sub>4</sub>-Anteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)

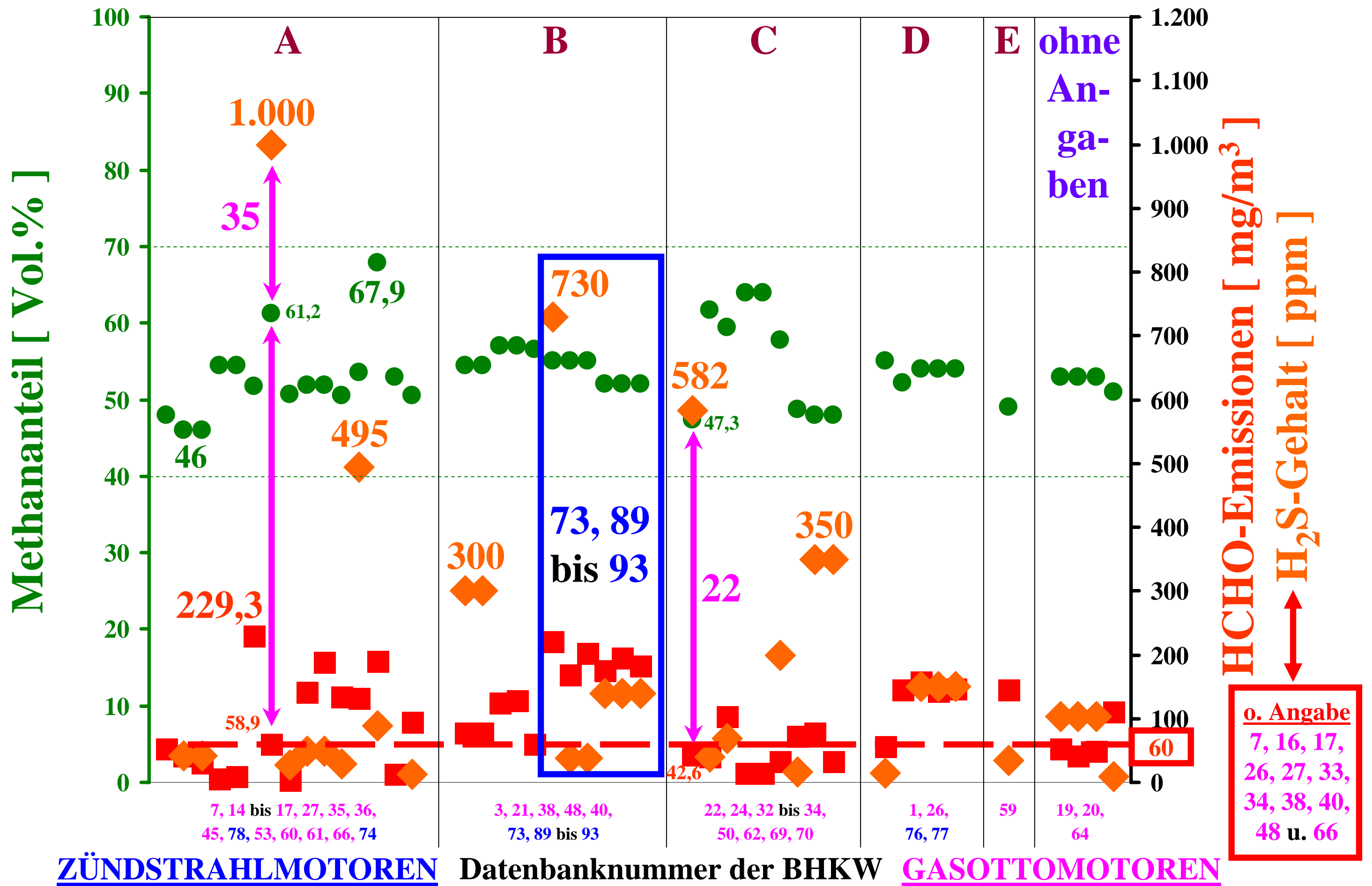


Abbildung 32: Untersuchung H<sub>2</sub>S-Gehalt / CH<sub>4</sub>-Anteile / HCHO-Emissionen (31 Standorte → 43 BHKW)

### 4.3.13 Gastrocknung

Das warme und feuchte Biogas wird aus dem Fermenter kommend über Rohrleitungen einem ggf. Biogaslager zugeführt oder direkt in den BHKW-Raum geleitet. Dabei kühlt sich das Biogas in der Rohrleitung ab. Die Rohrleitung ist mit einem Gefälle von mindestens 1% auszuliegen, damit das durch die Abkühlung anfallende Kondensat in einem tieferliegenden Kondensatschacht gesammelt werden kann. Außerdem ist bei der Rohrleitungsverlegung darauf zu achten, dass eine leichte Zugänglichkeit gewährleistet wird. Bei den in dieser Studie zu berücksichtigenden 66 Biogasanlagen (97 BHKW) wird das Prinzip der Kondensatabscheidung überwiegend mittels in der Erde verlegter Rohrleitungen umgesetzt. An den Anlagen, wo eine jederzeit für die Rohrleitung zugängliche Lösung nicht realisierbar war, erfolgte eine oberirdische Verlegung (z. B. **Abbildung 33**). Laut Betreiberangaben in den übermittelten Datenblättern sind einige Biogasanlagen zusätzlich mit Gaskühler (z. B. **Abbildung 34**), Kältetrockner, Prallplattenabscheider oder Kompressor ausgestattet.



**Abbildung 33:** Biogasrohrleitung vom Fermenter in den BHKW-Raum der Biogasanlage bei der Tobias Barthel und Christian Landwehr GbR Geithain, OT Wickershain (Kreis Leipzig)



**Abbildung 34:** Gaskühler an der Biogasanlage beim Agrarbetrieb Landtechnik u. Biogas Trieb (Vogtlandkreis, Sachsen)

Die Untersuchungen hinsichtlich evtl. Zusammenhänge zwischen den praktizierten Biogastrocknungsvarianten, Methananteil im Biogas und evtl. resultierenden Korrelationen zu den Formaldehydemissionen lassen keine nennenswerten Auffälligkeiten erkennen. Die Ergebnisse stellen sich ähnlich der bereits vorgestellten Auswertungen für die anderen Untersuchungsparameter, z. B. Prozesstemperatur, Verweilzeiten, Rührdauer, dar. Dementsprechend sind keine Korrelationen zwischen den Gastrocknungsvarianten und dem Methananteil im Biogas und den Formaldehydemissionen feststellbar.

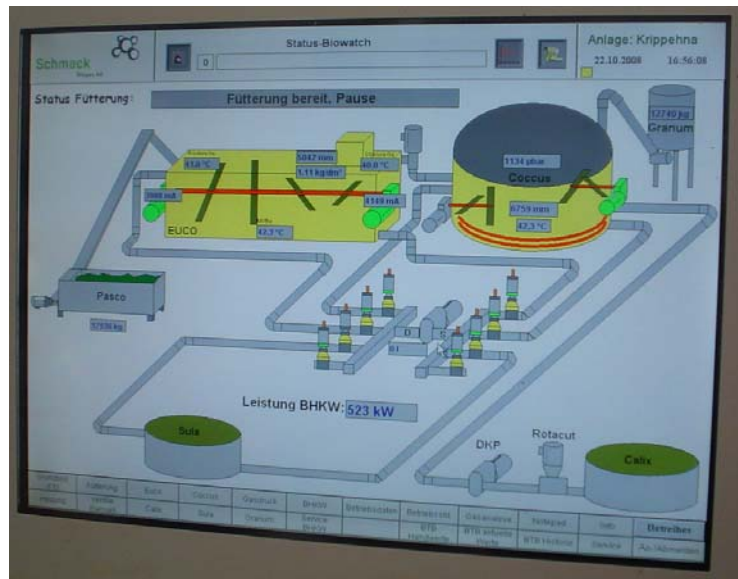
### 4.3.14 Brenngaszusammensetzung

Die Messung, Steuerung und Regelung von Biogaserzeugungsprozessparametern (z. B. **Abbildung 35**) sowie der Energieerzeugung und Einspeisung in das Netz des Energieversorgungsunternehmens sind für den zuverlässigen und störungsfreien Betrieb der Biogasanlage unerlässlich. In diesem Zusammenhang ist insbesondere auch die laufende Erfassung der Brenngaszusammensetzung von besonderer Bedeutung, um beispielsweise im Falle von unzureichenden Biogasqualitäten, welche zu Störungen führen können, eine automatische Abschaltung des(r) BHKW zu ermöglichen. Diese Aufgaben der komplexen Prozessüberwachung sowie die Messung der Brenngaszusammensetzung werden durch spezielle Sensoren und Analysegeräte wahrgenommen. Einige Hersteller bzw. Typen dieser Gasanalysegeräte wurden in **Abschnitt 4.3.3** benannt.



**Abbildung 35:**

Prozessüberwachungsdisplays an den Biogasanlagen der MKH Agrar Produkte GmbH (**links**) in Kotten (Landkreis Bautzen, Sachsen) bzw. der Agrargenossenschaft Krippelna e. G. (**rechts**) in Zschepplin (Kreis Nordsachsen)



In den vorangegangenen **Abschnitten 4.3.4 bis 4.3.13** wurden die Untersuchungsergebnisse zu evtl. Korrelationen von ausgewählten Biogaserzeugungsprozessparametern (z. B. Prozessstufen, Rührdauer) auf den Methananteil im Biogas und auf die evtl. daraus resultierenden HCHO-Bildungen vorgestellt. Die Grundlage dieser Untersuchungen bildeten überwiegend der Datenbestand aus den durch die Betreiber zur Verfügung gestellten Datenblättern sowie Emissionsmessberichten bzw. -auszügen. Dementsprechend konnten in diese Betrachtungen mindestens 31 Standorte, an denen insgesamt 43 BHKW betrieben werden, einfließen. Dabei handelt es sich um die Anlagen für die zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen bzw. Probenahmen auch der Methananteil im Biogas erfasst wurde. Für keinen der untersuchten Prozessparameter (z. B. Fermentertemperatur) bzw. Anlagenauslegungen (z. B. Entschwefelung) konnten direkte Einflüsse auf die Gewinnung eines bestimmten Methananteiles in einer jeweils untersuchten Klasse (z. B. Temperaturbereich, Entschwefelung mit Nasswäscher) mit evtl. korrelierenden Formaldehydemissionen analysiert werden. Dies wird sowohl in den für die jeweilige Untersuchung erläuterten **Abbildungen 14, 16, 19, 21, 24, 25, 27 bis 29, 31 und 32** als auch in den **Anlagen 8a und 8b** deutlich. In diesen Anlagen sind die für die jeweiligen Untersuchungen einbezogenen Ausgangsdaten, Ansätze, Spezifikationen und Werte ersichtlich. Diese wurden nicht unter Berücksichtigung der Datenbanknummern, sondern nach erfassten Methananteil im Biogas geordnet. Lediglich zum Substrateinsatz könnte evtl. in einem zukünftigen Projekt untersucht werden, ob sich evtl. Zusammenhänge aus dem Einsatz bestimmter Kosubstrate (z. B. Luzerne, Fettabscheidefette, Glycerin) formulieren lassen. Hierzu ist beispielsweise aus /15/ und /30/ bekannt, dass sich aus Fettabscheidefetten (-rückständen) Methananteile bis zu 68 Vol.% bilden können. Für „Luzerne“ ist in Auswertung von Steinfatt /31/ einzuschätzen, dass aus einsiliertem Luzernegras Methananteile bis zu 62 Vol.% erzeugt werden könnten. Sofern im Ergebnis eines zukünftigen Projektes „Substrateinsatz“ Einflüsse auf die Brenngaszusammensetzung mit evtl. Korrelationen zwischen dem Methananteil und den Formaldehydemissionen feststellbar sind, könnten der Kosubstrateinsatz von „Fettabscheidefetten und Glycerin“ am Standort mit der Datenbanknummer „26“ bzw. von „Luzerne“ am Standort mit der Datenbanknummer „27“ eine Maßnahme zur Minderung der HCHO-Emissionen darstellen. Für ein derartiges Projekt bietet sich grundsätzlich an, Erfahrungsträger auf dem Gebiet der Biogaserzeugungsprozesse, wie z. B. das DBFZ (Deutsches BiomasseForschungsZentrum), einzubinden. Zurzeit sind seitens des Auftragnehmers für diese Studie weder das dafür benötigte Know-How noch die dafür erforderliche technische Ausstattung verfügbar.



Beim Einsatz von „Biogas“ als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren von Blockheizkraftwerken ist aus Sicht der Autoren eine grundsätzliche Besonderheit zu beachten. Während es für konventionelle und teilweise auch für andere Alternativkraftstoffe eindeutig definierte Qualitätsanforderungen an diese Kraftstoffe nach entsprechenden Normen oder Regeln gibt bzw. diese sich teilweise im Beschlussfassungsprozess befinden, sind zurzeit für „Biogas“ keine verbindlichen Qualitätsanforderungen beim Einsatz in Verbrennungsmotoren von BHKW festgelegt. Beispielhaft ist für konventionelle Kraftstoffe bzw. ausgewählte Alternativkraftstoffe die 10. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BGBl. I Nr. 30 vom 28.06.2004, S. 1.342) zu nennen. U. a. ist dort geregelt:

- ⇒ § 1 Beschaffenheit von **Ottokraftstoffen DIN EN 228**
- ⇒ § 2 Beschaffenheit von **Dieselmotorkraftstoffen DIN EN 590**
- ⇒ § 3 Beschaffenheit von **Biodiesel DIN EN 14214**
- ⇒ § 4 Beschaffenheit von **Flüssiggaskraftstoff DIN EN 589**
- ⇒ § 5 Beschaffenheit von **Erdgas DVGW-Arbeitsblatt G 260**

Für den Kraftstoff „Erdgas“ ist interessant, dass voraussichtlich ab 2009 neue Qualitätsanforderungen nach DIN 51624 gelten werden. U. a. ist vorgesehen, in dieser DIN zu regeln, dass am Ausgang der Erdgasbetankungsanlage, dies entspricht dem Tankstutzen des Fahrzeuges, der Schwefelgehalt von 10 mg/kg nicht überschritten werden darf. Nach derzeitigen Erkenntnissen wird davon ausgegangen, die entsprechende Verabschiedung der geänderten 10. BImSchV im Januar 2009 und daraus resultierend die Inkrafttretung einige Wochen später zu realisieren. Durch diese Maßnahme ist sowohl den Motorenherstellern als auch der Kraftfahrzeugzuliefererindustrie die Möglichkeit gegeben, ihre Produkte an diese Qualitätsanforderungen anzupassen.

Für den praktischen Biogaseinsatz in Verbrennungsmotoren von BHKW sind gegenwärtig ausschließlich die geforderten Mindesteigenschaften seitens der Motorenhersteller relevant. Im Ergebnis des Studiums einiger Betriebsanleitungen für die eingesetzten BHKW ist zu analysieren, dass die jeweiligen Vorgaben herstellereigentlich voneinander abweichen. Auffallend sind beispielsweise die geforderten Schwefelwasserstoffgehalte (z. B. < 200 ppm bzw. < 1.500 ppm). Auf Grund der Tatsache, dass keine einheitlichen und verbindlichen Mindestanforderungen bei der Verwendung von „Biogas“ in BHKW-Motoren existieren, gestaltet sich aus Sicht der Autoren auch die Anpassung der Motorprozesse an die Brenngaszusammensetzung im Herstellerwerk schwierig. In Auswertung der Internetrecherchen, des Literaturstudiums sowie der Betriebsanleitungen und der Vor-Ort-Gespräche wird eingeschätzt, dass z. B. die jeweiligen Gasotomotoren im Herstellerwerk für Erdgasbetrieb und teilweise auch für Biogasbetrieb, mit eindeutig definierten Mindestanforderungen (z. B. Heizwert, Methanzahl, Methananteil) optimiert werden (vgl. auch **Tabellen 10 bis 21 → Abschnitte 4.4.3.1 bis 4.4.3.13**). In der Praxis erfolgt dann am jeweiligen Standort entweder durch die Motorenhersteller (z. B. **Anlagen 2 und 6**) oder durch spezielle Maschinen- und Anlagenbauunternehmen (z. B. **Anlage 7**) die Anpassung auf die standortspezifische Brenngaszusammensetzung (z. B. Methananteil). Die Ergebnisse der Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass an einigen Standorten schwankende Brenngaszusammensetzungen auftreten (z. B. **Abbildung 13 → Seite 26, Tabelle 8**). Auch wenn keine direkten Einflüsse der jeweiligen Untersuchungsparameter (z. B. Fermentertemperatur) auf den Methananteil mit evtl. resultierenden Korrelationen zur Formaldehydbildung herausgearbeitet werden konnten, gehen die Autoren



davon aus, dass der Methananteil einen Einfluss auf die Verbrennung ausüben könnte. Unter Berücksichtigung dieser Überlegung könnte die Installation einer CH<sub>4</sub>-Regelung evtl. eine hilfreiche Maßnahme zur Minderung von Formaldehydemissionen aus diesen mit Biogas betriebenen BHKW darstellen. In diesem Zusammenhang wäre eine kontinuierliche Messung des Methananteils denkbar, wobei daraus resultierend eine Anpassung des Zündzeitpunktes oder der Leistung in Abhängigkeit des jeweiligen Methananteils erfolgt. Hierbei wäre in einem ersten Arbeitsschritt mit den Motorenherstellern bzw. Maschinen- und Anlagenbauunternehmen die technische Machbarkeit zu klären bzw. der ggf. Ist-Zustand hierzu zu erfassen.

**Tabelle 8:** Beispielhafter Vergleich der Zusammensetzung von „Biogas“ und „Erdgas“

	<b>BIOGAS</b>				<b>ERDGAS (Beispiele)</b>		
Quellen	/32/		<u>STUDIENERGEBNIS</u>		/33/	/34/	/35/
Zusammensetzung	Schwankungsbreite	Durchschnitt	Emissionsmessberichte	Datenblätter	GUS-Gas (H-Gas)	Verbundgas Nord (H-Gas)	E.ON Avacon (L-Gas Ahlten 3)
Methan	(45...70)%	60%	(46...67,9)%	(46...65)%	98,03%	88,11%	86,523%
Kohlendioxid	(25...55)%	35%	(33...49)%	(27...43,1)%	0,05%	1,41%	0,28%
Wasserdampf	(0...10)%	3,1%	ohne Angaben		ohne Angaben		
Stickstoff	(0,01...5)%	1%	ohne Angaben		0,78%	2,54%	11,837%
Sauerstoff	(0,01...2)%	0,3%	(0,1...5,7)%	(0,1...1,7)%	0%	0%	0,008%
Wasserstoff	(0...1)%	< 1%	ohne Angaben		0%	0%	0%
Ammoniak	(0,01...2,5) mg/m <sup>3</sup>	0,7mg/m <sup>3</sup>	ohne Angaben		ohne Angaben		
Schwefelwasserst.	(10...30.000) mg/m <sup>3</sup>	500 mg/m <sup>3</sup>	(9,12...1.520) mg/m <sup>3</sup>	(7,6...760) mg/m <sup>3</sup>	< 0,1mg/m <sup>3</sup>	1mg/m <sup>3</sup>	ohne Angabe

Im Rahmen der Vorstellung der Untersuchungsergebnisse zu den Fermentationsverfahren (Abschnitt 4.3.1 → S. 20 und 21 → **Abbildung 7**) und zur Hygienisierung (Abschnitt 4.3.9 → S. 38 bis 41 → **Abbildungen 24** und **25**) sowie zum Substrateinsatz (Abschnitt 4.3.11 → S. 46 bis 49 → **Abbildung 29**) wurde bereits auf die evtl. Bedeutung der jeweils installierten BHKW-Spezifikationen hingewiesen. Darauf aufbauend wurden Untersuchungen hinsichtlich des **Methananteils** im Biogas und der **HCHO-Emissionen** unter Berücksichtigung einer Klasseneinteilung nach Motorherstellern durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den **Abbildungen 36** bis **39** ersichtlich. In den **Abbildungen 36** und **38** sind die zum **Zeitpunkt der Probenahme** mit erfassten **Methananteile im Biogas** sowie die dementsprechend analysierten maximalen **HCHO-Emissionen** aufgetragen. Diese beziehen sich in **Abbildung 36** auf die **Gasotomotoren** und in **Abbildung 38** auf die **Zündstrahlmotoren**. Die **Abbildungen 37** und **39** veranschaulichen die gleiche Betrachtungsbasis, jedoch auf der Grundlage der in den **Datenblättern** ausgewiesenen  $\varnothing$  **Methananteile im Biogas**. Für die **Gasotomotoren** sind diese in **Abbildung 37** und für die **Zündstrahlmotoren** in **Abbildung 39** dargestellt. In Auswertung dieser **Abbildungen 36** bis **39** sind keine Korrelationen zwischen Methananteil im Biogas und HCHO-Emissionen festzustellen. Auffällig sind jedoch die Konzentrationen von TA Luftgrenzwertüberfüllungen bzw. -überschreitungen in einigen Klassen.

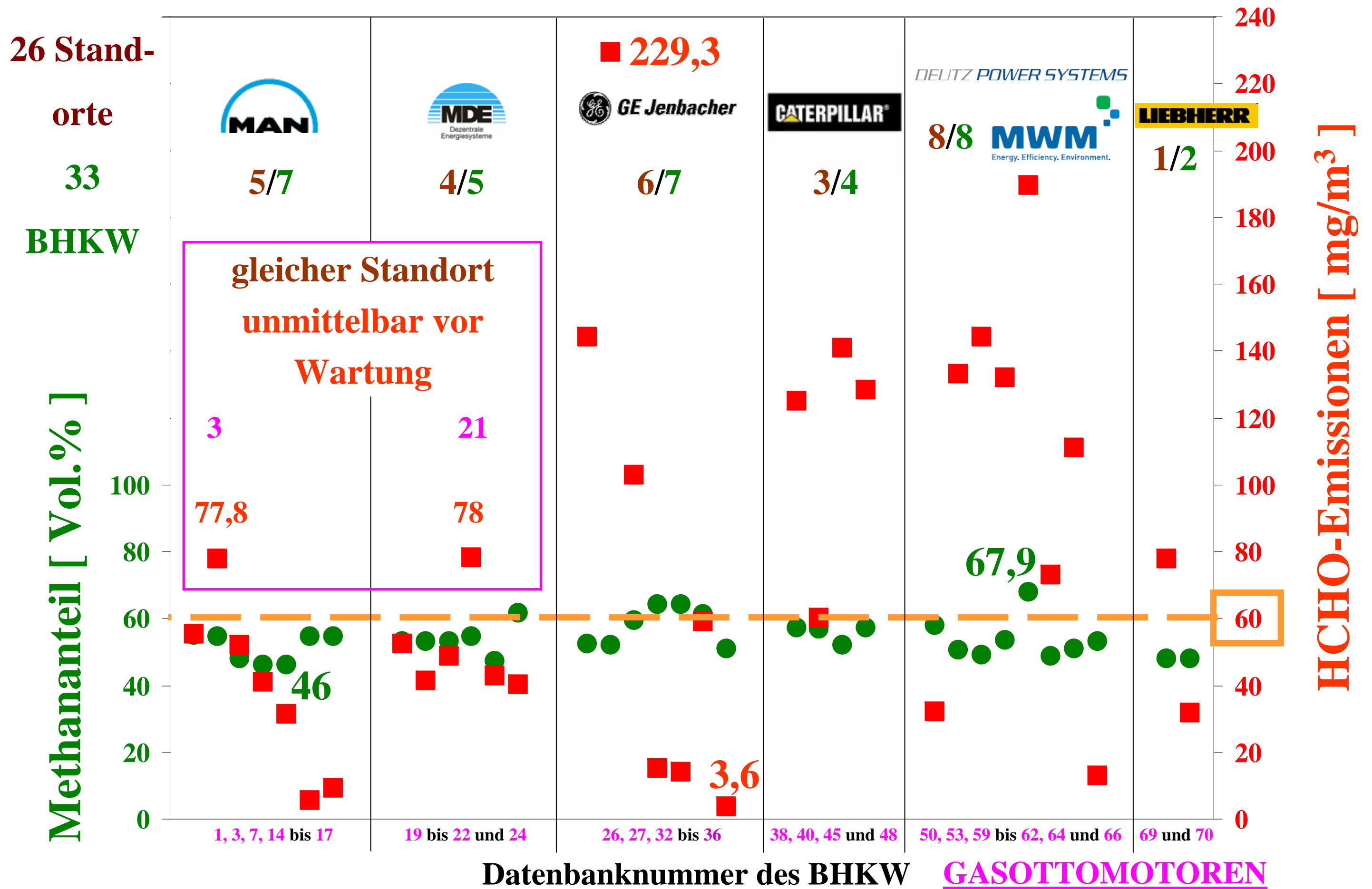
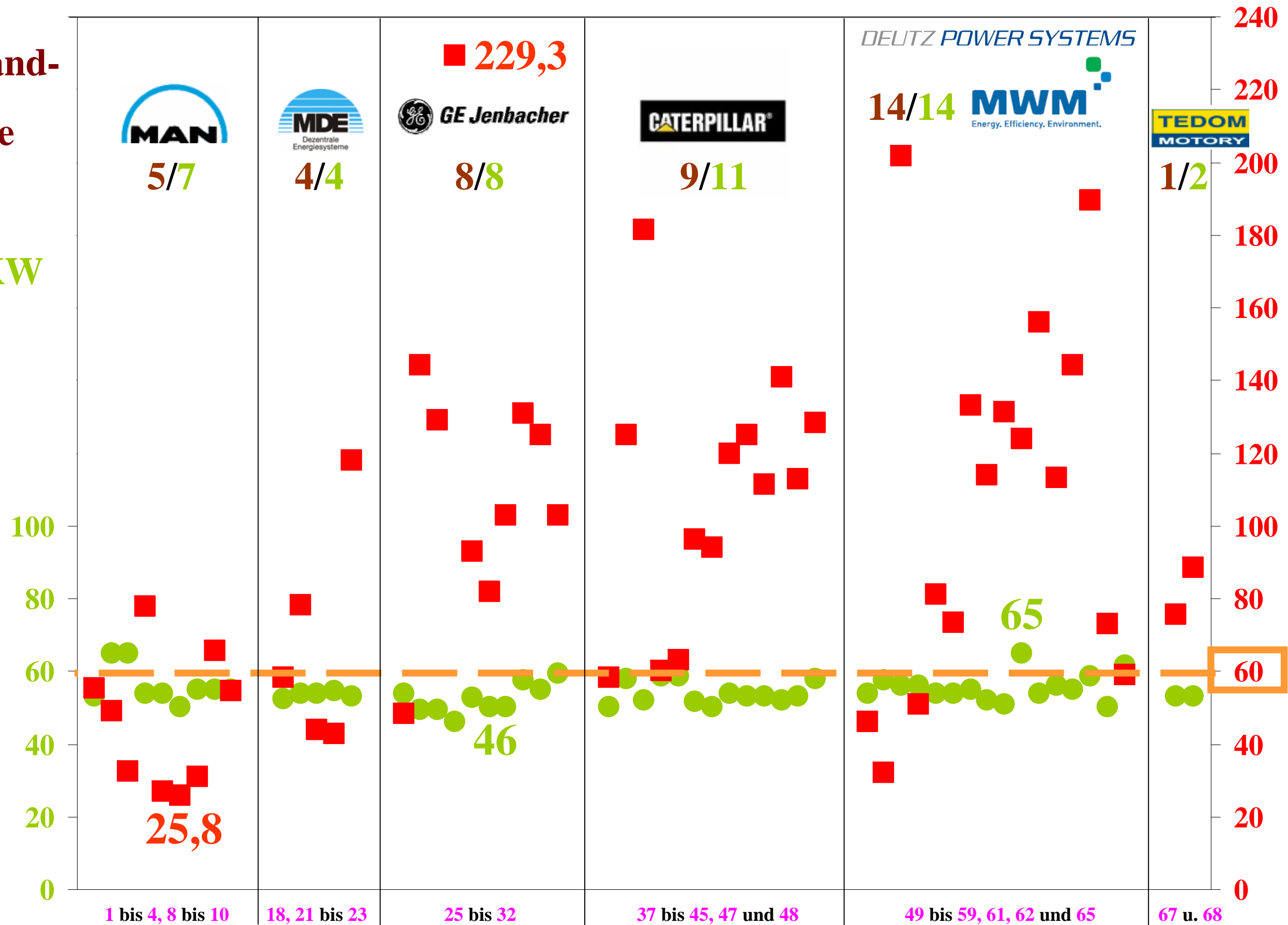


Abbildung 36: Methananteil und analysierte Formaldehydemissionen für 33 Biogas-BHKW

41 Stand-  
orte  
46  
BHKW

Methananteil [ Vol.% ]



HCHO-Emissionen [ mg/m³ ]

Datenbanknummer der BHKW GASOTTOMOTOREN

Abbildung 37:  $\circ$  Methananteil und analysierte Formaldehydemissionen für 46 Biogas-BHKW

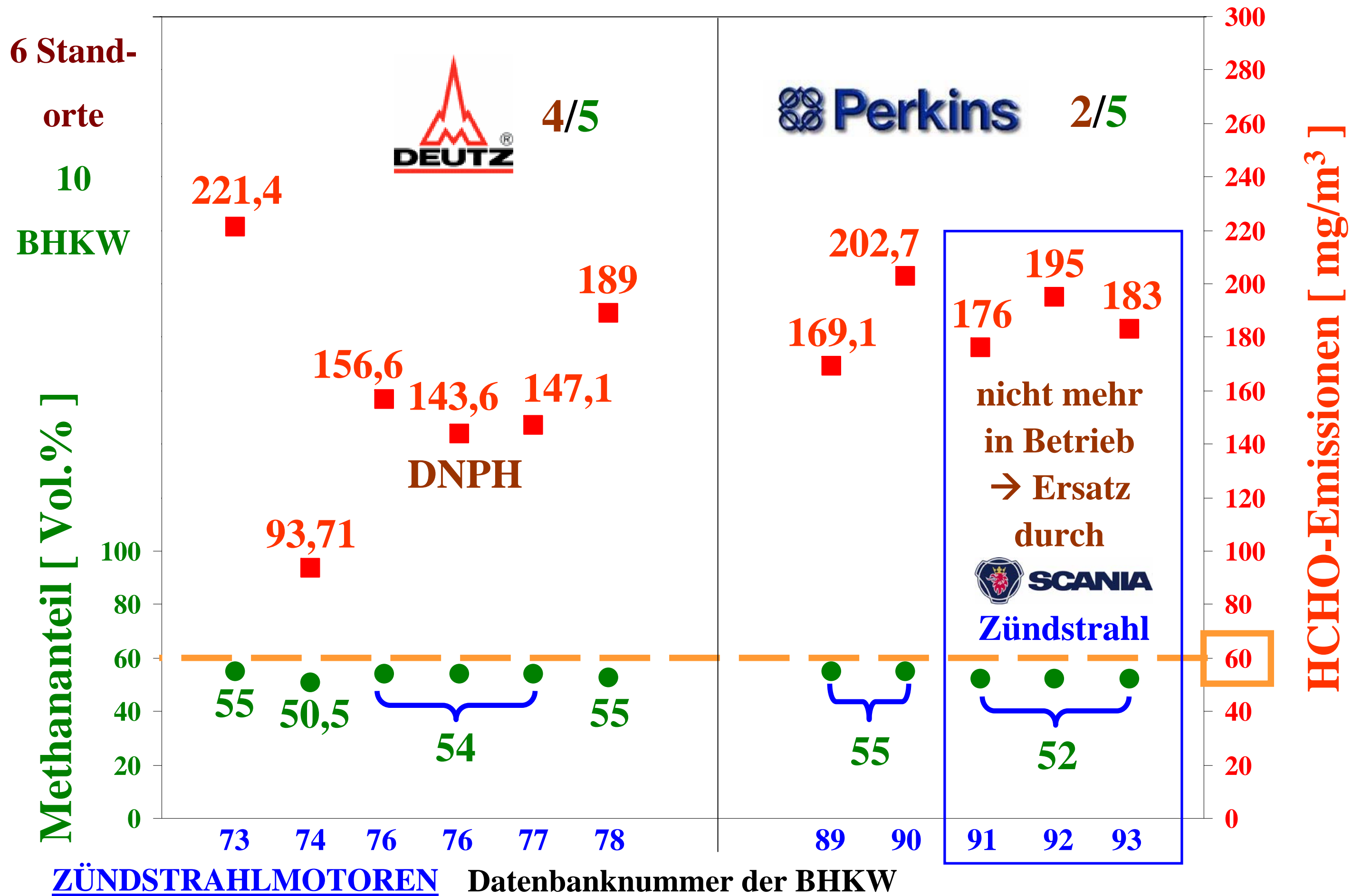


Abbildung 38: Methananteil und analysierte Formaldehydemissionen für 10 Biogas-BHKW

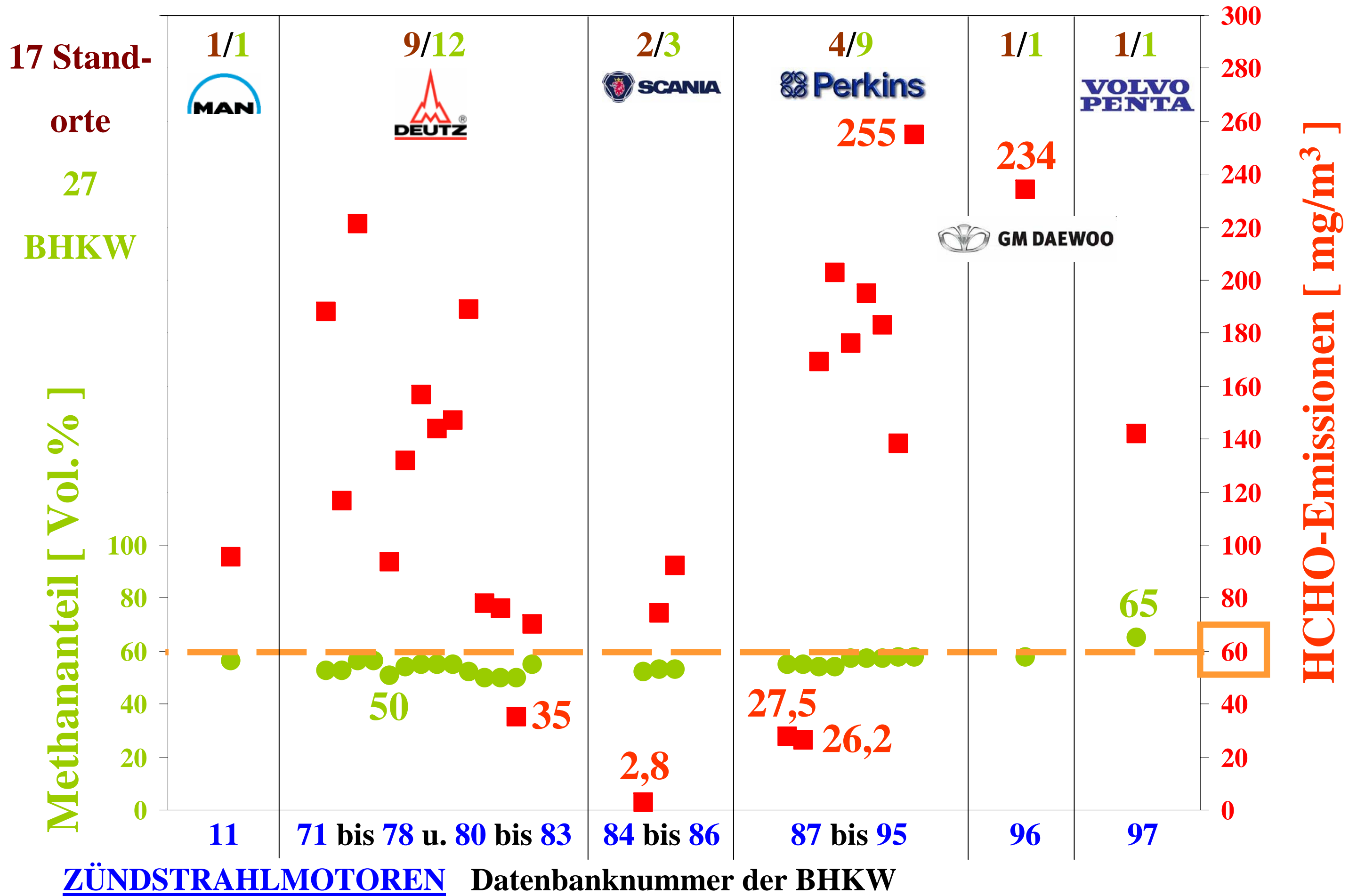


Abbildung 39:  $\circ$  Methananteil und analysierte Formaldehydemissionen für 27 Biogas-BHKW

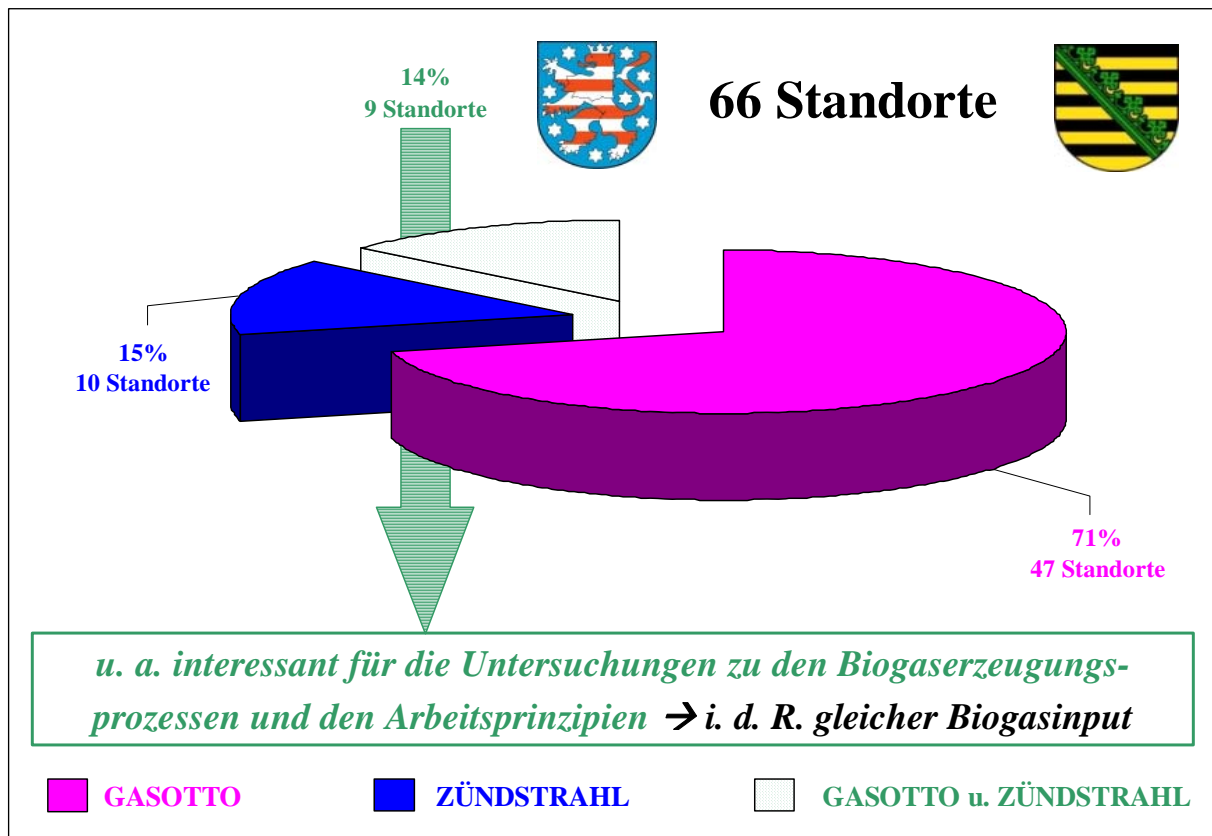


## 4.4 BHKW-Spezifikationen

### 4.4.1 Arbeitsprinzipien, Brennverfahren

Bei der Verbrennung von Biogas gelangen zwei unterschiedliche Arbeitsprinzipien zur Anwendung. Entweder wird das Biogas in Fremdzündungsmotoren, die nach dem Otto-Prinzip arbeiten, oder in Selbstzündungsmotoren (Diesel-Prinzip), in denen die Verbrennung nach dem Zündstrahlverfahren erfolgt, verbrannt. Hinsichtlich des Zündstrahlverfahrens wird in der Literatur und Praxis auch von Zünd- bzw. Stützfeuerung gesprochen. Bei diesem Brennverfahren werden dem Biogasegemisch geringe Mengen Heizöl, Biodiesel oder Pflanzenöl zugemischt, um den selbstzündenden Verbrennungsbeginn einzuleiten. Eine gesetzliche Besonderheit ist, dass in Anlagen, die nach dem 31.12.2006 errichtet wurden, ausschließlich Biodiesel oder Pflanzenöl als Zündöl zu verwenden ist. Je nach technischem Entwicklungsstand der Biogas-BHKW ist von Zündölmengen im Bereich von (2...10)% auszugehen.

In der **Abbildung 40** ist die gegenwärtige Auslegungssituation hinsichtlich der angewandten Arbeitsprinzipien für die zurzeit in dieser Studie zu berücksichtigenden Standorte ersichtlich.



**Abbildung 40:** Standortanteile der angewandten Arbeitsprinzipien hinsichtlich der in Sachsen u. in Thüringen für diese Studie zu berücksichtigenden Anlagenstandorte

### 4.4.2 Verbrennungsmotorenhersteller

Der gegenwärtige Ist-Zustand hinsichtlich der an den zu berücksichtigenden 66 Anlagenstandorten installierten Verbrennungsmotoren ist in der **Tabelle 9** zusammengestellt. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass in diese Übersicht lediglich die Standorte aufgenommen wurden, von denen sowohl die Angaben hinsichtlich der BHKW-Spezifikationen als auch der analysierten Formaldehydemissionen vorliegen (vgl. **Tabelle 3** → S. 18). Dementsprechend wurden die in der **Anlage 6** aufgeführten BHKW mit den Datenbanknummern **98.** bis **138.** nicht

in dieser **Tabelle 9** berücksichtigt. Hinsichtlich dieser 41 BHKW sind die Formaldehydemissionswerte zurzeit nicht verfügbar, so dass für diese Anlagen zunächst keine der in den folgenden Abschnitten vorzustellenden Untersuchungen möglich war.

**Tabelle 9:** Übersicht Motorhersteller mit Standort-, BHKW- und Grundspezifikationsanzahl

MOTO- RENHER- STELLER	SACHSEN			THÜRINGEN			GESAMT		
	ANZAHL								
	Stand- orte	BHKW	Grund- spez.	Stand- orte	BHKW	Grund- spez.	Stand- orte	BHKW	Grund- spez.
	<b>GASOTTOMOTOREN → Abbildungen 41 bis 54</b>								
MAN	7	10	3	4	6	1	11	16	3
MDE	5	6	1	1	1	1	6	7	1
Jenbacher	7	7	3	4	5	1	11	12	3
Caterpillar	10	12	3				10	12	3
MWM, Deutz Power Systems	16	16	5	2	2	2	18	18	5
Tedom Motory	1	2	1				1	2	1
Liebherr	-	-	-	1	2	1	1	2	1
<b>GESAMT</b>	<b>46</b>	<b>53</b>		<b>12</b>	<b>16</b>		<b>58</b>	<b>69</b>	<b>17</b>
	<b>ZÜNDSTRAHLMOTOREN → Abbildungen 55 bis 62</b>								
MAN	1	1	1				1	1	1
DEUTZ	9	13	3				9	13	3
SCANIA	2	3	1				2	3	1
Perkins	4	9	2				4	9	2
Daewoo	1	1	1				1	1	1
Volvo Penta	1	1	1				1	1	1
<b>GESAMT</b>	<b>18</b>	<b>28</b>					<b>18</b>	<b>28</b>	<b>9</b>

#### 4.4.3 Ist-Zustand ermittelter Formaldehydemissionen

Gemäß **Tabelle 9** sind zunächst 97 BHKW zu betrachten, an denen Verbrennungsmotoren von 12 verschiedenen Herstellern mit insgesamt 26 unterschiedlichen Grundspezifikationen (z. B. Leistungsparameter, Motorkonzept, Bauform, Zylinderanzahl) eingesetzt werden.

Für die nachfolgenden Untersuchungen und Abbildungen wurden die für das jeweilige BHKW (Datenbanknummern) übermittelten Daten hinsichtlich der Maximalwerte für CO-, NO<sub>x</sub>- und Formaldehyd sowie der BHKW-Spezifikationen zugrunde gelegt. Hierbei wurde bewusst die Darstellung dieser Emissionsbestandteile gewählt, da bezüglich dieser Emissionen die größte Anzahl der Daten verfügbar ist. Für einige Anlagenstandorte sind den jeweiligen Emissionsmessberichten auch Messwerte für SO<sub>2</sub>, NMHC, Ges-C und Staub zu entnehmen. Diese werden jedoch nicht näher betrachtet.

Die Messinstitutionen, welche die Emissionsmessungen sowie die Formaldehydemissionsanalysen durchgeführt haben, sind in der **Anlage 9** in willkürlich gewählter Reihenfolge genannt.

Je nach Datenbestand variiert die Gestaltung der **Abbildungen 41 bis 46** bzw. **48 bis 62**. Aus diesem Grunde sollen zunächst einige allgemeine Ausführungen zum besseren Verständnis dieser Abbildungen sowie der dementsprechenden Erläuterungen beitragen.

1. Für die Abbildungen, aus denen keine Hinweise auf Voll- bzw. Teillastbetrieb, 1. bzw. 2. Messung (ggf. vor bzw. nach Wartung), Formaldehydanalyseverfahren (AHMT, DNPH) oder Minimalwerte zu entnehmen sind, wird festgelegt, dass es sich bei der jeweiligen Abbildung um Maximalwerte für die jeweils dargestellten Emissionsbestandteile handelt. Diese Festlegung wird getroffen, da bei den Emissionswertangaben, welche den Datenblättern entnommen wurden, nicht immer zweifelsfrei war, ob Mittel- oder Maximalwerte in diese Datenblätter übertragen wurden.
2. In einigen Abbildungen sind für das jeweilige BHKW (Datenbanknummer) mehrere Messwerte ersichtlich. In solchen Fällen handelt es sich entweder um die Darstellung von Emissionswerten, die an verschiedenen Messtagen ermittelt wurden oder um Minimal- bzw. Maximalwerte. Hierzu erfolgt in der jeweils betreffenden Abbildung der entsprechende Hinweis. Als Beispiel ist das BHKW mit der Datenbanknummer „2“ zu beschreiben. In **Abbildung 41** sind für diesen Standort sechs Messwerte ersichtlich. Die ersten drei Messwerte beziehen sich auf die Emissionsmessung am 24.01.2007, wobei es sich bei den Werten 1 bis 3 um die Maximalwerte handelt. Am 09.08.2007 wurden erneute Messungen an diesem Biogas-BHKW realisiert. Die Messwerte 4 bis 6 zeigen die Maximalwerte an diesem Messtag.
3. Sofern es sich um mehrere BHKW an einem gleichen Standort handelt, wurde dieser Aspekt textlich bezeichnet (**Abbildung 42** → MAN → Datenbanknummern „8“, „9“ und „10“ sowie „14“ und „15“).
4. Für einige Anlagen war weder aus den Datenblättern noch aus den Emissionsmessberichten bzw. -auszügen zu entnehmen, ob das AHMT- oder DNPH-Verfahren zur Analyse der Formaldehydemissionen angewandt wurde. In Auswertung aller vorliegenden Emissionsmessberichte war jedoch zu analysieren, dass die Messungen überwiegend nach dem AHMT-Verfahren erfolgten. Aus diesem Grunde wurde für die Standorte, wo nicht auf das verwendete Verfahren hingewiesen wurde, unterstellt, dass die Analyse nach dem AHMT-

Verfahren erfolgte. Entsprechend einigen Emissionsmessberichten wurden an einigen Biogas-BHKW die Formaldehydemissionen sowohl nach dem AHMT- als auch nach dem DNPH-Verfahren ermittelt. Für die Standorte, an denen Messungen nach beiden Verfahren realisiert wurden, wird dies in den jeweiligen Abbildungen ersichtlich. Am BHKW mit der Datenbanknummer „23“ (**Abbildung 43** → Seite 71) erfolgte die Formaldehydemissionsanalyse ausschließlich nach dem DNPH-Verfahren.

5. Auf die Messwertedarstellung für Teil- bzw. Volllastbetrieb wurde weitestgehend verzichtet. Ausnahmen stellen das BHKW mit der Datenbanknummer „52“ in **Abbildung 50** (Seite 83), 2 BHKW mit Tedom Motory-Motoren am gleichen Standort (Datenbanknummern „67“ u. „68“ → **Abbildung 53** → Seite 87) sowie das BHKW „11“ mit Zündstrahlmotor (**Abbildung 55** → Seite 91) dar.
6. Formaldehydemissionswerte wurden überwiegend für die Standorte angegeben, wo Überschreitungen des Grenzwertes vorhanden sind oder wo die Überschaubarkeit der Abbildungen dies zuließ.
7. Um in den jeweiligen Abbildungen auch einen schnellen Überblick hinsichtlich der je nach Hersteller eingesetzten **Motorspezifikationen** zu bekommen, wurden diese mit der Schriftfarbe „GRÜN“ hervorgehoben.
8. Den übermittelten Datenblättern und Emissionsmessberichten der jeweiligen Anlagenstandorte sind teilweise widersprüchliche Angaben hinsichtlich der eingesetzten Verbrennungsmotoren zu entnehmen. Hierbei ist zu unterstellen, dass diese durch die Betreiber entweder aus den jeweiligen Anlagendokumentationen oder aus evtl. vorliegenden allgemeinen Produktdatenblättern übertragen wurden. Um für die nachfolgenden Untersuchungen Zuordnungen bzw. Vereinheitlichungen hinsichtlich der jeweils angewandten Motorgrund- und -unterspezifikationen vornehmen zu können, wurden Internet- und Literaturrecherchen zu diesen jeweils eingesetzten Verbrennungsmotoren durchgeführt. Im Ergebnis dessen wurden die Technischen Daten der bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt zu berücksichtigenden Motoren in den **Tabellen 10 bis 21** zusammengestellt. In die Tabellen wurden überwiegend die Angaben laut Motorenhersteller und ggf. Entwicklers zur Anpassung auf Biogasbetrieb (z. B. SEVA Energie AG) aufgenommen.

#### 4.4.3.1 MAN-Gasottomotoren

Für die Untersuchungen zu den MAN-Gasottomotoren sind zurzeit insgesamt 16 BHKW, die an 7 Standorten in Sachsen und an 4 Standorten in Thüringen installiert sind, zu berücksichtigen. In der **Tabelle 10** sind technische Spezifikationen von zurzeit bzw. zukünftig zu betrachtenden MAN-Gasottomotorspezifikationen zusammengestellt.

Der **Tabelle 10** ist zu entnehmen, dass den zurzeit drei zu berücksichtigenden MAN-Grundspezifikationen (**E 2842 LE** bzw. **E** und **E 2876 LE**) weitere Unterspezifikationen (**TE 302, LE 302** bzw. **312** und **322**) zuzuordnen sind. In Auswertung der entsprechenden Produktdatenblätter des Motorenherstellers handelt es sich beispielsweise bei den Spezifikationsunterschieden um ein- bzw. zweistufige Ausführungen der Gemischkühlung, woraus auch voneinander abweichende Einbaumaße bzw. -gewichte resultieren. Des Weiteren sind unterschiedliche Leistungsparameter zu erkennen.

**Tabelle 10:** Technische Angaben ausgewählter MAN-Gasottomotorspezifikationen /36/

Motorotypbezeichnung	E 2842 LE <sup>(1)</sup>		E 2842 E <sup>(2)</sup>	E 2876 LE <sup>(1)</sup>	
Motorausführung	LE 312	LE 322	LE 312	TE 302	LE 302
Arbeitsprinzip	GASOTTO				
Motorkonzept	Magermotor		Saugmotor	Magermotor	
Aufladung	Abgasturbolader		-	Abgasturbolader	
Luftverhältnis $\lambda$	1,5	1,45	1	1,4	
Gemischkühlung	1-stufig	2-stufig	-	1-stufig	2-stufig
Zylinderanzahl	12			6	
Zylinderanordnung	V-Form			Reihe	
Hubvolumen	21,9 l			12,8 l	
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>				
ISO-Standardleistung	360 kW	380 kW	250 kW	130 kW	200 kW
Kühlwasserwärme <sup>(3)</sup>	215 kW	205 kW	236 kW	124 kW	98 kW
Abgaswärme bei 120°C	217 kW	216 kW	129 kW	57 kW	129 kW
mech. Wirkungsgrad <sup>(3)</sup>	39%	40,8%	37,5%	38%	40,6%
therm. Wirkungsgrad <sup>(3)</sup>	46,8%	48,6%	54,5%	52,8%	49,4%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(3)</sup>	85,9%	89,3%	92%	90,8%	90%

<sup>(1)</sup> für Biogas mit ca. 60% CH<sub>4</sub>    <sup>(2)</sup> für Erdgas, da Biogas ohne Angaben    <sup>(3)</sup> bei 100% Last

Aus Effizienzgründen wurde für die Erstellung der **Abbildungen 41** und **42** (Seiten 68 u. 69) keine weitere Unterteilung der Unterspezifikationen, sondern die Darstellung der Grundspezifikationen gewählt. Auffallend ist, dass unabhängig von der jeweiligen Grundspezifikation die Emissionsmesswerte für Formaldehyd, ausgenommen je ein Messwert für die BHKW mit der Datenbanknummer „3“ (**Abbildung 41** → Seite 68) bzw. mit der Datenbanknummer „9“ (**Abbildung 42** → Seite 69) unterhalb des zurzeit geltenden TA Luft-Grenzwertes von 60mg/m<sup>3</sup> liegen.

Für das BHKW mit der Datenbanknummer „3“ (**Abbildung 41** → Seite 68) sind die Maximalwerte einer am 28.08.2007 durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Radebeul durchgeführten Emissionsmessung aufgetragen. Dem Emissionsmessbericht sind für dieses BHKW mehrere Halbstundenmittelwerte bei Volllastbetrieb zu entnehmen. Für **Formaldehyd** wurden **32,9 mg/m<sup>3</sup>**, **39,6 mg/m<sup>3</sup>** und **77,8 mg/m<sup>3</sup>** nach dem AHMT-Verfahren ermittelt. Der Ansatz des Mittelwertes aus diesen drei Analysewerten (= 50,1 mg/m<sup>3</sup>) würde die Erfüllung des TA Luftgrenzwertes bedeuten. Zum Zeitpunkt der Erarbeitung des Zwischenberichtes für diese Studie /20/ lag für dieses BHKW ausschließlich



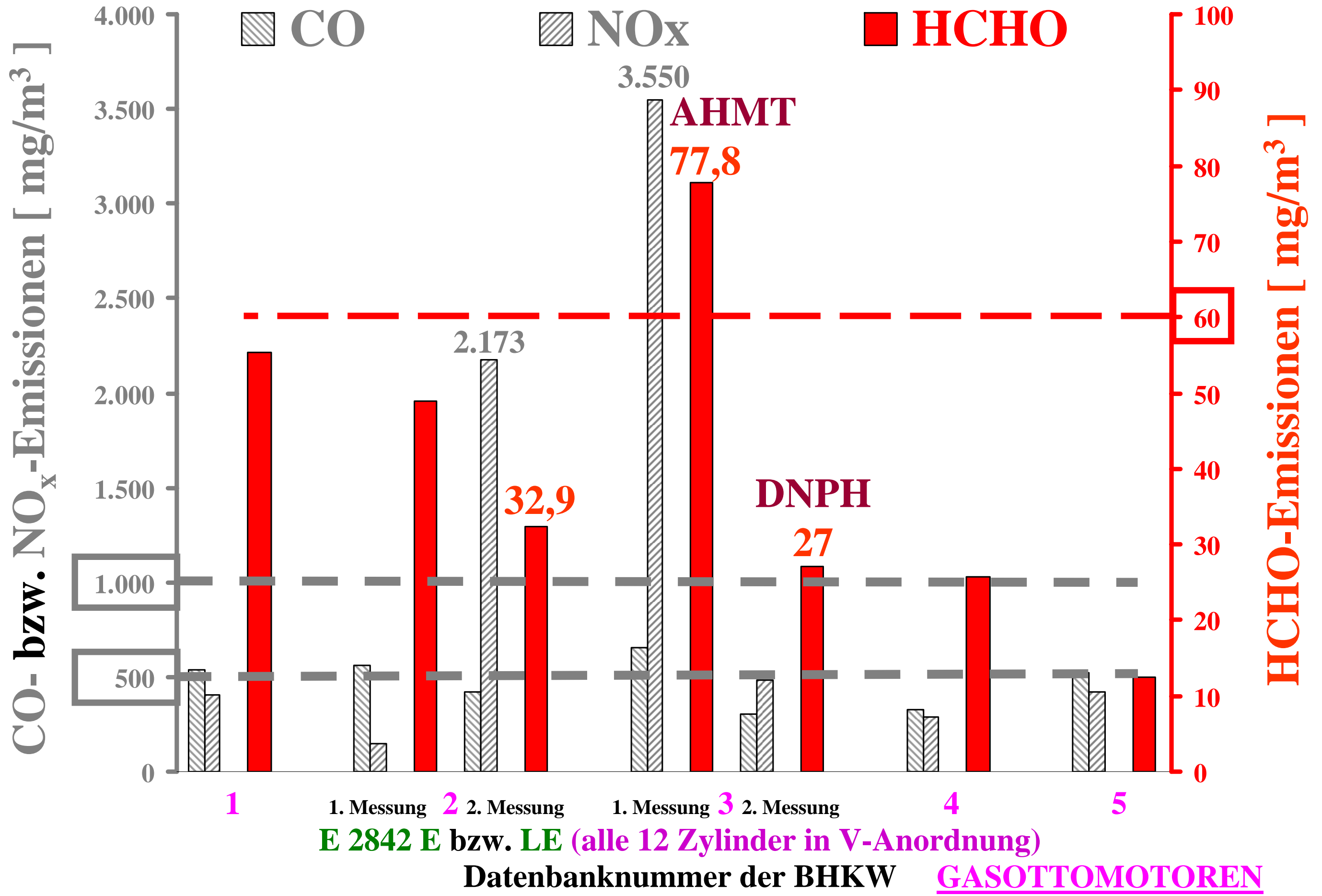
der Emissionsmessbericht vom 28.08.2007 vor. Um dieses BHKW I sowie das BHKW II (MDE-Spezifikation → **Abschnitt 4.4.3.2** (Seite 70), **Abbildung 43** → Seite 71) in die fortführenden Betrachtungen einbeziehen zu können, wurde mit dem Betreiber ein Termin zur Datenerfassung vereinbart und dementsprechend wahrgenommen. Im Rahmen dieses Termins wurde darüber informiert, dass die Emissionsmessungen bzw. die Probenahmen unmittelbar vor einer Wartung erfolgten. In Auswertung dieses Gespräches sowie unter Berücksichtigung der anderen HCHO-Werte bei Vollast wird eingeschätzt, dass der erhöhte Formaldehydwert hauptsächlich aus unvollständig ablaufenden Verbrennungsprozessen resultieren könnte. In diesem Zusammenhang wird der Wartungszustand (z. B. Ventilspiel, Zündkerzen) als Hauptursache für die unvollständigen Verbrennungsprozesse vermutet. Eine genaue Ursachenanalyse ist zurzeit nicht möglich. Hierzu könnte ein prüfender Einblick in die Wartungsnachweise bzw. das BHKW-Buch Aufschluss geben.

Die BHKW mit den Datenbanknummern „8“, „9“ und „10“ (**Abbildung 42** → Seite 69) sind am gleichen Standort installiert. Hierbei handelt es sich um die gleiche MAN-Spezifikation „E 2876 LE 701“. Leider sind zurzeit keine exakten technischen Angaben für diese MAN-Motorspezifikation verfügbar. Aus diesem Grunde sind auch keine entsprechenden technischen Angaben für diesen MAN-Motortyp in der **Tabelle 10** aufgeführt. Auffälligkeiten sind mit den **gegensätzlichen maximalen Formaldehydemissionswerten** („8“ →  $31,1 \text{ mg/m}^3$ , „9“ →  $65,7 \text{ mg/m}^3$ , „10“ →  $54,6 \text{ mg/m}^3$ ) bei annähernd gleichen CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen gegeben. Diese BHKW mit den entsprechend dargestellten Emissionswerten stellen ein gutes Beispiel hinsichtlich der Betrachtungen zum Biogasininput dar. Da die Emissionsmessungen für diese drei BHKW am gleichen Tag sowie annähernd zeit- und lastgleich durchgeführt wurden, ist die gleiche Brenngaszusammensetzung zu unterstellen. Im Ergebnis dessen wird für diesen Standort eingeschätzt, dass der Biogasininput (Brenngaszusammensetzung) als evtl. Ursache für unvollständig ablaufende Verbrennungsprozesse auszuschließen wäre. Auch für dieses Beispiel wird der Inspektions- bzw. Wartungszustand (z. B. Zündkerzenelektrodenabstand, λ-Sonde) als evtl. Hauptursache für die höheren HCHO-Werte der BHKW „9“ u. „10“ im Vergleich zum BHKW „8“ vermutet. Sofern in einem zukünftigen Projekt nähere Informationen zwingend erforderlich sind, wird erneuter Kontakt zum betreffenden Betreiber aufgenommen, um Einsicht in die Wartungsnachweise bzw. -bücher der BHKW zu bekommen.

Unter Berücksichtigung o. g. Aspekte sowie unter Einbeziehung der HCHO-Analysewerte an den anderen Standorten (Datenbanknummern „1“, „2“, „4“ bis „7“ und „12“ bis „17“ → 2 BHKW mit Oxydationskatalysator) könnte zunächst der Eindruck entstehen, dass für BHKW mit MAN-Motoren wahrscheinlich keine wesentlichen Probleme hinsichtlich der Erfüllung des derzeitigen Formaldehydgrenzwertes und evtl. daraus resultierender Maßnahmen zur Minderung dieses Emissionsbestandteiles zu erwarten sind. Dabei dürfte eine wesentliche Grundvoraussetzung auch die Durchführung der turnusmäßig durchzuführenden Wartungen darstellen.

Hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise für ggf. zukünftige Untersuchungen zu den MAN-Motoren könnten die nachfolgend genannten Arbeitsschwerpunkte von Interesse sein.

- Datenabgleich, -aktualisierung und -auswertung für die Standorte mit MAN-Motorspezifikationen, für die zurzeit noch keine HCHO-Emissionsmesswerte vorliegen (**Anlage 6** → Datenbanknummern 98. bis 105. → 8 BHKW an 5 Standorten)
- Einbindung von weiteren BHKW, die in anderen Bundesländern installiert sind → Initiierung neues Projekt → ggf. Trendbestätigung mit Erhöhung der Ergebnisrepräsentativität
- Spezifikationserfassung für die mit Oxydationskatalysator ausgestatteten BHKW „16“ und „17“



**Abbildung 41:** Abgasemissionen  -Motoren (Datenbank-Nr. „1“ Saugmotor, übrige Magermotoren)

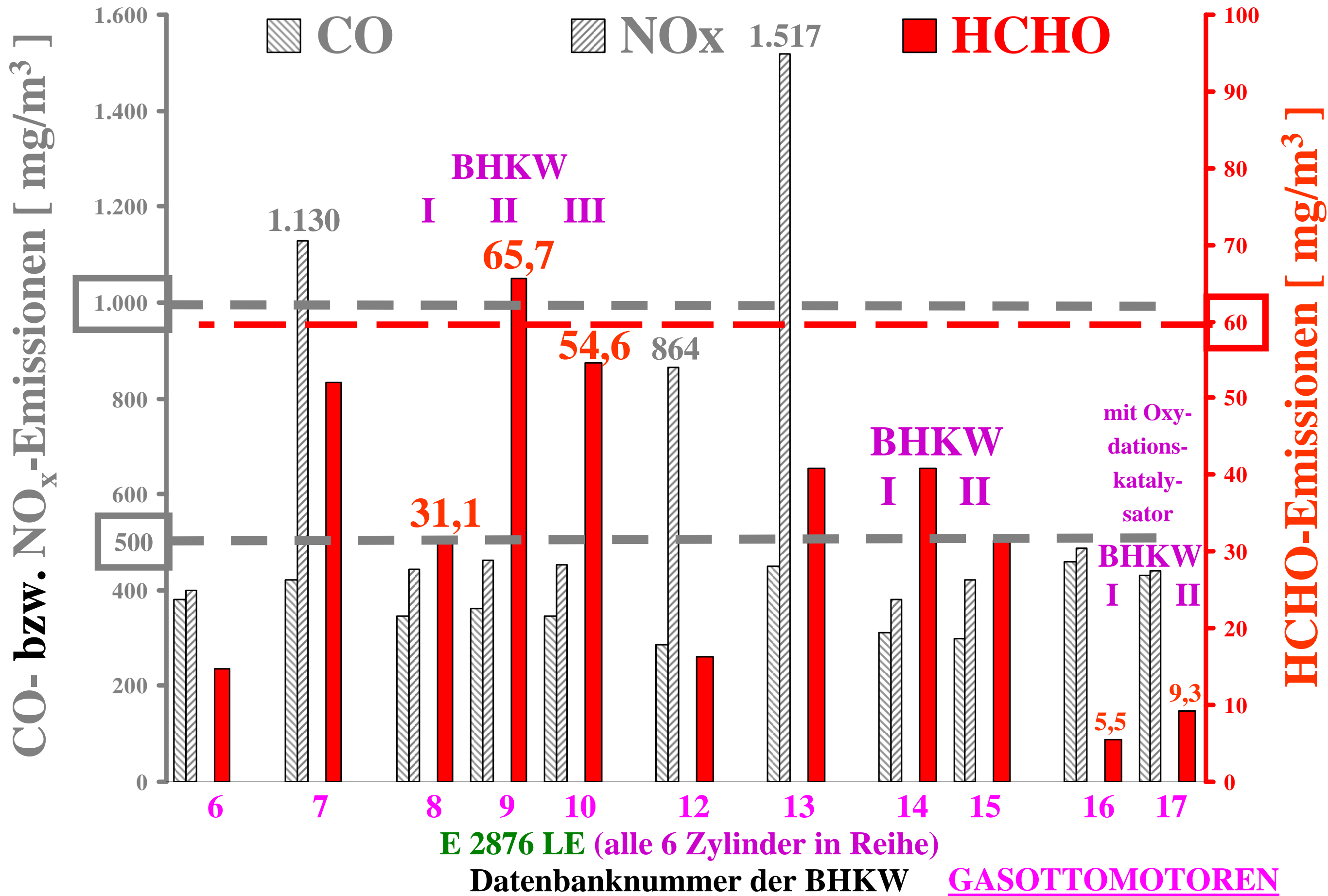


Abbildung 42: Abgasemissionen -Motoren (alles **Magermotoren** an 7 Standorten)

#### 4.4.3.2

#### MDE-Motoren



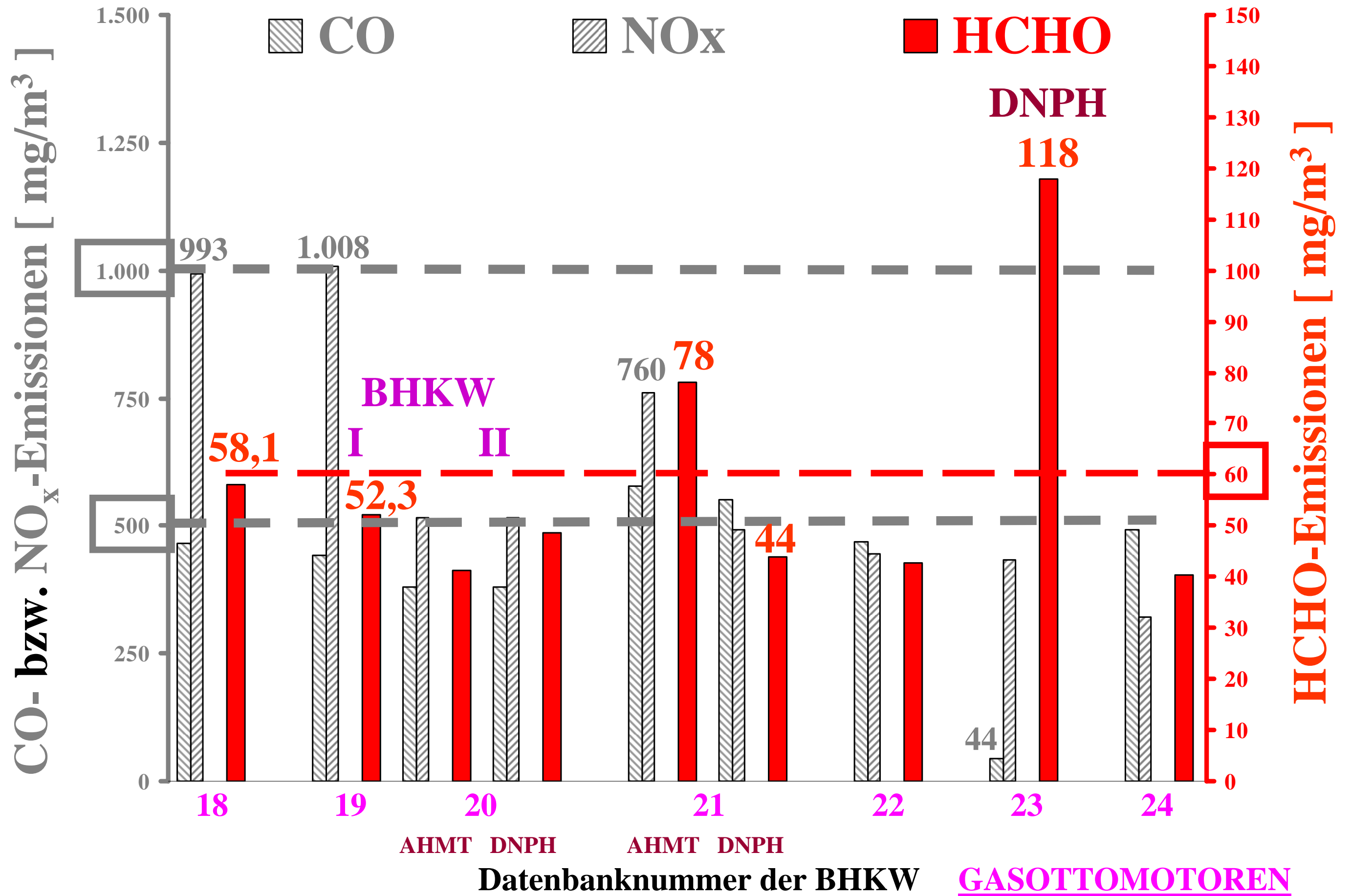
Die MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH Augsburg entwickelt und produziert Gasmotoren, die über Leistungen von (125...400) kW verfügen. Im Bereich von (775...1.600) kW setzt das Unternehmen Gasmotoren des Herstellers MTU Friedrichshafen GmbH ein. Für die nachfolgenden Ist-Zustandsermittlungen waren 6 Standorte mit 7 BHKW zu berücksichtigen (**Abbildung 43** → Datenbanknummern „18“ bis „24“). Laut Angaben in den Datenblättern bzw. Emissionsmessberichten werden an den zu berücksichtigenden Standorten MDE-Motoren mit den Bezeichnungen „AB 3042 L2/L1“, „B 3042 L1 bzw. ...L3 oder ...LS“ und „MB 3042 L5“ betrieben. Im Ergebnis eines Datenabgleichs zwischen den gleichfalls den Unterlagen zu entnehmenden Angaben und den Produktdaten des Herstellers scheint es sich an allen Standorten um den gleichen in der **Tabelle 11** vorgestellten Motor zu handeln.

**Tabelle 11:** Technische Angaben zu berücksichtigender MDE-Motorspezifikation /37/

<b>Motortypbezeichnung</b>	<b>B 3042 L</b>
<b>Arbeitsprinzip</b>	<b>GASOTTO</b>
<b>Motorkonzept</b>	Magermotor mit Abgasturbolader
<b>Zylinderanzahl</b>	12
<b>Zylinderanordnung</b>	V
<b>Nenndrehzahl</b>	1.500 min <sup>-1</sup>
<b>elektr. Leistung</b> <sup>(1), (2), (3)</sup>	370 kW
<b>therm. Leistung</b> <sup>(1), (2), (3), (4)</sup>	426 kW
<b>sonstige Angabe</b>	Einsatz MDE-spezifischer λ-Regelung (z. B. Gasqualität)

- <sup>(1)</sup> Biogas mit (45...65) % CH<sub>4</sub> und mit Mindestmethanzahl > 120 <sup>(2)</sup> bei 100% Last  
<sup>(3)</sup> Gemischkühlwassertemperatur 50°C <sup>(4)</sup> Kühlwasser und Abgas 5% Toleranz

Auch bei den MDE-Motoren entsteht auf den ersten Blick ähnlich den MAN-Gasottomotoren der Eindruck, dass die HCHO-Grenzwerte entsprechend derzeit gültiger TA Luft überwiegend erfüllt werden und daraus evtl. keine zwingend notwendigen Maßnahmen zur Emissionsminderung resultieren könnten. Für die Standorte mit den Datenbanknummern „21“ und „23“ sind Überschreitungen dieses Grenzwertes ersichtlich. Hierbei handelt es sich um die Maximalwerte (78 mg/m<sup>3</sup> → „21“ bzw. 118 mg/m<sup>3</sup> → „23“). Das BHKW mit der Datenbanknummer „21“ wird parallel als BHKW II zum BHKW I mit der Datenbanknummer „3“ (MAN-Gasottomotor → **Abbildung 41** → Seite 68) betrieben. Hierzu wurde bereits ausgeführt, dass die Emissionsmessungen bzw. Probenahme unmittelbar vor einer Wartung (28.08.2007) erfolgten. Es wird unterstellt, dass dieser erhöhte Formaldehydgrenzwert für dieses BHKW II („21“) evtl. im Zusammenhang mit dem Wartungszustand (z. B. Ventilspiel, Zündkerzen) zu betrachten sein könnte. An einem anderen Messtag (18.03.2008), für den die HCHO-Emissionen nach dem DNPH-Verfahren analysiert wurden, beträgt der Maximalwert 44 mg/m<sup>3</sup>. Für zukünftige Betrachtungen könnte von Bedeutung sein, wie sich die HCHO-Emissionen bei weiteren Probenahmen gestalten. Die Überschreitung des Grenzwertes durch das BHKW mit der Datenbanknummer „23“ ist sehr wahrscheinlich in Zündaussetzern begründet. Im Rahmen eines Vor-Ort-Termins zur Datenerfassung für dieses Biogas-BHKW führte der Betreiber aus, dass laut Rückinformation mit dem Servicedienst des Motorenherstellers ein Zylinder nicht störungsfrei lief. Als Ursache wurde eine defekte Zündspule lokalisiert. Auch hinsichtlich der MDE-Motoren könnten weitere Datenerfassungen (z. B. andere Bundesländer) sowie Datenaktualisierungen (z. B. **Anlage 6** → 3 BHKW an zwei Standorten) mit entsprechenden Auswertungen die Ergebnisse repräsentativer gestalten.



**Abbildung 43:** Abgasemissionen  -Motoren „AB bzw. MB 3042 L 1 ... L 5“ (12 Zyl., V-Form)



#### 4.4.3.3 Jenbacher-Motoren von GE **GE Jenbacher**

GE (General Electric Company) ist einer der größten Konzerne der Welt, dessen Hauptsitz sich in den USA befindet. Die Geschäftsfelder umfassen u. a. Medizintechnik, Flugzeugtriebwerke, Finanzdienstleistungen und Energieerzeugung. Im Bereich der Energieerzeugung werden beispielsweise verschiedene Baureihen für Gasmotoren in Jenbach (Österreich) gefertigt.

Gemäß durch das Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie übermittelten Datenblättern sind für die folgenden Untersuchungen hinsichtlich der in Thüringen mit Jenbacher-Motoren ausgelegten Biogasanlagen 4 Standorte mit insgesamt 5 BHKW zu berücksichtigen. In Auswertung des gegenwärtigen Datenbestandes für Sachsen werden 7 Biogasanlagenstandorte mit je einem Jenbacher-BHKW untersucht. Die **Tabelle 12** gibt einen Überblick über die Technischen Angaben der zurzeit berücksichtigten Jenbacher-Motoren.

**Tabelle 12:** Technische Angaben zu berücksichtigender Jenbacher-Motorspezifikationen /38/

Baureihe	2		3	
Motortyp	<b>JMS 208 GS-B.L.</b>	<b>JMS 212 GS-B.L.</b>	<b>JMS 312 GS-C221</b>	<b>JMS 312 GS-B.L.</b>
Arbeitsprinzip	<b>GASOTTO</b>			
Motorkonzept	Magermotor			
Aufladung	Abgasturbolader (Gemischkühlung vorhanden)			
Zylinderanzahl	8	12		
Zylinderanordnung	Reihe	V-Form		
Hubvolumen	16,6 l	24,91 l	29,2 l	
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>			
elektrische Leistung <sup>(1), (2)</sup>	330 kW	288 kW	526 kW	499 kW
thermische Leistung <sup>(2), (3)</sup>	405 kW	456 kW	558 kW	539 kW
elektrischer Wirkungsgrad <sup>(2)</sup>	38,7%	33%	40,4%	40,2%
thermischer Wirkungsgrad <sup>(2)</sup>	47,5%	52%	42,9%	43,3%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(2)</sup>	86,2%	85%	83,3%	83,5%

<sup>(1)</sup> Biogas, basierend auf ISO-Standardleistung bei Normbezugsbedingungen

<sup>(2)</sup> bei 100% Last

<sup>(3)</sup> Toleranz von +/- 8%; Abgaskühlung auf 180°C

Je nach Motorspezifikation gestalten sich die ermittelten Emissionswerte für die Jenbacher-Motoren grundsätzlich differenzierter (**Abbildungen 44** und **45** → Seiten 74 bzw. 75).

Für den 8-Zylinder-Reihenmotor kann zurzeit nur ein BHKW (**Abbildung 44** → Datenbanknummer „25“) betrachtet werden. Daher sind diese Werte zurzeit als nicht repräsentativ einzuordnen.

Auffallend sind die um **ca. (115...140)%-igen Formaldehydgrenzwertüberschreitungen** durch das BHKW mit der Datenbanknummer „26“. Es handelt sich um einen 12-Zylinder-V-Motor des Typs „**JMS 212 GS-B.L.**“. Bei den aufgetragenen Messwerten handelt es sich um je drei Messwerte, die am 24.04.2007 durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Radebeul bzw. am 13.02.2008 durch die Eurofins AUA GmbH Erfurt aufgenommen wurden. Diese Messungen wurden sowohl für den Teil- als auch den Volllastbetrieb realisiert. In der **Abbildung 44** wurde auf die Unterscheidung der Laststufen verzichtet, da die Überschreitungen bei beiden Betriebsanforderungen auftraten. In Auswertung dieser **Abbildung 44** fällt auf, dass sich innerhalb des Betriebszeitraumes von ca. 10 Monaten die gemessenen CO- bzw. NO<sub>x</sub>-Emissionen verbessert und die **Formaldehydemissionen verschlechtert** haben. In Auswertung mehrerer Datenblätter von Anlagen an denen GE Jenbacher-Motoren installiert sind, wird vermutet, dass der Inspektions- und Wartungszustand (z. B. Luftfilter, Zündzeitpunkt) von Bedeutung sein könnte.

Teilweise gegensätzlich stellen sich die Mess- und Analyseergebnisse für den 12-Zylinder-V-Motor (**JMS 312 ...**) mit zwei unterschiedlichen Unterspezifikationen dar (**Abbildung 45** → Seite 75). Den Datenblättern sowie Emissionsmessberichten ist nicht eindeutig zu entnehmen, ob und welche Unterspezifikationen (**Tabelle 12**) angewandt werden. Eine annähernd eindeutige Angabe (**JMS 312 GS-C221**) liegt für die Thüringer Anlage mit der Datenbanknummer „36“ vor. Für diese Anlage fällt insbesondere der **niedrige Formaldehydemissionswert (3,6 mg/m<sup>3</sup>)** auf. Da die Motortypbezeichnung von den für die BHKW mit den Datenbanknummern „27“ bis „35“ in den Datenblättern ausgefüllten Angabe (alle **JMS 312 GS-B.L. oder ...-B**) abweicht, könnte es sich evtl. um eine Weiterentwicklung handeln. Dieser Aspekt konnte auch im zweiten Bearbeitungszeitraum nicht eindeutig geklärt werden. Aus diesem Grunde erfolgte zunächst die Zuordnung und Darstellung in **Abbildung 45**. Der sehr niedrige Formaldehydemissionswert könnte evtl. im Zusammenhang mit der Trockenfermentation zu betrachten sein. Hierzu wurden für das BHKW „36“ einige Ausführungen in **Abschnitt 4.3.1** (S. 20 u. 21 → **Abbildung 7**) vorgenommen, wobei jedoch auf Grund zu geringer Datenbasis keine Repräsentativität gegeben ist.

Ausgenommen die BHKW mit den Datenbanknummern „33“, „34“ und „35“ wurden für die Übrigen sechs BHKW („27“ bis „32“), an denen je ein Motor „**JMS 312 GS-B.L.**“ installiert ist, HCHO-Emissionsüberschreitungen ermittelt. Besonders auffallend ist der Maximalwert für das BHKW mit der Datenbanknummer „27“ (**229,3 mg/m<sup>3</sup>**). Auch für dieses BHKW ist zu vermuten, dass der Wartungszustand von besonderem Interesse sein könnte. Im Rahmen der Projektlaufzeit war keine eindeutige Klärung hinsichtlich dieser These möglich. Daher wird vorgeschlagen, dieses BHKW in ggf. zukünftigen Betrachtungen erneut einzubeziehen.

Auch für das BHKW mit der Datenbanknummer „29“ sind Tendenzen hinsichtlich der **Verbesserung** von CO- bzw. NO<sub>x</sub>-Emissionen mit einhergehender **Verschlechterung** der **Formaldehydemissionen** zwischen zwei verschiedenen Messtagen (10. u. 31.01.2007) zu analysieren. U. a. resultierend aus diesen Emissionsmesswerten sowie der für den Motor **JMS 212 GS-B.L.** vorgestellten Analyseergebnisse könnte der Einfluss anderer Emissionsbestandteile auf die Formaldehydbildung interessant sein.

Für die GE Jenbacher-Motoren ist abschließend zu erwähnen, dass durch die Betreiber der BHKW mit den Datenbanknummern „109“ bis „111“ (vgl. **Anlage 6**) die jeweiligen Datenblätter für die entsprechenden Standorte vorliegen. Auf Grund zurzeit nicht verfügbarer Emissionswerte erfolgten hierfür jedoch keine Untersuchungen. Auch für die GE Jenbacher-Motoren bietet sich an, weitere BHKW, z. B. aus anderen Bundesländern, in zukünftige Untersuchungen einzubeziehen.

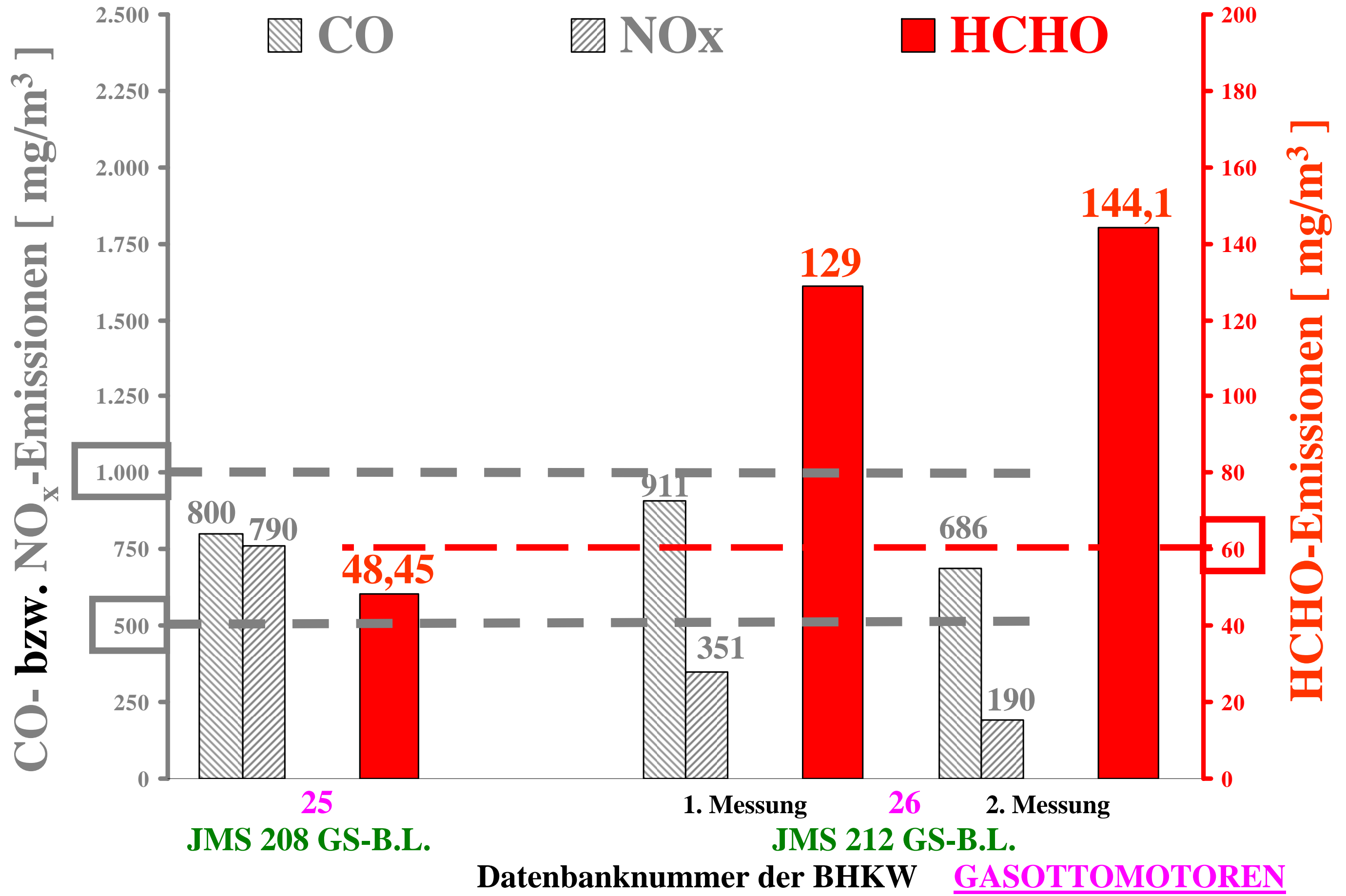
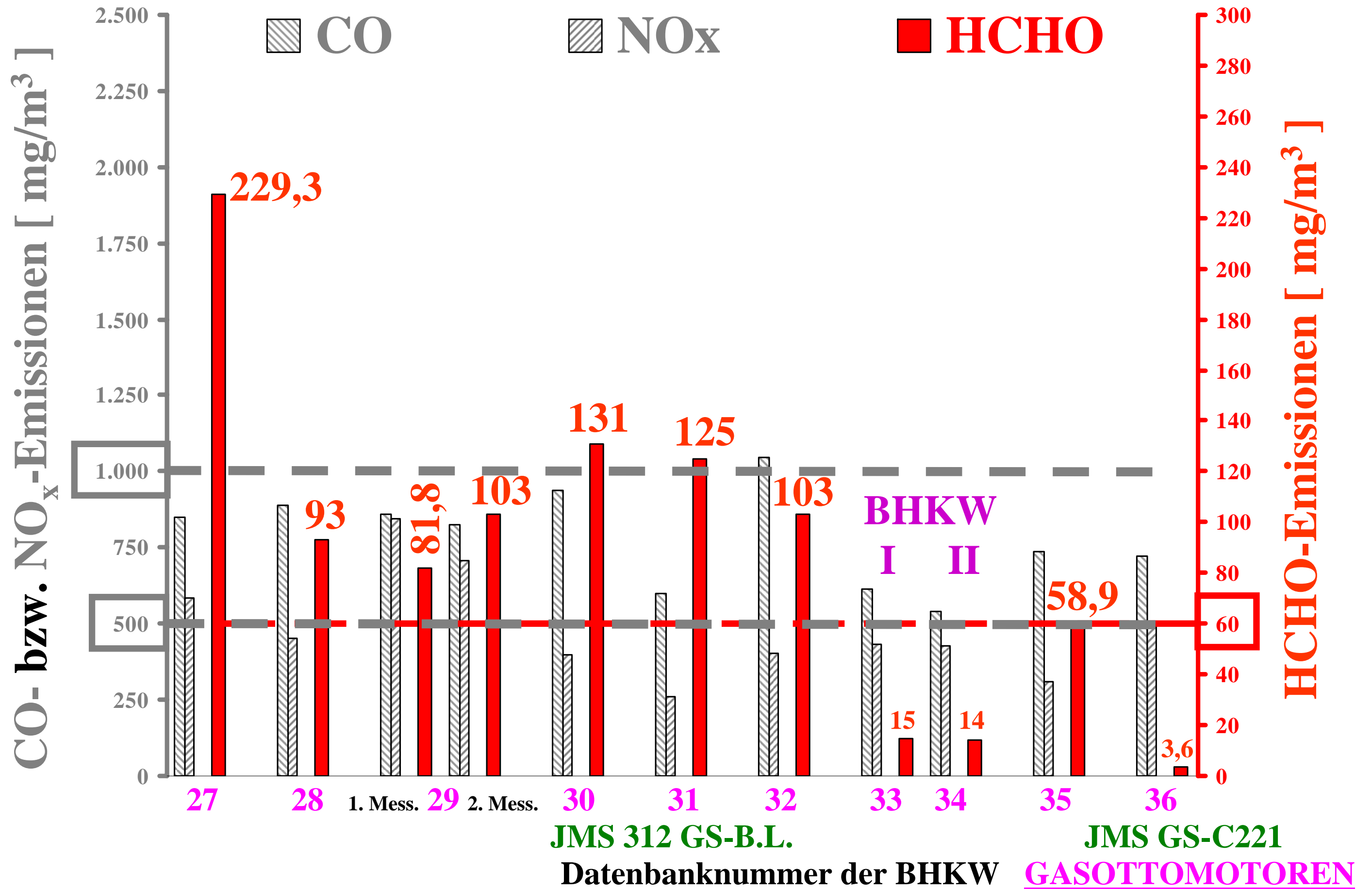


Abbildung 44: Abgasemissionen  **GE Jenbacher** -Motoren „Baureihe 2“ (8 Zyl. Reihe bzw. 12 Zyl., V-Form)



**Abbildung 45:** Abgasemissionen  **GE Jenbacher** -Motoren „Baureihe 3“ (12 Zylinder, V-Anordnung)

## 4.4.3.4

## Caterpillar-Motoren



In Auswertung der gegenwärtigen Datenbestandssituation sind für die Untersuchungen 12 BHKW an 10 verschiedenen sächsischen Standorten zu berücksichtigen. Dabei gelangen Auslegungen mit drei verschiedenen Spezifikationen zum Einsatz (**Tabelle 13**).

**Tabelle13:** Techn. Angaben zu berücksichtigender Caterpillar-Motorspezifikationen /39, 40/

Motortypbezeichnung	G 3406 TA	G 3408 TA	G 3412 TA
Arbeitsprinzip	GASOTTO		
Motorkonzept	Magermotor		
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung		
Gemischkühlung	1-stufig		
Zylinderanzahl	6	8	12
Zylinderanordnung	Reihe	V-Form	
Hubvolumen	14,6 l	17,9 l	26,9 l
Nenndrehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>		
elektrische Leistung <sup>(1), (2)</sup>	180 kW	230 kW	370 kW
Kühlwasserwärme <sup>(1), (2), (3)</sup>	158 kW	195 kW	262 kW
Abgaswärme bis 180°C <sup>(1), (2), (3)</sup>	81 kW	72 kW	119 kW
Nutzwärme gesamt <sup>(1), (2), (3)</sup>	239 kW	267 kW	381 kW
Brennstoffeinsatz (+/- 5%) <sup>(1), (2)</sup>	510 kW	633 kW	971 kW
elektr. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	35,3%	36,3%	38,1%
therm. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	46,9%	42,2%	39,2%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	82,2%	78,5%	77,3%

<sup>(1)</sup> für Biogas mit 60% CH<sub>4</sub>, 35% CO<sub>2</sub>, Rest N<sub>2</sub>, Mindestmethanzahl 80 und Mindestheizwert H<sub>u</sub> = 5,0 kWh/Nm<sup>3</sup>

<sup>(2)</sup> bei 100% Last

<sup>(3)</sup> +/- 8%

Für die in **Abbildung 46** dargestellten BHKW mit den Datenbanknummern „37“ bis „39“, „42“ und „48“ wird deutlich, dass die geforderten Kohlenmonoxid- und Stickoxidemissionswerte gemäß TA Luft an diesen drei Standorten erfüllt werden. Demgegenüber wurden die Formaldehydemissionswerte überwiegend als Überschreitungen des TA Luftgrenzwertes ermittelt. Eine Ausnahme stellt lediglich das BHKW „37“ dar, an dem der analysierte Wert knapp unter dem HCHO-Grenzwert liegt. Die Untersuchungsergebnisse sind für die Caterpillar-Spezifikationen „G 3406 TA“ (6 Zylinder, Reihe) sowie „G 3408 TA“ (8 Zylinder, V-Form) als nicht repräsentativ einzuordnen, da bisher nur ein bzw. zwei BHKW dieser Spezifikationen berücksichtigt werden konnten. Hinsichtlich der Caterpillar-Motoren gelangt überwiegend der 12 Zylinder-V-Motor „G 3412 TA“ (z. B. **Abbildung 47** → Seite 78) zur Anwendung.



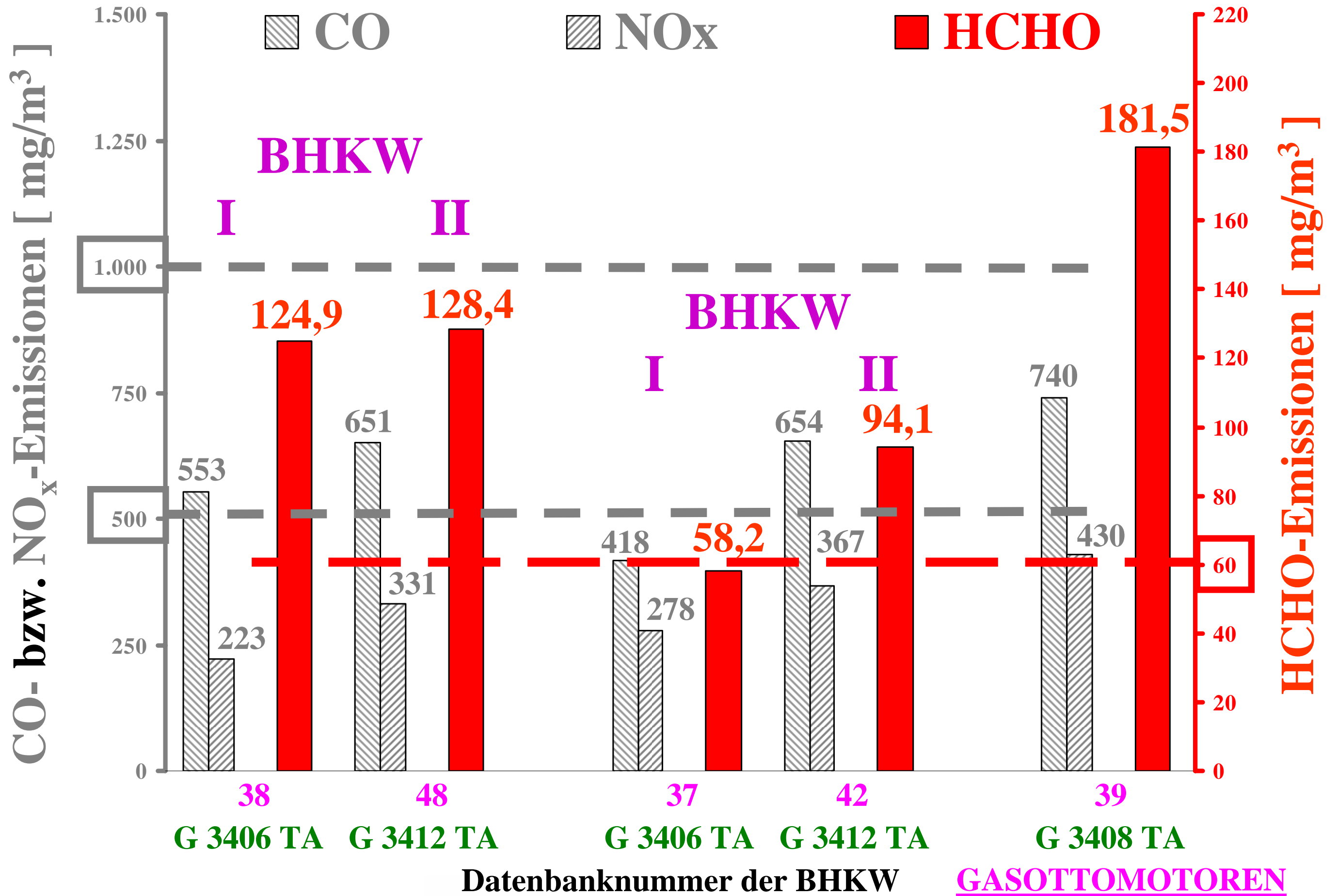



Abbildung 46: Abgasemissionen  -Motoren (6 Zyl. Reihe u. 8 bzw. 12 Zyl. V-Form, 3 Standorte)



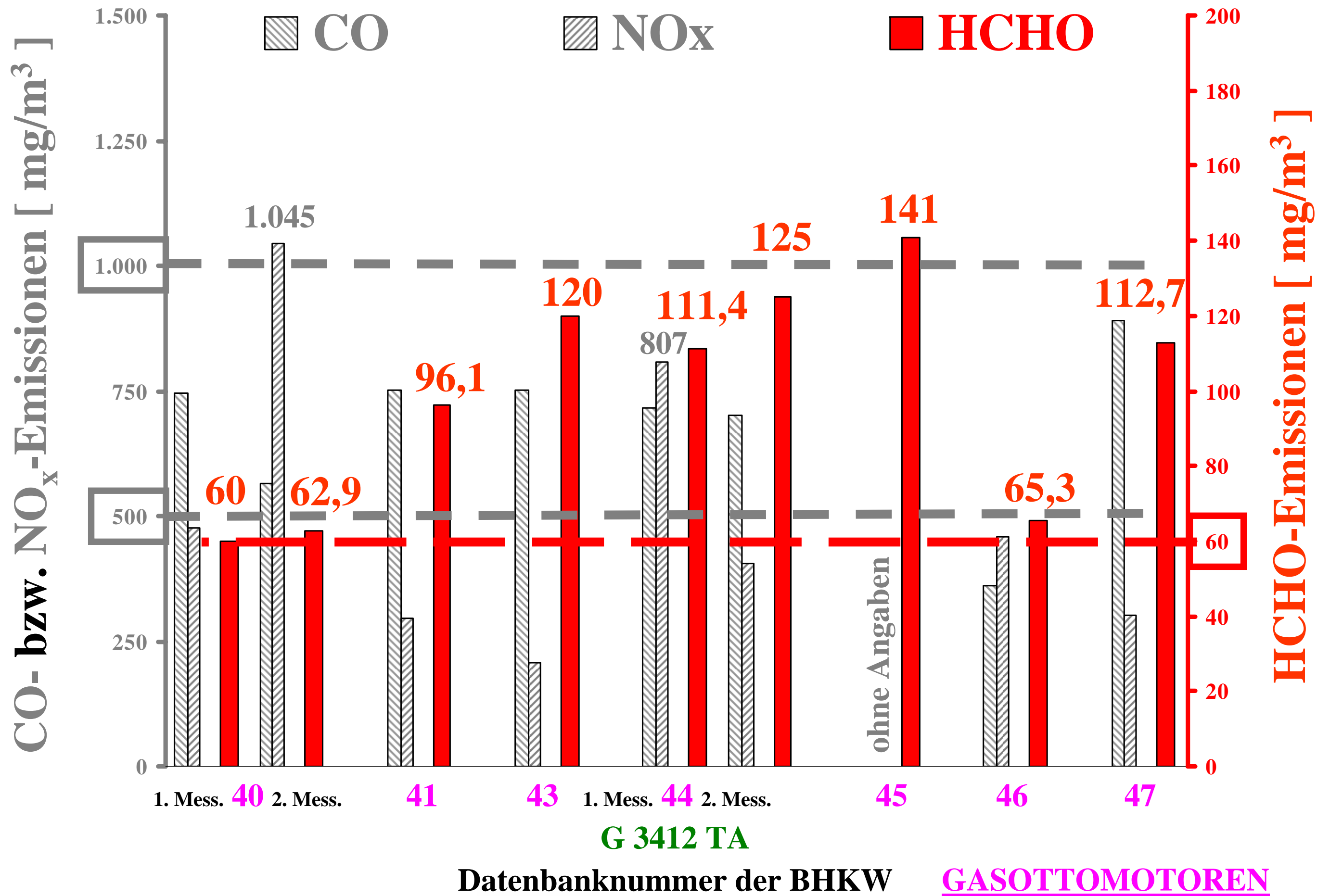
**Abbildung 47:** Biogas-BHKW „Caterpillar G 3412 TA“ der Agrargenossenschaft e. G. Hainichen-Pappendorf

In der **Abbildung 48** sind die gemessenen Maximalwerte für **CO** und **NO<sub>x</sub>** sowie die aus der jeweiligen Probenahme analysierten maximalen **HCHO-Werte** für je ein BHKW an 7 Standorten dargestellt. Besonders auffallend sind die **NO<sub>x</sub>-Grenzwertüberschreitungen** bei der 2. Messung am BHKW „40“ ( $1.045 \text{ mg/m}^3$ ) bzw. bei der 1. Messung am BHKW „44“ ( $807 \text{ mg/m}^3$ ). Außerdem wird ersichtlich, dass **überwiegend Formaldehydgrenzwertüberschreitungen** an allen Standorten festgestellt wurden, wobei diese für die BHKW „40“ bzw. „46“ als **geringfügige Überschreitungen** zu bewerten sind.

In Auswertung der Untersuchungsergebnisse für die Caterpillar-Spezifikationen wird zunächst eine Maßnahme hinsichtlich der Minderung von Formaldehydemissionen vorgeschlagen.

⇒ Installation einer zusätzlichen Entschwefelungsanlage (z. B. Aktivkohlefilter) und von Oxydationskatalysatoren am Standort mit den BHKW „38“ (**G 3406 TA**) und „48“ (**G 3412 TA**) → sh. und vgl. **Abschnitt 5 „Maßnahmenvorschläge ... BHKW“**, Seite 109 (**Tabelle 23**)

Für die BHKW mit den Datenbanknummern „112“ und „113“, die sich an zwei verschiedenen sächsischen Standorten befinden, sind Datenblätter beim Auftragnehmer eingegangen. Bisher liegen jedoch keine Emissionswerte vor. Dementsprechend wurden diese noch nicht berücksichtigt. Sofern demnächst Daten eingehen, werden diese in ggf. zukünftigen Betrachtungen berücksichtigt.



**Abbildung 48:** Abgasemissionen -Motoren (12 Zylinder, V-Anordnung, 7 Standorte)

#### 4.4.3.5

### MWM-Motoren (DEUTZ Power Systems-Motoren *DEUTZ POWER SYSTEMS*)

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

Hinsichtlich der MWM-Motoren sind zurzeit die Baureihen 616, 2015 und 2016 zu berücksichtigen. Insgesamt werden 18 BHKW mit fünf verschiedenen Spezifikationen an 16 sächsischen und 2 thüringischen Standorten unterhalten. Die **Tabelle 14** zeigt die technischen Angaben der Spezifikationen „TCG 2015 V6“, „TCG 2016 V12“ und „TCG 2016 V16“. An den in dieser Studie zu berücksichtigenden Anlagenstandorten ist überwiegend der „TCG 2016 V12“ (12 BHKW) installiert. Die anderen Spezifikationen sind an je einen bzw. maximal zwei Standorten anzutreffen (**Abbildungen 49** (S. 82), **50** (S. 83) und **52** (S. 85)).

**Tabelle 14:** Technische Angaben ausgewählter MWM-Motorspezifikationen /41/

Motortyp- bezeichnung	TCG 2015 V6	TCG 2016 V12	TCG 2016 V16
Arbeitsprinzip	<b>GASOTTO</b>		
Motorkonzept	Magermotor		
Aufladung	Abgasturbolader		
Gemischkühlung	1-stufig		
Zylinderanzahl	6	8	12
Zylinderanordnung	V-Form		
Hubvolumen	11,9 l	26,3 l	35 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>		
elektrische Leistung <sup>(1)</sup>	171 kW	537 kW	716 kW
Kühlwasserwärme (+/- 8%) <sup>(1)</sup>	172 kW	210 kW	278 kW
Abgaswärme bis 120°C (+/- 8%) <sup>(1)</sup>	100 kW	-	-
Abgaswärme bis 150°C (+/- 8%) <sup>(1)</sup>	91 kW	321 kW	428 kW
Brennstoffeinsatz (+5%) <sup>(1)</sup>	492 kW	1.341 kW	1.777 kW
elektr. Wirkungsgrad <sup>(1)</sup>	34,8%	40%	40,3%
therm. Wirkungsgrad <sup>(1)</sup>	55,3%	39,6%	39,7%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(1)</sup>	90,1%	79,6%	80%

<sup>(1)</sup> für Biogas mit 60% CH<sub>4</sub>, 32% CO<sub>2</sub>, Rest N<sub>2</sub> und Mindestheizwert H<sub>u</sub> = 5,0 kWh/Nm<sup>3</sup>



Aus den **Abbildungen 49 bis 52** lassen sich einige grundlegende Tendenzen für die zurzeit zu berücksichtigenden Standorte mit MWM-Motoren analysieren. So ist beispielsweise in diesen Abbildungen auffallend, dass an allen 18 vermessenen Biogas-BHKW (Datenbanknummern 49. bis 66.) die TA Luftgrenzwerte für CO u. NO<sub>x</sub> überwiegend eingehalten wurden. Demgegenüber stellen sich die analysierten **HCHO-Werte je nach Spezifikation unterschiedlich** dar.

In der **Abbildung 49** sind die maximal gemessenen bzw. analysierten CO-, NO<sub>x</sub>- und **HCHO-Emissionen** für die Motorspezifikationen „**TBG 616 V12**“ und „**TBG 616 V16 K**“ dargestellt. In Auswertung einer Internetrecherche für diese beiden Motoren ist neben der Zylinderanzahl (12 bzw. 16) auf zwei evtl. nennenswerte Spezifikationsunterschiede hinzuweisen. Der „**TBG 616 V12**“ ist mit Kammer-Zündkerze und der „**TBG 616 V16 K**“ mit Standard-Zündkerze ausgestattet, was evtl. auch unterschiedliche Verbrennungsprozesse hinsichtlich der Entzündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches und der Bildung der Flammenfront zur Folge haben könnte. Ein weiterer Spezifikationsunterschied ist in der Einkreiskühlung für den „**TBG 616 V12**“ und der Zweikreiskühlung für den „**TBG 616 V16 K**“ begründet. Für diese beiden BHKW-Spezifikationen ist zurzeit keine Repräsentativität gegeben, da es sich um nur einen bzw. zwei Standorte handelt, an denen diese MWM-Motoren betrieben werden. Auffallend ist jedoch der **hohe HCHO-Wert vor der Wartung** an BHKW „**51**“. In Auswertung der **HCHO-Werte vor und nach der Wartung** für das BHKW „**51**“ wird eingeschätzt, dass der Wartungszustand einen nicht unbedeutenden Einfluss auf die Motorprozesse und die evtl. daraus resultierenden Formaldehydbildungen ausüben könnte. Zwecks Gewährleistung der Ergebnisrepräsentativität für diese Spezifikationen erscheint die Einbeziehung weiterer BHKW dieses Motortyps, z. B. aus anderen Bundesländern, grundsätzlich sinnvoll.

Der 6 Zylinder-V-Motor „**TCG 2015 V6**“ (**Abbildung 50**) stellt ein gutes Beispiel für die Untersuchung zu den Lastanforderungen dar. Für diese BHKW-Spezifikation sind keine wesentlichen Emissionsunterschiede bei Lastreduzierung festzustellen. Während sich die gemessenen CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen sowohl für Voll- als auch für Teillastbetrieb auf annähernd gleichem Niveau bewegen, stellen sich die **HCHO-Werte** etwas differenzierter dar. Die **HCHO-Grenzwertüberschreitungen** liegen im Teillastbereich bei ca. 1% und bei Volllast zwischen (6,5...22)%. Evtl. Maßnahmen zur Minderung von HCHO-Emissionen an Biogas-BHKW infolge Leistungsminderung sind zumindest für dieses Beispiel nicht zu formulieren.

Wie die **Abbildung 51** veranschaulicht sind für die BHKW-Spezifikation „**TCG 2016 V12**“ an allen zu berücksichtigenden 12 Anlagen HCHO-Grenzwertüberschreitungen analysiert worden. Für 10 BHKW liegen diese Überschreitungen im Bereich zwischen (51...129,4) mg/m<sup>3</sup>. **Geringfügige Grenzwertüberschreitungen** sind für die BHKW „**62**“ und „**63**“ ersichtlich. Eine Begründung für die Abweichung gegenüber den anderen 10 BHKW („**53**“ bis „**61**“ und „**64**“) kann im Rahmen dieser Studie nicht formuliert werden. Evtl. könnten die jeweiligen Wartungszustände von Bedeutung sein. Hinsichtlich der Biogaserzeugungsprozesse wurden keine nennenswerten Auffälligkeiten festgestellt. Für diese BHKW-Spezifikation „**TCG 2016 V12**“ wird durch die MWM Motoren-Werke Mannheim GmbH ein „Formaldehydpaket EuroTier 2008“ in zwei Paketvarianten angeboten. Es wird empfohlen, dieses zumindest am Standort mit dem BHKW „**61**“ zu installieren und den daraus resultierenden Praxis Einsatz zu begleiten.

Die **Abbildung 52** zeigt die Maximalwerte der ermittelten CO-, NO<sub>x</sub>- und **HCHO-Emissionen** für die MWM-Spezifikation „**TCG 2016 V16**“ für die BHKW „**65**“ und „**66**“. Auch für diesen Ist-Zustand ist keine Ergebnisrepräsentativität gegeben. Um die Ergebnis-sicherheit zu erhöhen, sollten in zukünftigen Projekten weitere BHKW dieser Spezifikation Berücksichtigung finden.



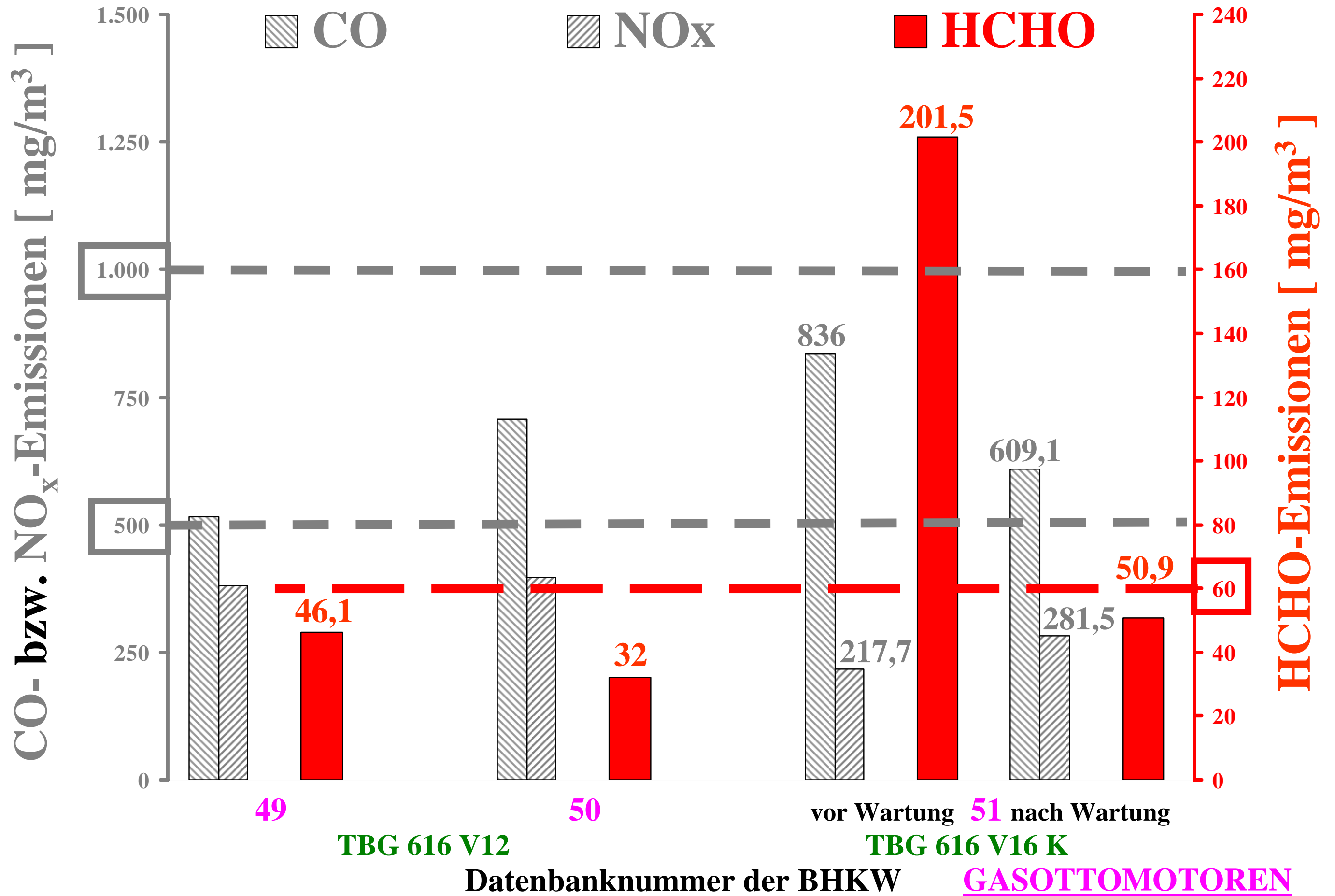
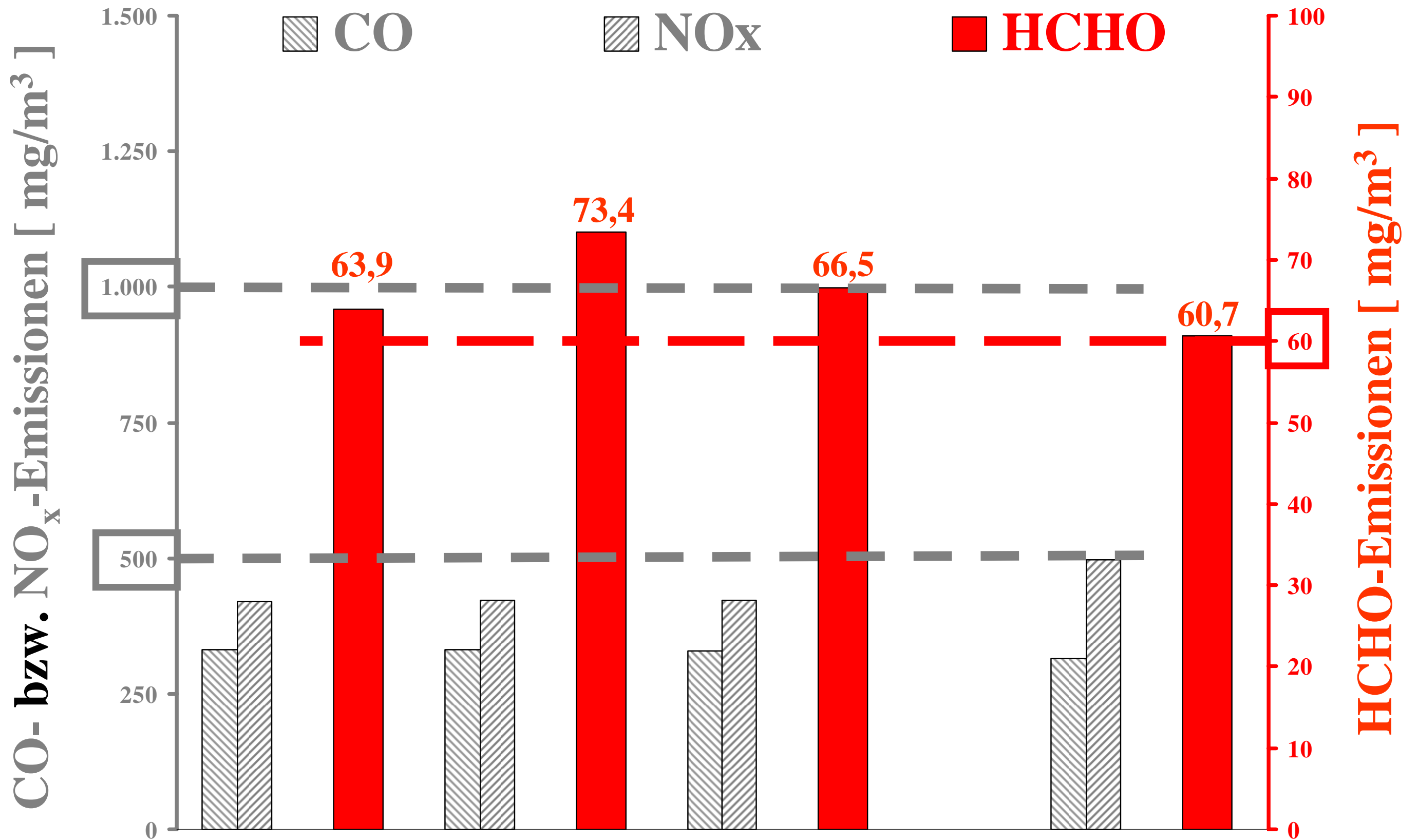


Abbildung 49: Abgasemissionen **MWM DEUTZ POWER SYSTEMS**-Motoren (Baureihe 616 → 12 bzw. 16 Zyl., V) GASOTTOMOTOREN



**Vollast: 170 kW (P<sub>elektr.</sub>)**

**Teillast: 104 kW (P<sub>elektr.</sub>)**

**Vollast**

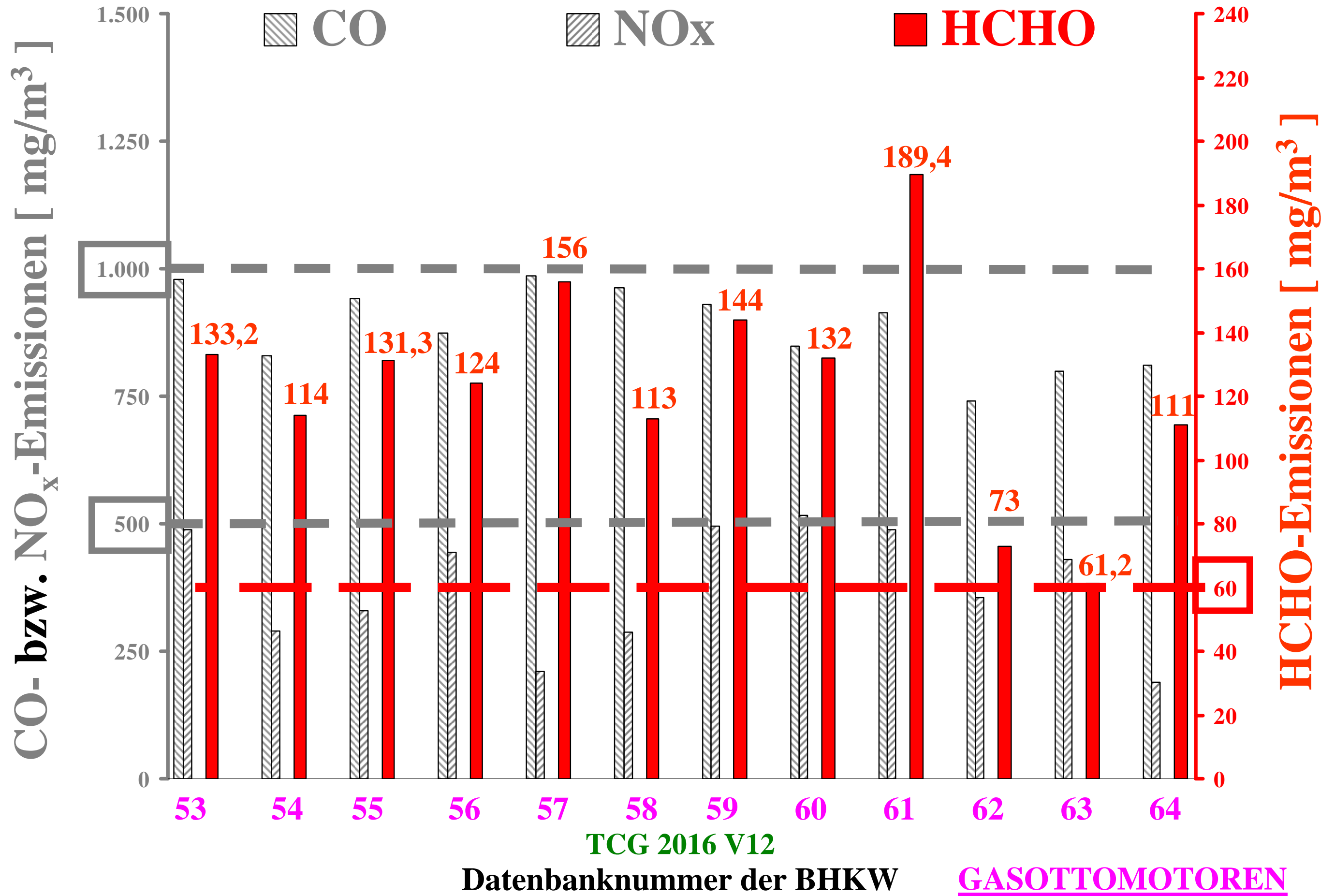
**52 → TCG 2015 V6**

**Datenbanknummer der BHKW**

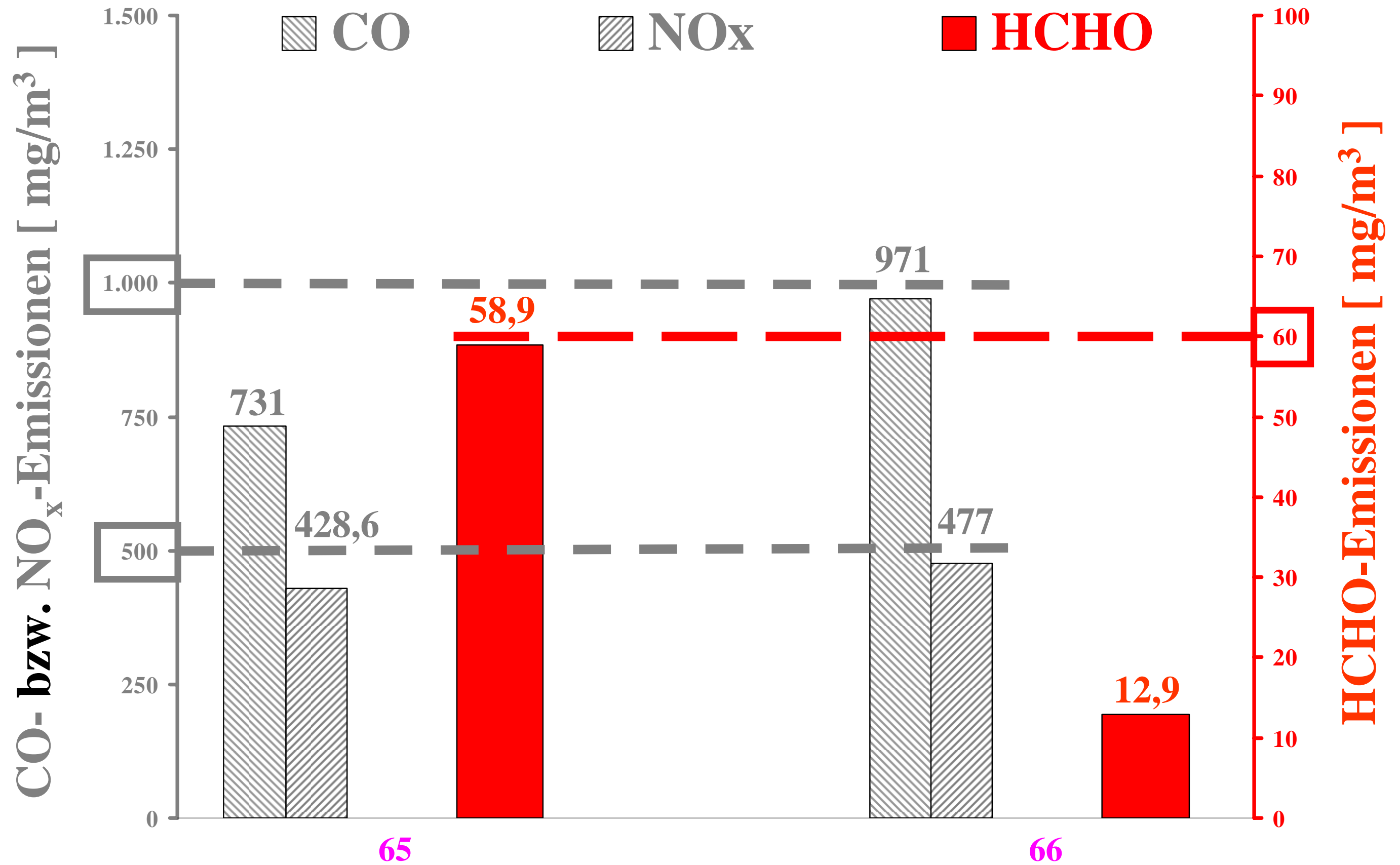
**Teillast**

**GASOTTOMOTOR**

**Abbildung 50: Abgasemissionen**  **DEUTZ POWER SYSTEMS**-Motoren (**Baureihe 2015 → 6 Zyl., V**)



**Abbildung 51:** Abgasemissionen  **DEUTZ POWER SYSTEMS**-Motoren (**Baureihe 2016** → **12 Zyl., V**)



**TCG 2016 V16**

**Datenbanknummer der BHKW**

**GASOTTOMOTOREN**

**Abbildung 52:** Abgasemissionen **MWM DEUTZ POWER SYSTEMS**-Motoren (**Baureihe 2016** → **16 Zyl., V**)

#### 4.4.3.6 Tedom Motory-Motoren



LIAZ war einer insbesondere in der DDR und in den osteuropäischen Ländern sehr bekannter und erfolgreicher Nutzfahrzeughersteller aus der ehemaligen CSSR. Beispielhaft sind Busse und Abfallsammelfahrzeuge, die mit den verschiedensten Aufbauten ausgerüstet wurden, zu nennen. Tedom Motory ist ein Unternehmen, das zur TEDOMTRUCK s.r.o. mit Hauptsitz in Jablonec nad Nisou (Tschechien) gehört. Dieses hat sich aus LIAZ gegründet. U. a. auch dadurch verfügt Tedom Motory über umfangreiche und vielfältige Erfahrungen im Bereich der Motorenentwicklung und -herstellung. Zum gegenwärtigen Produktfolio gehören sowohl Nutzfahrzeug- als auch Industriemotoren. Für die nachfolgenden Untersuchungen waren die beiden BHKW „67“ und „68“, die sich an einem Standort in Sachsen befinden, zu betrachten (**Abbildung 53**). Hinsichtlich der installierten Motoren sind dem durch den Betreiber übermittelten Datenblatt bzw. dem durch das LfULG zur Verfügung gestellten Emissionsmessbericht widersprüchliche Angaben zu entnehmen. Im Ergebnis einer Internetrecherche ist die im Datenblatt angegebene Motortypbezeichnung „TGE 1242 W“ nicht auffindbar. Aus diesem Grunde wurde unterstellt, dass es sich um den laut Emissionsmessbericht angegebenen Motor „**TB 158 GV TW 86**“ handelt. Die für diesen Motor laut Hersteller verfügbaren Technischen Angaben zeigt die **Tabelle 15**.

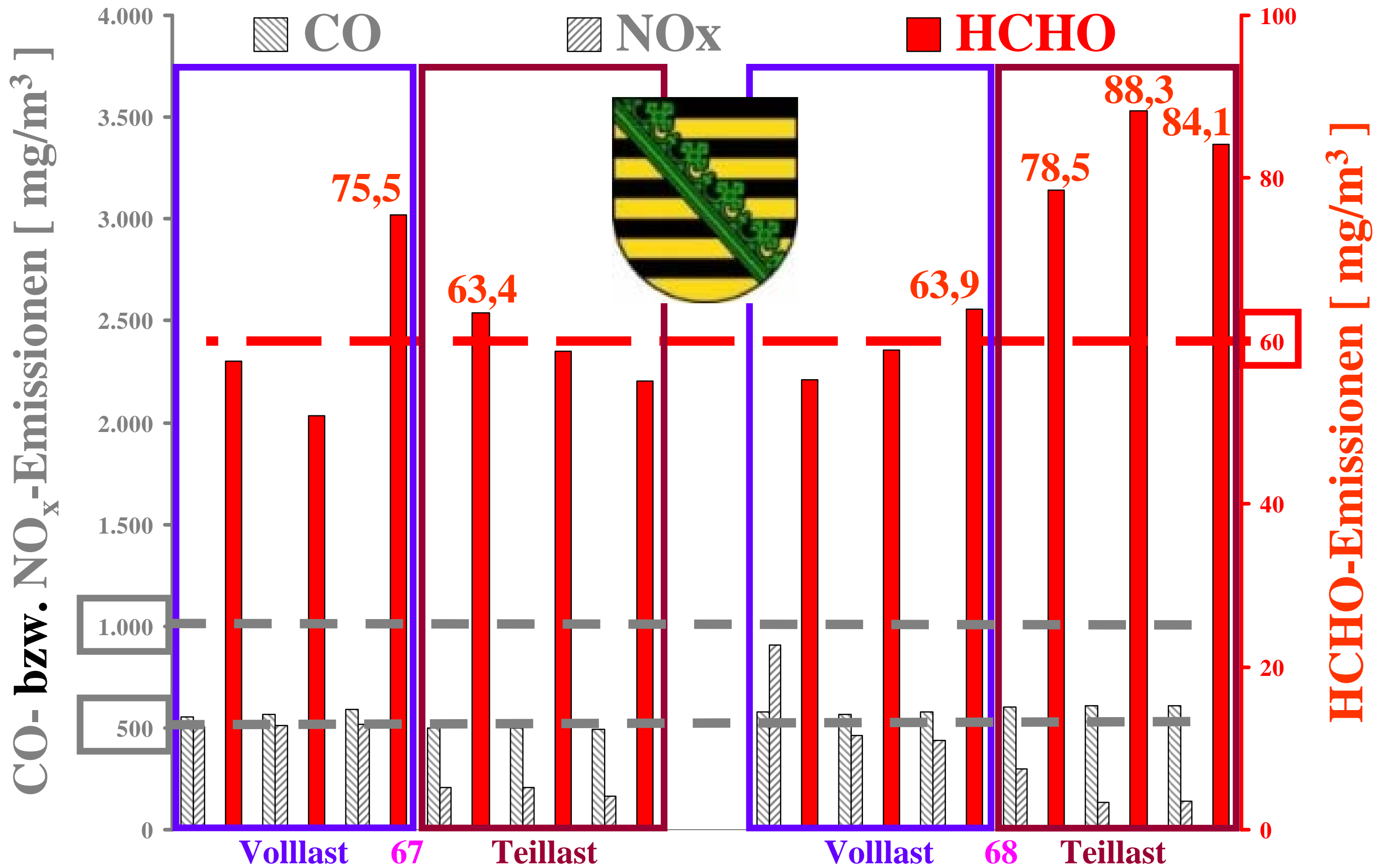
**Tabelle 15:** Techn. Angaben zu berücksichtigender Tedom Motory-Motorspezifikation /42/

Motortypbezeichnung	<b>TB 158 TV GW 86</b>
Arbeitsprinzip	<b>GASOTTO</b>
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung
Zylinderanzahl	6
Zylinderanordnung	Reihe
Hubvolumen	11,946 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>
elektrische Leistung <sup>(1)</sup>	158 kW

<sup>(1)</sup> für Biogas mit 65% CH<sub>4</sub> (Temperatur 0°C, Luftdruck 101,325 kPa)

Die Messreihen der am 08. und 09.05.2007 durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Radebeul für die BHKW mit der Datenbanknummern „67“ und „68“ durchgeführten Emissionsmessungen sind in **Abbildung 53** ersichtlich. Aus Darstellungsgründen bot sich an, auch eine Betrachtung unter Berücksichtigung der Lastanforderungen für beide BHKW vorzunehmen. Dementsprechend wurde bei der Messreihendarstellung in Teil- und Volllast unterschieden. Hierbei stellen sich für die beiden Tedom Motory-BHKW gegensätzliche Tendenzen dar. Bei Minderung der Leistungsanforderungen (Volllast → Teillast) wurden beim BHKW I („67“) geringfügig niedrigere und beim BHKW II („68“) annähernd gleich bleibende CO-Emissionen gemessen. Hinsichtlich der NO<sub>x</sub>-Emissionen sind bei Leistungs-minderung für beide BHKW grundsätzlich niedrigere Emissionswerte erkennbar. Bei **Formaldehyd** wurden bei Laständerung (Volllast → Teillast) für BHKW I („67“) tendenzielle Abnahmen und bei BHKW II („68“) grundsätzliche Erhöhungen ermittelt. Da es sich um nur zwei BHKW an einem Standort handelt, sind die Ergebnisse zurzeit als nicht repräsentativ einzustufen.





**Vollast: 151 kW (P<sub>elektr.</sub>) BHKW I**

**TB 158 GV TW 86**

**BHKW II**

**Teillast: 80 kW (P<sub>elektr.</sub>)**

**Datenbanknummer der BHKW**

**GASOTTOMOTOREN**

**Abbildung 53: Abgasemissionen**



**-Motoren (6 Zyl. Reihe, Turbolader mit Ladeluftkühlung)**

#### 4.4.3.7 Liebherr-Motoren **LIEBHERR**

Die bisherige Datenerfassung hinsichtlich eingesetzter Liebherr-Motoren bezieht sich ausschließlich auf im Freistaat Thüringen installierte Biogasanlagen („69“ und „70“ → **Abbildung 54**, „122“ bis „125“ → **Anlage 6**). Dabei handelt es sich um zwei verschiedene Motorspezifikationen, die wiederum insgesamt vier voneinander abweichende Unterspezifikationen aufweisen. Für die BHKW mit den Datenbanknummern „122“ bis „125“ liegen zurzeit keine Angaben zu den Formaldehydemissionswerten vor, so dass für diese keine weiteren Betrachtungen vorgenommen wurden. Die BHKW mit den Datenbanknummern „69“ und „70“ befinden sich am gleichen Standort und sind mit der Motorspezifikation „**G 926 TI**“ konfiguriert. Gemäß Internetrecherchen handelt es sich um einen Liebherr-Basisdieselmotor, der durch spezielle Unternehmen, wie z. B. Senergie GmbH Heitersheim oder enertec – Kraftwerke GmbH Mühlhausen, auf das Gas-Otto-Verfahren umfunktioniert und für den Biogasbetrieb angepasst wird. Die bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt für diesen Motor verfügbaren Technischen Angaben sind in der **Tabelle 16** aufgeführt.

**Tabelle 16:** Technische Angaben zu berücksichtigender Liebherr-Motorspezifikation /43, 44/

<b>Motortypbezeichnung</b>	<b>G 926 TI</b>
<b>Arbeitsprinzip</b>	<b>GASOTTO</b>
<b>Motorkonzept</b>	Magermotor
<b>Aufladung</b>	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung
<b>Gemischkühlung</b>	kühlwasserkreisintegriert
<b>Zylinderanzahl</b>	6
<b>Zylinderanordnung</b>	Reihe
<b>Hubvolumen</b>	9,96 l
<b>Nenn Drehzahl</b>	1.500 min <sup>-1</sup>
<b>elektrische Leistung</b> <sup>(1)</sup>	125 kW
<b>thermische Leistung</b> <sup>(1), (2)</sup>	184 kW
<b>Brennstoffleistung</b> <sup>(1), (3)</sup>	356 kW
<b>elektrischer Wirkungsgrad</b> <sup>(1)</sup>	35,1%

<sup>(1)</sup> Biogas mit  $H_u = 5,33 \text{ kWh/Nm}^3$     <sup>(2)</sup> Abgastemperatur = 180°C    <sup>(3)</sup> Toleranz +5%

An beiden BHKW (Datenbanknummern „69“ und „70“) wurden am 08.02.2007 durch die Eurofins AUA GmbH Erfurt Emissionsmessungen durchgeführt (**Abbildung 54**). Auf Grund des geringen Datenbestandes für diesen Motor können zurzeit keine nennenswerten Tendenzen formuliert werden. Auffallend sind jedoch die grundsätzlich gegensätzlichen **Formaldehydemissionsmesswerte** beider BHKW bei annähernd gleichen CO- bzw. NO<sub>x</sub>-Emissionen. Zwecks Durchführung weiterer Untersuchungen ist die Einbeziehung weiterer Biogasanlagen, die mit Liebherr-Motoren ausgestattet sind, unerlässlich. Hierbei sollten auch Emissionsmessberichte für die in der **Anlage 6** genannten BHKW mit den Datenbanknummern „122“, „123“ (mit Oxydationskatalysator), „124“ und „125“ einsehbar werden.

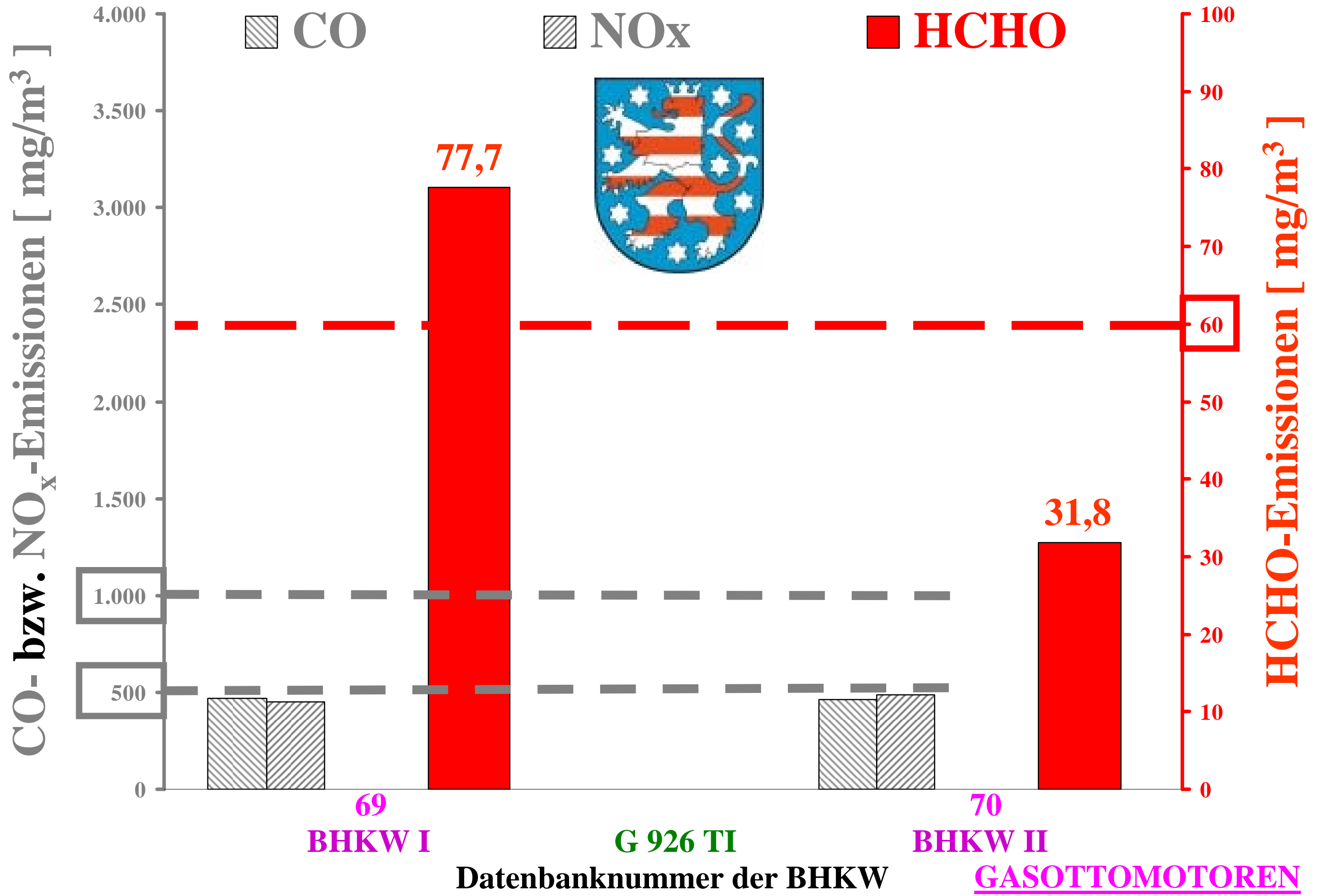


Abbildung 54: Abgasemissionen **LIEBHERR**-Motor (6 Zylinder-Reihenmotor mit Turboaufladung)

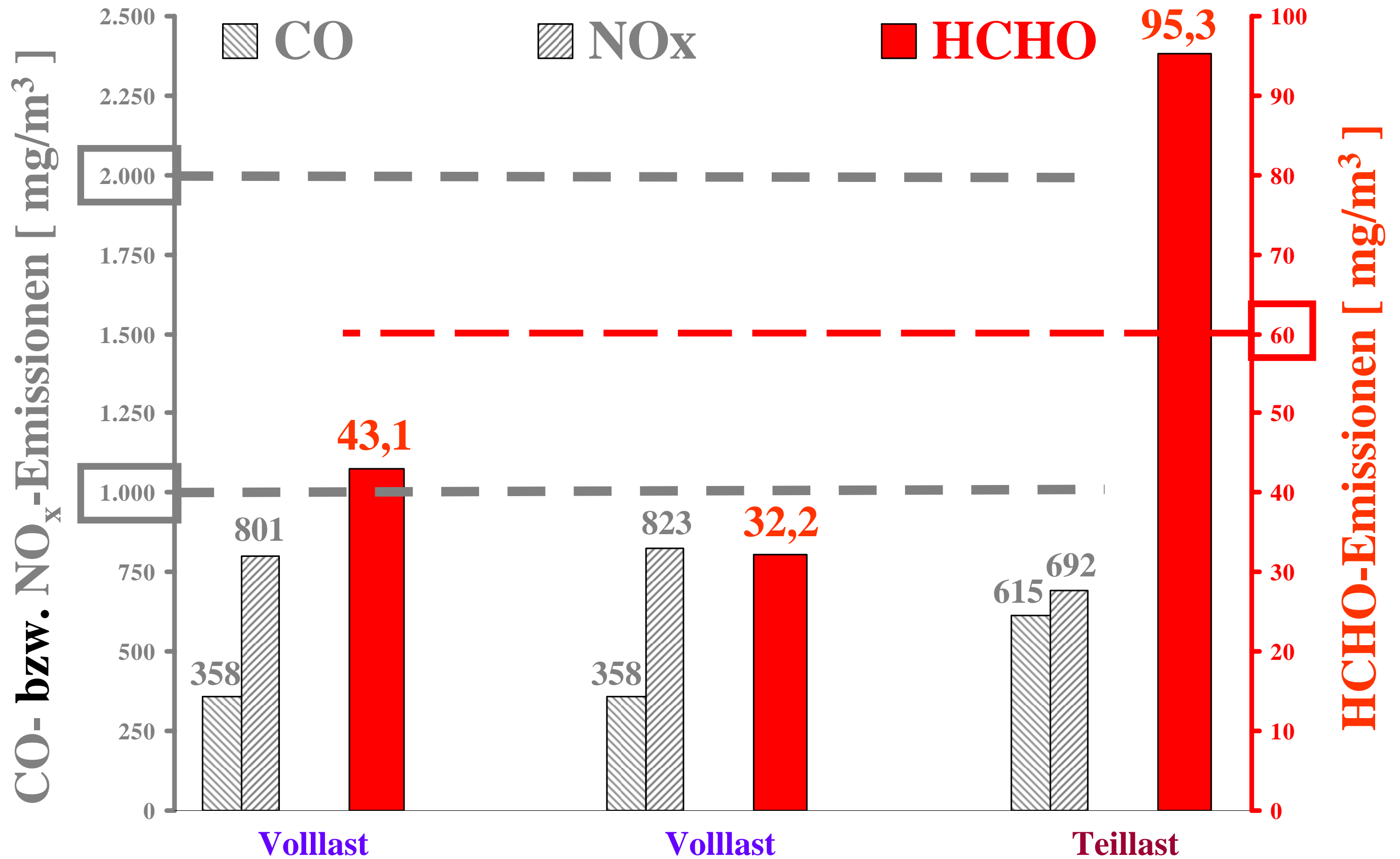
#### 4.4.3.8

#### MAN-Zündstrahlmotor



In die Untersuchungen ist zurzeit ein Zündstrahlmotor des Motorenherstellers MAN Nutzfahrzeuge AG vom Typ „D 2842 LE 20212“ einzubeziehen. Dabei handelt es sich um einen Basisdieselmotor, der durch ein spezielles Maschinen- und Anlagenbauunternehmen auf das Zündstrahlprinzip für die Verbrennung des Kraftstoffes „Biogas“ angepasst wurde. Gegenwärtig liegen keine ausführlichen technischen Angaben für diesen Motor vor. Aus diesem Grunde wurde auch keine Tabelle erstellt. Die zurzeit verfügbaren Informationen zu dieser Motorspezifikation wurden mit in die **Abbildung 55** aufgenommen.

Auch für dieses BHKW mit der Datenbanknummer „11“ bot sich die Darstellung der gemessenen **CO-** und **NO<sub>x</sub>-Emissionen** sowie der analysierten **Formaldehydemissionswerte** mit entsprechender Betrachtung hinsichtlich der Lastanforderungen (Volllast, Teillast) an. Die entsprechenden Werte sind in der **Abbildung 55** ersichtlich. Für Volllastbetrieb sind je zwei Maximalwerte und für Teillastbetrieb je ein Maximalwert der gemessenen Emissionsbestandteile **CO** und **NO<sub>x</sub>** bzw. der analysierten **Formaldehydemissionen** aufgetragen. Eine Auffälligkeit besteht in dem **sehr hohen Formaldehydwert** bei Teillastbetrieb im Vergleich zu den beiden **HCHO-Werten** bei Volllastbetrieb. Die TA Luftgrenzwerte für **CO** und **NO<sub>x</sub>** werden bei beiden Lastprofilen grundsätzlich erfüllt. Im Volllastbetrieb sind **CO-** bzw. **NO<sub>x</sub>-Werte** ersichtlich, die sich auf gleichem (CO) bzw. annähernd gleichem (NO<sub>x</sub>) Niveau bewegen. Im Vergleich dazu wurden bei der Reduzierung von Volllast auf ca. 85% Teillastbetrieb höhere **CO-** und niedrigere NO<sub>x</sub>-Emissionen gemessen. Ein direkter Zusammenhang zwischen den Emissionsbestandteilen **CO** und **NO<sub>x</sub>** sowie dem gegenüber Volllastbetrieb erhöhten **Formaldehydwert** kann aufgrund zu geringer Datenbasis nicht herausgearbeitet werden. Die Emissionen dieses BHKW mit der Datenbanknummer „11“ sollten fortführend im Rahmen der turnusmäßig vorgeschriebenen Messungen beobachtet werden.



**Vollast: 262 kW (P<sub>elektr.</sub>)**

**Teillast: 221 kW (P<sub>elektr.</sub>)**

**Datenbanknummer des BHKW**

**ZÜNDSTRAHLMOTOR**

**Abbildung 55: Abgasemissionen**  **-Motor „D 2842 LE 20212“ (12 Zylinder, V-Anordnung)**

#### 4.4.3.9 Deutz-Motoren



In dieser Studie sind 13 BHKW, die sich an 9 Standorten in Sachsen befinden, zu untersuchen. An diesen Standorten erfolgten Auslegungen in drei verschiedenen Deutz-Motorspezifikationen. Die jeweiligen technischen Angaben für diese drei Spezifikationen sind in der **Tabelle 17** ersichtlich. In den vorliegenden Unterlagen (Datenblätter, Emissionsmessberichte) wurden voneinander abweichende Angaben getätigt. Zwecks Vereinheitlichung war ein Datenabgleich mit Angaben des Motorenherstellers bzw. von Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, die eine Anpassung auf das Zündstrahlverfahren vornehmen, notwendig. Daraus resultierend sind in dieser **Tabelle 17** überwiegend die Daten des Herstellers bzw. dieser Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, angegeben.

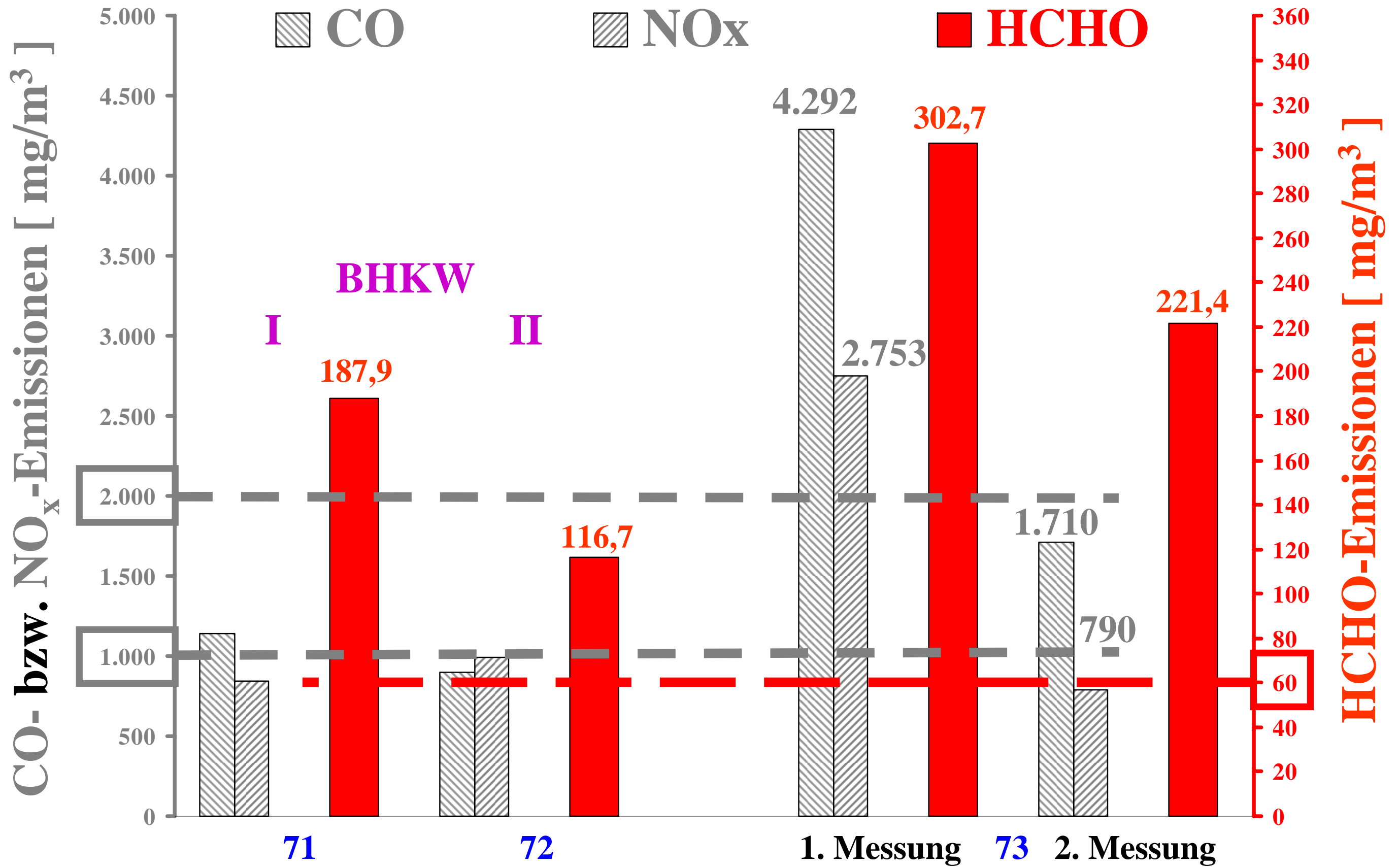
**Tabelle 17:** Technische Angaben zu berücksichtigender Deutz-Motorspezifikationen /45, 46/

Motortyp- bezeichnung	BF6M 1015C	BF6M 1013EC	BF8M 1015C
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL		
Motorkonzept	Magermotor		
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung		
Gemischkühlung	1-stufig		
Zylinderanzahl	6		8
Zylinderanordnung	V-Form	Reihe	V-Form
Hubvolumen	11,906 l	7,146 l	15,9 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>		
elektrische Leistung <sup>(1), (2)</sup>	190 kW	139 kW	280 kW
Kühlwasserwärme <sup>(1), (2), (3)</sup>	92 kW	<b>zurzeit keine Angaben verfügbar</b>	118 kW
Abgaswärme bis 150°C <sup>(1), (2), (3)</sup>	96 kW		140 kW
Nutzwärme gesamt <sup>(1), (2), (3)</sup>	188 kW		267 kW
Brennstoffeinsatz (+5%) <sup>(1), (2)</sup>	465 kW		668 kW
elektr. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	40,9%		41,9%
therm. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	40,4%		40%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	81,3%		81,9%
Zündölverbrauch <sup>(1), (2)</sup> (Biodiesel)	3 l/h		

<sup>(1)</sup> für Biogas mit 55% CH<sub>4</sub>, 42% CO<sub>2</sub>, Rest N<sub>2</sub>, Mindestmethanzahl 80 und Mindestheizwert H<sub>u</sub> = 5,0 kWh/Nm<sup>3</sup> <sup>(2)</sup> bei 100% Last <sup>(3)</sup> +/- 8%

Die Auswertung des Datenbestandes sowie die Internet- und Literaturrecherchen lassen die Schlussfolgerung zu, dass die zu berücksichtigenden Zündstrahl-BHKW ursprünglich Basisdieselmotoren waren, welche durch spezielle Firmen an den Biogasbetrieb angepasst wurden. Die **Abbildungen 56, 57 und 58** veranschaulichen, dass der **HCHO-TA Luftgrenzwert** durch den überwiegenden Teil der zu berücksichtigenden Biogas-BHKW überschritten wurde. Die einzige Ausnahme stellt das BHKW III (Datenbanknummer „82“ → **Abbildung 57**) dar. Für die Deutz-BHKW wird vorgeschlagen, zunächst an einem Standort (z. B. „80“ bis „82“) eine zusätzliche Gasaufbereitung (z. B. Aktivkohlefilter) und Oxydationskatalysator zu installieren und den Praxiseinsatz zu begleiten.





Datenbanknummer der BHKW ZÜNDSTRAHLMOTOREN

Abbildung 56: Abgasemissionen



-Motoren mit der Bauart „BF6M 1013 EC“

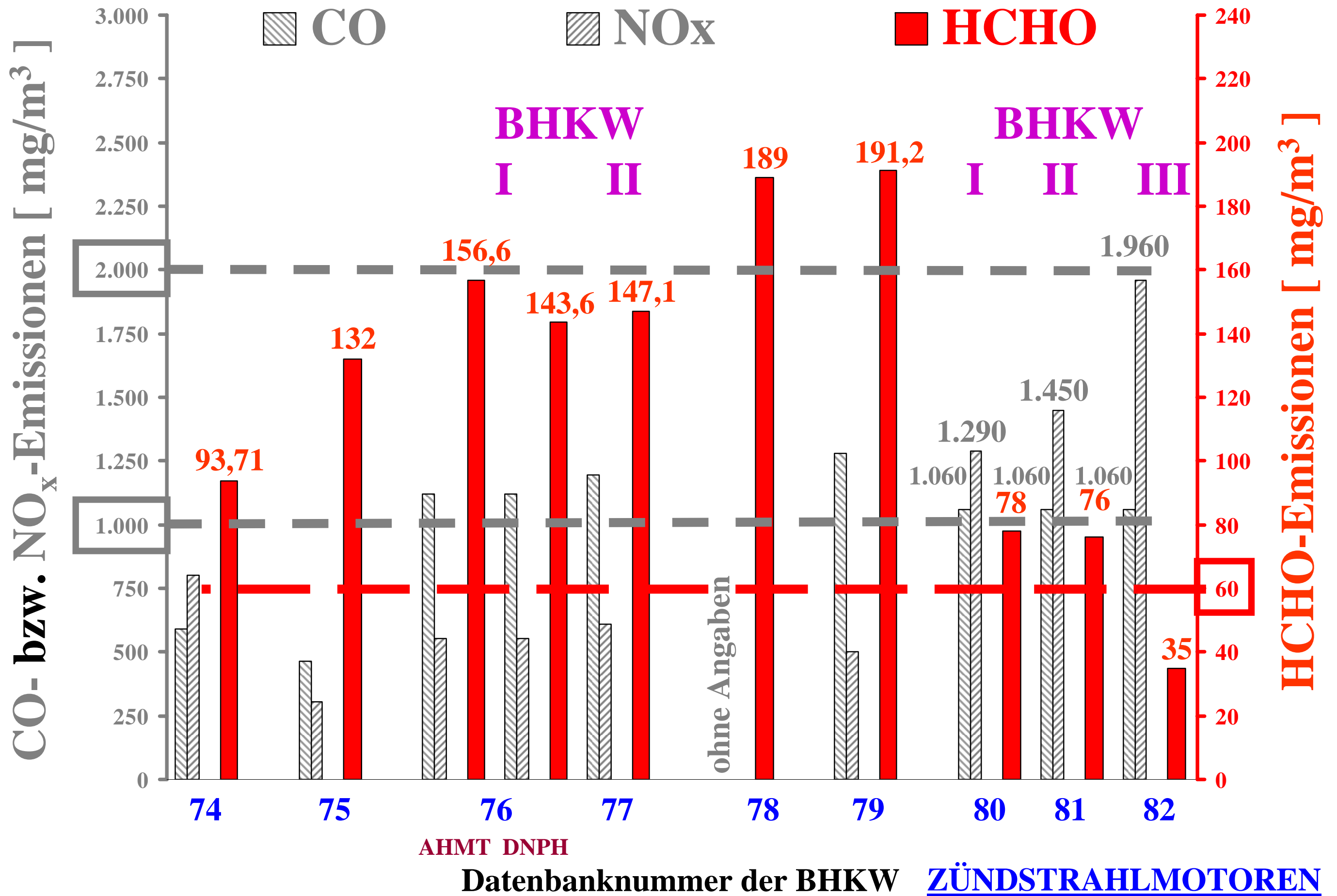
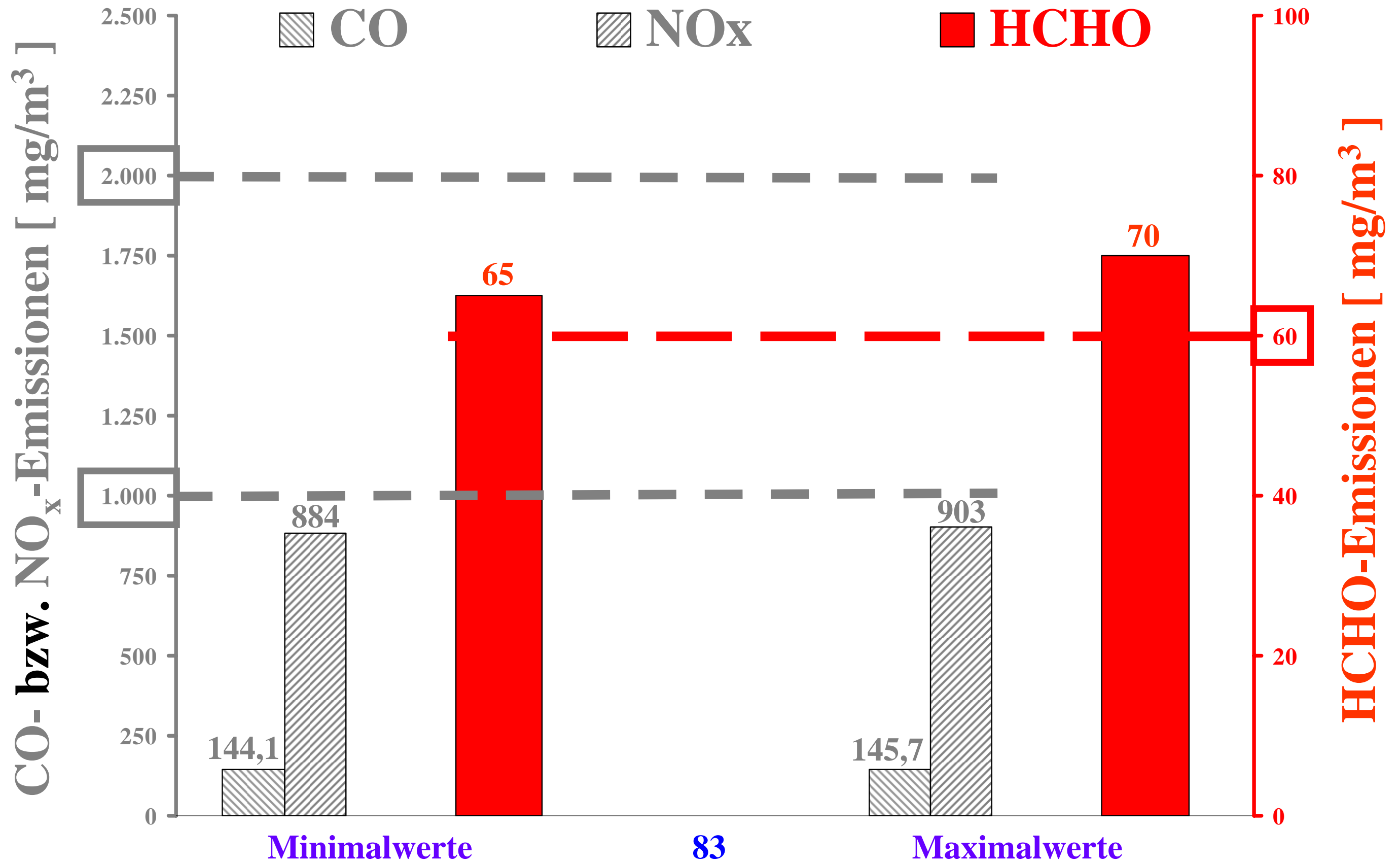


Abbildung 57: Abgasemissionen  -Motoren mit der Bauart „BF6M 1015 C“



Datenbanknummer der BHKW

ZÜNDSTRAHLMOTOR

Abbildung 58: Abgasemissionen



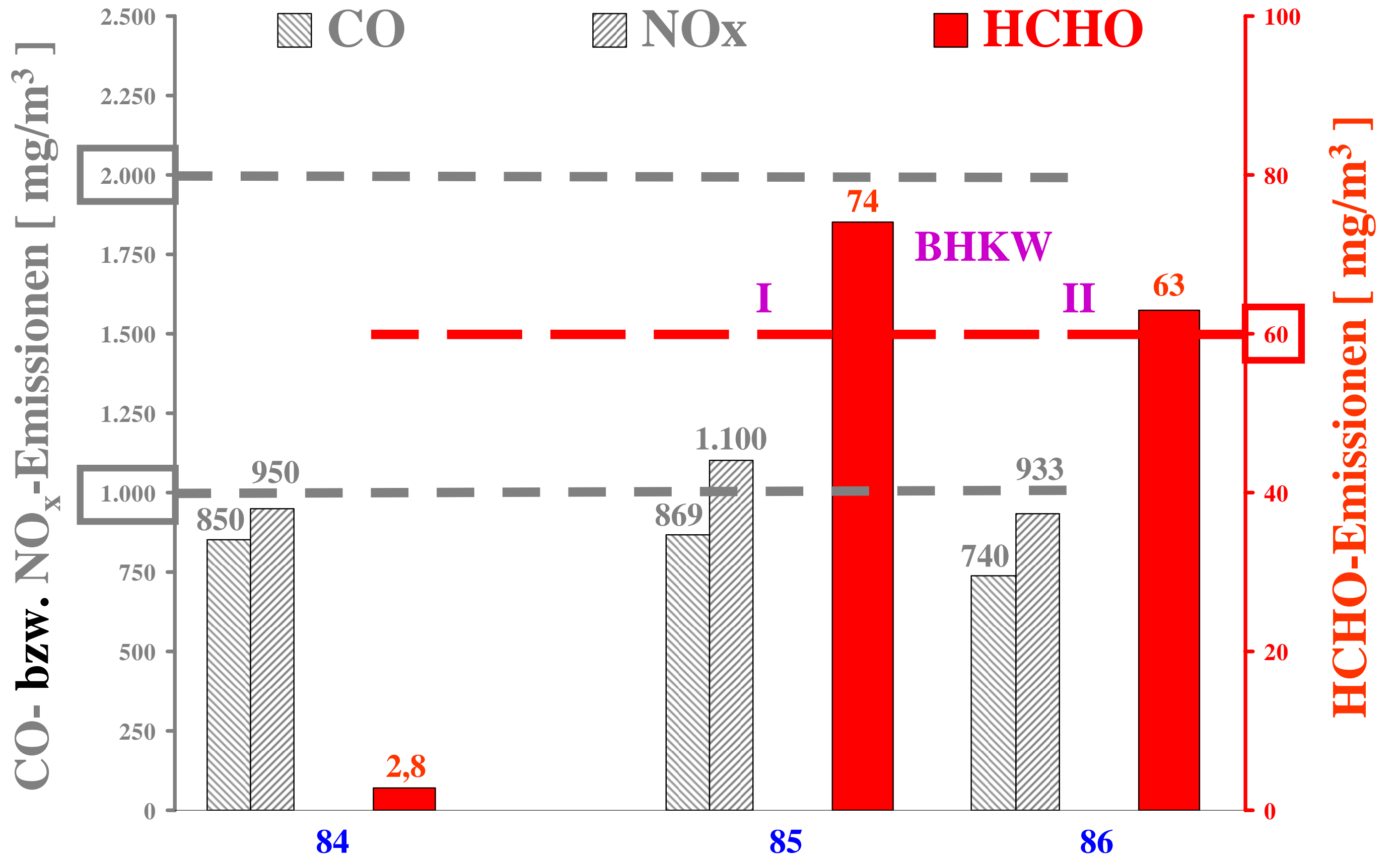
-Motoren mit der Bauart „BF8M 1015 C“

In den Untersuchungen sind zurzeit zwei im Freistaat Sachsen installierte Biogasanlagen, die mit Scania-Schnell-Motor ausgerüstet wurden, zu betrachten. Diese mit den Datenbanknummern „84“ bis „86“ registrierten BHKW arbeiten nach dem Zündstrahlverfahren. Die Technischen Angaben dieser durch die Schnell Zündstrahlmotoren AG & Co. KG Amtzell für Biogasbetrieb angepassten Aggregate sind in der **Tabelle 18** zusammengestellt.

**Tabelle 18:** Techn. Angaben zu berücksichtigender Scania-Schnell-Motorspezifikation /47/

Motortypbezeichnung	Scania-Schnell ES 2505
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader
Zylinderanzahl, -anordnung	6, Reihe
Hubvolumen	12 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>
Gesamtfeuerungsleistung	581 kW
mechanischer Wirkungsgrad	45,5%
mechanische Leistung	264 kW
elektrische Leistung	250 kW
thermische Leistung	232 kW (122 kW Kühlwasser-, 110 kW Abgaswärme)
elektrischer Wirkungsgrad	43%
thermischer Wirkungsgrad	40% (21% Kühlwasser-, 19% Abgaswärme)
Zündölverbrauch	2,3 l/h Biodiesel ; 3,5 kg/h Pflanzenöl

Die **Abbildung 59** veranschaulicht die Maximalwerte der CO-, NO<sub>x</sub>- und **HCHO**-Emissionen für die BHKW „84“ bis „86“. Besondere Auffälligkeiten sind mit dem **sehr niedrigen Formaldehydemissionswert** für das BHKW mit der Datenbanknummer „84“ gegeben. Hierbei wäre denkbar, dass diese u. a. auch durch den Technischen Entwicklungsstand des auf Biogasbetrieb angepassten Motors beeinflussbar sind. Entsprechend Produktinformation der Schnell Zündstrahlmotoren AG & Co. KG /47/ werden die Motoren mit einem weiterentwickelten Motormanagement ausgestattet. Dabei dient die Brennraumtemperatur als Stellgröße, wodurch die Einspritz- und Zündzeitpunkte separat für jeden einzelnen Zylinder geregelt werden können. Im Vergleich dazu gestalten sich jedoch die **TA Luftgrenzwertüberschreitungen** durch die BHKW „85“ und „86“ **tendenziell entgegengesetzt**. Hinsichtlich der evtl. Ursachen für die durch die BHKW „85“ und „86“ höheren Formaldehydemissionswerte ist zurzeit keine Aussage möglich. In einem ggf. zukünftigen Projekt sollten weitere Biogasanlagen, die mit dieser Scania-Schnell-Spezifikation „ES 2505“ ausgelegt sind, einbezogen werden, um eine Ergebnisrepräsentativität gewährleisten zu können.



SCANIA-SCHNELL ES 2505  
 Datenbanknummer der BHKW

ZÜNDSTRAHLMOTOREN

Abbildung 59: Abgasemissionen   -Motor (6 Zyl.-Reihenmotor mit Abgasturbolader)



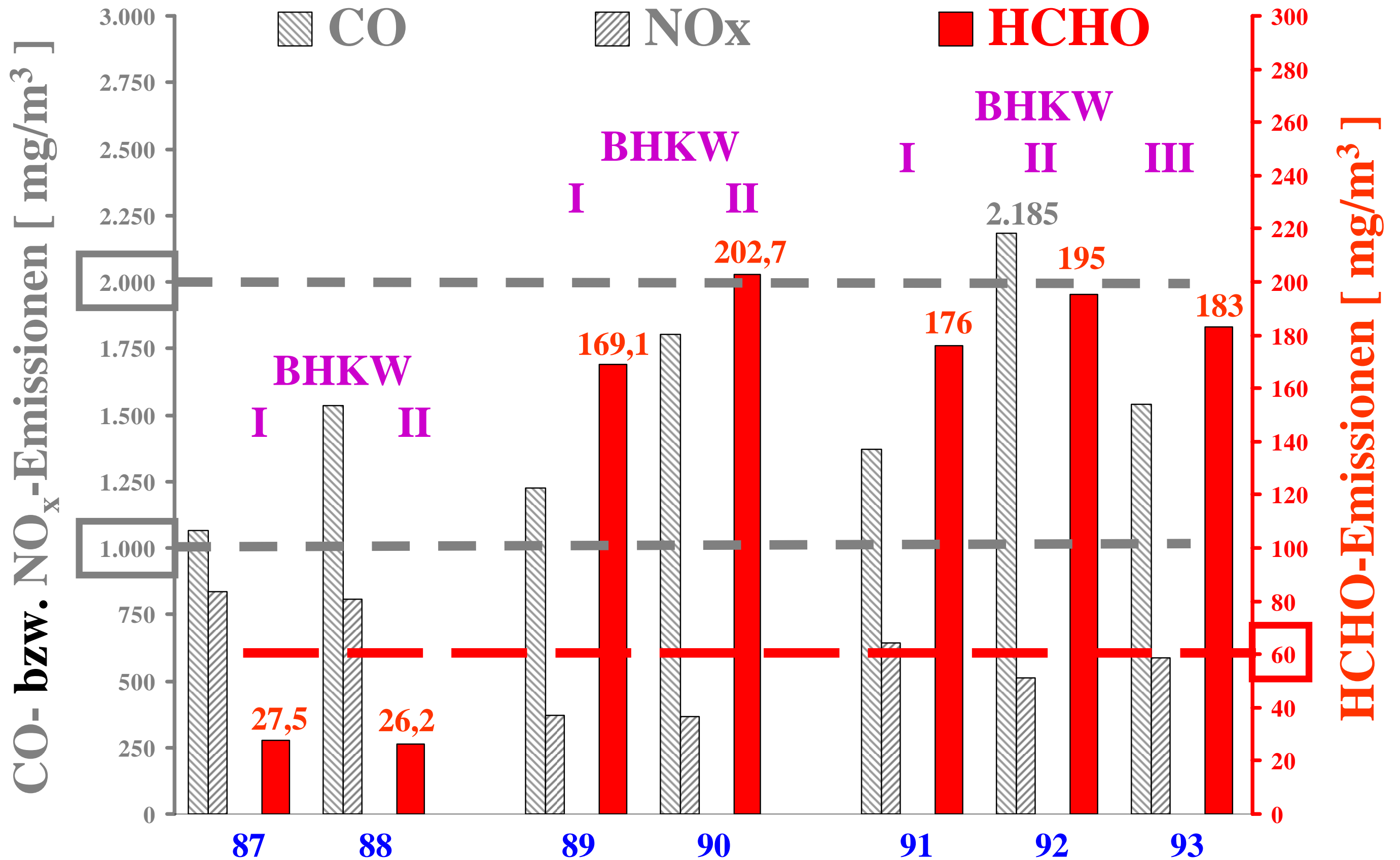
#### 4.4.3.11 Perkins-Motoren Perkins

Hinsichtlich der Perkins-Motoren wurden für Thüringen keine und für Sachsen 4 Standorte in die Betrachtungen einbezogen (**Abbildungen 60** → Datenbanknummern „87“ bis „93“ und **Abbildung 61** → Datenbanknummern „94“ bis „96“). Dabei handelt es sich um die Motorspezifikationen „1006 TG“ und „2006 TAG 2“. Für den „1006 TG“ sind einige Technische Angaben in der **Tabelle 19** zusammengestellt. Zum „1006 TG“ liegen derzeit kaum Informationen vor, so dass dieser nicht mit in dieser **Tabelle 19** aufgeführt ist.

**Tabelle 19:** Technische Angaben einer ausgewählten Perkins-Motorspezifikation /48/

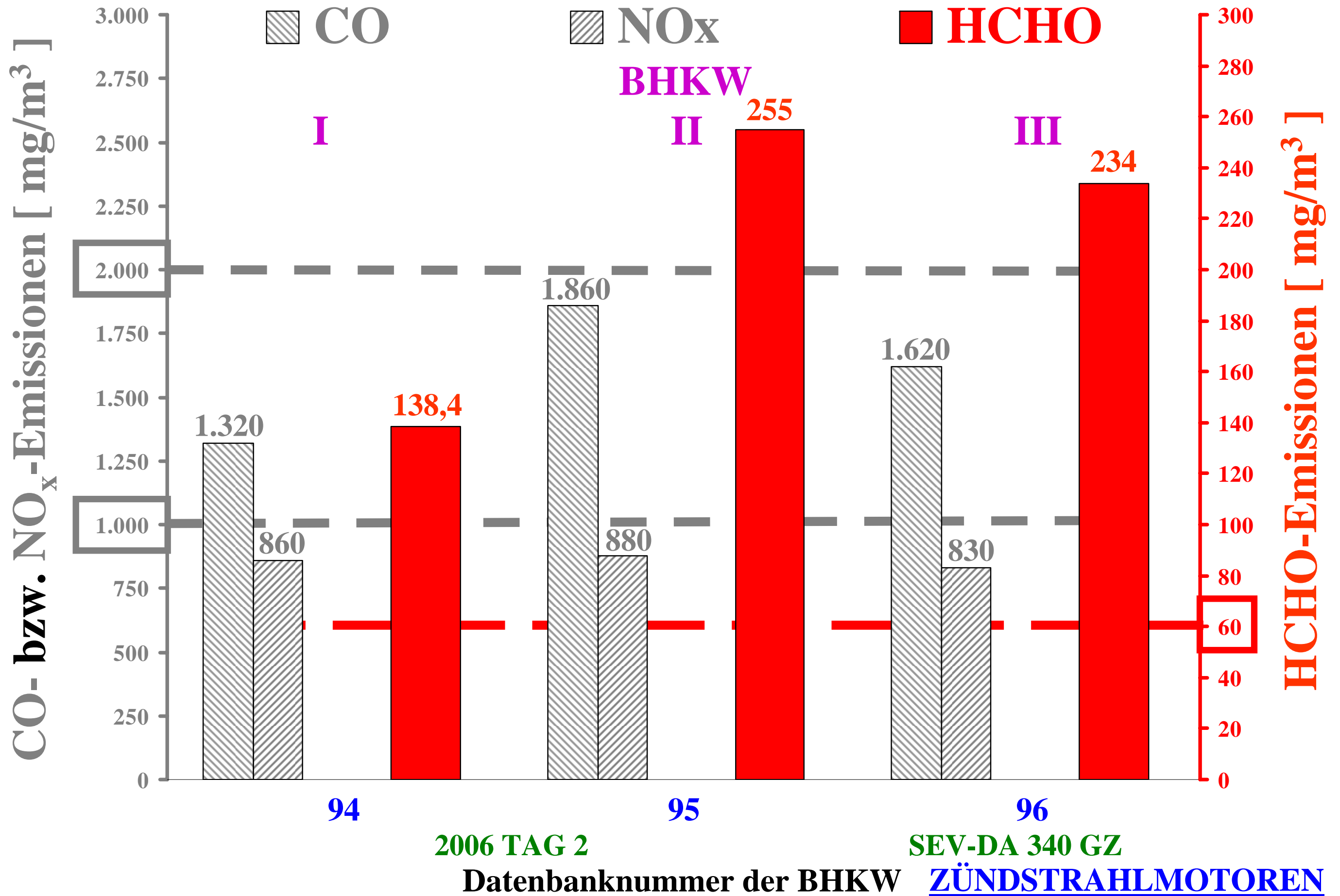
Motorartbezeichnung	Perkins 1006 TG
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader
Zylinderanzahl	6
Zylinderanordnung	Reihe
Hubvolumen	6 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>
elektrische Leistung	100 kW
thermische Leistung	125 kW
elektrischer Wirkungsgrad	40%
thermischer Wirkungsgrad	50%
Zündölverbrauch	2,5 l/h Heizöl

Für die BHKW mit den Datenbanknummern „87“ bis „93“ zeigt **Abbildung 60** die Maximalwerte der durch verschiedene Institutionen ermittelten CO-, NO<sub>x</sub>- und HCHO-Emissionen. Dabei sind gegensätzliche Formaldehydemissionswerte der BHKW mit dieser Motorspezifikation „1006 TG“ offensichtlich. An den zwei bzw. drei BHKW mit den Datenbanknummern „89“ und „90“ bzw. „91“ bis „93“ wurden im Vergleich zu den beiden BHKW am Standort mit den Datenbanknummern „87“ und „88“ wesentlich höhere HCHO-Emissionen analysiert. Wegen zu geringer Datenbasis konnten die evtl. Einflüsse für diese Unterschiede im Rahmen dieser Studie nicht herausgearbeitet werden. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die drei BHKW „91“ bis „93“ außer Betrieb genommen wurden. Anstelle dieser drei BHKW ist jetzt ein Scania-Schnell-BHKW installiert. Damit sind die Ergebnisse für diese BHKW-Spezifikation als nicht repräsentativ zu bewerten. Gleiches betrifft die zweite Perkins-Motorspezifikation „2006 TAG 2“ (**Abbildung 61** → Datenbanknummern „94“ und „95“). Diese Spezifikation wird zweimal parallel zu einem Daewoo-Motor des Typs „SEV-DA 340 GZ“ an einem gleichen Standort in Sachsen unterhalten. Für diese drei BHKW wird in der **Abbildung 61** ersichtlich, dass die gemäß TA Luft geforderten Grenzwerte für CO und NO<sub>x</sub> eingehalten, jedoch die analysierten **HCHO-Werte** deutlich über den zurzeit geltenden Grenzwert (60 mg/m<sup>3</sup>) liegen.



Datenbanknummer der BHKW ZÜNDSTRAHLMOTOREN

Abbildung 60: Abgasemissionen Perkins -Motoren „1006 TG“ (6 Zylinder in Reihe)



**Abbildung 61:** Abgasemissionen  Perkins-Motoren „2006 TAG 2“ und  GM DAEWOO-Motor

#### 4.4.3.12 Daewoo-Motor GM DAEWOO

Die technischen Angaben des BHKW mit der Datenbanknummer „96“ sind in der **Tabelle 20** aufgeführt. Entsprechend der Eintragungen im durch den Betreiber übermittelten Datenblatt wurde dieser Motor mit der Spezifikation „P222LE“ im Jahre 2007 durch die SEVA Energie AG Emstek für den Betrieb mit Biogas angepasst.

**Tabelle 20:** Technische Angaben zu berücksichtigender Daewoo-Motorspezifikation /49, 50/

Motortypbezeichnung	P222LE
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader
Gemischkühlung	1-stufig
Zylinderanzahl, -anordnung	12, V-Form
Hubvolumen	21,9 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>
elektrische Leistung <sup>(1), (2)</sup>	350 kW
Kühlwasserwärme <sup>(1), (2), (3)</sup>	132 kW
Abgaswärme bis 180°C <sup>(1), (2), (3)</sup>	190 kW
Nutzwärme gesamt <sup>(1), (2), (3)</sup>	322 kW
Brennstoffeinsatz (+/- 5%) <sup>(1), (2)</sup>	835 kW
elektr. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	41,9%
therm. Wirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	38,6%
Gesamtwirkungsgrad <sup>(1), (2)</sup>	80,5%
Zündölverbrauch (+/- 5%) <sup>(1), (2)</sup>	5 l/h Biodiesel

<sup>(1)</sup> für Biogas mit 55% CH<sub>4</sub>, 42% CO<sub>2</sub>, Rest N<sub>2</sub>, Mindestmethanzahl 80 und Mindestheizwert H<sub>u</sub> = 5,0 kWh/Nm<sup>3</sup> <sup>(2)</sup> bei 100% Last <sup>(3)</sup> +/- 8%

Dem Datenblatt ist nicht zweifelsfrei zu entnehmen, ob die für dieses BHKW (Datenbanknummer „96“) übermittelten Emissionswerte der BHKW I bis III am gleichen Tag ermittelt wurden. Es wird der gleiche Messtag unterstellt. Auffallend ist, dass für das BHKW III (Daewoo-Motor) im Vergleich zum BHKW II (Perkins-Motor) geringfügig niedrigere CO-, NO<sub>x</sub>- und HCHO-Emissionen ermittelt wurden (**Abbildung 61**). Auf Grund dieser Tatsache könnte für evtl. zukünftige Untersuchungen dem Inspektions- bzw. Wartungszustand und den Spezifikationen zum Motormanagement für die Gesamtanlage besondere Bedeutung beizumessen sein. Hierzu wären detaillierte Angaben aus der Anlagendokumentation sowie den Betriebsbüchern und Inspektions- bzw. Wartungsprotokollen zwingend notwendig.

#### 4.4.3.13 Volvo Penta-Motor

Das BHKW mit der Datenbanknummer „97“ wurde bereits teilweise im Zusammenhang mit den Untersuchungen zur Hygienisierung (**Abschnitt 4.3.9** → **Abbildung 24**, S. 40) vorgestellt. Die zurzeit zu diesem Motor „TWD 1211 G“ verfügbaren Daten zeigt die **Tabelle 21**.

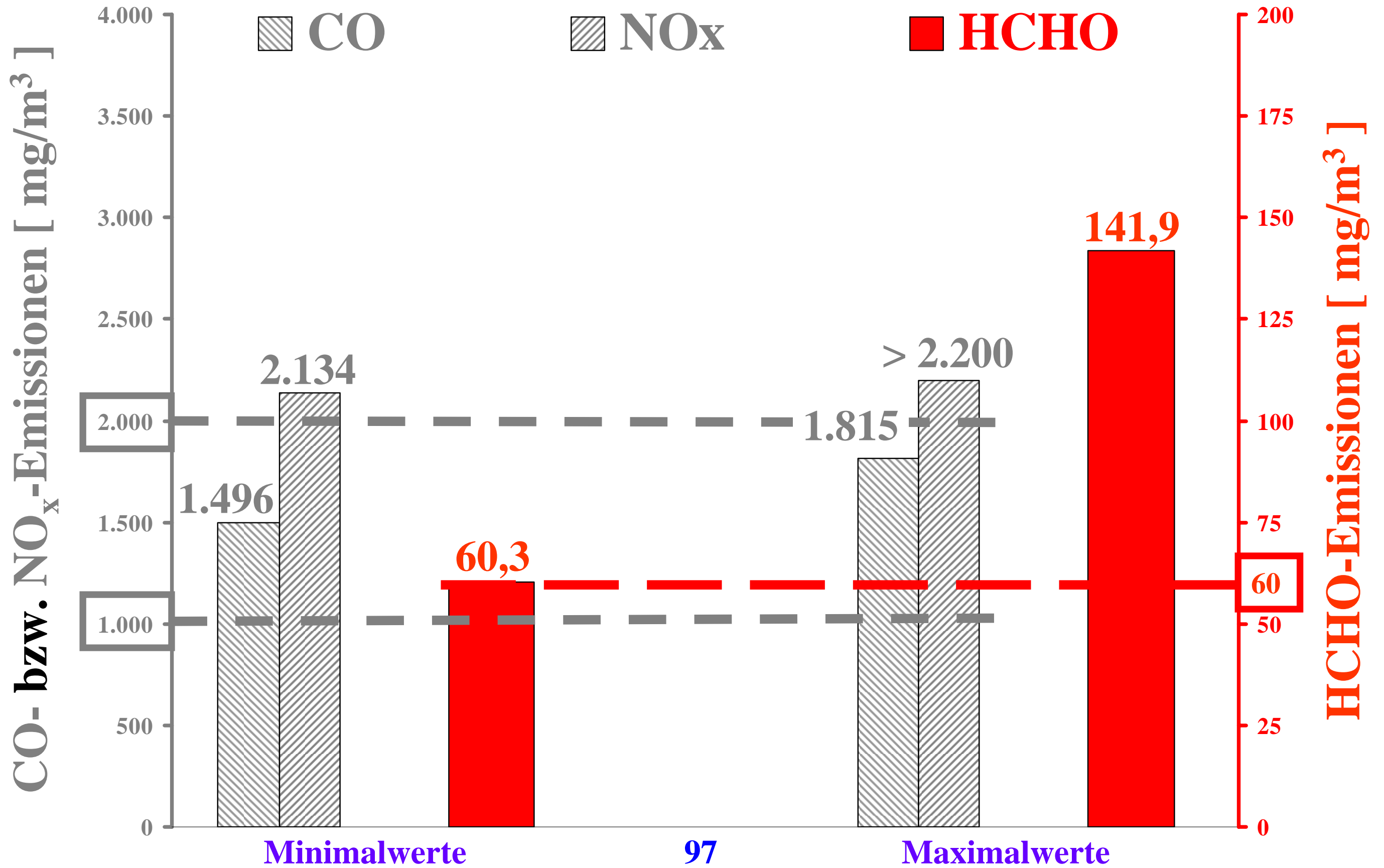
**Tabelle 21:** Technische Angaben zu berücksichtigender Volvo Penta-Motorspezifikation /51/

Motortypbezeichnung	TWD 1211 G
Arbeitsprinzip	Diesel → ZÜNDSTRAHL
Motorkonzept	Magermotor
Aufladung	Abgasturbolader mit Ladeluftkühlung
Zylinderanzahl	6
Zylinderanordnung	Reihe
Hubvolumen	11,98 l
Nenn Drehzahl	1.500 min <sup>-1</sup>
Feuerungswärmeleistung <sup>(1)</sup>	631 kW
elektrische Leistung <sup>(1)</sup>	160 kW
thermische Leistung <sup>(1)</sup>	254 kW
elektrischer Wirkungsgrad <sup>(1)</sup>	41,2%
thermischer Wirkungsgrad <sup>(1)</sup>	40,3%

<sup>(1)</sup> laut Angaben im Emissionsmessbericht

Für diesen Motor wurden am 16.01.2007 durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Radebeul Emissionsmessungen durchgeführt (**Abbildung 62**). Besondere Auffälligkeiten sind mit den sehr hohen NO<sub>x</sub>-Emissionen sowie dem Überschreiten des TA Luft-Formaldehydgrenzwertes gegeben. Die Ursachen könnten evtl. im ungenügenden Inspektions- bzw. Wartungszustand (z. B. Ventilspiel-, Zündölverbrauchseinstellung) des BHKW oder nicht ausreichend an den Biogasbetrieb angepasstem Motormanagement (z. B. Spritzbeginn) begründet sein. Für diesen Motor kann das Biogaserzeugungsverfahren als evtl. Ursache ausgeschlossen werden. Am Anlagenstandort wurden nach ca. 1 Woche (24.01.2007) erneute Emissionsmessungen durch die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft Radebeul durchgeführt. Diese bezogen sich jedoch ausschließlich auf den MAN-Gasottomotor „E 2842 LE 302“ (Datenbanknummer „2“). Wie bereits im **Abschnitt 4.4.3.1** ausgeführt, waren für diesen Motor bei diesen Emissionsmessungen keine Grenzwertüberschreitungen wahrzunehmen (Datenbanknummer „2“ → **Abbildung 41**, Seite 68).

Der Volvo Penta-Motor wird nicht näher betrachtet, da dieser laut Eintragungen im durch den Betreiber zur Verfügung gestellten Datenblatt scheinbar nicht mehr eingesetzt wird. Laut diesem Datenblatt ist möglicherweise seit Anfang 2008 anstelle dieses Volvo Penta-Motors ein Zündstrahlaggregat vom Hersteller Deutz AG Köln in Betrieb. Sofern in einem evtl. zukünftigen Projekt erforderlich, ist die Untersuchung an diese Randbedingung anzupassen.



**TWD 1211 G**

Datenbanknummer des BHKW

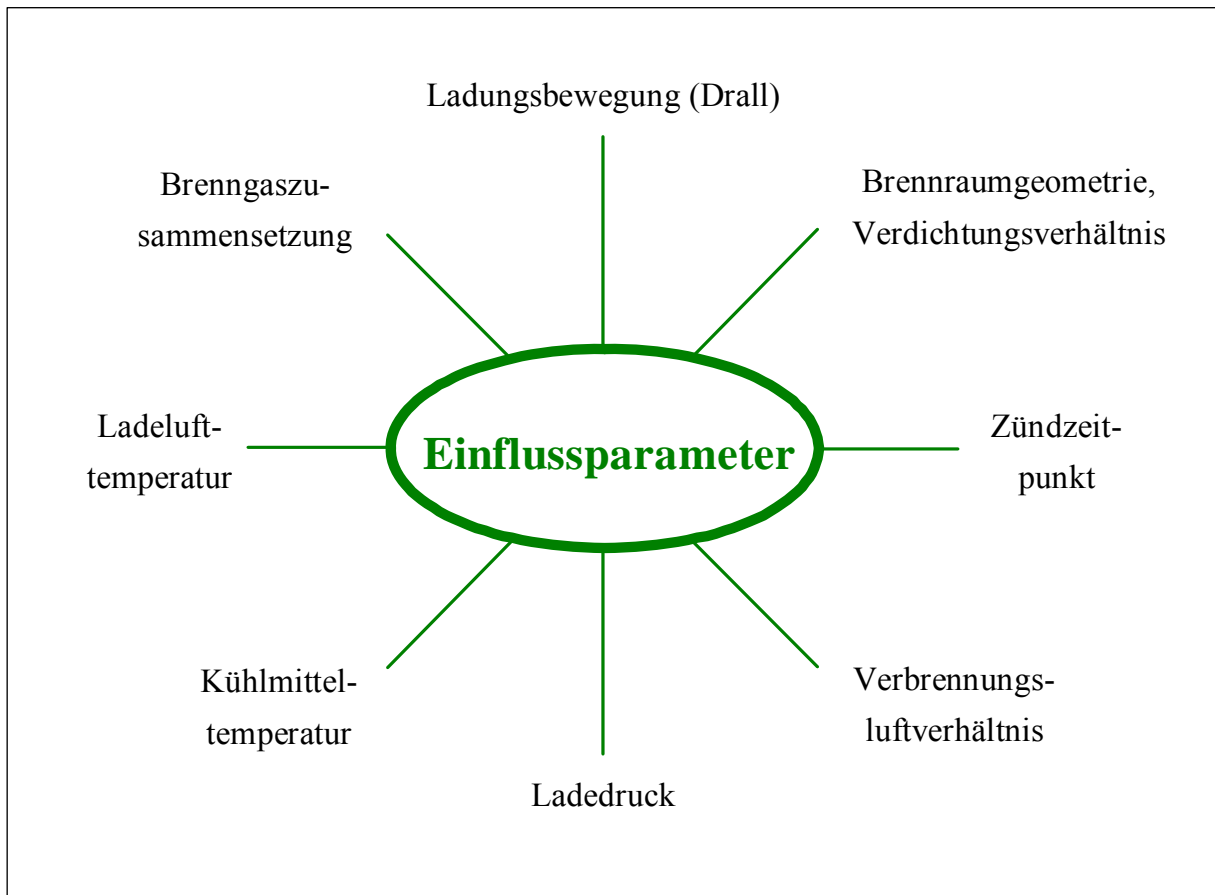
**ZÜNDSTRAHLMOTOR**

**Abbildung 62:** Abgasemissionen **VOLVO PENTA**-Motor (6 Zylinder-Reihenmotor mit Abgasturboaufladung)



#### 4.4.4 Motorprozesse

Der Einfluss der Motorprozesse auf die Formaldehydentstehung ist ausführlich im Rahmen des FVV-Vorhabens Nr. 918 „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ unter dem Thema „Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehydbildung und Darstellung der Einflussparameter“ /52/ untersucht worden. Dabei wurden u. a. die in **Abbildung 63** aufgeführten Parameter variiert und untersucht.



**Abbildung 63:** Einflussparameter für Motorprozesse (z. B. Gemischbildung, Verbrennung)

Nach Studium und Auswertung o. g. FVV-Forschungsvorhabens /52/ gehen auch die Verfasser dieser Studie davon aus, dass durch die Einstellung bestimmter Motorparameter die Formaldehydbildung beeinflusst werden könnte. Beispielhaft sind das Verbrennungsluftverhältnis und der Zündzeitpunkt zu nennen. Im Rahmen dieser Studie sind jedoch auf Grund nicht ausreichender Datenbasis keine diesbezüglichen Untersuchungen möglich. Beim o. g. FVV-Forschungsvorhaben handelt es sich um ein Projekt, in dem Grundlagenforschungen unter Berücksichtigung eindeutig definierter Einflussparameter an zwei Versuchsmotoren mit entsprechenden Messungen durchgeführt wurden. Demgegenüber liegen dieser Studie ausschließlich Angaben aus Datenblättern, Emissionsmessberichten und teilweise Betriebsanleitungen für die jeweiligen Motorgrundspezifikationen zu Grunde. Hinsichtlich der Untersuchung zu beispielsweise in der **Abbildung 63** ersichtlichen Einflussparametern wären Motorprozessdaten (z. B. Zündzeitpunkt, Gemischtemperatur) aus dem realen Betrieb der jeweiligen Motoren zwingend notwendig. Nach Auswertung aller Emissionsmessberichte konnten für insgesamt zehn BHKW max. je drei Werte zum Verbrennungsluftverhältnis im Voll- und Teillastbetrieb entnommen werden. Unter der Berücksichtigung, dass es sich hierbei teilweise um konstante Werte (z. B.  $4 \times \lambda = 1,41$ ) und um acht verschiedene Motorspezifikationen für diese 10 BHKW handelt, ist nachvollziehbar, dass für diese Untersuchung mit Bezug auf die derzeit

verfügbare Datenbasis keine Ergebnisrepräsentativität zu erwarten ist. Es wird vorgeschlagen, evtl. Einflüsse der Motorprozessparameter (z. B. Zündzeitpunkt, Ladedruck) auf die Formaldehydemissionen im Rahmen zukünftiger Projekte zu untersuchen. Dies bedarf der grundsätzlichen Einbeziehung der Motorlieferanten und der ggf. speziellen Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, welche die Anpassung auf Biogas vorgenommen haben.

#### 4.4.5 Inspektion und Wartung

In einigen Abschnitten dieser Studie mit jeweiligem Bezug auf die Abbildungen wurde bereits auf die evtl. Bedeutung des jeweiligen Inspektions- und Wartungszustandes zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen bzw. Probenahmen hingewiesen. Beispielhaft sind die nachfolgend aufgeführten Abschnitte mit Hinweis auf die Seite(n) bzw. Abbildungen genannt:

4.4.3.1	MAN-Gasottomotoren	→ S. 65 bis 69	→ <b>Abbildungen 41</b> u. <b>42</b>
4.4.3.2	MDE-Motoren	→ S. 70, 71	→ <b>Abbildung 43</b>
4.4.3.5	MWM-Motoren ...	→ S. 80 bis 85	→ <b>Abbildung 49</b>

Die o. g. Abbildungen veranschaulichen beispielhaft, dass dem jeweiligen Inspektions- bzw. Wartungszustand eine besondere Bedeutung beizumessen ist. Die Autoren dieser Studie vermuten, dass z. B. die Ventilspiele, **ggf.** der Zustand und die Elektrodenabstände der Zündkerzen sowie **ggf.** der Zündölanteil, den Ablauf der Verbrennungsprozesse und daraus resultierend die Formaldehydentstehung beeinflussen könnten. Auf Grund dieser Vermutung wurden im Rahmen der Datenerfassung (z. B. Datenblattmuster → **Anlage 4**) ausgewählte Inspektions- und Wartungstätigkeiten, z. B. Wechsel von Filtern (Luft, Biogas, Zündöl) sowie **ggf.** Zündkerzen bzw. **ggf.** Injektoren, mit abgefragt.

Nach Auswertung der entsprechenden Angaben in den Datenblättern ist einzuschätzen, dass einige Inspektions- und Wartungstätigkeiten nach der Analyse (z. B. Schmieröl) bzw. entsprechend des Zustandes bei der Überprüfung im Rahmen der Reinigung (z. B. Luftfilter) ausgeführt werden. In Auswertung dieser bereitgestellten Angaben zur Inspektion und Wartung waren auch teilweise verkürzte bzw. verlängerte Intervallabweichungen von den Herstellervorgaben zu erkennen.

Eine **Auswahl (Gasottomotoren)** hinsichtlich der für die jeweiligen BHKW-Spezifikationen (Motortyp) erfassten Angaben zu den Inspektions- und Wartungstätigkeiten ist in der **Tabelle 22** zusammengestellt. Hierbei wurden die jeweils **niedrigsten** bzw. **höchsten** Intervalle für die jeweiligen Inspektions- bzw. Wartungstätigkeiten angegeben. Besonders auffallend sind die für den Jenbacher-Motor „**JMS 312 GS-B.L.**“ am **höchsten** angegebenen Intervalle für die **Ventilspieleinstellung (8.000 Bh)** und **Zündkerzenwechsel (10.000 Bh)**. Es sind nicht unwesentliche Abweichungen sowohl im Vergleich zu den am **niedrigsten** für diesen Motortyp als auch gegenüber den für die anderen Motortypen am **höchsten** angegebenen Intervallen ersichtlich.

Auf eine Aufstellung mit Benennung der entsprechenden BHKW (Datenbanknummern) wurde bewusst verzichtet. In diesem Zusammenhang wird bereits an dieser Stelle vorgeschlagen, zum gegebenen Zeitpunkt Gespräche (z. B. Workshop) mit den Betreibern durchzuführen.

Für die **Zündstrahlmotoren** lassen sich ähnliche tendenzielle Abweichungen hinsichtlich der Inspektions- und Wartungsintervalle herausarbeiten.

Abschließend ist zu den evtl. Einflüssen des Inspektions- und Wartungszustandes auf die HCHO-Bildung zu erwähnen, dass weitere vor Kurzem sowohl an sächsischen als auch Thüringer Biogas-BHKW durchgeführte Messungen sicherlich weitere Aussagen zulassen werden.

**Tabelle 22:** Angaben zu Inspektions- u. Wartungstätigkeiten an **Gasotomotoren** (Auswahl)

<b>Motorhersteller</b>	<b>MAN</b>	<b>MDE</b>	<b>GE Jenbach.</b>	<b>Caterpillar</b>	<b>MWM</b>
<b>Motortyp- bezeichnung</b>	<b>E 2842 LE 302 / ...312</b>	<b>AB bzw. MB 3042 L1...L5</b>	<b>JMS 312 GS-B.L.</b>	<b>G 3412 TA</b>	<b>TCG 2016 V12</b>
<b>Inspektions- bzw. Wartungstätigkeit</b>	<b>BETRIEBSSTUNDEN [ Bh ]</b>				
Luftfilterreinigung	400 / 500	250 / 600	bei Bed.	750 / 1.000	750 / 3.000
Luftfilterwechsel	1.000 / 1.600	? / 1.200	6.000 / 8.000	1.500 / 8.000	1.500 / 12.000
Ölwechsel	400 / 500	nach Anal.	nach Anal.	750 / 1.500	600 / 2.000
Biogasfilterwechsel	1.600 / 8.000	1.800 / 8.000	1.800 / 8.000	750 / 8.000	1.000 / 8.000
Ventilspieleinst.	1.000 / 2.000	600 / 1.800	1.000 / 8.000	750 / 1.000	1.000 / 1.500
Kerzenwechsel	1.500 / 2.000	600 / 1.200	1.000 / 10.000	750 / 1.500	3.000 / 6.000

#### 4.4.6 Leistung (Lastanforderungen)

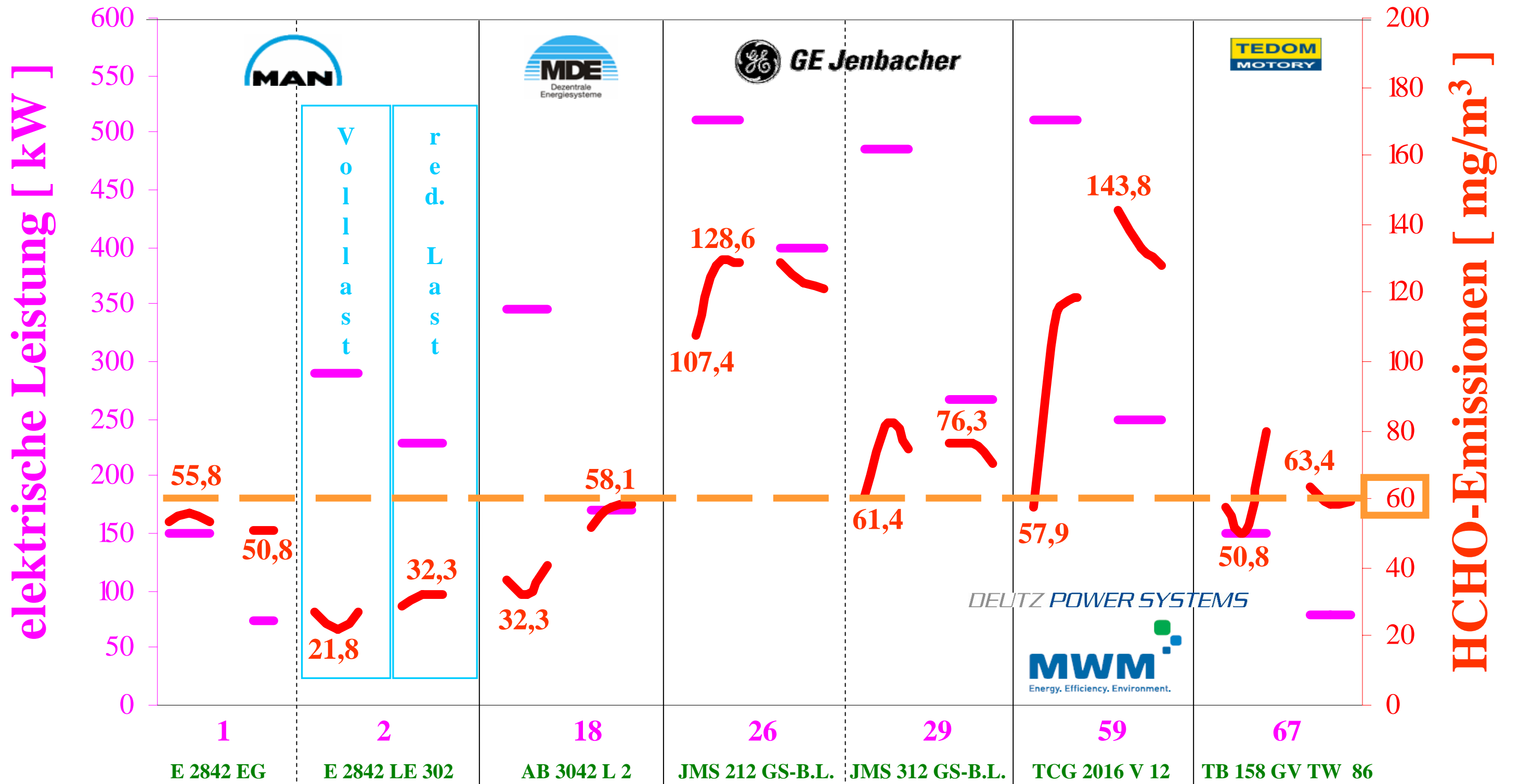
Für einige Biogas-BHKW bot sich u. a. aus Darstellungsgründen an, die Lastanforderungen in die Untersuchungen zum Ist-Zustand der Formaldehydemissionen (**Abschnitt 4.4.3**) einzubeziehen. Dies betrifft die nachfolgend genannten Biogas-BHKW (Datenbanknummern).

- „52“ Abschnitt: **4.4.3.5 MWM-Motoren** → S. 80 bis 85 → **Abbildung 50**  
 „67“, „68“ Abschnitt: **4.4.3.6 Tedom-Motory-Motoren** → S. 86 u. 87 → **Abbildung 53**  
 „11“ Abschnitt: **4.4.3.8 MAN-Zündstrahlmotor** → S. 90 u. 91 → **Abbildung 55**

In Auswertung der für die jeweilige Motorspezifikation in den o. g. **Abbildungen 50, 53** und **55** dargestellten Emissionswerte waren keine einheitlichen Tendenzen feststellbar. Beim **„TCG 2015 V6“** (**Abbildung 50** → S. 83) waren keine nennenswerten Unterschiede bei Lastveränderungen (Volllast → Teillast) zu analysieren. Demgegenüber wurden zwischen den beiden Tedom-Motory-Motoren **„TB 158 TV GW 86“** (**Abbildung 53** → S. 87) sowie den MAN-Zündstrahlmotor **„D 2842 LE 20212“** (**Abbildung 55** → S. 91) gegensätzliche Emissionstendenzen bei Lastveränderung gemessen bzw. analysiert. Aus diesen Beispielen lässt sich kein repräsentatives Ergebnis formulieren. Aus diesem Grunde wurden weitere BHKW in die Untersuchung einbezogen. Hierbei konnten die BHKW Berücksichtigung finden, für die zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen bzw. Probenahmen auch mehrere entsprechende Werte für den Volllast- bzw. Teillastbetrieb aus den jeweiligen Emissionsmessberichten zugeordnet werden konnten. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der **Abbildung 64** ersichtlich. In dieser **Abbildung 64** sind die verfügbaren Voll- und Teillastwerte für sieben **Gasotomotoren**-BHKW mit den entsprechend analysierten **HCHO-Emissionen** aufgetragen. Bei dem Tedom-Motory-Motor **„TB 158 TV GW 86“** (Datenbanknummer „67“) handelt es sich um das gleiche bereits in **Abbildung 53** (S. 87) dargestellte BHKW. Im Ergebnis der Untersuchung ist auch für diese BHKW kein repräsentatives Ergebnis herauszuarbeiten. Es sind erneut entgegengesetzte Tendenzen für die jeweiligen Motorspezifikationen zu erkennen. Beispielfhaft sind die beiden MAN-Motoren **„E 2842 EG“** und **„E 2842 LE 302“** zu nennen. Während beim **„E 2842 EG“** HCHO-Minderungen bei Teillast gegenüber Volllast analysiert wurden, stellt sich dieser Emissionsbestandteil für den **„E 2842 LE 302“** bei der Umstellung von Voll- auf Teillast mit HCHO-Erhöhungen dar. Auffallend ist, dass evtl. die jeweils installierte Leistung bedeutend sein könnte. Die Analysen dazu werden noch bearbeitet.

7 Gasototospezifikationen → 5 Motorhersteller

links: **Volllast** / rechts: **reduzierte Last** → ca. (20...50)%



Datenbanknummer der BHKW

Abbildung 64: Untersuchung **Lastanforderung** / **Formaldehydemissionen** für 7 Standorte (7 BHKW)

#### 4.4.7 Einfluss anderer Emissionsbestandteile

Im gesamten **Abschnitt „4.4.3. Ist-Zustand ermittelter Formaldehydemissionen“** wurde die Darstellung der CO-, NO<sub>x</sub>- und Formaldehydemissionen gewählt, da überwiegend Werte für diese Emissionsbestandteile verfügbar sind. In Auswertung der vorliegenden Emissionsdaten sind jedoch keine einheitlichen Tendenzen sowohl beim Vergleich von Messungen bzw. Probenahmen an mindestens zwei verschiedenen Messterminen für dasselbe BHKW als auch innerhalb der jeweiligen Motorspezifikationen zu erkennen. Beispielhaft wird auf folgende BHKW (Datenbanknummern) in den jeweiligen **Abschnitten** bzw. **Abbildungen** verwiesen.

---

„2“ Abschnitt: **4.4.3.1 MAN-Gasotomotoren** → **Abbildung 41** → S. 68  
Vergleich zwischen 1. Messung und 2. Messung

CO	1. Messung	>	CO	2. Messung
NO <sub>x</sub>	1. Messung	<	NO <sub>x</sub>	2. Messung
<b>HCHO</b>	1. Messung	>	<b>HCHO</b>	2. Messung

---

„3“ Abschnitt: **4.4.3.1 MAN-Gasotomotoren** → **Abbildung 41** → S. 68  
Vergleich zwischen 1. Messung und 2. Messung

CO	1. Messung	>	CO	2. Messung
NO <sub>x</sub>	1. Messung	>	NO <sub>x</sub>	2. Messung
<b>HCHO</b>	1. Messung	>	<b>HCHO</b>	2. Messung

---

„8“ bis „10“ Abschnitt: **4.4.3.1 MAN-Gasotomotoren** → **Abbildung 42** → S. 69  
Vergleich zwischen 3 BHKW an einem gleichen Standort  
CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen alle auf annähernd gleichem Niveau  
**HCHO** für „8“ am niedrigsten, „9“ über Grenzwert u. „10“ unter Grenzwert, höher als „8“

---

„26“ Abschnitt: **4.4.3.3 Jenbacher-Motoren von GE** → **Abbildung 44** → S. 74  
Vergleich zwischen 1. Messung und 2. Messung

CO	1. Messung	>	CO	2. Messung
NO <sub>x</sub>	1. Messung	>	NO <sub>x</sub>	2. Messung
<b>HCHO</b>	1. Messung	<	<b>HCHO</b>	2. Messung

---

„40“ Abschnitt: **4.4.3.4 Caterpillar-Motoren** → **Abbildung 48** → S. 79  
Vergleich zwischen 1. Messung und 2. Messung

CO	1. Messung	>	CO	2. Messung
NO <sub>x</sub>	1. Messung	<	NO <sub>x</sub>	2. Messung
<b>HCHO</b>	1. Messung	<	<b>HCHO</b>	2. Messung (geringe Diff. → 2.9 mg/m <sup>3</sup> )

---

Auch wenn zurzeit keine einheitlichen Tendenzen bzw. repräsentativen Ergebnisse hinsichtlich dieses Untersuchungsparameters formulierbar sind, vermuten die Autoren dieser Studie, dass evtl. Zusammenhänge zwischen diesen Emissionsbestandteilen bestehen könnten. Für die Untersuchung hinsichtlich dieses evtl. Einflusses ist es jedoch unerlässlich, diese analog der Betrachtungen zum Verbrennungsluftverhältnis im Rahmen von ggf. zukünftigen Projekten in der Praxis an noch auszuwählenden Biogasanlagenstandorten (BHKW) durchzuführen.

Hierzu ist die unbedingte Einbeziehung der Motorenhersteller sowie der Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, welche die Anpassung auf Biogasbetrieb vorgenommen haben, notwendig. Entsprechende Absprachen und ggf. Projektinitiativen könnten im Ergebnis von Workshops mit diesen jeweiligen Unternehmen realisiert werden.

## 5 Maßnahmenvorschläge zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“

In Auswertung aller durchgeführten Untersuchungen werden die in der **Tabelle 23** aufgeführten Maßnahmen zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ vorgeschlagen.

**Tabelle 23:** Maßnahmenvorschläge zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“

Vor-schlag-nr.	Bezeichnung der „Maßnahme zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“	BHKW-Vorschlag
1.	<b>Installation einer CH<sub>4</sub>-Regelung</b> für die z. B. Beeinflussung des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit des Methananteils im Biogas	„18“
2.	Pilotprojekt „ <b>Substrateinsatz</b> “ zur Untersuchung des evtl. Einflusses bestimmter Kosubstrate (z. B. <b>Luzerne, Fettsäurefette, Glycerin</b> ) auf die Brenngaszusammensetzung und die Verbrennungsprozesse mit evtl. Korrelation zur HCHO-Bildung	„26“ und „27“
3.	<b>Installation Aktivkohlefilter und Oxydationskatalysator</b> an einem Standort mit <b>2 Caterpillar-Motoren</b> verschiedener Spez.	„38“ u. „48“
4.	<b>Installation Aktivkohlefilter und Oxydationskatalysator</b> an einem Standort mit <b>3 Deutz-Motoren</b> gleicher Spezifikation	„80“ - „82“
5.	<b>Verkürzung Inspektions- und Wartungsintervalle</b> an <b>zwei SCANIA-Motoren</b> gleicher Spezifikation am gleichen Standort	„85“ u. „86“
6.	<b>Optimierung bereits vorhandener Aktivkohlefilter und Installation Oxydationskatalysator</b> an <b>zwei Perkins-Motoren</b> mit gleicher Spezifikation am gleichen Standort (Oxydationskatalysator ist evtl. durch Motorenhersteller verfügbar)	„89“ u. „90“

Alle vorgeschlagenen Maßnahmen bedingen die grundsätzliche Abstimmung mit den Verbrennungsmotorenherstellern sowie den Unternehmen, welche die Anpassung auf Biogasbetrieb vorgenommen haben. In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen, diese Abstimmung zum gegebenen Zeitpunkt nach Zustimmung durch den jeweiligen Anlagenbetreiber unter seiner Einbeziehung im Rahmen mehrerer für den jeweiligen Hersteller zutreffenden Ergebnispräsentationen durchzuführen.

Hinsichtlich oben vorgeschlagener Maßnahmen (Projekte) ist darauf hinzuweisen, dass für bestimmte Motoren zunächst bewusst keine Vorschläge unterbreitet wurden, da für diese zurzeit keine Ergebnisrepräsentativität gegeben ist oder für diese demnächst zwecks Bestätigung einiger repräsentativer Ergebnisse weitere Emissionsmessberichte (z. B. vor und nach Wartung) auszuwerten sind. Beispielhaft sind für den ersten Fall die Tedom-Motory-, Liebherr-, Daewoo-, Volvo Penta- sowie die MAN-Zündstrahlmotorspezifikationen zu nennen. Der zweite Fall betrifft die MAN-Gasmotorenspezifikationen. Für diese werden zurzeit die Emissionsmessberichte für insgesamt 8 BHKW an 5 verschiedenen Standorten erwartet. In diesem Zusammenhang erscheint auch die Einbeziehung weiterer Daten von anderen BHKW, die in



anderen Bundesländern betrieben werden, grundsätzlich sinnvoll. Dies bedürfte jedoch der Initiierung eines neuen Projektes.

Auch für die MWM(Deutz Power Systems)-Motoren sowie die Jenbacher-Motoren werden zunächst keine „Maßnahmen .... BHKW“ vorgeschlagen. Nach Heseding /53/ werden zurzeit zwei Referenzanlagen hinsichtlich von „Maßnahmen zur Minderung ... BHKW“ aufgebaut. Hierbei sind die Installation eines Thermoreaktors an einem MWM-Gasottomotor-BHKW in Biburg geplant. An einem zweiten BHKW (MWM) dieses Standortes soll eine zusätzliche Gasaufbereitung (z. B. Aktivkohlefilter) installiert und ein Oxydationskatalysator nachgeschaltet werden /53/. An einer zweiten Referenzanlage in Kloh werden zwei Jenbacher-Gasottomotoren mit der elektrischen Leistung von je 526 kW betrieben /53/. An dieser Referenzanlage ist vorgesehen, einen Thermoreaktor an einem dieser beiden BHKW zu installieren /53/. Die Projektpartner in diesem Projekt sind das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, das Umweltbundesamt sowie der VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. Frankfurt/Main /53/. Die Autoren dieser Studie gehen davon aus, dass im Ergebnis der Vorhaben an diesen beiden Referenzanlagen sowohl für die MWM- als auch die Jenbacher-Motoren serienreife Lösungen zu erwarten sind, welche sowohl die Einhaltung des ab 01.01.2009 gelten Formaldehydgrenzwertes ( $40 \text{ mg/m}^3$ ) als auch von ggf. zukünftig niedrigeren Grenzwerten gewährleisten könnten. Dementsprechend könnten diese Lösungen auf die in dieser Studie sowohl für Sachsen als auch für Thüringen berücksichtigten BHKW mit diesen Motorspezifikationen übertragen werden.

## 6 Kosten-Nutzen-Analysen

Laut LfULG-Ausschreibung sowie dem daraus resultierenden Leistungsangebot des Auftragnehmers war vorgesehen, Kostenabschätzungen mit entsprechenden Kosten-Nutzen-Analysen für die jeweiligen Maßnahmenvorschläge zur „Minderung ... BHKW“ (**Tabelle 23**) durchzuführen.

Nach Studium und Auswertung der bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt eingegangenen Kostenangebote sowie einer MWM-Produktinformation wird jedoch eingeschätzt, dass für die Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mit entsprechender Darstellung von Amortisationskennlinien weitere eindeutige sowohl betriebliche Daten zur Biogasanlage (z. B. definierte zu reduzierende  $\text{H}_2\text{S}$ -Gehalte, Betriebsstunden/Jahr, tatsächliche elektrische Leistung) als auch betriebswirtschaftliche Kennziffern (z. B. Finanzierungsmodalitäten → Eigen- bzw. Fremdkapital, Zinssatz) erforderlich sind.

Aus o. g. Argumenten wird aus Effizienzgründen vorgeschlagen, die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit, Amortisation und dem Nutzen durchzuführen, nachdem die Abstimmung hinsichtlich der zu realisierenden „Maßnahmenvorschläge“ (**Tabelle 23** → ggf. Pilotvorhaben) mit den jeweiligen Betreibern und den Motorenherstellern bzw. Maschinen- und Anlagenbauunternehmen erfolgte. Nach jeweils vereinbarten Projektpartnerschaften könnten detaillierte für die jeweilige Biogasanlage definierte Kostenangebote unter Berücksichtigung aller sowohl für die Installation als auch den Betrieb anzusetzender Kostenelemente angefordert werden. Im Ergebnis dessen könnten diese Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Amortisationskennlinien und Kosten-Nutzen-Analysen unter Anwendung der Annuitätenmethode realisiert werden. Hierbei ist geplant, grundsätzlich die tatsächlich durch den jeweiligen Betreiber angegebenen Finanzierungsmodalitäten (z. B. Eigen- und Fremdkapitalzins) unter Berücksichtigung der jeweiligen Lebensdauer der ggf. zu installierenden Technologie (z. B. Aktivkohlefilter, Katalysator) zum Ansatz zu bringen.

Ableitend aus den in dieser Studie vorgestellten Erkenntnissen werden hinsichtlich der weiteren Vorgehensweise die in der **Abbildung 65** ersichtlichen Arbeitsschritte vorgeschlagen.



**Abbildung 65:** Vorschlag zum weiteren Vorgehen

Für einige Motorspezifikationen sind die vorgestellten Ergebnisse zurzeit wegen zu geringer Datenbasis als nicht repräsentativ einzuordnen. Beispielhaft sind die Jenbacher-Motorspezifikationen „**JMS 208 GS-B.L.**“ und „**JMS 212 GS-B.L.**“ („**25**“ bzw. „**26**“ → **Abbildung 44** → S. 74), die Caterpillar-Motorspezifikationen „**G 3406 TA**“ und „**G 3408 TA**“ („**37**“ bis „**39**“ → **Abbildung 46** → S. 77) sowie die Scania-Schnell-Motorspezifikation „**ES 2505**“ („**84**“ → **Abbildung 59** → S. 97) zu nennen. Hinsichtlich des Scania-Schnell-Zündstrahlmotors mit der Datenbanknummer „**84**“ ist insbesondere der sehr niedrige Formaldehydwert (**2,8 mg/m<sup>3</sup>**) auffallend. Um die Ergebnisrepräsentativität für die hier vorgestellte Studie zu erhöhen, wird vorgeschlagen, die Datenerfassungen und -auswertungen für weitere in Sachsen stationierte Biogasanlagen fortzusetzen. Außerdem bietet sich an, den Ist-Zustand hinsichtlich der ermittelten Formaldehydemissionswerte von in anderen Bundesländern installierten BHKW zu analysieren. Dies bedarf jedoch der Initiierung von neuen Projekten mit entsprechend berücksichtigter Finanzierung.

Im Ergebnis des Erfahrungsaustausches mit den Motorenherstellern sowie den Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, die eine Anpassung auf den Biogasbetrieb vornehmen, könnten Forschungsprojekte initiiert werden. Beispielhaft ist die Umsetzung einer Projektidee hinsichtlich der Formaldehydgrenzwertüberwachung mittels Sensor mit resultierender Beeinflussung des Verbrennungsprozesses (z. B. Verbrennungsluftverhältnis, Zündzeitpunkt) zu erwähnen.

Resultierend aus der Aufgabenstellung zur Erarbeitung einer „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ sowie den Entscheidungen im Rahmen einer Projektanlaufberatung am 22.05.2008 wurden, beginnend ab 09.06.2008, 135 Biogasanlagenbetreiber in Sachsen per Post angeschrieben, standortbezogene Daten (z. B. **Anlage 4**) für die jeweils betriebene Biogasanlage bereitzustellen. Parallel dazu wurden die entsprechenden Daten für einige in Thüringen befindliche Biogas-BHKW durch das Thüringer Landesamt für Umwelt und Geologie erfasst.

Bis zum Redaktionsschluss dieser Studie (31.10.2008) konnte für Sachsen ein Datenbestand von 74 Standorten, an denen 110 BHKW stationiert sind, registriert werden. Für den Freistaat Thüringen lagen bis zum o. g. Zeitpunkt Daten für 28 BHKW, die an 19 verschiedenen Standorten unterhalten werden, vor. Für die verschiedenen Untersuchungsparameter war ein maximaler Datenbestand für insgesamt 66 Standorte mit insgesamt 97 BHKW nutzbar. An diesen 97 BHKW gelangen Verbrennungsmotoren von 12 Herstellern (z. B. MAN, Volvo, Liebherr) mit insgesamt 26 verschiedenen Motorspezifikationen zum Einsatz.

Hinsichtlich der Untersuchungsparameter zu den Biogaserzeugungsprozessen (**Abschnitt 4.3**) waren teilweise aufgrund von Abweichungen hinsichtlich der in den übermittelten Datenblättern im Vergleich zu den Emissionsmessberichten ausgewiesenen Angaben zum Methananteil im Biogas für einige Untersuchungsparameter (z. B. Prozesstemperatur, Beschickung) Einschränkungen der Datenbasis notwendig. Im Ergebnis dessen konnten für diese Untersuchungen zur Biogaserzeugung, die u. a. auch Einfluss auf die Brenngaszusammensetzung und damit auch auf den Methananteil im Biogas ausüben dürften, lediglich die Anlagen bzw. BHKW Berücksichtigung finden, für die zum Zeitpunkt der Emissionsmessungen bzw. Probenahmen auch der Methananteil im Biogas mit erfasst wurde. Daraus resultierend waren für diese Untersuchungen insgesamt maximal 43 BHKW, die an 31 verschiedenen Standorten installiert sind, nutzbar.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Biogaserzeugung wurden unter Berücksichtigung von Klasseneinteilungen durchgeführt. Diese Einteilungen erfolgten entweder mittels Klassenbreiten hinsichtlich der Untersuchungsparameter, für die Werte verfügbar sind (z. B. Verweilzeit) oder mittels Klassenvorgabe unter Berücksichtigung der jeweils angewandten Spezifikation (z. B. Entschwefelung). In Auswertung aller Untersuchungsergebnisse zur Biogaserzeugung konnten keine Einflüsse der jeweiligen Untersuchungsparameter auf den Methananteil im Biogas mit evtl. Korrelationen zur Formaldehydbildung festgestellt werden. Es gibt keine Klasse, in der eine bestimmte Konzentration eines niedrigen, konstanten oder hohen Methananteils im Biogas zu erkennen ist. Eine evtl. Ausnahme könnte der Einsatz bestimmter Kosubstrate (z. B. Luzerne, Fettabscheidfette, Glycerin) darstellen. Diese Ergebnisse sind zurzeit jedoch als nicht repräsentativ einzuordnen. Hierfür besteht weiterer Forschungsbedarf. Grundsätzlich bietet sich an, ein entsprechendes Projekt unter Einbeziehung von Erfahrungsträgern auf dem Gebiet der Biogaserzeugung, z. B. das DBFZ, zu initiieren.

Sowohl die Angaben in den jeweiligen Datenblättern als auch in den Emissionsmessberichten haben gezeigt, dass in der Praxis mehr oder minder schwankende Methananteile im Biogas auftreten. Die Autoren dieser Studie vermuten, dass auch der Methananteil im Biogas den Verbrennungsprozess und damit die Formaldehydbildung beeinflussen könnte. Auf Grund der Aspekte von schwankenden Methananteilen im Biogas sowie der Überlegung dieses evtl. Einflusses wurde als eine „Maßnahme zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Bio-

gas betriebenen BHKW“ vorgeschlagen, eine CH<sub>4</sub>-Regelung zu installieren. Eine der wesentlichsten Funktionen dieser CH<sub>4</sub>-Regelung könnte die Beeinflussung des Zündzeitpunktes in Abhängigkeit des Methananteils im Biogas darstellen. In einem ersten Arbeitsschritt wären zunächst die Machbarkeit in Abstimmung mit den Motorenherstellern und der Ist-Zustand zu analysieren.

Für die Untersuchungen, welche sich auf den Ist-Zustand ermittelter Formaldehydemissionen (**Abschnitt 4.4.3**) beziehen, war die maximal verfügbare Datenbasis (66 Standorte, 97 BHKW) anwendbar. Hierfür wurden die BHKW bzw. Standorte berücksichtigt, für die sowohl der überwiegende Teil der Angaben zur BHKW-Spezifikation (z. B. Arbeitsprinzip, Motortyp) als auch die HCHO-Emissionswerte aus Datenblättern bzw. Emissionsmessberichten vorliegen. Im Ergebnis dieser Untersuchungen, die überwiegend auf die Darstellung von maximalen **Ist**-Emissionswerten für CO, NO<sub>x</sub> und HCHO für die jeweiligen BHKW beruhen, ist für einige Motoren eine evtl. Konzentration hinsichtlich der Erfüllung bzw. Überschreitung des derzeit gültigen TA Luftgrenzwertes (60 mg/m<sup>3</sup>) ersichtlich. Hinsichtlich der wahrscheinlich ab 01.01.2009 geltenden und ggf. zukünftig niedrigeren HCHO-Grenzwerte ist sehr wahrscheinlich davon auszugehen, dass zusätzliche Technologien zur Biogasaufbereitung (z. B. Aktivkohlefilter) und zur Abgasnachbehandlung (z. B. Oxydationskatalysator, Thermoreaktor) notwendig sein dürften. U. a. aufgrund dieser Überlegungen wurde nach Studium von Bauer, Wachtmeister /52/ und Heseding /53/ vorgeschlagen, zusätzliche Biogasaufbereitungstechnologien und Oxydationskatalysatoren an drei verschiedenen Standorten zu installieren.

Im Rahmen dieser Studie wurde teilweise auch auf die Ist-Zustände der ermittelten HCHO-Emissionen vor bzw. nach der Wartung hingewiesen. In Auswertung dieser Untersuchungen wird eingeschätzt, dass der jeweilige Wartungszustand der BHKW von nicht zu vernachlässigender Bedeutung sein könnte. Dadurch wäre aus der Sicht der Autoren ein zumindest kleiner Beitrag zur HCHO-Emissionsminderung denkbar. Vor dem Hintergrund sich weiter verschärfender Emissionsgesetzgebungen mit evtl. HCHO-Grenzwerttendenz < 40 mg/m<sup>3</sup> bis < 1 mg/m<sup>3</sup> wird diese ggf. Vorgabe allein durch den Aspekt der Wartung wohl nicht einzuhalten sein. Evtl. Ergebnisse hierzu könnte ein weiterer Vorschlag zur „Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ im Zusammenhang mit der Verkürzung von Inspektions- und Wartungsintervallen liefern.

Hinsichtlich der evtl. Einflüsse von Motorprozessen, der Lastanforderungen und von anderen Emissionsbestandteilen auf die Formaldehydentstehung konnten aufgrund zu geringer und nicht ausreichend repräsentativer Datenbasis keine tiefgründigen Untersuchungen durchgeführt werden. Dementsprechend waren auch keine Ergebnisse zu formulieren. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass evtl. Zusammenhänge existieren könnten. Hierfür sind jedoch detaillierte Untersuchungen an ausgewählten Anlagen unter unbedingter Einbeziehung der Motorenhersteller sowie von Maschinen- und Anlagenbauunternehmen, welche die Anpassung auf Biogasbetrieb vorgenommen haben, unumgänglich.

Abschließend ist anzumerken, dass die jeweils beschriebenen Erkenntnisse (z. B. Technischer Entwicklungsstand, Motorsteuerung) ausschließlich auf Vermutungen und Einschätzungen beruhen, die sich aus dem gegenwärtigen Datenbestand (z. B. Betriebsanleitungen) analysieren lassen.

## Literaturverzeichnis

- /1/ Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft „Platsch planscht CO<sub>2</sub>-neutral“  
[www.medienservice.sachsen.de](http://www.medienservice.sachsen.de)  
Dresden, 11/2008
- /2/ agri.capital GmbH „Deutschlands größte Produktionsstätte für BioErdgas am Netz“  
[www.agri-capital.de](http://www.agri-capital.de)  
Münster, 02/2008
- /3/ gibgas medien  
gibgas consulting „800. Erdgastankstelle in Deutschland eröffnet“  
[www.gibgas.de](http://www.gibgas.de)  
München, 08/2008
- /4/ Jäkel, K., Mau, S.,  
Nusche, H.  
Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft „Biogaserzeugung und -verwertung“  
Kapitel 8 „Ausgewählte Standorte von Biogasanlagen in Deutschland“, S. 10 - 12  
[www.smul.sachsen.de/lfl](http://www.smul.sachsen.de/lfl)  
Dresden, 03/2003
- /5/ Schreier, W.  
Umweltanalytik RUK  
GmbH Longuich „Formaldehydproblematik bei Gasmotoren – messtechnisches oder motorisches Problem?“  
Fachtagung: Neue Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität;  
UMTK Nürnberg 2008, 24./25.06.2008
- /6/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit „Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)“  
Berlin, 24.07.2002
- /7/ Ämter für Landwirtschaft Agrarförderung „Biogasanlagen von landwirtschaftlichen Betrieben in Sachsen (Stand: 01.03.2008)“  
[www.smul.sachsen.de/lfl](http://www.smul.sachsen.de/lfl)  
Dresden, 03/2008
- /8/ Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft „Umweltbericht 2007“  
Abschnitt 3.4 „Erneuerbare Energien“, S. 32  
[www.smul.sachsen.de](http://www.smul.sachsen.de)  
Dresden, 03/2008
- /9/ Moczigemba, T.  
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie „Geruchsemissionen aus Abgasen von Blockheizkraftwerken (BHKW)“  
Abschlussbericht zum Messprogramm  
Dresden, 05/2008

- /10/ Wellinger, A., Egger, K., Baserga, U., Seiler, B., Edelmann, W. „Biogas-Handbuch: Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Anlagen“ Verlag Wirz AG, Aarau, 1991
- /11/ Eder, B., Schulz, H. „Biogas – Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit“ ökobuch Verlag, Staufen b. Freiburg, 1996, 2001, 2006
- /12/ Görisch, U., Helm, M. „Biogasanlagen – Planung, Errichtung und Betrieb von landwirtschaftlichen und industriellen Biogasanlagen“ Eugen Ulmer KG, Stuttgart (Hohenheim), 2006
- /13/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) „Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ KTBL, Darmstadt, 2005
- /14/ VDI Wissensforum IWB GmbH „Biogas 2007 – Energieträger der Zukunft“ VDI-Berichte 1983, Tagung Berlin, 14./15.06.2007 VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2007
- /15/ Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) „Faustzahlen Biogas“ KTBL, Darmstadt, 2007
- /16/ Autorenkollektiv top agrar, Das Magazin für moderne Landwirtschaft „Biogas – Strom aus Gülle und Biomasse“ Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster 2002
- /17/ Schmitz, K. W., Schaumann, G. „Kraft-Wärme-Kopplung“ Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2005
- /18/ Fachverband Biogas e.V. „Biogas im Wandel“ 16. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V. Congress Center Leipzig, 31.01.-02.02.2007
- /19/ Fachverband Biogas e.V. „Biogas – effizient und verlässlich“ 17. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e. V. Congress Center Nürnberg, 15.-17.01.2008
- /20/ Hofmann, U., Neumann, T., Zikoridse, G. HTW Dresden (FH) „Studie zu Maßnahmen zur Minderung von Formaldehydemissionen an mit Biogas betriebenen BHKW“ Zwischenbericht, Dresden, 08/2008
- /21/ AgroNet Gesellschaft für modernes Agrarmanagement und -technik mbH „VSP-Fermenter: Theorie und Praxis“ [www.agronet-vsp.de](http://www.agronet-vsp.de) Dresden, 08/2008



- /22/ Neumann, T. „Untersuchungen zum Einsatz von Erdgas in den Stadtlinienbussen der Dresdner Verkehrsbetriebe AG“ unveröffentlicht, Dresden, 07/1995
- /23/ Neumann, T. „Testbetrieb von zwei erdgasbetriebenen Standardlinienbussen vom 06.10. – 06.11.1995 bei der Dresdner Verkehrsbetriebe AG“ unveröffentlicht, Dresden, 02/1996
- /24/ Bach, E.,  
Neumann, T.  
HTW Dresden (FH) „Modellvorhaben: Erdgasbetriebene Fahrzeuge – Ein Beitrag zur dauerhaften Reduzierung von Verkehrsmissionen in Leipzig“ Abschlussbericht, Dresden, 03/2002
- /25/ Jäkel, K.,  
Mau, S.  
Sächsisches Landesamt für Landwirtschaft „Biogaserzeugung und -verwertung“ Kapitel 3 „Grundlagen der Biogasproduktion“, S. 28 [www.smul.sachsen.de/lfl](http://www.smul.sachsen.de/lfl) Dresden, 03/2003
- /26/ ARCHEA Biogastechnologie GmbH „Biogasanlagen – Liegende Fermentertechnik“ Produktinformation, Hessisch Oldendorf, 2008
- /27/ ROTARIA Energie- und Umwelttechnik GmbH „BioProp-Fermenterrührwerk“ Produktinformation, Rerik, 2008
- /28/ Reinhold, G.  
Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft „Spezielle verfahrenstechnische Anforderungen – Entschwefelung“ Jena, 2005
- /29/ Brummack, J.,  
Polster, A.  
TU Dresden „Verbesserung von Entschwefelungsverfahren in landwirtschaftlichen Biogasanlagen“ Abschlussbericht, Dresden, 02/2005
- /30/ Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. „Handreichung – Biogasgewinnung und -nutzung“ [www.fnr.de](http://www.fnr.de) Gülzow, 2005
- /31/ Steinfatt, K.  
Landwirtschaftliches Technologiezentrum, Außenstelle Forchheim „Energiepflanzen für die Biogasanlage – Realisierbare Erträge und Fruchtfolgegestaltung“ Fachtagung Bioenergie „Gärsubstraterzeugung und Biogasgewinnung“, Herbertingen-Marbach, 02/2008
- /32/ Wikimedia Foundation Inc. San Francisco „BIOGAS – Zusammensetzung“ [www.wikipedia.de](http://www.wikipedia.de) San Francisco, 11/2008
- /33/ EVH – Energieversorgung Halle GmbH „GUS-Gas / Gaszusammensetzung“ Gasbeschaffensdatenblatt, Halle, 05/2004

- /34/ EVH – Energieversorgung Halle GmbH „Verbundgas Nord (H-Gas) / Gaszusammensetzung“  
Gasbeschaffenhheitsdatenblatt, Halle, 07/2004
- /35/ E.ON Avacon AG Helmstedt „Gasanalyse – L-Gas, Ahlten 3“  
Gasbeschaffenhheitsdatenblatt, Helmstedt, 06/2005
- /36/ MAN Nutzfahrzeuge AG „E 2842 LE“, „E 2842 E“ und „E 2876 LE“  
Produktinformationen  
[www.man-engines.com](http://www.man-engines.com)  
München, 2008
- /37/ MDE Dezentrale Energiesysteme GmbH „Auszug aus dem Produktprogramm MDE Baureihe 400“, Produktinformation  
[www.mde-online.com](http://www.mde-online.com)  
Augsburg, 06/2007
- /38/ GE Energy Jenbacher Gasmotoren Österreich „Jenbacher Baureihe 2“ und „Jenbacher Baureihe 3“  
Produktinformationen  
[www.gejenbacher.com](http://www.gejenbacher.com)  
Jenbach, 2008
- /39/ Caterpillar Inc. „Lieferprogramm Industriemotoren“  
Produktinformation  
[www.cat.com](http://www.cat.com)  
Peoria (Illinois, USA), 2008
- /40/ SEVA Energie AG „SEV-CA 180 BG“, „SEV-CA 230 BG“ und „SEV-CA 370 BG“, Produktinformationen  
[www.seva.de](http://www.seva.de)  
Emstek, 21.07.2008
- /41/ MWM - Motorenwerke Mannheim GmbH „TCG 2015“ und „TCG 2016“  
Produktinformationen  
[www.deutzpowersystems.com](http://www.deutzpowersystems.com)  
Mannheim, 08/2007 und 01/2008
- /42/ TEDOM s.r.o. divize MOTORY „TB 158 GV TW 86“  
Produktinformation  
[www.motory.tedom.cz](http://www.motory.tedom.cz)  
Jablonec nad Nisou, 2008
- /43/ Senergie GmbH „Technische Daten und Dimensionen Liebherr G 926“  
Produktinformation  
[www.senergie.de](http://www.senergie.de)  
Heitersheim und Engen, 22.04.2008
- /44/ enertec Kraftwerke GmbH „Produktübersicht Juni 2008“  
Produktinformation  
[www.enertec-kraftwerke.de](http://www.enertec-kraftwerke.de)  
Mühlhausen, 06/2008

- /45/ Deutz AG „1013 – Der Gen Motor“ u. „1015 – Der Gen Motor“  
Produktinformationen  
[www.deutz.de](http://www.deutz.de)  
Köln, 08/2008
- /46/ SEVA Energie AG „SEV-DE 190 GZ“ , „SEV-DE 230 GZ“  
und „SEV-DE 280 GZ“  
Produktinformationen  
[www.seva.de](http://www.seva.de)  
Emstek, 09.07.2008
- /47/ Schnell Zündstrahl-  
motoren GmbH “Zündstrahlaggregate - Pflanzenölaggregate”  
Produktinformation  
[www.schnellmotor.de](http://www.schnellmotor.de)  
Amtzell, 02/2007
- /48/ Schnell Zündstrahl-  
motoren GmbH “Betriebsanleitung: BHKW 65/100 kW”  
Produktinformation  
Amtzell, 07/2004
- /49/ SEVA Energie AG „SEV-DA 350 GZ“  
Produktinformation  
[www.seva.de](http://www.seva.de)  
Emstek, 09.07.2008
- /50/ Brinkmann & Niemeijer  
B. V. AM Twello „Produktinformation – P222LE“  
[www.daewoodiesel.nl](http://www.daewoodiesel.nl)  
Twello (Niederlande), 08/2008
- /51/ AB Volvo Penta „TWD 1211 G: Genset Engine – Gen Pac“  
Produktinformation  
[www.continentalengines.com](http://www.continentalengines.com)  
Göteborg (Schweden), 03/2000
- /52/ Bauer, M.,  
Wachtmeister, G.  
TU München „Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermo-  
torischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und  
Darstellung der Einflussparameter“  
FVV-Vorhaben Nr. 918 „Formaldehyd – Wirk-  
mechanismen“, Bericht zum Forschungsvorhaben  
Heft R547 – 2008, Frankfurt am Main, 10/2008
- /53/ Heseding, M.,  
Verband Deutscher Ma-  
schinen- und Anlagen-  
bau e. V. „Herausforderung zukünftiger Abgasemissionsgrenz-  
werte für Industriemotoren“  
6. FAD-Konferenz, Dresden, 11/2008

## **Impressum**

**Herausgeber:** Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Internet: <http://www.smul.sachsen.de/lfulg>

**Autoren:** Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)  
Fachbereich Maschinenbau/Verfahrenstechnik  
Forschungsinstitut Fahrzeugtechnik  
Prof. Dr.-Ing. Gennadi Zikoridse  
Dr. rer. nat. Uwe Hofmann  
Dipl.-Ing. Torsten Neumann  
Friedrich-List-Platz 1  
01069 Dresden  
Telefon: 0351 462-3344  
Telefax: 0351 462-3476  
E-Mail: [fif@fif.mw.htw-dresden.de](mailto:fif@fif.mw.htw-dresden.de)

**Redaktion:** siehe Autoren

**Endredaktion:** Öffentlichkeitsarbeit  
Präsidialabteilung

**ISSN:** 1867-2868

**Redaktionsschluss:** Februar 2009

Für alle angegebenen E-Mail-Adressen gilt:

Kein Zugang für elektronisch signierte sowie für verschlüsselte elektronische Dokumente.

### **Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlhelfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.