

Raphael Lechner, Nicholas O'Connell, Markus Brautsch

**Identifikation von Einsatz-
möglichkeiten und Potentialen
der Zündstrahltechnologie zur
Verbesserung der Anlageneffizienz
und Wirtschaftlichkeit von
BHKW-Anlagen mit experimen-
teller Überprüfung der Vorteile
an einer Pilotanlage unter realen
Bedingungen im Praxisbetrieb**

F 2943

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9471-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Identifikation von Einsatzmöglichkeiten und Potentialen der Zündstrahltechnologie

Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert

Bearbeitungszeitraum: 12/2011 – 06/2014

Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.41

Autoren: Raphael Lechner
Nicholas O'Connell
Markus Brautsch

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren

Institut für Energietechnik IfE GmbH an der
Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden

Amberg, Januar 2015

Für die fachliche Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit bedanken wir uns bei den Mitgliedern der projektbegleitenden Arbeitsgruppe

Holger Burkhardt, Fa. Burkhardt GmbH,
Dr. Klaus Thuneke, Technologie- und Förderzentrum Straubing,
Andreas Weigel, Fa. KW Energie,
Dr. Ulrich Möhl, Fa. LEA Lean Energy Services GmbH,
Christoph Mentzel, Fa. LEA Lean Energy Services GmbH,
Andreas Windisch, BBSR

und bei der Fa. Burkhardt GmbH.

Langfassung Titel:

Identifikation von Einsatzmöglichkeiten und Potentialen der Zündstrahltechnologie zur Verbesserung der Anlageneffizienz und Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen mit experimenteller Überprüfung der Vorteile an einer Pilotanlage unter realen Bedingungen im Praxisbetrieb

Institut für Energietechnik IfE GmbH an der
Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden
Kaiser-Wilhelm-Ring 23a
92224 Amberg
Tel.: +49 9621 / 482 - 3921
Fax: +49 9621 / 482 - 4921
E-Mail: info@ifeam.de
www.ifeam.de

Amberg, Januar 2015

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis	10
Formelzeichen und Indizes	12
1 Einführung	13
2 Technische Grundlagen	15
2.1 Aufbau eines Blockheizkraftwerks	15
2.2 Diesel-Verfahren	16
2.3 Gas-Otto-Verfahren	18
2.4 Zündstrahl-Verfahren	19
2.5 Kraftstoffe für Zündstrahlmotoren	23
2.5.1 Biogas	23
2.5.2 Erdgas	23
2.5.3 Biomethan	24
2.5.4 Diesekraftstoff / Heizöl EL	24
2.5.5 Pflanzenöl / Pflanzenölmethylester	25
2.6 Energetische Bewertung von Blockheizkraftwerken	26
2.6.1 Energiekennzahlen	26
2.6.2 Leistungsangaben nach DIN ISO 3046-1	28
3 Wichtige rechtliche Rahmenbedingungen	30
3.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	30
3.2 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)	32
3.3 Richtlinie 2012/27/EU (Energieeffizienzrichtlinie)	33
3.4 Energiesteuergesetz (EnergieStG)	33
3.5 Immissionsschutzrechtliche Regelungen	35
4 Marktpotential für die Zündstrahl-Technologie	36
4.1 Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland	36
4.2 Abschätzung des Bestands an Blockheizkraftwerken in Deutschland	38

4.3	Gegenwärtiger Anteil der Zündstrahltechnologie am BHKW-Markt	42
4.4	Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Einsparpotentials	45
5	Vergleich der Zündstrahltechnologie mit dem üblichen Stand der Technik	48
6	Ökonomisches Potential der Zündstrahltechnologie	53
6.1	Methodische Vorgehensweise	53
6.2	Szenarien	57
6.3	Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	58
6.3.1	Erdgasbetrieb (100 % Stromeinspeisung)	58
6.3.2	Erdgasbetrieb (100 % Stromeigennutzung)	60
6.3.3	Biomethanbetrieb (100 % Stromeinspeisung)	62
6.3.4	Ergebnisse der Szenarienrechnungen im Vergleich	64
7	Ökologisches Potential der Zündstrahltechnologie	66
7.1	Methodische Vorgehensweise	66
7.1.1	Primärenergetische Betrachtung	66
7.1.2	CO ₂ -Bilanzierung	68
7.2	Ergebnisse der ökologischen Betrachtung	69
7.2.1	Primärenergieeinsparung	69
7.2.2	CO ₂ -Bilanz	71
8	Fazit und Zusammenfassung der Potentialuntersuchung	74
9	Verifizierung der Potentiale im Praxisbetrieb	77
9.1	Beschreibung der Versuchsanlage	77
9.2	Überblick über die verwendeten Messmethoden	80
9.2.1	Wirkungsgrad- und Nutzungsgradbestimmung	80
9.2.2	Emissionsmessung	81
9.2.3	Motorindizierung	81
9.3	Ergebnisse zur Wirkungsgradbestimmung	83
9.3.1	Erzielbare Wirkungsgrade bei verschiedenen Betriebsmodi	83
9.3.2	Einfluss von Alterungseffekten auf die Wirkungsgrade	86
9.3.3	Nutzungsgradbestimmung	88
9.4	Emissionsverhalten	90

9.4.1	Emissionsverhalten (Rohabgas) im Zündstrahl-Betrieb.....	90
9.4.2	Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Betriebsarten.....	93
9.4.3	Emissionsminderung	95
9.5	Verbrennungsanalyse	98
9.5.1	Vergleich zwischen Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb.....	98
9.5.2	Einfluss des Einspritzzeitpunkts.....	103
9.5.3	Einfluss der Zündölmenge	105
9.6	Evaluierung des Betriebsverhaltens	107
10	Verifizierung der Wirtschaftlichkeits- und Effizienzvorteile	111
10.1	Überprüfung der Wirtschaftlichkeit im Praxisbetrieb.....	111
10.2	Vergleich der Praxis-Wirkungsgrade mit Gas-Otto-BHKW.....	113
11	Zusammenfassung	114
	Quellenangaben	120
	Anhang 1: Wichtige Vergütungsregelungen für Strom aus Biomasse nach EEG 2009 und EEG 2012	124
	Anhang 2: Zuschläge nach KWKG in Cent/kWh (Novelle 2012)	125
	Anhang 3: Festgelegte Exponenten zur Leistungsbestimmung nach DIN ISO 3046-1	126
	Anhang 4: Jährl. abgesetzte BHKW in Deutschland nach Leistung	127
	Anhang 5: Jährl. abgesetzte BHKW in Deutschland nach Modulzahl	128
	Anhang 6: Kenndaten der untersuchten BHKW (Stand 2012).....	129
	Anhang 7: Kenndaten der untersuchten BHKW (Stand 2014).....	130
	Anhang 8: Datenblatt Burkhardt Blockheizkraftwerk ECO 240 Zündstrahl-Biomethan	131
	Anhang 9: Erdgasqualität während des Projektzeitraums [Fergas2014]	132
	Anhang 10: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 1, 06.03.13 bis 12.04.13.....	133
	Anhang 11: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 2, 12.04.13 bis 23.01.14	134
	Anhang 12: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 3, 23.01.14 bis 07.04.14.....	135
	Anhang 13: Neu zugelassene KWK-Anlagen nach Anlagenleistung.....	136
	Anhang 14: Neu zugelassene KWK-Anlagen nach Modulzahl	137
	Anhang 15: Verwendete Messtechnik.....	138
	Anhang 16: Förderfähige Strommenge nach KWKG	141

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Blockheizkraftwerks.....	15
Abbildung 2: Arbeitsweise eines 4-Takt-Dieselmotors [Bosch2004].....	17
Abbildung 3: Arbeitsweise eines 4-Takt-Ottomotors [Reif2014].....	19
Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Zündstrahlmotors.....	21
Abbildung 5: Förderfähige KWK-Stromengen nach KWKG (berechnet aus [BAFA2014]).....	37
Abbildung 6: Leistung neu gemeldeter KWK-Anlagen 2009 – 2013 [BAFA2014].....	39
Abbildung 7: Anzahl neu gemeldete KWK-Anlagen 2009 – 2013 [BAFA2014].....	39
Abbildung 8: Anlagenleistung neu zugelassener kleiner KWK-Anlagen nach KWKG [BAFA2014]....	40
Abbildung 9: Anzahl neu zugelassener kleiner KWK-Anlagen nach KWKG [BAFA2014].....	40
Abbildung 10: Gesamtleistung der installierten fossil betriebenen KWK-Anlagen (berechnet aus [BAFA2014]).....	41
Abbildung 11: Gesamtanzahl der installierten fossil betriebenen KWK-Anlagen (berechnet aus [BAFA2014]).....	42
Abbildung 12: Marktanteil der Zündstrahl-BHKW Hersteller am gesamten BHKW-Markt nach verkaufter elektrischer Leistung (Daten aus [E&M2011], [E&M2012], [E&M2013]).....	44
Abbildung 13: Marktanteil der Zündstrahl-BHKW Hersteller am gesamten BHKW-Markt nach verkaufter Modulzahl (Daten aus [E&M2011], [E&M2012], [E&M2013]).....	44
Abbildung 14: Kumuliertes Energieeinsparpotential für die Jahre 2009 – 2013.....	46
Abbildung 15: Kumuliertes CO ₂ -Einsparpotential für die Jahre 2009 – 2013.....	47
Abbildung 16: Kumuliertes Kosteneinsparpotential für die Jahre 2009 – 2013.....	47
Abbildung 17: Leistung der untersuchten BHKW Stand 2012.....	49
Abbildung 18: Leistung der untersuchten BHKW Stand 2014.....	49
Abbildung 19: Vergleich der Wirkungsgrade der untersuchten BHKW Stand 2012.....	50
Abbildung 20: Vergleich der Wirkungsgrade der untersuchten BHKW Stand 2014.....	50
Abbildung 21: Einnahmen bzw. Ausgaben für erdgasbetriebene BHKW (100% Einspeisung).....	59
Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung (100 % Einspeisung).....	59
Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises (100 % Einspeisung).....	60

Abbildung 24: Einnahmen bzw. Ausgaben für erdgasbetriebene BHKW (100% Eigennutzung)	61
Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung (100 % Stromeigennutzung).....	62
Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises (100 % Stromeigennutzung).....	62
Abbildung 27: Einnahmen bzw. Ausgaben für biomethanbetriebene BHKW (100 % Einspeisung)	63
Abbildung 28: Sensitivitätsanalyse für biomethanbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung	64
Abbildung 29: Sensitivitätsanalyse für biomethanbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises.....	64
Abbildung 30: Vergleich der Wärmegestehungskosten in den verschiedenen Szenarien	65
Abbildung 31: Primärenergieeinsparung des Zündstrahl-BHKWs im Vergleich mit Gas-Otto-BHKW (Erdgasbetrieb und 100 % Stromeinspeisung).....	70
Abbildung 32: Primärenergieeinsparung des Zündstrahl-BHKWs im Vergleich mit Gas-Otto-BHKW (Erdgasbetrieb und 100 % Stromeigenverbrauch).....	71
Abbildung 33: Spezifische CO ₂ -Emissionen im Erdgasbetrieb (100 % Stromeinspeisung)	72
Abbildung 34: Spezifische CO ₂ -Emissionen im Erdgasbetrieb (100 % Stromeigenverbrauch).....	72
Abbildung 35: Spezifische CO ₂ -Emissionen im Biomethanbetrieb (100 % Stromeinspeisung).....	73
Abbildung 36: Zündstrahl-BHKW-Prüfstand.....	78
Abbildung 37: Schema Zündstrahl-BHKW	78
Abbildung 38: Darstellung der Kolbenposition in Abhängigkeit des Kurbelwinkels	82
Abbildung 39: Elektrischer Wirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb.....	84
Abbildung 40: Thermischer Wirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb.....	85
Abbildung 41: Gesamtwirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb.....	85
Abbildung 42: Vergleich des elektrischen Wirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden..	87
Abbildung 43: Vergleich des thermischen Wirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden .	87
Abbildung 44: Vergleich des Gesamtwirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden	88
Abbildung 45: Vergleich der Nutzungsgrade in den verschiedenen Betrachtungszeiträumen	89
Abbildung 46: CO-Emissionen im Zündstrahlbetrieb (vor Katalysator) bezogen auf 5 Vol-% Restsauerstoff.....	91
Abbildung 47: NO _x -Emissionen im Zündstrahlbetrieb	91

Abbildung 48: Formaldehydemissionen (vor Katalysator) im Zündstrahlbetrieb.....	92
Abbildung 49: Methanemissionen (vor Katalysator) im Zündstrahlbetrieb.....	93
Abbildung 50: CO-Emissionen (vor Katalysator) bei verschiedenen Betriebsmodi	93
Abbildung 51: NO _x -Emissionen bei verschiedenen Betriebsmodi.....	94
Abbildung 52: Minderung der CO-Emissionen durch den Oxidationskatalysator	97
Abbildung 53: Minderung der Formaldehydemissionen durch den Oxidationskatalysator	97
Abbildung 54: Druckverläufe bei 200 kW im Zündstrahlbetrieb	99
Abbildung 55: Druckverläufe bei 200 kW im Flüssigkraftstoffbetrieb	99
Abbildung 56: Injektorstrom und Zylinderdruckverlauf bei 200 kW im Zündstrahlbetrieb.....	100
Abbildung 57: Injektorstrom und Zylinderdruckverlauf bei 200 kW im Flüssigkraftstoffbetrieb.....	100
Abbildung 58: Vergleich des Heizverlaufs im Zündstrahl- und Pflanzenölbetrieb bei 200 kW	102
Abbildung 59: Vergleich des summierten Heizverlaufs im Zündstrahl- und Pflanzenölbetrieb bei 200 kW.....	102
Abbildung 60: Zylinderdruckverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit des Einspritzzeitpunktes .	104
Abbildung 61: Heizverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit des Einspritzzeitpunktes.....	104
Abbildung 62: Zylinderdruckverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge	106
Abbildung 63: Heizverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge	106
Abbildung 64: Abgasemissionen im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge.....	107
Abbildung 65: Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade im Praxisbetrieb.....	113

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Zündstrahltechnologie mit Gas-Otto-Motoren	22
Tabelle 2: Typische Heiz- und Brennwerte für unterschiedliche Energieträger [Friedrichs2002], [DIN 51603-1], [DIN 51605], [Kaltschmitt2009]	25
Tabelle 3: Energiesteuerentlastung für KWK-Anlagen gemäß EnergieStG [EnergieStG]	34
Tabelle 4: Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 bezogen auf 5 Vol-% Sauerstoff [TA Luft] .	35
Tabelle 5: KWK-Netto-Stromerzeugung der Jahre 2002 bis 2010, Datenquelle [Prognos2011] [IÜNB2014]	37
Tabelle 6: Brennstoff- und Strompreisannahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	56
Tabelle 7: Angenommene Investitionskosten für Zündstrahl-BHKW Burkhardt ECO 240	56
Tabelle 8: Referenzwirkungsgrade nach Richtlinie 2012/27/EG	67
Tabelle 9: Korrekturfaktoren nach Durchführungsbeschluss 2011/877/EU	67
Tabelle 10: CO ₂ -Äquivalente in g/kWh Endenergie (Daten aus GEMIS v4.9)	69
Tabelle 11: Technische Daten der Pilotanlage	80
Tabelle 12: Ergebnisse der Nutzungsgradbetrachtung über Gesamtzeitraum	90
Tabelle 13: Ergebnisse der Schmierölanalysen	110
Tabelle 14: Überprüfung der Wirtschaftlichkeitsprognose mit den tatsächlichen Energieumsätzen ..	112

Abkürzungsverzeichnis

AG	Aktiengesellschaft
AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.
ASUE	Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMVBS	Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BN	Basenzahl
C	Kohlenstoff
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEG	Erneuerbare Energie Gesetz
EEWärmeG	Erneuerbare Energie Wärme Gesetz
EEX	European Energy Exchange
EnergieStG	Energiesteuergesetz
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EU	Europäische Union
E&M	Energie & Management
FTIR	Fourier-Transform-Infrarotspektrometer
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
H bzw. H ₂	Wasserstoff
H-Gas	high (calorific) gas
H ₂ O	Wasser
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
Heizöl EL	leichtes Heizöl
Heizöl S	schweres Heizöl
HKW	Heizkraftwerk
IfE	Institut für Energietechnik
IFNE	Ingenieurbüro für neue Energien
ISO	International Organization for Standardization

IWES	Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
L-Gas	low (calorific) gas
NAWARO	Nachwachsende Rohstoffe
N ₂	Stickstoff
NH ₃	Ammoniak
NO _x	Stickstoffoxide
O ₂	Sauerstoff
OT	oberer Totpunkt
PEE	Primärenergieeinsparung
PQ-Index	Particle Quantifier Index
SCR	Selective Catalytic Reduction
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen		Einheiten	
A_{Br}	Brennstoffanteil	1/min	Umdrehungen pro Minute
b	spez. Kraftstoffverbrauch	a	Jahr
H_u	Heizwert	bar	Bar
H_s	Brennwert	Ct	Cent
\dot{m}	Massenstrom	cm ³	Kubikzentimeter
P	Leistung	€	Euro
p	Druck	g	Gramm
PEE	Primärenergieeinsparung	°C	Grad Celsius
T	Temperatur	°KW	Grad Kurbelwinkel
W	Arbeit / Energie	h	Stunde
VBh	Vollbenutzungsstunden	Hz	Hertz
ϵ_{CO_2}	CO ₂ -Emissionsfaktor	K	Kelvin
λ	Luftverhältniszahl	kg	Kilogramm
η	Wirkungsgrad	kPa	Kilopascal
$\bar{\eta}$	Nutzungsgrad	kW	Kilowatt
σ	Stromkennzahl	kWh	Kilowattstunde
Φ	rel. Luftfeuchte	l	Liter
		m ³	Kubikmeter
		mbar	Millibar
Indizes			
Br	Brennstoff	mg	Milligramm
el	elektrisch	MHz	Megahertz
FWL	Feuerungswärmeleistung	mm	Millimeter
ges	gesamt	MW	Megawatt
th	thermisch	MWh	Megawattstunde
		Nm ³	Normkubikmeter
		ppm	Parts per Million
		%	Prozent
		TWh	Terawattstunde

1 Einführung

Für die zukünftige Entwicklung des Energiemarkts kann der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung eine wichtige Rolle spielen. Zielvorgabe der Bundesregierung ist die Erhöhung des Anteils der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in der Bundesrepublik Deutschland auf 25 Prozent im Jahr 2020 [KWKG2009]. Im Rahmen dieses Zubaus werden neben großen Heizkraftwerken (HKW) auch Blockheizkraftwerke (BHKW) aufgrund ihrer geringen Abschreibungsdauer und ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeiten zur dezentralen Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen [DLR IWES IFNE2012].

Der überwiegende Anteil der Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken erfolgt heutzutage aus gasförmigen Brennstoffen, sowohl leitungsgebunden (Erdgas, Biomethan), als auch nicht-leitungsgebunden (Biogas, Deponiegas, Klärgas). Flüssige Kraftstoffe spielen demgegenüber nur eine untergeordnete Rolle [DLR IWES IFNE2012]. Den größten Anteil an den zur Stromerzeugung eingesetzten Brennstoffen nimmt Erdgas ein, gefolgt von Biogas, Deponiegas und Klärgas und in zunehmendem Maße von Biomethan [DLR IWES IFNE2012]. Als Antriebsaggregate für Blockheizkraftwerke haben sich im Leistungsbereich bis etwa 1 MW_{el} Hubkolben-Verbrennungsmotoren für den Gasbetrieb (Gas-Otto-Motor) und Flüssigkraftstoffbetrieb (Dieselmotor) bewährt, während alternative Technologien wie Brennstoffzellen und Gasturbinen hier derzeit nur für Nischenanwendungen von Bedeutung sind.

Triebkraft für technische Weiterentwicklungen im Bereich der KWK-Technologie ist derzeit v. a. die Forderung nach höherer elektrischer Effizienz vor dem Hintergrund langfristig steigender Brennstoffpreise und dem steigendem Wert elektrischer Energie. Ein interessanter Ansatz zur elektrischen Effizienzsteigerung ist die Verwendung von Zündstrahlmotoren. Diese basieren auf Dieselmotoren und können bedingt durch ihre Bauart sehr hohe elektrische Wirkungsgrade erreichen. Ursprünglich wurde die Zündstrahl-Technologie für die motorische Nutzung von Schwachgasen mit niedrigem Methangehalt und schwankender Qualität entwickelt und konnte sich mittlerweile v. a. im Biogasbereich als Alternative zu Gas-Otto-Motoren etablieren¹. Aufgrund ihrer potentiellen Wirkungsgradvorteile wird die Technologie jedoch zunehmend auch für erdgas- oder biomethanbetriebene BHKW interessant. Ein weiterer entscheidender Vorteil der Zündstrahltechnologie ist die Flexibilität bei der Wahl des Brennstoffs. Je nach Bedarf können die Motoren mit 100 % Flüssigkraftstoff oder mit nahezu 100 % gasförmigen Brennstoffen betrieben werden (bis auf eine geringe zur Zündung erfor-

¹Verbreitet ist die Zündstrahl-Technologie auch im Marinebereich oder in der Öl- und Gasindustrie. Hierfür werden insbesondere im größeren Leistungsbereich Motoren angeboten (z. B. Wärtsilä Dual Fuel Engine im Leistungsbereich ab 7 MW). Diese Anwendungsbereiche sind jedoch nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens und werden daher nicht näher betrachtet.

derliche Menge an flüssigem Zündkraftstoff). Damit ist auch bei Unterbrechung der Gasversorgung ein Weiterbetrieb möglich, z. B. zur Notversorgung oder bei Gasabschaltverträgen.

Ziel des Forschungsvorhabens „Identifikation von Einsatzmöglichkeiten und Potentialen der Zündstrahltechnologie zur Verbesserung der Anlageneffizienz und Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen mit experimenteller Überprüfung der Vorteile an einer Pilotanlage unter realen Bedingungen im Praxisbetrieb“ war es, die potentiellen Vorteile der Zündstrahltechnologie für BHKW-Anwendungen gegenüber Gas-Otto-Motoren herauszuarbeiten und unter realen Bedingungen an einer Pilotanlage zu überprüfen sowie auf ihre Praxistauglichkeit hin zu untersuchen. Der Fokus lag auf Blockheizkraftwerken im elektrischen Leistungsbereich von 50 kW_{el} bis 1 MW_{el}, die sich besonders gut für die Versorgung öffentlicher Liegenschaften (Krankenhäuser, Schwimmbäder, Schulen, Verwaltungsgebäude,...) und kleinerer kommunaler und industrieller Nahwärmenetze eignen. Im Rahmen des Projekts wurden ausschließlich Erdgas-Blockheizkraftwerke betrachtet, da in diesem Bereich das größte Wachstum prognostiziert wird [DLR IWES IFNE2012], aber auch der größte Forschungsbedarf besteht. Im interessierenden Leistungsbereich waren zu Projektbeginn noch keine Zündstrahlaggregate für den Erdgasbetrieb auf dem Markt verfügbar, während für Schwachgase (Biogas, Holzgas,...) die Zündstrahltechnologie bereits etabliert ist. Als Industriepartner konnte die Fa. Burkhardt GmbH gewonnen werden, ein mittelständischer Hersteller von BHKW-Modulen im Leistungsbereich von ca. 150 kW_{el} bis 300 kW_{el}. Die Fa. Burkhardt entwickelt und vertreibt u. a. Zündstrahl-Blockheizkraftwerke auf Dieselmotorbasis für den Betrieb mit Holzgas. Auf Wunsch sind die Aggregate mittlerweile auch für den Betrieb mit Erdgas verfügbar.

Im ersten Projektabschnitt wurden zunächst die verfügbaren Daten zum Bestand an BHKW-Anlagen in Deutschland zusammengestellt und der bisherige Anteil der Zündstrahltechnologie am BHKW-Markt analysiert, um das mögliche Marktpotential dieser Technologie für Erdgas-Anwendungen einschätzen zu können. Anschließend wurde ausgehend von einem konkreten Zündstrahl-BHKW-Modul des Projektpartners Burkhardt GmbH, das zu Projektbeginn kurz vor der Markteinführung stand, das ökonomische und ökologische Potential im Vergleich mit dem heutigen Stand der Technik herausgearbeitet.

In der zweiten Projektphase wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Burkhardt GmbH eine Zündstrahl-BHKW-Pilotanlage zur experimentellen Überprüfung der getroffenen Annahmen aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Pilotanlage wurde über einen Zeitraum von etwa 10.000 Betriebsstunden im Praxisbetrieb erprobt. Dabei wurden u. a. die erreichbaren Wirkungs- und Nutzungsgrade, das Emissionsverhalten, das motorische Verbrennungsverhalten und das Betriebsverhalten evaluiert.

2 Technische Grundlagen

2.1 Aufbau eines Blockheizkraftwerks

Unter dem Begriff Blockheizkraftwerk werden in der Regel kompakte Kraft-Wärme-Kopplungsaggregate zur dezentralen Strom- und Wärmebereitstellung verstanden. Das elektrische Leistungsspektrum reicht dabei von einigen wenigen Kilowatt (Mikro-/Mini-BHKW) bis zu einigen Megawatt.

Ein klassisches Blockheizkraftwerk besteht im Wesentlichen aus einem Verbrennungsmotor – der in der Regel als Hubkolbenmotor ausgeführt ist – und einen Generator zur Stromerzeugung antreibt. Die dabei entstehende Abwärme wird mittels Wärmetauschern aus dem Motorkühlwasser und dem Abgas ausgekoppelt und für Heizzwecke verwendet (vgl. Abbildung 1). Übliche Temperaturen sind bis zu 90 °C im Vorlauf und 70 °C im Rücklauf. Für Sonderanwendungen existieren heißgekühlte Aggregate, die höhere Temperaturen bereitstellen können. Der erzeugte Strom kann entweder im Hausnetz des versorgten Objekts selbst genutzt werden (Stromeigennutzung) oder in ein Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist werden (Stromeinspeisung).

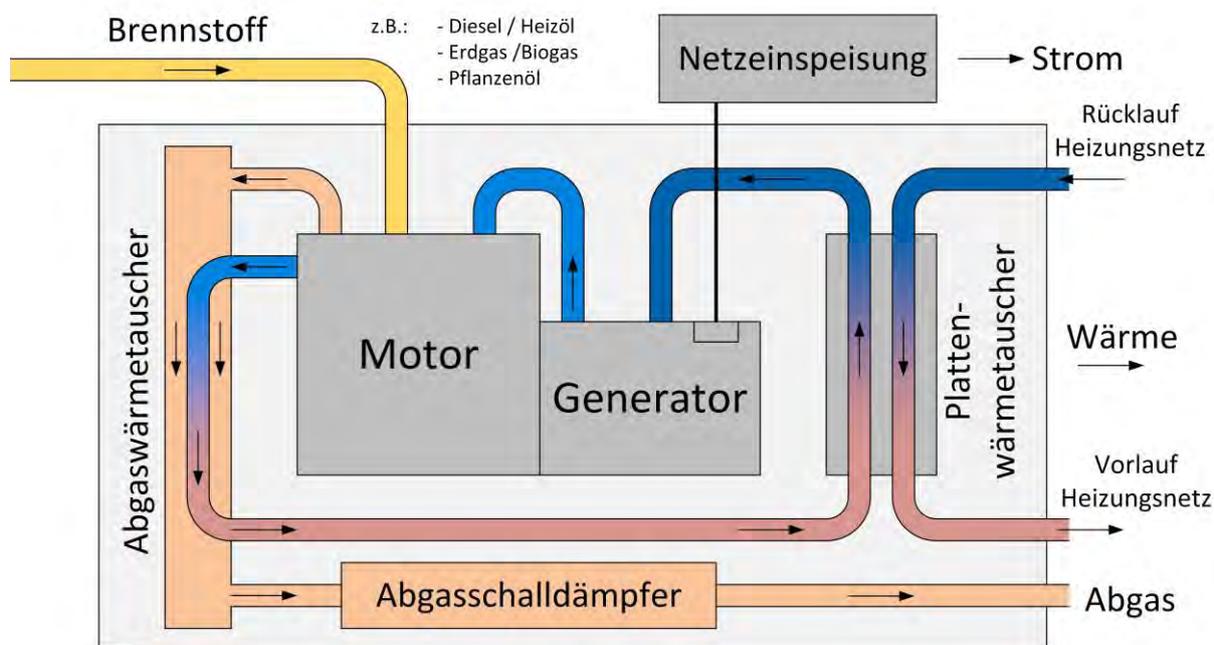


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Blockheizkraftwerks

Für Blockheizkraftwerke werden verschiedene Ausführungen von Verbrennungsmotoren als Antriebsaggregate eingesetzt, je nachdem welche Brennstoffe verwendet werden sollen. Gebräuchliche fossile Brennstoffe für Blockheizkraftwerke sind Heizöl, Erdgas und Flüssiggas, übliche biogene Brennstoffe sind z. B. Rapsöl, Biogas, Biomethan (auf Erdgasqualität aufbereitetes Biogas) oder Deponiegas.

Für Flüssige Brennstoffe werden in der Regel in Dieselmotoren eingesetzt (Selbstzündungsmotor). Gasförmige Brennstoffe werden dagegen meist in sogenannten Gas-Otto-Motoren verwendet (Fremdzündungsmotor). Eine Zwischenform stellt das sogenannten Zündstrahlverfahren dar, bei dem gasförmige Kraftstoffe in einem Dieselmotor durch gezielte Einspritzung einer kleinen Menge Flüssigkraftstoff gezündet und verbrannt werden [BHKW2012].

2.2 Diesel-Verfahren

Der Dieselmotor ist eine Kolbenmaschine, bei der durch Verbrennung eines Kraftstoffes Wärme freigesetzt und in mechanische Arbeit umgewandelt wird. Die Verbrennung findet in einem oder mehreren Zylindern statt, in denen die freigesetzte Energie über einen Kolben in eine Hubbewegung und weiter über eine Pleuelstange in die Rotationsbewegung einer Pleuelwelle umgesetzt wird. Dieselmotoren für Blockheizkraftwerke werden üblicherweise nach dem Viertaktverfahren betrieben, welches durch folgende Phasen bzw. Takte charakterisiert wird²:

1. Ansaugen
2. Verdichtung
3. Arbeitstakt
4. Ausstoßen

Wesentliches Merkmal des Dieselmotors ist die innere Gemischbildung, d. h. die Vermischung von Verbrennungsluft und Kraftstoff findet erst innerhalb der Zylinder statt, nach der Verdichtung der Verbrennungsluft. Beim Ansaugtakt wird Luft über das geöffnete Einlassventil durch die Abwärtsbewegung des Kolbens in den Zylinder gesaugt. Nach Schließen der Gaswechselventile wird durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens die im Zylinder eingeschlossene Luft verdichtet und dabei stark erwärmt. Gegen Ende des Verdichtungstakts wird

² Große Blockheizkraftwerke mit mehreren Megawatt elektrischer Leistung pro Modul arbeiten teilweise auch nach 2-Takt-Verfahren, insbesondere wenn Schiffsdieselmotoren als Antriebsaggregate eingesetzt werden

2.3 Gas-Otto-Verfahren

Für den Betrieb von BHKW mit gasförmigen Kraftstoffen, wie Erd- oder Biogas, werden sogenannte Gas-Otto-Motoren eingesetzt. Der wesentliche Unterschied zum Dieselmotor ist dabei, dass Verbrennungsluft und Brennstoff in der Regel nicht erst im Brennraum miteinander vermischt werden, sondern bereits vor Eintritt in den Zylinder in einem sogenannten Gasmischer zusammengeführt werden (äußere Gemischbildung). Im Gegensatz zum Dieselmotor saugt der Gasmotor also nicht nur Luft, sondern bereits ein zündfähiges Luft-Brennstoff-Gemisch an und wird daher auch als gemischansaugender Motor bezeichnet. Aufgrund der chemisch-physikalischen Eigenschaften von Brenngasen lassen sich diese nicht kontrolliert so hoch verdichten, dass wie beim Dieselmotor eine Selbstzündung stattfinden kann. Stattdessen muss das Gemisch aktiv durch Zufuhr einer geringen Energiemenge, üblicherweise durch einen Zündfunken, gezündet werden (Fremdzündung).

Wie bei den Dieselmotoren dominiert auch bei den Gas-Otto-Motoren das Viertakt-Verfahren. Das Luft-Kraftstoff-Gemisch wird dabei über das geöffnete Einlassventil durch die Abwärtsbewegung des Kolbens in den Zylinder gesaugt. Danach schließen die Ventile und es findet die Verdichtung des im Zylinder eingeschlossenen Luft-Kraftstoff-Gemisches durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens statt. Zu Beginn des Arbeitstakts wird das angesaugte Gemisch mittels eines elektrischen Funkens gezündet (Funkenzündung mit Zündkerze) und verbrennt. Dies führt zu einem weiteren Anstieg der Temperatur im Zylinder und zu einer Erhöhung des Drucks im Zylinder, wobei der Kolben durch den Druck nach unten getrieben wird. Im Ausstoßtakt werden die Abgase durch die Aufwärtsbewegung des Kolbens durch das geöffnete Auslassventil ausgestoßen [Eichlseder2008].

Im Gegensatz zu Dieselmotoren wird bei Gas-Otto-Motoren die Zusammensetzung des Brennstoff-Luft-Gemisches über einen Gasmischer präzise eingestellt und konstant gehalten. Die Leistungsregelung erfolgt über die Menge des angesaugten Brennstoff-Gas-Gemisches und nicht über dessen Zusammensetzung (Quantitätsregelung). Otto-Motoren für kleinere Blockheizkraftwerke (Mini-KWK-Anlagen) werden in der Regel mit stöchiometrischem Luft-verhältnis betrieben, d. h. es wird stets genau so viel Luft beigemischt, wie zur vollständigen Umsetzung des Brennstoffs erforderlich ist ($\lambda = 1$). Größere Gas-Otto-Motoren arbeiten dagegen aus prozesstechnischen Gründen ähnlich wie Dieselmotoren mit höherem Luftüberschuss (sogenannte Magermotoren).

- b) Beim zweiten Verfahren erfolgt die Zufuhr des gasförmigen Brennstoffs wie beim Gas-Otto-Motor über einen Gasmischer vor dem Brennraum (äußere Gemischbildung), es wird also ein bereits zündfähiges Gemisch angesaugt. Im Unterschied zum Otto-Motor erfolgt die Zündung des Kraftstoffs jedoch nicht über eine Zündkerze, sondern durch die Einspritzung einer geringen Menge Flüssigkraftstoffs. Das Brennverfahren entspricht dabei weitestgehend dem eines mit Luftüberschuss, also mager, betriebenen Gas-Otto-Motors. Auch hier kann der Motor grundsätzlich weiterhin als konventioneller Dieselmotor ohne Gaszufuhr betrieben werden. Da sich dieses Verfahren technologisch vergleichsweise einfach umsetzen lässt, wird es bei kleineren Blockheizkraftwerken bis zu ca. 1 MW elektrischer Leistung bevorzugt eingesetzt. Abbildung 4 zeigt die schematische Darstellung eines solchen Zündstrahlmotors.

Das Zündstrahlverfahren wird häufig für Schwachgase mit niedrigem Methangehalt (z. B. Biogas oder Holzgas) eingesetzt, die bei hohem Luftüberschuss durch einen Zündkerzenfunken nicht mehr sicher gezündet werden können. Über den Zündölkraftstoff kann eine wesentlich höhere Zündenergiemenge in den Brennraum eingebracht werden als bei Funkenzündung. Zudem kann das Verhältnis von gasförmigem und flüssigem Brennstoff nahezu beliebig variiert werden. Das Zündstrahlverfahren ermöglicht eine sichere Zündung auch sehr magerer Gemische, was einen Betrieb mit hohen Verdichtungsverhältnissen möglich macht (vgl. Dieselmotor). Das Verdichtungsverhältnis ist eine der Haupteinflussgrößen auf den Wirkungsgrad von Motoren. Je höher dieses ist, umso höher ist in der Regel auch der theoretisch erreichbare Motorwirkungsgrad. Gas-Otto-Motoren benötigen demgegenüber in der Regel deutlich fettere Gemische zur sicheren Zündung. Diese sind jedoch weniger klopfest, sodass die Verdichtung nicht so hoch gewählt werden kann, was die erreichbaren Wirkungsgrade des Motors limitiert.

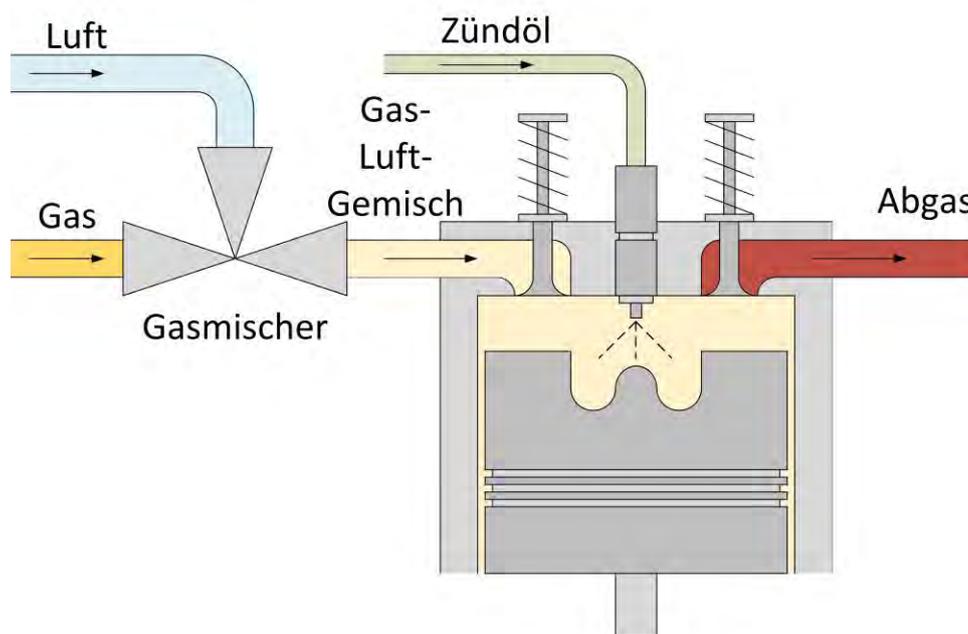


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Zündstrahlmotors

Im Gegensatz zu Gas-Otto-Motoren weisen Zündstrahlmotoren aufgrund des dieselmotorischen Brennverfahrens vergleichsweise hohe Stickstoffoxidemissionen auf, die sich nicht durch einfache 3-Wege- oder Oxidationskatalysatoren mindern lassen, sondern SCR-Katalysatoren erfordern. Bei SCR-Katalysatoren wird dem Abgas ein Reduktionsmittel (in der Regel wässrige Harnstofflösung) zudosiert, mit dem an einer katalytisch aktiven Oberfläche Stickstoffoxide zu Stickstoff reduziert und damit unschädlich gemacht werden.

Da es sich bei einem Zündstrahlmotor in der Basis um einen Dieselmotor handelt, ist es grundsätzlich möglich, den Motor bei Bedarf auch ausschließlich mit Flüssigkraftstoff zu betreiben [Grünig2010], z. B. für den Notbetrieb bei Störung der Gasversorgung oder bei Gasabschaltverträgen. Zündstrahlmotoren werden v. a. im kleinen und mittleren Leistungsbe- reich meist von serienmäßig hergestellten Dieselmotoren abgeleitet, die in großen Stückzahlen verfügbar sind. Dadurch können gegenüber den in vergleichsweise kleinen Stückzahlen hergestellten Gas-Otto-Motoren Kostenvorteile realisiert werden. Zudem sind Ersatzteile oft kostengünstiger und schneller verfügbar [Bioenergie2012]. Demgegenüber ist die Haltbarkeit der Motoren aufgrund der hohen Belastung oft geringer [FNR2005]. Im Vergleich mit Gas-Otto-Motoren sind bei Zündstrahlaggregaten zusätzliche Investitionen in die Anlagenperipherie erforderlich. Diese umfassen die Lagerung und Bereitstellung des Zündöls (Tanklager) sowie gegebenenfalls Kosten für Abgasminderungsmaßnahmen (SCR-Katalysator, Versorgung mit Reduktionsmittel). In Tabelle 1 Vorteile und Nachteile der Zündstrahltechnologie gegenüber der Gas-Otto-Motortechnologie zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Vergleich der Zündstrahltechnologie mit Gas-Otto-Motoren

Zündstrahlmotor	Gas-Otto-Motor
Höherer Verdichtungsdruck → höherer elektrischer Wirkungsgrad	Hoher thermischer und gesamter Wirkungsgrad, aber in der Regel geringerer elektrischer Wirkungsgrad
Höhere Verdichtung → höhere Motorbelastung, ggf. geringere Standzeiten	Höhere Standzeiten des Motors als bei Zündstrahlaggregaten
Aufwändige Abgasnachbehandlung mit SCR-Katalysatoren notwendig → weitere Anschaffungs- und Betriebskosten	Einfache Abgasreinigung mit 3-Wege-Katalysator oder Magermotorkonzept
Betrieb unabhängig vom Methangehalt → Einsatz von Schwachgasen möglich	Benötigen einen Mindestmethangehalt von ca. 45 % → Einsatz von Schwachgasen ggf. nur eingeschränkt möglich
Flexible Brennstoffwahl je nach Marktlage, aber bei derzeitigen Marktpreisen Zündöl oft teurer als Hauptbrennstoff	Abhängigkeit von einem einzigen Brennstoff
Notversorgung bei Ausfall oder Abschaltung der Gasversorgung möglich	Kein Not- / Ersatzbetrieb bei Ausfall der Gasversorgung
Basismotor potentiell preisgünstiger als Gas-Otto-Motor, da Basismotoren in hoher Stückzahl gefertigt	Speziell entwickelte Gasmotoren aufgrund geringer Stückzahlen i.d.R. teurer als Zündstrahlmotoren
Externes Brennstofflager für Zündöl notwendig, doppelte Brennstoffinfrastruktur	Kein weiterer Brennstoff notwendig
Einspritzsystem im Vergleich zum Zündsystem von Gas-Otto-Motoren teuer in Anschaffung und Unterhalt (Einspritzdüsen neigen zum Verkoken, Filterwechsel erforderlich, Einspritzpumpen und Injektoren müssen regelmäßig getauscht werden)	Bei einfachen Motoren hohe Standzeiten der Zündkerzen und günstige Ersatzteilpreise, bei elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-Motoren können Zündkerzenverschleiß und Kosten für Zündkerzen höher sein
Ersatzteile bei Basismotoren aus der Großserie günstig und schnell verfügbar	Teilweise hohe Ersatzteilpreise und lange Lieferzeiten

2.5 Kraftstoffe für Zündstrahlmotoren

2.5.1 Biogas

Biogas entsteht durch anaerobe mikrobielle Vergärung von organischen Stoffen in Biogasanlagen. Es besteht aus Methan (CH_4) und Kohlendioxid (CO_2). Außerdem enthält es, je nachdem eingesetzten Substraten, Nebenbestandteile wie Wasserdampf (H_2O), Stickstoff (N_2), Sauerstoff (O_2), Wasserstoff (H_2), Ammoniak (NH_3) und Schwefelwasserstoff (H_2S). Energetisch verwertbar ist im Biogas lediglich der Methananteil, d. h. je höher dieser ist, umso höher ist auch der Heizwert des Gases. Typische Methangehalte liegen im Bereich von 45 % bis 75 %, typische Heizwerte im Bereich 4,5 kWh/m³ bis 7,5 kWh/m³ [Kaltschmitt2009] (vgl. Tabelle 2). Für die Nutzung von Biogas als Brennstoff, z. B. für Motoren, müssen aggressive Gasbestandteile, wie Schwefelwasserstoff oder Ammoniak, abgeschieden werden, um die Aggregate nicht zu schädigen.

In Deutschland wird Biogas aus wirtschaftlichen Gründen in erster Linie zur dezentralen Stromerzeugung in Blockheizkraftwerken eingesetzt. Dabei konnte sich die Zündstrahltechnologie aufgrund ihrer hohen elektrischen Wirkungsgrade als Alternative zu Gas-Otto-BHKWs etablieren.

2.5.2 Erdgas

Erdgas ist ein fossiler Energieträger der weltweit vorkommt. Er besteht zu 75 % bis 90 % aus Methan (CH_4) und weiteren Alkanen in geringen Anteilen (Ethan, Propan, Butan) sowie Stickstoff (N_2) und Kohlendioxid (CO_2). Typische Heizwerte liegen im Bereich von 9,0 kWh/m³ (L-Gas) bis zu 12,6 kWh/m³ (H-Gas). Aufgrund des günstigen H/C-Verhältnisses von ca. 4:1 wird bei der Verbrennung von Erdgas weniger CO_2 freigesetzt als bei der Verbrennung von Heizöl. Typische Heizwerte von Erdgas finden sich in Tabelle 2.

Erdgas hat viele verschiedene Anwendungsmöglichkeiten und wird u. a. im Haushalt, in der Industrie und im Energiesektor verwendet. Im Verkehrssektor stellt Erdgas eine Alternative zu herkömmlichen Flüssigkraftstoffen dar [Gaswärme2012]. Die Erdgasversorgung erfolgt in Deutschland über das nationale Gasnetz. Je nach Versorgungsgebiet weist es unterschiedliche Gaszusammensetzungen und damit unterschiedliche thermodynamische Eigenschaften auf (Heizwert, Methanzahl, Wobbe-Index,...) [Eichlseder2008]. Dies muss bei der Abstimmung von Blockheizkraftwerken auf den Erdgasbetrieb beachtet werden

2.5.3 Biomethan

Unter dem Begriff Biomethan (auch als Bio-Erdgas bezeichnet) versteht man Methan, das aus biogenen Ausgangsstoffen erzeugt wurde. Biomethan wird heute zum größten Teil aus Biogas gewonnen, das gereinigt und durch CO₂-Abscheidung auf einen Methananteil von > 90 % aufkonzentriert wird.

Die Aufbereitung erlaubt die Einspeisung von Biomethan in die vorhandenen Erdgasnetze, sodass es verteilt und bilanziell an anderer Stelle wieder entnommen werden kann. Biomethan unterscheidet sich in diesem Fall lediglich durch seine Herkunft von Erdgas, physikalisch handelt es sich für den Kunden um das gleiche Gas (Heizwerte vgl. Tabelle 2). Die Qualität beider Kraftstoffe ist identisch und entspricht der Erdgas-Zusammensetzung an der jeweiligen Entnahmestelle.

Die ermöglicht es Erzeugung und Nutzung regenerativer Brennstoffe zeitlich und örtlich voneinander zu entkoppeln. Aufgrund der vergleichsweise hohen Brennstoffkosten, bei gleichzeitig hohen Einspeisevergütungen nach EEG für den erzeugten Strom, kann Biomethan ein interessanter Brennstoff für Zündstrahl-BHKW sein, da sich die hohen elektrischen Wirkungsgrade dieser Technologie hier besonders günstig auf die Wirtschaftlichkeit auswirken.

2.5.4 Dieselkraftstoff / Heizöl EL

Dieselmotoren bestehen aus einer Mischung verschiedener Kohlenwasserstoffe und wird durch Destillation aus Erdöl gewonnen. Typische Heizwerte liegen im Bereich von 10 kWh/kg [DIN 51603-1] (vgl. Tabelle 2). In Wärmeerzeugern wird typischerweise Heizöl EL (leichtes Heizöl) eingesetzt, das im Wesentlichen Dieselmotoren entspricht, jedoch für die Verwendung zur Energiebereitstellung in Feuerungsanlagen, Stromaggregaten und Blockheizkraftwerken steuerbegünstigt ist.

In größeren BHKW-Aggregaten, die mit schweröltauglichen Motoren ausgerüstet sind, können auch mindere Heizölqualitäten, wie z. B. Heizöl S eingesetzt werden. In der Regel handelt es sich dabei um Anlagen mit mehreren Megawatt elektrischer Leistung auf Basis von Schiffsdieselmotoren. In Zündstrahlmotoren werden Heizöle üblicherweise in Verbindung mit Erdgas oder Flüssiggas als Hauptbrennstoff eingesetzt. Aus technischer Sicht können Heizöle auch als Zündöle für andere Gase genutzt werden, in der Praxis ist dies für biogene Gase, Deponie- Klär und Grubengas jedoch durch gesetzliche Regelungen (EEG) eingeschränkt.

2.5.5 Pflanzenöl / Pflanzenölmethylester

Pflanzenöle bestehen aus Fettsäuremolekülen, die mit Glycerin sogenannten Triglyceride bilden. Gewonnen werden sie mittels mechanischer oder chemischer Extraktion aus Ölfrüchten und -saaten, wie z. B. Raps, Soja oder Kokos. Pflanzliche Öle können als Alternative zu Dieselkraftstoff bzw. Heizöl in Verbrennungsmotoren eingesetzt werden, weisen jedoch davon abweichende chemisch-physikalische Kraftstoffparameter auf, sodass in der Regel eine Umrüstung des Motors notwendig ist, z. B. durch Anpassung des Einspritzsystems und der Einspritzparameter (Einspritzdruck, Einspritzzeiten,...). In Deutschland werden aus Gründen der Verfügbarkeit aus der großtechnischen Herstellung meist teil- oder vollraffinierte Raps-, Soja-, oder Palmöle als Kraftstoff für Blockheizkraftwerke verwendet.

Pflanzenölmethylester werden aus Pflanzenölen durch die Auftrennung der Triglyceride in einzelne Fettsäuren gewonnen. Gegenüber reinen Pflanzenölen weisen Pflanzenölmethylester eine deutlich geringere Viskosität auf, sodass sie in den meisten Fällen ohne größere Modifikationen in konventionellen Dieselmotoren eingesetzt werden können.

Typische Heizwerte von Pflanzenölkraftstoffen liegen im Bereich von 10 kWh/kg [DIN 51605] (vgl. Tabelle 2). Für Zündstrahlmotoren haben Pflanzenölkraftstoffe in erster Linie als Zündkraftstoff Bedeutung, da bei Einsatz biogener Brenngase wie Holzgas, Biogas oder Biomethan auch das Zündöl aus biogenen Quellen stammen muss, um einen Anspruch auf die Stromvergütung nach EEG zu erlangen.

Tabelle 2: Typische Heiz- und Brennwerte für unterschiedliche Energieträger [Friedrichs2002], [DIN 51603-1], [DIN 51605], [Kaltschmitt2009]

Brennstoff	Einheit	Heizwert H_i	Brennwert H_s
Erdgas [*]	kWh/m ³	9,0 – 12,6	10,0 – 14,0
Biomethan [*]	kWh/m ³	9,0 – 12,6	10,0 – 14,0
Biogas	kWh/m ³	4,5 – 7,5	-
Heizöl EL	kWh/kg	10,0	10,9
Pflanzenöl	kWh/kg	10,2	11,1

^{*}: je nach Versorgungsgebiet

2.6 Energetische Bewertung von Blockheizkraftwerken

2.6.1 Energiekennzahlen

Für die energetische Bilanzierung von Blockheizkraftwerken sind in vorliegendem Rahmen in erster Linie die folgenden Größen relevant:

- Elektrischer Wirkungsgrad

$$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{P_{Br}} = \frac{P_{el}}{\dot{m}_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

- Thermischer Wirkungsgrad

$$\eta_{th} = \frac{P_{th}}{P_{Br}} = \frac{P_{th}}{\dot{m}_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

- Gesamtwirkungsgrad

$$\eta_{ges} = \frac{P_{el} + P_{th}}{P_{Br}} = \frac{P_{el} + P_{th}}{\dot{m}_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

- Elektrischer Nutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{W_{el}}{W_{Br}} = \frac{W_{el}}{m_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

- Thermischer Nutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{th} = \frac{W_{th}}{W_{Br}} = \frac{W_{th}}{m_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

- Gesamtnutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{W_{el} + W_{th}}{W_{Br}} = \frac{W_{el} + W_{th}}{m_{Br}H_i} \quad (\text{Gleichung 2.6})$$

- Leistungsbezogene Stromkennzahl

$$\sigma_P = \frac{P_{el}}{P_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}} \quad (\text{Gleichung 2.7})$$

- Arbeitsbezogene Stromkennzahl

$$\sigma_W = \frac{W_{el}}{W_{th}} = \frac{\bar{\eta}_{el}}{\bar{\eta}_{th}} \quad (\text{Gleichung 2.8})$$

- Elektrische Vollbenutzungsstunden

$$VBh_{el} = \frac{W_{el}}{P_{el}} \quad (\text{Gleichung 2.9})$$

- Thermische Vollbenutzungsstunden

$$VBh_{th} = \frac{W_{th}}{P_{th}} \quad (\text{Gleichung 2.10})$$

Im Rahmen des vorliegenden Berichts wird der Begriff Wirkungsgrad als leistungsbezogener Wert definiert, der in einem stationären Betriebspunkt über ein festgelegtes Messintervall ermittelt wird. Demgegenüber wird unter dem Begriff Nutzungsgrad ein arbeitsbezogener Wert verstanden, der über einen definierten längeren Betrachtungszeitraum ermittelt wird – beispielsweise über ein Jahr – und in dem Anfahr- und Abfahrvorgänge sowie Betriebszustände wechselnder Leistung enthalten sind. Zur leichteren Unterscheidung wird im vorliegenden Bericht der Nutzungsgrad analog dem Wirkungsgrad in die Komponenten elektrischer, thermischer und gesamter Nutzungsgrad aufgegliedert. Diese Definition weicht etwas von der für KWK-Anlagen gebräuchlichen Terminologie (z. B. nach AGFW Arbeitsblatt FW 308) ab, in der der Begriff Nutzungsgrad unabhängig von den erzeugten Produkten (Strom und Wärme) verwendet wird und insgesamt abgegebene Energie im Verhältnis zum Energieeinsatz bezeichnet (siehe Gleichung 2.6) [AGFW FW308]. Analog der Unterscheidung in Wirkungsgrad und Nutzungsgrad lässt sich zwischen einer leistungsbezogenen Stromkennzahl in einem stationären Betriebspunkt und der arbeitsbezogenen Stromkennzahl über einen längeren Betrachtungszeitraum unterscheiden.

Eine weitere wichtige Kenngröße sind die jährlichen Vollbenutzungsstunden als Maß für die Auslastung des BHKW-Moduls. Eine BHKW-Anlage könnte bei ununterbrochenem Dauerbetrieb mit Nennleistung maximal 8.760 Vollbenutzungsstunden im Jahr erreichen, was in der Regel jedoch schon aufgrund der notwendigen Wartungsarbeiten nicht der Fall sein wird. Typische Vollbenutzungsstunden für den wärmegeführten Betrieb liegen im Bereich 4.000 bis 6.000 Stunden pro Jahr. Unterschieden werden kann zwischen elektrischen und thermischen Vollbenutzungsstunden, je nachdem ob auf die elektrische oder thermische Nennleistung der Anlage abgestellt wird. Bei BHKW-Anlagen ist der Bezug auf die elektrische Leistung üblich und wird so auch in einschlägigen Rechtsvorschriften angewendet, wie z. B. dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz (KWKG).

2.6.2 Leistungsangaben nach DIN ISO 3046-1

Die Norm DIN ISO 3046-1 dient der Spezifizierung der Standardbezugsbedingungen und der Festlegung und Erläuterung der Methoden zur Leistungsermittlung für Hubkolbenverbrennungsmotoren, die mit gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen betrieben werden. Sie ist gültig für Verbrennungsmotoren zum Antrieb stationärer Anlagen, Schienenfahrzeuge und Schiffe. Für Blockheizkraftwerke wird die DIN ISO 3046 in erster Linie für die Normierung der Angaben zur Leistung und zum spezifischen Kraftstoffverbrauch bzw. Wirkungsgrad auf eine einheitliche, vom Aufstellort des Aggregats unabhängige, Bezugsbasis angewendet. Als Standardbezugsbedingungen sind folgende Werte festgelegt:

Luftdruck (totaler barometrischer Druck)	$p_t = 100 \text{ kPa (1000 mbar)}$
Relative Luftfeuchte	$\Phi_r = 30 \%$
Lufttemperatur	$T_r = 300 \text{ K (27 } ^\circ\text{C)}$
Temperatur des Ladeluftkühlmittels	$T_{cr} = 300 \text{ K (27 } ^\circ\text{C)}$

Die Leistung, die der Motor unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen erbringt, wird vom Motorenhersteller angegeben. Es ist zudem anzugeben welche Drehzahl der Motors am entsprechenden Betriebspunkt erreicht und ob die Umgebungsbedingungen von den Standardbezugsbedingungen abweichen. Wenn diese sich unterscheiden, ist eine rechnerische Leistungsanpassung bzw. Leistungsreduktion durchzuführen. Die Umrechnung erfolgt mittels folgender Gleichungen:

$$P_x = \alpha * P_r \quad (\text{Gleichung 2.12})$$

$$\alpha = k - 0,7 * (1 - k) * \left(\frac{1}{\eta_m} - 1\right) \quad (\text{Gleichung 2.12})$$

$$k = \left(\frac{p_x - a \phi_x p_{sx}}{p_{ra} - a \phi_r p_{sr}}\right)^m * \left(\frac{T_r}{T_x}\right)^n * \left(\frac{T_{cr}}{T_{cx}}\right)^q \quad (\text{Gleichung 2.13})$$

Dabei beziehen sich die Indizes r auf die Werte unter Standardbedingungen und die Indizes x auf die Umgebungsbedingungen. Die Exponenten m, n, und q sind je nach Motorenausführung aus der Anlage 4 zur Norm zu entnehmen.

Der spezifische Kraftstoffverbrauch bezieht sich auf die Umgebungsbedingungen und auf die erbrachte Leistung. Der Kraftstoffverbrauch wird anhand folgender Formel auf die Normbedingungen umgerechnet:

$$b_x = \beta * b_r \quad (\text{Gleichung 2.14})$$

$$\beta = \frac{k}{\alpha} \quad (\text{Gleichung 2.15})$$

Die Faktoren k und α lassen sich über die Gleichungen 2.12 bzw. 2.13 berechnen. Aufgrund dieser Umrechnung kann sich der rechnerische Kraftstoffverbrauch nach Norm je nach den bei der Messung vorliegenden Umgebungsbedingungen reduzieren oder erhöhen. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die Angaben der Normwirkungsgrade des Motors. Im Praxisbetrieb ist gemäß Norm eine Abweichung des spezifischen Kraftstoffverbrauchs um bis zu + 5 % nach oben zulässig. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass in der Praxis eine Abweichung der angegebenen Wirkungsgrade nach unten möglich ist. So ergibt sich beispielsweise bei einem elektrischen Wirkungsgrad von 40 % nach Datenblatt und bei voller Ausschöpfung des nach Norm zulässigen Mehrverbrauchs von 5 % in der Praxis ein realer Wirkungsgrad von lediglich 38,1 %.

Obwohl die Norm aussagt, dass für die Leistungs- und Kraftstoffverbrauchsangaben die Betriebsbedingungen anzugeben sind, ist dies aus den Datenblattangaben vieler Hersteller nicht immer ersichtlich. Es ist davon auszugehen, dass die meisten BHKW-Hersteller die mögliche Toleranz von + 5 % bei den Leistungsangaben ausnutzen, sodass im realen Betrieb die Wirkungsgrade eher nach unten als nach oben von den Datenblattangaben abweichen. Im vorliegendem Rahmen handelt es sich bei allen aus Hersteller-Datenblättern entnommenen Leistungs- und Wirkungsangaben um Werte nach DIN ISO 3046-1.

3 Wichtige rechtliche Rahmenbedingungen

3.1 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) regelt den Anschluss, die Abnahme und Vergütung von Strom aus regenerativen Energiequellen, wie Wind, solarer Strahlungsenergie, Geothermie, Wasserkraft und Biomasse. Die erste Fassung des EEG trat im Jahr 2000 in Kraft, seitdem wurde das Gesetz mehrmals novelliert, zuletzt im Jahr 2014. Die ersten Fassungen des EEG waren v. a. auf einen schnellen Ausbau der Erneuerbaren Energien ausgerichtet und boten hohe Investitionsanreize mit attraktiven Stromvergütungen, die über 20 Jahre garantiert wurden. In den darauf folgenden Fassungen wurde in zunehmendem Maße versucht, Marktmechanismen zu berücksichtigen, um einerseits die Integration der Erneuerbaren Energien in die bestehenden Netze und Energiemärkte zu forcieren und andererseits die Kosten für deren Ausbau zu dämpfen. Aufgrund der Komplexität der EEG-Gesetzgebung können in diesem Kapitel nur die für Blockheizkraftwerke wichtigen Regelungen gestreift werden. Für nähere Informationen sei auf die jeweiligen Gesetzestexte verwiesen [EEG2012].

Für Blockheizkraftwerke sind im Rahmen des EEG in erster Linie die Regelungen für die Vergütung von Strom aus Biomasse, Deponie- und Klärgas relevant. In der Praxis betrifft dies größtenteils Blockheizkraftwerke, die mit Biogas- und Biomethan betrieben werden, also mit gasförmigen Brennstoffen aus biogenen Quellen. Biogene Flüssigkraftstoffe, wie Pflanzenöle oder Pflanzenölmethylester, können dagegen im Rahmen des EEG lediglich zur Anfahr-, Zünd- und Stützfeuerung eingesetzt werden (z. B. in Zündstrahlmotoren) [EEG2012]. Eine ausschließlich Stromerzeugung aus biogenen Flüssigkraftstoffen wird dagegen ab dem EEG 2012 nicht mehr gefördert [EEG2012]. Fossile Brennstoffe dürfen in EEG-Anlagen weder in gasförmiger noch in flüssiger Form eingesetzt werden, da sonst der Anspruch auf Stromvergütung erlischt⁴.

Bei Zündstrahl-BHKW ist nach dem EEG grundsätzlich der Betrieb mit beliebigen Kombinationen biogener Gase (Biogas, Holzgas) bzw. Klär-, Gruben- und Deponiegas und biogenen Flüssigkraftstoffen (Pflanzenöle, Pflanzenölmethylester) möglich. Der erlaubte energetische Anteil des flüssigen Zündkraftstoffs an der Feuerungswärmeleistung ist gesetzlich nicht klar geregelt, orientiert sich in der Anwendungspraxis des EEG jedoch im Allgemeinen an den technischen Erfordernissen. Für Zündstrahlmotoren ist für die meisten Anwendungen ein

⁴ Für den Einsatz fossiler Brennstoffe in Blockheizkraftwerken sind die Regelungen des Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetzes (KWKG) maßgeblich

energetischer Zündölanteil von 5 % bis maximal 10 % für eine sichere Zündung des Gemisches ausreichend und wird in der Regel als zulässige Zünd- bzw. Stützfeuerung anerkannt. Sollen Zündstrahlaggregate auch zur Wärme-Notversorgung bei Abschaltung der Gasversorgung herangezogen werden, so ist zu beachten, dass die Regelungen des EEG solange greifen, wie eine physikalische Verbindung zum öffentlichen Stromnetz besteht und eine Stromeinspeisung stattfindet. Demnach darf bei Abschaltung der Gasversorgung kein Weiterbetrieb mit reinem Flüssigkraftstoff (weder fossil noch biogen) erfolgen, solange noch unmittelbar oder mittelbar eine Verbindung zum öffentlichen Netz besteht, da sonst der Anspruch auf die Stromeinspeisevergütung endgültig entfällt⁵. Anders verhält sich dies bei einer Elektrizitäts-Notversorgung. In diesem Fall erfolgt eine physikalische Trennung vom öffentlichen Netz und die BHKW-Anlage wird in einem Inselnetz betrieben. Da hierbei keine Verbindung zum öffentlichen Netz besteht und keine Stromeinspeisung erfolgt, gelten auch die Regelungen des EEG bezüglich der einzusetzenden Brennstoffe grundsätzlich nicht. Die bestehende Rechtslage kann also dahingehend interpretiert werden, dass ein Elektrizitäts-Notbetrieb mit 100 % flüssigen biogenen Brennstoffen möglich ist, solange keine Verbindung zum öffentlichen Netz besteht.

Bis einschließlich des EEG 2012 bestand das Vergütungssystem für Strom aus Biomasse aus einer Grundvergütung und verschiedenen Boni, die je nach eingesetztem Brennstoff, verwendeter Technologie und Anlagenleistung gewährt wurden. In der Praxis können so sehr hohe Einspeisevergütungen von über 20 Ct/kWh erzielt werden. Der Ausbau von Biomasseanlagen war im EEG 2012 nicht gedeckelt. Das Vergütungssystem des EEG 2012 wurde im Zuge der EEG Reform zum 01.08.2014 grundlegend geändert und durch eine nach Leistung gestaffelte einheitliche Vergütung ersetzt. Zusätzliche Boni sind nicht mehr vorgesehen. Zudem ist der Brutto-Zubau von Biomasseanlagen auf einen Sollwert von 100 MW installierte Leistung pro Jahr gedeckelt [EEG2014]. Je nachdem, ob der Soll-Zubau über oder unterschritten wird, sinkt die Vergütung für neu in Betrieb genommene Anlagen ab dem Jahr 2016 um 0,5 % bis 1,27 % pro Quartal.

Eine weitere Neuheit im EEG 2014 stellt die Belastung selbst erzeugten und genutzten Stroms mit der EEG-Umlage⁶ dar. Für Strom aus Erneuerbaren Energien und hocheffizienten KWK-Anlagen beträgt der Anteil der zu entrichtenden EEG-Umlage:

⁵ Dies gilt nur für EEG-Anlagen. Bei KWK-Anlagen die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, ist ein Wärme-Notbetrieb mit Flüssigkraftstoff nach derzeitiger Rechtslage des KWKG möglich. In Bezug auf die bau- und immissionsschutzrechtliche Genehmigung ist dies im Einzelfall mit der zuständigen Behörde abzustimmen.

⁶ Die EEG-Umlage dient der Finanzierung der Kosten für das EEG und wird bisher auf alle Stromkunden (Letztverbraucher) als Aufschlag auf den Strompreis erhoben. Die EEG-Umlage beträgt derzeit 6,24 Ct/kWh (Stand 2014)

- 30 % der jeweils gültigen EEG-Umlage für den Zeitraum 01.08.2014 bis 31.12.2015
- 35 % der jeweils gültigen EEG-Umlage für den Zeitraum 01.01.2016 bis 31.12.2017
- 40 % der jeweils gültigen EEG-Umlage ab dem 01.01.2017

Für KWK-Anlagen die bereits vor dem 01.08.2014 in Betrieb waren gilt Bestandsschutz, d. h. es ist weiterhin keine EEG-Umlage auf den selbst erzeugten und genutzten Strom abzuführen. Dies gilt auch wenn die bestehende Anlage an demselben Standort erneuert, erweitert oder ersetzt wird, sofern die installierte Leistung um nicht mehr als 30 % erhöht wird [EEG2014].

3.2 Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG)

Das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) dient der Erhaltung, der Modernisierung und dem Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung. Ziel ist die Erhöhung des Anteils der Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland auf 25 % der Gesamtstromerzeugung bis 2020. Das Gesetz ist im Jahre 2002 in Kraft getreten und wurde zuletzt 2012 grundlegend novelliert [KWKG2009].

Das KWKG regelt die Abnahme und Vergütung für Strom, der in Kraftwerken auf Basis von Steinkohle, Braunkohle, Abfall, Abwärme, Biomasse, gasförmigen oder flüssigen Brennstoffen in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt wird. Sofern eine Anlage in den Geltungsbereich des Erneuerbaren Energie-Gesetzes (EEG) fällt, gilt dieses jedoch vorrangig. Dies betrifft in erster Linie Biomasse-KWK-Anlagen.

Gemäß KWKG sind Netzbetreiber grundsätzlich verpflichtet, hocheffiziente KWK-Anlagen (vgl. hierzu auch Abschnitt 3.3) an ihr Netz unverzüglich vorrangig anzuschließen und den in diesen Anlagen erzeugten KWK-Strom unverzüglich vorrangig abzunehmen, zu übertragen und zu verteilen [KWKG2009]. Für den aufgenommenen Strom wird zwischen Netzbetreiber und Betreiber der KWK-Anlage ein Preis vereinbart, der sich in der Regel nach dem „üblichen Preis“ (durchschnittlicher Preis für Grundlaststrom an der Strombörse EEX in Leipzig im jeweils vorangegangenen Quartal) richtet. Zuzüglich sind die vermiedenen Netznutzungsentgelte in die Vergütung einzuberechnen [KWKG2009].

Zusätzlich zur individuell zwischen Netzbetreiber und Anlagenbetreiber ausgehandelten Vergütung wird eine gesetzlich festgelegte Zuschlagszahlung gewährt, die über das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) abgewickelt wird. Die Höhe dieser Zuschlagszahlung beträgt für hocheffiziente Neuanlagen, die vor dem 31.12.2020 in Betrieb gehen,

5,41 Ct/kWh für den Leistungsanteil bis 50 kW, 4,0 Ct/kWh für den Leistungsanteil 50 kW bis 250 kW und 2,4 Ct/kWh für den Leistungsanteil 250 kW bis 2.000 kW. Die Dauer der Zuschlagszahlung ist jeweils auf 30.000 Vollbenutzungsstunden beschränkt. Kleine BHKW bis 50 kW elektrischer Leistung und Brennstoffzellen-BHKW erhalten einen Zuschlag von 5,41 Ct/kWh wahlweise für 30.000 Vollbenutzungsstunden oder 10 Jahre ab Inbetriebnahme [KWKG2009].

Seit dem Jahr 2009 wird KWK-Zuschlagszahlung nicht nur für Strom gewährt, der in ein Netz der öffentlichen Versorgung eingespeist wird, sondern auch für Strom, der für die Eigenversorgung eines Letztverbrauchers (= Endverbraucher, z. B. private Verbraucher, Gewerbe- und Industriekunden) verwendet wird. Grundsatz für den Anspruch auf die Zuschlagszahlung ist stets, dass durch die Errichtung der KWK-Anlage keine bestehende Fernwärmeversorgung aus KWK verdrängt wird, ausgenommen bei Brennstoffzellen. Ein Überblick der Zuschlagskategorien sowie der Dauer und Höhe der Zuschlagszahlung findet sich in Anhang 2.

3.3 Richtlinie 2012/27/EU (Energieeffizienzrichtlinie)

Die Energieeffizienzrichtlinie 2012/27/EU⁷ ist in der Praxis v. a. wegen des sogenannten Hocheffizienz-Kriteriums von Bedeutung, auf das im KWKG, im Energiesteuergesetz, im EEWärmeG sowie in einschlägigen Förderrichtlinien (z. B. Richtlinie zur Förderung von Mini-KWK-Anlagen) verwiesen wird. In der Richtlinie wird für BHKW-Anlagen eine Primärenergieeinsparung von mindestens 10 % gegenüber der getrennten Strom- und Wärmebereitstellung gefordert, damit diese als hocheffizient eingestuft werden können. Für Anlagen kleiner 1 MW elektrischer Leistung muss lediglich eine Primärenergieeinsparung > 0 % nachgewiesen werden. Die Primärenergieeinsparung berechnet sich nach dem in Abschnitt 7.1.1 dargestellten Verfahren. Praktisch alle auf dem deutschen Markt erhältliche Blockheizkraftwerke erfüllen die Anforderungen nach 2012/27/EU [Sutor2009].

3.4 Energiesteuergesetz (EnergieStG)

Für die gekoppelte Erzeugung von Kraft und Wärme wird gemäß Energiesteuergesetz § 53a und § 53b auf Antrag beim zuständigen Hauptzollamt eine Steuerentlastung gewährt. Eine

⁷ Die neue Richtlinie hebt die bisher geltende Regelung 2004/8/EG auf. Das Berechnungsverfahren für die Primärenergieeinsparung wurde unverändert in die neue Richtlinie übernommen.

vollständige Steuerentlastung wird nur für KWK-Anlagen gewährt, die hocheffizient entsprechend der Berechnungsmethode nach 2012/27/EU sind und einen Monats- oder Jahresnutzungsgrad > 70 % erreichen. Die vollständige Steuerentlastung ist nur bis zur vollständigen Absetzung für Abnutzung der Hauptbestandteile der KWK-Anlage (Gasturbine, Motor, Dampferzeuger, Dampfturbine, Generator, Steuerung) möglich. Diese Frist verlängert sich entsprechend, wenn einzelne Hauptbestandteile ersetzt werden und die Kosten für die Erneuerung mindestens 50 % der Kosten für die Neuerrichtung der Anlage betragen [EnergieStG].

Werden diese Voraussetzungen nicht erfüllt, ist nur eine teilweise Steuerentlastung für KWK-Anlagen möglich. Hierfür muss lediglich ein Monats- oder Jahresnutzungsgrad > 70 % nachgewiesen werden. Für ortsfeste Stromerzeugungsanlagen mit einer elektrischen Nennleistung > 2 MW wird nach § 53 EnergieStG dagegen auch ohne gekoppelte Wärmezeugung eine vollständige Steuerentlastung gewährt [EnergieStG].

Die Steuerentlastung wird nur für die im jeweiligen Zeitraum tatsächlich verwendeten Energieträger gewährt und nicht für die gelieferten und auf Vorrat gehaltenen Mengen. In der Praxis bedeutet dies, dass die KWK-Anlage mit einer Einrichtung zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs ausgerüstet sein muss, wie z. B. einem Gaszähler oder einer Füllstandsanzeige für den Tank. Weiterhin muss der Nachweis geführt werden können, dass ein Nutzungsgrad von mindestens 70 % erreicht wird. Da kleinere BHKW-Anlagen vielfach jedoch nicht mit separaten Zählern für Brennstoff- und Wärmemenge ausgestattet sind, wird bei rein wärmgeführten Anlagen in der Regel auch eine vereinfachte Berechnung des Brennstoffeinsatzes ausgehend von den Betriebsstunden oder der erzeugten Strommenge akzeptiert.

Tabelle 3: Energiesteuerentlastung für KWK-Anlagen gemäß EnergieStG [EnergieStG]

Brennstoff	Vollständige Steuerentlastung	Teilweise Steuerentlastung
Erdgas	5,50 €/MWh	4,42 €/MWh
Biomethan	5,50 €/MWh	4,42 €/MWh
Flüssiggas	60,60 €/1.000 kg	19,60 €/1.000 kg ¹
Heizöl-EL	61,35 €/1.000 l	40,35 €/1.000 l
Pflanzenöl bei 15 °C flüssig (Rapsöl)	61,35 €/1.000 l	40,35 €/1.000 l
Pflanzenöl bei 15 °C fest (Palmöl)	25,00 €/1.000 kg	10,00 €/1.000 kg

¹ gilt für Gasturbinen und Verbrennungsmotoren; für allgemeine ortsfeste KWK-Anlagen 60,60 €/1.000 kg

3.5 Immissionsschutzrechtliche Regelungen

BHKW-Anlagen sind ab einer Feuerungswärmeleistung von 1 MW genehmigungspflichtig nach 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV). Die für die Genehmigung anzuwendenden Grenzwerte sind in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) festgelegt (Emissionsbegrenzungen für Verbrennungsmotoranlagen).

Für kleinere BHKW-Anlagen existieren demnach also keine verbindlich festgelegten Emissionsgrenzwerte, da die 1. BImSchV (Kleinfeuerungsanlagen) Verbrennungsmotoranlagen nicht explizit erwähnt. De facto gilt aber die Verpflichtung nach § 22 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG), gemäß welcher nach dem Stand der Technik vermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden müssen [ASUE2011]. In der Praxis führt dies dazu, dass Förderrichtlinien – wie z. B. Zuschüsse für die Errichtung von Mini-KWK-Anlagen, oder Baugenehmigungen – regelmäßig an die Einhaltung bestimmter Emissionsgrenzwerte gekoppelt werden, die sich an der TA Luft orientieren.

Die für Blockheizkraftwerke relevanten Emissionsbegrenzungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Zu beachten ist, dass sich die Angaben der TA Luft für Verbrennungsmotoranlagen auf einen Restsauerstoffgehalt von 5 Vol-% im Abgas beziehen. Die tatsächlichen Emissionen müssen daher stets auf den Bezugssauerstoffwert umgerechnet werden.

Tabelle 4: Emissionsbegrenzungen gemäß TA Luft 2002 bezogen auf 5 Vol-% Sauerstoff [TA Luft]

Emissionskomponente	Selbstzündungsmotoren mit Flüssigkraftstoffen	Selbstzündungsmotoren mit gasförmigen Kraftstoffen (Zündstrahlmotoren)	Mager-Gasmotoren	Sonst. 4-Takt-Ottomotoren
Kohlenmonoxid	0,3 g/m ³	0,3 g/m ³ Biogas/Klärgas < 3 MW _{FWL} : 2,0 g/m ³ ≥ 3 MW _{FWL} : 0,65 g/m ³	0,3 g/m ³ Biogas/Klärgas < 3 MW _{FWL} : 1,0 g/m ³ ≥ 3 MW _{FWL} : 0,65 g/m ³ Grubengas 0,65 g/m ³	0,3 g/m ³ Biogas/Klärgas < 3 MW _{FWL} : 1,0 g/m ³ ≥ 3 MW _{FWL} : 0,65 g/m ³ Grubengas 0,65 g/m ³
Stickstoffoxide	< 3 MW _{FWL} : 1 g/m ³ ≥ 3 MW _{FWL} : 0,5 g/m ³	0,5 g/m ³ Biogas/Klärgas < 3 MW _{FWL} : 1,0 g/m ³ ≥ 3 MW _{FWL} : 0,5 g/m ³	0,5 g/m ³	0,25 g/m ³ Biogas/Klärgas 0,5 g/m ³
Formaldehyd	60 mg/m ³			
Staub	20 mg/m ³	-	-	-
Schwefeldioxid	Über den zulässigen Schwefelgehalt der Brennstoffe begrenzt			

4 Marktpotential für die Zündstrahl-Technologie

4.1 Stromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung in Deutschland

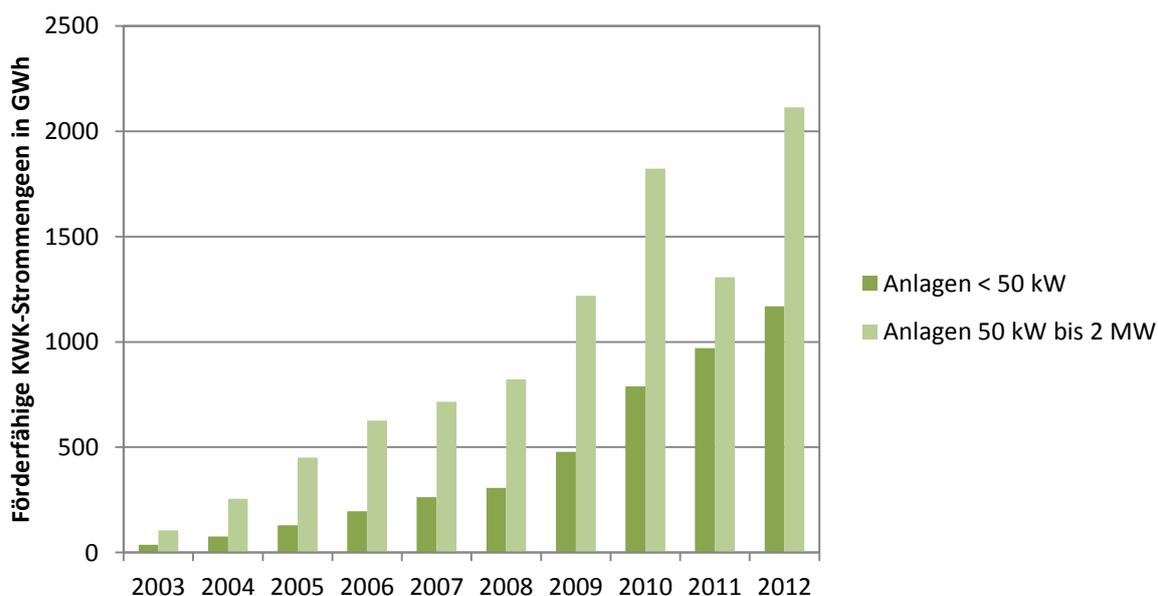
Um den potentiellen Markt für Zündstrahlaggregate einschätzen zu können, wurde die bisherige Entwicklung der KWK-Stromerzeugung in Deutschland recherchiert. Dabei sind v. a. Anlagen mit Anschluss an das Erdgasnetz und einer elektrischen Leistung $> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $< 1 \text{ MW}_{\text{el}}$ von Interesse. In dieser Leistungsklasse kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den in den Statistiken erfassten Anlagen in der Regel um Verbrennungsmotor-Blockheizkraftwerke handelt. Die Betrachtung beschränkt sich auf die verfügbaren Daten zu KWK-Anlagen im Geltungsbereich des KWKG, die mit fossilen Brennstoffen (Erdgas) betrieben werden. Ausgeklammert werden dadurch z. B. Biogasanlagen, bei denen sich die Zündstrahl-Technologie bereits erfolgreich am Markt etabliert hat und die daher nicht Gegenstand des Projekts sind. Anlagen $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ liegen unterhalb der betrachteten Leistungsklasse, da hier der technologische Aufwand für Entwicklung und Betrieb von Zündstrahlaggregaten für den Erdgasbetrieb unverhältnismäßig hoch ist, insbesondere wenn man die benötigte doppelte Kraftstoffinfrastruktur berücksichtigt. Ähnliches gilt für Anlagen $> 1 \text{ MW}_{\text{el}}$, bei denen die erwartbaren Stückzahlen relativ gering sind.

Als Datenbasis für die Abschätzung der KWK-Stromerzeugung dient die im Jahr 2011 veröffentlichte Studie „Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft-Kraft-Wärme-Kopplung“ der Prognos AG, die im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie erstellt wurde [Prognos2011]. Die Studie enthält Daten für die Jahre 2002 bis 2010 (siehe Tabelle 5). In diesem Zeitraum konnte der Anteil der KWK-Stromerzeugung an der gesamten Netto-Stromerzeugung in Deutschland ausgehend von 13,9 % im Jahr 2002 auf rund 15,4 % im Jahr 2010 gesteigert werden. Die Daten umfassen alle KWK-Anlagen in Deutschland, also z. B. auch große Heizkraftwerke. Um genauer abschätzen zu können, welcher Anteil der KWK-Stromerzeugung tatsächlich aus Blockheizkraftwerken stammt, wurden die Jahresabrechnungen der KWK-Strommengen gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) ausgewertet, die auf der Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber veröffentlicht werden [ÜNB2014]. Dabei wurden die tatsächlichen Ist-Werte der KWK-Stromerzeugung der Jahre 2003 bis 2012 für KWK-Anlagen mit einer Leistung kleiner $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und zwischen $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ und 2 MW_{el} ermittelt (vgl. Abbildung 5). Bis zur Anlagengröße 2 MW_{el} handelt es sich nach Definition des KWKG um kleine KWK-Anlagen, die in Regel mit Verbrennungsmotor-Blockheizkraftwerken gleichzusetzen sind. Eventuell in den Daten enthaltene KWK-Anlagen anderer Technologien, wie z. B. KWK-Brennstoffzellen oder Mikrogasturbinen, dürften zahlenmäßig vernachlässigbar sein.

Tabelle 5: KWK-Netto-Stromerzeugung der Jahre 2002 bis 2010, Datenquelle [Prognos2011] [IÜNB2014]

	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nettostromerzeugung [TWh]	547,8	566,2	574,5	572,7	594,6	594,5	594,7	552,9	583,5
KWK-Nettostromerzeugung [TWh]	75,9	76,0	77,5	80,0	83,0	83,0	86,2	85,4	89,9
Nach KWKG geförderte Strommenge der KWK-Nettostromerzeugung [TWh]	-	52,6	55,9	59,8	60,3	46,1	46,4	53,3	20,5
Anteil KWK-Nettostromerzeugung [%]	13,9	13,4	13,5	14,0	14,0	14,0	14,5	15,4	15,4
Anteil der geförderten KWK-Strommenge an der KWK-Nettostromerzeugung [%]	-	69,2	72,1	74,8	72,7	55,5	53,8	62,4	22,8

Die Menge des geförderten KWK-Stroms ist im Zeitraum von 2003 bis 2012 im Durchschnitt stetig angestiegen, lediglich im Jahr 2011 ist ein deutlicher Einbruch zu verzeichnen. Dies erklärt sich u. a. durch den Wegfall der Förderung nach dem KWKG ab 30.000 Betriebsstunden, weshalb ältere Anlagen in der Statistik nicht mehr auftauchen. In der Praxis werden diese Anlagen in den meisten Fällen dennoch weiter betrieben und tragen zur KWK-Stromerzeugung bei, sodass die tatsächliche KWK-Strommenge höher liegt als aus den Zahlen ersichtlich (vgl. auch Daten Tabelle 5).


Abbildung 5: Förderfähige KWK-Strommengen nach KWKG (berechnet aus [BAFA2014])

4.2 Abschätzung des Bestands an Blockheizkraftwerken in Deutschland

Die Anzahl der installierten Blockheizkraftwerke wird in Deutschland nicht zentral erfasst. Lediglich in Teilbereichen werden von einzelnen Bundesbehörden Register geführt, wie z. B. im Fall der pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerke vom Bundesamt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Eine Abschätzung des tatsächlichen Bestandes ist auf Basis von Daten des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) möglich. Hier werden alle KWK-Anlagen, die eine Förderung nach dem KWK-G erhalten, gemeldet. Dabei handelt es sich ausschließlich um Anlagen, die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden. Allerdings ist zu beachten, dass in den veröffentlichten Zahlen nicht nur BHKW mit Verbrennungsmotoren, sondern beispielsweise auch Brennstoffzellen und BHKW mit Mikrogasturbinen enthalten sind. Außerdem kann eine KWK-Anlage aus mehreren einzelnen, auch unterschiedlichen, BHKW-Modulen bestehen, sodass aus den BAFA-Daten nicht unmittelbar auf die Anzahl der tatsächlich installierten BHKW-Module rückgeschlossen werden kann. Dennoch eignen sich die Daten des BAFA gut für eine Abschätzung des BHKW-Bestandes in Deutschland.

Abbildung 6 zeigt die jährlich beim BAFA neu gemeldete KWK-Anlagenleistung der Jahre 2009 bis 2013. Hier erkennt man deutlich, dass die KWK-Anlagen der Leistungsklasse $> 1 \text{ MW}_{\text{el}}$ den größten Anteil an der in Deutschland installierten KWK-Leistung ausmachen. Betrachtet man jedoch nicht die Leistung, sondern die Anzahl der neu gemeldeten Anlagen (siehe Abbildung 7), so dominieren zahlenmäßig die Mini-KWK-Anlagen mit einer Leistung $< 50 \text{ kW}_{\text{el}}$. In dem für die vorliegende Studie interessanten Leistungsbereich $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis 1 MW_{el} wurden im Zeitraum 2009 bis 2013 insgesamt 1.821 KWK-Anlagen mit einer Gesamtleistung von $440 \text{ MW}_{\text{el}}$ neu gemeldet [BAFA2014].

Um den interessierenden Leistungsbereich besser einzugrenzen, wurden die Daten des BAFA im Bereich bis 1 MW_{el} installierter Leistung in Abbildung 8 (neu installierte Leistung) und Abbildung 9 (neu installierte Anlagenzahl) genauer aufgeschlüsselt. Hier erkennt man deutlich, dass KWK-Anlagen mit einer Leistung von $50 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ den größten Anteil der gemeldeten Gesamtleistung ausmachen und diese von Jahr zu Jahr steigt. Im Zeitraum von 2009 bis 2013 wurden in diesem Leistungsbereich insgesamt 1.303 Anlagen mit einer Gesamtleistung von $190 \text{ MW}_{\text{el}}$ neu zugelassen [BAFA2014]. Besonders viele KWK-Anlagen wurden im Leistungsbereich zwischen 2 kW_{el} und $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ errichtet. Es handelt sich hierbei größtenteils um erdgasbetriebene Mini- bzw. Mikro-BHKW.

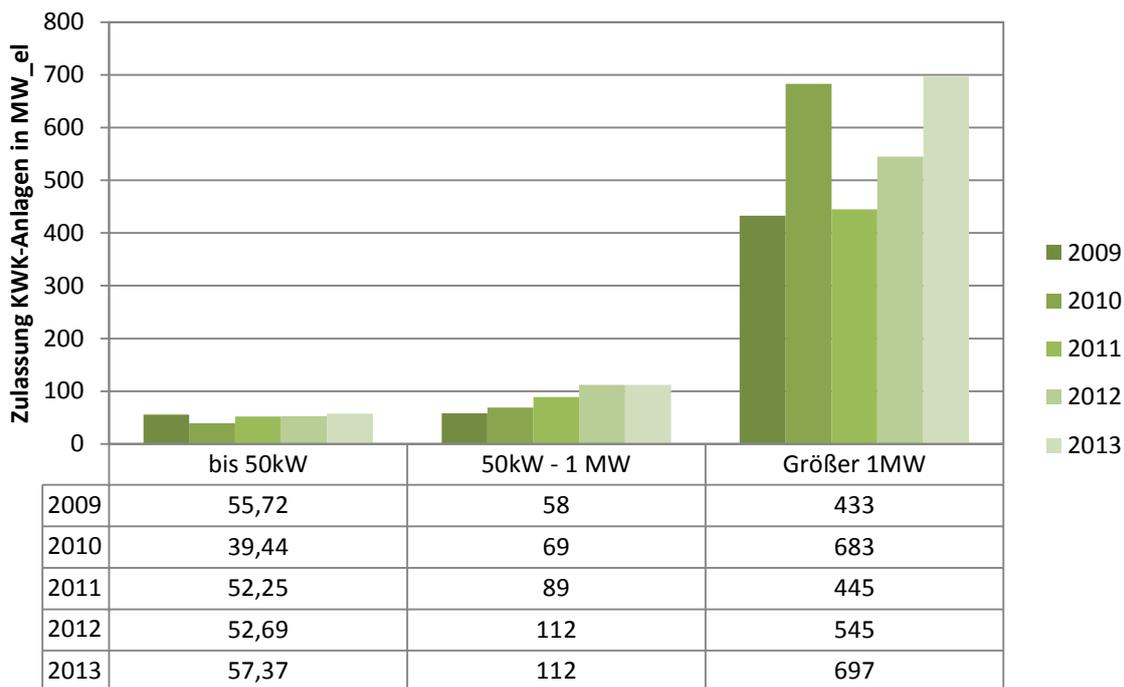


Abbildung 6: Leistung neu gemeldeter KWK-Anlagen 2009 – 2013 [BAFA2014]

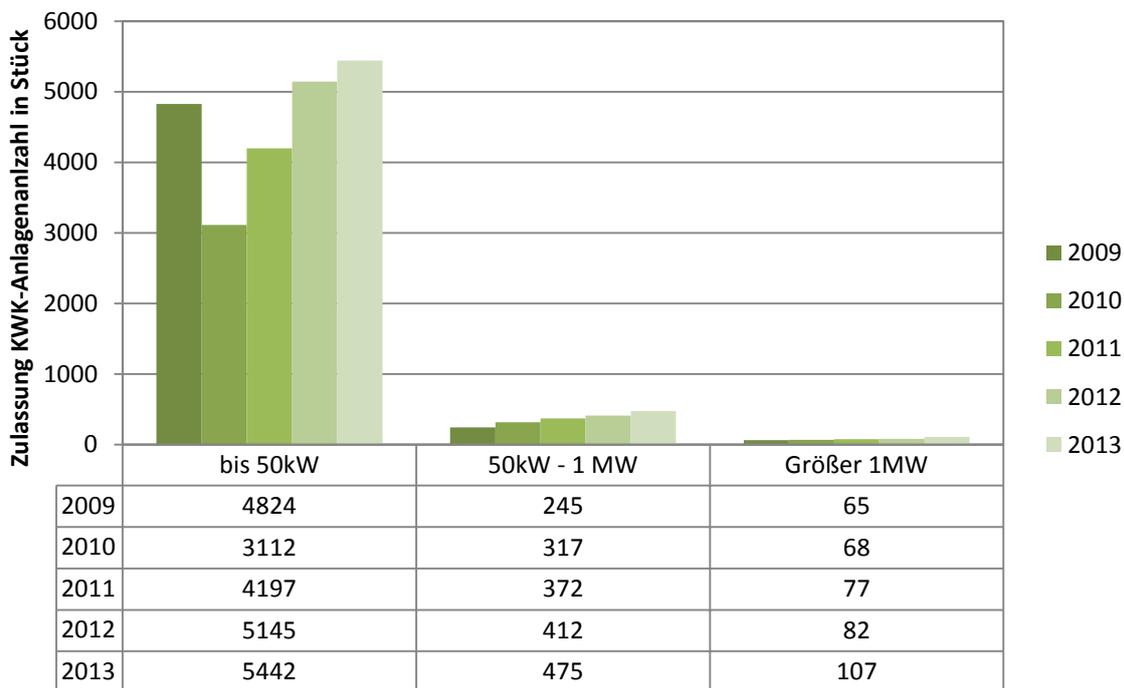


Abbildung 7: Anzahl neu gemeldete KWK-Anlagen 2009 – 2013 [BAFA2014]

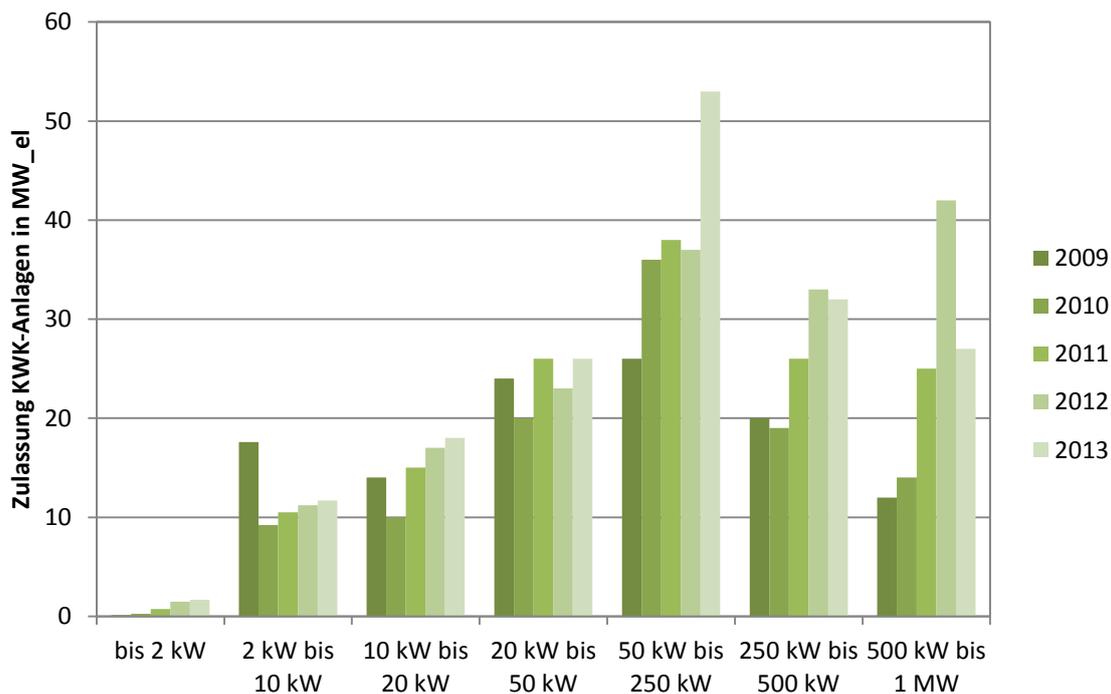


Abbildung 8: Anlagenleistung neu zugelassener kleiner KWK-Anlagen nach KWK-G [BAFA2014]

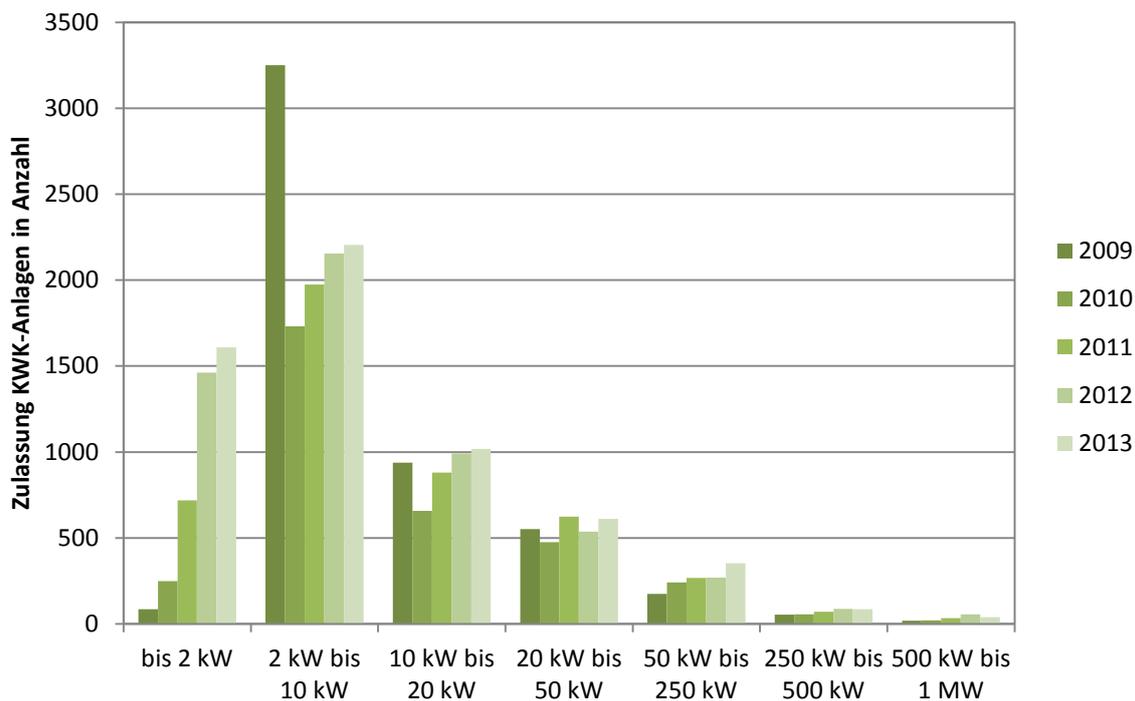


Abbildung 9: Anzahl neu zugelassener kleiner KWK-Anlagen nach KWKG [BAFA2014]

Die vom BAFA veröffentlichten und in den Abbildungen 7 bis 10 dargestellten Zahlen umfassen nur die jährlich neu gemeldeten KWK-Anlagen, nicht jedoch die zu diesem Zeitpunkt bereits bestehenden Anlagen. Eine Aussage zum gesamten Anlagenbestand in Deutschland kann daher zunächst nicht getroffen werden. Legt man die in der Studie „Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft-Kraft-Wärme-Kopplung“ durch die Prognos AG veröffentlichten Daten zugrunde, waren im Jahr 2009 insgesamt 26.906 KWK-Anlagen mit einer Gesamtleistung von 40.736 kW_{el} beim Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) gemeldet [Prognos2011]. Ausgehend von dieser Zahl und den jährlich neu gemeldeten Anlagen der Jahre 2010 bis 2013 kann der gesamte Bestand an fossil betriebenen KWK-Anlagen in Deutschland Ende 2013 mit ca. 46.700 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 43.690 kW_{el} abgeschätzt werden (vgl. Abbildung 10 und Abbildung 11). Das entspricht in diesem Zeitraum einem Zubau von knapp 73,6 % bezogen auf die installierte Anzahl, jedoch lediglich 7,3 % auf die installierte Leistung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der größte Anteil des Zubaus auf Anlagen kleiner 50 kW_{el} entfällt, die vergleichsweise wenig zur gesamten installierten Leistung beitragen.

Zu beachten ist, dass in den Abschätzungen nicht berücksichtigt wird, wie viele Anlagen im betrachteten Zeitraum stillgelegt oder vom Netz genommen wurden, da hierüber keine Daten erhoben werden. Insofern ist davon auszugehen, dass die Anzahl der tatsächlich betriebenen Anlagen etwas geringer ist. Umgekehrt ist es möglich, dass neue KWK-Anlagen nicht beim BAFA gemeldet werden, da auf den KWK-Zuschlag verzichtet wird, oder die Anlagen nicht förderfähig sind. Dies dürfte sich jedoch im Rahmen des hier interessierenden Leistungsbereichs auf Einzelfälle beschränken.

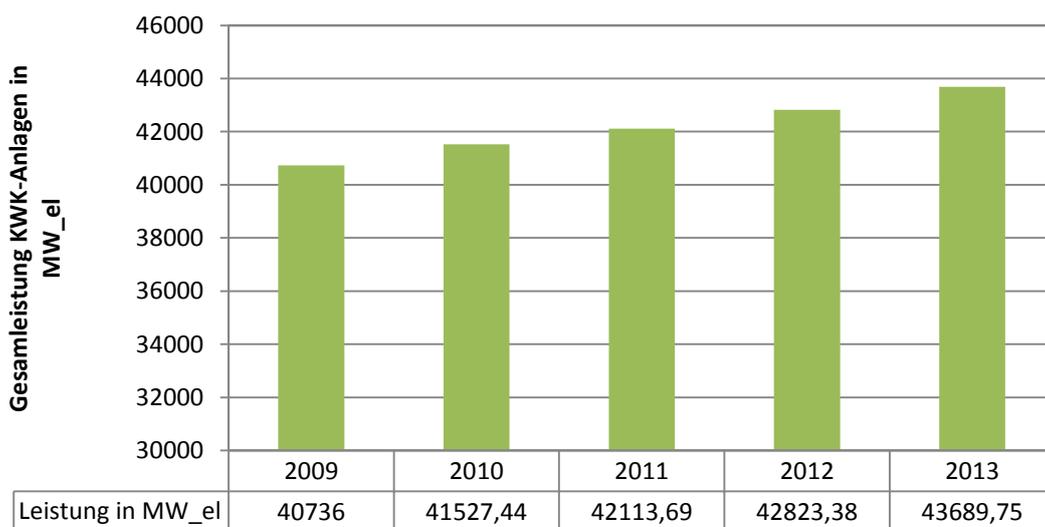


Abbildung 10: Gesamtleistung der installierten fossil betriebenen KWK-Anlagen (berechnet aus [BAFA2014])

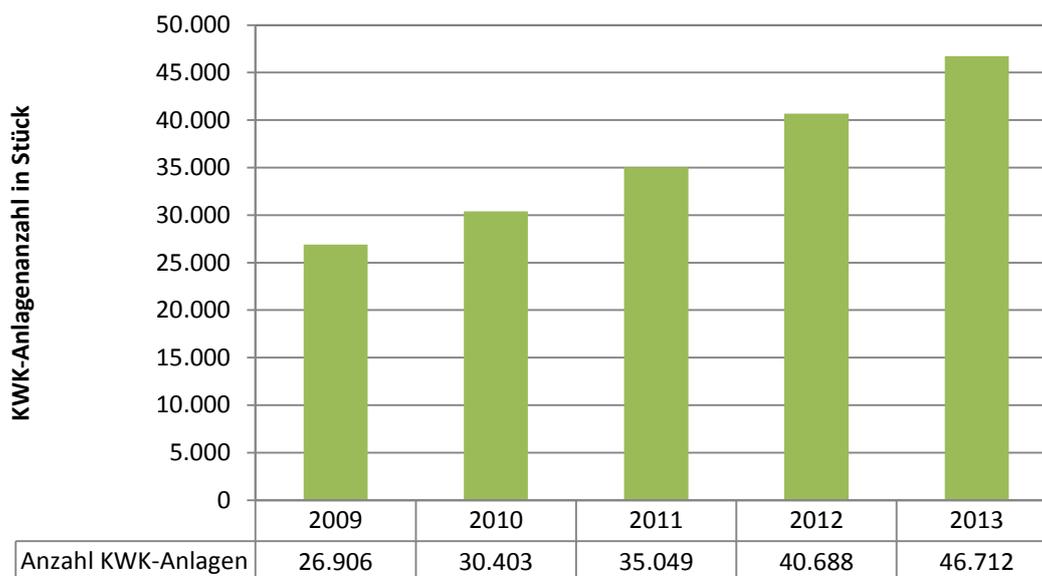


Abbildung 11: Gesamtanzahl der installierten fossil betriebenen KWK-Anlagen (berechnet aus [BAFA2014])

4.3 Gegenwärtiger Anteil der Zündstrahltechnologie am BHKW-Markt

Der BHKW-Markt wird derzeit (Stand 2014) von Gas-Otto-Motoren dominiert. Flüssigkraftstoff-BHKW mit Dieselmotoren spielen lediglich noch für Nischenanwendungen eine Rolle (z. B. Pflanzenöl-BHKW auf Berghütten) und werden mittlerweile aufgrund geänderter Förderbedingungen (insbesondere keine EEG-Förderung mehr) so gut wie nicht mehr neu zu gebaut. Im Bereich der Zündstrahltechnologie stellen lediglich zwei Hersteller BHKW-Module in nennenswerten Stückzahlen her, die Fa. Burkhardt GmbH, die die Zündstrahltechnik größtenteils in Verbindung mit Holzvergasungsanlagen einsetzt, und die Schnell Motoren AG. Die Fa. Schnell beschränkt sich dabei aktuell ausschließlich auf den Biogasmarkt in den Leistungsklassen 170 bis 530 kW_{el}. Seit 2012 werden von der Fa. Schnell außerdem Gas-Otto-BHKW für den Biogasbetrieb produziert.

Um den Anteil der Zündstrahl-Technologie am gesamten BHKW-Markt in Deutschland abschätzen zu können, wurden die von der Zeitschrift „Energie & Management (E&M)“ in Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut veröffentlichten Marktübersichten [E&M2011], [E&M2012], [E&M2013] untersucht, die bis einschließlich 2012 mit Prognose für das Jahr 2013 vorlagen. Bis zum Jahr 2012 kann dabei der Marktanteil der Fa. Schnell Motoren AG nahezu mit dem Anteil der Zündstrahltechnologie am gesamten BHKW-Markt gleichgesetzt werden, da vom zweiten relevanten Hersteller, der Fa. Burkhardt GmbH, noch kaum Zünd-

strahl-Aggregate in größerer Stückzahl angeboten wurden. Ab dem Jahr 2012 wurden durch die Fa. Schnell auch Gas-Otto-Motoren angeboten und zusätzlich die Fa. Burkhardt neu in die Marktübersicht mit aufgenommen. Da die Zahlen von „Energie & Management“ lediglich nach fossilen und biogenen BHKW aufgliedert werden und nicht nach Motorentechnologie, kann ab dem Jahr 2012 aus den vorhandenen Daten keine belastbare Aussage mehr über den Anteil der Zündstrahltechnologie am gesamten BHKW-Markt getroffen werden. Die Prognosewerte für das Jahr 2013 können daher nicht mehr zur Beurteilung des Anteils der Zündstrahl-Technologie am BHKW-Markt herangezogen werden.

Ausgehend von den veröffentlichten Daten war die Fa. Schnell im Jahr 2010 auf dem 2. Rang nach abgesetzter elektrischer Leistung bzw. auf dem 5. Rang nach abgesetzter Modulzahl zu finden. Im Jahr 2010 konnte der Marktanteil nach abgesetzter elektrischer Leistung von ca. 9 % im Vorjahr auf ca. 13 % vergrößert werden (vgl. Abbildung 12). Bezogen auf die abgesetzten Modulzahlen war ein Wachstum von ca. 3 % auf 6 % Marktanteil zu verzeichnen (vgl. Abbildung 13) [Öko-Institut2011]. Nachdem die Fa. Schnell ihren Absatz nach elektrischer Leistung im Jahr 2011 um 50 % vergrößern konnte, erfolgte im Jahr 2012 ein großer Einbruch im Biogasbereich [E&M2011, E&M2012, E&M2013]. Dies ist auf die am 01.01.2012 in Kraft getretene Novellierung des EEG zurückzuführen, im Zuge derer sich die Förderbedingungen für Biogasanlagen verschlechtert haben.

Insgesamt ist aus den Zahlen ist zu erkennen, dass die Zündstrahltechnologie im Biogasmarkt eine attraktive Alternative zum marktführenden Gas-Otto-Motor darstellt. Für die im Rahmen der vorliegenden Studie interessierenden Anwendungen am Erdgasnetz sind Zündstrahl-Aggregate jedoch nach wie vor Nischenprodukte. Dies dürfte einerseits darauf zurückzuführen sein, dass sich der höhere elektrische Wirkungsgrad der Zündstrahl-Aggregate bisher v. a. im Biogasmarkt mit seinen hohen Stromvergütungen kaufentscheidend ausgewirkt hat. Andererseits ist die Nutzung von Biogas in Zündstrahlmotoren technologisch einfacher umzusetzen als die Nutzung von Erdgas, weshalb für den Erdgasmarkt bisher kaum Zündstrahl-Aggregate entwickelt wurden. Mit zunehmenden Strompreisen und damit steigendem Wert elektrischer Energie ist jedoch davon auszugehen, dass der elektrische Wirkungsgrad auch bei Erdgas-BHKW-Anlagen eine immer höhere Bedeutung erlangen wird, sodass die Zündstrahl-Technologie auch hier eine attraktive Option darstellen kann.

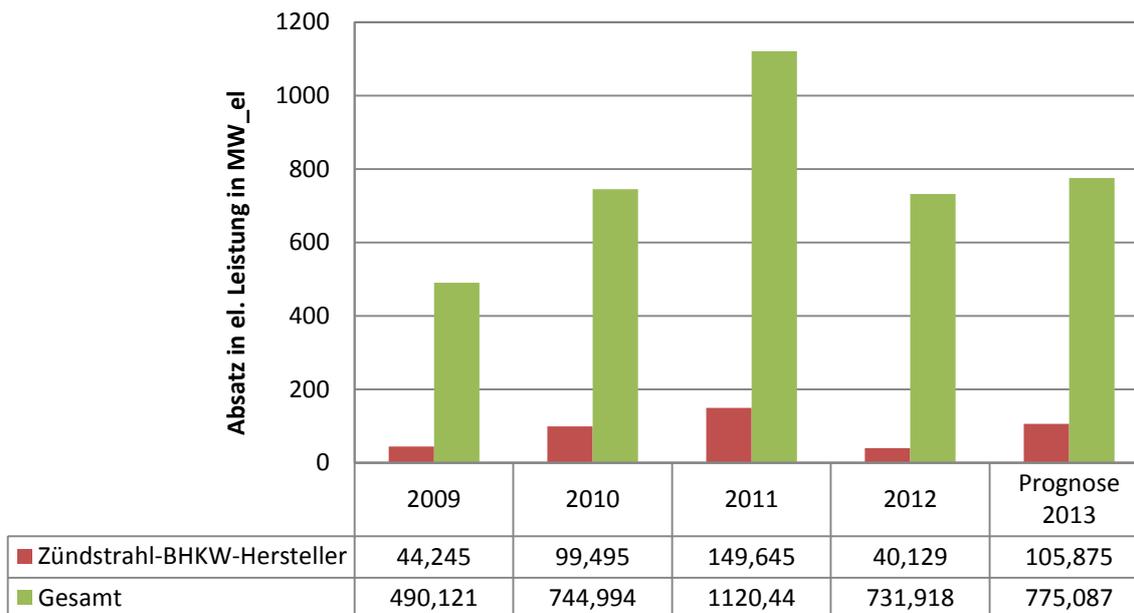


Abbildung 12: Marktanteil der Zündstrahl-BHKW Hersteller am gesamten BHKW-Markt nach verkaufter elektrischer Leistung (Daten aus [E&M2011], [E&M2012], [E&M2013])

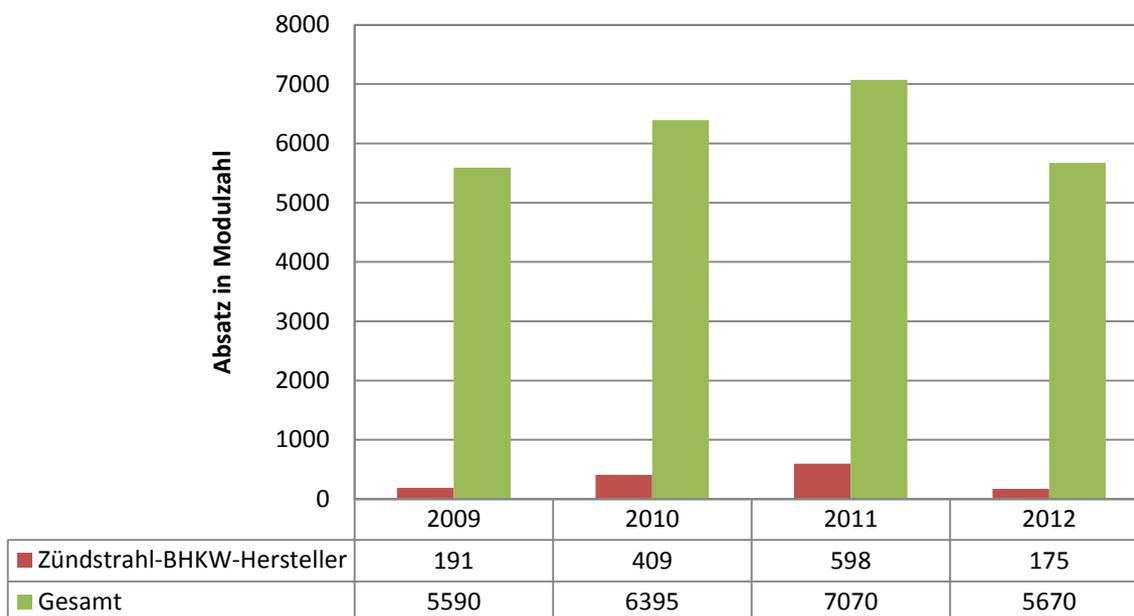


Abbildung 13: Marktanteil der Zündstrahl-BHKW Hersteller am gesamten BHKW-Markt nach verkaufter Modulzahl (Daten aus [E&M2011], [E&M2012], [E&M2013])

4.4 Abschätzung des ökologischen und ökonomischen Einsparpotentials

Eine Abschätzung, welchen Anteil die Zündstrahl-Technologie im Markt für Erdgas-Blockheizkraftwerke erlangen könnte und welche Brennstoff-, CO₂- und Kosteneinsparungen dadurch realisierbar wären, ist auf Basis der in Deutschland verfügbaren statistischen Daten nur ansatzweise möglich. Prinzipiell sind folgende Szenarien denkbar, in denen für Erdgas-Anwendungen Zündstrahl-BHKW anstelle von herkömmlichen Gas-Otto-BHKW eingesetzt werden könnten:

- Ersatz (Modernisierung) und Neuerrichtung bestehender BHKW-Anlagen nach dem KWKG
- Ersatz und Neuerrichtung von Biomethan-BHKW-Modulen nach dem EEG (entspricht physikalisch Erdgas)
- Ersatz bestehender Flüssigkraftstoff BHKW nach dem KWKG (fossile Brennstoffe) oder dem EEG (regenerative Brennstoffe), die neben der Flüssigkraftstoff-Infrastruktur auch über einen Anschluss an die öffentliche Erdgas-Versorgung verfügen

Dabei sind insbesondere solche Anwendungen interessant, in denen die spezifischen Vorteile der Zündstrahl-Technologie (hoher Wirkungsgrad, Brennstoffflexibilität, Notversorgung) zum Tragen kommen. Leider lassen die in Deutschland veröffentlichten Statistiken zur Kraft-Wärme-Kopplung kaum Rückschlüsse auf die verwendete Technologie zu, ebenso wie keine Daten über die vor Ort verfügbare Brennstoff-Infrastruktur erfasst werden. So ist es beispielsweise nicht möglich aus den gemeldeten Daten für einen Pflanzenöl-BHKW-Standort abzuleiten, ob dort auch eine öffentliche Gasversorgung verfügbar ist, sodass auf Zündstrahl-Technologie umgestellt werden könnte.

Um dennoch zumindest näherungsweise das bundesweite ökonomische und ökologische Einsparpotential der Zündstrahltechnologie im Markt für Erdgas-BHKW abschätzen zu können, wurde ausgehend von der zwischen 2009 und 2013 jährlich neu beim BAFA gemeldeten KWK-Anlagenleistung (vgl. Abbildung 6) eine Modellrechnung erstellt. Dabei wurde unter der Annahme, dass in diesem Zeitraum anstelle der herkömmlichen Technologie ein bestimmter Prozentsatz an Zündstrahl-Aggregaten installiert worden wäre, die Entwicklung des kumulierten Energieverbrauchs sowie der kumulierter CO₂-Emissionen und Energiekosten berechnet. Die Betrachtung beschränkt sich auf den im Rahmen des Projekts interessierenden Leistungsbereich 50 kW_{el} bis 1 MW_{el} (vgl. Abschnitt 4.2) und basiert auf folgenden Randbedingungen:

- Angenommene Laufzeit pro KWK-Anlage 6.000 Vollbenutzungsstunden pro Jahr
- Elektrischer Wirkungsgrad der Zündstrahl-Technologie 43,5 % (nach ISO 3046), Leistungsklasse 240 kW_{el}
- Durchschnittlicher elektrischer Wirkungsgrad der Gas-Otto-Technologie 38,1 % (nach ISO 3046) ermittelt aus ASUE BHKW-Kenndaten für die Leistungsklasse 240 kW_{el} [ASUE2014]
- Brennstoffpreise gemäß Tabelle 6, CO₂-Äquivalente gemäß Tabelle 10
- Vier Szenarien für die Marktdurchdringung der Zündstrahltechnologie (2,5 %, 5,0 %, 7,5 % und 10 % der beim BAFA jährlich neu gemeldeten KWK-Anlagenleistung in der Leistungsklasse 50 kW_{el} bis 1 MW_{el})

Die Ergebnisse der Betrachtung sind in Abbildung 14 bis Abbildung 16 dargestellt. In Summe hätten unter den angenommen Randbedingungen bei einem Marktanteil der Zündstrahltechnologie am Erdgas-BHKW-Markt von 10 % im Zeitraum 2009 bis 2013 bis zu 37.000 MWh Brennstoff und 12.600 Tonnen CO₂ eingespart werden können. Die kumulierte Kosteneinsparung durch den geringeren Brennstoffverbrauch von Zündstrahlaggregaten hätte im selben Zeitraum ca. 2,09 Millionen Euro betragen.

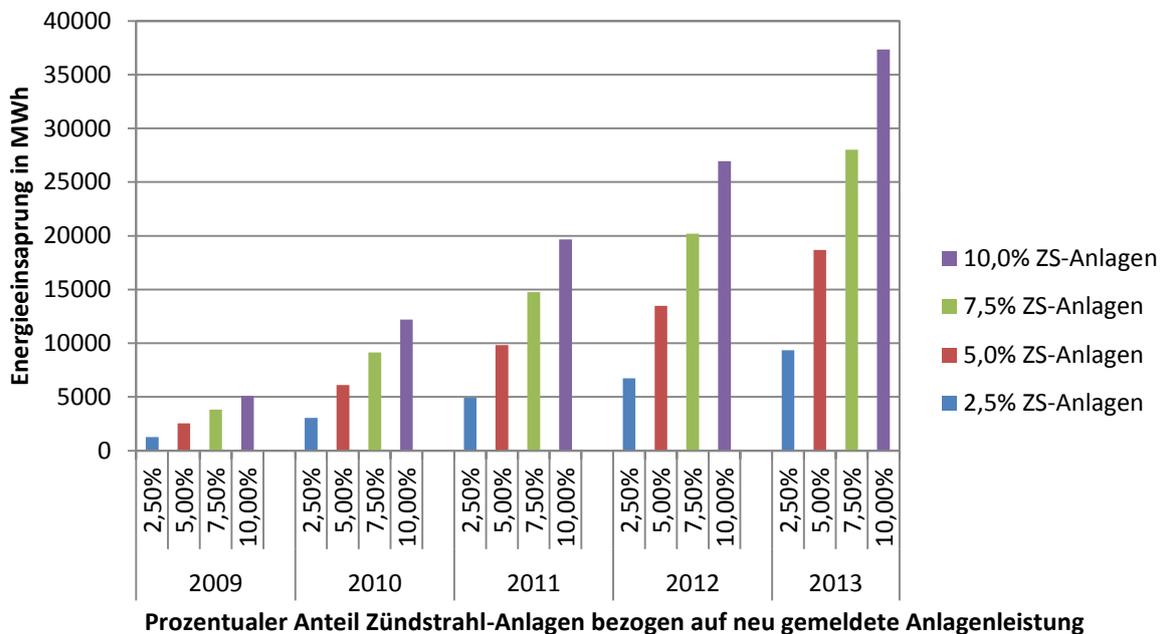


Abbildung 14: Kumuliertes Energieeinsparpotential für die Jahre 2009 – 2013

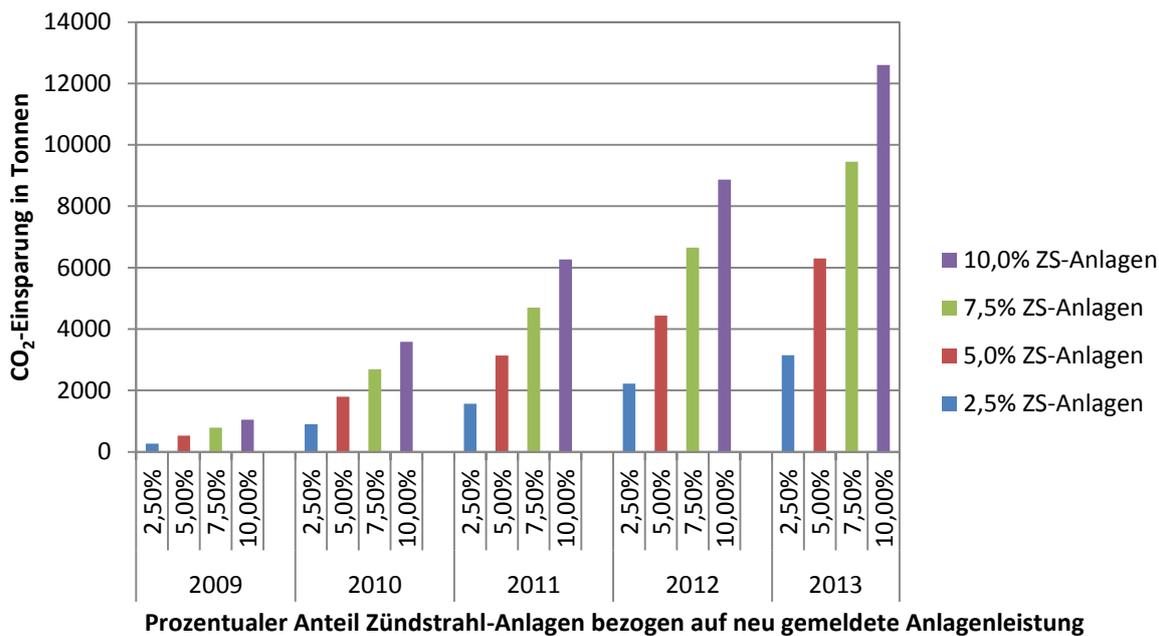


Abbildung 15: Kumuliertes CO₂-Einsparpotential für die Jahre 2009 – 2013

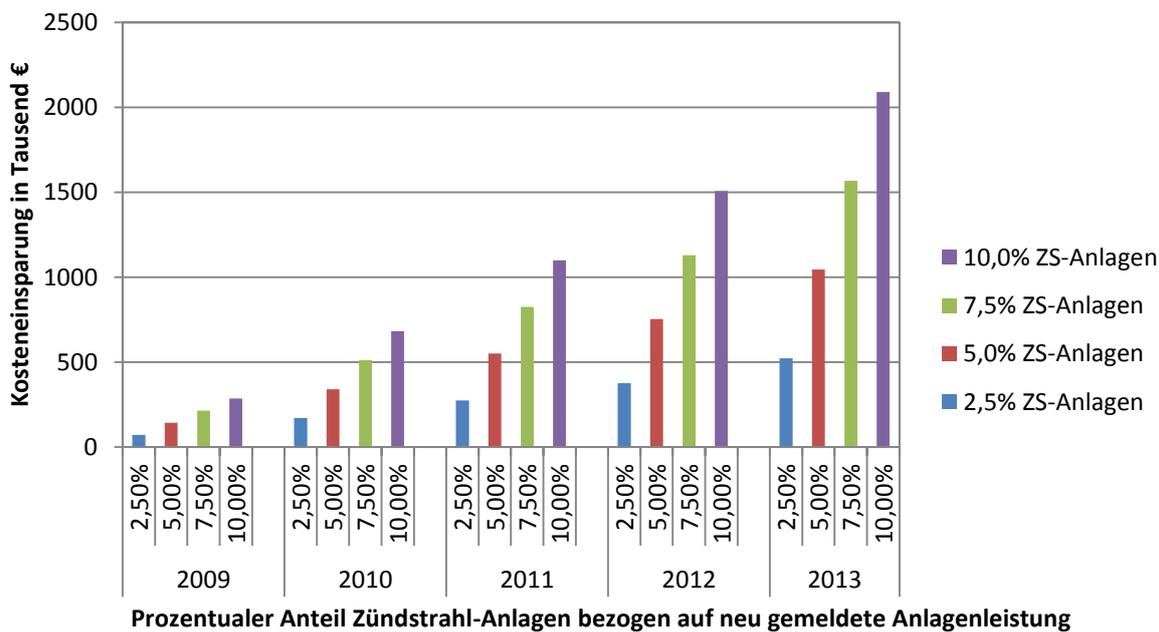


Abbildung 16: Kumuliertes Kosteneinsparpotential für die Jahre 2009 – 2013

5 Vergleich der Zündstrahltechnologie mit dem üblichen Stand der Technik

Als einer der Hauptvorteile der Zündstrahltechnologie gegenüber den etablierten Gas-Otto-Motoren kann der höhere elektrische Wirkungsgrad aufgrund des vom Dieselmotor abgeleiteten Brennverfahrens angesehen werden. Um dies zu überprüfen, wurden im Rahmen einer Potentialstudie die Wirkungsgradangaben von Zündstrahl-BHKW für den Betrieb am Erdgasnetz mit denen verschiedener aktuell am Markt verfügbarer Gas-Otto-BHKW verglichen.

Als Referenz dient dabei ein Zündstrahlaggregat ECO 240 des Projektpartners Burkhardt GmbH, das zunächst für den Betrieb mit Synthesegasen aus der thermochemischen Vergasung (Holzgas) entwickelt wurde und in modifizierter Form nun auch für den Erdgasbetrieb verfügbar ist. Das Aggregat basiert auf einem 6-Zylinder Dieselmotor des Herstellers MAN, der auf den Erdgas-Zündstrahlbetrieb umgebaut wurde. Gemäß Datenblatt (siehe Anhang 8) verfügt das BHKW über eine elektrische und thermische Leistung von jeweils 240 kW. Der elektrische Wirkungsgrad (Angabe nach ISO 3046) beträgt 43,5 %, der thermischer Wirkungsgrad ebenfalls 43,5 %. Der Gesamtwirkungsgrad liegt dementsprechend bei 87 %⁸.

Zur Repräsentation des aktuellen Stands der Technik wurden zu Beginn des Projekts im Jahr 2012 neun Erdgas-BHKW-Module verschiedener Hersteller auf Basis der ASUE BHKW Kenndaten 2011 [ASUE2011] und Recherchen auf der Energy 2012⁹ als Vergleichsmodule ausgewählt. Maßgabe war hierbei eine in etwa vergleichbare thermische Leistung der Module, da davon ausgegangen wird, dass BHKW am Erdgasnetz in erster Linie wärmegeführt betrieben werden. Um die technische Weiterentwicklung im Projektverlauf abzubilden, wurde zum Projektende der Vergleich wiederholt, diesmal mit Daten der im Jahr 2014 auf dem Markt verfügbaren Erdgas-BHKW-Module. Die Kenndaten aller untersuchten BHKW-Module sind in Anhang 6 und Anhang 7 zu finden. Es wurde angenommen, dass sich alle Herstellerangaben auf die Normbezugsbedingungen nach DIN ISO 3046-1 beziehen. Die hier getroffene Auswahl an BHKW-Modulen (Anhang 7) dient in der Folge als Grundlage für alle weiteren Vergleichsrechnungen zum ökonomischen und ökologischen Potential der Zündstrahltechnologie.

⁸ Alle Angaben berücksichtigen eine Toleranz des Brennstoffverbrauchs von 5 % nach oben. Die tatsächlich gemessenen Wirkungsgrade sind niedriger, wie im Rahmen des Forschungsvorhabens gezeigt werden konnte. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird hier dennoch der höhere Wert angesetzt, da die zum Vergleich ausgewerteten Datenblattangaben der Gas-Otto-Motoren ebenfalls eine Toleranz von 5 % bezogen auf den Brennstoffverbrauch beinhalten

⁹ Leitmesse zum Thema Energieerzeugung, Energieversorgung, -übertragung, -verteilung und -speicherung im Rahmen der Hannovermesse 2012

In Abbildung 17 (Daten 2012) und Abbildung 18 (Daten 2014) ist die thermische, elektrische und Feuerungswärmeleistung der verschiedenen BHKW dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass das Zündstrahl-BHKW zum Zeitpunkt des Projektstarts im Jahr 2012 bei ähnlicher thermischer Leistung eine wesentlich höhere elektrische Leistung als die vergleichbaren Gas-Otto-BHKW aufwies, also eine höhere Stromkennzahl erreichte. Dieses Bild ändert sich, wenn man die Daten aus dem Jahr 2014 betrachtet. Bei den nun auf dem Markt verfügbaren Gas-Otto-BHKWs ist aufgrund der fortschreitenden technologischen Entwicklung eine deutliche Verbesserung der Stromkennzahl zu erkennen.

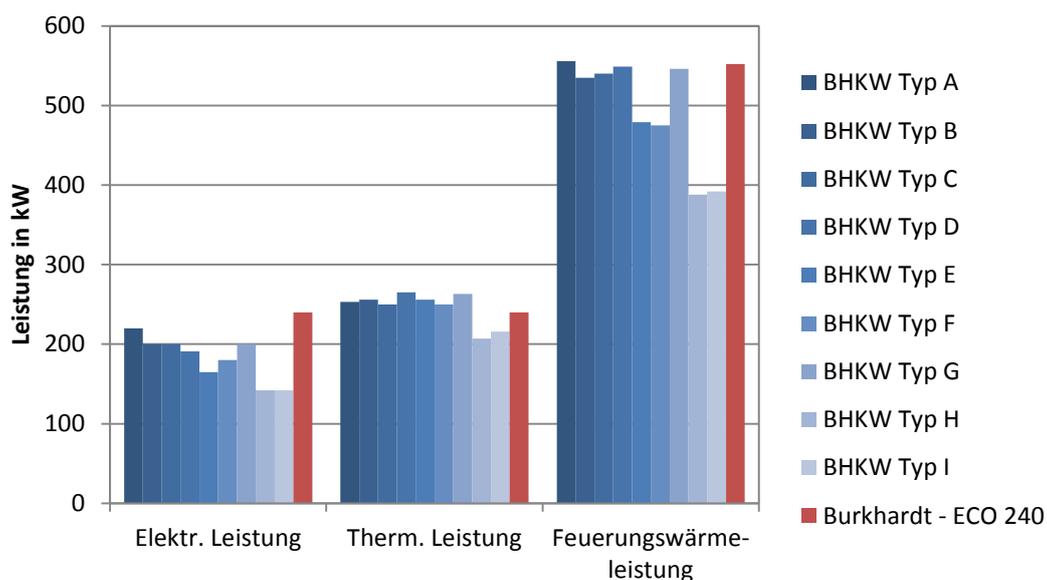


Abbildung 17: Leistung der untersuchten BHKW Stand 2012

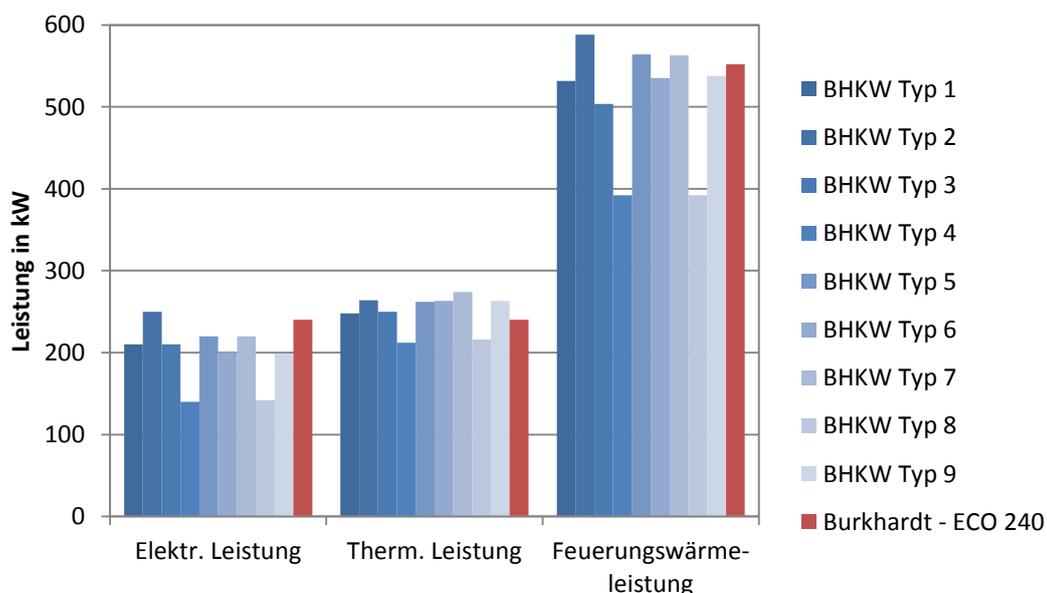


Abbildung 18: Leistung der untersuchten BHKW Stand 2014

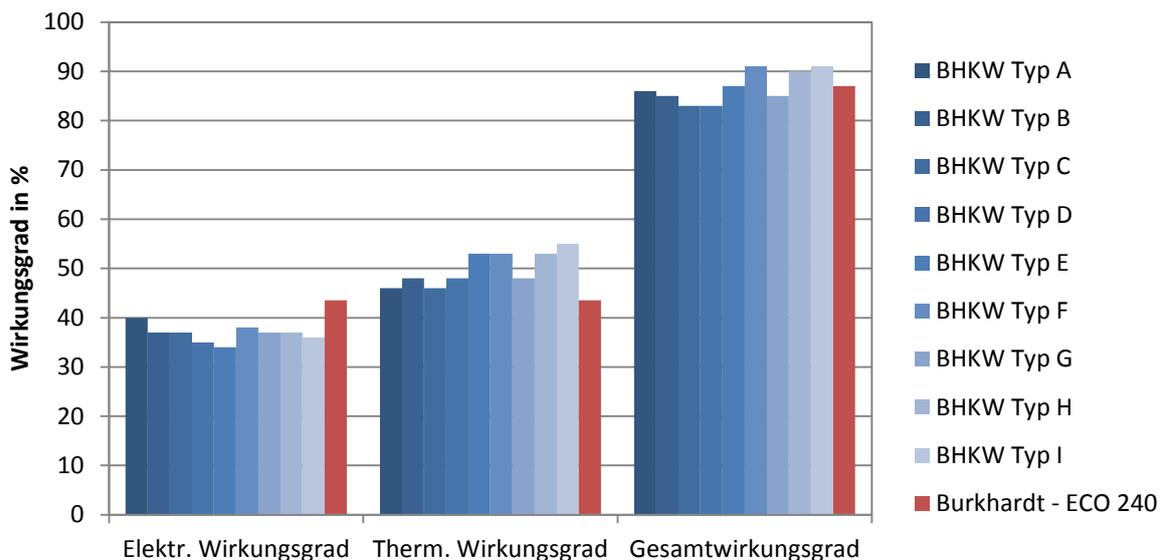


Abbildung 19: Vergleich der Wirkungsgrade der untersuchten BHKW Stand 2012

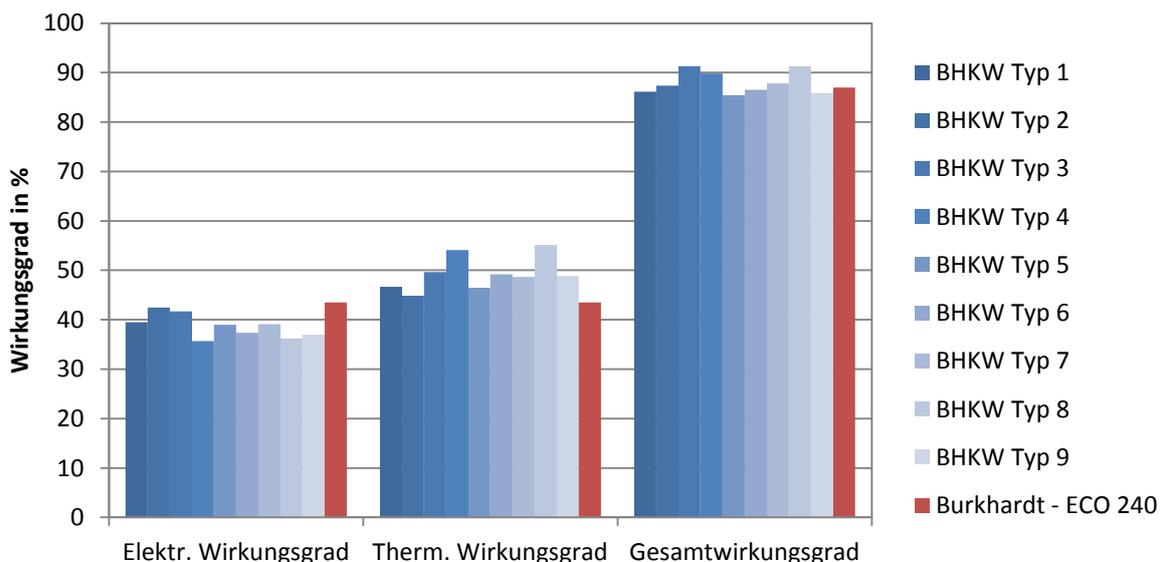


Abbildung 20: Vergleich der Wirkungsgrade der untersuchten BHKW Stand 2014

In Abbildung 19 (Daten 2012) und Abbildung 20 (Daten 2014) sind die Wirkungsgrade (elektrisch, thermisch, gesamt) der untersuchten BHKW-Module dargestellt. Zu Projektbeginn wies der Zündstrahlmotor mit elektrischen Wirkungsgraden von deutlich > 40 % ein klares Alleinstellungsmerkmal auf. Mittlerweile wurden jedoch auch im Bereich Gas-Otto-BHKW von verschiedenen Herstellern Anstrengungen unternommen, die elektrischen Wirkungsgrade zu steigern, sodass zunehmend Aggregate mit vergleichbar hohen Wirkungsgraden auf dem Markt verfügbar sind. Diese neue Gasmotoren generation basiert, ähnlich wie die Zünd-

strahltechnologie, ursprünglich auf Industrie-Dieselmotoren, die für den Gasbetrieb umkonstruiert wurden. Die erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade in der Leistungsklasse bis ca. 500 kW liegen in der Praxis derzeit bei etwa 41 % bis 42 %. Weitere Effizienzsteigerungen sind durch Detailoptimierungen denkbar, allerdings werden diese bei den heute verfügbaren Technologien deutlich kleiner ausfallen als in den vergangenen zwei bis drei Jahren, in denen, getrieben durch die Notwendigkeit höherer Wirtschaftlichkeit, ein langjähriges Entwicklungsdefizit im Gasmotorenmarkt aufgeholt wurde. Besondere Merkmale der hocheffizienten Gasmotoren sind u. a. ein vergleichsweise hohes Verdichtungsverhältnis sowie hoch belastbare und verbrennungstechnisch optimierte Stahlkolben, anstelle der bisher oft eingesetzten Aluminiumkolben. Weiterhin verfügen diese Motoren in der Regel über 4-Ventiltechnologie für einen optimierten Gaswechsel und hocheffiziente Aufladegruppen. Diese Entwicklung umfasst bei den Gasmotoren derzeit jedoch noch nicht den gesamten BHKW-Markt, sondern lediglich durch einzelne innovative Hersteller getrieben wird. So werden nach wie vor in einer Vielzahl von BHKW-Modulen technologisch einfache Gas-Saugmotoren mit vergleichsweise niedrigen Wirkungsgraden von deutlich unter 40 % eingesetzt.

Trotz der fortschreitenden Entwicklung bei den Gas-Otto-Motoren weist die Zündstrahl-Technologie im Vergleich zu diesen auch nach dem heutigen Stand noch eine Reihe von technisch und wirtschaftlich interessanten Vorteilen auf:

- a) Das im Rahmen des Projekts als Referenz herangezogene Zündstrahl-Aggregat vom Typ Burkhardt ECO 240 mit 240 kW_{el} erreicht laut Datenblatt einen elektrischen Wirkungsgrad > 43 % und in der Praxis elektrische Wirkungsgrade > 42 %. Damit übertrifft es nach wie vor die besten in dieser Leistungsklasse verfügbaren Aggregate mit Gas-Otto-Motoren.
- b) Zündstrahl-Aggregate sind im Gegensatz zu reinen Gas-Otto-Motoren für den Zweistoffbetrieb geeignet, was insbesondere für den Notbetrieb bei Abschaltung der Gasversorgung interessant ist (vgl. Zweistoffbrenner für Heizkessel).
- c) Durch die hohe Zündenergie, die durch die Zündstrahl-Einspritzung eingebracht wird, kann eine stabile Entzündung bei verschiedensten Betriebszuständen gewährleistet werden, z. B. bei der Regelennergiebereitstellung, für die eine möglichst gute Teillastfähigkeit und schnelle Regelfähigkeit gefordert werden. Gegenüber Gas-Otto-Motoren mit vergleichbarer Leistung und vergleichbarem Wirkungsgrad, die in der Regel lediglich für eine Abregelung bis auf etwa 50 % der Nennleistung freigegeben sind, ist das betrachtete Zündstrahl-Aggregat sehr gut teillastfähig (Reduzierung bis auf 25 % der Nennleistung).

- d) Weitere Potentiale zur Effizienzsteigerung eröffnen sich insbesondere für Zündstrahlmotoren durch die sogenannte Abgasnachverstromung mittels einer nachgeschalteten Abgasturbine (Turbocompound-Prinzip). Dabei wird dem eigentlichen Turbolader eine zweite Nutzturbine nachgeschaltet, über die das heiße Abgas vor Eintritt in den Abgaswärmetauscher nochmals entspannt wird. Da bei diesem Verfahren der Abgasgegendruck und das Druckniveau des Motors insgesamt angehoben werden, müssen der Ladungswechsel und die Aufladegruppe sowie die Einspritz- bzw. Zündparameter neu abgestimmt werden. In einem vorangegangenen Forschungsvorhaben der Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde für die Abgasturbinentechnologie ein Potential zur Effizienzsteigerung von ca. 4 bis 5 Prozentpunkten nachgewiesen [BrautschLechner2010]. Die Untersuchungen wurden an einem mit Flüssigkraftstoff betriebenen Dieselmotor-BHKW durchgeführt, mittlerweile wurde die Technologie von verschiedenen Herstellern aber auch auf Zündstrahlmotoren übertragen¹⁰. Diese Aggregate erreichen in der Leistungsklasse von ca. 250 kW_{el} sehr hohe elektrische Systemwirkungsgrade von bis zu 46 % [Schnell2014]. Im Gegensatz dazu ist für Gas-Otto-Motoren die Abgasnachverstromung mittels Abgasturbinen bisher nicht serienmäßig verfügbar. Ein Grund hierfür dürfte sein, dass sich die Technologie bei Zündstrahlmotoren mit ihrer stabilen Verbrennung einfacher umsetzen lässt, insbesondere im Vergleich zu den prozesstechnisch weitgehend ausgereizten hocheffizienten Gas-Otto-Motoren. Besser geeignet für Gas-Otto-Motoren sind Nachverstromungstechnologien die lediglich die Abgaswärme nutzen und keinen Eingriff in den Motorprozess erfordern, wie z. B. Organic-Rankine-Cycle Anlagen (ORC) oder Dampfkraftanlagen. Nachteil dieser Systeme sind der vergleichsweise hohe apparative Aufwand und Platzbedarf sowie die hohen Kosten, sodass sie erst bei größeren BHKW-Leistungen mit entsprechend hohen Abgaswärmeleistungen wirtschaftlich interessant werden (BHKW ab ca. 500 kW elektrischer Leistung).
- e) Technologisch gesehen befindet sich die Entwicklung von Zündstrahlaggregaten für Erdgas-Anwendungen insgesamt noch in der Anfangsphase, sodass, entsprechende Forschung und Entwicklung vorausgesetzt, in den nächsten Jahren weitere Effizienz- und Kostenvorteile sowie die Erschließung neuer Einsatzfelder zu erwarten sind. Potential zur Weiterentwicklung besteht insbesondere beim Ladungswechsel (Steuerzeiten, Aufladegruppe) sowie bei der mechanischen und verbrennungstechnischen Optimierung von Kolben und Brennraum.

¹⁰ Fa. Schnell Motoren AG (Biogas-Zündstrahl-BHKW mit Abgasturbine), Fa. Burkhardt GmbH (Holzgas-Zündstrahl-BHKW mit Abgasturbine)

6 Ökonomisches Potential der Zündstrahltechnologie

6.1 Methodische Vorgehensweise

Zur Abschätzung des wirtschaftlichen Potentials der Zündstrahltechnologie wurde für verschiedene Szenarien eine Vollkostenrechnung nach der Annuitätenmethode in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 2067 durchgeführt, wobei Kapitalkosten, verbrauchsgebundene und betriebsgebundene Kosten sowie Einnahmen durch Stromgutschriften berücksichtigt wurden. Dabei wurde für alle Anlagen von einheitlichen Marktdurchschnittspreisen ausgegangen (z. B. gleicher Erdgaspreis für alle Erdgas-BHKW, gleicher Zündölpreis für alle Zündstrahl-BHKW), um eine vergleichbare Datenbasis zu schaffen. Ergebnis der Vollkostenrechnung sind die spezifischen Wärmegegestehungskosten in Cent/kWh, die als Vergleichsmaßstab für die Wirtschaftlichkeit dienen. Folgende einheitliche Randbedingungen wurden festgelegt:

- Der Betrachtungszeitraum beträgt 10 Jahre.
- Alle Preise sind Nettopreise.
- Abschreibungen erfolgen linear über den Betrachtungszeitraum.
- Der kalkulatorische Zinssatz beträgt 4 %.
- Die Brennstoffpreise bleiben im Betrachtungszeitraum konstant (siehe Tabelle 6).
- Preisänderungen werden gesondert über eine Sensitivitätsanalyse erfasst.
- Einspeisevergütungen für EEG-Anlagen werden für Bestandsanlagen nach geltender Rechtslage des EEG 2012 mit Degression für das Jahr 2014 ermittelt (Inbetriebnahme bis 31.07.2014). Für Neuanlagen, die nach dem 01.08.2014 in Betrieb genommen werden gilt das EEG 2014.
- Zuschläge nach dem KWKG werden nach geltender Rechtslage im Inbetriebnahmejahr der BHKW-Anlage berücksichtigt und gleichmäßig auf den Betrachtungszeitraum umgelegt.
- Für den in KWK-Anlagen eingesetzten Brennstoff wird eine Steuerentlastung nach § 53a EnergieStG berücksichtigt, die Brennstoffpreise werden daher exklusive Energiesteuer kalkuliert.
- Steuerliche Aspekte über das EnergieStG hinaus werden nicht berücksichtigt.

- Investitionskosten und Kosten für Wartung- und Instandhaltung der BHKW-Module werden soweit möglich auf Basis der Kostenfunktionen aus [ASUE2014] für die Leistungsklasse 100 kW_{el} bis 1000 kW_{el} entnommen. Art und Umfang der darin enthaltenen Wartungsarbeiten orientieren sich an der VDI 4680, auf die an dieser Stelle verwiesen sei [VDI4680]. Im Falle der Zündstrahltechnologie ist zu erwarten, dass die Instandhaltungskosten höher anzusetzen sind als bei Gas-Otto-BHKW. Um dies abzubilden, wurden für die Zündstrahltechnologie vereinfachend die Kosten für die Instandhaltung von Biogas-BHKW nach [ASUE2014] angenommen. Im Biogasbereich sind Zündstrahlaggregate bereits verbreitet und daher in den Kostenfunktionen zumindest anteilmäßig berücksichtigt.

Spez. Richtpreis für
Anschaffung von
Erdgas-BHKW:

$$k_{BHKW} = 4907 * P_{el}^{-0,352} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{el}} \right] \quad (\text{Gleichung 6.1})$$

Spez. Richtpreis für
Instandhaltung von
Erdgas-BHKW:

$$k_{Instand} = 6,2728 * P_{el}^{-0,283} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{el}} \right] \quad (\text{Gleichung 6.2})$$

Spez. Richtpreis für
Instandhaltung von
Biogas-BHKW:

$$k_{Instand} = 6,896 * P_{el}^{-0,287} \left[\frac{\text{€}}{\text{kW}_{el}} \right] \quad (\text{Gleichung 6.3})$$

- Investitionskosten für das Zündstrahl-BHKW wurden auf Basis von Richtpreisen des Herstellers kalkuliert (siehe Tabelle 7). Im Vergleich zu Gas-Otto-BHKW müssen hier weitere Kosten berücksichtigt werden (z. B. zusätzliche Kraftstoffinfrastruktur).
- Für die Anlieferung und Einbindung von BHKW-Modulen fallen zusätzliche Kosten an. Hierfür wurden gemäß Kostenfunktion nach [ASUE2014] für die Leistungsklasse 101 kW_{el} bis 350 kW_{el} in Summe 51 % der Investitionskosten angesetzt (6 % Transport bis Abnahme, 45 % Einbindung).
- Zusätzlich wurden Planungskosten in Höhe von 15 % auf die Summe der Investitions- und Einbindungskosten aufgeschlagen.
- Bei Zündstrahl-BHKW werden SCR-Katalysatoren für die Emissionsreduzierung berücksichtigt. Die Kosten für das Reduktionsmittel (wässrige Harnstofflösung, Handelsname Ad-Blue) wurden mit 0,30 €/l angesetzt.

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden anlagenspezifische Betreiber-, Finanzierungs- und Abschreibungsmodelle (Contracting, Wartungsmodelle,...) sowie steuerliche Aspekte

und Renditeerwartungen nicht berücksichtigt, sodass die hier dargestellten Energiegestehungskosten nicht direkt mit marktüblichen Wärme- oder Kältepreisen vergleichbar sind.

BHKW-Anlagen die mit Biomethan betrieben werden haben Anspruch auf Vergütung nach dem Erneuerbaren-Energien-Gesetz. Für Anlagen die vor dem 01.08.2014 in Betrieb genommen wurden gilt dabei das EEG 2012 [EEG2012]. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurden zur Ermittlung der Vergütungshöhe nach EEG 2012 folgende Rahmenbedingungen angenommen:

- Energetischer Anteil der eingesetzten Substrate der Einsatzstoffvergütungskategorie I nach Biomasseverordnung 100 %
- Nennleistung der Biomethan-Einspeiseanlage: 1400 Nm³/h
- Inbetriebnahmedatum der KWK-Anlage 01.01.2014

Für EEG-Neuanlagen, die nach dem 01.08.2014 in Betrieb genommen werden richtet sich die Vergütung nach den Regelungen des EEG 2014 [EEG2014]. Bis zu einer elektrischen Leistung von 150 kW beträgt die Vergütung anteilig 13,66 Ct/kWh zwischen 150 kW_{el} und 500 kW_{el} sind es 11,78 Ct/kWh (jeweils Inbetriebnahmejahr 2014) [EEG2014]. Im Rahmen der Wirtschaftlichkeits-Modellrechnungen wurde sowohl die Vergütung nach EEG 2012, als auch nach EEG 2014 betrachtet.

Für KWK-Anlagen die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden und daher nicht in den Geltungsbereich des EEG fallen, erfolgt die Vergütung des Stroms nach dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz in der aktuellen novellierten Fassung von 2012. Der Anspruch auf Zahlung des KWK-Zuschlags besteht sowohl bei Stromeigennutzung als auch bei Stromeinspeisung. Für die Stromeinspeisung wurde eine Vergütung nach EEX Baseloadpreis zuzüglich des KWK-Zuschlags angenommen. Bei Stromeigennutzung wurde eine Stromgutschrift von 15 Ct/kWh (vermiedene Strombezugskosten) zuzüglich KWK-Zuschlag angesetzt. Für Neuanlagen ab dem 01.08.2014 ist zu berücksichtigen, dass auch für den selbst genutzten Strom eine EEG-Umlage in Höhe von 30 % bis 40 % des jeweils gültigen Satzes abgeführt werden muss (stufenweise Einführung in den Jahren 2014 bis 2016). In den Modellrechnungen zur Wirtschaftlichkeit wurde für Neuanlagen vereinfachend von einer EEG-Umlage von 40 % bezogen auf den Satz des Jahres 2014 ausgegangen, ohne nach dem Inbetriebnahmejahr zu differenzieren (ungünstigster Fall). Dies entspricht einer Umlage von 2,496 Ct/kWh, die von der Stromgutschrift abzuziehen ist. Die angenommenen Stromeinspeisevergütungen bzw. Gutschriften für selbst genutzten Strom sind zusammenfassend in Tabelle 6 dargestellt.

In den spezifischen Wärmegestehungskosten sind zunächst keine Preissteigerungen enthalten. Diese werden gesondert über eine Sensitivitätsanalyse berücksichtigt, mittels derer die Abhängigkeit der Energiekosten von einzelnen Einflussgrößen untersucht wurde. Bei Blockheizkraftwerken sind die entscheidenden Einflussgrößen in der Regel die verbrauchsgebundenen Kosten und die erzielbaren Einnahmen bzw. Ersparnisse durch die Stromerzeugung, während die Wartungs- und die Kapitalkosten eine untergeordnete Rolle spielen. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden die Sensitivitätsanalysen daher auf die Einflussgrößen Brennstoffpreis und Stromgutschrift bzw. Stromeinspeisevergütung beschränkt.

Tabelle 6: Brennstoff- und Strompreisannahmen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Energieträger	Preis pro Einheit
Brennstoffpreis Erdgas (exkl. Energiesteuer)	0,040 €/kWh _{Hi}
Brennstoffpreis Heizöl (exkl. Energiesteuer)	0,075 €/kWh _{Hi}
Brennstoffpreis Pflanzenöl (exkl. Energiesteuer)	0,080 €/kWh _{Hi}
Brennstoffpreis Biomethan (exkl. Energiesteuer)	0,095 €/kWh _{Hi}
Einspeisevergütung nach EEG 2012 gestaffelt nach Bemessungsleistung	0 - 150 kW: 0,2069 €/kWh 150 - 500 kW: 0,1879 €/kWh
Einspeisevergütung nach EEG 2014 gestaffelt nach Bemessungsleistung	0 - 150 kW: 0,1366 €/kWh 150 - 500 kW: 0,1178 Ct/kWh
Strom Verkauf KWKG EEX Baseload (Durchschnitt Quartal 1 bis Quartal 3 2014)	0,0321 €/kWh
Stromgutschrift für Eigenverbrauch ohne EEG-Umlage (Bestandsanlagen vor 01.08.2014)	0,1500 €/kWh
EEG-Umlage Basisjahr 2014	6,24 Ct/kWh
EEG-Umlage für Stromeigenerzeugung mit hocheffizienten KWK-Anlagen	2,496 Ct/kWh (40 % von 6,24 Ct/kWh)
Stromgutschrift für Eigenverbrauch abzgl. EEG-Umlage i.H.v. 40 % (Neuanlagen ab 01.08.2014)	0,1250 €/kWh

Tabelle 7: Angenommene Investitionskosten für Zündstrahl-BHKW Burkhardt ECO 240

	Kosten
BHKW-Modul	166.000 €
Zündöltank (10.000 l)	8.500 €
SCR-Katalysator-System	18.500 €

6.2 Szenarien

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden drei unterschiedliche Szenarien für den Betrieb von Zündstrahl-BHKW betrachtet:

- Szenario 1: Erdgas-Heizöl-Zündstrahlbetrieb, 100 % Stromeinspeisung nach KWKG im Vergleich mit marktüblichen Gas-Otto-BHKW
- Szenario 2: Erdgas-Heizöl-Zündstrahlbetrieb, 100 % Stromeigennutzung nach KWKG im Vergleich mit marktüblichen Gas-Otto-BHKW
- Szenario 3: Biomethan-Rapsöl-Zündstrahlbetrieb, 100 % Stromeinspeisung nach EEG im Vergleich mit marktüblichen Gas-Otto-BHKW

Ein viertes Szenario „Biomethan-Rapsöl-Zündstrahlbetrieb mit 100 % Stromeigennutzung“ wurde nicht betrachtet, da diese Variante in der hier betrachteten Leistungsklasse aufgrund fehlender Förderungen in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen nicht relevant ist. Im EEG ist keine Förderung für die Stromeigennutzung vorgesehen und eine Förderung nach KWKG wäre ebenfalls nicht möglich, da eine solche Anlage unter den Geltungsbereich des EEG fällt und dieses nach § 2 KWKG vorrangig anzuwenden ist [KWKG2009].

Als Bezugsgröße für die wirtschaftliche Betrachtung dient ein definierter jährlicher Wärmebedarf von 1.440.000 kWh_{th}. Es wird davon ausgegangen, dass das BHKW wärmegeführt betrieben wird. Die jährlichen Vollbenutzungsstunden der BHKW-Anlagen errechnen sich demnach aus dem geforderten Wärmebedarf und der thermischen Leistung der Anlage. Für das Zündstrahl-BHKW ergeben sich folgende Energieumsätze:

- Thermische Leistung: 240 kW
- Elektrische Leistung: 240 kW
- Vollbenutzungsstunden: 6.000 h/a
- Wärmebereitstellung: 1.440.000 kWh/a
- Strombereitstellung: 1.440.000 kWh/a

Für den Vergleich mit dem Stand der Technik wurden die in Abschnitt 5 dargestellten Gas-Otto-BHKW mit der aktualisierten Datenbasis des Jahres 2014 herangezogen (vgl. Abbildung 18 und Abbildung 20, technische Daten siehe Anhang 7).

6.3 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

6.3.1 Erdgasbetrieb (100 % Stromeinspeisung)

In Abbildung 21 ist die Höhe der jährlichen Einnahmen bzw. Ausgaben für den Betrieb der untersuchten BHKW im Szenario „Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeinspeisung“ dargestellt. Das Zündstrahl-BHKW weist mit deutlichem Abstand die höchsten Ausgaben auf, während die Einnahmen nur geringfügig höher ausfallen als bei den Gas-Otto-BHKWs. Daraus ergibt sich eine höhere Differenz zwischen Einnahmen und Ausgaben, die sich direkt proportional auf die Wärmegestehungskosten auswirkt.

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Wärmegestehungskosten für das Szenario in Abhängigkeit der Einflussgrößen Stromgutschrift und Brennstoffkosten. Das Zündstrahl-BHKW schneidet über den gesamten Betrachtungsbereich deutlich schlechter ab als die Gas-Ottomotoren. Dies liegt in erster Linie an der geringen garantierten Stromgutschrift (EEX-Baseloadpreis + KWK-Zuschlag), wodurch im Vergleich zu den hohen Betriebs- und Investitionskosten beim Zündstrahl-BHKW nur geringe Einnahmen vorliegen. Darüber hinaus wird beim betrachteten Zündstrahl-Aggregat im Vergleich zu den meisten Gas-Ott-BHKW auch noch weniger Wärme ausgekoppelt, sodass sich in Summe höhere Wärmegestehungskosten. Weiterhin ist in der Sensitivitätsanalyse zu erkennen, dass die Kurven für das Zündstrahl-BHKW etwas steiler verlaufen als die für die Gas-Ottomotoren, d. h. die Wärmegestehungskosten reagieren sensibler auf Änderungen der Stromgutschrift und Brennstoffpreise.

Der Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeinspeisung ist heutzutage eine wenig verbreitete Betriebsstrategie. Wo immer möglich, wird versucht, den erzeugten Strom selbst zu nutzen, da die erzielbaren Einsparungen durch Stromeigennutzung in der Regel höher sind als der für die Stromeinspeisung nach KWKG maßgebliche EEX-Baseloadpreis. Die Ergebnisse des Szenarios Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeinspeisung lassen sich grundsätzlich auf alle Anwendungen verallgemeinern, bei denen der erzeugte Strom vergleichsweise wenig wert ist und der Fokus auf der ausgekoppelten Wärme liegt. Hier sind Gas-Otto-BHKW mit einfacher Technologie und niedrigen elektrischen Wirkungsgraden aber hoher Wärmeauskopplung und hohem Gesamtwirkungsgrad wirtschaftlich im Vorteil.

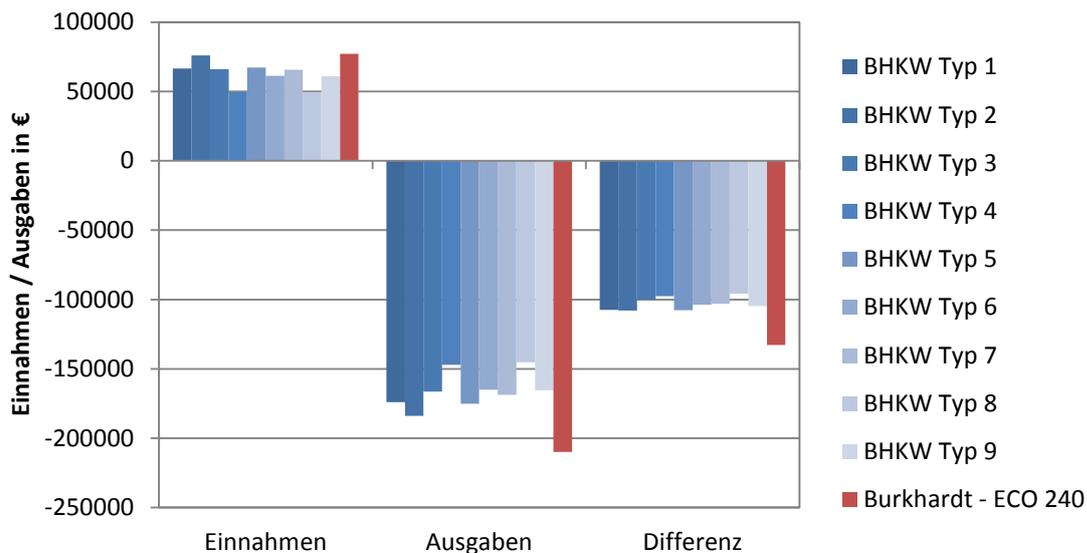


Abbildung 21: Einnahmen bzw. Ausgaben für erdgasbetriebene BHKW (100% Einspeisung)

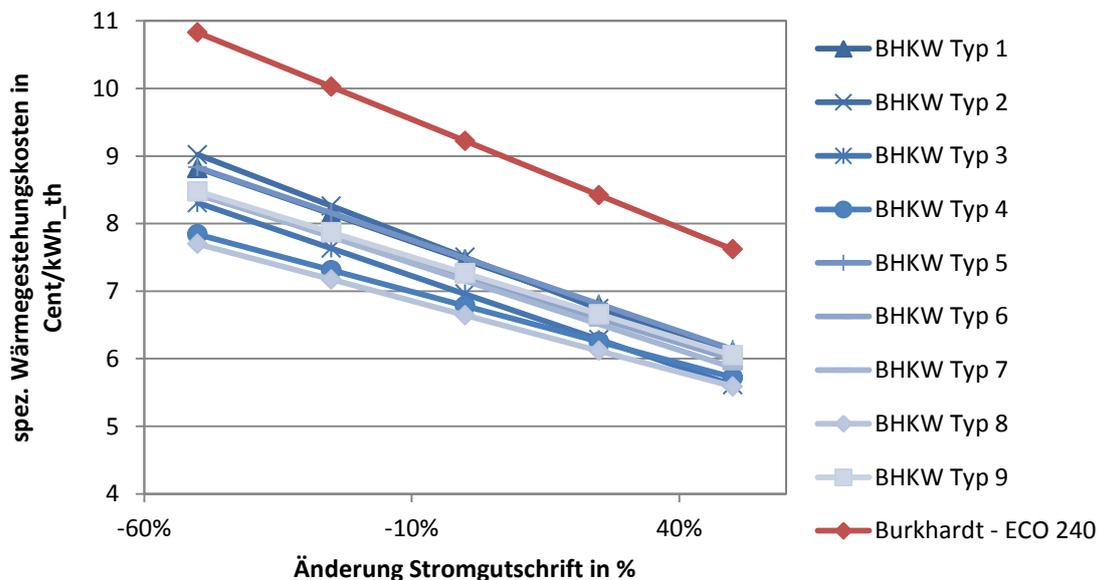


Abbildung 22: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung (100 % Einspeisung)

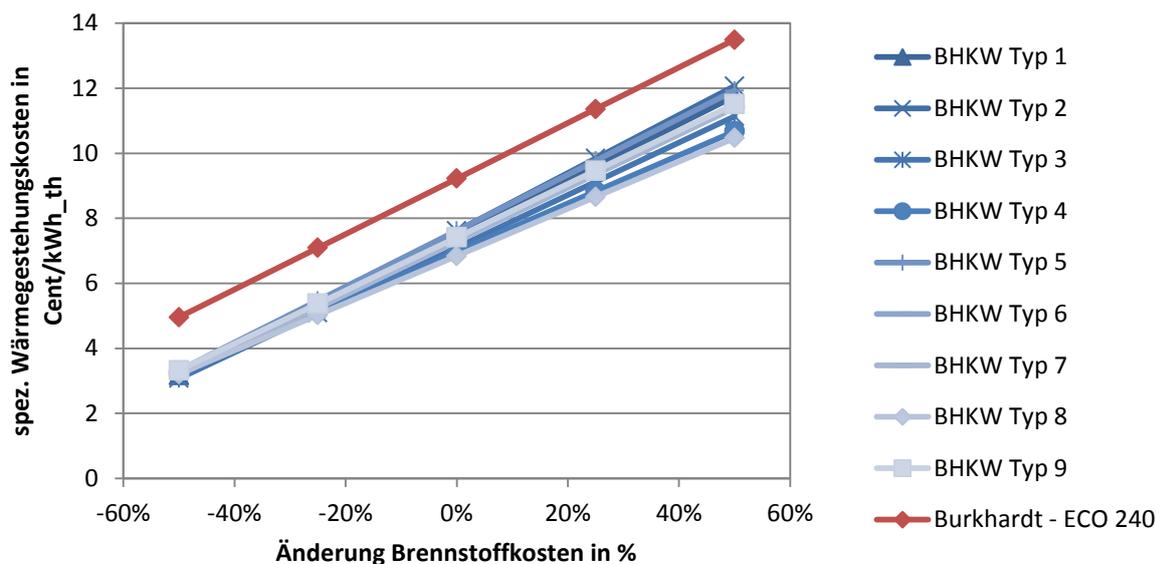


Abbildung 23: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises (100 % Einspeisung)

6.3.2 Erdgasbetrieb (100 % Stromeigennutzung)

Abbildung 24 zeigt die jährlichen Einnahmen und Ausgaben im Szenario „Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeigennutzung“. Auch hier fallen beim Zündstrahl-BHKW die höchsten Ausgaben an. Dem stehen jedoch auf Grund der in diesem Szenario höheren Stromgutschrift hohe Einnahmen gegenüber, sodass sich in Summe eine positive Differenz ergibt (Gewinn). In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Wärmegestehungskosten in Abhängigkeit der Stromgutschrift und der Brennstoffkosten dargestellt¹¹. Aufgrund der hohen Stromgutschrift schneidet das Zündstrahl-BHKW mit seinen hohen elektrischen Wirkungsgraden sehr gut ab, wird jedoch von den neu auf dem Markt verfügbaren elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-BHKW (BHKW Typ 2 und Typ 3) noch übertroffen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die angenommenen Investitions- und Betriebskosten auf Marktdurchschnittspreisen basieren. In der konkreten Einzelfallbetrachtung kann sich das Ergebnis umkehren.

Im Erdgasbetrieb wird aus wirtschaftlichen Gründen meist eine möglichst hohe Stromeigennutzung angestrebt. Für die Mehrheit der Fälle dürfte also dieses Szenario die praxisrelevan-

¹¹ Unter den angenommenen Randbedingungen ergeben sich in weiten Bereichen negative Wärmegestehungskosten. Dies bedeutet, dass allein durch die Stromgutschrift bereits ein kostendeckender Betrieb mit einer Gewinnmarge möglich wäre. Dies liegt an der hier gewählten etwas vereinfachten Form der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung begründet, deren Ziel der Vergleich von BHKW-Anlagen untereinander ist und nicht die Ermittlung der Wärmegestehungskosten für einen konkreten Einsatzfall. In der Realität sind zusätzliche Investitionskosten (Peripherie) und Betriebskosten zu berücksichtigen (Verwaltung, Versicherung, Technische Prüfungen,...), sodass die Wärmegestehungskosten etwas höher bzw. nicht negativ ausfallen.

te Betriebsweise darstellen. Zu unterscheiden ist zwischen Bestandsanlagen, die vor dem 01.08.2014 in Betrieb genommen wurden und Neuanlagen, die nach dem 01.08.2014 erstmals in Betrieb gesetzt wurden. Für letztere ist auch für den selbst genutzten Strom ein Teil der EEG-Umlage abzuführen. Die Auswirkungen der EEG-Eigenstromumlage auf die Wirtschaftlichkeit sind wie folgt in Abbildung 25 dargestellt:

- Fall A: Inbetriebnahme vor dem 01.08.2014; EEG-Umlage 0 %
- Fall B: Inbetriebnahme nach dem 01.08.2014; EEG-Umlage 40 %

Aufgrund des starken Einflusses der Stromgutschrift in diesem Szenario, ist das Zündstrahl-BHKW besonders von der EEG-Umlage auf selbst genutzten Strom betroffen, d.h. die Wärmegestehungskosten steigen im Vergleich mit Gas-Otto-BHKW überproportional an. Je höher die Befreiung von der EEG-Umlage ausfällt, desto besser schneidet das Zündstrahl-BHKW im Vergleich ab.

Die Ergebnisse des Szenarios „Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeingennutzung“ lassen sich grundsätzlich auf alle Anwendungen verallgemeinern, bei denen der erzeugte Strom hoch bewertet wird (hohe Stromgutschrift) und der Fokus auf der Stromerzeugung liegt. Hier ist die Zündstrahl-Technologie mit ihren hohen elektrischen Wirkungsgraden im Vorteil. Im Vergleich zur Ausgangslage bei Projektstart im Jahr 2012 drängen jedoch vermehrt Gas-Otto-BHKW mit sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden auf den Markt, sodass der potentielle Vorteil der Zündstrahl-Technologie hier schwindet.

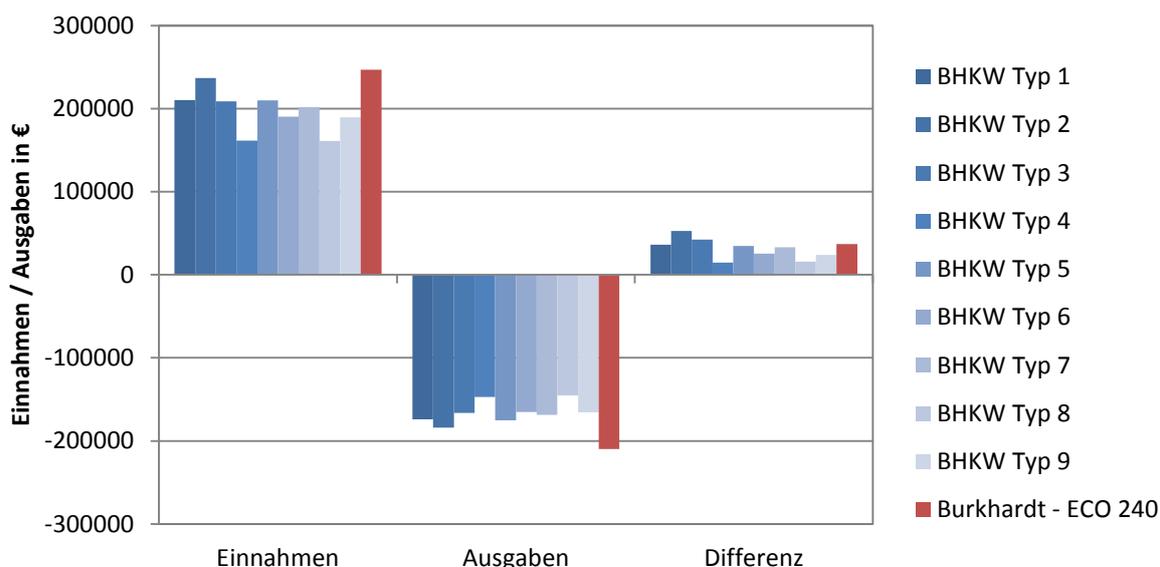


Abbildung 24: Einnahmen bzw. Ausgaben für erdgasbetriebene BHKW (100% Eigennutzung)

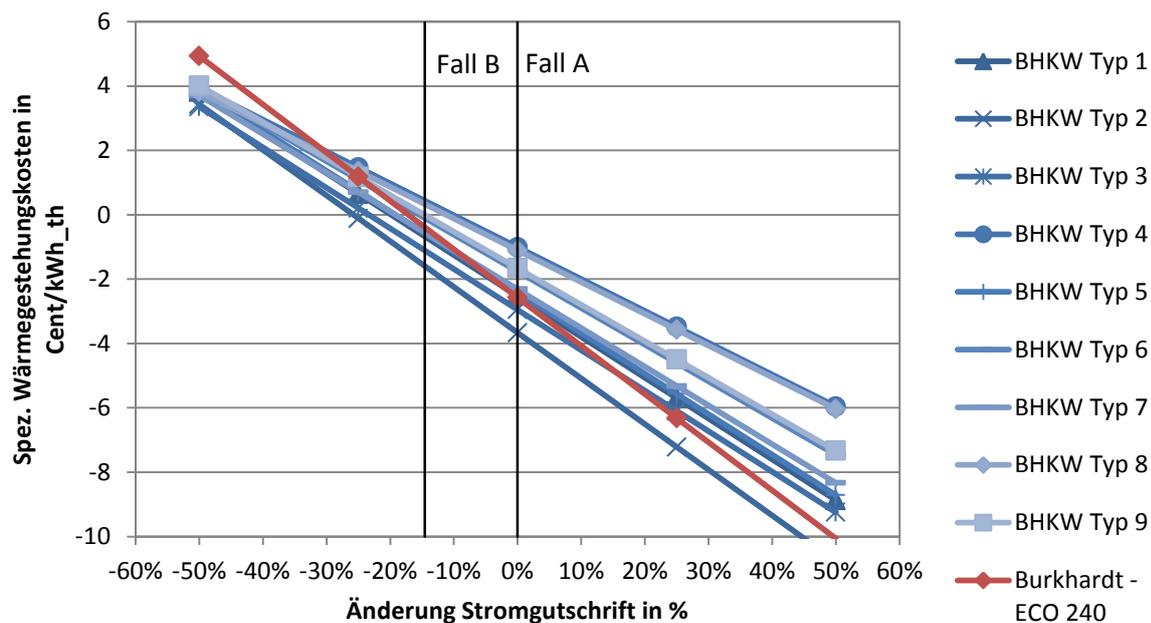


Abbildung 25: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung (100 % Stromeigennutzung)

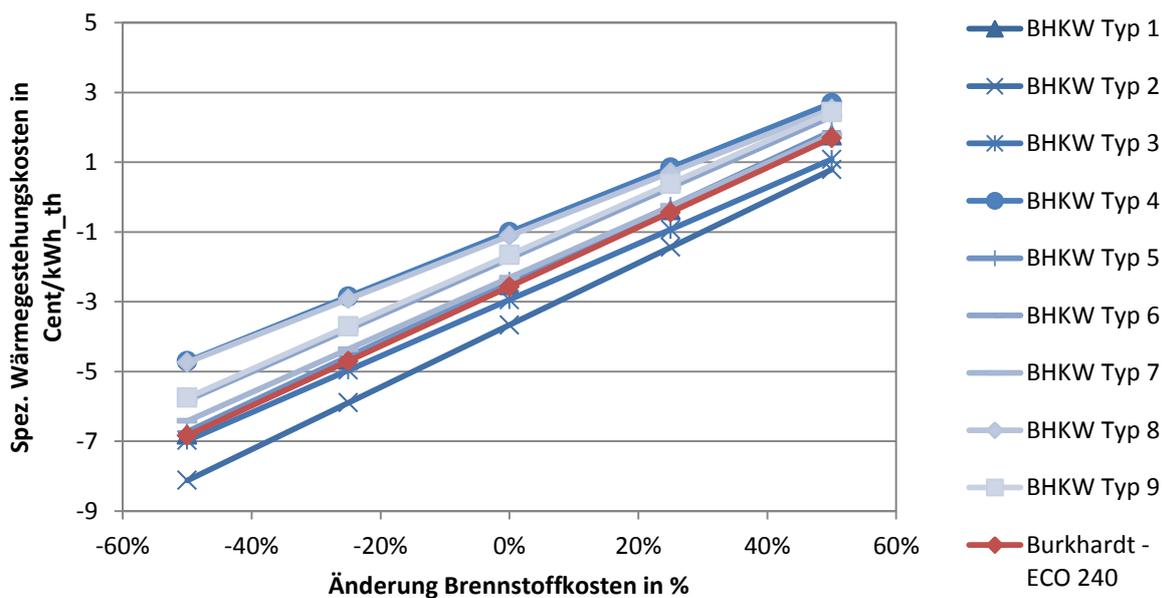


Abbildung 26: Sensitivitätsanalyse für erdgasbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises (100 % Stromeigennutzung)

6.3.3 Biomethanbetrieb (100 % Stromeinspeisung)

Eine interessante Anwendung für Zündstrahl-BKHW stellt der Biomethanbetrieb dar, da hier vergleichsweise hohe Brennstoffpreise vorliegen, aber auch hohe Einspeisevergütungen

erzielt werden können, wodurch BHKW-Module im Vorteil sind, die den teuren Brennstoff möglichst gut in elektrische Energie umsetzen. Dies gilt in erster Linie für Biomethan-BHKW, die bis zum 31.07.2014 in Betrieb genommen wurden. Im Zuge der Novellierung des EEG im Jahr 2014 (gültig ab 01.08.2014) wurde die Vergütung für Strom aus Biomasse deutlich abgesenkt, sodass der Biomethanbetrieb wirtschaftlich nun wesentlich unattraktiver ist. Dennoch existiert noch eine Reihe von Biomasse-KWK-Altanlagen die Anspruch auf EEG-Vergütung haben oder im Rahmen außerhalb des EEG vermarktet werden (Direktvermarktung) und für die eine Umstellung des Brennstoffs auf Biomethan wirtschaftlich interessant sein kann. Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde ausschließlich der Biomethanbetrieb nach EEG in der Fassung des Jahres 2012 mit Berücksichtigung der Degression für das Inbetriebnahmejahr 2014 betrachtet.

Abbildung 27, Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das Szenario „Biomethanbetrieb“ mit Stromeinspeisung nach EEG 2012. Wie erwartet schneiden hier die BHKW-Module mit hohem elektrischen Wirkungsgrad am besten ab, wobei auch hier wieder die neu am Markt verfügbaren elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-BHKW tendenziell geringere Wärmegestehungskosten als das Zündstrahl-BHKW aufweisen, ähnlich wie beim Szenario „Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeigennutzung“. Dennoch können Zündstrahl-BHKW nach EEG 2012 eine wirtschaftliche interessante Alternative für den Biomethanbetrieb darstellen. Berücksichtigt man dagegen die Absenkung der Vergütung nach EEG 2014, die im betrachteten Fall rund 34 % gegenüber dem Wert nach EEG 2012 beträgt, so ist mit deutlich höheren Wärmegestehungskosten zu rechnen. In Abbildung 28 sind beide Fälle – Vergütung nach EEG 2012 und EEG 2014 – dargestellt.

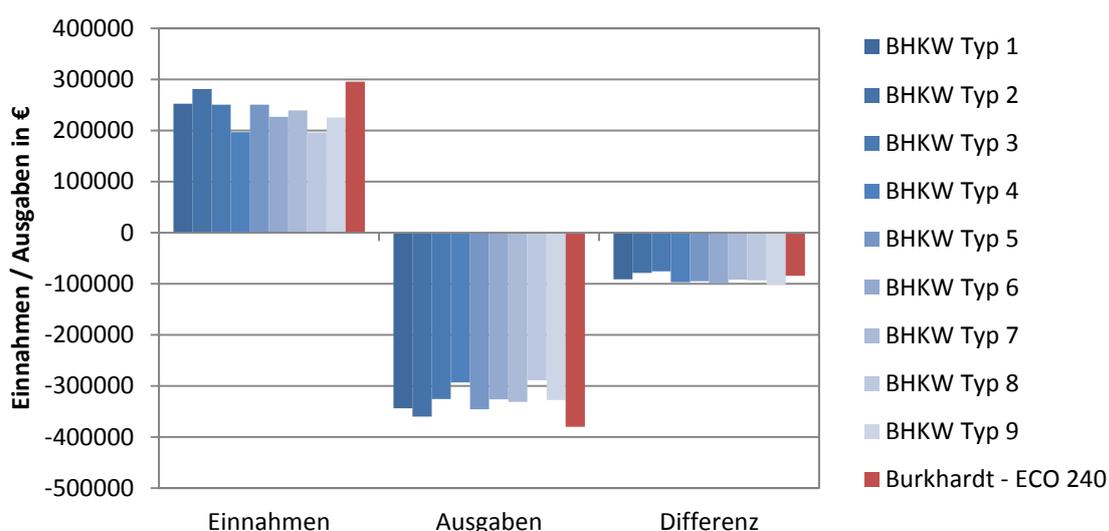


Abbildung 27: Einnahmen bzw. Ausgaben für biomethanbetriebene BHKW (100 % Einspeisung)

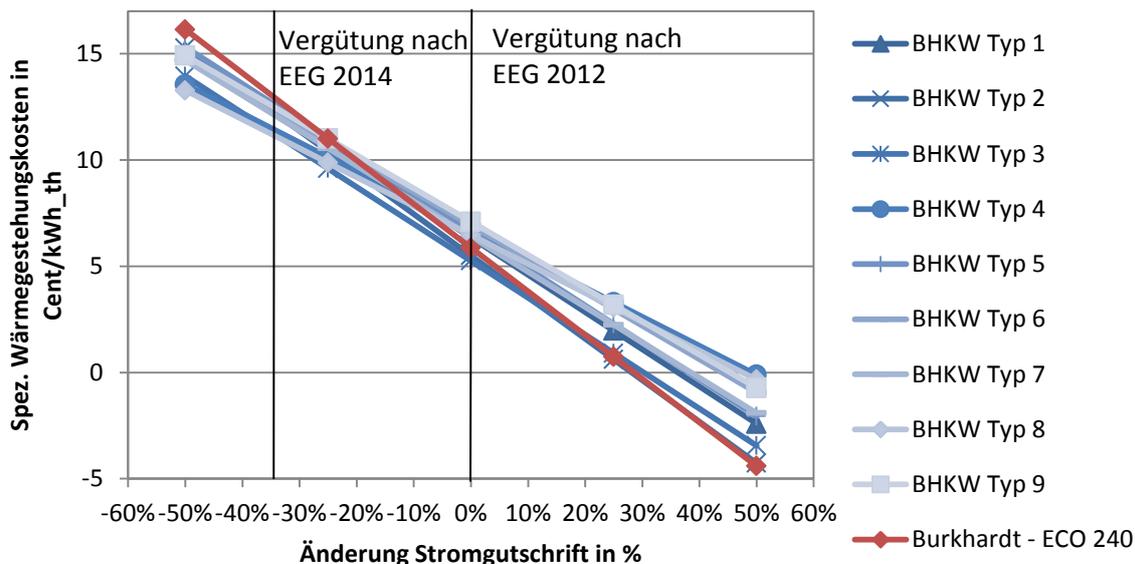


Abbildung 28: Sensitivitätsanalyse für biomethanbetriebene BHKW in Abhängigkeit der Stromvergütung

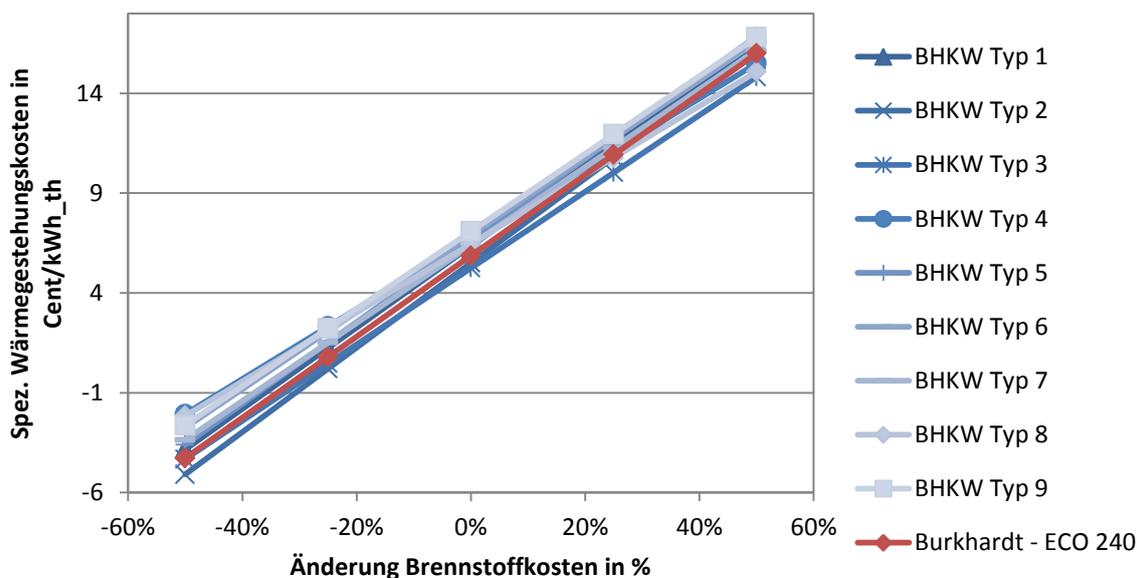


Abbildung 29: Sensitivitätsanalyse für biomethanbetriebene BHKW in Abhängigkeit des Brennstoffpreises

6.3.4 Ergebnisse der Szenarienrechnungen im Vergleich

In Abbildung 30 sind die Wärmegestehungskosten der untersuchten BHKW in den unterschiedlichen Szenarien zusammenfassend dargestellt. Dabei wurden die Regelungen des neuen EEG 2014 berücksichtigt (Absenkung der Vergütung für Biomethanbetrieb und Belas-

tung selbst genutzten Strom in Höhe von 40 % der EEG-Umlage). Das Zündstrahl-BHKW schneidet im Szenario Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeinspeisung zunächst vergleichsweise schlecht ab, ist aber bei Anwendungen mit hoher Stromgutschrift (Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeigennutzung) wirtschaftlich gegenüber den meisten Gas-Otto-BHKW im Vorteil, ebenso wie im Betrieb mit Biomethan nach EEG 2012. Allerdings erreichen die neu auf dem Markt verfügbaren elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-BHKW nochmals etwas geringere Wärmegestehungskosten, sodass gegenüber der Situation zu Beginn des Projekts im Jahr 2012 das Alleinstellungsmerkmal der Zündstrahl-Technologie – hohe Wirtschaftlichkeit aufgrund hoher elektrischer Wirkungsgrade – zunehmend schwindet.

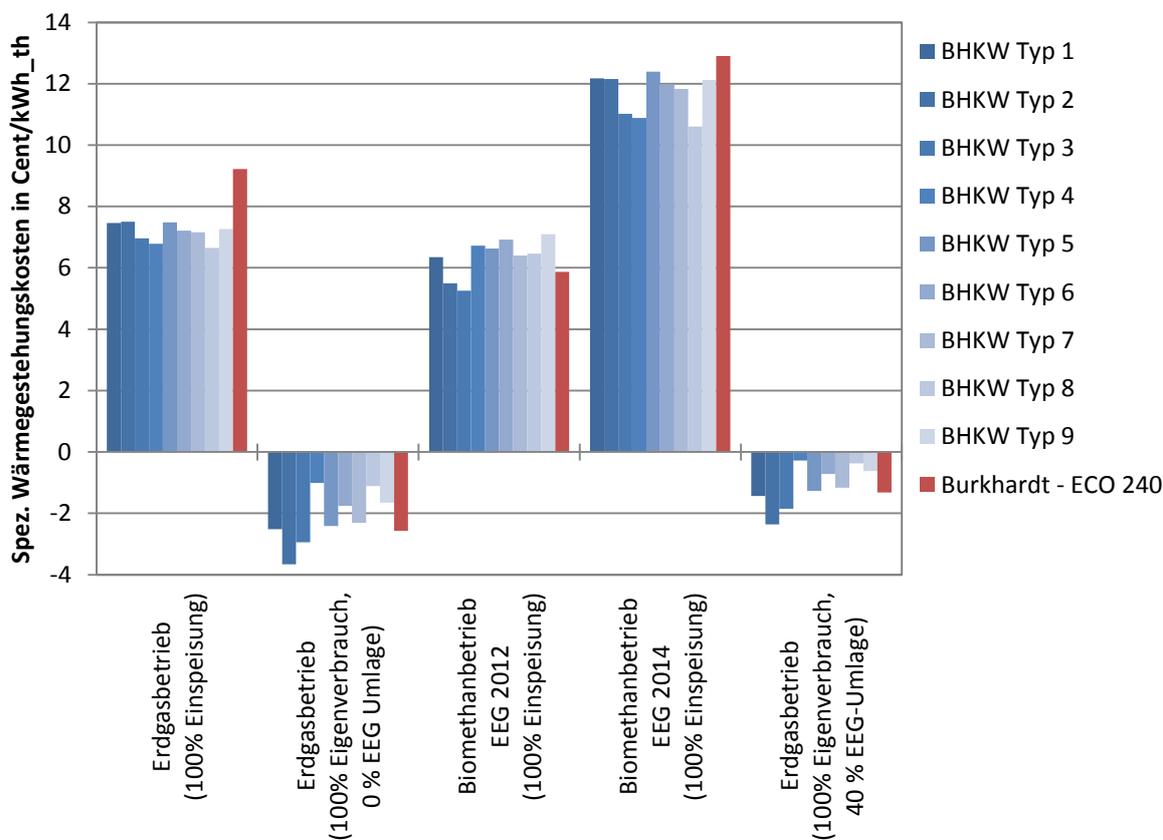


Abbildung 30: Vergleich der Wärmegestehungskosten in den verschiedenen Szenarien

7 Ökologisches Potential der Zündstrahltechnologie

7.1 Methodische Vorgehensweise

7.1.1 Primärenergetische Betrachtung

Zur Ermittlung der Primärenergieeinsparung einer KWK-Anlage gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung wurde mit der Richtlinie 2012/27/EU ein einheitliches Verfahren für den EU-Raum festgelegt, das auch in der vorliegenden Studie angewendet wurde. Die Primärenergieeinsparung berechnet sich demnach zu:

$$PEE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,REF}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,REF}}} \quad (\text{Gleichung 7.1})$$

Als Vergleichswerte für die ungekoppelte Strom- bzw. Wärmeerzeugung wurden von der EU-Kommission harmonisierte Wirkungsgrad-Referenzwerte festgelegt, die den Stand der Technik im jeweiligen Inbetriebnahmejahr der KWK-Anlage repräsentieren. Die so berechnete Primärenergieeinsparung berücksichtigt also nicht die tatsächliche Verdrängung von Anlagen zur getrennten Strom- und Wärmeerzeugung im Einzelfall, sondern entspricht der Einsparung durch die Kraft-Wärme-Kopplung gegenüber einem fiktiven Referenzsystem zur getrennten Strom- und Wärmeerzeugung, das mit dem gleichen Brennstoff betrieben wird. Ziel der Betrachtung ist es, die primärenergetische Effizienz der jeweiligen KWK-Anlage zu beurteilen. Ein direkter Vergleich mit anderen Methoden zur primärenergetischen Bewertung, wie sie z. B. im Rahmen der Energieeinsparverordnung angewendet werden, ist nicht möglich.

Die Referenzwirkungsgrade sind nach dem Jahr der Inbetriebnahme gestaffelt und vom jeweiligen Energieträger für das Vergleichssystem abhängig. So wird z. B. für die ungekoppelte Stromerzeugung aus Erdgas für die Inbetriebnahmejahre 2012 – 2015 ein Referenzwirkungsgrad von 52,5 % und für die entsprechende ungekoppelte Wärmeerzeugung ein Wert von 90 % festgelegt. Die Referenzwirkungsgrade für die Stromerzeugung werden entsprechend den klimatischen Bedingungen (durchschnittliche Abweichung der Außentemperatur von 15 °C) und den vermiedenen Netzverlusten (Spannungsebene, Stromeinspeisung oder Eigennutzung) korrigiert. In Deutschland beträgt das langjährige Mittel der Außentemperatur 9,7 °C (Jahre 2001 – 2010), der Referenzwirkungsgrad der Stromerzeugung erhöht sich damit jeweils um 0,53 %. Für die Stromeinspeisung auf Mittelspannungsebene bis 50 Kilovolt beträgt der Korrekturfaktor für die vermiedenen Netzverluste 0,945, für die Stromeigennutzung 0,925. Die in der Studie angenommenen korrigierten Referenzwirkungsgrade für Inbetriebnahmejahre zwischen 2012 und 2015 sind in Tabelle 8 dargestellt. Alle Angaben zu Pri-

märenergieeinsparungen in diesem Bericht beziehen sich stets auf die Definition nach 2012/27/EU.

Die Richtlinie 2012/27/EU unterscheidet die anzusetzenden Referenzwirkungsgrade nach Art des Brennstoffs. Für vorliegende Studie relevant sind die Brennstoffe Erdgas, Biomethan und Pflanzenöl. Beim Zündstrahlaggregat wird dabei der Referenzwirkungsgrad für den Hauptbrennstoff als maßgeblich angesehen. Für Biomethan sind nach Richtlinie 2012/27/EU keine expliziten Referenzwirkungsgrade angegeben, lediglich für Biogas wurden Werte festgelegt. Da es sich bei Biomethan physikalisch-chemisch gesehen um Erdgas handelt und die Anlagen zur Biomethanverstromung in der Regel am Erdgasnetz betrieben werden, wurden im Rahmen dieser Studie die Referenzwirkungsgrade für Erdgas als Maßstab für die beste verfügbare Biomethan-Technologie angesetzt. Die Primärenergieeinsparung eines Biomethan-Blockheizkraftwerks gegenüber der getrennten Strom- und Wärmeerzeugung wäre in diesem Fall also genauso hoch wie die eines mit Erdgas betriebenen Blockheizkraftwerks, da in beiden Fällen das gleiche Referenzsystem zugrunde gelegt wird.

Tabelle 8: Referenzwirkungsgrade nach Richtlinie 2012/27/EG

Brennstoff	Referenzwirkungsgrad Stromerzeugung Einspeisung 2012 – 2015*	Referenzwirkungsgrad Stromerzeugung Eigennutzung 2012 – 2015*	Referenzwirkungsgrad Wärmeerzeugung
Erdgas / Biomethan	50,1 %	49,1 %	90 %
Biogas	40,2 %	39,3 %	70 %
Flüssige Biobrennstoffe	42,3 %	41,4 %	89 %

*für durchschnittliche Außentemperatur 9,7 °C und Einspeisung bzw. Eigennutzung auf Spannungsebene 0,40 kV – 50 kV; für Inbetriebnahmejahre vor 2012 siehe Durchführungsbeschluss 2011/877/EU

Tabelle 9: Korrekturfaktoren nach Durchführungsbeschluss 2011/877/EU

	Korrekturfaktor
Korrekturfaktor auf der Grundlage der durchschnittlichen klimatischen Bedingungen bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom	Ref $E_{\eta, \text{original}} + 0,53 \%$
Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom; Netzspannung 400 V → ins Netz eingespeister Strom	Faktor 0,945
Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom; (Niederspannungsnetz) → vor Ort verbrauchter Strom	Faktor 0,925

7.1.2 CO₂-Bilanzierung

Aufbauend auf die energetische Bilanzierung wurde eine ökologische Bewertung anhand der CO₂-Bilanz durchgeführt. Andere ökologische Auswirkungen, wie z. B. die Luftschadstoffemissionen, die Einwirkung auf Gewässer und Böden oder die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen beim Anbau von Biobrennstoffen wurden dabei nicht berücksichtigt. Die Berechnung der CO₂-Emissionen erfolgt mit Hilfe von CO₂-Emissionsfaktoren, die die Vorketten der Brennstoffbereitstellung ebenso berücksichtigen wie Emissionen anderer klimawirksamer Stoffe, z. B. Methan und Distickstoffoxid, die bei der Bereitstellung des jeweiligen Brennstoffes frei werden. Diese als CO₂-Äquivalente bezeichneten Emissionsfaktoren geben an, wie viel Gramm CO₂ aus fossilen Quellen bei der Nutzung einer Kilowattstunde des jeweiligen Energieträgers beim Endverbraucher emittiert werden (Endenergie). Die CO₂-Emissionen aus regenerativen Quellen bleiben dabei unberücksichtigt. So werden z. B. bei der Verbrennung von Holz lediglich die CO₂-Emissionen betrachtet, die bei Ernte und Verarbeitung anfallen, nicht jedoch die Emissionen aus der Verbrennung selbst, während bei Erdgas sowohl die Emissionen aus der Gewinnung als auch aus der Verbrennung berücksichtigt werden. Die CO₂-Äquivalente der verschiedenen Energieträger wurden mit Hilfe des Lebensweg- und Stoffstromanalyse-Modells GEMIS Version 4.9 ermittelt und sind in Tabelle 10 dargestellt.

Mit Hilfe der CO₂-Äquivalente werden aus der eingesetzten Brennstoffmenge zunächst die absoluten CO₂-Emissionen der KWK-Anlage ermittelt, die dann auf die beiden Koppelprodukte aufgeteilt und auf die jeweilige Energiemenge bezogen werden, um die spezifischen Emissionsfaktoren für den bereitgestellten Strom und die bereitgestellte Wärme zu erhalten. Für diese als CO₂-Allokation bezeichnete Aufteilung werden in der Literatur verschiedene Methoden vorgeschlagen [Mauch2012] [VDI4660]. Allen Methoden gemeinsam ist, dass die absolute Menge an emittiertem CO₂ stets gleich bleibt und sich nur die Aufteilung auf die beiden Koppelprodukte ändert:

$$m_{CO_2,ges} = m_{CO_2,el} + m_{CO_2,th} = W_{Br} * \varepsilon_{CO_2,Br} \quad (\text{Gleichung 7.2})$$

$$m_{CO_2,el} = A_{Br,el} * W_{Br} * \varepsilon_{CO_2,Br} \quad (\text{Gleichung 7.3})$$

$$m_{CO_2,th} = A_{Br,th} * W_{Br} * \varepsilon_{CO_2,Br} \quad (\text{Gleichung 7.4})$$

$$\varepsilon_{CO_2,el} = \frac{m_{CO_2,el}}{W_{el}} \quad (\text{Gleichung 7.5})$$

$$\varepsilon_{CO_2,th} = \frac{m_{CO_2,th}}{W_{th}} \quad (\text{Gleichung 7.6})$$

Der für die Aufteilung maßgebliche Brennstoffanteil der elektrischen bzw. thermischen Energie wird nach der sogenannten Finnischen Methode berechnet. Ausgangspunkt für die Berechnung des Brennstoffanteils ist die dabei Primärenergieeinsparung nach Richtlinie 2012/27/EU:

$$PEE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{th}}{\eta_{th,REF}} + \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,REF}}} \quad (\text{Gleichung 7.7})$$

$$A_{Br,el} = (1 - PEE) * \frac{\eta_{el}}{\eta_{el,REF}} \quad (\text{Gleichung 7.8})$$

$$A_{Br,th} = (1 - PEE) * \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,REF}} \quad (\text{Gleichung 7.9})$$

Die anzusetzenden Referenzwirkungsgrade ergeben sich aus den Regelungen der EU-Kommission zu den harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerten (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 10: CO₂-Äquivalente in g/kWh Endenergie (Daten aus GEMIS v4.9)

Brennstoff	CO ₂ -Äquivalent bezogen auf Endenergie
Strom (deutscher Mix Verteilnetz Niederspannung)	606,05 g/kWh _{End}
Heizöl EL für Heizzwecke Endverbraucher	312,49 g/kWh _{End}
Erdgas für Heizzwecke Endverbraucher	240,46 g/kWh _{End}
Rapsöl (ohne Landnutzungsänderungen)	180,83 g/kWh _{End}
Biomethan aus Mais (ohne Landnutzungsänderungen)	135,54 g/kWh _{End}

7.2 Ergebnisse der ökologischen Betrachtung

7.2.1 Primärenergieeinsparung

In Abbildung 31 ist für den Grenzfall „100 % Stromeigennutzung“ die Primärenergieeinsparung der betrachteten BHKW-Module im Vergleich zur getrennten Strom- und Wärmerzeugung dargestellt. Für den Grenzfall „100 % Stromeinspeisung in das öffentliche Netz“ sind die Ergebnisse in Abbildung 32 dargestellt. Als Vergleichsmaßstab für das Zündstrahl-BHKW dienen wiederum die in Abschnitt 5 vorgestellten Gas-Otto-BHKW (vgl. auch Anhang 7). Aufgrund der hier gewählten Betrachtungsweise ist die Primärenergieeinsparung im Biome-

thanbetrieb (100 % Stromeinspeisung nach EEG) gleich der im Erdgasbetrieb mit 100 % Stromeinspeisung, da in beiden Fällen das gleiche Referenzsystem zugrunde gelegt wird (vgl. Abschnitt 7.1.1). Daher wurde auf eine gesonderte Darstellung der Ergebnisse für den Biomethanbetrieb verzichtet.

Die Primärenergieeinsparung hängt in erster Linie vom Wirkungsgrad der KWK-Anlage im Verhältnis zu den festgelegten Referenzwirkungsgraden ab. Daher erreichen die Anlagen mit hohen Gesamtwirkungsgraden die höchsten Primärenergieeinsparungen, insbesondere dann, wenn nach Tabelle 8 vergleichsweise niedrige Referenzwirkungsgrade anzusetzen sind. Alle betrachteten Anlagen erfüllen das Hocheffizienzkriterium von mindestens 10 % Primärenergieeinsparung nach Richtlinie 2012/27/EU.

Das Zündstrahl-BHKW schneidet trotz des im Vergleich zu den meisten Gas-Otto-Motoren niedrigeren Gesamtwirkungsgrads in Bezug auf die Primärenergieeinsparung gut ab. Im Vergleich zu Gas-Otto-BHKW mit ähnlichem Gesamtwirkungsgrad ist die Primärenergieeinsparung sogar wesentlich höher. Dies ist im Wesentlichen auf den hohen elektrischen Wirkungsgrad des Zündstrahl-BHKWs zurückzuführen, der zu einer guten Bewertung gegenüber dem Referenzsystem führt. Die Primärenergieeinsparung der beiden hocheffizienten Gas-Otto-BHKW (BHKW Typ 2 und Typ 3) ist aufgrund der Kombination aus hohem elektrischen und hohem Gesamtwirkungsgrad noch etwas höher als die des Zündstrahl-BHKWs.

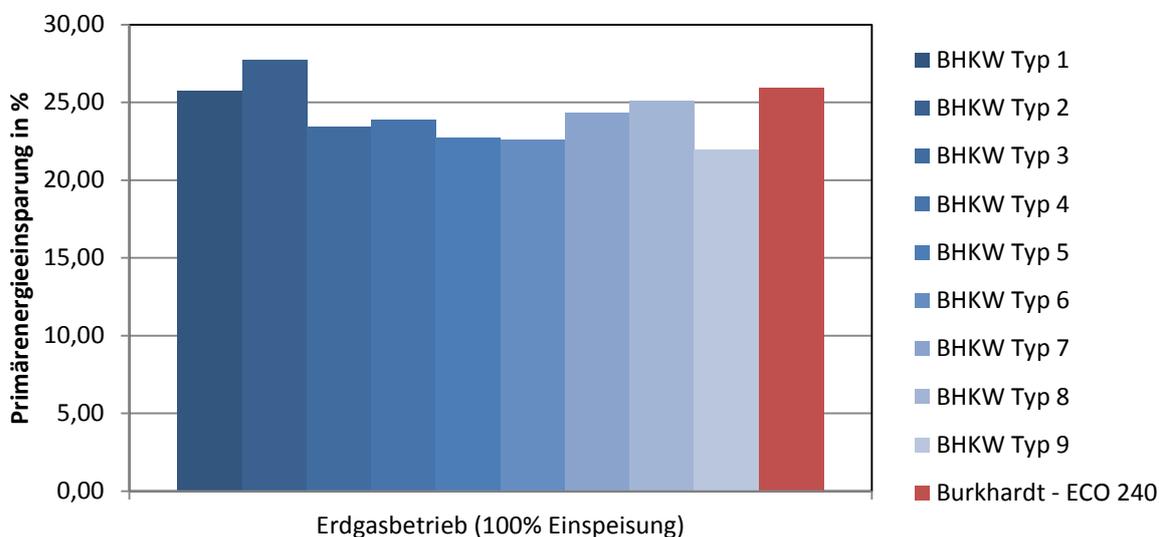


Abbildung 31: Primärenergieeinsparung des Zündstrahl-BHKWs im Vergleich mit Gas-Otto-BHKW (Erdgasbetrieb und 100 % Stromeinspeisung)

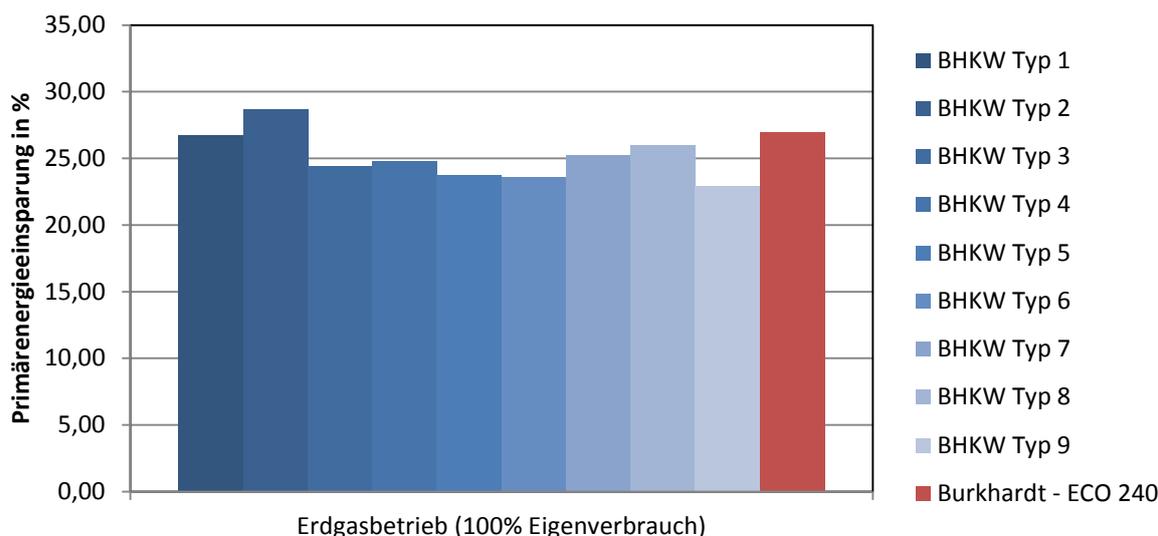


Abbildung 32: Primärenergieeinsparung des Zündstrahl-BHKWs im Vergleich mit Gas-Otto-BHKW (Erdgasbetrieb und 100 % Stromeigenverbrauch)

7.2.2 CO₂-Bilanz

Aufbauend auf die Berechnung der Primärenergieeinsparung wurden die CO₂-Emissionsfaktoren für die Strom- und Wärmebereitstellung der einzelnen BHKW-Module nach der Finnischen Methode (siehe Kapitel 7.1.2) ermittelt. Die Ergebnisse sind für die betrachteten BHKW in Abbildung 33 und Abbildung 34 für die Szenarien Erdgasbetrieb und in Abbildung 35 für das Szenario Biomethanbetrieb dargestellt.

Im Erdgasbetrieb liegt das Zündstrahlaggregat sowohl bei den spezifischen CO₂-Emissionen der Strom- als auch bei der Wärmeerzeugung etwa gleichauf mit den besten konventionellen Gas-Otto-BHKW, was in erster Linie auf den guten elektrischen Wirkungsgrad zurückzuführen ist. Im Biomethanbetrieb fallen aufgrund des niedrigeren CO₂-Äquivalents des Brennstoffs die spezifischen CO₂-Emissionen bei allen Aggregaten niedriger aus als im Erdgasbetrieb. Beim Zündstrahl-BHKW ist zu beachten, dass in der CO₂-Bilanz auch der Zündkraftstoff enthalten ist, der ein etwas höheres CO₂-Äquivalent aufweist als der Hauptbrennstoff (vgl. Tabelle 10), was sich in der Bilanz negativ auswirkt. Dennoch liegen die spezifischen Emissionen des Zündstrahl-BHKWs auch in diesem Szenario etwa im Schnitt der konventionellen Gas-Otto-Motoren. In beiden Szenarien (Erdgas- und Biomethanbetrieb) schneiden die neuen hocheffizienten Gas-Otto-BHKW nochmals geringfügig besser ab als das Zündstrahl-BHKW.

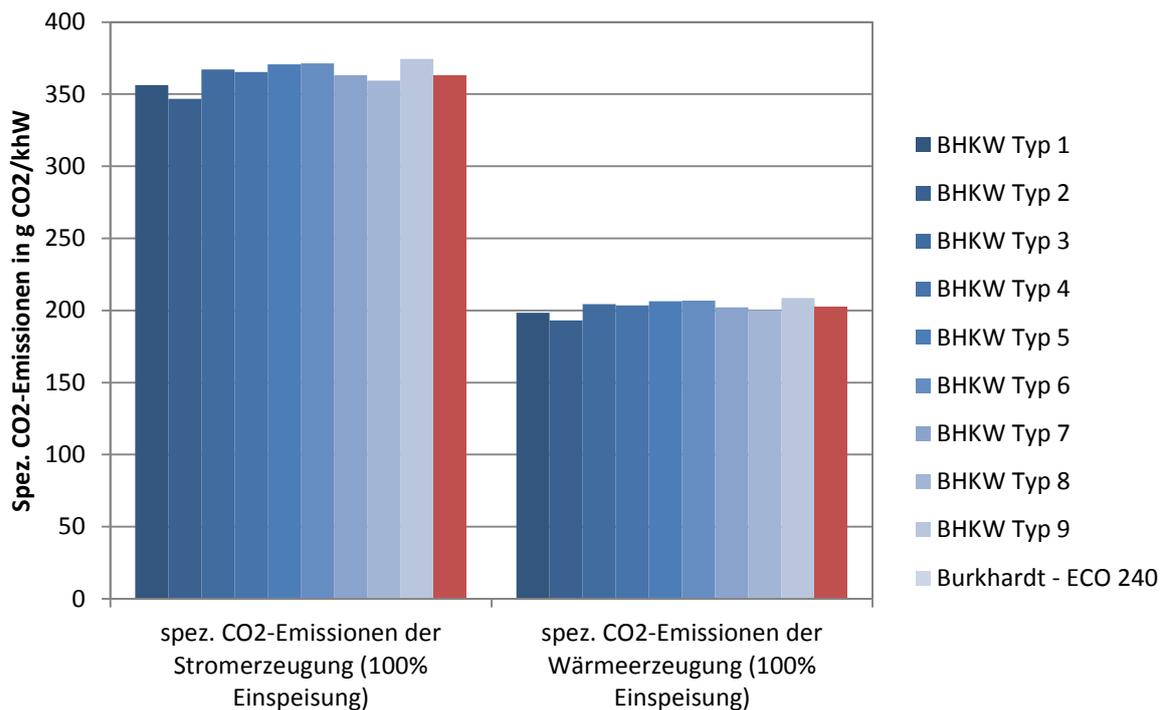


Abbildung 33: Spezifische CO₂-Emissionen im Erdgasbetrieb (100 % Stromeinspeisung)

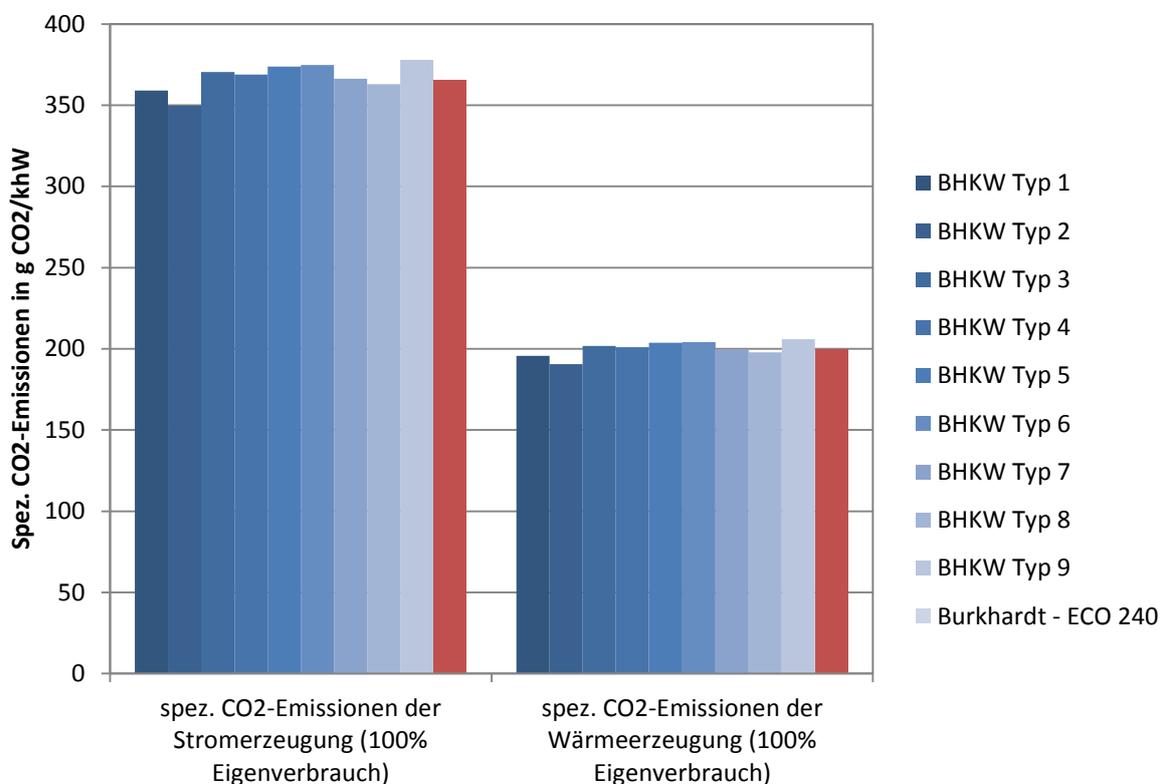


Abbildung 34: Spezifische CO₂-Emissionen im Erdgasbetrieb (100 % Stromeigenverbrauch)

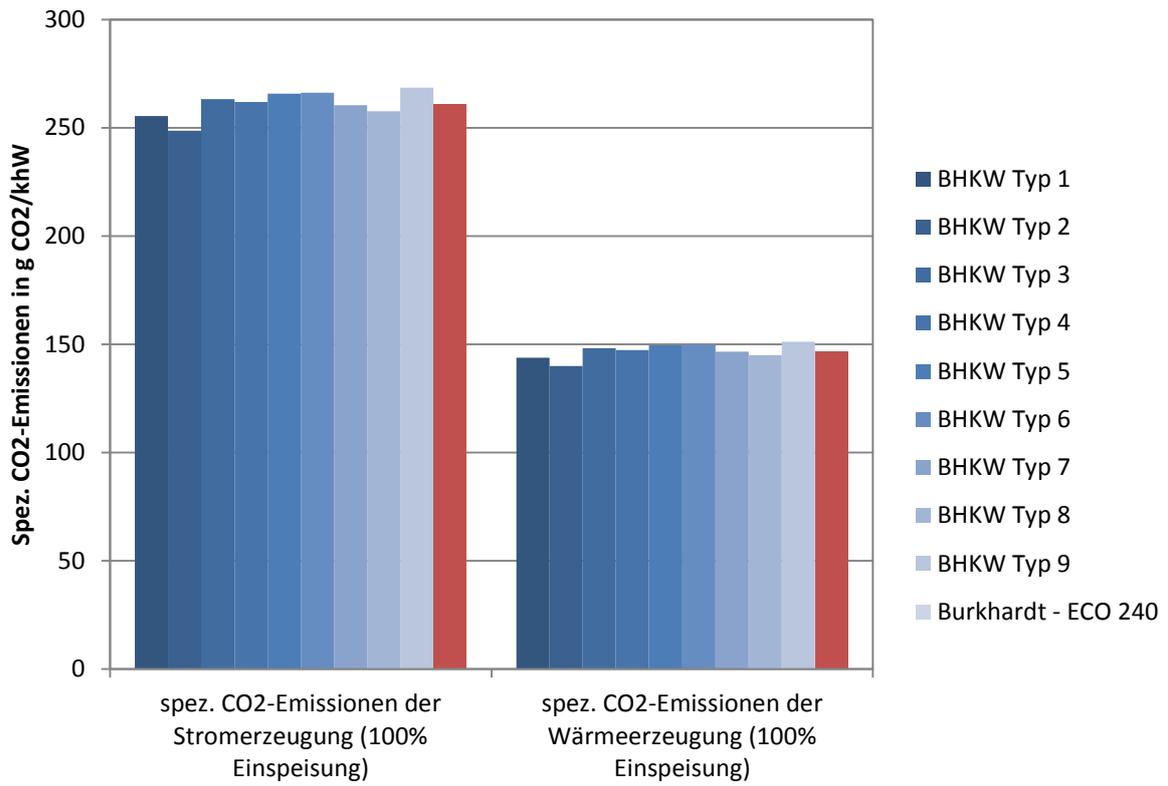


Abbildung 35: Spezifische CO₂-Emissionen im Biomethanbetrieb (100 % Stromeinspeisung)

8 Fazit und Zusammenfassung der Potentialuntersuchung

Die KWK-Stromerzeugung in Deutschland erfolgt zum heutigen Stand überwiegend aus leitungsgebundenen (Erdgas, Biomethan) und nicht-leitungsgebundenen (Biogas, Klärgas, Deponiegas) gasförmigen Energieträgern. In der Leistungsklasse bis 1 MW_{el} werden dabei in erster Linie Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto-Motoren zur Strom- und Wärmebereitstellung eingesetzt. Als erfolgreiche Alternative haben sich v. a. im preissensitiven Biogasbereich Zündstrahlmotoren etablieren können, die höhere elektrische Wirkungsgrade erreichen als Gas-Otto-Motoren, jedoch für den Betrieb einen zweiten Kraftstoff, das sogenannten Zündöl, benötigen. Für Erdgas-Anwendungen werden Zündstrahlmotoren dagegen bisher kaum eingesetzt. Ein Grund hierfür dürften die in der Vergangenheit vergleichsweise geringen Brennstoffpreise und Stromvergütungen in diesem Markt gewesen sein, die den technologischen Aufwand für die Installation von Zündstrahl-Aggregaten nicht rechtfertigten. Mit steigenden Brennstoffpreisen und zunehmendem Wert der elektrischen Energie nimmt die Bedeutung des elektrischen Wirkungsgrads jedoch auch bei BHKW-Anlagen mit Anschluss ans Erdgasnetz zu, was den Einsatz von Zündstrahlmotoren interessant macht.

Von besonderem Interesse ist der Leistungsbereich > 50 kW_{el} bis etwa 1 MW_{el}, da hier eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten im kommunalen und industriellen Bereich (Krankenhäuser, Verwaltungsgebäude, Schwimmbäder, Schulen, Nahwärmenetze, Prozesswärmebereitstellung,...) existiert, bei denen große Energiemengen umgesetzt werden. Ausgehend von den durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrollen veröffentlichten Daten wurden in den Jahren 2009 bis 2013 in diesem Leistungsbereich etwa 1.820 KWK-Anlagen mit einer kumulierten Leistung von 440 MW_{el} neu zugelassen (fossil betriebene KWK-Anlagen) [BAFA2014].

Bisher sind Zündstrahl-BHKW nur für Biogas-Anwendungen in nennenswertem Umfang am Markt vertreten. Legt man Analysen der Zeitschrift Energie & Management [E&M2011] [E&M2012] [E&M2013] zugrunde, kann unter den befragten BHKW-Herstellern¹² von einem Marktanteil der Zündstrahltechnologie am gesamten BHKW-Markt (alle Brennstoffe) von ca. 9 % im Jahr 2009 und ca. 13 % in den Jahren 2010 und 2011, jeweils bezogen auf die verkaufte Anlagenleistung, ausgegangen werden. 2012 erfolgte ein Einbruch auf 5 % Marktanteil, der in diesem Fall jedoch nicht technologiebedingt ist, sondern auf die Verschlechterung der Förderbedingungen für Biogasanlagen im EEG 2012 zurückzuführen ist.

¹² Nicht alle BHKW-Hersteller in Deutschland stellen ihre Absatzdaten für die Marktanalysen zur Verfügung

Eine Abschätzung, welche Brennstoff-, CO₂- und Kosteneinsparungen durch die Zündstrahl-Technologie bundesweit realisierbar wären, ist auf Basis verfügbaren statistischen Daten nur ansatzweise möglich. Um dennoch zumindest näherungsweise das ökonomische und ökologische Einsparpotential der Zündstrahltechnologie im Markt für Erdgas-BHKW abschätzen zu können, wurde ausgehend von der zwischen 2009 und 2013 jährlich neu beim BAFA gemeldeten KWK-Anlagenleistung eine Modellrechnung erstellt. In Summe wären unter den dabei angenommen Randbedingungen bei einem Marktanteil der Zündstrahltechnologie von 10 % in den Jahren 2009 bis 2013 bis zu 37.000 MWh Brennstoff und 12.600 Tonnen CO₂ eingespart worden. Im selben Zeitraum hätten in Summe ca. 2,09 Millionen Euro an Brennstoffkosten eingespart werden können.

Im Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik wies die Zündstrahl-Technologie zu Beginn des Projekts im Jahr 2012 in Bezug auf die elektrischen Wirkungsgrade ein Alleistungsmerkmal auf dem BHKW-Markt auf. Mittlerweile (Stand 2014) drängen zunehmend elektrisch hocheffiziente BHKW mit Gas-Otto-Motoren auf den Markt, die ähnlich hohe Wirkungsgrade > 42 % erreichen. Dies wirkt sich auch auf die potentiellen Wirtschaftlichkeitsvorteile der Technologie aus. Hier schneiden Zündstrahl-BHKW v. a. bei Szenarien mit hoher Stromgutschrift (Erdgasbetrieb nach KWKG mit 100 % Stromeigennutzung und Biomethanbetrieb nach EEG) zusammen mit den elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-BHKW am besten ab, können sich jedoch, anders als noch zu Projektbeginn, nicht deutlich von diesen absetzen¹³. Für Anwendungen mit geringer Stromgutschrift (Erdgasbetrieb nach KWKG mit 100 % Stromeinspeisung) schneiden einfache Gas-Otto-BHKW mit geringem elektrischem Wirkungsgrad aber hoher Wärmeauskopplung am besten ab.

Auf Basis der Modellrechnungen lässt sich ableiten, dass Zündstrahl-BHKW immer dann interessant sind, wenn die elektrische Effizienz eine herausragende Rolle spielt, d. h. wenn die Stromgutschriften und/oder die Brennstoffkosten hoch sind. Dies ist beispielsweise der Fall wenn der erzeugte Strom vollständig selbst genutzt werden kann (Einsparung von Stromeinkauf aus dem öffentlichen Netz) oder hoch vergütet wird (Einspeisung nach EEG), oder wenn teure regenerative Brennstoffe (Biomethan) eingesetzt werden. Dennoch dürften Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto-Motoren aufgrund der einfacheren Handhabung (kein zweites Kraftstoffsystem, einfachere Abgasreinigung) auch hier für die breite Masse der Anwendungen die bevorzugte Technologie darstellen, während die Zündstrahl-Technologie v. a. in speziellen Nischen ihr Potential entfaltet.

¹³ Bei Stand der Technik zu Beginn des Projekts im Jahr 2012 konnten in zwei von drei betrachteten Szenarien noch klare Wirtschaftlichkeitsvorteile für die Zündstrahl-Technologie ermittelt werden.

Dies sind in erster Linie Anwendungen bei denen maximale Brennstoff- und Betriebsflexibilität gefordert ist, beispielsweise auf Grundlage von § 14b des Energiewirtschaftsgesetzes, der es Netzbetreibern ermöglicht, im Rahmen von Gaslieferverträgen mit Abschaltvereinbarung geringere Netzentgelte anzubieten [EnWG2005]. Dadurch können Kunden, die eine Unterbrechung der Gasversorgung bei drohenden Engpässen akzeptieren, günstigere Lieferkonditionen aushandeln und einen wirtschaftlichen Vorteil generieren. Dies erfordert jedoch ein Energieversorgungssystem, das auch bei Abschaltung der Gasversorgung mit einem zweiten (Flüssig)brennstoff weiterbetrieben werden kann. Üblicherweise beschränkt sich dies heutzutage auf die Wärmeversorgung (Zweistoffbrenner für Erdgas/Heizöl), mit Zündstrahlaggregaten könnte darüber hinaus bei Unterbrechung der Gasversorgung künftig auch die elektrische Eigenenergieerzeugung sichergestellt werden. Ein weiteres interessantes Einsatzfeld für die Zündstrahltechnologie stellt die Bereitstellung elektrischer Regelenergie (z. B. negative Sekundärregelleistung) dar. Aufgrund der hohen Zündenergie, die durch die Zündstrahl-Einspritzung eingebracht wird, kann ein stabiler Betrieb bei unterschiedlichsten Lastzuständen gewährleistet werden. So kann die im Rahmen des Projekts betrachtete Pilotanlage bis auf etwa 25 % der Nennleistung abgeregelt werden, während vergleichbare hocheffiziente Gas-Otto-Motoren in vielen Fällen lediglich für eine Abregelung bis auf etwa 50 % der Nennleistung freigegeben sind.

Ökologisch betrachtet konnten auf Basis der Modellrechnungen hinsichtlich Primärenergieeinsparung und CO₂-Emissionen weder besondere Vorteile noch Nachteile der Zündstrahltechnologie im Vergleich mit Gas-Otto-Motoren festgestellt werden. Betrachtet man die Primärenergieeinsparung nach Richtlinie 2012/27/EU, so ergeben sich für die Zündstrahltechnologie ähnlich gute Werte wie für die besten Gas-Otto-Motoren. Gleiches gilt für die spezifischen CO₂-Emissionen für die Koppelprodukte Strom und Wärme. Die CO₂-Einsparung aufgrund des höheren elektrischen Wirkungsgrads von Zündstrahlaggregaten wird zumindest teilweise durch die höheren spezifischen CO₂-Emissionen des Zündkraftstoffs wieder kompensiert, sodass sich in Summe keine wesentlichen Vorteile gegenüber hocheffizienten Gas-Otto-Motoren ergeben.

9 Verifizierung der Potentiale im Praxisbetrieb

9.1 Beschreibung der Versuchsanlage

Um die getroffenen Annahmen bezüglich der ökonomischen und ökologischen Potentiale der Zündstrahltechnologie in der Praxis zu verifizieren, wurde in Zusammenarbeit mit dem Industriepartner Burkhardt GmbH eine Zündstrahl-BHKW Pilotanlage für Betrieb am Erdgasnetz aufgebaut und erprobt. Ziel war es, an der Versuchsanlage die prognostizierten Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsvorteile sowie die ökologischen Aspekte experimentell zu überprüfen und die Praxistauglichkeit der Technologie zu beurteilen. Schwerpunkt der Arbeiten war die Untersuchung des Verbrennungs- und Emissionsverhaltens des Zündstrahl-BHKWs, die Ermittlung der erreichbaren Wirkungsgrade und Nutzungsgrade im realen Betrieb und das Monitoring des Betriebsverhaltens über einen Zeitraum von mindestens 12 Monaten.

Die Versuchsanlage wurde in Zusammenarbeit mit der Fa. Burkhardt GmbH auf Basis einer bestehenden Pflanzenöl-BHKW-Anlage an der Ostbayerischen Technischen Hochschule für den Zündstrahlbetrieb umgebaut. Hierfür wurde der ursprünglich verbaute pflanzenöltaugliche Dieselmotor gegen ein modifiziertes Aggregat mit Zündstrahl-Technologie getauscht. Es handelt sich hierbei um ein turboaufgeladenen Sechszylinder-Dieselmotor in Reihenbauform, Typ MAN D26 (vgl. Abbildung 36). Dieser wurde für den Zündstrahlbetrieb mit angepassten Kolben, Injektoren und Turbolader und einem angepassten Motorsteuergerät ausgerüstet. Der Motor verfügt über ein elektronisch geregeltes Common-Rail-Einspritzsystem, das eine präzise Dosierung und ein genaues Timing der Zündöl-Einspritzung erlaubt. Im Rahmen der Umrüstung wurde der BHKW-Prüfstand mit einer Gasversorgung und einem eigenen Abrechnungsgaszähler ausgestattet. Für die Zündölversorgung konnte auf die bereits bestehende Infrastruktur für die Versorgung mit Pflanzenölkraftstoff zurückgegriffen werden.

Die Versuchsanlage kann sowohl als Zündstrahl-BHKW mit Biomethan bzw. Erdgas als auch als Flüssigkraftstoff-BHKW betrieben werden. Für den Versuchsbetrieb wurde Biomethan eingesetzt, das bilanziell dem Erdgasnetz entnommen wurde. Als Zündöl wurde im Dauerbetrieb Rapsöl verwendet, für den kurzzeitigen Versuchsbetrieb wurden auch Heizöl EL und Palmöl als Zündöl eingesetzt. Die Pilotanlage ist elektrisch und thermisch in die Energieversorgung des Hochschulcampus eingebunden, sodass eine Untersuchung unter Praxisbedingungen möglich war.

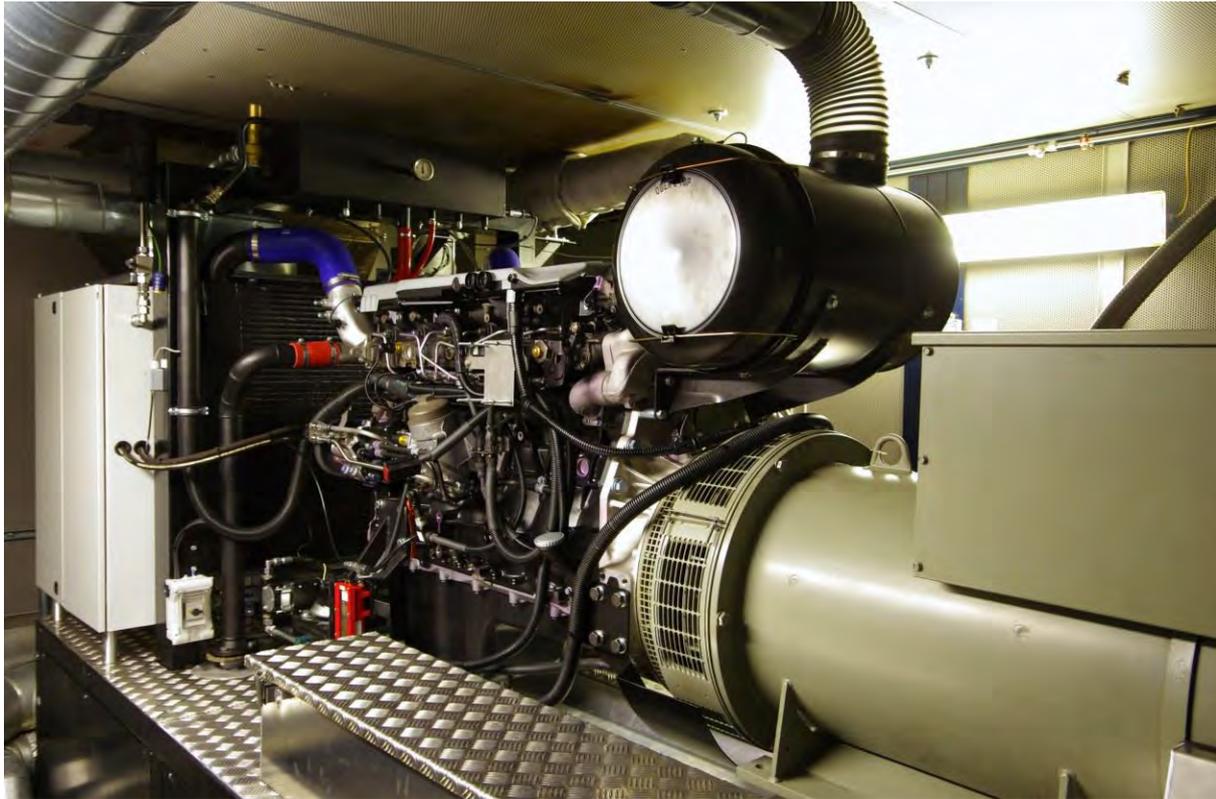


Abbildung 36: Zündstrahl-BHKW-Prüfstand

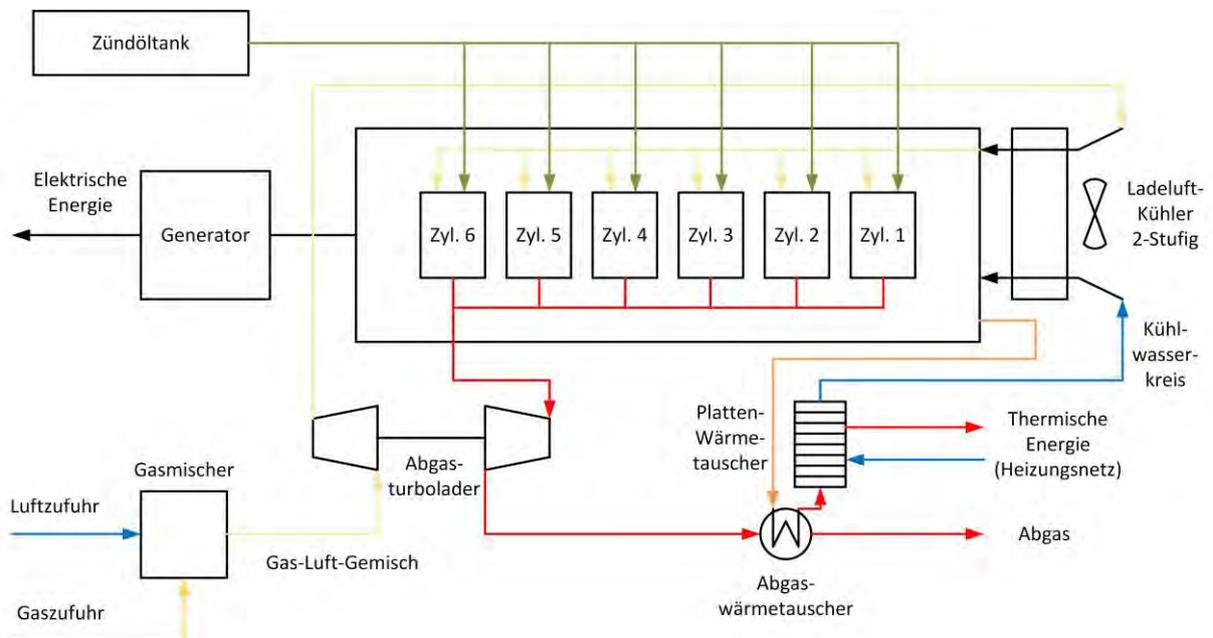


Abbildung 37: Schema Zündstrahl-BHKW

Abbildung 37 zeigt ein vereinfachtes Schema des für die Versuche eingesetzten Blockheizkraftwerks. Der Brennstoff Biomethan wird über eine Gasregelstrecke, die aus einem Gasfilter, einem Druckminderer und einem Doppelmagnetventil besteht, dem Gasmischer zugefügt. Hier wird das Gas mit Frischluft gemischt, wodurch ein zündfähiges Gas-Luft-Gemisch entsteht. Dieses Gemisch wird über einen Abgasturbolader auf einen Druck von ca. 2,4 bar (absolut) verdichtet. Da sich das Gas-Luft-Gemisch bei der Verdichtung erhitzt, muss es vor Eintritt in den Motor abgekühlt werden, um eine möglichst hohe Zylinderfüllung zu gewährleisten. Dies erfolgt über einen zweistufigen Gemischkühler (1. Stufe wassergekühlt, 2. Stufe luftgekühlt), wobei die Gemischwärme aus der 1. Kühlstufe als Nutzwärme in das Heizungsnetz abgegeben wird. Die Gemischtemperatur nach der Kühlung beträgt ca. 30 °C.

Nach Ansaugen des Gas-Luft-Gemisches in die Zylinder des Motors wird es durch die Kolbenbewegung verdichtet. In das hoch verdichtete Gas-Luft-Gemisch wird eine geringe Menge an Zündöl eingespritzt, die sich aufgrund der hohen Temperatur des komprimierten Gas-Luft-Gemisches selbst entzündet. Ausgehend von diesem Flammenherd breitet sich im Brennraum eine Flammenfront aus, welche nun ihrerseits das Gas-Luft-Gemisch entzündet. Durch die Verbrennung wird die im Brennstoff enthaltene Energie freigesetzt und bewirkt eine Temperatur- und Druckerhöhung im Brennraum, die über die Kolbenbewegung in mechanische Arbeit an der Kurbelwelle umgesetzt wird. Das verbrannte Gas-Luft-Gemisch wird anschließend im Ladungswechseltakt aus dem Zylinder ausgeschoben und über die Turbine des Abgasturboladers geführt, wo es auf knapp über Umgebungsdruck entspannt wird. Die dabei verrichtete Arbeit wird zum Antrieb der Verdichterstufe des Turboladers genutzt. Nach dem Turbolader wird das heiße Abgas (ca. 400 – 500 °C) über einen Abgaswärmetauscher auf ca. 140 °C abgekühlt und zuletzt über die Abgasanlage ins Freie geführt.

Der Motor treibt einen luftgekühlten Generator der Fa. Leroy Somer an. Dieser generiert 3-phasigen Wechselstrom, welcher ins Netz eingespeist wird. Die Abwärme des Motors wird aus dem Schmieröl- und Kühlwasserkreislauf und aus dem Abgas ausgekoppelt. Über einen Plattenwärmetauscher wird anschließend die Abwärme in das Heizungsnetz der Hochschule eingespeist. Die technischen Daten des BHKW-Moduls sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Technische Daten der Pilotanlage

Fabrikat / Typ	Burkhardt GmbH Typ ECO 240
Betriebsweise	Netzparallelbetrieb
Elektrische Nennleistung (lt. Datenblatt)	240 kW im Zündstrahlbetrieb 200 kW im Flüssigkraftstoffbetrieb
Thermische Nennleistung (lt. Datenblatt)	240 kW
Feuerungswärmeleistung	571 kW
Motor Hersteller / Typ	MAN D 2676
Bauart	6-Zylinder Reihenmotor
Arbeitsverfahren	4-Takt Diesel, Abgasturboaufladung mit Abgasrückführung und Ladeluftkühlung; Zündstrahlverfahren mit äußerer Gemischbildung; energetischer Zündölanteil ca. 7 %
Ventile	2 Einlass / 2 Auslass
Einspritzsystem	Bosch Common-Rail-System
Hub / Bohrung / Hubvolumen	166 mm / 126 mm / 12419 cm ³
Verdichtungsverhältnis	19:1 (serienmäßig, für Zündstrahlbetrieb angepasst)
Nenn Drehzahl	1500 1/min
Generator Hersteller / Typ	Leroy Somer LSA 46.2 VL 12
Bauart	Luftgekühlter Synchrongenerator 400 V 50 Hz

9.2 Überblick über die verwendeten Messmethoden

9.2.1 Wirkungsgrad- und Nutzungsgradbestimmung

Im Rahmen der Wirkungsgradbestimmung wurden die zu- und abgeführten Energieströme erfasst. Dies sind die zugeführte Brennstoffenergien (Biomethan, Rapsöl), die abgeführte Wärmemenge und die in das Stromnetz eingespeiste elektrische Energie.

Die Gasmenge wurde über einen geeichten Gaszähler mit Mengenumwerter (Druck- und Temperaturkompensation) erfasst, der den Gasverbrauch als Impulssignal ausgibt. Der Zündölverbrauch wurde gravimetrisch über eine Waage bestimmt.

Als abgeführte Energieströme musste die Menge an erzeugtem Strom sowie die dem Heizungsnetz zugeführte Wärmemenge bestimmt werden. Die abgegebene elektrische Energie wurde über ein elektrisches Leistungs- und Energiemessgerät erfasst. Die Wärmemenge wurde über einen geeichten Wärmemengenzähler an der Schnittstelle zum Heizungsnetz (Wärmesenke) gemessen.

Für die Nutzungsgradmessungen, die sich über einen längeren Zeitraum erstreckten, war die Erfassung der bereitgestellten Strommenge über das Leistungsmessgerät nicht praktikabel. Daher wurde die erzeugte elektrische Energie im Betrachtungszeitraum über einen geeichten Stromzähler des Netzbetreibers erfasst, der auch für Abrechnungszwecke verwendet wird und mit einer 15 Minuten Leistungsmessung ausgestattet ist. Der Zündölverbrauch für die Nutzungsgradbestimmung wurde über die Füllstandsanzeige des Kraftstofftanks ermittelt.

9.2.2 Emissionsmessung

Die Messung der Abgasemissionen erfolgte mittels eines Gasanalyzesystems für Industriebmotoren (Testo 350). Zur Erfassung der Abgaskomponenten Kohlenmonoxid, Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Sauerstoff sind elektrochemische Sensoren im Messgerät verbaut. Die Messung von Kohlendioxid geschieht über einen Infrarotsensor.

Zur detaillierten Erfassung des Emissionsverhaltens wurde darüber hinaus ein Abgasanalyzesystem mit Fourier-Transform-Infrarotspektrometer (FTIR) eingesetzt (Ansyco / Gasmeter). Vorteil dieses Verfahrens gegenüber konventionellen Gasanalysatoren ist, dass eine Vielzahl infrarotaktiver Abgaskomponenten simultan erfasst werden können. Dies erlaubt eine detaillierte Untersuchung der Emissionen an unverbrannten Kohlenwasserstoffen, wie z. B. Formaldehyd. Zusätzlich ist das System einem paramagnetischem Sauerstoffanalysator zur Ermittlung der Restsauerstoffgehalts im Abgas und mit konventionellen Analysatoren für die gesetzlich limitierten Komponenten ausgerüstet (Chemolumineszenz-Detektor für Stickstoffoxide, Nichtdispersiver-Infrarot-Detektor für Kohlenmonoxid und Kohlendioxid, Flammenionisations-Detektor für unverbrannte Kohlenwasserstoffe).

9.2.3 Motorindizierung

Unter „Indizierung“ versteht man eine Analyse des Zylinderdruckverlaufs in Verbrennungsmotoren in Abhängigkeit der Kolbenposition, die über den Kurbelwinkel bestimmt wird (vgl. Abbildung 38). Aus den Daten der Zylinderdruckanalyse ist es möglich, Informationen wie den maximalen Verbrennungsdruck, die Drucksteigerungsrate und den Brennverlauf zu ermitteln, die eine Beurteilung des motorischen Verbrennungsverhaltens erlauben [Grohe2003]. Die Indiziermessungen im Projekt erfolgten mittels eines Indiziersystems des Typs Indimicro der Fa. AVL. Es handelt sich hierbei um ein portables Messsystem mit bis zu acht schnellen Signaleingängen (1 MHz Abtastrate).

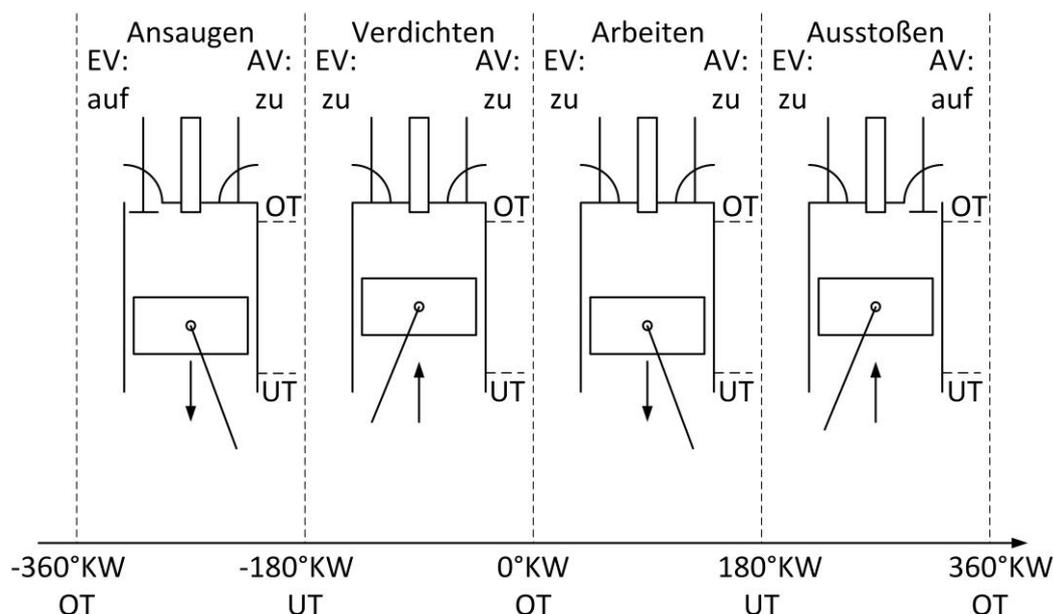


Abbildung 38: Darstellung der Kolbenposition in Abhängigkeit des Kurbelwinkels

Für die Winkelzuordnung wurde ein optischer Winkelmarkengeber des Typs AVL 265C eingesetzt, welcher an der Kurbelwelle des Motors montiert wurde. Dieser erzeugt Winkelmarken mit einer Auflösung von bis zu $0,1^\circ\text{KW}$ (Grad Kurbelwinkelumdrehung), die zur Triggerrung der Datenerfassung im Indiziergerät verwendet werden. Außerdem wird einmal pro Umdrehung eine sogenannte Triggermarke erzeugt, die zur Zuordnung des oberen Totpunkts (OT) dient. Für die OT-Zuordnung ist es notwendig, eine genaue Bestimmung des OT durchzuführen, um den korrekten Bezug aller Messdaten zu gewährleisten, da bereits kleine Abweichungen im Bereich von unter 1°KW zu beträchtlichen Verfälschungen der Ergebnisse führen können [Grohe2003]. Der OT wurde mittels eines kapazitiven Sensors im geschleppten Motorbetrieb bestimmt.

Als das BHKW im September 2012 in Betrieb genommen wurde, wurde der Zylinderkopf für Indiziermessungen zunächst mit einer Bohrung für einen Zylinderdrucksensor am Zylinder 6 ausgestattet. Im Projektverlauf wurde beschlossen, einen speziell angefertigten Zylinderkopf mit Bohrungen für Drucksensoren an allen Zylindern (Vollindizierung) zu installieren. Der Umbau auf den neuen Zylinderkopf erfolgte bei 6.639 Betriebsstunden.

Für die Zylinderdruckmessung am Zylinder 6 wurde ein wassergekühlter piezoelektrischer Drucksensor mit Messbereich von 0 - 250 bar eingesetzt. Darüber hinaus wurden Niederdrucksensoren sowohl im Saugrohr als auch im Abgaskrümmen eingebaut. Es handelte sich hierbei um wassergekühlte, piezoresistive Absolutdrucksensoren mit einem Messbereich von

0 – 5 bar. Um die Ansteuerung des Zündöl-Injektors zu erfassen, wurde der Stromverlauf in der Zuleitung zum Injektor mit einer Strommesszange gemessen.

9.3 Ergebnisse zur Wirkungsgradbestimmung

9.3.1 Erzielbare Wirkungsgrade bei verschiedenen Betriebsmodi

Im Rahmen der Wirkungsgradbestimmung wurden Untersuchungen im Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb bei verschiedenen Laststufen durchgeführt. Im Flüssigkraftstoffbetrieb wurde Palmöl als Referenzkraftstoff eingesetzt. Im Zündstrahlbetrieb wurden verschiedene Zündöle untersucht, darunter Palmöl, Rapsöl und Heizöl, wobei als gasförmiger Kraftstoff stets Biomethan eingesetzt wurde, das bilanziell dem Erdgasnetz entnommen wurde. Physikalisch-chemisch handelt es sich dabei um Erdgas-H aus dem Netz der Stadtwerke Amberg (Heizwerte siehe Anhang 9).

Im Zündstrahlbetrieb wurden 10 Laststufen von $61 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Mindestleistung) bis $240 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Nennleistung) untersucht. Im Flüssigkraftstoffbetrieb war dagegen die maximale zulässige elektrische Leistung des BHKWs aus technischen Gründen (Motorbelastbarkeit) auf maximal $200 \text{ kW}_{\text{el}}$ begrenzt¹⁴. Daher existieren hierfür keine Messwerte für die Laststufe $240 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Die Abbildungen 39 bis 41 zeigen den elektrischen, den thermischen und den Gesamtwirkungsgrad des Blockheizkraftwerks bei den untersuchten Laststufen im Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb. Die Ergebnisse bestätigen die Erwartungen an den hohen elektrischen Wirkungsgrad der Zündstrahl-Technologie. Unter realen Bedingungen konnte ein elektrischer Wirkungsgrad von bis zu 42,5 % gemessen werden, was mit den prognostizierten Werten für die Pilotanlage übereinstimmt¹⁵. Auffällig ist, dass der Motor im Flüssigkraftstoffbetrieb ein besseres Teillastverhalten aufweist als im Zündstrahlbetrieb und ab $180 \text{ kW}_{\text{el}}$ abwärts höhere elektrische Wirkungsgrade erreicht. Hier wirkt sich aus, dass der Motor im Zündstrahlmodus auf den Nennlastbetrieb optimiert ist und nicht für den Teillastbetrieb. Vergleichsweise geringen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad hat dagegen die Wahl des Zündöls, da dessen energetischer Anteil im Vergleich zum Hauptbrennstoff Biomethan vergleichsweise gering ist. Bei Nennlast entspricht der Zündölanteil in etwa 7 % der Feuerungswärmeleistung. Solange der Zündkraftstoff also in der Lage ist, das Gemisch sicher zu entzünden, ist dessen Einfluss auf den elektrischen Wirkungsgrad vernachlässigbar.

¹⁴ Im Flüssigkraftstoffbetrieb weist der Motor höhere Zylinderspitzen drücke und Drucksteigerungsraten auf, weshalb insbesondere die Kolben einer hohen thermischen und mechanischen Belastung ausgesetzt werden. Die Maximalleistung im Flüssigkraftstoffbetrieb ist daher auf knapp 83 % begrenzt.

¹⁵ Die Datenblattangabe für den elektrischen Wirkungsgrad bezogen auf DIN ISO 3046 ist 43,5 %. Der tatsächlich gemessene Wirkungsgrad liegt damit innerhalb der zulässigen Toleranz von 5 % Brennstoffmeherverbrauch.

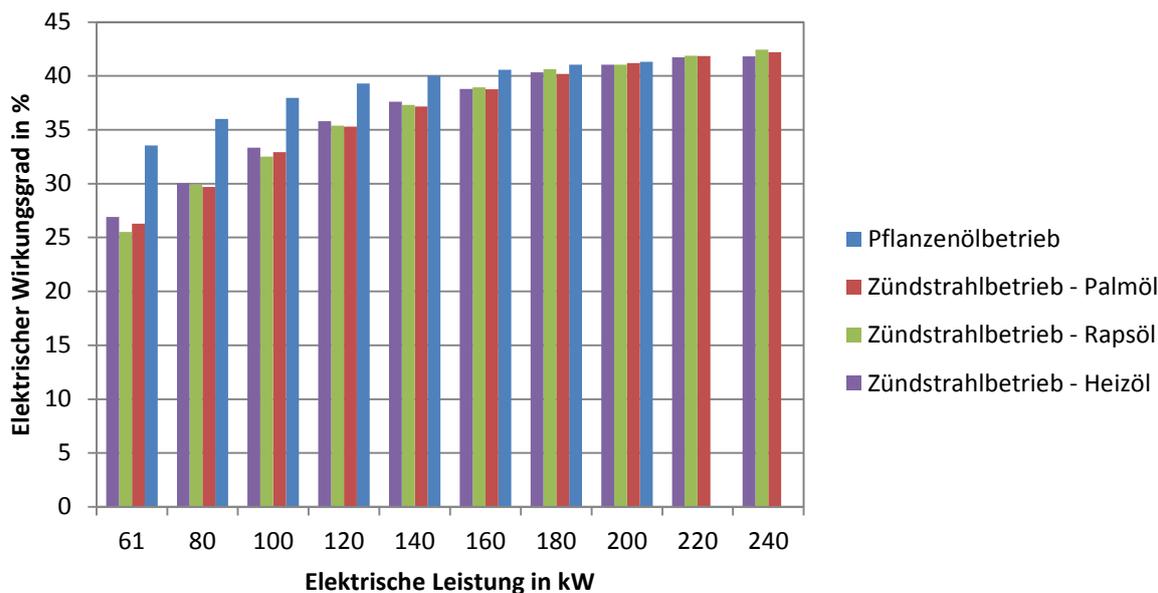


Abbildung 39: Elektrischer Wirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb

Bei Betrachtung des thermischen Wirkungsgrads sind starke Spreizungen zwischen den verschiedenen Messungen zu erkennen. So wurden insbesondere im Flüssigkraftstoffbetrieb im Vergleich überproportional hohe thermische Wirkungsgrade gemessen. Dies dürfte in erster Linie auf unterschiedliche Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizungsnetz bei den Messungen zurückzuführen sein, die unter den gegebenen Bedingungen am Prüfstand nicht konstant gehalten werden konnten. Trotz der Spreizung der Messwerte kann man erkennen, dass der thermische Wirkungsgrad der Anlage im Allgemeinen geringer ist als bei vergleichbaren Gas-Otto-BHKWs. Dies ist kann im Wesentlichen auf zwei Ursachen zurückgeführt werden:

- Mit steigender elektrischer Effizienz nimmt in der Regel die thermische Effizienz ab, da weniger Abwärme zur Verfügung steht, die noch dazu auf niedrigerem Temperaturniveau vorliegt (geringere Abgastemperaturen)
- Da im Zündstrahlbetrieb zwar geringe aber im Vergleich zu Gas-Otto-Motoren doch relevante Rußemissionen auftreten, kann die Abgastemperatur nicht zu weit abgesenkt werden, um eine Versottung des Abgaswärmetauschers zu vermeiden. Bei der Pilotanlage ist die Temperatur nach dem Abgaswärmetauscher auf minimal ca. 140 °C begrenzt
- Beim Umbau der Pilotanlage auf den Zündstrahlbetrieb wurde ein vorhandener Abgaswärmetauscher genutzt, der ursprünglich für den Flüssigkraftstoffbetrieb ausge-

legt war. Durch optimierte Auslegung auf den Zündstrahlbetrieb könnte der thermische Wirkungsgrad möglicherweise gesteigert werden

Der Gesamtwirkungsgrad von bis zu 81,7 % kann als gut betrachtet werden, allerdings liegt dieser im Vergleich zu leistungsgleichen Gas-Otto-Motoren unterhalb der erreichbaren Spitzenwerte von > 90 %.

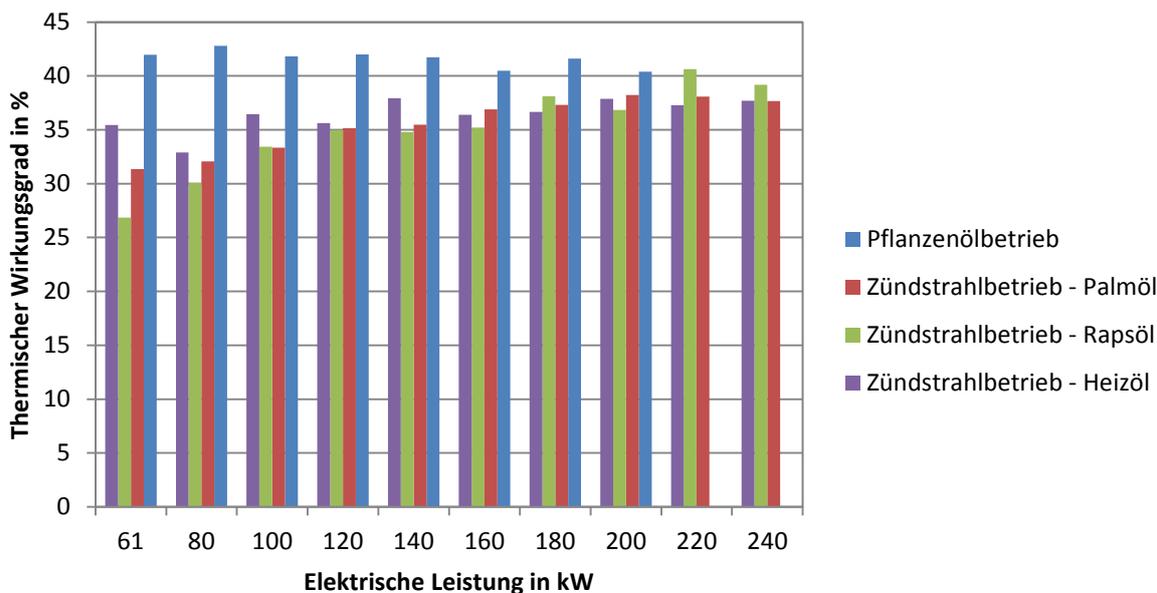


Abbildung 40: Thermischer Wirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb

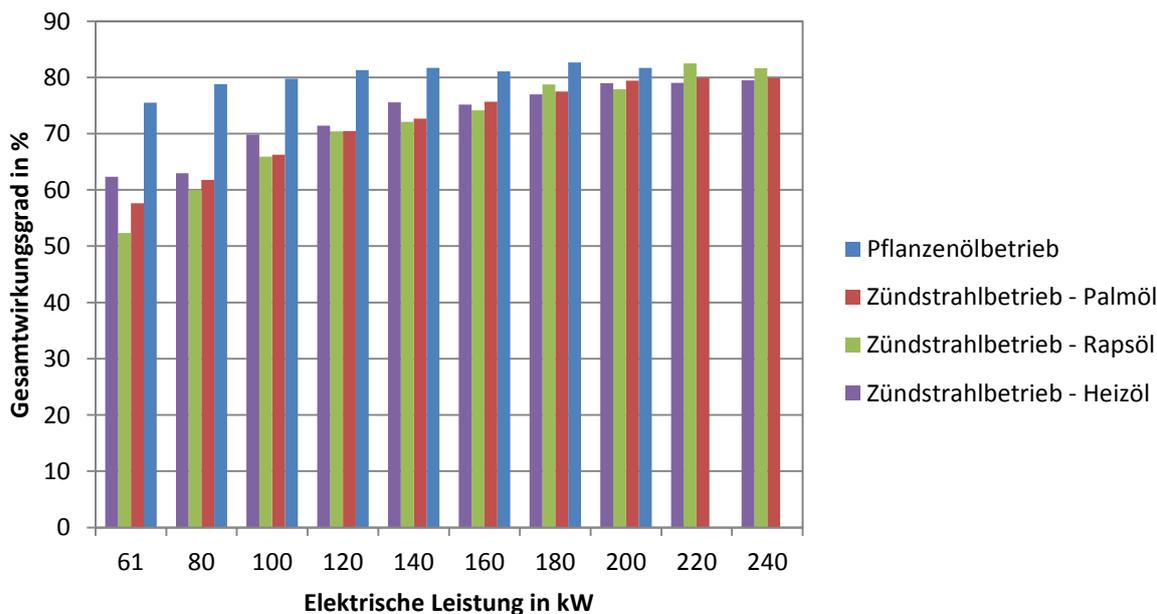


Abbildung 41: Gesamtwirkungsgrad im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb

9.3.2 Einfluss von Alterungseffekten auf die Wirkungsgrade

Im Rahmen des Projekts wurde Veränderung des Wirkungsgrads durch Alterungseffekte untersucht. Hierfür wurden die Messungen im Zündstrahlbetrieb nach ca. 1.000 und 10.000 Betriebsstunden wiederholt. Das BHKW wurde in der Zeit zwischen den Messungen durchgehend im Praxisbetrieb bei Nennlast als Grundlastwärmeerzeuger eingesetzt (im Durchschnitt $226 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $200 \text{ kW}_{\text{th}}$, vgl. auch Kapitel 9.3.3). Als Brennstoffe wurden im Zeitraum der Dauererprobung durchgängig Biomethan und Rapsöl im Zündstrahlbetrieb verwendet. Vor Durchführung der Messung nach 10.000 Betriebsstunden wurden turnusgemäß entsprechend der Wartungsvorschrift des Herstellers die Injektoren ausgetauscht (Wechsel alle 3.000 Betriebsstunden).

In Abbildung 42 bis Abbildung 44 ist der elektrische, thermische und gesamte Wirkungsgrad der Anlage jeweils nach 1.000 und 10.000 Betriebsstunden dargestellt. Man erkennt deutlich, dass sich der elektrische Wirkungsgrad des BHKW von ursprünglich 42,5 % auf lediglich noch 41,2 % nach 10.000 Betriebsstunden verschlechterte, was einen Rückgang um ca. 1,3 Prozentpunkte bedeutet.

Beim thermischen Wirkungsgrad sind bei der Messung nach 1.000 Stunden vergleichsweise große Unterschiede zwischen den einzelnen Laststufen zu erkennen. Dies ist in erster Linie auf unterschiedliche Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizungsnetz zurückzuführen, die bei den Messungen nicht reproduzierbar eingestellt und konstant gehalten werden konnten. Bei der Messung nach 10.000 Betriebsstunden war der thermische Wirkungsgrad hingegen über alle Laststufen hinweg sehr konstant, da bei dieser Messreihe eine konstant niedrige Rücklauftemperatur mit hoher Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf realisiert werden konnte. Somit konnte eine sehr gute Wärmeauskopplung gewährleistet werden. Die Messergebnisse nach 1.000 und 10.000 Betriebsstunden sind aufgrund der unterschiedlichen Vor- und Rücklauftemperaturen nicht absolut vergleichbar. Dennoch ist in der Tendenz zu erkennen, dass der maximal erreichbare thermische Wirkungsgrad nach 10.000 Betriebsstunden bei Nennlast (37,2 %) signifikant schlechter war als nach 1.000 Betriebsstunden (39,2 %). Dies kann in erster Linie auf Ablagerungen im Abgaswärmetauscher zurückgeführt werden, da parallel ein Anstieg der Abgastemperaturen nach dem Wärmetauscher beobachtet werden konnte.

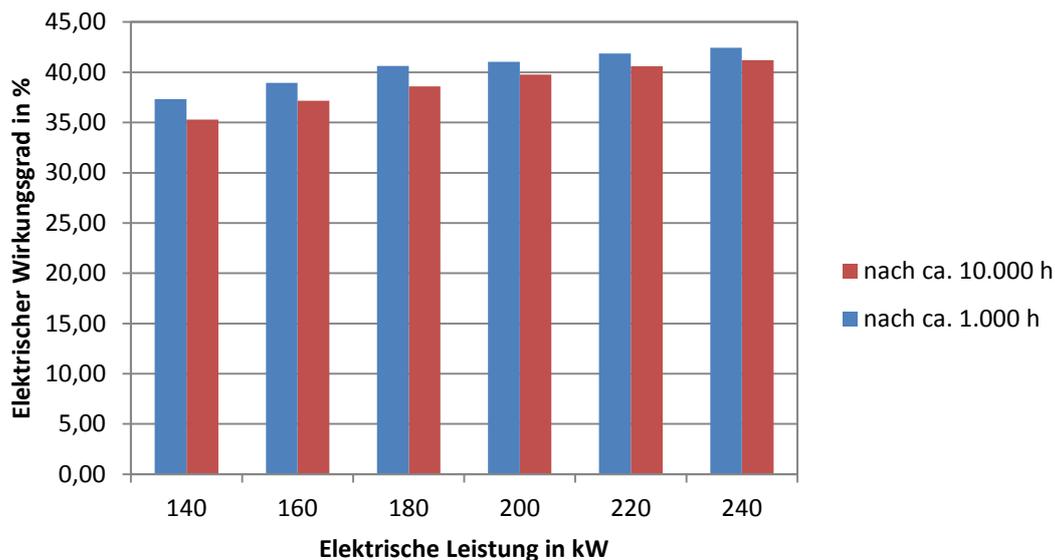


Abbildung 42: Vergleich des elektrischen Wirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden

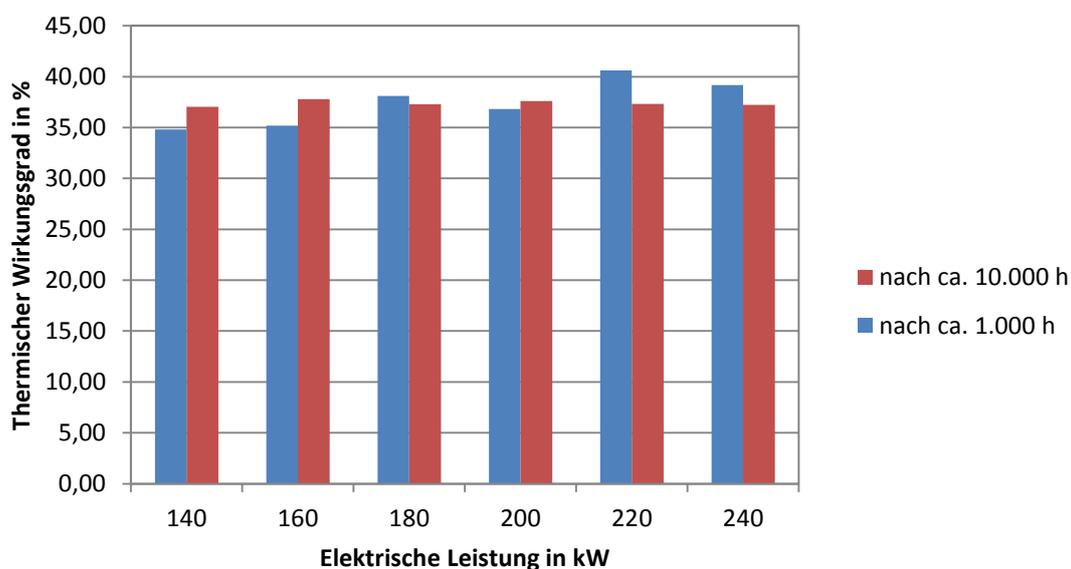


Abbildung 43: Vergleich des thermischen Wirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden

Betrachtet man den Gesamtwirkungsgrad, so ist ein Rückgang von 81,6 % nach 1.000 Betriebsstunden auf 78,4 % nach 10.000 Betriebsstunden (jeweils Nennlast) zu erkennen, der in erster Linie auf die Verschlechterung des thermischen Wirkungsgrads zurückzuführen ist. Bei Teillast nähern sich die Werte beider Messungen dagegen weitestgehend wieder an. Dies kann so interpretiert werden, dass der Abgaswärmetauscher nach 10.000 Betriebsstunden nicht mehr seine volle Auslegungsleistung erreichte, was sich v. a im Nennlastbetrieb auswirkt, während dies im Teillastbetrieb eine geringere Rolle spielt, da der Wärmetauscher hier noch über ausreichend Reserven verfügt.

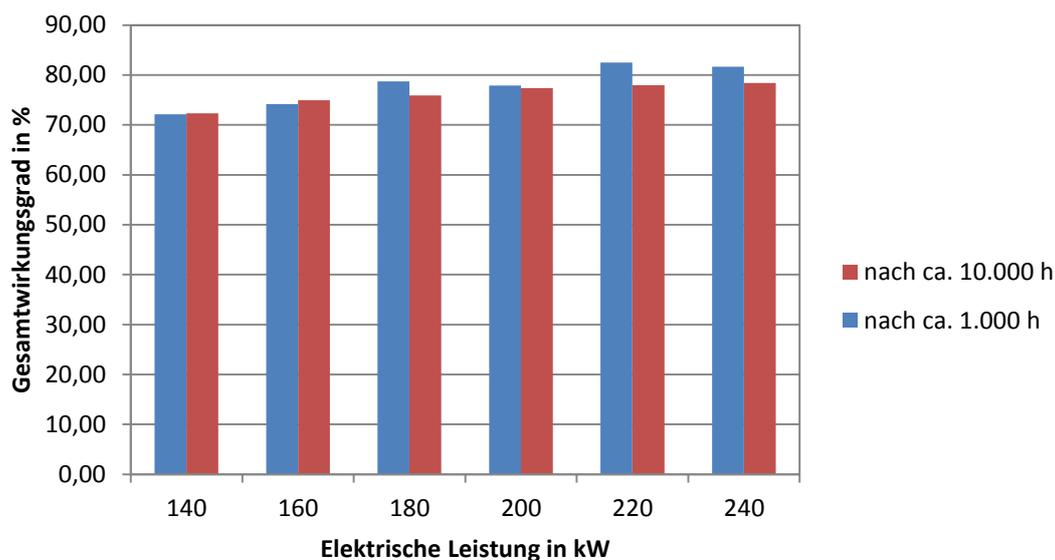


Abbildung 44: Vergleich des Gesamtwirkungsgrads nach 1.000 bzw. 10.000 Betriebsstunden

9.3.3 Nutzungsgradbestimmung

Neben der Wirkungsgradbestimmung wurde für den Zeitraum vom 06.03.2013 bis 07.04.2014 eine Nutzungsgradbestimmung für den Zündstrahlbetrieb durchgeführt. Der Gesamtzeitraum der Nutzungsgradbestimmung wurde wie folgt in drei Intervalle über insgesamt 6.369 Betriebsstunden unterteilt:

- Zeitraum 1: 06.03.2013 bis 12.04.2013 (siehe Anhang 10)
- Zeitraum 2: 12.04.2013 bis 23.01.2014 (siehe Anhang 11)
- Zeitraum 3: 23.01.2014 bis 07.04.2014 (siehe Anhang 12)

Für die Nutzungsgradbestimmung wurden über den gesamten Betrachtungszeitraum der Gas- und Zündölverbrauch, die bereitgestellte thermische und elektrische Energie sowie der elektrische Eigenbedarf der Anlage erfasst. Der Eigenstrombedarf der Anlage wurde bei der Nutzungsgradbestimmung berücksichtigt und von der gesamten erzeugten Strommenge abgezogen (Bestimmung des Netto-Nutzungsgrads). Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 und Abbildung 45 zusammengefasst. Über den gesamten Betrachtungszeitraum hinweg wurde ein durchschnittlicher elektrischer Netto-Nutzungsgrad von 40,9 % ermittelt. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Wert alle An- und Abfahrvorgänge während des Betrachtungszeitraums enthalten sind und dass die Anlage aufgrund von Versuchsdurchführungen und modulierendem Betrieb in Abhängigkeit der Wärmeanforderung nicht durchgängig bei Nennlast

betrieben wurde. Für den thermischen Nutzungsgrad wurde ein Wert von 36,6 % ermittelt, für den Gesamtnutzungsgrad von 78,1 %.

Aus den erfassten Daten wurde eine durchschnittliche Feuerungswärmeleistung von 546,3 kW ermittelt, wobei der energetische Zündölanteil 8,0 % der Feuerungswärmeleistung betrug. Die durchschnittliche elektrische Leistung betrug 226 kW und die thermische 200 kW. Dies entspricht einer durchschnittlichen Auslastung der Anlage von knapp 83 %.

Abbildung 45 stellt den elektrischen, thermischen und gesamten Nutzungsgrad der Anlage während der drei Betrachtungszeiträume dar. Vergleicht man die drei Zeiträume, so ist zu erkennen, dass in allen drei Fällen ein konstant hoher elektrischer Nutzungsgrad erreicht werden konnte. Lediglich im Zeitraum 2, der Übergangszeiten zu Beginn und Ende der Heizperiode enthält, fällt der elektrische Nutzungsgrad etwas niedriger aus. Der thermische Nutzungsgrad hingegen ist im zweiten Betrachtungszeitraum deutlich geringer. Dies ist in erster Linie auf den Leistungsrückgang des Abgaswärmetauschers durch Ablagerungsbildung zurückzuführen, aufgrund dessen die angestrebte Abgastemperatur von 140 °C nach dem Wärmetauscher nicht eingehalten werden konnte. Der Rückgang der thermischen Leistung führte in der Folge auch zu einem geringeren Gesamtnutzungsgrad im zweiten und dritten Betrachtungszeitraum.

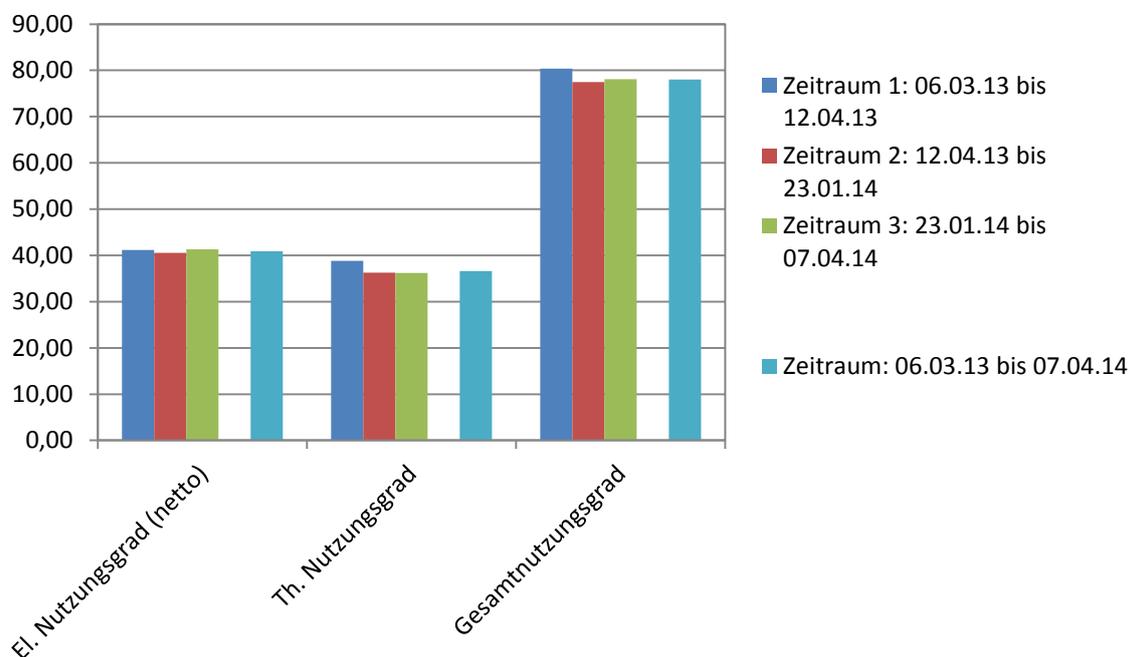


Abbildung 45: Vergleich der Nutzungsgrade in den verschiedenen Betrachtungszeiträumen

Tabelle 12: Ergebnisse der Nutzungsgradbetrachtung über Gesamtzeitraum

		Gesamter Betrachtungszeitraum	Stündlicher Durchschnitt über Betrachtungszeitraum
Betriebsstunden	[h]	6.369	1
Gasverbrauch	[Nm ³]	316.891	50
Zündölverbrauch	[l]	29.716	5
Erzeugter Strom	[kWh]	1.442.118	226
Eigenstromverbrauch	[kWh]	20.492	3
Wärmemenge	[kWh]	1.273.800	200
Elektrischer Nutzungsgrad (brutto)	[%]	41,45	-
Elektrischer Nutzungsgrad abzgl. Eigenverbrauch (netto)	[%]	40,86	-
Thermischer Nutzungsgrad	[%]	36,61	-
Gesamtnutzungsgrad	[%]	78,05	-
Stromkennzahl	[-]	1,12	-

9.4 Emissionsverhalten

9.4.1 Emissionsverhalten (Rohabgas) im Zündstrahl-Betrieb

In Abbildung 46 sind die Kohlenmonoxidemissionen der Zündstrahl-BHKW-Pilotanlage bei verschiedenen Laststufen im Betrieb mit Biomethan und Rapsöl dargestellt. Die Emissionswerte wurden auf einen Restsauerstoffgehalt von 5 Vol-% im Abgas bezogen, um einen Vergleich mit den in der TA Luft festgelegten Emissionsbegrenzungen zu ermöglichen. Bei den dargestellten Werten handelt es sich um die Rohemissionen ohne Abgasnachbehandlung.

Bei Nennlast betragen die Kohlenmonoxidemissionen im Rohabgas mehr als 1.000 mg/m³. Ohne Abgasnachbehandlung (Oxidationskatalysator) kann daher die Emissionsbegrenzung nach TA Luft von 300 mg/m³ nicht eingehalten werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die untersuchte Pilotanlage mit einer Feuerungswärmeleistung von knapp 570 kW nicht in den Geltungsbereich der TA Luft fällt und daher die dort festgelegten Grenzwerte nicht zwangsläufig anzuwenden sind.

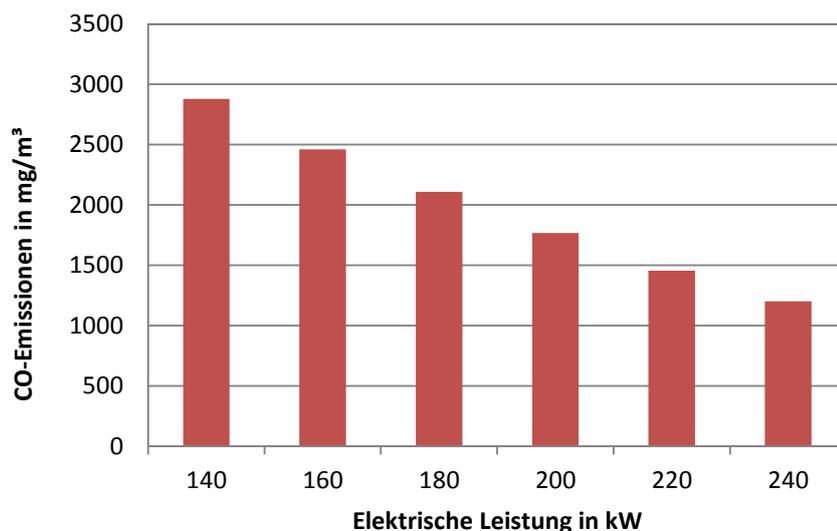


Abbildung 46: CO-Emissionen im Zündstrahlbetrieb (vor Katalysator) bezogen auf 5 Vol-% Restsauerstoff

Betrachtet man die NO_x -Emissionen (Abbildung 47) so erkennt man, dass diese sich bei allen Laststufen unterhalb von 2.500 mg/m^3 bewegen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Pilotanlage mit einer aktiven NO_x -Regelung ausgestattet ist, die die Emissionen durch Veränderung des Einspritzzeitpunkts des Zündöls auf einen Maximalwert von 2.500 mg/m^3 regelt. Müssen die Emissionsbegrenzungen der TA Luft eingehalten werden (1.000 mg/m^3 für NO_x), so wäre für die weitere Reduzierung der Emissionen ein SCR-Katalysator erforderlich.

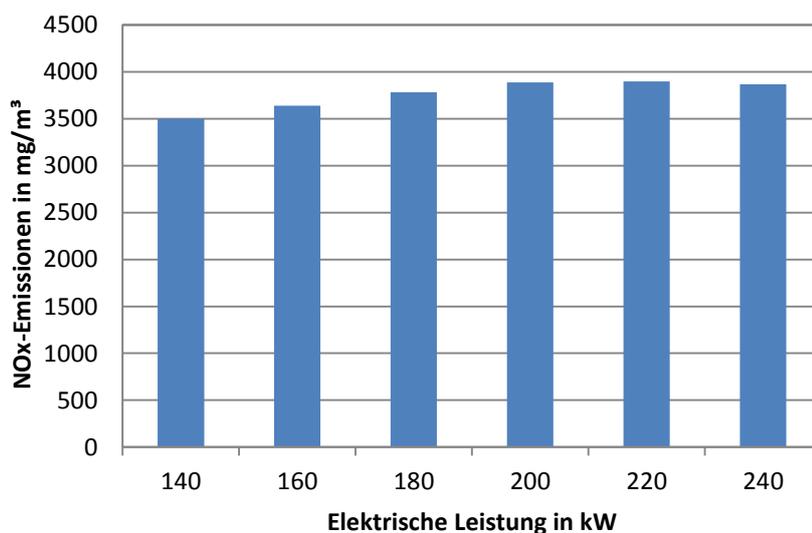


Abbildung 47: NO_x -Emissionen im Zündstrahlbetrieb

In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die Formaldehydemissionen und Methanemissionen im Rohabgas des BHKW im Zündstrahlbetrieb dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte v. a. im Teillastbetrieb stark ansteigen. Bei Nennlast wurden im Rohabgas Formaldehydkonzentrationen von bis zu 105 mg/m^3 gemessen, was deutlich über den Grenzwerten der TA Luft (60 mg/m^3) liegt. Zur Einhaltung der Grenzwerte ist, ebenso wie bei Kohlenmonoxidemissionen, eine Abgasnachbehandlung mittels eines Oxidationskatalysators erforderlich.

Die gemessene Methankonzentration im Abgas beträgt bei Nennlast beträgt ca. 2.400 ppm. In der TA Luft sind die Methanemissionen nicht begrenzt, spielen jedoch aufgrund ihrer klimaschädlichen Wirkung eine Rolle zur Beurteilung der Ökobilanz von Blockheizkraftwerken. Ähnlich hohe Methanemissionen wie an bei der Versuchsanlage gemessen wurden, finden sich auch bei Blockheizkraftwerken mit Gas-Otto-Motoren. Zündstrahl-BHKW sind hier also nicht prinzipiell im Nachteil. Die hohen Methanemissionen sind zumindest teilweise auf den sogenannten Methanschluß während des Ladungswechsels zurückzuführen. Dabei sind für eine kurze Zeit sowohl das Einlassventil als auch das Auslassventil des Zylinders gleichzeitig geöffnet (sogenannte Ventilüberschneidung), wodurch ein Teil des angesaugten Gas-Luft-Gemisches unverbrannt direkt in das Abgasrohr gelangen kann. Eine Reduzierung des Methanschlußes wäre durch eine Anpassung der Steuerzeiten möglich, erfordert jedoch größere konstruktive Änderungen am Motor und ist daher nur im Rahmen einer technischen Weiterentwicklung des Aggregats umsetzbar.

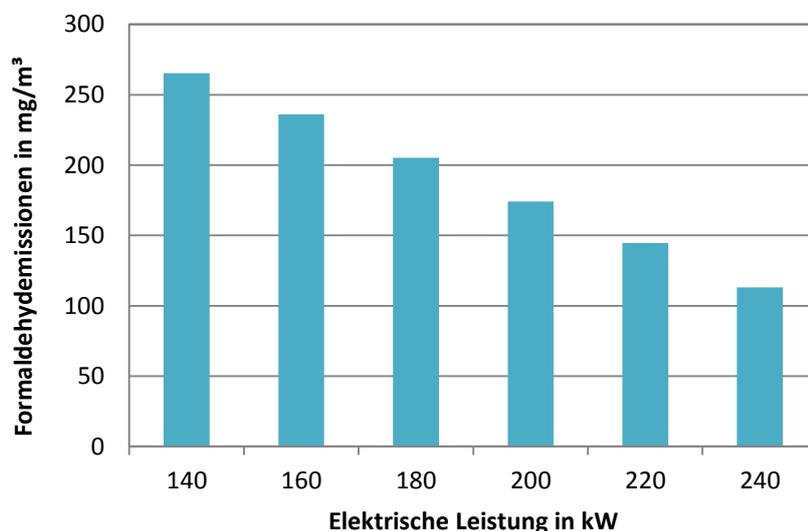


Abbildung 48: Formaldehydemissionen (vor Katalysator) im Zündstrahlbetrieb

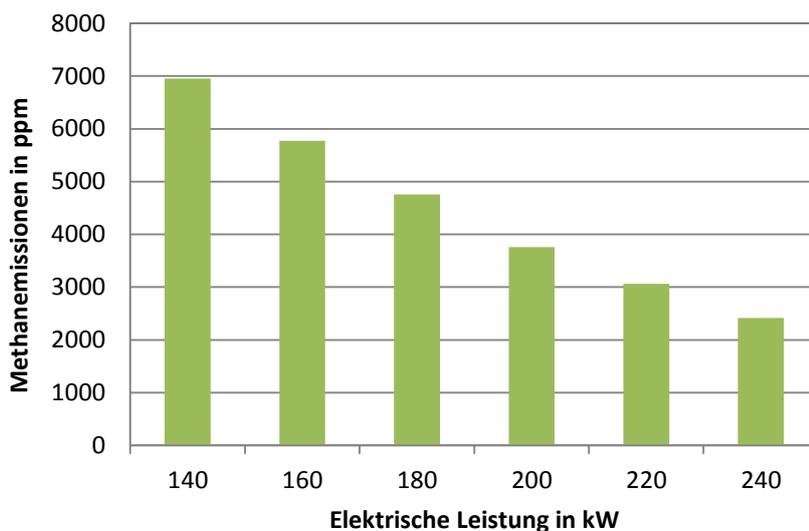


Abbildung 49: Methanemissionen (vor Katalysator) im Zündstrahlbetrieb

9.4.2 Vergleich der Emissionen bei verschiedenen Betriebsarten

Um den Einfluss des Brennstoffmix auf das Emissionsverhalten der Zündstrahl-BHKW-Pilotanlage herauszuarbeiten, wurden Emissionsmessungen mit verschiedenen Zündölen (Palmöl, Rapsöl, Heizöl) und unterschiedlichen Laststufen durchgeführt. Als Hauptbrennstoff wurde jeweils Biomethan aus dem Netz der Stadtwerke Amberg verwendet (entspricht physikalisch Erdgas-H). Zusätzlich wurde die Emissionen im Betrieb mit 100 % Flüssigkraftstoff (Palmöl) untersucht, wobei hier die elektrische Leistung der Anlage auf 200 kW beschränkt war.

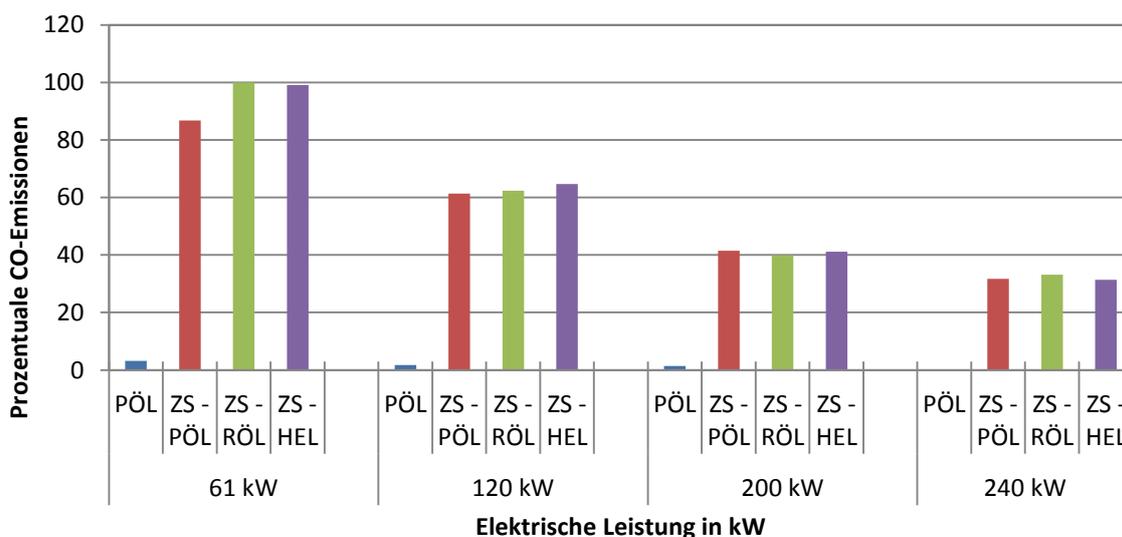


Abbildung 50: CO-Emissionen (vor Katalysator) bei verschiedenen Betriebsmodi

In Abbildung 50 sind die Kohlenmonoxid-Emissionen des Motors für die verschiedenen Betriebsmodi dargestellt. Die Ergebnisse sind auf den höchsten auftretenden Emissionswert normiert (= 100 %), um die Vergleichbarkeit zu erleichtern. Die Art des Zündöls wirkt sich v. a. bei niedrigen Leistungen auf die Emissionen aus, da hier der energetische Anteil des Zündöls prozentual höher ist. Bei Nennlast hingegen hat die Wahl des Zündöls kaum einen Einfluss auf die CO-Emissionen. Im reinen Flüssigkraftstoffbetrieb liegen die CO-Emissionen deutlich unter denen des Zündstrahlbetriebs (reine dieselmotorische Verbrennung).

In Abbildung 51 sind die NO_x-Emissionen bei verschiedenen Laststufen und Zündölen im Zündstrahl- und im Flüssigkraftstoffbetrieb dargestellt. Im Flüssigkraftstoffbetrieb liegen die NO_x-Emissionen deutlich höher als im Zündstrahlbetrieb, das Verhalten ist hier also gegenläufig zu den CO-Emissionen. Bei der Interpretation der Messwerte ist darauf zu achten, dass der Motor im vorliegenden Fall im Zündstrahlbetrieb aktiv auf einen Maximalwert von 2.500 mg/m³ NO_x-Emissionen geregelt wurde, was im Flüssigkraftstoffbetrieb nicht der Fall war (vgl. hierzu Erläuterungen in nachfolgendem Kapitel 9.4.3).

Bezieht man die Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen in die Betrachtung mit ein (vgl. Abbildung 39), so lässt sich feststellen, dass im Zündstrahlbetrieb bei etwa gleichbleibendem elektrischem Wirkungsgrad geringere NO_x-Emissionen erreicht werden können als im Flüssigkraftstoffbetrieb, bei allerdings deutlich höheren CO-Rohemissionen.

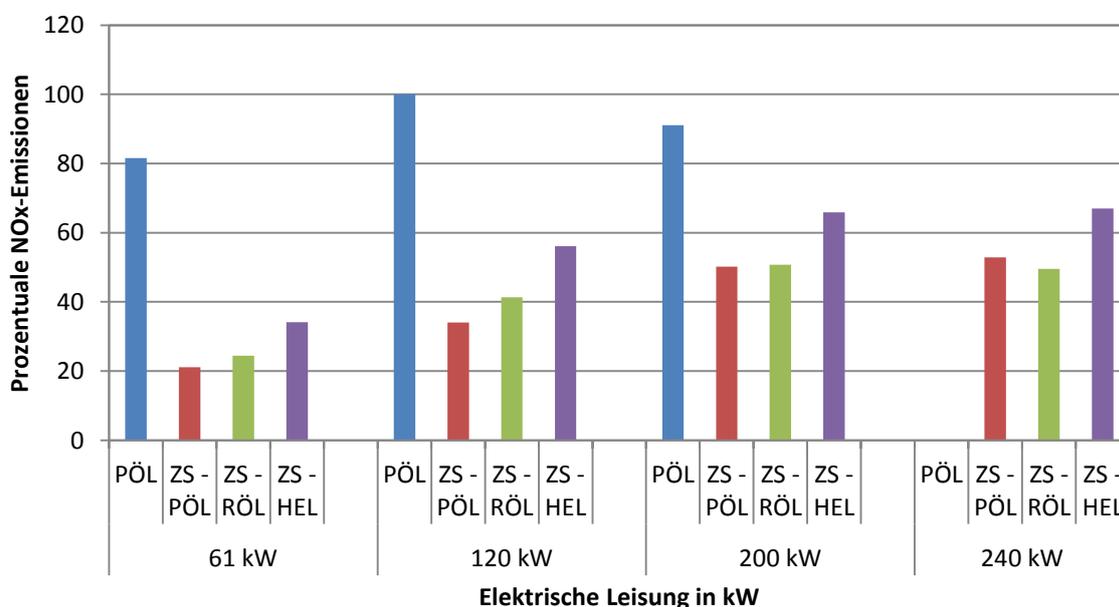


Abbildung 51: NO_x-Emissionen bei verschiedenen Betriebsmodi

9.4.3 Emissionsminderung

Die Ergebnisse der Emissionsmessungen zeigen, dass die Emissionsbegrenzungen nach TA-Luft bei der Zündstrahl-BHKW-Pilotanlage nicht ohne Abgasnachbehandlung eingehalten werden können. Insgesamt ist das Niveau der Rohemissionen als hoch zu bewerten. Um sowohl die Kohlenmonoxid-, als auch die Stickstoffoxidemissionen auf das in der TA Luft geforderte Niveau abzusenken, ist bei dem hier umgesetzten Zündstrahl-Verfahren ein zwei-stufiges Abgasnachbehandlungskonzept notwendig. Für die Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffemissionen (z. B. Formaldehyd) ist ein Oxidationskatalysator erforderlich, der kohlenstoffhaltige Verbindungen zu Kohlendioxid aufoxidiert. Zur Minimierung der Stickstoffoxidemissionen ist dagegen ein Reduktionskatalysator erforderlich, der die Stickstoffoxide zu molekularem Stickstoff reduziert. Bei Verbrennungsmotoren wird hierfür üblicherweise die selektive katalytische Reduktion unter Zugabe eines Reduktionsmittels eingesetzt (selective catalytic reduction = SCR).

Im Rahmen des Projekts wurde die Reduzierung der NO_x -Emissionen innermotorisch durch eine Kombination aus fest eingestellter Abgasrückführung und einer aktiven Regelung des Einspritzzeitpunkts in Abhängigkeit der mittels eines elektrochemischen Sensors im Abgasstrang gemessenen NO_x -Emissionen vorgenommen. Durch die Abgasrückführung wird der Inertgasanteil im Zylinder erhöht und die Verbrennungsspitzen-temperatur, die maßgeblich für die NO_x -Emissionen sind¹⁶, werden gesenkt. Nach dem gleichen Wirkprinzip funktioniert die Minderung der NO_x -Emissionen durch Verschiebung des Einspritzzeitpunkts. Auch hier wird versucht, die Verbrennungsspitzen-temperatur zu verringern. Je später die Einspritzung des Zündkraftstoffs erfolgt, umso sanfter läuft die Verbrennung ab und umso geringer sind die auftretenden Drücke und Temperaturen sowie die NO_x -Emissionen, allerdings zu Lasten des Wirkungsgrads¹⁷.

Die aktive Regelung des Einspritzzeitpunkts dient bei dem untersuchten BHKW-Modul in erster Linie dazu, unkontrollierte Betriebszustände (klopfende Verbrennung) zu vermeiden und einen sicheren und schonenden Motorbetrieb zu gewährleisten und ist nicht auf minimale NO_x -Emissionen hin optimiert. In der Praxis konnten bei dem untersuchten BHKW-Modul mit diesem Konzept NO_x -Werte bis ca. 2.500 mg/m^3 dargestellt werden, ohne nennenswerte Verluste beim elektrischen Wirkungsgrad in Kauf nehmen zu müssen. Eine weitere Absenkung der NO_x -Emissionen von Zündstrahlmotoren durch innermotorische Maßnahmen ist möglich, allerdings müssen dabei in der Regel Einbußen beim elektrischen Wirkungsgrad in

¹⁶ Bildung von thermischem NO nach dem Zeldovich-Mechanismus

¹⁷ Für maximale Wirkungsgrade wird eine kurze Verbrennungsphase mit möglichst hoher Energiefreisetzungsrate angestrebt

Kauf genommen werden. Daher wird für Anwendungen in denen Abgasgrenzwerte verbindlich vorgeschrieben sind (z. B. Einsatz des Zündstrahl-BHKW-Moduls in genehmigungsbedürftigen Anlagen nach TA Luft) eine nachgeschaltete Abgasreinigung mittels SCR-Katalysator bevorzugt. Das im Rahmen des Projekts untersuchte Zündstrahl-BHKW war nicht mit einem SCR-Katalysator ausgestattet. Die grundsätzliche Wirksamkeit von SCR-Katalysatoren für Blockheizkraftwerke konnte jedoch u. a. in vorangegangenen Versuchsreihen an der Technischen Hochschule Amberg-Weiden bestätigt werden, in denen an einer vergleichbaren Anlage im Praxisbetrieb NO_x -Minderungsraten von bis zu 90 % erreicht wurden, sodass eine Einhaltung der Grenzwerte nach TA Luft ($1.000 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$) und $\frac{1}{2}$ TA Luft ($500 \text{ mg/m}^3 \text{ NO}_x$) möglich war [BrautschLechner2012]¹⁸.

Zur Minderung der Kohlenmonoxid- und Kohlenwasserstoffemissionen wurde die Versuchsanlage mit einem Oxidationskatalysator ausgestattet. Oxidationskatalysatoren gehören in der Regel zur Standardausstattung von BHKW-Modulen und sind im Lieferumfang enthalten, so auch bei der Versuchsanlage. In Abbildung 52 ist die Verringerung der CO-Emissionen durch den Katalysator nach 1.000 Betriebsstunden und 10.000 Betriebsstunden dargestellt. Zu Beginn der Versuchsphase konnten die CO-Konzentration im Abgas durch den Katalysator um fast 60 % reduziert werden, die Emissionsbegrenzung von 300 mg/m^3 nach TA Luft konnte damit eingehalten werden. Nach 10.000 Betriebsstunden fiel die erreichbare Minderung jedoch aufgrund der Alterung des Katalysators auf lediglich noch knapp 35 % bei Nennlast ab, die Vorgaben der TA Luft konnten damit nicht mehr erfüllt werden.

In Abbildung 53 ist die Minderung der Formaldehydemissionen (Leitkomponente für die Kohlenwasserstoffemissionen) durch den Oxidationskatalysator dargestellt. Im Vergleich zu den Kohlenmonoxidemissionen ist der Katalysator hier weniger wirksam. Es konnte eine Minderung von nur ca. 7,6 % im Nennlastbetrieb festgestellt werden.

Der Emissionsproblematik wurde mittlerweile vom Hersteller der BHKW-Versuchsanlage durch die Entwicklung leistungsfähigerer und größer dimensionierter Abgasnachbehandlungssysteme Rechnung getragen. Die Zündstrahl-BHKW-Module können nun auf Wunsch mit einer Kombination aus Oxidations- und Reduktionskatalysatoren (SCR) geliefert werden, die auf die einzuhaltenden Grenzwerte (z. B. TA Luft) abgestimmt werden.¹⁹

¹⁸ Die Versuche mit der SCR-Katalysatoranlage wurden an einem pflanzenölbetriebenen BHKW durchgeführt, die Ergebnisse sind jedoch grundsätzlich auch auf Zündstrahl-BHKW übertragbar.

¹⁹ Aus wirtschaftlichen Gründen beschränkt sich der Umfang der Emissionsminderungsmaßnahmen in der Praxis auf das für die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte notwendige Maß. In den Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (siehe Abschnitt 6) wurden für die Abgasnachbehandlung Investitionskosten von 18.650 € (SCR-Katalysator) und Betriebskosten von 0,30 €/l Harnstofflösung bei einem Verbrauch von 4 l/h berücksichtigt.

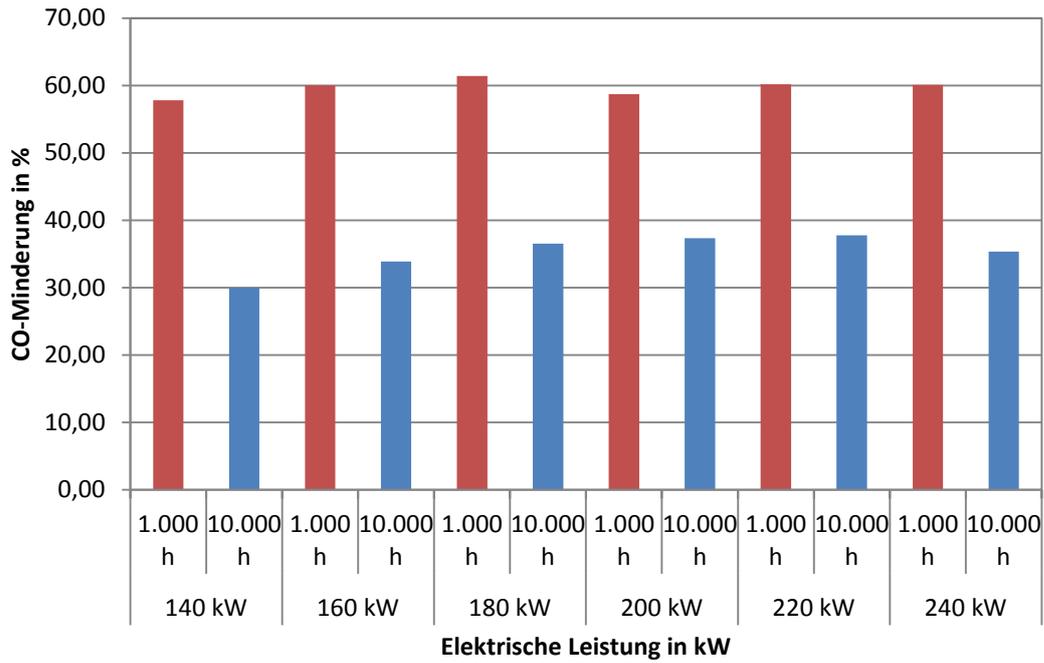


Abbildung 52: Minderung der CO-Emissionen durch den Oxidationskatalysator

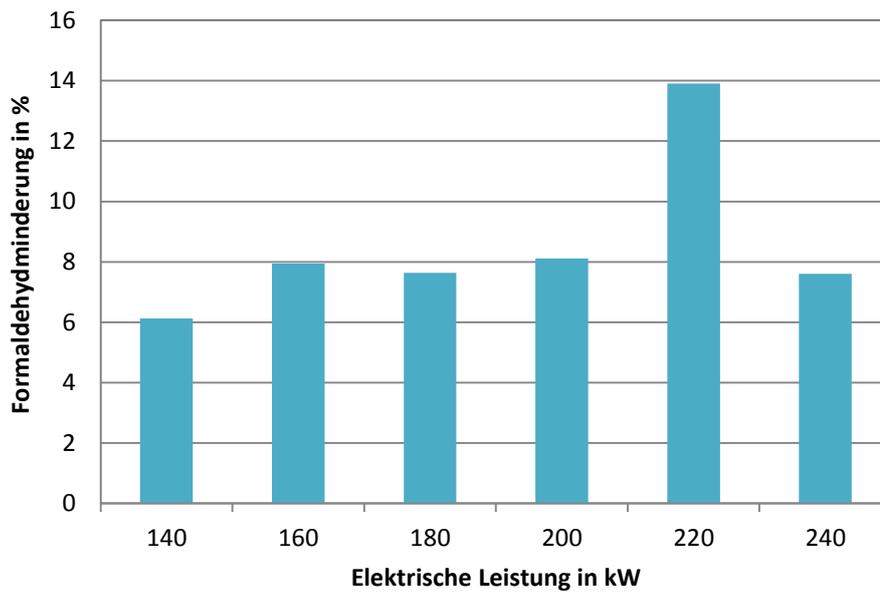


Abbildung 53: Minderung der Formaldehydemissionen durch den Oxidationskatalysator

9.5 Verbrennungsanalyse

9.5.1 Vergleich zwischen Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb

Um das motorische Verbrennungsverhalten der Pilotanlage zu beurteilen, wurden Indiziermessungen bei verschiedenen Laststufen von 61 kW bis 240 kW elektrischer Leistung durchgeführt. Um einen unverzerrten Vergleich zwischen Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb zu ermöglichen, werden im Folgenden lediglich die Ergebnisse bei 200 kW präsentiert (Maximalleistung im Flüssigkraftstoffbetrieb).

In Abbildung 54 und Abbildung 55 sind jeweils die Zylinderdruck-, Saugrohrdruck- und Abgasdruckverläufe im Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb bei 200 kW_{el} dargestellt. Betrachtet man den Saugrohrdruckverlauf, sind drei ausgeprägte Druckabfälle mit Abständen von ca. 240 °KW zu erkennen, bedingt durch das Öffnen der Einlassventile des Motors. Beim Abgasdruckverlauf sind deutliche Druckwellen zu erkennen. Diese sind auf das Ausstoßen des Abgases aus dem Zylinder zurückzuführen. Die Spitzendrücke im Saugrohr liegen im Flüssigkraftstoffbetrieb bei etwa 2,2 bar und im Zündstrahlbetrieb bei etwa 2,1 bar. Im Abgaskrümmen treten Spitzenwerte von ca. 3,0 bar im Flüssigkraftstoffbetrieb und von ca. 2,95 bar im Zündstrahlbetrieb auf. Vergleicht man Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb, sind die Verläufe im Saugrohr und Abgaskrümmen nahezu identisch. Für die Druckverhältnisse im Saugrohr und Abgaskrümmen ist es also unerheblich, ob der Motor Luft ansaugt und verdichtet (Betrieb als Dieselmotor im Flüssigkraftstoffbetrieb) oder Gas-Luft-Gemisch (Betrieb als Zündstrahlmotor). Unterschiede sind dagegen vor allem im Zylinderdruckverlauf zu finden, der maßgeblich durch die Verbrennung beeinflusst wird.

In Abbildung 56 und Abbildung 57 sind Ausschnitte aus den Zylinderdruckverläufen im Flüssigkraftstoff- und Zündstrahlbetrieb für den Bereich von 30 °KW vor OT bis 30 °KW nach OT dargestellt. Weiterhin ist das Ansteuersignal des Injektors, welches mit einer Strommesszange aufgenommen wurde, abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Injektor im Zündstrahlbetrieb früher angesteuert wird. Außerdem ist die Ansteuerdauer deutlich kürzer, da im Zündstrahlbetrieb lediglich eine geringe Menge an Kraftstoff eingespritzt werden muss. Betrachtet man dagegen das Ansteuersignal im Flüssigkraftstoffbetrieb, so sind zwei ausgeprägte Plateaus zu erkennen. Während der ersten Phase (Anzugstromphase) wird die Düsennadel des Magnetventilinjektors angezogen. Hierfür wird ein hoher Anzugsstrom benötigt. Nachdem die Düsennadel ihren vollständig geöffneten Zustand erreicht hat, wird weniger Strom benötigt um Injektor offen zu halten. Man spricht hier von der Haltestromphase. Im Vergleich dazu ist beim Ansteuersignal im Zündstrahlbetrieb nur ein Plateau zu erkennen. Um die benötigte Menge an Kraftstoff einzuspritzen ist nur eine kurze Ansteuerung des Injek-

tors notwendig, wobei die Düsennadel erreicht den voll geöffneten Zustand nicht erreicht. Der Injektor arbeitet im sogenannten ballistischen Bereich.

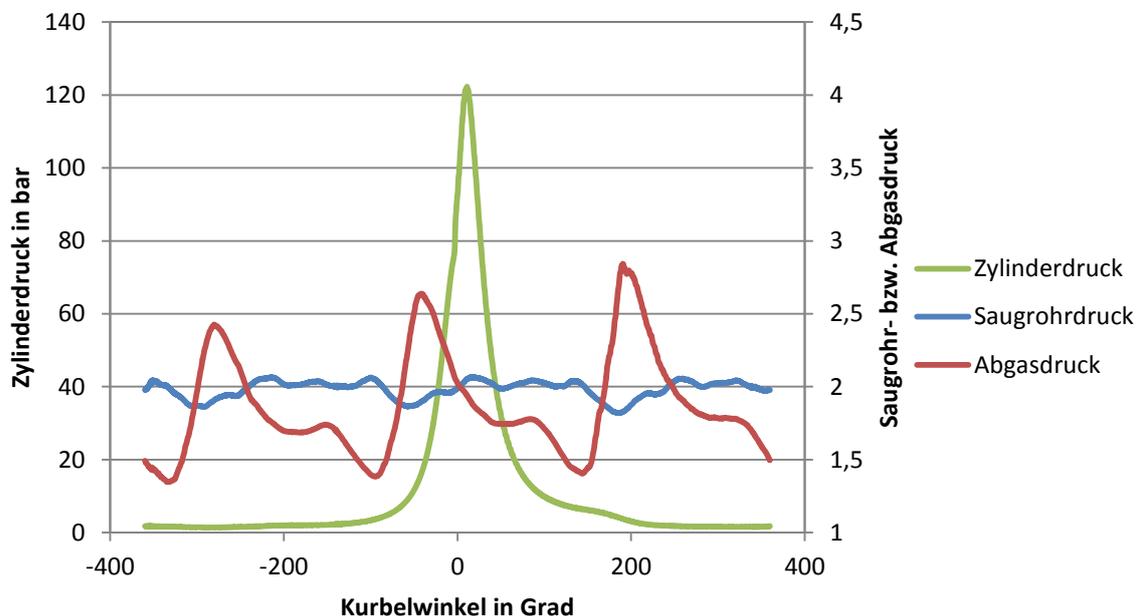


Abbildung 54: Druckverläufe bei 200 kW im Zündstrahlbetrieb

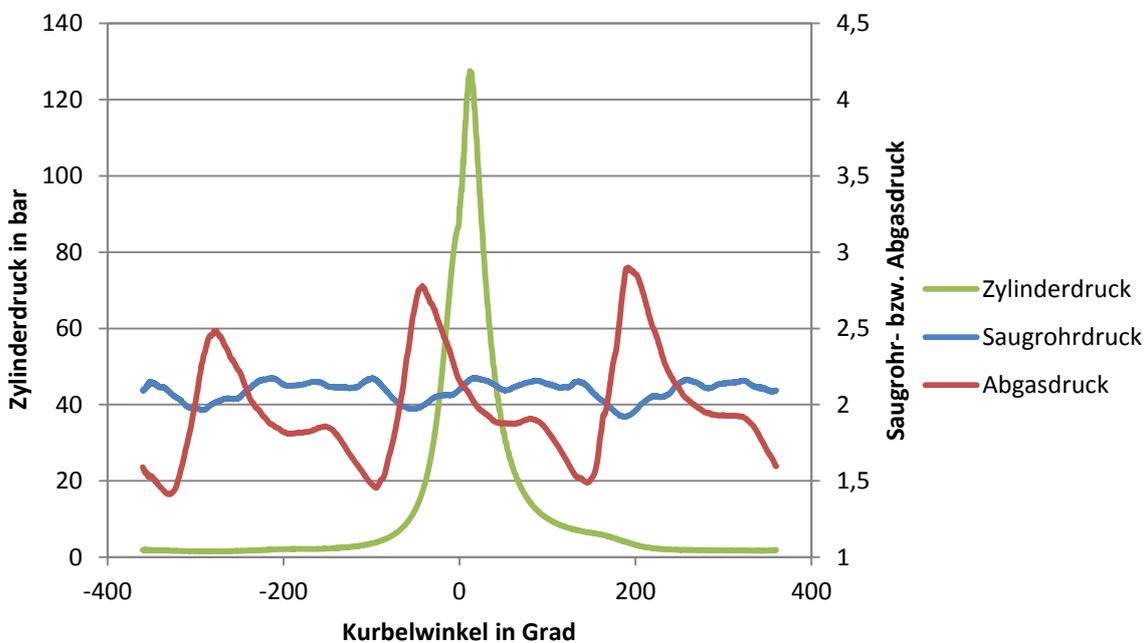


Abbildung 55: Druckverläufe bei 200 kW im Flüssigkraftstoffbetrieb

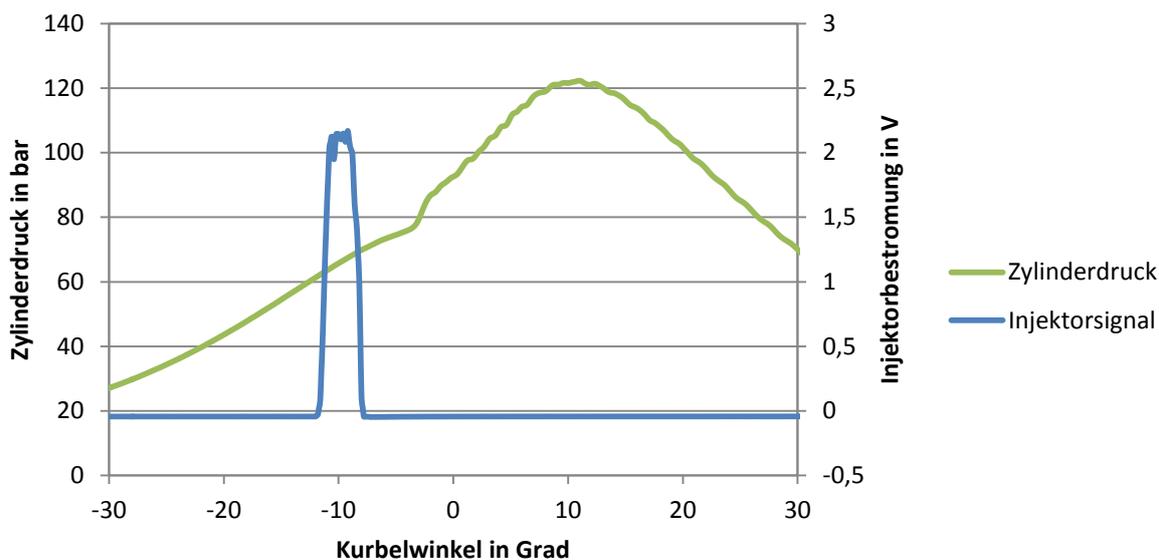


Abbildung 56: Injektorstrom und Zylinderdruckverlauf bei 200 kW im Zündstrahlbetrieb

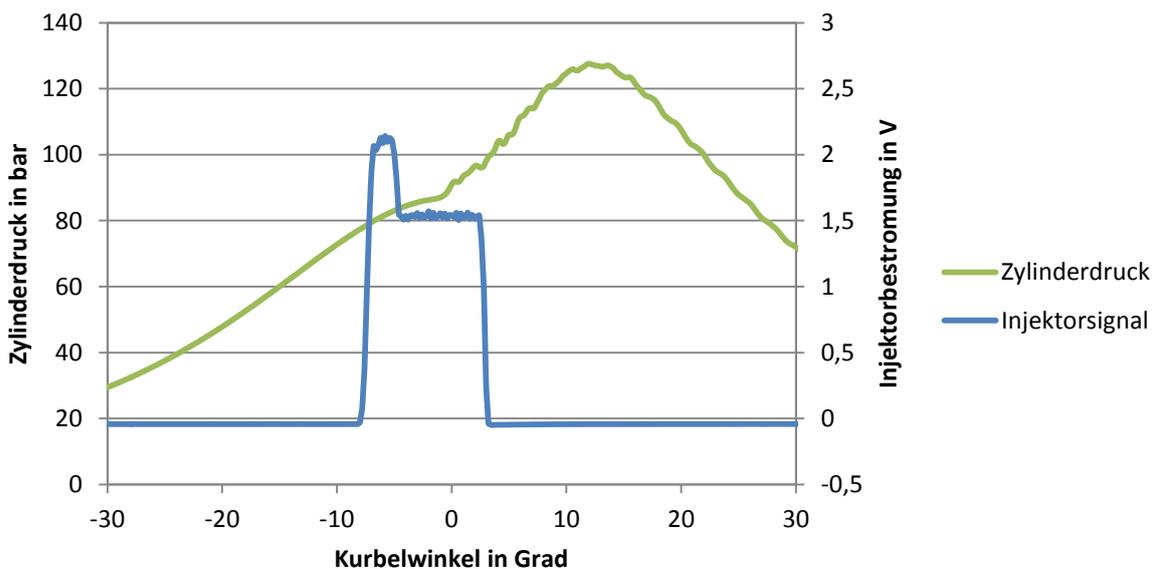


Abbildung 57: Injektorstrom und Zylinderdruckverlauf bei 200 kW im Flüssigkraftstoffbetrieb

Betrachtet man die Zylinderdruckkurve im Zündstrahlbetrieb, so ist nach der Verdichtungsphase ein kurzer, steiler Anstieg zu erkennen. Es handelt sich hierbei um die schlagartige Selbstzündung des Zündöls, die in der Folge zur Entzündung des Gas-Luft-Gemisches führt. Nach diesem steilen Anstieg findet ein stetig verlaufender flacherer Druckanstieg statt. In dieser Phase findet die gleichmäßig ablaufende Verbrennung des Gas-Luft-Gemisches statt.

Im Flüssigkraftstoffbetrieb erfolgt dagegen ein vergleichsweise später und in der Folge etwas steilerer Druckanstieg, ohne jedoch die ausgeprägte schlagartige Drucksteigerung zu Beginn der Verbrennung aufzuweisen. Im Flüssigkraftstoffbetrieb ist der Zylinderspitzenruck um ca. 6 bar höher als im Zündstrahlbetrieb. Aufgrund des hohen Spitzendrucks kann von einer höheren Belastung des Motors ausgegangen werden.

In Abbildung 58 und Abbildung 59 sind die Heizverläufe bzw. summierten Heizverläufe des BHKW im Zündstrahl- und Flüssigkraftstoffbetrieb dargestellt. Die Heizverläufe werden mittels thermodynamischer Methoden rechnerisch aus dem Zylinderdruckverlauf ermittelt. Sie sind ein Maß für den zeitlichen Verlauf der im Zylinder freigesetzten Energie in Relation zur Kolbenposition. Betrachtet man den Heizverlauf im Zündstrahlbetrieb, so erkennt man, dass die Verbrennung im Zylinder ca. 5 °KW früher beginnt als im Flüssigkraftstoffbetrieb. Außerdem erkennt man, dass die Kurve zwei Spitzen aufweist. Die erste kleinere Spitze entspricht der auch im Druckverlauf sichtbaren schlagartigen Entzündung bei Einspritzung des Zündöls. Die zweite Spitze stellt den darauf folgenden gleichmäßigen Abbrand des Gas-Luft-Gemisches dar. Im Vergleich dazu besitzt die Kurve des Heizverlaufs im Flüssigkraftstoffbetrieb lediglich eine kleine erste Spitze (sogenannte vorgemischte Verbrennung) und eine deutlich stärker ausgeprägte zweite Spitze (Diffusionsverbrennung). Diese ist in Summe allerdings höher als im Zündstrahlbetrieb, d. h. es wird in einem kleineren Intervall mehr Energie umgesetzt, was sich auch in dem höheren Zylinderspitzenruck und der höheren maximalen Drucksteigerungsrate widerspiegelt.

Betrachtet man den summierten Heizverlauf (Abbildung 59) erkennt man den früheren Beginn der Verbrennung im Zündstrahlbetrieb sowie den kurzen, steilen Anstieg und den folgenden Knick der Kurve, welcher die Verbrennung des Zündöls darstellt. Die Kurve im Flüssigkraftstoffbetrieb verläuft steiler als im Zündstrahlbetrieb. Der Verbrennungsschwerpunkt liegt in beiden Fällen nahe am theoretischen Optimum, das nach bei etwa 8 °KW nach dem oberen Totpunkt liegt [Merker2009], was auf eine wirkungsgradoptimierte Einstellung des Motors schließen lässt.

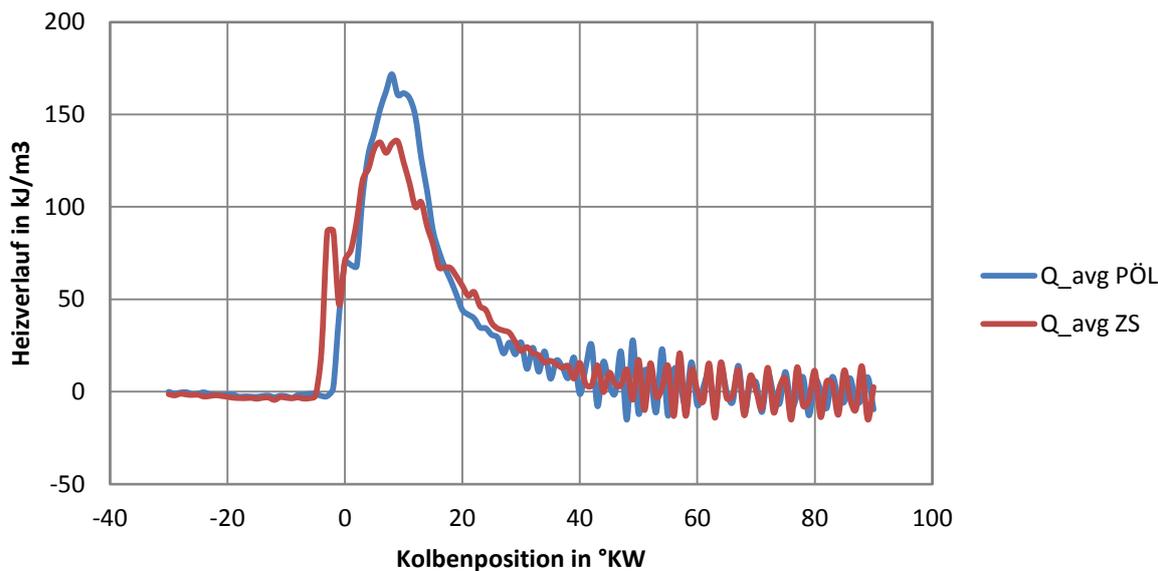


Abbildung 58: Vergleich des Heizverlaufs im Zündstrahl- und Pflanzenölbetrieb bei 200 kW

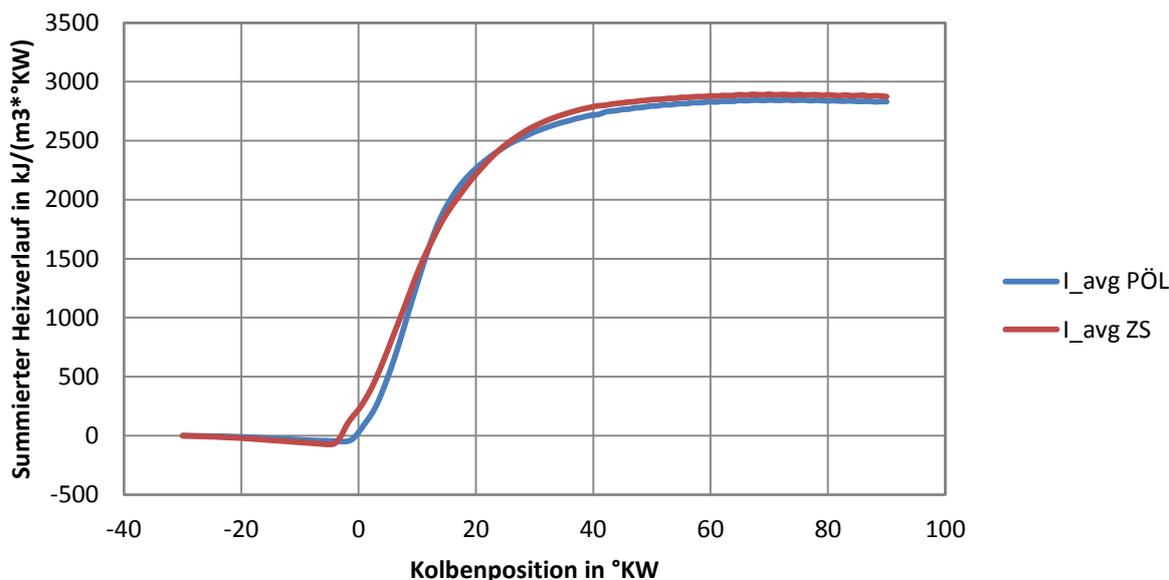


Abbildung 59: Vergleich des summierten Heizverlaufs im Zündstrahl- und Pflanzenölbetrieb bei 200 kW

Aus den Daten der Zylinderdruckanalyse ist es möglich, den indizierten Mitteldruck zu ermitteln. Dieser ist eine rechnerische Größe, die aus dem Hubvolumen und dem Druckverlauf ermittelt wird und stellt die auf den Kolben wirkende spezifische Arbeit dar [Grünig2010]. Der indizierte Mitteldruck ist im Zündstrahlbetrieb mit 15,18 bar geringfügig höher als im Flüssigkraftstoffbetrieb (15,03 bar). Daraus lässt sich schließen, dass im untersuchten Lastpunkt (200 kW_{el}) der Wirkungsgrad des Motors im Zündstrahlbetrieb geringfügig niedriger ist als im Flüssigkraftstoffbetrieb, da im Zylinder mehr Energie freigesetzt werden muss, um die glei-

che elektrische Leistung zu erreichen. Dies wird durch die Wirkungsgradmessungen bestätigt (vgl. Abbildung 39).

9.5.2 Einfluss des Einspritzzeitpunkts

Um den Einfluss zu untersuchen, den der Zeitpunkt der Zündöleinspritzung auf das Verbrenungsverhalten hat, wurden Indiziermessungen bei verschiedenen Einspritzzeitpunkten durchgeführt. Abbildung 60 zeigt den Zylinderdruckverlauf im Zündstrahlbetrieb (Nennlast 240 kW_{el}) in Abhängigkeit vom Einspritzzeitpunkt des Zündöls. Ein Kurbelwinkel von 0° entspricht dabei dem oberen Totpunkt der Kolbenbewegung (OT). Abbildung 61 zeigt die aus den Druckverläufen errechneten Heizverläufe (zeitlicher Verlauf der Energiefreisetzung im Zylinder).

Je früher der Zündkraftstoff eingespritzt wird, umso früher zündet das angesaugte Gas-Luft-Gemisch und umso höher sind die auftretenden Spitzendrücke. Charakteristisch für die Verbrennung ist ein vergleichsweise steiler Druckanstieg am Anfang der Verbrennungsphase, der auf die schlagartige Entzündung der eingespritzten Zündölmenge zurückzuführen ist, die wiederum das Gas-Luft-Gemisch entzündet. Im Heizverlauf ist dies als Spitze am Anfang der Verbrennung sichtbar. Der charakteristische Verlauf der Zündstrahl-Verbrennung verändert sich mit Verlegung des Einspritzzeitpunktes nicht, wie aus dem Heizverlauf erkennbar ist. Lediglich die Dauer und die Gradienten der Energiefreisetzung variieren.

Eine frühe Einspritzung mit hohen Spitzendrücken und kurzer Verbrennung ist in der Theorie vorteilhaft für den Wirkungsgrad des Motors. In der Praxis wird die Vorverlegung des Einspritzzeitpunkts durch unkontrollierte Zündungen des Gemisches (Klopfen), durch die maximal zulässigen Spitzendrücke und durch die maximal zulässigen Stickstoffoxidemissionen²⁰ begrenzt. Im vorliegenden Fall stellt die hellblaue Linie die im Versuchsbetrieb realisierbare Grenzeinstellung dar. Hier sind bereits hohe Spitzen im Druck- und Heizverlauf zu sehen, die im Dauerbetrieb zu Motorschäden führen können. Eine weitere Vorverlegung würde zu Motorschäden führen.

Je später dagegen der Einspritzzeitpunkt gewählt wird, umso mehr verlagert sich die Verbrennung in die Expansionsphase der Kolbenbewegung. Dies äußert sich in höheren Abgastemperaturen, die wiederum dazu führen, dass am Abgasturbolader mehr Antriebsenergie für die Turbine bereitsteht und höhere Ladedrücke erreicht werden. Das Zylinderdruckniveau

²⁰ Die NO_x-Emissionen steigen bei Vorverlegung des Einspritzzeitpunkts aufgrund der hohen Verbrennungsspitzen-temperaturen stark an

außerhalb der Verbrennungsphase (Kompression Expansion) liegt bei späten Einspritzzeitpunkten daher höher, wie aus Abbildung 60 deutlich wird. In Summe nimmt der Wirkungsgrad des Motors bei später Einspritzung jedoch ab.

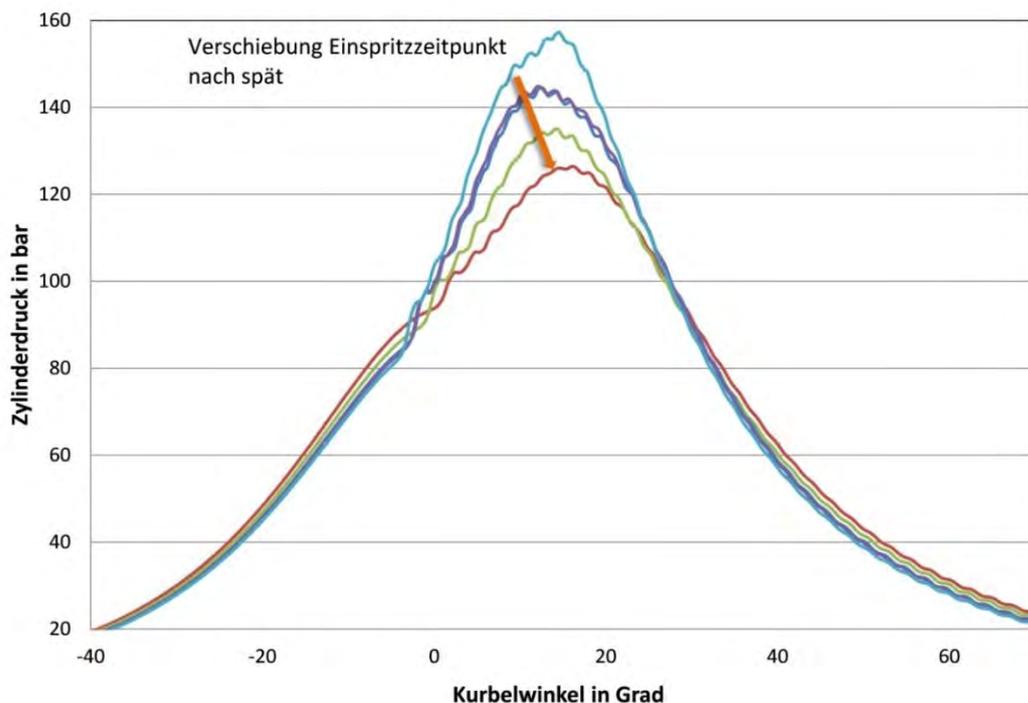


Abbildung 60: Zylinderdruckverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit des Einspritzzeitpunktes

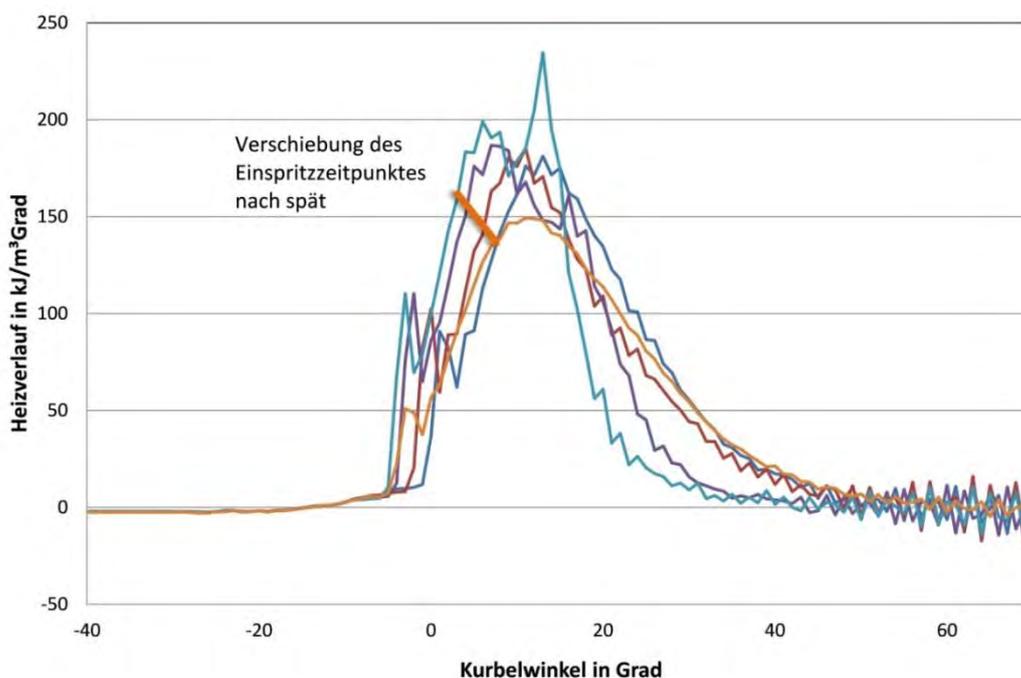


Abbildung 61: Heizverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit des Einspritzzeitpunktes

9.5.3 Einfluss der Zündölmenge

Entscheidend für den Betrieb eines Zündstrahlmotors ist die Menge an Flüssigkraftstoff, die für eine sichere Entzündung des Gemisches und eine stabile Verbrennung erforderlich ist. Aus wirtschaftlichen und regulatorischen Gründen kann es erforderlich sein, diese auf das notwendige Minimum von etwa 5 % bis 10 % zu begrenzen. Um die Auswirkungen der Zündölmenge auf die Verbrennung zu untersuchen, wurde die Einspritzmenge gegenüber der Standardeinstellung versuchsweise um 25 % reduziert. Dies entspricht einem energetischen Zündstrahlanteil von 5,9 %, gegenüber 7,8 % bei Standardeinstellung.

Die resultierenden Zylinderdruckverläufe sind in Abbildung 62 dargestellt. Deutlich erkennbar sind der geringere Spitzendruck und die geringere Drucksteigerungsrate bei reduzierter Zündölmenge. Der Heizverlauf (Abbildung 63) weist ebenfalls geringere Spitzenwerte und Gradienten auf, die Brenndauer ist länger und der Schwerpunkt der Verbrennung liegt später. Im Gegensatz zur Verlegung des Einspritzzeitpunktes verändern sich nicht nur Dauer, Gradienten und Spitzenwerte des Heizverlaufs, sondern die gesamte Form der Verbrennung. Der erste Verbrennungspeak bestimmt bei geringer Zündölmenge in weit geringerem Maße den Heizverlauf, stattdessen ist nach erfolgter Zündung ein gleichmäßiger und annähernd symmetrischer Verbrennungspeak erkennbar, der breiter ist und geringere Spitzenwerte aufweist als dies bei hoher Zündölmenge der Fall ist. Die Verbrennung verlagert sich insgesamt zu späteren Kurbelwinkeln in Richtung Expansionsphase. Dementsprechend steigt die Abgastemperatur und das Energieangebot für die Turboladerturbine steigt, was sich wiederum in einem etwas höheren Ladedruck und Abgasgegendruck widerspiegelt (vgl. Zylinderdruckverlauf bei Kompression und Expansion in Abbildung 62). Bei Reduzierung der Einspritzmenge ist ebenso wie bereits bei der Verlegung des Einspritzzeitpunktes nach spät in Summe ein etwas niedriger Motorwirkungsgrad aufgrund des langsameren Brennverlaufs zu erwarten. Der thermische Wirkungsgrad steigt dagegen in der Regel etwas an, die Abgastemperatur und damit die im Abgas enthaltene auskoppelbare Wärmeenergie zunimmt.

Die hier dargestellten Druck- und Heizverläufe stellen jeweils die Mittelwerte aus 100 Einzelzyklen dar. Betrachtet man die einzelnen Verbrennungszyklen, so weisen die Verläufe bei geringer Zündölmenge eine etwas höhere Streuung auf. Die Standardabweichung der Zylinderdruckspitzenwerte beträgt 3,6 bar bei hoher Zündölmenge und 5,2 bar bei geringer Zündölmenge, zwischen den einzelnen Verbrennungszyklen treten also größere Unterschiede im Druckverlauf und in der Energiefreisetzung auf. Zündaussetzer konnten jedoch nicht beobachtet werden, die Verbrennung ist weiterhin stabil.

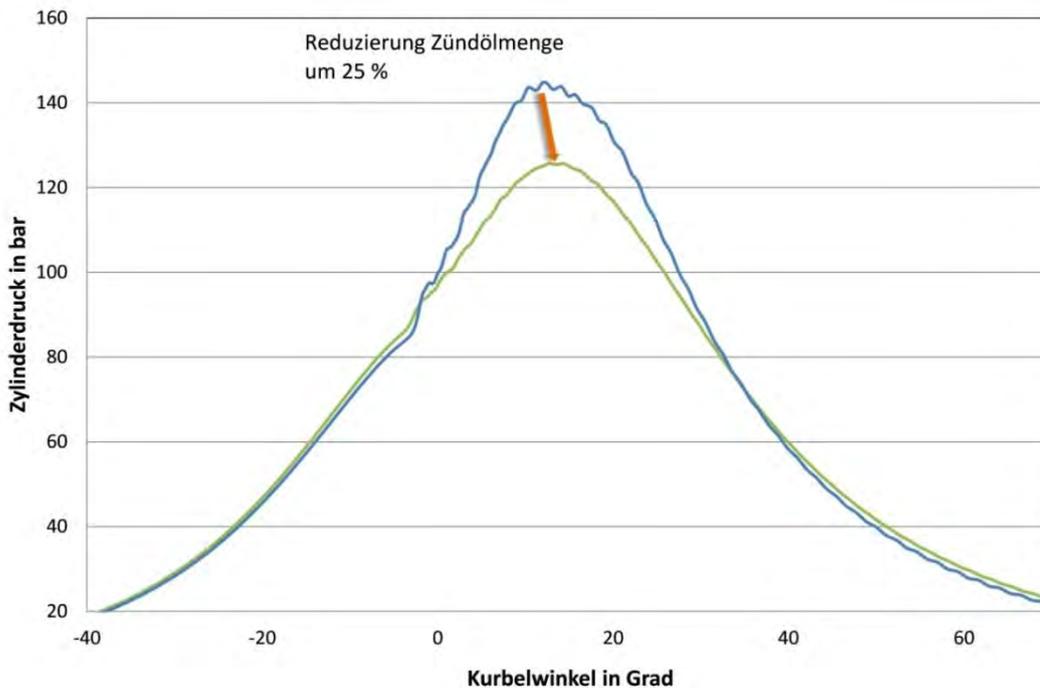


Abbildung 62: Zylinderdruckverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge

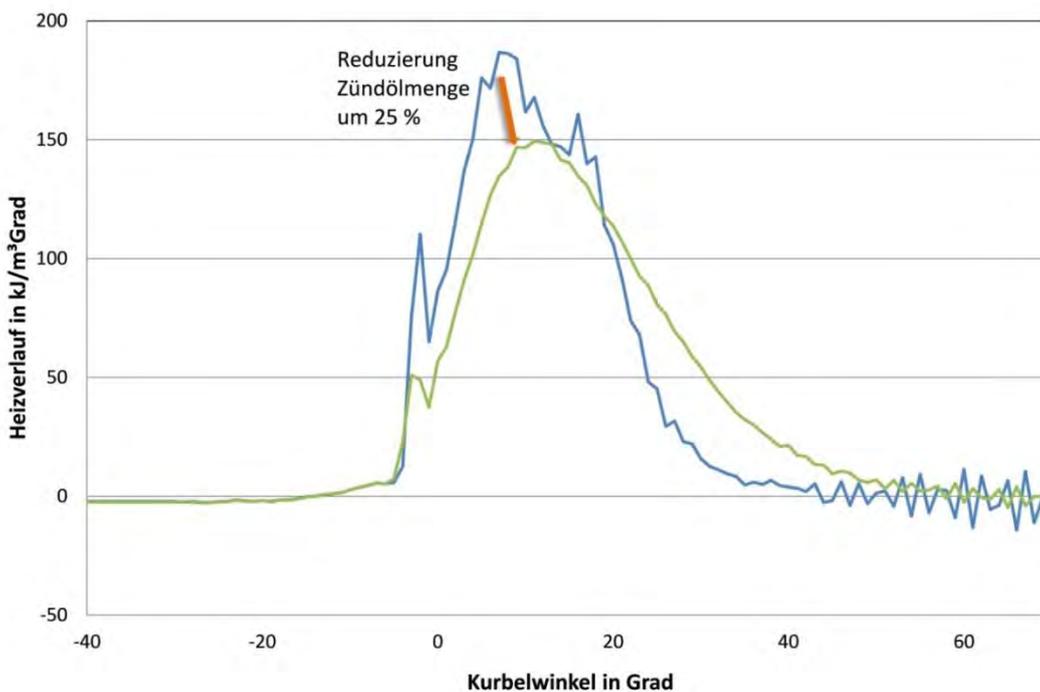


Abbildung 63: Heizverlauf im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge

Die Reduzierung der Zündölmenge hat auch Auswirkungen auf die Abgasemissionen des Motors. Abbildung 64 zeigt die Aufteilung der Rohemissionen vor Katalysator für die Abgasbestandteile Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide, Methan und Formaldehyd, jeweils bei voller

und bei reduzierter Zündölmenge. Der Einspritzzeitpunkt wurde in beiden Fällen gleich eingestellt. Bei Reduzierung der Zündölmenge nehmen die Emissionen an Stickstoffoxiden ab, während die Konzentrationen der anderen Abgasbestandteile zunehmen. Dies deckt sich gut mit den Ergebnissen der Indiziermessungen. Stickstoffoxide entstehen in erster Linie aus Luftstickstoff bei hohen Verbrennungsspitzen, also bei schneller und heftiger Energiefreisetzung mit hohen Druckspitzen und Druckgradienten. Verläuft die Verbrennung dagegen sanfter, wie bei reduzierter Zündölmenge, nehmen die Stickstoffoxidemissionen ab, die Emissionen aus der unvollständigen Verbrennung (Kohlenmonoxid, Methan, Kohlenwasserstoffe) dagegen zu. Bei dem hier verwendeten Zündstrahlmotor ergeben sich zusätzlich Methanemissionen aus der Ventilüberschneidungsphase, während derer die Ein- und Auslassventile gleichzeitig geöffnet sind, wodurch unverbrannter Brennstoff ins Abgas strömen kann. Die Emissionen aus der Ventilüberschneidung sind prinzipiell unabhängig von der eingespritzten Zündölmenge und dem Einspritzzeitpunkt, da sie nicht aus der Verbrennung, sondern aus dem Ladungswechsel resultieren.

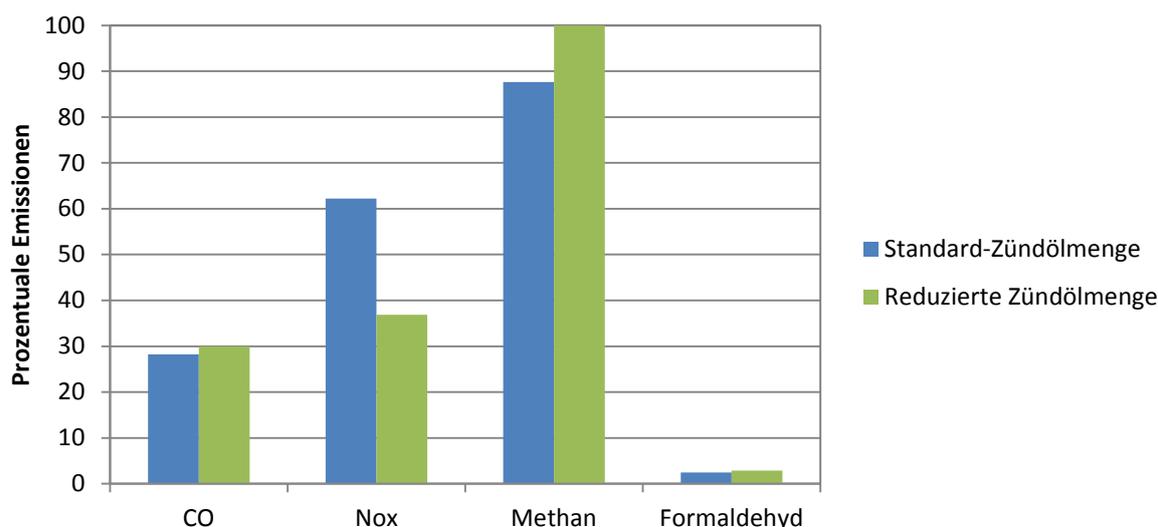


Abbildung 64: Abgasemissionen im Zündstrahlbetrieb in Abhängigkeit der Zündölmenge

9.6 Evaluierung des Betriebsverhaltens

Die Wartung der Anlage erfolgte im Rahmen eines Vollwartungsvertrags durch den Hersteller, der Fa. Burkhardt GmbH. Die Intervalle der Wartungen und die durchzuführenden Servicearbeiten wurden auf Basis von Erfahrungswerten des BHKW-Herstellers festgelegt. Da es während des Betrachtungszeitraumes zu keinen Ausfällen aufgrund defekter Komponen-

ten kam, kann das Wartungskonzept als zweckmäßig und ausreichend bewertet werden, um Schäden soweit möglich vorzubeugen und einen reibungslosen Betrieb des BHKWs zu gewährleisten. Eine große Wartung mit dem Austausch kritischer Motorkomponenten, wie z. B. Lagerschalen, Zylinderlaufbuchsen und Kolben ist vom Hersteller bei ca. 15.000 Betriebsstunden vorgesehen. Im Rahmen der Dauererprobung wurden etwa 2/3 dieses Zeitraums erfolgreich abgedeckt. Außerplanmäßig wurde vor Ablauf dieses Zeitraums der Zylinderkopf nach 6.639 Betriebsstunden gegen eine Ausführung mit Bohrungen für die Aufnahme von Drucksensoren für die Motorindizierung (vgl. Abschnitt 9.2.3) ausgetauscht. Dies war jedoch nicht aufgrund von Verschleiß, sondern für den Versuchsbetrieb erforderlich.

Die periodische Grundwartung erfolgte in einem Intervall von 504 Betriebsstunden bzw. 21 Tagen durchgeführt, dabei standen folgende Arbeiten auf dem Serviceplan:

- Motorölwechsel
- Motorölfilterwechsel
- Motorkraftstofffilterwechsel
- Kraftstofffilterwechsel im Kraftstoffschränk
- Überprüfung und Einstellung des Ventilspiels
- Überprüfung von Batterien, Abgasanlage und Kühlmittel
- Überprüfung des BHKW auf sichtbare Schäden

Zusätzlich wurde in regelmäßigen Abständen das Verdichtergehäuse des Turboladers von Ablagerungen gereinigt. Die Ablagerungen bilden sich als Folge der Rückführung von Blow-By-Gasen aus dem Kurbeltrieb in die Ansaugluft des Motors (Kurbelgehäuseentlüftung) und verschlechtern das Betriebsverhalten des Verdichters. Dies hat Auswirkungen auf den Ladedruck und die Zusammensetzung des Brennstoff-Luft-Gemisches und damit auf das Brennverhalten und den Wirkungsgrad des Motors. Da sich die Ablagerungen nicht vollständig vermeiden lassen, ist eine periodische Reinigung des Verdichtergehäuses erforderlich.

Gegenüber einem vergleichbaren Gas-Otto-Motor entstehen bei Zündstrahlmotoren zusätzliche Wartungskosten für das zweite Kraftstoffsystem, insbesondere für die Einspritztechnik (Filter, Injektoren, Hochdruckpumpe). Zwar müssen auch bei Gas-Otto-Motoren die Komponenten des Zündsystems (Zündkerzen) regelmäßig erneuert werden, jedoch sind die Kosten hierfür in der Regel geringer. Die untersuchte Pilotanlage ist mit einem Common-Rail-Einspritzsystem ausgestattet, das im Nutzfahrzeugbereich (Lkw) in großen Stückzahlen ein-

gesetzt wird, allerdings nicht speziell für BHKW-Anwendungen entwickelt wurde. Zusätzliche Servicearbeiten waren daher insbesondere am Einspritzsystem erforderlich:

- Wechsel der Common-Rail-Injektoren nach 3.700, 6.636 und 9.736 Betriebsstunden
- Austausch der Common-Rail-Einspritzpumpe nach 4.159 und 9.230 Betriebsstunden
- Wechsel der Druckrohrstutzen nach 6.639 Betriebsstunden

Verbesserungspotential besteht hier gegebenenfalls durch Optimierung der Einspritzkomponenten (z. B. Einsatz lebensdauererweiternde Beschichtungen) zur Verlängerung der Wartungsintervalle. Abzuwägen ist jedoch, ob der vergleichsweise hohe Entwicklungsaufwand hierfür im Hinblick auf die geringen Stückzahlen im BHKW-Markt gerechtfertigt ist, oder ob weiterhin auf einfach verfügbare Komponenten aus der Großserie zurückgegriffen wird, die dafür öfters ausgetauscht werden.

Weitere Wartungsarbeiten betrafen in erster Linie das System zur Wärmeauskopplung. Nach 6.800 Betriebsstunden wurde das Kühlwasser des Motors gewechselt. Da sich im Laufe der Zeit die thermische Leistung verringerte und die Soll-Abgastemperatur von 140 °C nach dem Abgaswärmetauscher nicht mehr erreicht werden konnte (siehe auch Kapitel 9.3.3) musste der Abgaswärmetauscher mehrmals manuell gereinigt werden. Die automatische Abreinigungseinrichtung über hydraulisch betätigte Stahlwendeln in den Abgasrohren des Wärmetauschers erwies dafür sich als zu schwach dimensioniert. Nach 9.072 Betriebsstunden wurden die Wendeln durch eine stabilere Ausführung ersetzt, die zuverlässiger funktionieren.

Während des gesamten Erprobungszeitraums wurden in regelmäßigen Abständen Schmierölproben gezogen und analysiert. Die Schmierölanalysen wurden von der Fa. OELCHECK GmbH durchgeführt. Unter anderem wurden Analysen des Metallgehalts im Schmieröl durchgeführt, um beispielsweise einen korrosiven oder abrasiven Verschleiß zu erkennen. In diesem Zusammenhang wurde ebenfalls der sogenannte PQ-Index „Particle Quantifier Index“ ermittelt, der eine Aussage über magnetisierbaren Eisenabrieb macht. Außerdem wurde die Basenzahl BN ermittelt um die Versäuerung des Schmieröls zu untersuchen. Je stärker die Basenzahl des gebrauchten Öls im Vergleich zum Frischöl abfällt, desto schlechter ist dessen Zustand einzuschätzen [Ölcheck2014]. Die Schmierölproben zeigten keinen außergewöhnlichen Verschleiß des Motors auf (vgl. Tabelle 13). Kurz nach Einbau des neuen Zylinderkopfs (6.639 Betriebsstunden), waren leicht erhöhte Verschleißwerte (Eisen, Chrom, Kupfer) zu erkennen, vermutlich aufgrund von Abrieb beim Einbau. Der PQ-Wert war zu keinem Zeitpunkt erhöht. Die Basenzahl fiel zwischen den Wechselintervallen ab, die alkalische Reserve des Motoröls wurde jedoch nie aufgebraucht, sodass keine kritischen Zustände erreicht wurden (BN stets > 0).

Tabelle 13: Ergebnisse der Schmierölanalysen

Betriebsstunden	Eisen	Chrom	Kupfer	Basenzahl BN	PQ-Index
[h]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mgKOH/g]	
Frischöl	1	0	0	10,05	OK
28	4	1	4		OK
101	7	1	5		OK
187	10	1	5		OK
323	14	1	6		OK
2397	3	0	0	9,23	OK
2494	5	1	0	8,36	OK
2655	10	2	1	7,25	OK
2725	12	2	1	6,56	OK
2799	13	2	1	5,93	OK
4160	17	4	1	5,88	OK
4923	7	1	1	7,98	OK
4600	13	3	1	5,71	OK
5042	4	0	0	8,45	OK
6002	20	1	1	5,98	OK
6937	44	10	3	6,78	OK
7405	6	0	1	9,24	OK
8769	9	0	1	7,25	OK
9230	11	0	1	7,1	OK
9709	7	1	1	6,38	OK
10207	6	0	0	6,92	OK

10 Verifizierung der Wirtschaftlichkeits- und Effizienzvorteile

10.1 Überprüfung der Wirtschaftlichkeit im Praxisbetrieb

Um die prognostizierten Wärmegestehungskosten für die betrachteten Szenarien (vgl. Kapitel 6.2) zu überprüfen, wurde die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für alle Szenarien mit den tatsächlichen Energieumsätzen aus der Erprobungsphase der Pilotanlage wiederholt. Als Betrachtungszeitraum wurde das Jahr 2013 gewählt. In diesem Zeitraum wurden folgende Energiemengen umgesetzt bzw. Nutzungsgrade erreicht:

- Bereitgestellter Strom: 1.277.273 kWh
- Bereitgestellte Wärme: 1.125.430 kWh
- Gasverbrauch: 2.850.763 kWh_{Hi}
- Zündölverbrauch: 24.481 kg
- Elektrischer Nutzungsgrad: 41,0 %
- Thermischer Nutzungsgrad: 36,1 %
- Gesamtnutzungsgrad: 77,1 %

Um einen direkten Vergleich zwischen Prognose und Ist-Werten zu ermöglichen, wurden lediglich die Betriebskosten betrachtet (Kosten für Brennstoff, Wartung und Hilfsstoffe abzüglich Einnahmen durch Stromverkauf bzw. Stromgutschrift). Alle weiteren Rahmenbedingungen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden unverändert übernommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 14 zusammengefasst.

Gegenüber der Prognose wurden in der Praxis etwas geringere Vollbenutzungsstunden erreicht, da das BHKW in der Dauererprobung wärmegeführt entsprechend des tatsächlichen Bedarfs betrieben wurde, der niedriger war als prognostiziert. Der elektrische Nutzungsgrad im Praxisbetrieb liegt erwartungsgemäß deutlich unter den Angaben nach ISO 3046 im Datenblatt (siehe auch Erläuterungen in Kapitel 2.6.2), aber nahe an den angegebenen Messwerten des Herstellers (vgl. Anhang 8). Dagegen weicht der thermische Nutzungsgrad deutlich von den Datenblattangaben ab (vgl. auch Kapitel 9.3.1 und 9.3.3), was auf den nicht optimalen Betrieb des Abgaswärmetauschers zurückzuführen ist. Etwas höher als prognostiziert ist der Zündölverbrauch. Hier ist jedoch zu beachten, dass im Zeitraum der Dauererprobung aufgrund des parallel laufenden Versuchsbetriebs häufigere An- und Abfahrvorgänge sowie Betriebsphasen mit 100 % Flüssigkraftstoff notwendig waren, weshalb der Zündölverbrauch im Durchschnitt höher war als im Regelbetrieb.

Mit den tatsächlich gemessenen Energieumsätzen ergeben sich etwas höhere Ausgaben bzw. geringere Einnahmen für den Betrieb des BHKWs und damit in Summe höhere Beträge für die Wärmegegestehungskosten als nach der Prognose. Dies ist auf die im Vergleich zu den Datenblattangaben geringeren elektrischen Nutzungsgrad und insbesondere den deutlich geringeren thermischen Nutzungsgrad zurückzuführen. Letzterer bedingt eine im Verhältnis zur Strombereitstellung geringere Wärmeauskopplung, was in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zu einem höheren Betrag der spezifischen Wärmegegestehungskosten pro kWh thermischer Energie führt, da die Bezugsbasis für die Berechnung (Summe der Kosten abzüglich Einnahmen dividiert durch bereitgestellte Wärmemenge) kleiner ist²¹.

Tabelle 14: Überprüfung der Wirtschaftlichkeitsprognose mit den tatsächlichen Energieumsätzen

	Prognose		Nachrechnung auf Basis der tatsächlichen Energieumsätze im Jahr 2013	
	Betriebskosten (ohne Kapitalkosten)	Wärmegegestehungskosten (nur Betrieb)	Betriebskosten (ohne Kapitalkosten)	Wärmegegestehungskosten (nur Betrieb)
Vollbenutzungsstunden	6.000 h		5.322 h	
Wirkungsgrad / Nutzungsgrad elektrisch	43,5 % (ISO 3046) 42,0 % (Messwert)		41,0 %	
Wirkungsgrad / Nutzungsgrad thermisch	43,5 % (ISO 3046) 42,0 % (Messwert)		36,1 %	
Bereitgestellte Strommenge	1.440.000 kWh		1.277.273 kWh	
Bereitgestellte Wärmemenge	1.440.000 kWh		1.125.430 kWh	
Brennstoffeinsatz Gas	3.070.345 kWh _{Hi}		2.850.763 kWh _{Hi}	
Brennstoffeinsatz Zündöl	24.000 kg (4,0 kg/h)		24.481 kg (4,6 kg/h)	
	Betriebskosten (ohne Kapitalkosten)	Wärmegegestehungskosten (nur Betrieb)	Betriebskosten (ohne Kapitalkosten)	Wärmegegestehungskosten (nur Betrieb)
Erdgasbetrieb 100 % Stromeinspeisung	91.449 €	6,35 Ct/kWh	85.052 €	7,56 Ct/kWh
Erdgasbetrieb 100 % Strom-eigennutzung 0 % EEG-Umlage	-78.356 €	-5,44 Ct/kWh	-65.564 €	-5,83 Ct/kWh
Erdgasbetrieb 100 % Strom-eigennutzung 40 % EEG-Umlage	-42.414 €	-2,95 Ct/kWh	-33.683 €	-2,99 Ct/kWh
Biomethanbetrieb nach EEG 2012, Zündöl Rapsöl	42.969 €	2,98 Ct/kWh	47.215 €	4,20 Ct/kWh
Biomethanbetrieb nach EEG 2014, Zündöl Rapsöl	144.266 €	10,02 Ct/kWh	140.456 €	12,48 Ct/kWh

²¹ Dies gilt sowohl für positive als auch negative Werte. In beiden Fällen steigt bei geringerer ausgekoppelter Wärmemenge (Bezugsbasis) der Betrag der Wärmegegestehungskosten. Für einen qualifizierten Vergleich sind daher neben den spezifischen Wärmegegestehungskosten auch die Absolutwerte der Betriebskosten entscheidend.

10.2 Vergleich der Praxis-Wirkungsgrade mit Gas-Otto-BHKW

Ein wesentlicher Punkt bei der Beurteilung der Zündstrahl-Technologie im Vergleich mit elektrisch hocheffizienten Gas-Otto-BHKW ist die Frage, inwiefern letztere die angegeben hohen Wirkungsgrade in der Praxis tatsächlich erreichen. Um dies zu untersuchen, wurde im Rahmen des Projekts eine vergleichende Praxismessung an einer BHKW-Anlage mit Gas-Otto-Motor der neuesten Generation durchgeführt, die laut Datenblatt einen elektrischen Wirkungsgrad $> 42\%$ (Leistungs- und Verbrauchsangaben nach DIN ISO 3046-1) erreicht.

Abbildung 65 zeigt die Ergebnisse der Messung am Gas-Otto-BHKW im Vergleich mit den Datenblattangaben und den tatsächlich gemessenen Wirkungsgraden der Zündstrahl-BHKW-Pilotanlage. Die elektrischen Wirkungsgrade beider Anlagen liegen in der Praxis innerhalb der zulässigen Toleranz von 5 % des Brennstoffverbrauchs. Das Zündstrahl-BHKW weist weiterhin leichte Vorteile auf, ist jedoch gegenüber der aktuellen Gas-Otto-Motortechnologie nicht mehr so überlegen, wie es noch zu Projektbeginn im Jahr 2012 der Fall war.

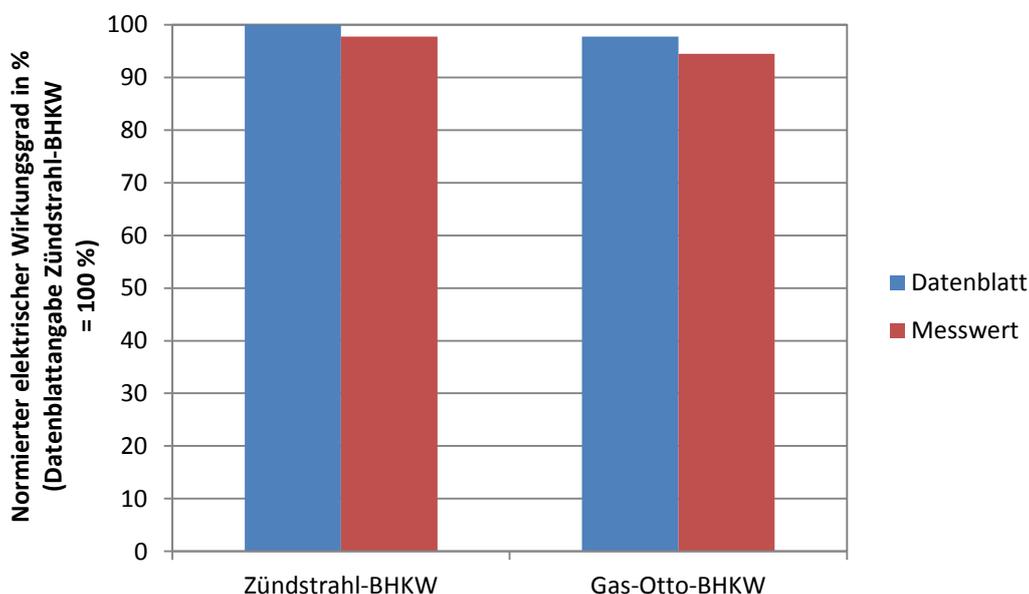


Abbildung 65: Vergleich der elektrischen Wirkungsgrade im Praxisbetrieb

11 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens „Identifikation von Einsatzmöglichkeiten und Potentialen der Zündstrahltechnologie zur Verbesserung der Anlageneffizienz und Wirtschaftlichkeit von BHKW-Anlagen mit experimenteller Überprüfung der Vorteile an einer Pilotanlage unter realen Bedingungen im Praxisbetrieb“ war es, die potentiellen Vorteile der Zündstrahltechnologie für BHKW-Anwendungen gegenüber Gas-Otto-Motoren herauszuarbeiten und unter realen Bedingungen an einer Pilotanlage zu überprüfen und auf ihre Praxistauglichkeit hin zu untersuchen. Der Fokus lag auf Blockheizkraftwerken im elektrischen Leistungsbereich von ca. $> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis etwa 1 MW_{el} , der insbesondere für die Versorgung industrieller und öffentlicher Liegenschaften von Interesse ist und in dem zu Projektbeginn (2012) noch keine Zündstrahlaggregate für den Erdgasbetrieb auf dem Markt verfügbar waren. Betrachtet wurde im Rahmen des Projekts ausschließlich der Betrieb am Erdgasnetz, da hier einerseits das größte Wachstum prognostiziert wird [DLR IWES IFNE2012] und andererseits die Zündstrahltechnologie für Schwachgase (Biogas, Holzgas) bereits erfolgreich am Markt etabliert ist und keine Neuheit mehr darstellt. Als Industriepartner für die Errichtung der Pilotanlage konnte die Fa. Burkhardt GmbH für das Projekt gewonnen werden, ein mittelständischer Hersteller von BHKW-Modulen im Leistungsbereich von ca. $150 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis $300 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Die KWK-Stromerzeugung in Deutschland erfolgt zum heutigen Stand überwiegend aus leitungsgebundenen (Erdgas, Biomethan) und nicht-leitungsgebundenen (Biogas, Klärgas, Deponiegas) gasförmigen Energieträgern. In der Leistungsklasse bis 1 MW_{el} werden dabei in erster Linie Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto-Motoren zur Strom- und Wärmebereitstellung eingesetzt. Als erfolgreiche Alternative haben sich v. a. im preissensitiven Biogasbereich Zündstrahlmotoren etablieren können, die höhere elektrische Wirkungsgrade erreichen als Gas-Otto-Motoren, jedoch für den Betrieb einen zweiten Kraftstoff, das sogenannten Zündöl, benötigen. Für Erdgas-Anwendungen werden Zündstrahlmotoren dagegen bisher kaum eingesetzt. Ein Grund hierfür dürften die in der Vergangenheit vergleichsweise geringen Brennstoffpreise und Stromvergütungen in diesem Markt gewesen sein, die den technologischen Aufwand für die Installation von Zündstrahl-Aggregaten nicht gerechtfertigt haben. Mit steigenden Brennstoffpreisen und zunehmendem Wert der elektrischen Energie nimmt die Bedeutung des elektrischen Wirkungsgrads jedoch auch bei BHKW-Anlagen mit Anschluss ans Erdgasnetz zu, was den Einsatz von Zündstrahlmotoren interessant macht.

Der im Rahmen des Projekts untersuchte Leistungsbereich $> 50 \text{ kW}_{\text{el}}$ bis etwa 1 MW_{el} ist von besonderem Interesse für die Zündstrahl-Technologie, da hier eine Vielzahl von Einsatzmög-

lichkeiten im kommunalen und industriellen Bereich (Krankenhäuser, Verwaltungsgebäude, Schwimmbäder, Schulen, Nahwärmenetze, Prozesswärmebereitstellung,...) existiert, bei denen große Energiemengen umgesetzt werden. Ausgehend von den durch das BAFA veröffentlichten Daten wurden in den Jahren 2009 bis 2013 in diesem Leistungsbereich etwa 1.820 KWK-Anlagen mit einer kumulierten Leistung von 440 MW_{el} neu zugelassen (fossil betriebene KWK-Anlagen) [BAFA2014].

Bisher sind Zündstrahl-BHKW jedoch nur für Biogas-Anwendungen in nennenswertem Umfang am Markt vertreten. Legt man Analysen der Zeitschrift Energie & Management [E&M2011, E&M2012, E&M2013] zugrunde, kann unter den befragten BHKW-Herstellern von einem Marktanteil der Zündstrahltechnologie am gesamten BHKW-Markt (alle Brennstoffe) von ca. 9 % im Jahr 2009 und ca. 13 % in den Jahren 2010 und 2011, jeweils bezogen auf die verkaufte Anlagenleistung, ausgegangen werden. 2012 erfolgte ein Einbruch auf 5 % Marktanteil, der in diesem Fall jedoch nicht technologiebedingt ist, sondern auf die Verschlechterung der Förderbedingungen für Biogasanlagen durch das EEG 2012 zurückzuführen ist.

Eine Abschätzung, welche Brennstoff-, CO₂- und Kosteneinsparungen durch die Zündstrahl-Technologie bundesweit realisierbar wären, ist auf Basis verfügbaren statistischen Daten nur ansatzweise möglich. Um dennoch zumindest näherungsweise das ökonomische und ökologische Einsparpotential der Zündstrahltechnologie im Markt für Erdgas-BHKW abschätzen zu können, wurde ausgehend von der zwischen 2009 und 2013 jährlich neu beim BAFA gemeldeten KWK-Anlagenleistung eine Modellrechnung erstellt. In Summe wären unter den dabei angenommenen Randbedingungen bei einem Marktanteil der Zündstrahltechnologie von 10 % in den Jahren 2009 bis 2013 bis zu 37.000 MWh Brennstoff und 12.600 Tonnen CO₂ eingespart worden. Im selben Zeitraum hätten in Summe ca. 2,09 Millionen Euro an Brennstoffkosten eingespart werden können.

Im Vergleich mit dem aktuellen Stand der Technik wies die Zündstrahl-Technologie zu Beginn des Projekts im Jahr 2012 in Bezug auf die elektrischen Wirkungsgrade ein Alleistungsmerkmal auf dem BHKW-Markt auf. Mittlerweile (Stand 2014) drängen zunehmend elektrisch hocheffiziente Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto-Motoren auf den Markt, die ähnlich hohe Wirkungsgrade erreichen. Besondere Merkmale dieser hocheffizienten Gasmotoren sind u. a. ein hohes Verdichtungsverhältnis sowie hoch belastbare und verbrennungstechnisch optimierte Stahlkolben anstelle der bisher oft eingesetzten Aluminiumkolben. Weiterhin verfügen die Motoren in der Regel über 4-Ventiltechnologie für einen optimierten Gaswechsel und hocheffiziente Aufladegruppen. Im Vergleich dazu befindet sich die technologische Entwicklung von Zündstrahlaggregaten für Erdgas-Anwendungen noch in der Anfangs-

phase, sodass, entsprechende Forschung und Entwicklung vorausgesetzt, in den nächsten Jahren weitere Effizienz- und Kostenvorteile erschlossen werden können. Potential zur Weiterentwicklung besteht insbesondere beim Ladungswechsel (Steuerzeiten, Aufladegruppe) sowie bei der Optimierung von Kolbengeometrie und Brennraum.

Eine weitere Effizienzsteigerung von Zündstrahlmotoren ist durch die sogenannte Abgasnachverstromung mittels einer nachgeschalteten Abgasturbine möglich (Turbocompound-Prinzip). Dabei wird dem eigentlichen Turbolader eine zweite Nutzturbine nachgeschaltet, über die das heiße Abgas vor Eintritt in den Abgaswärmetauscher nochmals entspannt wird. In einem vorangegangenen Forschungsvorhaben der Technischen Hochschule Amberg-Weiden wurde für die Abgasturbinentechnologie ein Potential zur Effizienzsteigerung von ca. 4 bis 5 Prozentpunkten nachgewiesen [BrautschLechner2010]. Mittlerweile wurde die Technologie von verschiedenen Herstellern von Zündstrahlmotoren in die Serie überführt. Diese Aggregate erreichen in der Leistungsklasse von ca. 250 kW_{el} sehr hohe elektrische Systemwirkungsgrade von bis zu 46 % [Schnell2014]. Demgegenüber gestaltet sich bei Gas-Otto-Motoren die Abgasnachverstromung mittels Abgasturbinen technologisch anspruchsvoller, sodass hier noch keine entsprechenden Aggregate serienmäßig verfügbar sind. Besser geeignet für Gas-Otto-Motoren sind Nachverstromungstechnologien die lediglich die Abgaswärme nutzen und keinen Eingriff in den Motorprozess erfordern, wie z. B. Organic-Rankine-Cycle Anlagen (ORC) oder Dampfkraftanlagen. Diese Systeme lassen sich jedoch bei dem heutigen Stand in der Regel erst bei größeren BHKW-Anlagen wirtschaftlich umsetzen (BHKW ab ca. 500 kW elektrischer Leistung). Im Bereich Abwärmeverstromung sind daher derzeit noch Vorteile für die Zündstrahl-Technologie zu verzeichnen.

Zur Abschätzung des wirtschaftlichen Potentials der Zündstrahltechnologie wurden Modellrechnungen (Vollkostenrechnung und Sensitivitätsanalyse) für verschiedene Szenarien durchgeführt. Die betrachteten Szenarien umfassen den Betrieb nach Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz mit Stromeinspeisung und Stromeigennutzung sowie den Betrieb nach dem Erneuerbare-Energie-Gesetz mit Biomethan. Für Anwendungen mit geringer Stromgutschrift (Erdgasbetrieb nach KWKG mit 100 % Stromeinspeisung) schneiden einfache Gas-Otto-BHKW mit geringem elektrischem Wirkungsgrad und hoher Wärmeauskopplung am besten ab. Demgegenüber ist die Zündstrahltechnologie v. a. in Szenarien mit hoher Stromgutschrift (Erdgasbetrieb nach KWKG mit 100 % Stromeigennutzung und Biomethanbetrieb nach EEG) im Vorteil, kann sich jedoch nicht von den in den letzten Jahren neu auf den Markt gekommenen hocheffizienten Gas-Otto-BHKW absetzen. Auf Basis der Modellrechnungen lässt sich ableiten, dass Zündstrahl-BHKW immer dann interessant werden, wenn die elektrische Effizienz eine herausragende Rolle spielt, d. h. wenn die Stromgutschriften

und/oder die Brennstoffkosten hoch sind. Dies ist der Fall wenn der erzeugte Strom vollständig selbst genutzt werden kann (Einsparung von Stromeinkauf aus dem öffentlichen Netz) oder hoch vergütet wird (Einspeisung nach EEG), oder wenn teure regenerative Brennstoffe (Biomethan) eingesetzt werden. Dennoch dürften Blockheizkraftwerke mit Gas-Otto-Motoren aufgrund der einfacheren Handhabung (kein zweites Kraftstoffsystem, einfachere Abgasreinigung) für die breite Masse der Anwendungen die bevorzugte Technologie darstellen, während die Zündstrahl-Technologie v. a. in speziellen Nischen ihr Potential entfaltet.

Dies sind in erster Linie Anwendungen bei denen maximale Brennstoff- und Betriebsflexibilität gefordert ist, beispielsweise auf Grundlage von § 14b des Energiewirtschaftsgesetzes, der es Netzbetreibern ermöglicht, im Rahmen von Gaslieferverträgen mit Abschaltvereinbarung geringere Netzentgelte anzubieten [EnWG2005]. Dadurch können Kunden, die eine Unterbrechung der Gasversorgung bei drohenden Engpässen akzeptieren, günstigere Lieferkonditionen aushandeln und einen wirtschaftlichen Vorteil generieren. Dies erfordert jedoch ein Energieversorgungssystem, das auch bei Abschaltung der Gasversorgung mit einem zweiten (Flüssig)brennstoff weiterbetrieben werden kann. Üblicherweise beschränkt sich dies heutzutage auf die Wärmeversorgung (Zweistoffbrenner für Erdgas/Heizöl), mit Zündstrahlaggregaten könnte darüber hinaus bei Unterbrechung der Gasversorgung künftig auch die elektrische Eigenenergieerzeugung sichergestellt werden. Ein weiteres interessantes Einsatzfeld für die Zündstrahltechnologie stellt die Bereitstellung elektrischer Regelenergie (z. B. negative Sekundärregelleistung) dar. Aufgrund der hohen Zündenergie, die durch die Zündstrahl-Einspritzung eingebracht wird, kann ein stabiler Betrieb bei unterschiedlichsten Lastzuständen gewährleistet werden. So kann die im Rahmen des Projekts betrachtete Pilotanlage bis auf etwa 25 % der Nennleistung abgeregelt werden, während vergleichbare hocheffiziente Gas-Otto-Motoren in vielen Fällen lediglich für eine Abregelung bis auf etwa 50 % der Nennleistung freigegeben sind.

Ökologisch betrachtet konnten auf Basis von Modellrechnungen zu Primärenergieeinsparung und CO₂-Emissionen für die Zündstrahltechnologie weder besondere Vorteile noch Nachteile gegenüber Gas-Otto-Motoren festgestellt werden. Betrachtet man die Primärenergieeinsparung nach Richtlinie 2012/27/EU, so ergeben sich für die Zündstrahltechnologie ähnlich gute Werte wie für die besten Gas-Otto-Motoren. Gleiches gilt für die spezifischen CO₂-Emissionen für die Koppelprodukte Strom und Wärme. Die CO₂-Einsparung aufgrund des höheren elektrischen Wirkungsgrads von Zündstrahlaggregaten wird zumindest teilweise durch die höheren spezifischen CO₂-Emissionen des Zündkraftstoffs wieder kompensiert, sodass sich in Summe keine wesentlichen Vorteile gegenüber hocheffizienten Gas-Otto-Motoren ergeben.

In der experimentellen Überprüfung an einer Pilotanlage mit einer Auslegungsleistung von 240 kW_{el} konnten die prognostizierten Wirkungsgradvorteile der Zündstrahltechnologie bestätigt werden. Die untersuchte Pilotanlage erreichte in der Praxis elektrische Wirkungsgrade bis zu 42,5 % und Gesamtwirkungsgrade bis knapp über 80 %. Der in der Dauerprobung ermittelte elektrische Netto-Nutzungsgrad nach Abzug des Stromeigenverbrauchs betrug etwa 40,9 %. Insgesamt als hoch zu bewerten ist dagegen das Niveau der Rohabgasemissionen (vor Katalysator) der Pilotanlage. Aufgrund des wirkungsgradoptimierten und vom Dieselmotor abgeleiteten Brennverfahrens betrifft dies insbesondere die Stickstoffoxid-Emissionen. Durch innermotorische Maßnahmen (Regelung des Einspritzzeitpunkts) konnte bei der Pilotanlage ein praxistauglicher Wert von 2.500 mg/m³ NO_x bei noch guten elektrischen Wirkungsgraden von > 42 % erreicht werden. Eine weitergehende Verringerung der NO_x-Emissionen auf das Niveau der TA Luft (1.000 mg/m³) erfordert eine Abgasreinigung mittels SCR-Katalysator. Vergleichsweise hoch sind auch die Emissionen an Kohlenmonoxid im Rohabgas, die jedoch durch einen Oxidationskatalysator auf den in der TA Luft geforderten Wert < 300 mg/m³ verringert werden konnten. Nur eingeschränkt wirksam erwies sich der verwendete Katalysator dagegen in Bezug auf die Formaldehyd-Emissionen (Leitkomponente für Kohlenwasserstoff-Emissionen). Zudem war im Dauerbetrieb ein deutliches Nachlassen der Katalysator-Aktivität festzustellen. Der Emissionsproblematik wurde mittlerweile durch die Entwicklung leistungsfähigerer und größer dimensionierter Abgasnachbehandlungssysteme durch den Hersteller der Pilotanlage Rechnung getragen. Insgesamt bestätigen die Messreihen die hohe elektrische Effizienz der Zündstrahl-Technologie auch unter Praxisbedingungen, zeigen jedoch noch Optimierungspotential in der verbrennungstechnischen Feinabstimmung und im Bereich der Abgasemissionen.

Als unproblematisch erwies sich das Betriebsverhalten der Pilotanlage. Bis auf die Stillstandszeiten für regelmäßige Wartungsarbeiten und Umbauten im Zuge des Versuchsbetriebs waren im Zeitraum der Dauerprobung über knapp 10.000 Betriebsstunden keine größeren Ausfälle zu verzeichnen. Der vom Hersteller aufgestellte Wartungsplan erwies sich als zweckmäßig und ausreichend um einen reibungslosen Anlagenbetrieb zu gewährleisten. Auftretende Probleme z. B. im Bereich des Abgaswärmetauschers waren auf die spezielle Ausführung der Versuchsanlage zurückzuführen und sind nicht auf die Zündstrahl-Technologie als solche verallgemeinerbar. Eine große Wartung mit dem Austausch kritischen Motorkomponenten, wie z. B. der Lagerschalen ist vom Hersteller bei ca. 15.000 Betriebsstunden vorgesehen. Im Rahmen der Dauererprobung wurden etwa 2/3 dieses Zeitraums erfolgreich abgedeckt, sodass die Technologie als praxistauglich bewertet werden kann.

Gegenüber einem vergleichbaren Gas-Otto-Motor entstehen bei Zündstrahlmotoren zusätzliche Wartungskosten für das zweite Kraftstoffsystem, insbesondere für die Einspritztechnik (Filter, Injektoren, Hochdruckpumpe). Zwar müssen auch bei Gas-Otto-Motoren die Komponenten des Zündsystems (Zündkerzen) regelmäßig erneuert werden, jedoch sind die Kosten hierfür in der Regel geringer. Die untersuchte Pilotanlage ist mit einem Common-Rail-Einspritzsystem ausgestattet, das im Nutzfahrzeugbereich (Lkw) in großen Stückzahlen eingesetzt wird, allerdings nicht speziell für BHKW-Anwendungen entwickelt wurde. Verbesserungspotential besteht hier gegebenenfalls in der Verlängerung der Wartungsintervalle für die Einspritzkomponenten, z. B. durch lebensdauererweiternde Beschichtungen. Abzuwägen ist jedoch, ob der vergleichsweise hohe Entwicklungsaufwand hierfür im Hinblick auf die geringen Stückzahlen im BHKW-Markt gerechtfertigt ist, oder ob weiterhin auf einfach verfügbare Komponenten aus der Großserie zurückgegriffen wird, die dafür öfters ausgetauscht werden.

In der Dauererprobung konnten die Wirtschaftlichkeitsprognosen mit tatsächlichen Daten aus dem Praxisbetrieb bestätigt werden. Allerdings stellen die hohen elektrischen Wirkungsgrade der Zündstrahl-Technologie, anders als zu Projektbeginn im Jahr 2012, kein Alleinstellungsmerkmal mehr dar, da in der betrachteten Leistungsklasse mittlerweile auch erste Gas-Otto-BHKW mit sehr hohen elektrischen Wirkungsgraden von deutlich über 40 % auf den Markt drängen. Dass diese Wirkungsgrade auch bei Gas-Otto-BKHW in der Praxis tatsächlich erreicht werden, konnte im Rahmen einer Vergleichsmessung an einem Gas-Otto-BHKW mit aktueller Motorentechnologie nachgewiesen werden. Das untersuchte Zündstrahl-BHKW weist zwar weiterhin den etwas höheren gemessenen elektrischen Wirkungsgrad auf, ist jedoch gegenüber der aktuellen Gas-Otto-Motortechnologie nicht mehr so überlegen, wie es noch zu Projektbeginn im Jahr 2012 der Fall war.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Entwicklung von Zündstrahlaggregaten für Erdgas-Anwendungen im Vergleich zur Entwicklung bei den Gas-Otto-Motoren noch in der Anfangsphase ist, sodass, entsprechende Marktnachfrage sowie Forschung und Entwicklung vorausgesetzt, in den nächsten Jahren weitere Effizienz- und Kostenvorteile sowie die Erschließung neuer Einsatzfelder zu erwarten sind. Stellvertretend seien hier die Erhöhung des Stromertrages mittels Abgasnachverstromung, die Optimierung des Emissionsverhaltens und die Entwicklung optimierter Betriebsstrategien unter Ausnutzung der spezifischen Vorteile der Technologie (Brennstoff- und Betriebsflexibilität) genannt. Ein verstärkter Einsatz der Zündstrahl-Technologie ist v. a. dann zu erwarten wenn einerseits hohe Brennstoffkosten und/oder hohe erzielbare Stromgutschriften die Marktnachfrage nach hocheffizienten Aggregaten erhöhen und gleichzeitig maximale Brennstoff- und Betriebsflexibilität gefordert ist.

Quellenangaben

- [ASUE2014] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.): BHKW-Kenndaten 2014/2015. Essen, energiedruck, 2014.
- [AGFW FW308] AGFW- Arbeitsblatt FW 308 -Zertifizierung von KWK-Anlagen- Ermittlung des KWK-Stromes; Internetseite www.agfw.de; Abfrage 16.05.2014
- [BAFA2014] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Zulassung von KWK-Anlagen nach dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) Stand: 20.02.2014; Internetseite www.bafa.de Abfrage am 16.05.2014
- [BHKW2012] Internetseite: www.bhkw.de, Abfrage: 03.06.2012
- [BMWi2014] Internetseite:
<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Erneuerbare-Energien/eeg-reform.html>, Abfrage: 30.06.2014
- [Bioenergie2012] Internetseite: www.bioenergie-portal.info; Abfrage 30.04.2012; CORELL, Jean: Biogasanlagentechnik und Substrate
- [Bosch2004] ROBERT BOSCH GmbH (Hrsg.): Dieselmotor-Management; 4. Aufl.; Wiesbaden; Vieweg & Sohn Verlag; 2004; ISBN 3-528-23873-9
- [BrautschLechner2012] BRAUTSCH, Markus; LECHNER, Raphael; SCHWEMMER, Andreas; LINDNER, Christian: Emissionsminderung bei pflanzenölbetriebenen Blockheizkraftwerken. Forschungsbericht Hochschule Amberg-Weiden. Oktober 2012, S. 65 – 73
- [BrautschLechner2010] BRAUTSCH, Markus; LECHNER, Raphael: Abgasturbine für Blockheizkraftwerke. Forschungsbericht Hochschule Amberg-Weiden. Dezember 2010, S. 36 – 37
- [DIN ISO 3046-1] DIN ISO 3046-1: Reciprocating internal combustion engines – Performance – Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods – Additional requirements for engines for general use – Fifth Edition 2002-05-01

- [DIN 51603-1] DIN 51603-1: Flüssige Brennstoffe – Heizöle- Teil 1: Heizöl EL – Mindestanforderungen. September 2003.
- [DIN 51605] DIN 51605: Kraftstoff für pflanzenöлтаugliche Motoren – Rapsölkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren. September 2010.
- [DLR IWES IFNE2012] Arbeitsgemeinschaft: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global – Schlussbericht; 2012
- [E&M2011] Energie und Management (Hrsg.), MÜHLSTEIN, Jan: Rang und Namen; 15.11.2011
- [E&M2012] Energie und Management (Hrsg.), MÜHLSTEIN, Jan: BHKW-Ranking: Wellenreiten; 01.11.2013
- [E&M2013] Energie und Management (Hrsg.), MÜHLSTEIN, Jan: BHKW-Ranking: Erdgas vor Biogas; 15.11.2014
- [EEG2012] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 17. August 2012 (BGBl. I S. 1754) geändert worden ist
- [EEG2014] Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2406) geändert worden ist
- [EnergieStG] Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660, 1007), das zuletzt durch Artikel 11 des Gesetzes vom 18. Juli 2014 (BGBl. I S. 1042) geändert worden ist
- [Eichlseder2008] EICHLSEDER, Helmut; KLÜTING, Manfred; PIOCK, Walter: Grundlagen und Technologien des Ottomotors. Wien, Springer, 2008. ISBN 978-3-211-25774-6
- [EnWG2005] Energiewirtschaftsgesetz vom 7. Juli 2005 (BGBl. I S. 1970, 3621), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist

- [Erdgas2012] Internetseite: www.erdgas.info, Abfrage am 18.04.2012
- [Ferngas2014] Internetseite: www.open-grid-regional.com; Abfrage: 16.05.2014
- [FNR2005] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (Hrsg.): Basisdaten Biogas Deutschland Stand: März 2005
- [Friedrichs2002] FRIEDRICHS, Gregor: Abrechnung bei wechselnden Gasbeschaffungen – eine vergleichende Darstellung zwischen Deutschland, den Niederlanden und Großbritannien. gwf Das Gas- und Wasserfach, Gas – Erdgas. Jg. 143, Nr. 1, 2002, S. 23-29
- [Gaswärme2012] Internetseite: www.gaswaerme.at, Abfrage am 27.04.2012
- [Gerigk1987] GERIGK, Peter, et.al.: Kraftfahrzeugtechnik; 1. Aufl.; Braunschweig; Westermann Schulbuchverlag; 1987; ISBN 3-14-201500-0
- [Grohe2003] GROHE, Heinz: Otto- und Dieselmotoren; 13. Aufl.; Würzburg; Vogel Verlag und Druck; 2003; ISBN 3-802-319737
- [Grünig2010] GRÜNIG, Gerhard: Zündstrahlmotoren – Effiziente Verbrennung von Biogas und Schachgasen in Blockheizkraftwerken; 1. Aufl. München; Süddeutscher Verlag onpact GmbH; 2010; ISBN 978-3-86236-008-6
- [IÜNB2014] Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber; Internetseite: www.netztransparenz.de; Abfrage am 16.05.2014
- [Kaltschmitt2009] KALTSCHMITT, Martin; HARTMANN, Hans; HOFBAUER, Hermann (Hrsg.): Energie aus Biomasse. 2. Aufl., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2009. ISBN 978-3-540-85094-6
- [KWKG2009] Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vom 19. März 2002 (BGBl. I S. 1092), das zuletzt durch Artikel 13 des Gesetzes vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066) geändert worden ist
- [Mauch2012] MAUCH, W. et.al.: Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 55, Heft 9, 2010

- [Merker2009] MERKER, Günter; SCHWARZ, Christian (Hrsg.): Grundlagen Verbrennungsmotoren. 4. Aufl., Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2009. ISBN 978-3-8348-0740-3
- [Öko-Institut2011] Öko-Institut e.V.: Monitoring der Kraft-Wärme-Kopplungs-Vereinbarung vom 19. Dezember 2003 für den Teilbereich Kraft-Wärme-Kopplung Berichtszeitraum 2009 (Dritter Bericht); 2011
- [Ölcheck2014] Internetseite: www.oelcheck.de ; Abfrage: 16.05.2014
- [Prognos2011] WÜNSCH, Marco; SEEFELDT, Friedrich; MELLAHN, Stefan; RITS, Vincent; PIÉGSA, Dr. Alexander; WETZEL, Anton; DITTMANN, Dr. Lutz: Endbericht - Zwischenüberprüfung zum Gesetz zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung, 2011
- [Reif2014] REIF, Konrad (Hrsg.): Ottomotor-Management. 4. Aufl., Wiesbaden, Spring Vieweg, 2014. ISBN 978-3-8348-1416-6
- [Schnell2014] Schnell Motoren AG (Hrsg.): Produktübersicht Hocheffiziente Blockheizkraftwerke – Zündstrahl- und BlueRail-Technologie. November 2014.
- [TA Luft] Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) vom 24. Juli 2002
- [Sutor2009] SUTTOR, Wolfgang: Blockheizkraftwerke – Ein Leitfaden für Anwender. Karlsruhe, 2009.
- [VDI 4660] VDI 4660, Bl.2: *Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energiewandlung*. Mai 2003
- [VDI 4680] VDI 4680: *Blockheizkraftwerke (BHKW) - Grundsätze für die Gestaltung von Serviceverträgen*. April 2011

Anhang 1: Wichtige Vergütungsregelungen für Strom aus Biomasse nach EEG 2009 und EEG 2012

	Vergütung EEG 2009 in Ct/kWh Jährliche Degression 1,0 %			Vergütung EEG 2012 in Ct/kWh Jährliche Degression 2,0 %		
	150 kW	500 kW	5.000 kW	150 kW	500 kW	5.000 kW
Grundvergütung	11,67	9,18	8,25	14,3	12,3	11,0
NawaRo-Bonus	500 kW	5.000 kW		-		
	6,00	4,00				
NawaRo-Bonus Biogas	500 kW	5.000 kW		-		
	7,00	4,00				
KWK-Bonus	3,00			-		
Technologie-Bonus	2,00			-		
Formaldehyd-Bonus Biogas (Formaldehyd < 60 mg/m ³)	1,00			-		
Gülle-Bonus Biogas (mind. 30 % Gülleinsatz)	150 kW	500 kW		-		
	4,00	1,00				
Landschaftspflege-Bonus Biogas bis 500 kW	2,00			-		
Gasaufbereitungs-Bonus Biomethan	350 m ³ /h	700 m ³ /h		700 m ³ /h	1.000 m ³ /h	1.400 m ³ /h
	2,00	1,00		3,00	2,00	1,00
Bonus Einsatzstoffklasse I	-			150 kW	750 kW	5.000 kW
				6,00	5,00	4,00
Bonus Einsatzstoffklasse II bis 5.000 kW	-			8,00		
Bonus Einsatzstoffklasse II Gülle	-			500 kW	5.000 kW	
				8,00	6,00	

Anhang 2: Zuschläge nach KWKG in Cent/kWh (Novelle 2012)

	< 50 kW	> 50 kW < 250 kW	> 250 kW < 2000 kW	< 2000 kW	Anspruchszeitraum
Kleine KWK-Anlagen < 50 kW ¹	5,41	-	-	-	10 Jahre oder wahlweise 30.000 h
Kleine KWK-Anlagen > 50 kW ¹	5,41	4,0	2,4	-	30.000 h
Hocheffiziente Neuanlagen	5,41	4,0	2,4	1,8	30.000 h
Modernisierte hocheffiziente KWK-Anlagen < 50 kW	5,41	-	-	-	5 Jahre oder wahlweise 15.000 h 10 Jahre oder wahlweise 30.000 h ²
Modernisierte hocheffiziente KWK-Anlagen > 50 kW	5,41	4,0	2,4	1,8	15.000 h 30.000 h ²

¹: nach § 3 KWKG werden Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von bis zu 2 MW als kleine KWK-Anlagen definiert; mehrere unmittelbar miteinander verbundene kleine KWK-Anlagen an einem Standort gelten als eine KWK-Anlage, soweit sie innerhalb von zwölf aufeinanderfolgende Kalendermonaten in Dauerbetrieb genommen worden sind

²: wenn die Kosten der Erneuerung min. 50% der Kosten für die Neuerrichtung der KWK-Anlage betragen

Anhang 3: Festgelegte Exponenten zur Leistungsbestimmung nach DIN ISO 3046-1

Motorenart	Motorenausführung		Faktor	Exponent		
			α	m	n	q
Dieselmotoren und Diesel-/Gasmotoren	Nicht aufgeladene Motoren	Leistungsbegrenzung durch Luftüberschuss	1	1	0,75	0
		Leistungsbegrenzung aus therm. Gründen	0	1	1	0
	Auflademotoren ohne Ladeluftkühler	Langsam- und mittel-schnell-laufende 4-Taktmotoren	0	0,7	2	0
	Auflademotoren mit Ladeluftkühler		0	0,7	1,2	1
Gasmotoren	Nicht aufgeladene Motoren		1	0,86	0,55	0
	Auflademotoren mit Ladeluftkühler	Langsam- und mittel-schnell-laufende 4-Taktmotoren mit Fremdzündung	0	0,57	0,55	0
Benzinmotoren	Saugmotoren		1	1	0,5	0

Anhang 4: Jährl. abgesetzte BHKW in Deutschland nach Leistung

Daten aus der Fachzeitsung „Energie und Management“ [E&M2011, E&M2012, E&M2013]

Unternehmen	2009	2010	2011	2012	Prognose 2013
	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]	[kW]
MWM	151570	190631	279923	234036	179195
Schnell	44245	99495	149645	37249	101375
2GEnergietechnik	47479	94805	183740	104958	98388
Seva Energie	37544	67593	72078	27973	28712
MTU Onsite Energy	46235	66436	199846	80351	97000
Zeppelin	34250	37620	27670	29930	30000
SES	23272	25900	18970	10381	10720
ETW Energietechnik	17444	23274	29667	34085	41000
AGO		16120	15613	40450	30000
Sokratherm	10808	15100	13944	11980	17800
Bosch KWK-Systeme	4319	13099	21605	26940	34300
Pro2	16500	12400	20686	6930	13200
ESS (Viessmann)	5993	11800	16717	29122	34280
SenerTec	14229	10105			
EC Power		9000	12000	12750	14625
Kuntschar + Schlüter	5940	8928	10442	12296	
Senergie	6087	8747	12815	6940	8250
Haase		7740	11744	3200	4760
Giese	5221	4976	4844	4998	4300
Comuna metall	3442	4892	4406	4944	5160
KW Energietechnik	2923	4539	4733	4658	8050
Vaillant (Ecopower)	3803	2794	3143	4379	6400
Cogenon	3800	2239			
MWB		2150			
KraftWerk	2344	1940	3328	3368	3572
Ernergiewerkstatt	1008	1337			
E-quad	1660	1080	2650		4000
Sanevo	5	134	231		
Kirch		120			
GE Jenbacher			190853	104958	187881
Elektro Hagl			101730	39275	38000
Agrogen			22710	3490	430
Lichtblick			6728	6156	
UPB			725		
H.G.S				6426	7600
Bayern BHKW				5980	9500
Dreyer & Bosse				5332	7845
Burkhardt				2880	4500

Anhang 5: Jährl. abgesetzte BHKW in Deutschland nach Modulzahl

Daten aus der Fachzeitung „Energie und Management“ [E&M2011, E&M2012, E&M2013]

Unternehmen	2009	2010	2011	2012
	[-]	[-]	[-]	[-]
SenerTec	2591	1844		
Vaillant (Ecopower)	838	628	959	1378
EC Power		600	750	750
2G Energietechnik	194	452	869	440
Schnell	191	409	598	159
Giese	327	320	330	317
MWM	174	291	411	286
KW Energietechnik	132	178	197	217
Seva Energy	102	170	203	61
MTU Onsite Energy	117	160	242	112
ESS (Viessmann)	104	160	204	380
Bosch KWK-Systeme	60	159	215	221
Cogenon	190	149		
Sanevo	5	134	231	
Sokrathern	74	97	90	78
Kuntschar + Schlüter	52	90	83	84
KraftWerk	99	84	137	148
Comuna metall	62	78	78	84
SES	55	67	63	33
Energiewerkstatt	48	67		
Sernergie	63	63	73	63
ETW Energietechnik	30	41	47	47
E-quad	26	33	25	18
Kirsch		30		
Pro2	26	26	38	12
Zeppelin	30	25	18	17
MWB		15		
Haase		13	22	6
AGO		12	13	16
GE Jenbacher			282	137
Elektro Hagl			459	199
Agrogen			88	13
Lichtblick			345	324
UPB				
H.G.S				13
Bayern BHKW				28
Dreyer & Bosse				13
Burkhardt				16

Anhang 6: Kenndaten der untersuchten BHKW (Stand 2012)

Bezeichnung	BHKW-Typ	Hersteller	Elektrische Leistung	Thermische Leistung	Feuerungsleistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Thermischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad	
			[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[%]	
BHKW Typ A	Agenitor-206	2G	220	253	555,5	40	46	86	a
BHKW Typ B	KWK-200-EG	2G	200	256	535	37	48	85	a
BHKW Typ C	MNW 200EG MAN	Bayern-BHKW	200	250	540	37	46	83	b
BHKW Typ D	TB 1533	MTU	191	265	549	35	48	83	c
BHKW Typ E	TB 1535	MTU	165	256	479	34	53	87	c
BHKW Typ F	G926 AGR	Senergie	180	250	475	38	53	91	c
BHKW Typ G	SEV-MA 200-NG	SEVA	200	263	546	37	48	85	c
BHKW Typ H	SEV-MA 142 NG	SEVA	142	207	388	37	53	90	c
BHKW Typ I	GG 140 S	SOKRATH ERM	142	216	392	36	55	91	c
Burkhardt ECO 240	ECO 240	Burkhardt	240	240	571	42	42	84	d

a: Broschüre „Natural gas – CHP modules“ Hrsg. 2G Energietechnik GmbH
 b: Broschüre „Blockheizkraftwerke von Bayern BHKW“ Hrsg. Bayern BHKW GmbH
 c: BHKW-Kenndaten 2011 Hrsg. ASUE [27]
 d: Datenblatt „BHKW ECO 240 Zündstrahl-Biomethan“ Fa. Burkhardt GmbH

Anhang 7: Kenndaten der untersuchten BHKW (Stand 2014)

Bezeichnung	BHKW-Typ	Hersteller	Elektrische Leistung	Thermische Leistung	Feuerungsleistung	Elektrischer Wirkungsgrad	Thermischer Wirkungsgrad	Gesamtwirkungsgrad	
			[kW]	[kW]	[kW]	[%]	[%]	[%]	
BHKW Typ 1	ECO 210	Burkhardt	210	248	531,6	39,5	46,7	86,2	a
BHKW Typ 2	Agenitor 406	2G	250	264	588,2	42,5	44,9	87,4	b
BHKW Typ 3	MNW 210EG MAN	Bayern BHKW	210	250	503,6	41,7	49,6	91,3	c
BHKW Typ 4	GTK 140	Kuntschar + Schlüter	140	212	392	35,7	54,1	89,8	d
BHKW Typ 5	GC 220 N5	MTU	220	262	564	39,0	46,5	85,5	e
BHKW Typ 6	NM 2876	Pro 2	200	263	535	37,4	49,2	86,5	f
BHKW Typ 7	MA-220 NG	SEVA	220	274	562,66	39,1	48,7	87,8	g
BHKW Typ 8	GG 140 S	Sokratherm	142	216	392	36,2	55,1	91,3	h
BHKW Typ 9	EM-199/263	Viessmann	199	263	538	37,0	48,9	85,9	i
Burkhardt ECO 240	ECO 240	Burkhardt	240	240	571	42	42	84	j

a: Datenblatt „BHKW ECO 210 Zündstrahl-Biomethan“ Fa. Burkhardt GmbH
 b: Datenblatt „BHKW Agenitor 406“ Fa. 2G Energy AG
 c: Datenblatt „BHKW MNW 210EG MAN“ Fa. Bayern BHKW GmbH
 d: Datenblatt „BHKW GTK 140“ Fa. Kuntschar u. Schlüter GmbH
 e: Datenblatt „BHKW GC 220 N5“ Fa. MTU Onsite Energy GmbH
 f: Datenblatt „BHKW NM 2876“ Fa. Pro2 Anlagentechnik GmbH
 g: Datenblatt „BHKW MA-220 NG“ Fa. SEVA Energie AG
 h: Datenblatt „BHKW GG 140 S“ Fa. SOKRATHERM GmbH
 i: Datenblatt „BHKW Vitobloc 200 EM-199/263“ Fa. Viessmann Werke GmbH & Co. KG
 j: Datenblatt „BHKW ECO 240 Zündstrahl-Biomethan“ Fa. Burkhardt GmbH

Anhang 8: Datenblatt Burkhardt Blockheizkraftwerk ECO 240 Zündstrahl-Biomethan²²

Kraftstoff	Biomethan + Pflanzenöl
Elektrische Leistung	240 kW
Thermische Leistung	240 kW
Stromkennzahl	1
Kraftstoffverbrauch Biomethan	53,1 Nm ³ /h
Kraftstoffverbrauch Zündöl	5 l/h
Wirkungsgrad elektrisch (Messwert)	42 %
Vorlauftemperatur	90 °C
Rücklauftemperatur	70 °C
Motor	MAN D26
Arbeitsverfahren	4- Takt Diesel mit Turboaufladung
Zylinderzahl	6 (in Reihe)
Hubraum	12,4 l
Synchrongenerator	Leroy Somer LSA 46.2 VL12
Leistung	276 kVA
Spannung	400 V
Abmessungen und Gewicht	
Länge	3600 mm
Breite	1600 mm
Höhe	2100 mm
Gewicht ohne Kühlwasser	4640 kg

²² Auf Internetseite www.burkhardt-gmbh.de veröffentlicht. Abruf am 19.01.2015

Anhang 9: Erdgasqualität während des Projektzeitraums [Ferngas2014]

		Sep 12	Okt 12	Nov 12	Dez 12	Jan 13
Brennwert	[kWh/Nm ³]	11,148	11,179	11,162	11,194	11,199
Heizwert	[kWh/Nm ³]	10,04	10,07	10,06	10,08	10,09

		Feb 13	Mrz 13	Apr 13	Mai 13	Jun 13
Brennwert	[kWh/Nm ³]	11,205	11,204	11,165	11,193	11,193
Heizwert	[kWh/Nm ³]	10,09	10,09	10,06	10,08	10,08

		Jul 13	Aug 13	Sep 13	Okt 13	Nov 13
Brennwert	[kWh/Nm ³]	11,214	11,229	11,211	11,201	11,219
Heizwert	[kWh/Nm ³]	10,10	10,12	10,10	10,09	10,11

		Dez 13	Jan 14	Feb 14	Mrz 14	Apr 14
Brennwert	[kWh/Nm ³]	11,202	11,207	11,205	11,214	11,318
Heizwert	[kWh/Nm ³]	10,09	10,10	10,09	10,13	10,20

Anhang 10: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 1, 06.03.13 bis 12.04.13

		Gesamter Betrachtungszeit- raum	Stündlicher Durchschnitt über Betrachtungszeit- raum
Betriebsstunden	[h]	847	-
Gasverbrauch	[Nm³]	44386	52
Zündölverbrauch	[l]	4350	5
Erzeugter Strom	[kWh]	202705	239
Eigenstromverbrauch	[kWh]	1848	2
Wärmemenge	[kWh]	189600	224
Elektrischer Nutzungsgrad (brutto)	[%]	41,51	-
Elektrischer Nutzungsgrad abzgl. Eigenverbrauch (netto)	[%]	41,13	-
Thermischer Nutzungsgrad	[%]	38,83	-
Gesamtnutzungsgrad	[%]	80,34	-
Stromkennzahl	[-]	1,06	-

Anhang 11: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 2, 12.04.13 bis 23.01.14

		Gesamter Betrachtungszeit- raum	Stündlicher Durchschnitt über Betrachtungszeitraum
Betriebsstunden	[h]	3795	-
Gasverbrauch	[Nm³]	184232	49
Zündölverbrauch	[l]	17560	5
Erzeugter Strom	[kWh]	834051	220
Eigenstromverbrauch	[kWh]	12775	3
Wärmemenge	[kWh]	734400	194
Elektrischer Nutzungs- grad (brutto)	[%]	41,20	-
Elektrischer Nutzungs- grad abzgl. Eigenver- brauch (netto)	[%]	40,56	-
Thermischer Nutzungs- grad	[%]	36,27	-
Gesamtnutzungsgrad	[%]	77,47	-
Stromkennzahl	[-]	1,12	-

Anhang 12: Nutzungsgradbestimmung: Zeitraum 3, 23.01.14 bis 07.04.14

		Gesamter Betrachtungszeitraum	Stündlicher Durchschnitt über Betrachtungszeitraum
Betriebsstunden	[h]	1727	-
Gasverbrauch	[Nm³]	88273	51
Zündölverbrauch	[l]	7806	5
Erzeugter Strom	[kWh]	405362	235
Eigenstromverbrauch	[kWh]	5869	3
Wärmemenge	[kWh]	349800	203
Elektrischer Nutzungsgrad (brutto)	[%]	41,92	-
Elektrischer Nutzungsgrad abzgl. Eigenverbrauch (netto)	[%]	41,32	-
Thermischer Nutzungsgrad	[%]	36,18	-
Gesamtnutzungsgrad	[%]	78,10	-
Stromkennzahl	[-]	1,14	-

Anhang 13: Neu zugelassene KWK-Anlagen nach Anlagenleistung

Daten vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa) [BAFA2014]

KWK-Anlagen	2009	2010	2011	2012	2013
	MW _{el}				
Gesamt	546,72	791,44	586,25	709,69	866,37
bis 2 kW	0,12	0,24	0,75	1,49	1,67
2 kW bis 10 kW	17,6	9,2	10,5	11,2	11,7
10 kW bis 20 kW	14	10	15	17	18
20 kW bis 50 kW	24	20	26	23	26
50 kW bis 250 kW	26	36	38	37	53
250 kW bis 500 kW	20	19	26	33	32
500 kW bis 1 MW	12	14	25	42	27
1 MW bis 2 MW	64	67	88	86	111
2 MW bis 10 MW	97	61	103	93	129
10 MW bis 50 MW	132	113	70	162	208
50 MW bis 100 MW	0	442	0	98	249
größer 100 MW	140	0	184	106	0

Anhang 14: Neu zugelassene KWK-Anlagen nach Modulzahl

Daten vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa) [BAFA2014]

KWK-Anlagen	2009	2010	2011	2012	2013
	Anzahl				
gesamt	5134	3497	4646	5639	6024
bis 2 kW	85	248	718	1462	1609
2 kW bis 10 kW	3250	1731	1975	2155	2204
10 kW bis 20 kW	938	657	880	991	1018
20 kW bis 50 kW	551	476	624	537	611
50 kW bis 250 kW	174	241	267	269	352
250 kW bis 500 kW	53	55	71	88	85
500 kW bis 1 MW	18	21	34	55	38
1 MW bis 2 MW	41	42	54	52	67
2 MW bis 10 MW	18	15	19	20	28
10 MW bis 50 MW	5	5	3	8	8
50 MW bis 100 MW	0	6	0	1	4
größer 100 MW	1	0	1	1	0

Anhang 15: Verwendete Messtechnik

1) Gaszähler

Hersteller:	Elster GmbH
Drehkolbenzähler:	RVG G65 DN50 PN 16
Zählwerk:	Encoder S1D
Messbereich:	0,65 bis 100 m ³ /h
Maximaler Fehler ²³ :	Qt – Qmax (± 1 %) Qmin - Qt* (± 2 %)

2) Waage

Hersteller:	Kern
Typ:	DS
Messbereich:	0 bis 60.100 g
Genauigkeit:	0,2 g

3) Elektrisches Leistungsmessgerät

Hersteller:	Hioki
Typ:	3169-20
Strommesszangen:	Typ 9660 (Messbereich bis 100 A) Genauigkeit (Messgerät ± 0,5 % v. Anz. ± 0,11 % v. Messbereich + Strommesszangen)

4) Stromzähler

Hersteller:	Actaris Zähler & Systemtechnik GmbH
Typ:	DC331T
Klasse (Wirkenergie):	1
Messwandler:	MBS EASK 51.4 500/5A

5) Indiziersystem

Hersteller:	AVL
Typ:	IndiMicro
Sampling Rate:	1 MHz

6) Drucksensoren

Hersteller:	Kistler
Typ:	4049A (Wassergekühlter Absolutdrucksensor)
Messbereich:	0 bis 5 bar absolut
Linearität bei T _{ref} (BSL):	≤ ±0,1 % FSO

²³ Qt = 0,2 Q_{max} für Messspanne 1:20
 Qt = 0,1 Q_{max} für Messspanne 1:50
 Qt = 0,05 Q_{max} für Messspanne > 1:50

Hersteller: Kistler
 Typ: 6061B (ThermoCOMP®-Quarz-Drucksensor)
 Messbereich: 0 bis 250 bar
 Linearität: $\leq \pm 0,5$ % FSO

7) Mobiles Abgasmessgerät

Messgröße	Messverfahren	Gerätetyp	Größter Messbereich	Genauigkeit
O ₂	elektrochemisch	TESTO 350	0 - 25 Vol.-%	$\pm 0,8$ % v.Ew
NO	elektrochemisch	TESTO 350	0 - 3000 ppm	± 5 ppm (0-99ppm) $\pm 5\%$ v.Mw (100-1999,9ppm) ± 10 % v.Mw (2000-3000ppm)
NO ₂	elektrochemisch	TESTO 350	0 - 500 ppm	± 5 ppm (0-99,9ppm) $\pm 5\%$ v.Mw (100-500ppm)
NO _x (NO+NO ₂)	elektrochemisch	TESTO 350	0 - 3500 ppm	berechnet aus NO und NO ₂
CO	elektrochemisch	TESTO 350	0 - 10000 ppm	± 10 ppm (0-199ppm) ± 5 % v.Mw (200-2000ppm) $\pm 10\%$ v.Mw (2001-10000 ppm)
CO ₂	berechnet aus O ₂	TESTO 350	0 - 50 Vol.-%	berechnet aus O ₂

8) Stationäres Abgasmesssystem

Geräte- typ	Hersteller	Messver- fahren	Messgröße	Genauigkeit
CR-4000	Gasmet	FT-IR	Sämtliche gasförmigen Abgasbestandteile außer O ₂	Nullpunktsdrift: < 2 % vom Messwert Linearitätsfehler: < 2 % vom Messbereich Temperaturdrift: < 2 % vom Messwert pro 10 K Abweichung
CLD 822	Ecophysics	CLD	NO, NO ₂ , NO _x	< 2 % vom Messbereich
AO2020 Magnos 206	ABB	paramagnetisch	O ₂	Linearitätsfehler: < 0,5 % vom Messwert Nullpunktsdrift: < 3 % vom kleinsten Messwert pro Woche Empfindlichkeitsdrift: < 1 % vom Messwert pro Woche
AO2020 Uras26	ABB	ND-IR	CO, CO ₂	Linearitätsfehler: < 1 % vom Messwert Nullpunktsdrift: < 1 % vom Messwert pro Woche Empfindlichkeitsdrift: < 0,1 vol-% O ₂ pro Woche
Thermo FID	Mess- & Analysetechnik GmbH	FID	Unverbrannte Kohlenwasserstoffe	Linearitätsfehler: < 1 % vom Messwert Nullpunktsdrift: < 1 % vom Messwert pro 24 h Empfindlichkeitsdrift: < 1 % vom Messwert pro 24 h

9) Prüfgase

Prüfgas	Zusammensetzung	Hersteller	Konzentration	Genauigkeit
O ₂	Umgebungsluft	-	21 Vol%	-
NO	NO / CO / CO ₂ / N ₂	Rießner Gase	1995 ppm	± 2 %
NO ₂	NO ₂ / N ₂	Rießner Gase	104 ppm	± 2 %
CO	NO / CO / CO ₂ / N ₂	Rießner Gase	970 ppm	± 2 %

Anhang 16: Förderfähige Strommenge nach KWKG

Daten von der Informationsplattform der deutschen Übertragungsnetzbetreiber Netztransparenz [IÜNB2014]

Kat. (§)	Anlagenkategorie	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
		[GWh]	[GWh]	[GWh]							
5.1.1	Alte Bestandsanlagen	16.313,90	16.252,90	14.518,60	12.432,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5.1.2	Neue Bestandsanlagen	35.617,20	37.254,70	36.137,30	33.231,30	31.507,10	31.093,90	37.436,34	0,00	0,00	0,00
5.1.3	Modernisierte Anlagen	518,20	2.083,60	8.512,00	13.775,70	13.588,10	14.236,20	13.611,88	15.096,28	0,00	0,00
5.1.4	Hocheffiziente, modernisierte Anlagen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	169,74	1.000,32	2.085,88	1.993,05
5.2.1a	kleine KWK-Anlagen (Zubau) > 50 kW bis max. 2 MW elektr. Leistung, die ab dem 01.04.2002 bis zum 31.12.2008 in Dauerbetrieb genommen worden sind	105,80	255,90	450,40	627,10	716,60	821,70	1.031,48	1.135,78	0,00	0,00
5.2.1b	kleine KWK-Anlagen (Zubau) bis max. 50 kW	37,70	76,60	129,00	196,10	263,50	307,00	478,38	788,74	970,75	1.169,54
5.2.1c	hocheffiziente kleine KWK-Anlagen (Zubau) > 50 kW bis max. 2 MW elektr. Leistung, die ab dem 01.01.2009 in Dauerbetrieb genommen wurden	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	187,20	686,93	1.306,82	2.112,87
5.2.2	Brennstoffzellen	3,30	3,90	5,50	3,90	1,30	1,00	2,32	3,18	0,81	1,08
5.3.	KWK-Anlagen > 2 MW (hocheffiziente Neuanlagen)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	386,96	1.811,65	2768,48	3.432,53
	SUMME	52.596,10	55.927,60	59.752,80	60.267,00	46.076,60	46.459,80	53.304,30	20.522,88	7.132,74	8.709,07