

Raphael Lechner, Nicholas O'Connell
Thorsten Meierhofer, Markus Brautsch

Entwicklung, Umsetzung und Bewertung optimierter Monitoring-, Betriebs- und Regelstrategien für Blockheizkraftwerke

F 3058

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) 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

2017

ISBN 978-3-7388-0083-8

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/bauforschung

Optimierte Monitoring-, Betriebs- und Regelstrategien für Blockheizkraftwerke

Abschlussbericht

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

Bearbeitungszeitraum: 11/2014 – 12/2016

Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-14.27

Autoren: Raphael Lechner
Nicholas O'Connell
Thorsten Meierhofer
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, August 2017

Für die fachliche Unterstützung und angenehme Zusammenarbeit bedanken wir uns bei den Mitgliedern der projektbegleitenden Arbeitsgruppe sowie bei der LEA Lean Energy Services GmbH, der Bayernwerk Natur GmbH, der Stadtwerke Crailsheim GmbH und dem Kommunalunternehmen Stadtwerke Weiden i.d. Opf.

Langfassung Titel:

Entwicklung, Umsetzung und Bewertung optimierter Monitoring-, Betriebs- und Regelstrategien für Blockheizkraftwerke

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, August 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xiv
Abkürzungsverzeichnis	xvi
Formelzeichen und Indizes	xvii
1 Einführung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Energiemonitoring von Blockheizkraftwerken.....	3
2.2 Hydraulische Einbindung von BHKW-Anlagen	4
2.3 Betriebsstrategien für BHKW-Anlagen	9
2.5 Erbringung von Systemdienstleistungen	12
2.6 Regelung von BHKW-Anlagen	14
2.6.1 Regelung nach der Rücklauftemperatur.....	14
2.6.2 Regelung nach dem Pufferladezustand	14
2.6.3 Stromgeführte Regelung	14
2.7 Zustandsgraph nach VDI 3814	16
3 Methodik	19
3.1 Energiemonitoring.....	19
3.2 Bewertungskriterien	24
3.2.1 Technische Bewertungskriterien	24
3.2.1.1 Verfügbarkeit.....	24
3.2.1.2 Betriebsstunden	24
3.2.1.3 Volllaststunden.....	24
3.2.1.4 Modulationsfaktor.....	25
3.2.1.5 Startanzahl.....	25
3.2.1.6 Nutzungsgrade.....	25
3.2.1.7 Stromkennzahl	26
3.2.1.8 Thermische Speicherkapazität und Ladezustand von Wärmespeichern	27
3.2.1.9 Temperaturspreizung	27
3.2.2 Wirtschaftliche Bewertungskriterien	27
3.2.3 Ökologische Bewertungskriterien	28
3.2.3.1 Primärenergieeinsparung.....	28
3.2.3.2 CO ₂ -Bilanzierung	30
3.3 Vorgehensweise	31
4 Vorstellung der untersuchten BHKW-Anlagen	33
4.1 BHKW-Anlage A – Blockheizkraftwerk Kindergarten	33
4.2 BHKW-Anlage B – Heizkraftwerk Wohngebiet	35

4.3	BHKW-Anlage C – Heizkraftwerk Industrie-/Gewerbegebiet	38
4.4	BHKW-Anlage D – Klinikum	42
5	Forschungsergebnisse	47
5.1	BHKW-Anlage A	47
5.1.1	Ergebnisse der ersten Monitoringphase	47
5.1.1.1	Energieumsätze	47
5.1.1.2	Betriebsverhalten	49
5.1.1.3	Ökologische Betrachtung	51
5.1.1.4	Analyse der Kesselregelung	54
5.1.1.5	Analyse der BHKW-Motorprobleme	57
5.1.2	Identifikation und Umsetzung von Optimierungspotentialen	58
5.1.3	Ergebnisse der zweiten Monitoringphase	60
5.1.3.1	Energieumsätze	60
5.1.3.2	Betriebsverhalten	62
5.1.3.3	Ökologische Betrachtung	64
5.1.4	Evaluation	67
5.1.4.1	Evaluation der optimierten Kesselregelung	67
5.1.4.2	Einfluss der Witterung	70
5.1.5	Zusammenfassung der Monitoringphasen	71
5.2	BHKW-Anlage B	74
5.2.1	Ergebnisse der ersten Monitoringphase	74
5.2.1.1	Energieumsätze	74
5.2.1.2	Betriebsverhalten	76
5.2.1.3	Ökologische Betrachtung	78
5.2.2	Identifikation und Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen	80
5.2.2.1	Teillastverhalten der BHKW-Module	80
5.2.2.2	Vorrangschaltung der BHKW-Module	81
5.2.3	Ergebnisse der zweiten Monitoringphase	82
5.2.3.1	Energieumsätze	82
5.2.3.2	Betriebsverhalten	84
5.2.3.3	Ökologische Betrachtung	86
5.2.4	Evaluation	89
5.2.4.1	Evaluation der optimierten Vorrangschaltung	89
5.2.4.2	Potentialanalyse taktender versus modulierender Betrieb	92
5.2.4.3	Einfluss der Witterung	94
5.2.5	Zusammenfassung der Monitoringphasen	96
5.3	BHKW-Anlage C	98
5.3.1	Ergebnisse der ersten Monitoringphase	98

5.3.1.1	Energieumsätze	98
5.3.1.2	Betriebsverhalten	99
5.3.1.3	Ökologische Betrachtung	101
5.3.2	Ergebnisse der zweiten Monitoringphase	103
5.3.2.1	Energieumsätze	103
5.3.2.2	Betriebsverhalten	105
5.3.2.3	Ökologische Betrachtung	106
5.3.3	Evaluation	108
5.3.3.1	Bewertung des Anlagenbetriebs	108
5.3.3.2	Einfluss der Witterung	109
5.3.4	Zusammenfassung der Monitoringphasen	110
5.4	BHKW-Anlage D	111
5.4.1	Ergebnisse der ersten Monitoringphase	111
5.4.1.1	Energieumsätze	111
5.4.1.3	Betriebsverhalten	113
5.4.1.4	Ökologische Betrachtung	117
5.4.2	Identifikation und Umsetzung von Optimierungspotentialen	119
5.4.2.1	Optimierung des Regelverhaltens im Sommerbetrieb	119
5.4.2.2	Stromgeführter Sommerbetrieb	121
5.4.3	Ergebnisse der zweiten Monitoringphase	122
5.4.3.1	Energieumsätze	122
5.4.3.2	Betriebsverhalten	124
5.4.3.3	Ökologische Betrachtung	126
5.4.4	Evaluation	129
5.4.4.1	Evaluation des optimierten Sommerbetriebs	129
5.4.4.2	Potentialanalyse stromgeführter Betrieb	131
5.4.4.3	Einfluss der Witterung	134
5.4.5	Zusammenfassung der Monitoringphasen	136
5.5	Potentialanalyse Regelenergie	137
6	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	140
6.1	Energiemonitoring	140
6.2	Betriebsstrategie	142
6.2.1	Wärmegeführter Betrieb	142
6.2.2	Stromgeführter Betrieb	145
6.2.3	Systemdienstleistungen	146
6.2.4	Anmerkungen zu Störungen und Ausfällen	147
6.3	Regelstrategie	148
7	Zusammenfassung	150
8	Quellenangaben	154

9	Anhang.....	156
9.1	Beispielberechnung CO ₂ -Bilanzierung.....	156
9.2	Zuordnungstabellen zu den Zustandsgraphen	158
9.2.1	BHKW-Anlage A	158
9.2.2	BHKW-Anlage B	159
9.2.3	BHKW-Anlage C	160
9.2.4	BHKW-Anlage D	161
9.3	Muster-Datenpunktliste für Energiemonitoring.....	162
9.4	Zustandsdiagramm der BHKW-Anlage D	164

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile eines Energiemonitorings [Schellong2016].....	4
Abbildung 2: Parallelschaltung von Spitzenlastkessel und BHKW [KWE2012].....	7
Abbildung 3: Reihenschaltung von Spitzenlastkessel und BHKW [KWE2012]	7
Abbildung 4: Reihenschaltung von mehreren Pufferspeichern [KWE2012]	8
Abbildung 5: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage auf Basis von Diesel-/Ottomotoren [Schaumann2010]	9
Abbildung 6: BHKW-Betriebsstrategien	11
Abbildung 7: Zustandsgraph für das Beispiel BHKW mit Spitzenlastkessel.....	18
Abbildung 8: Beispiel Liniendiagramm	22
Abbildung 9: Beispiel Säulendiagramm	22
Abbildung 10: Beispiel Jahresdauerlinie	23
Abbildung 11: Beispiel Rasterdiagramm	23
Abbildung 12: Schematische Darstellung der Vorgehensweise im Projekt	32
Abbildung 13: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage A	33
Abbildung 14: Zustandsgraph nach VDI 3814 für die BHKW-Anlage A	34
Abbildung 15: Gekapselte BHKW-Module in der BHKW-Anlage B	36
Abbildung 16: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage B	36
Abbildung 17: Zustandsgraph nach VDI 3814 der BHKW-Anlage B	37
Abbildung 18: BHKW-Anlage C mit Kaminanlagen und Pufferspeicher 100 m ³	39
Abbildung 19: BHKW-Modul mit 825 kW _{el} in BHKW-Anlage C.....	39
Abbildung 20: Vereinfachte schematische Darstellung BHKW-Anlage C.....	40
Abbildung 21: Zustandsgraph der Regelung der BHKW-Anlage C	41
Abbildung 22: BHKW Module agenitor 406 (vorn) und avus 550plus (hinten) in BHKW-Anlage D	43
Abbildung 23: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage D	43
Abbildung 24: Zustandsgraph der Regelung der BHKW-Anlage D	46
Abbildung 25: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	48
Abbildung 26: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	48
Abbildung 27: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	50
Abbildung 28: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase.....	50
Abbildung 29: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	51
Abbildung 30: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	52
Abbildung 31: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase .	53
Abbildung 32: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	53

Abbildung 33: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels vom 17.03.2015 bis zu 31.07.2015	54
Abbildung 34: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 29.03.2015 (Winterbetrieb) ...	55
Abbildung 35: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 14.05.2015	56
Abbildung 36: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 10.07.2015	56
Abbildung 37: Elektrische Leistung der BHKW-Anlage A im November und Dezember 2015 ...	57
Abbildung 38: Elektrische Leistung der BHKW-Anlage A im Januar 2016	58
Abbildung 39: Anlagenvisualisierung (Brennwertkessel nach Optimierung)	60
Abbildung 40: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	61
Abbildung 41: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	62
Abbildung 42: Geordnete, elektrische Dauerlinie der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	63
Abbildung 43: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase ...	63
Abbildung 44: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	64
Abbildung 45: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	65
Abbildung 46: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	66
Abbildung 47: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	66
Abbildung 48: Betrieb des BHKW und des Heizkessels am 03.01.2016	68
Abbildung 49: Betrieb des BHKW und des Heizkessels am 12.01.2016	68
Abbildung 50: Betrieb des BHKW und Heizkessels am 15.01.2016	69
Abbildung 51: Betrieb des BHKW und Heizkessels am 25.01.2016	69
Abbildung 52: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage A und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) für die Vergleichszeiträume 2015 und 2016	71
Abbildung 53: Rasterdiagramm des Pufferspeicher-Füllstands der BHKW-Anlage A über beide Monitoringphasen	73
Abbildung 54: Tägliche Gesamtwärmeerzeugung der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	75
Abbildung 55: Nutzungsgrade der beiden BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	75
Abbildung 56: Geordnete elektrische Jahresdauerlinien der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	76
Abbildung 57: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	77
Abbildung 58: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	77
Abbildung 59: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	78
Abbildung 60: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage B im Jahr 2015	79
Abbildung 61: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	79

Abbildung 62: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung der BHKW-Anlage B	81
Abbildung 63: Ungünstige BHKW-Vorrangschaltung.....	82
Abbildung 64: Tägliche Gesamtwärmeerzeugung der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	83
Abbildung 65: Nutzungsgrade der beiden BHKW der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	84
Abbildung 66: Geordnete, elektrische Jahresdauerlinien der beiden BHKW der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	85
Abbildung 67: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase ...	86
Abbildung 68: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	86
Abbildung 69: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	87
Abbildung 70: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	88
Abbildung 71: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	88
Abbildung 72: Elektrische Leistung der beiden BHKW-Module vor der Umstellung der Vorrangschaltung	89
Abbildung 73: Elektrische Leistung der beiden BHKW-Module nach der Umstellung der Vorrangschaltung	90
Abbildung 74: Wirtschaftlicher Vorteil durch Umstellung der Vorrangschaltung von BHKW2 auf BHKW1.....	91
Abbildung 75: Darstellung der Szenarien 1 und 2 als geordnete Jahresdauerlinien.....	92
Abbildung 76: Wirtschaftlicher Vorteil durch Umstellung der Betriebsweise des BHKW1 von modulierend auf taktend.....	94
Abbildung 77: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage B und die monatliche Gradtagezahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016.....	95
Abbildung 78: Rasterdiagramm des Pufferspeicher-Füllstands der BHKW-Anlage B über beide Monitoringphasen.....	97
Abbildung 79: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	99
Abbildung 80: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	99
Abbildung 81: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	100
Abbildung 82: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase ...	101
Abbildung 83: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	101
Abbildung 84: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	102
Abbildung 85: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	102
Abbildung 86: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	103
Abbildung 87: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	104

Abbildung 88: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	104
Abbildung 89: Geordnete elektrische Dauerlinie BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	105
Abbildung 90: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase ..	106
Abbildung 91: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	106
Abbildung 92: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	107
Abbildung 93: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	107
Abbildung 94: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	108
Abbildung 95: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage C und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016	109
Abbildung 96: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage D im Jahr 2015 ..	112
Abbildung 97: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	112
Abbildung 98: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie für BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	114
Abbildung 99: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase....	115
Abbildung 100: Elektrische Leistung BHKW1 (Februar 2015)	116
Abbildung 101: Durchschnittliche Betriebsstunden der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	116
Abbildung 102: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	117
Abbildung 103: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß von BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	118
Abbildung 104: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen von BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	118
Abbildung 105: Betrieb der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D Ende August 2015 ..	119
Abbildung 106: Betrieb der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D Ende September 2015	120
Abbildung 107: Rückgang der Strombereitstellung in den Sommermonaten bei BHKW-Anlage D	122
Abbildung 108: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	123
Abbildung 109: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	124
Abbildung 110: Geordnete elektrische Dauerlinie für BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	125
Abbildung 111: Startanzahl der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase	126
Abbildung 112: Durchschnittliche Betriebsstunden pro Start der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase	126

Abbildung 113: Monatliche Primärenergieeinsparung der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase	127
Abbildung 114: Monatlicher CO ₂ -Ausstoß der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase ...	128
Abbildung 115: Monatliche spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	128
Abbildung 116: Betrieb der beiden BHKW vor der Umstellung der Regelung	129
Abbildung 117: Betrieb der beiden BHKW nach der Umstellung der Regelung	130
Abbildung 118: Rasterdiagramm des Pufferspeicherfüllstands über beide Monitoringphasen	130
Abbildung 119: Vergleich der tatsächlichen Stromerzeugung der BHKW-Anlage mit der Simulation im Betrachtungszeitraum	132
Abbildung 120: Wirtschaftlicher Vorteil des stromgeführten Betriebs im Sommer gegenüber dem wärmegeführten Betrieb	134
Abbildung 121: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage D und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016	135
Abbildung 122: Potentielle Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der MRL-Vermarktung	139
Abbildung 123: Potentielle Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der SRL-Vermarktung	139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungen an die Regelenergiebereitstellung	13
Tabelle 2: Zuordnung von Zuständen und Betriebsarten	16
Tabelle 3: Zuordnungstabelle zum Zustandsgraphen	17
Tabelle 4: Referenzwirkungsgrade nach Richtlinie 2012/27/EG	29
Tabelle 5: Korrekturfaktoren gemäß Verordnung (EU) 2015/2402	29
Tabelle 6: Brennstoffenergiebezogene CO ₂ -Emissionen	31
Tabelle 7: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten für BHKW-Anlage A	34
Tabelle 8: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten BHKW-Anlage B	37
Tabelle 9: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten BHKW-Anlage C	41
Tabelle 10: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten der BHKW-Anlage D	45
Tabelle 11: Energieumsätze der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	47
Tabelle 12: Betriebsdaten der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase	49
Tabelle 13: Energieumsätze der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	61
Tabelle 14: Betriebsdaten der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase	62
Tabelle 15: Betriebsdaten des BHKW und Heizkessels vor und nach Umstellung der Regelung	68
Tabelle 16: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen [IWU17] der BHKW-Anlage A für die Vergleichszeiträume 2015 und 2016	71
Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleichszeitraum für BHKW-Anlage A	72
Tabelle 18: Energieumsätze der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	74
Tabelle 19: Betriebsdaten der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	76
Tabelle 20: CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	78
Tabelle 21: Spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase	79
Tabelle 22: Datenblattangaben und Ergebnisse der BHKW-Anlage B	80
Tabelle 23: Energieumsätze der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	82
Tabelle 24: Betriebsdaten der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	84
Tabelle 25: CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	87
Tabelle 26: Spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase	87
Tabelle 27: Energieumsätze, Nutzungsgrade und Betriebsdaten der BHKW-Anlage B vor und nach der Umstellung der Vorrangschaltung	91
Tabelle 28: Ergebnisse der Potentialanalyse taktender versus modulierender Betrieb	93
Tabelle 29: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage B in den Jahren 2015 und 2016	96
Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitorings der BHKW-Anlage B	97
Tabelle 31: Energieumsätze der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	98
Tabelle 32: Betriebsdaten der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase	100
Tabelle 33: Energieumsätze der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	103
Tabelle 34: Betriebsdaten der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase	105

Tabelle 35: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage C der Jahre 2015 und 2016	109
Tabelle 36: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitoring der BHKW-Anlage C	110
Tabelle 37: Energieumsätze der beiden BHKW-Module in BHKW-Anlage D im Jahr 2015.....	111
Tabelle 38: Betriebsdaten der BHKW-Anlage D im Jahr 2015	114
Tabelle 39: CO ₂ -Ausstoß der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	117
Tabelle 40: Spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase	118
Tabelle 41: Betriebsdaten der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D in den betrachteten Zeiträumen	121
Tabelle 42: Energieumsätze der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	123
Tabelle 43: Betriebsdaten der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	124
Tabelle 44: CO ₂ -Ausstoß der BHKW- Anlage D in der zweiten Monitoringphase	127
Tabelle 45: Spezifische CO ₂ -Emissionen der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase	127
Tabelle 46: Betriebsdaten der beiden BHKW vor und nach der Umstellung der Regelung	130
Tabelle 47: Vergleich des tatsächlichen Betriebs der BHKW-Anlage mit den Ergebnissen der Simulation.....	133
Tabelle 48: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage D der Jahre 2015 und 2016	135
Tabelle 49: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitorings für BHKW-Anlage D.....	137
Tabelle 50: Jährliche Betriebskennwerte der betrachteten BHKW-Anlagen im Vergleich	144

Abkürzungsverzeichnis

AGFW	Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
AWT	Abgaswärmetauscher
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BHKW	Blockheizkraftwerk
BW-Kessel	Brennwert-Kessel
CAFM	Computer-Aided Facility Management
CO ₂	Kohlendioxid
CSV	Comma Separated Values
EDM	Energy Data Management
EEX	European Energy Exchange
EMS	Energiemanagementsystem
FTP	File Transfer Protocol
GA-FL	Gebäudeautomations-Funktionsliste
GLT	Gebäudeleittechnik
GuD	Gas- und Dampfkraftwerk
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
MRL	Minutenregelleistung
MSR	Mess-, Steuerung- und Regelungstechnik
SRL	Sekundärregelleistung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Formelzeichen und Indizes

Formelzeichen

A, X	Anteil
ΔT	Temperaturdifferenz
E_x	Exergie
ε	spezifische Emissionen
η	Wirkungsgrad
$\overline{\eta}$	Nutzungsgrad
H_i	Heizwert
m	Masse
M	Modulationsfaktor
P	Leistung
PEE	Primärenergieeinsparung
T	Temperatur
t	Zeit
σ	Stromkennzahl
v	spezifisches Volumen
V	Volumen
VBh	Volllaststunden / Vollbenutzungstunden
W	Arbeit

Indizes

Br	Brennstoff
c	Carnot
CO ₂	Kohlendioxid
el	elektrisch
FWL	Feuerungswärmeleistung
ges	gesamt
m	Mittel
P	leistungsbezogen
REF	Referenzwert
RL	Rücklauf
th	thermisch
VL	Vorlauf
W	arbeitsbezogen

Einheiten

°C	Grad Celsius
€	Euro
€/a	Euro pro Jahr
Bh	Betriebsstunden

h	Stunden
h/a	Stunden pro Jahr
g/kWh	Gramm pro Kilowattstunde
Hz	Hertz
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/kg	Kilowattstunde pro Kilogramm
kWh/Nm ³	Kilowattstunde pro Normkubikmeter
l	Liter
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
mbar	Millibar
min	Minuten
m ³	Kubikmeter
%	Prozent
t	Tonne
V	Volt
VBh	Volllaststunden/Vollbenutzungsstunden

1 Einführung

Für die zukünftige Entwicklung des Energiemarkts spielt der Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung eine wichtige Rolle. Zielvorgabe der Bundesregierung ist die Erhöhung der Nettostromerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) auf 110 Terawattstunden bis zum Jahr 2020 sowie auf 120 Terawattstunden bis zum Jahr 2025 [KWKG15]. Im Rahmen dieser Entwicklung spielen kompakte KWK-Anlagen, sogenannte Blockheizkraftwerke (BHKW), die dezentral zur Versorgung von Liegenschaften und Wärmenetzen eingesetzt werden, eine wichtige Rolle.

Sowohl für neu geplante als auch bestehende BHKW-Anlagen gilt es, die Auslegung sowie die Betriebs- und Regelstrategie optimal auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen, um das Effizienzpotential voll auszuschöpfen. Dies ist von umso größerer Bedeutung, da BHKW-Anlagen einerseits eine vergleichsweise hohe Investition darstellen, die wirtschaftlich optimal genutzt werden soll, andererseits jedoch auch systemtechnisch eine wichtige Doppelrolle sowohl für die elektrische als auch die thermische Energieversorgung erfüllen und oftmals in komplexe übergeordnete Energiesysteme eingebunden sind.

Im Rahmen des Projekts „Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen“ [IfE2012] wurden ausgehend von achtzehn ausgewählten Praxisbeispielen Ansätze zur optimierten Auslegung und Konfiguration von BHKW-Anlagen aufgezeigt. Die im Projekt entwickelten Maßnahmen führen zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit, erfordern jedoch in vielen Fällen zunächst erhebliche Investitionen, sodass die Hürden für eine Umsetzung hoch sind. Ausgehend von den Erfahrungen aus diesem Projekt wurden daher im aktuellen Vorhaben anhand von vier ausgewählten Praxisbeispielen gezielt die Potentiale zur nicht-investiven bzw. gering-investiven Betriebsoptimierung durch die Umsetzung optimierter Monitoring-, Betriebs und Regelstrategien untersucht.

Entscheidend für die Optimierung von Betriebs- und Regelstrategien ist eine zeitlich hoch aufgelöste Datenbasis, die eine umfassende Beurteilung des Anlagenbetriebs inklusive dynamischer Effekte erlaubt, da nur auf diese Weise schlecht abgestimmte Regelsysteme oder ungünstige Betriebsmodi erkannt werden können. In der Praxis liegen diese Daten jedoch meist nicht oder nur unzureichend vor, oder werden nicht zielgerichtet ausgewertet. Wesentlicher Ansatzpunkt des Projekts war daher zunächst die Umsetzung eines Monitoringkonzepts zur Generierung der benötigten Daten im BHKW-Praxisbetrieb. Zur Datenerfassung wurde ein softwaregestütztes Energiemonitoringsystem eingesetzt, das auf der an den Anlagen vorhandenen Messtechnik aufbaut und mittels dem die Betriebsdaten auf einer unabhängigen Plattform erfasst, visualisiert und ausgewertet werden können. Vorteil dieser Lösung ist, dass kein Eingriff in die bestehenden Mess-, Steuer- und Regel- sowie Leittechniksysteme erforderlich ist und das alle für das Projekt erforderlichen Daten unabhängig von den verschiedenen vor Ort eingesetzten Systemen in einem einheitlichen Format gesammelt und analysiert werden konnten.

Zur Generierung der benötigten Datenbasis wurden in einer ersten Monitoringphase zunächst die Betriebsdaten der jeweiligen BHKW-Anlage zeitlich hoch aufgelöst erfasst und analysiert. Ausgehend von der Analyse wurden für die jeweilige Anlage Verbesserungspotentiale herausgearbeitet und daraus optimierte Betriebs- und Regelstrategien entwickelt und ausgewählte Maßnahmen umgesetzt. Sofern die entwickelten Maßnahmen aus betrieblichen Gründen in Rahmen des Vorhabens nicht umsetzbar waren, wurde eine Potentialanalyse auf Basis der realen Betriebsdaten durchgeführt. Um den Erfolg der Maßnahmen beurteilen zu können, wurden in einer zweiten Monitoringphase wiederum die Betriebsdaten erfasst und im Vergleich mit der ersten Monitoringphase analysiert.

Aus den Ergebnissen des Vorhabens wurden allgemein anwendbare Handlungsempfehlungen für das Monitoring sowie den Betrieb und die Regelung bestehender und neu geplanter BHKW-Anlagen abgeleitet.

2 Grundlagen

2.1 Energiemonitoring von Blockheizkraftwerken

Unter dem Begriff „Energiemonitoring“ wird im Rahmen des vorliegenden Berichts die Erfassung von Betriebsdaten und Energieumsätzen über einen definierten Zeitraum mit anschließender bzw. fortlaufender Auswertung und Analyse des Anlagenbetriebs verstanden. Das Ziel des Energiemonitorings ist es, die notwendige Datengrundlage für eine Analyse und technisch-wirtschaftliche Optimierung des Betriebs von Energiesystemen zu schaffen, hier vorrangig bezogen auf BHKW-Anlagen. Eine BHKW-Anlage kann dabei aus einem oder mehreren BHKW-Modulen sowie weiteren Komponenten bestehen, wie z. B. Spitzenlastkesseln und Pufferspeichern. Je nach Größe und Komplexität der installierten BHKW-Anlage und der Einbindung in das Gesamtsystem, unterscheidet sich auch der notwendige Umfang des Energiemonitorings.

Für ein zielgerichtetes Monitoring von BHKW-Anlagen zwingend erforderlich sind zunächst die Verbrauchs- und Erzeugungsdaten der einzelnen Module (Energieeinsatz, Stromerzeugung, thermische Erzeugung,...). Weiterhin sind die Energieumsätze des Gesamtsystems (z. B. bei Heizzentralen mit zusätzlichen Mittel- und Spitzenlastkesseln,...) wichtige Größen, um die Wechselwirkungen der Erzeuger untereinander und die Deckungsanteile der einzelnen Wärmeerzeuger darstellen zu können. Zur Beurteilung des Regelverhaltens ist zusätzlich eine Erfassung der Betriebsstunden und der Startanzahl der einzelnen BHKW-Module sowie gegebenenfalls der Heizkessel notwendig. Diese Größen sind u. a. für das Wartungsmanagement und die Gewährleistungsansprüche von Bedeutung. Die Aufzeichnung von weiteren Anlagenparametern, z. B. Systemtemperaturen, kann die Ursachensuche bei auftretenden Störungen deutlich vereinfachen und ist daher ebenfalls empfehlenswert. Wesentliche Bestandteile eines Monitoringkonzeptes sind nach [Schellong2016] exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt.

Mit Hilfe des Energiemonitorings kann eine umfassende Betriebsdatenbasis geschaffen werden, mit Hilfe derer der Betrieb der BHKW-Anlage überwacht, analysiert und gegebenenfalls optimiert werden kann. Vom Energiemonitoring abzugrenzen ist eine reine Betriebsdatenüberwachung im Rahmen des Wartungs- und Störfallmanagements. Die dabei erfassten Betriebsparameter dienen in erster Linie der Zustandsüberwachung der einzelnen Anlagenkomponenten für einen sicheren Betrieb (z. B. Überwachung der Abgastemperaturen je Zylinder bei Verbrennungsmotor-BHKW) und erlauben in der Regel keine weiterführenden Analysen des Betriebs- und Regelverhaltens.

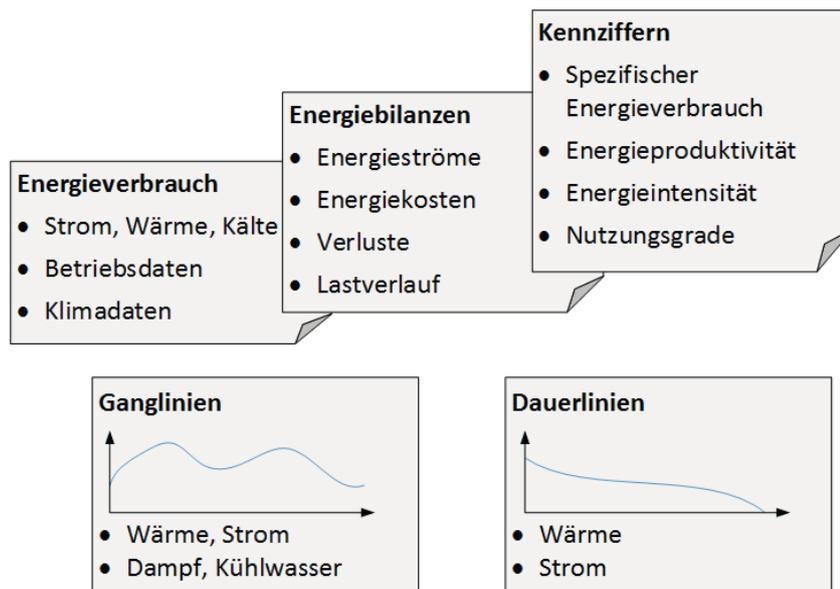


Abbildung 1: Bestandteile eines Energiemonitorings [Schellong2016]

2.2 Hydraulische Einbindung von BHKW-Anlagen

Blockheizkraftwerke sind als KWK-Anlagen sowohl elektrisch als auch hydraulisch in übergeordnete Energiesysteme eingebunden. Grundsätzlich gilt es dabei, die besonderen Anforderungen des jeweiligen BHKW-Moduls und der weiteren Systemkomponenten zu berücksichtigen und zu beachten, dass die Anforderungen an die hydraulische Einbindung sich von einer reinen Heizkesselanlage unterscheiden. Im Folgenden werden die grundlegenden Anforderungen an die hydraulische Einbindung von Blockheizkraftwerken erläutert.

BHKW sind in der Regel auf den Grundlast- und damit auf Dauerbetrieb ausgelegt. Die hydraulische Einbindung hat daher so zu erfolgen, dass ein möglichst langer Dauerbetrieb erreicht werden kann und die Wärme aus dem BHKW vorrangig abgenommen wird. Die Anbindung hat daher vorrangig an Abnehmer mit möglichst durchgehendem Wärmebedarf zu erfolgen.

Abhängig von der eingesetzten KWK-Technologie ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die hydraulische Einbindung. Bei BHKW-Anlagen mit Verbrennungsmotoren ist z. B. die maximale Rücklauftemperatur auf Werte von etwa 70 °C begrenzt, um eine zuverlässige Kühlung des Motors sicherzustellen. Andererseits darf die Temperatur nicht zu gering sein, um negative Einflüsse durch zu hohe Temperaturspreizungen zu vermeiden (Bauteilausdehnung, Materialspannungen,...), weshalb in der Praxis oftmals eine externe oder interne Rücklauftemperaturerhebung erfolgt. Bei Aggregaten mit Brennwertwärmetauschern ist dagegen stets die niedrigste mögliche Rücklauftemperatur anzustreben, um den Kondensationseffekt bestmöglich auszunutzen. In diesem Zusammenhang hat die hydraulische Einbindung des BHKW an das Gesamtsystem so

zu erfolgen, dass die zulässigen Rücklauftemperaturen über einen möglichst langen Zeitraum eingehalten werden.

Bei den heute üblichen BHKW-Modulen kann Wärme auf verschiedenen Temperaturniveaus ausgekoppelt werden, wobei in den meisten Fällen alle Wärmeströme bereits intern im Modul auf einen gemeinsamen Anschluss zusammengeführt werden, an dem in der Regel Temperaturen von bis zu 90 °C im Vorlauf und 70 °C im Rücklauf verfügbar sind. Die grundsätzlich verfügbaren Temperaturniveaus sind:

- Wärme aus dem Motorkühlkreislauf (Kühlwasser und Schmierölkühlung, ggf. erste Gemischkühlstufe bei Turbomotoren) mit Temperaturen bis zu 90 °C
- Wärme aus der Abgaskühlung (Abgaswärmetauscher) mit Temperaturen bis ca. 109 °C in Heißwassernetzen, darüber hinaus Dampfauskopplung über Abhitzedampfkessel (in der Regel Sattedampf bis etwa 10 bar Überdruck)
- Wärme aus der Gemischkühlung (zweite Stufe) bei aufgeladenen Motoren mit Temperaturen von etwa 45 °C bis 50 °C

Davon abweichende Konfigurationen sind möglich, z. B. bei heißgekühlten Motoren oder bei BHKW-Modulen mit Brennwertnutzung.

Probleme entstehen in der Praxis häufig dadurch, dass ein zu hohes Rücklauftemperaturniveau am BHKW anliegt und das Modul außer Betrieb geht. Liegt aber gleichzeitig dennoch ein Wärmebedarf vor, geht der Spitzenlastkessel in Betrieb, obwohl der Wärmebedarf noch über das BHKW gedeckt werden könnte. Ursache dafür ist oft ein fehlender hydraulischer Abgleich auf der Abnehmerseite aufgrund nicht richtig geregelter oder eingestellter Übergabestationen im Wärmenetz bzw. aufgrund von „Kurzschlüssen“ oder Überströmungen im Heizungsnetz. Dadurch gelangt warmes Vorlaufwasser in den Rücklauf, was zu hohen Rücklauftemperaturen und einer mangelnden Temperaturspreizung auf der Abnahmesseite führt.

Da die thermische Leistung von BHKW-Modulen im Normalfall nicht auf den maximalen Leistungsbedarf des Gesamtsystems ausgelegt ist, müssen zusätzliche Wärmeerzeuger – in der Regel Heizkessel – im Heizungssystem vorgesehen werden. Als weiteres zentrales Element in der Anlagenhydraulik werden in den meisten Fällen Pufferspeicher zur Zwischenspeicherung thermischer Energie eingebunden. Ein entsprechend groß dimensionierter Pufferspeicher kann die Laufzeit der BHKW-Anlage bei schwankender Leistungsabnahme verbessern. Die Einbindung von Pufferspeichern erfolgt in der Regel an zentraler Stelle, z. B. parallel zwischen den Wärmeerzeugern und Wärmeabnehmern als hydraulische Weiche.

Eine sorgfältige Planung und Umsetzung der hydraulischen Einbindung von BHKW sowie der Gesamthydraulik in Systemen mit BHKW ist von zentraler Bedeutung, um einen optimalen und störungsfreien Betrieb mit möglichst langen Laufzeiten des BHKW sicherstellen zu können. Fehler bei der hydraulischen Einbindung können durch regelungstechnische Eingriffe nachträglich meist nicht mehr oder nur unzureichend korri-

giert werden. Zudem besteht die Gefahr, dass größere regelungstechnische Eingriffe zum Ausgleich von hydraulischen Problemen dazu führen, dass das System dazu neigt sich „aufzuschwingen“.

Die wichtigsten Systemkomponenten von BHKW-Anlagen sind nachfolgend aufgeführt:

- Wärmeerzeuger (z. B. BHKW-Module, Mehrmodul-Anlagen, Heizkessel für Mittel-/Spitzenlast, usw.)

Wichtige Merkmale: Art der Wärmeerzeuger, Anzahl der Wärmeerzeuger im Gesamtsystem, Leistungsunterschiede der einzelnen Wärmeerzeuger bzw. Leistungsunterschiede zwischen Grundlast-BHKW und Spitzenlastkessel, hydraulische Einbindung / Verschaltungsmöglichkeiten (Reihenschaltung, Parallelschaltung)

- Wärmesenken (z.B. Heizkreise, Fernwärmenetze, Produktionsanlagen / Prozesse, Notkühler, usw.)

Wichtige Merkmale: Anforderung an das Vorlauftemperaturniveau (→ wichtig für die Einbindung), mögliche Spreizungen, Rücklauftemperaturniveau

- Wärmeauskopplung am BHKW (z.B. Gemischkühlkreis, Motorkreis, Abgaswärmetauscher)

Wichtige Merkmale: vorhandenes Rücklauf-Temperaturniveau (ist eine Einbindung von NT-Wärme möglich? / Brennwert-Nutzung grundsätzlich möglich?), bereitzustellendes Vorlauf-Temperaturniveau (Einbindung/interne Verschaltung Abgaswärmetauscher)

- Pufferspeicher

Wichtige Merkmale: Größe des Pufferspeicher, mögliche Spreizung und damit mögliche Speicherkapazität des Puffers

- Leitungen und Armaturen

Die Einbindung der Wärmeerzeuger kann parallel zueinander oder in Reihenschaltung erfolgen. In den nachfolgenden Abbildungen werden verschiedene Möglichkeiten und Systemschaltbilder für die hydraulische Einbindung von BHKW-Anlagen in ein Gesamtsystem mit Pufferspeicher und Spitzenlastkessel dargestellt.

In Abbildung 2 ist die grundlegende Parallelschaltung dargestellt. Das BHKW-Modul ist über den Pufferspeicher parallel zum Heizkessel und den Verbrauchern eingebunden. Die einzelnen Wärmeerzeuger können grundsätzlich unabhängig voneinander betrieben werden und die Heizkreise mit Wärme versorgen. Reicht die thermische Leistung des BHKW nicht mehr aus um die Wärmeabnehmer ausreichend mit Wärme zu versorgen, wird der Heizkessel zugeschaltet. Sinkt die Wärmeabnahme der Verbraucher, kann mit dem BHKW der Pufferspeicher beladen werden. Der Pufferspeicher dient gleichzeitig als hydraulische Weiche zur Entkopplung der Volumenströme auf Erzeuger- und Verbraucherseite.

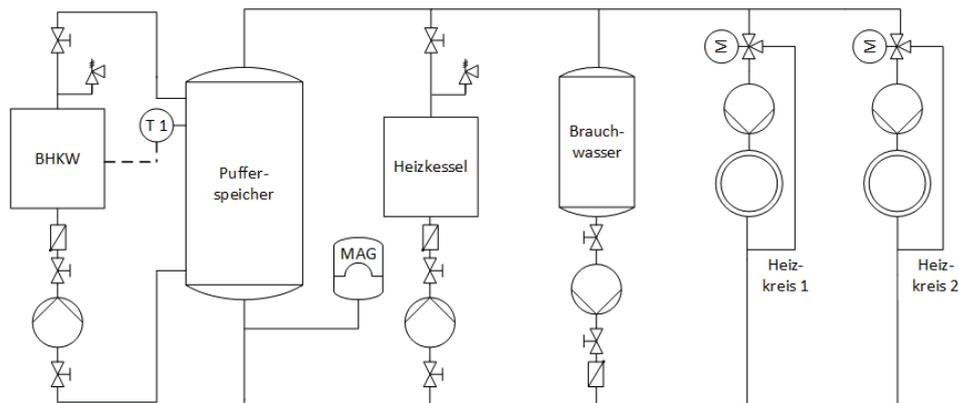


Abbildung 2: Parallelschaltung von Spitzenlastkessel und BHKW [KWE2012]

In Abbildung 3 ist der grundsätzliche Aufbau einer Reihenschaltung eines BHKW mit einem Pufferspeicher und einem Spitzenlastkessel dargestellt. Diese Art der Verschaltung ist vergleichsweise einfach und auch nachträglich ohne große Umbauten am Heizverteiler möglich, führt jedoch dazu, dass die Rücklauftemperatur zum Heizkessel grundsätzlich durch das BHKW angehoben wird, wodurch eine Nutzung des Brennwerteffekts im Heizkessel meist nicht mehr möglich ist. Andererseits bietet diese Verschaltungsart durch die Nachheizung über den Heizkessel die Möglichkeit, sehr hohe Vorlauftemperaturen zu erreichen, die vom BHKW-Modul alleine nicht ohne Weiteres zur Verfügung gestellt werden könnten.

BHKW-Anlagen sind auch als Stand-Alone-Wärmeerzeuger ohne zusätzlichen Heizkessel grundsätzlich realisierbar. Hierbei ist ein entsprechend großes Puffervolumen vorzusehen, dass auch zu Spitzenlastzeiten eine ausreichend hohe Wärmeleistung gewährleistet. Eine Auslegung des BHKW auf den Spitzenleistungsbedarf ist dagegen nicht sinnvoll, da dies zu einer sehr geringen Auslastung des Moduls und häufigen Start-Stopp-Vorgängen führen würde, was sich negativ auf die Lebensdauer und die Wirtschaftlichkeit der BHKW-Anlage auswirkt.

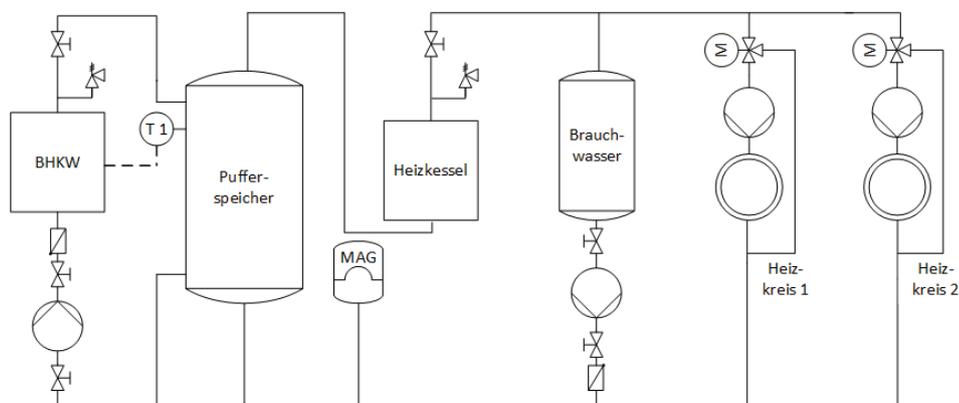


Abbildung 3: Reihenschaltung von Spitzenlastkessel und BHKW [KWE2012]

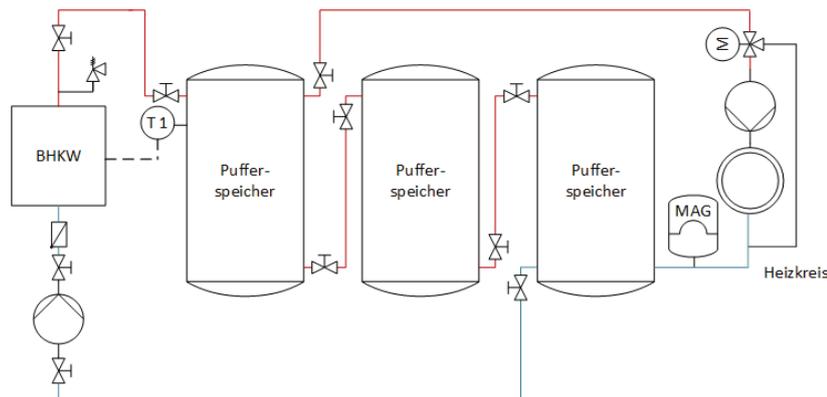


Abbildung 4: Reihenschaltung von mehreren Pufferspeichern [KWE2012]

Sind die notwendigen Pufferkapazitäten, z. B. aus Platzgründen, mit einem einzelnen Speicher nicht realisierbar, bietet sich die in Abbildung 4 dargestellte Kaskadenschaltung von Pufferspeichern an. Hierbei werden die Puffer – in dieser Abbildung von links nach rechts und jeweils von oben nach unten – von der BHKW-Anlage geladen.

Werden mehrere BHKW-Module in einer Anlage zusammengeschaltet, spricht man von einer Mehrmodulanlage. In Abbildung 5 ist ein Beispiel für die hydraulische Einbindung einer Mehrmodul-KWK-Anlage mit Verbrennungsmotor-Aggregaten dargestellt. Der Spitzenlastkessel ist im dargestellten Fall parallel zu den beiden BHKW-Modulen eingebunden. Als Besonderheit ist in diesem Schaltbild ein Notkühler zu erkennen, der notwendig ist, um die BHKW-Module auch bei fehlender Wärmeabnahme betreiben zu können. Dies kann z. B. für stromgeführte Betriebsweisen oder für den Notstrombetrieb erforderlich sein. Weiterhin ist die separate Einbindung der einzelnen BHKW-Kühlkreise (Ölkühlkreis / Ladeluft- und Motorkühlkreis) sowie des Abgaswärmetauschers in das Wärmeversorgungsnetz über jeweils eigene Wärmetauscher zu erkennen. Dieser komplexere Aufbau findet vorrangig bei BHKWs der größeren Leistungsklassen Anwendung, bei kleineren BHKW-Modulen werden die einzelnen Wärmeströme dagegen bereits intern im Modul zusammengeführt und über einen gemeinsamen Wärmetauscher geführt.

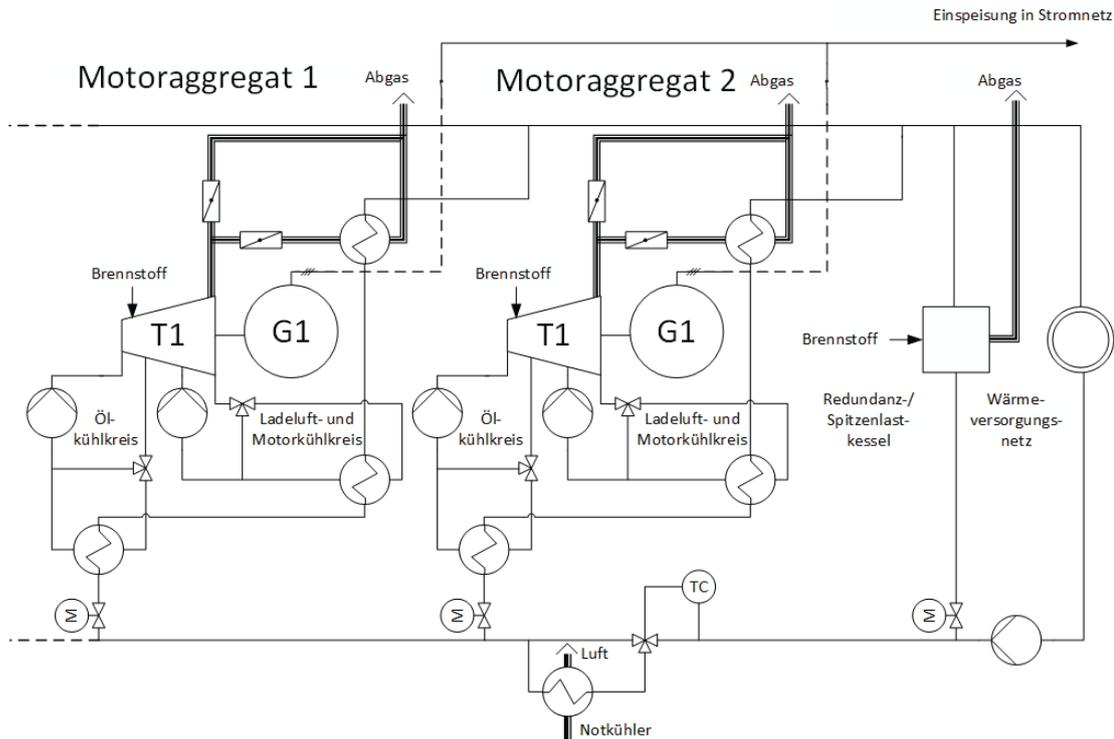


Abbildung 5: Prinzipschaltbild einer KWK-Anlage auf Basis von Diesel-/Ottomotoren
[Schaumann2010]

2.3 Betriebsstrategien für BHKW-Anlagen

Als grundlegende Betriebsstrategien können übergeordnet der „wärmegeführte“ und der „stromgeführte“ Betrieb einer BHKW-Anlage definiert werden. Zu unterscheiden ist hierbei, ob ein Betrieb des BHKW nur möglich ist, wenn eine Wärmeabnahme bzw. freie Kapazitäten im Pufferspeicher vorhanden sind („wärmegeführt“) oder ob ein Notkühler vorhanden ist, über den die Wärme bei vorrangig elektrischer Anforderung und fehlender Wärmeabnahme abgeführt werden kann („stromgeführt“). Nachrangig sind weitere Unterstrategien und Mischformen möglich. In Abbildung 6 sind verschiedene mögliche Betriebsstrategien für BHKW-Anlagen im Überblick dargestellt.

Eine weitere grundlegende Unterscheidung kann nach der Art der Leistungsanpassung getroffen werden. Im „taktenden Betrieb“ werden die BHKW-Module stets nur bei Nennlast betrieben, etwaige Leistungsschwankungen müssen über die vorhandenen Speicherkapazitäten ausgeglichen werden. Ist keine ausreichende Wärme- bzw. Stromabnahme mehr sichergestellt, wird das BHKW-Modul abgeschaltet. Vorteil dieser Betriebsweise ist, dass das BHKW-Modul stets im optimalen Betriebspunkt mit maximalem Wirkungsgrad läuft. Nachteilig können insbesondere bei einer ungünstigen Auslegung oder Regelung die häufigen Start-Stopp-Vorgänge sein, die zu einem erhöhten Verschleiß führen. In der Praxis beschränken die BHKW-Hersteller daher in ihren Spe-

zifikationen die maximal zulässige Anzahl von Starts pro Tag bzw. die minimal erforderliche Anzahl von Betriebsstunden pro Start.

Im „modulierenden Betrieb“ wird bei rückläufiger Leistungsanforderung die BHKW-Leistung gleitend oder in festen Schritten bis zu einer vorgegebenen Mindestleistung (in der Regel 35 % bis 50 % der Nennleistung) reduziert. Vorteil dieser Betriebsweise ist, dass die BHKW-Module in der Leistung besser nachgeführt werden können und länger in Betrieb gehalten werden, wodurch sich allzu häufige Start-Stopp-Vorgänge sowie Stillstandsverluste vermeiden lassen. Zudem lässt sich bei geeigneter Umsetzung des modulierenden Betriebs der KWK-Deckungsanteil an der Wärmeversorgung erhöhen. Nachteilig sind der bei Teillast in der Regel geringere elektrische Wirkungsgrad sowie die höheren spezifischen Wartungskosten¹. Zudem muss insbesondere bei Gasmotoren darauf geachtet werden, dass die vom Hersteller zugelassenen Mindestleistungen für den Dauerbetrieb nicht unterschritten werden, um Schäden an der Anlage zu vermeiden.

Die wärmegeführte Betriebsweise ist die verbreitetste übergeordnete Betriebsstrategie für BHKW-Anlagen. Die BHKW-Anlage wird dabei in der Regel auf die Deckung der Wärmegrundlast ausgelegt und wird – zumindest im Winter und in den Übergangsmonaten – im Dauerbetrieb gefahren. Eine Laufzeitoptimierung kann durch den Einsatz von Pufferspeichern erreicht werden. Grundlegend kann noch unterschieden werden, ob das BHKW taktend oder modulierend betrieben wird. Die erzeugte elektrische Energie kann je nach den maßgeblichen rechtlichen Rahmenbedingungen für die betreffende Anlage z. B. über eine Volleinspeisung ins öffentliche Netz eingespeist werden (meist EEG-Anlagen) oder am Anlagenstandort vorrangig selbst verbraucht werden, wobei lediglich der überschüssige Strom ins öffentliche Netz eingespeist wird (Überschusseinspeisung, meist Anlagen nach dem KWKG). Um eine Stromüberschusseinspeisung weitestgehend zu vermeiden, kann die BHKW-Leistung zusätzlich zum Wärmebedarf auch nach dem aktuellen Strombezug am Anlagenstandort geregelt werden („Netzbezugsregelung“). Hierbei wird über eine Leistungsmessung an der Übergabestelle zum öffentlichen Stromnetz die aktuell benötigte Ist-Leistung erfasst und die BHKW-Leistung entsprechend nachgeführt. Die Voraussetzung dafür ist, dass das BHKW grundsätzlich für den Modulationsbetrieb mit wechselnden Leistungen freigegeben ist und ein Wärmebedarf vorhanden ist, da die übergeordnete Betriebsweise weiterhin wärmegeführt ist.

Bei der stromgeführten Betriebsweise ist dagegen die benötigte elektrische Leistung die vorrangige Führungsgröße. Da hier ein Betrieb auch ohne Wärmeabnahme möglich sein muss, ist die Abfuhr von überschüssiger Wärme, z. B. über einen Notkühler, zwingend notwendig. Auch hier kann die „Netzbezugsregelung“ angewendet werden, wobei dann konsequent nach der elektrischen Leistungsvorgabe geregelt wird und über-

¹ Die Wartungskosten werden in der Regel pro Betriebsstunde des BHKW-Moduls verrechnet. Bei Modulationsbetrieb erhöhen sich die Betriebsstunden bzw. die pro Betriebsstunde bereitgestellte Energiemenge nimmt ab. Die spezifischen Wartungskosten pro kWh Energiebereitstellung steigen daher.

schüssige Wärme ungenutzt abgeführt wird. Weiterhin besteht die Möglichkeit, das BHKW ungeachtet des tatsächlichen Strom- und Wärmebedarfs stets bei Nennlast im Dauerbetrieb zu fahren, was eine typische Betriebsweise bei Biogasanlagen darstellt. Auch das gezielte Abfahren von elektrischen Lastspitzen zur Vermeidung von hohen Strombezugskosten (Lastmanagement) kann eine sinnvolle stromgeführte Betriebsstrategie darstellen.

Weitere interessante Optionen, die in den letzten Jahren für BHKW-Anlagen an Bedeutung gewonnen haben, sind strommarktorientierten Fahrweisen und die Bereitstellung von Systemdienstleistungen im elektrischen Netz (Regelenergie). Diese Betriebsweisen zählen zum stromgeführten Betrieb, wobei die Anforderung der BHKW-Anlage in diesem Fall nicht ausschließlich von der lokalen Abnahme abhängt, sondern übergeordnet erfolgt, z. B. durch einen Vermarkter oder den jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber. Auf die Bereitstellung von Systemdienstleistungen wird weiter unten gesondert eingegangen.

Der Betrieb des BHKW-Moduls erfolgt bei allen oben beschriebenen Betriebsweisen parallel zum öffentlichen Stromnetz (Netzparallelbetrieb). Davon abweichende Sonderformen mit jeweils projektspezifisch im Detail zu definierenden Betriebsweisen sind u. a. der Inselnetz-Betrieb (z. B. wenn am Standort der BHKW-Anlage kein öffentliches Netz verfügbar ist) oder der Netzersatz-Betrieb bei Ausfall der öffentlichen Stromversorgung. Da diese Sonderbetriebsformen in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielen und im Rahmen des Projektes nicht relevant sind, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

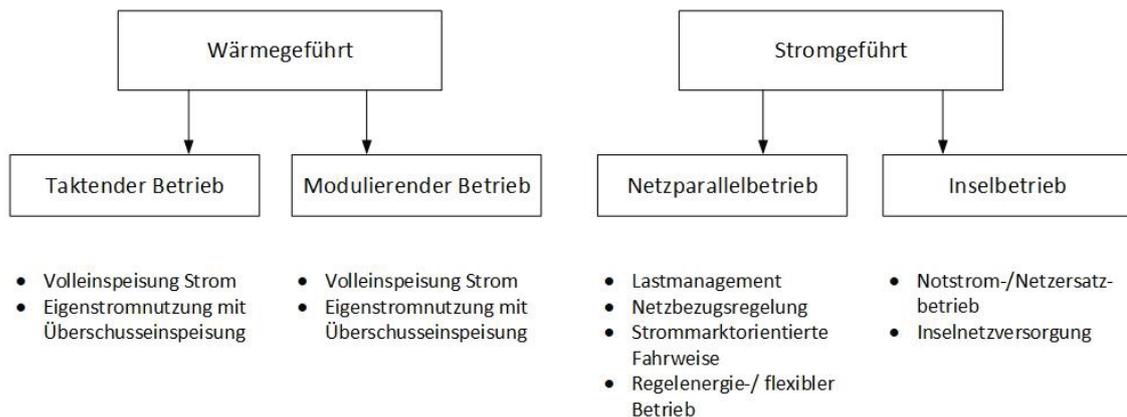


Abbildung 6: BHKW-Betriebsstrategien

2.5 Erbringung von Systemdienstleistungen

Sowohl bei wärmegeführter als auch bei stromgeführter Betriebsweise ist es möglich, mit KWK-Anlagen Systemdienstleistungen im elektrischen Netz anzubieten. Von praktischer Bedeutung für Blockheizkraftwerke ist dabei bisher lediglich die Frequenzhaltung im elektrischen Netz, die über die sogenannte Regelernergie gewährleistet wird. Derzeit sind in Deutschland drei Regelleistungsarten definiert, die als Produkte über ein Gebotsverfahren gehandelt werden und bei Bedarf vom jeweiligen Übertragungsnetzbetreiber angefordert werden [Lehnhoff2010], vgl. auch Tabelle 1:

- Minuten- bzw. Tertiärregelleistung (MRL)
- Sekundärregelleistung (SRL)
- Primärregelleistung (PRL)

Wichtig ist dabei die Unterscheidung zwischen negativer und positiver Regelernergie. Negative Regelernergie wird benötigt wenn im Netz eine Überfrequenz vorliegt – in diesem Fall werden zusätzliche elektrischer Verbraucher zugeschaltet oder elektrische Erzeugungseinheiten (z. B. BHKW) abgeschaltet. Liegt eine Unterfrequenz vor wird positive Regelleistung angefordert und elektrische Verbraucher werden abgeschaltet bzw. Erzeugungseinheiten werden zugeschaltet. Die technischen Anforderungen – und damit in der Regel auch die erzielbaren Erlöse – nehmen von der Minuten- über die Sekundär- und Primärregelleistung deutlich zu (vgl. Tabelle 1). Für BHKW-Anlagen sind in der Praxis derzeit in erster Linie die Minuten- und die Sekundärregelleistung relevant, da diese Produkte einzeln sowohl positiv als auch negativ gehandelt werden können und die geforderten Reaktionszeiten mit heutigen BHKW-Modulen meist problemlos eingehalten werden können. Ein typischer Anwendungsfall ist die Erbringung von negativer MRL oder SRL durch die Abschaltung oder Leistungsreduzierung von BHKW-Anlagen aus dem laufenden Betrieb heraus.

Da die Hürden für die direkte Teilnahme am Regelergergiemarkt relativ hoch sind und die erforderlichen gesicherten Leistungen durch Einzelanlagen in der Regel nicht erreicht werden, erfolgt die Vermarktung in der Praxis meist über Poolbetreiber, die verschiedene Erzeugungsanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk bündeln und damit auch die Besicherung der angebotenen Leistung sicherstellen. Der Anlagenbetreiber schließt dabei einen Vertrag mit dem jeweiligen Poolbetreiber, der die Vermarktung übernimmt und dafür einen Teil der Erlöse einbehält. Der Anlagenbetreiber muss lediglich sicherstellen, dass die Anlagen im angebotenen Zeitraum mit der angebotenen Leistung verfügbar ist und dem Poolbetreiber mitteilen falls dies, z. B. aufgrund von Störungen oder Wartungsarbeiten, nicht der Fall ist. Die Kommunikation mit der BHKW-Anlage erfolgt automatisiert über eine Fernsteuer-Schnittstelle (Energeregler), die vom jeweiligen Poolbetreiber zur Verfügung gestellt wird und mit der BHKW-Leistungsregelung verbunden wird. Zum Nachweis, dass die Bedingungen für die Regelleistung erfüllt werden, muss eine sogenannte Präqualifikation durchgeführt werden. Dabei muss nachgewiesen werden, dass die Kommunikationsschnittstelle funktioniert

und es muss ein vorgegebenes Prüfprofil in Form einer sogenannten Doppelhöckerkurve abgefahren werden. Ausgehend vom jeweiligen Betriebszustand muss dabei innerhalb der geforderten Reaktionszeiten zweimal hintereinander die angebotene Regelleistung angefahren und für einen definierten Zeitraum gehalten werden, anschließend muss der Ausgangszustand wieder erreicht werden.

Tabelle 1: Anforderungen an die Regelenergiebereitstellung

Regelenergieprodukt	Anforderungen	Mindestangebotsgröße	Handelbarkeit
Primärregelleistung (PRL)	Angebotene Leistung ($P_{el,PRL}$) muss innerhalb von max. 30 Sekunden an- und abgefahren werden können (Lastrampe: 3,33% $P_{el,PRL}/\text{sec}$)	Symmetrisch positiv/negativ ab ± 1 MW PQ-Leistung*	Wöchentliche Ausschreibung
Sekundärregelleistung (SRL)	Angebotene Leistung ($P_{el,SRL}$) muss innerhalb von max. 5 Minuten an- und abgefahren werden können (Lastrampe: 20,0% $P_{el,SRL}/\text{min}$)	Separat positiv/negativ ab ± 5 MW PQ-Leistung*	Wöchentliche Ausschreibung
Minutenregelleistung (MRL)	Angebotene Leistung ($P_{el,MRL}$) muss innerhalb von max. 15 Minuten an- und abgefahren werden können (Lastrampe: 6,67% $P_{el,MRL}/\text{min}$)	Separat positiv/negativ ab ± 5 MW PQ-Leistung*	Täglich positive und negative MRL mit jeweils sechs Zeitscheiben über 4 Stunden Dauer
Präqualifizierte Leistung			

2.6 Regelung von BHKW-Anlagen

2.6.1 Regelung nach der Rücklauftemperatur

Die einfachste Form einer „temperaturgeführten“ Regelung ist die Regelung nach der aktuellen Rücklauftemperatur zum BHKW. Überschreitet die Rücklauftemperatur einen festgelegten Schwellwert, schaltet das BHKW-Modul automatisch ab (taktender Betrieb) oder reduziert die Leistung (modulierender Betrieb). Die erneute Anforderung des Moduls bzw. die Freigabe des Nennlastbetriebs erfolgt wenn die Rücklauftemperatur die eingestellte Temperaturschwelle wieder unterschreitet, wobei in der Regel eine Hysterese berücksichtigt wird. Das Rücklauftemperaturniveau ergibt sich hierbei automatisch in Abhängigkeit der Wärmeabnahme der angebundenen Heizkreise oder Verbraucher.

Die wichtigste Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung dieser Regelungsart ist eine optimale hydraulische Einbindung in das Gesamtsystem. Ohne weitere Eingangsgrößen kann lediglich ein wärmegeführter Betrieb dargestellt werden. Als Schutzfunktion gegen Überhitzung ist eine rücklauftemperaturgeführte Abregelung üblicherweise bereits in der internen Modulsteuerung integriert.

2.6.2 Regelung nach dem Pufferladezustand

Generell wird die Installation eines Wärmespeichers zum Betrieb eines BHKW empfohlen, um Leistungsschwankungen abzupuffern und einen möglichst durchgängigen und störungsfreien Betrieb zu erreichen. Gerade wenn die Verbraucherseite (Heizkreise) nur über ein begrenztes Wasservolumen verfügt und sehr schnelle und kurzfristige Leistungsanforderungen auftreten, wird der Einsatz eines Pufferspeichers für eine optimale Anlagenregelung notwendig, da sonst ein häufiges „Takten“ auftritt.

Als weitere Möglichkeit einer „temperaturgeführten Regelung“ kann die Regelung somit nach der Temperatur im Pufferspeicher erfolgen. Da in Pufferspeichern in der Regel eine geschichtete Temperaturverteilung auftritt, ist hierbei darauf zu achten, eine geeignete Messstelle auszuwählen. Je nach Puffervolumen oder der Verschaltung von mehreren einzelnen Pufferspeichern kann anhand der Temperaturschichtung auch der Ladezustand des Pufferspeichers berechnet und als Führungsgröße herangezogen werden. Das BHKW-Modul wird dabei in der Regel bei einem vorgegebenen minimalen Ladezustand angefordert und bei einem maximalen Ladezustand abgeschaltet bzw. in der Leistung reduziert. Zur Reduzierung von Schaltzyklen ist auf eine entsprechende Hysterese oder Verzögerungszeit zu achten.

2.6.3 Stromgeführte Regelung

In der einfachsten Form der stromgeführten Regelung erfolgt eine direkte manuelle Vorgabe der elektrischen Sollleistung am BHKW-Modul. Die eingestellte Leistung wird

dann unabhängig von weiteren Führungsgrößen bis zum nächsten manuellen Eingriff gehalten, weshalb sich diese Regelungsart lediglich für einfache Anwendungen eignet, wie beispielsweise Biogasanlagen mit Volleinspeisung ins öffentliche Stromnetz.

Sollen dagegen Lastkurven abgefahren werden, müssen die Anforderung des BHKW-Moduls und die Leistungsvorgabe automatisiert mittels einer übergeordneten Regelung erfolgen. Dies kann z. B. durch die Vorgabe von Fahrplänen in der übergeordneten Leittechnik geschehen oder über automatisierte Vorgänge. So kann z. B. die Leistungsvorgabe an eine Maximumüberwachung der elektrischen Verbraucher gekoppelt werden, die bei Überschreiten einer vorgegeben Leistungsspitze das BHKW anfordert. Die Leistungsvorgabe kann auch von extern erfolgen, z. B. wenn das BHKW in die Direktvermarktung oder die Regellenergievermarktung eingebunden ist.

Eine Unterform der stromgeführten Regelung ist die sogenannte Netzbezugsregelung. Hierbei erfolgt die Regelung des BHKW nach der tatsächlichen elektrischen Bezugs-/Verbrauchsleistung am Netzübergabepunkt des Anlagenstandortes (z. B. eine Liegenschaft oder ein Betriebsstandort) mit der Zielsetzung, den Strombezug aus dem öffentlichen Netz möglichst zu minimieren und gleichzeitig eine Stromüberschusseinspeisung durch das BHKW zu vermeiden. Zur Netzbezugsregelung muss am Übergabe- oder Einspeisepunkt eine elektrische Leistungsmessung vorhanden sein, die die aktuelle Bezugsleistung aus dem öffentlichen Netz erfasst und an die BHKW-Steuerung weitergibt. Das BHKW-Modul regelt dann seine elektrische Leistung innerhalb der minimalen und maximalen Leistungsgrenzen so nach, dass nach Möglichkeit ein Netzbezug von Null erreicht wird, d. h. kein Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen, aber auch kein überschüssiger Strom eingespeist wird. Es lassen sich zwei grundlegende Varianten der Netzbezugsregelung unterscheiden.

Variante A (Betriebsweise übergeordnet wärmegeführt):

Das BHKW-Modul wird bei dieser Variante grundsätzlich wärmegeführt betrieben und ist ausgehend vom thermischen Bedarf dimensioniert. Solange ein Wärmebedarf vorhanden ist, soll das BHKW den elektrischen Bedarf im jeweiligen Hausnetz decken und keinen Überschussstrom in das öffentliche Netz einspeisen:

- ist der elektrische Bedarf am Standort kleiner als die Nennleistung des BHKW, regelt das BHKW bis zu einer unteren Leistungsgrenze (z. B. 50 % der Nennleistung) dem tatsächlichen Leistungsbedarf nach („Nullbezug“); hierbei ist ein Leistungs- und Zeitraster mit entsprechender Hysterese vorzugeben
- ist der elektrische Bedarf größer als die Nennleistung, wird das BHKW bei Nennlast betrieben und der verbleibende Bedarf aus dem öffentlichen Netz bezogen
- ist kein ausreichender Wärmebedarf am Standort vorhanden, wird das BHKW abgestellt; bei modulierender Betriebsweise wird zunächst die Leistung redu-

ziert und erst bei Unterschreiten der unteren Leistungsgrenze (in der Regel 50 % der Nennleistung) abgestellt.

Variante B (Betriebsweise übergeordnet stromgeführt):

Die Regelung erfolgt grundlegend wie oben beschrieben, das BHKW ist bei dieser Betriebsstrategie jedoch meist orientiert am elektrischen Bedarf dimensioniert:

- das BHKW folgt innerhalb der minimalen und maximalen Leistungsgrenze und der vorgegeben Ausregelzeit und Hysterese dem elektrischen Bedarf im Hausnetz
- kann die Wärme nicht abgenommen werden, wird diese über eine geeignete Wärmesenke (z. B. Notkühler) abgeführt

2.7 Zustandsgraph nach VDI 3814

Die möglichen Betriebszustände von Automationssystemen, wie sie zur Regelung von Energiesystemen für die Gebäudeenergieversorgung eingesetzt werden, lassen sich zweckmäßigerweise in sogenannten Zustandsgraphen nach VDI 3814 Blatt 6 abbilden. Dabei ist der Zustand folgendermaßen definiert: „Situation im Lebenszyklus einer Anlage, während die Anlage bestimmten Bedingungen unterliegt, bestimmte Aktionen ausführt oder auf eine bestimmtes Ereignis wartet“ [VDI3814]. Diese Bedingungen, Aktionen und Ereignisse werden nach VDI 3418 als Informationspunkte bezeichnet. Im Rahmen des Vorhabens wurden Zustandsgraphen eingesetzt, um die Regelsysteme und Betriebszustände der betrachteten BHKW-Anlagen übersichtlich darstellen und analysieren zu können.

Im Folgenden werden anhand eines fiktiven Minimalbeispiels einer BHKW-Anlage mit einem BHKW-Modul und einem Spitzenlastkessel der Aufbau des Zustandsgraphen (Abbildung 7) und der zugehörigen Tabellen (Tabelle 2 und Tabelle 3) erläutert. Alle möglichen Zustände, die die Energieerzeugungsanlagen einnehmen können, werden im Zustandsgraphen und den dazugehörigen Tabellen aufgezeigt. In Tabelle 2 sind die möglichen **Zustände** der Beispielanlage aufgelistet.

Tabelle 2: Zuordnung von Zuständen und Betriebsarten

Zustandsnummer	Nutzungsart (Zustand)	Betriebsmodus
1	BHKW aus, Spitzenlastkessel aus	AUS (Schutz, Vorlauftemperatur zu hoch)
2	BHKW an, Spitzenlastkessel aus	BHKW
3	BHKW an, Spitzenlastkessel an	BHKW + Spitzenlastkessel (Volllast)

Die Bedingungen, Aktionen und Ereignisse werden in einer Zuordnungstabelle (Tabelle 3) definiert. Sie erhalten eine laufende Nummer „Nr.“ als Kürzel für die Datenpunktbenennung. Die Zeilennummer der Gebäudeautomations-Funktionsliste „Zeilen-Nr. GA-FL“ ordnet direkt ineinandergreifende Bedingungen, Aktionen und Ereignisse zu. Die im Zustandsgraphen auftretenden „Kurzzeichen“ werden separat gelistet und ihr Wert (meist 1=wahr und 0=falsch) sowie eine genauere Beschreibung werden in der Spalte „Logische Zuordnung“ getroffen.

Die oben genannten **Bedingungen** (genauer Übergangsbedingungen), die einen Wechsel der Zustände hervorrufen können, sind in Tabelle 3 als Eingänge definiert. **Aktionen** werden als Ausgänge bezeichnet und geben Auskunft über den Betriebszustand bzw. die Betriebsart der BHKW-Anlage. Dabei kann ein Zustand mehrere Betriebsarten ausführen. **Ereignisse** sind wiederum Übergangsbedingungen. Des Weiteren können noch Merker und Zeitglieder auftauchen. Merker können auftretende Eingänge, Ausgänge und Zeitglieder speichern und vom Benutzer ausgelesen werden. Zeitglieder werden als Wartezeiten für Übergangszeiten der Zustände benutzt.

Tabelle 3: Zuordnungstabelle zum Zustandsgraphen

Nr.	Datenpunkt Benennung	Zeilen-Nr. GA-FL	Kurz-Zeichen	Logische Zuordnung
Eingänge:				
1	Vorlauftemperatur in den Heizkreis	2	TS1	TS1=1: Vorlauftemperatur > Sollvorlauftemperatur 1
2	Vorlauftemperatur in den Heizkreis	2	TS2	TS2=1: Vorlauftemperatur > Sollvorlauftemperatur 2
3	Vorlauftemperatur in den Heizkreis	2	TG1	TG1=1: Vorlauftemperatur < Sollgrenztemperatur 1
4	Vorlauftemperatur in den Heizkreis	2	TG2	TG2=1: Vorlauftemperatur < Sollgrenztemperatur 2
Ausgänge:				
5	AUS	2	A	A = 1: Vorlauftemperatur zu hoch oder manuelles Abschalten
6	BHKW	2	B	B = 1: BHKW Betrieb
7	BHKW + Spitzenlastkessel	2	BS	BS = 1: BHKW-Betrieb mit Spitzenlastkessel
Zeitglieder:				
8	Schaltdauer Heizung A-B-BS	2	T5	T5=1: Umschaltverzögerung

Im Zustandsgraphen (Abbildung 7) werden die **Zustände** mit einem Vierkant und einer Zustandsnummer gekennzeichnet. Die Eingänge (**Übergangsbedingungen**) werden rechts über dem Vierkant angezeichnet und die Ausgänge (**Aktionen**) werden rechts neben dem Vierkant angegeben. Es gibt immer einen Startzustand von dem aus auf alle anderen Zustände übergegangen werden kann. Zweckmäßigerweise ist der Start-

zustand immer der AUS-Zustand, da aus Sicherheitsgründen von jedem Zustand aus manuell abgeschaltet werden können muss. Ist ein Zustand in einem Vierkant definiert, kann er vereinfacht als Kreis mit der jeweiligen Zustandsnummer dargestellt werden.

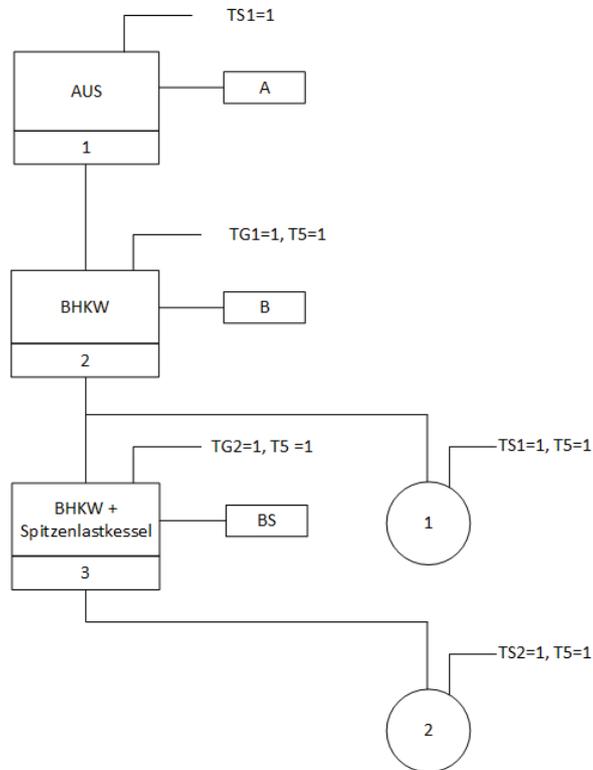


Abbildung 7: Zustandsgraph für das Beispiel BHKW mit Spitzenlastkessel

Im Beispiel in Abbildung 7 wird vom AUS-Betrieb (Zustand 1) ausgegangen. Nach einer Wartedauer (Umschaltverzögerung T_5) schaltet die Regelung in den Zustand 2 (BHKW) wenn die Bedingung $TG_1=1$ erfüllt ist. Das BHKW startet wenn die Vorlauftemperatur zu den Heizkreisen die Sollwerttemperatur für die Dauer der Umschaltverzögerung T_5 unterschreitet. Im Zustand 2 kann das BHKW modulierend von Teillast bis Volllast betrieben werden. Im Fall, dass die Vorlauftemperatur zu den Heizkreisen den Sollvorlauftemperaturwert $TG_2=1$ für die Dauer der Umschaltverzögerung T_5 unterschreitet, geht die Regelung in den Zustand 3 (BHKW + Spitzenlastkessel) über). Von hier kann die Regelung zurück zum Zustand 2 umschalten, wenn die Vorlauftemperatur zu den Heizkreisen die Sollvorlauftemperatur $TS_2=1$ für die Dauer der Umschaltverzögerung T_5 überschreitet. Das BHKW wird ausgeschaltet wenn die Vorlauftemperatur zu den Heizkreisen die Sollwerttemperatur $TS_1=1$ für die Dauer der Umschaltverzögerung T_5 überschreitet. Das BHKW kann außerdem jederzeit manuell abgeschaltet werden.

3 Methodik

3.1 Energiemonitoring

Als Werkzeug für die Datenerfassung- und -auswertung im Vorhaben wurde eine plattformunabhängige Softwarelösung für das Energiemanagement eingesetzt. Zur Auswahl des geeigneten Systems wurde im Vorfeld eine Marktanalyse durchgeführt. Einen guten Überblick über die auf dem Markt verfügbaren Lösungen bieten der EMS.Marktspiegel der EnergieAgentur.NRW [EANRW17] und die Liste der förderfähigen EMS-Software der BAFA [Bafa17]. Der EMS.Marktspiegel listet über 100 Produkte verschiedener Anbieter auf.

Als Lösung wurde eine Stand-Alone Software gesucht, welche weitestgehend hardwareunabhängig eingesetzt werden kann. Daher wurden alle produkt- oder herstellereingebundene EMS-Softwaresysteme, wie sie z. B. für GLT- (Gebäudeleittechnik), CAFM- (Computer-Aided Facility Management) oder EDM-Systeme (Energy Data Management) eingesetzt werden, nicht betrachtet. Als weitere Bewertungskriterien wurden u.a. folgende Punkte definiert:

- Einfache Bedienung der Software
- Schnelle Bearbeitung der Daten
- Webfähigkeit des Systems
- Hohe IT-Kompatibilität und gute Kommunikation mit Feldgeräten
- Umfassende Auswertungs- und Darstellungsmöglichkeiten der Daten
- Niedrige Kosten

Ausgehend von diesen Anforderungen wurde im Rahmen des Projekts das Energiemanagementsystem „e3m“ der Fa. Emation GmbH ausgewählt, das vom Projektpartner LEA Lean Energy Services GmbH implementiert und als Softwareservice zur Verfügung gestellt wurde. Diese Lösung überzeugte anhand von folgenden Punkten:

- Verwaltung großer Datenmengen durch Datenbanktechnologie
- Flexibles und gut handhabbares Reportingsystem mit der Möglichkeit zur Generierung einfacher und komplexer Reports
- Integriertes Rechentool zur Erzeugung und Verarbeitung von Zeitreihen
- Mobile Lösung durch Webfähigkeit

Mit Hilfe des Energiemanagementsystems ist es möglich, sämtliche Energiedaten einer Anlage zu erfassen und als Rohdaten zu speichern und zu verwalten. Des Weiteren können diese Rohdaten aufbereitet und Kennzahlen individuell ermittelt werden. Anhand dieser Kennwerte können Auswertungen erstellt werden um den Betrieb der Anlage zu analysieren und bewerten zu können. Beispielsweise ist es möglich anhand

von Benchmarks, direkten Vergleichen und Langzeitanalysen die Wirtschaftlichkeit einer Anlage zu betrachten oder eine technische Prozessoptimierung durchzuführen.

Die Daten des Energiemanagementsystems können aus unterschiedlichen externen Quellen stammen. Es ist beispielsweise möglich, die Daten direkt per Email oder die Dateien per Download von einem FTP-Server zu importieren. Dabei werden u.a. die CSV- und XML-Dateiformate unterstützt. Es ist außerdem möglich, CSV-Dateien über die Bedienoberfläche des „e3m“-Systems hochzuladen oder Werte über manuelle Eingaben per Hand hinzuzufügen.

Im e3m-System werden sogenannte Datenpunkte abgelegt. Diese dienen dazu, die gespeicherten historischen Daten mit deren Verwendung im System zu verbinden (z. B. in Diagrammen oder Formeln). Für jeden Datenpunkt werden bestimmte Eigenschaften definiert. Zu diesen Eigenschaften gehören u. a.:

- Datenpunktname
- Beschreibung des Datenpunkts
- Einheit
- Aggregationsmodus
- Interpolationsmodus
- Quellename

Unter dem Aggregationsmodus versteht man die Berechnungsmethode für Tages-, Wochen, Monats- und Jahreswerte. Beispielsweise können Aggregationsmodi wie Minimum, Maximum, Summe oder Mittelwert bis hin zu Zählerständen oder Integralen ausgewählt werden. Der Interpolationsmodus beschreibt das Berechnungsverhalten für Berechnungen zu Zeitpunkten an denen keine Werte gespeichert sind.

Berechnungen auf Basis der vorhandenen Daten lassen sich mit Hilfe von Formeln durchführen. Es lassen sich sämtliche Datenpunkte als auch andere Formeldatenpunkte miteinander verrechnen. Hierzu stehen u.a. folgende Operatoren zur Verfügung:

- Arithmetische Operatoren (+, -, *, /, ^, sin, cos, ...)
- Vergleichsoperatoren (>, <, =, ...)
- Logische Verknüpfungen (UND, ODER, ...)
- Sonderfunktionen (MAX, MIN, WENN, Aggregationsfunktionen, ...)

Die Datenpunkt- und Formelwerte können in Diagrammen visuell dargestellt werden. In einem Diagramm lassen sich mehrere Datenpunkte gleichzeitig darstellen. Es stehen eine Vielzahl von Diagrammtypen zur Auswahl, wie z.B.:

- Liniendiagramme (vgl. Abbildung 8)
- Säulendiagramme (vgl. Abbildung 9)
- Jahresdauerlinien (vgl. Abbildung 10)
- Rasterdiagramme oder „Carpet Plots“ (vgl. Abbildung 11)

Als Basis für die Darstellung einer Jahresdauerlinie dient ein beliebiger Lastgang. Die Werte des Lastgangs werden im Energiemanagementsystem automatisch der Größe nach geordnet und als Dauerlinie dargestellt. Die Konfiguration der x- und Zeitachse erfolgt ebenfalls automatisch im Energiemanagementsystem. In Abbildung 10 ist als Beispiel die elektrische Leistung eines BHKW als Jahresdauerlinie dargestellt.

Als Basis für die Erstellung eines Rasterdiagramms dient gewöhnlich eine Temperatur die in hoher zeitlicher Auflösung aufgenommen wurde. Es können allerdings auch andere Datenpunkte als Rasterdiagramm dargestellt werden. Die Datenpunktwerte werden im Rasterdiagramm als Farbe dargestellt. Zur Definition dient die Farbskala auf der linken Seite des Diagramms. Die x- und y-Achsen haben unterschiedliche zeitliche Auflösungen (x-Achse Tage und y-Achse Uhrzeit). So können Muster und periodisch auftretende Phänomene erkannt werden. In Abbildung 11 ist beispielhaft eine Pufferspeichertemperatur im Rasterdiagramm dargestellt. Auf der x-Achse sind hier Tage dargestellt und auf der y-Achse die Tagesstunden von 0 h bis 24 h².

Es können auch unterschiedliche Diagrammtypen miteinander kombiniert werden. Die Zeitachsen lassen sich im „e3m“-System individuell einstellen. Außerdem lassen sich die Datenpunkte ihrem Aggregationsmodus entsprechend als Tages-, Wochen-, Monats- oder Jahreswerte darstellen. Die Diagramme und Formeln werden beim Hinzufügen von neuen Datenwerten automatisch aktualisiert. Dies ermöglicht eine besonders schnelle und effektive Auswertung der Daten nachdem die Berechnungen und Diagramme im „e3m“-System erstmalig eingerichtet sind.

² Der y-Skalenwert in der Einheit „h“ entspricht in der hier gewählten Darstellung des Rasterdiagramms der jeweiligen Uhrzeit, also z. B. 10 h = 10 Uhr; diese Darstellungsweise wird in der Folge so beibehalten

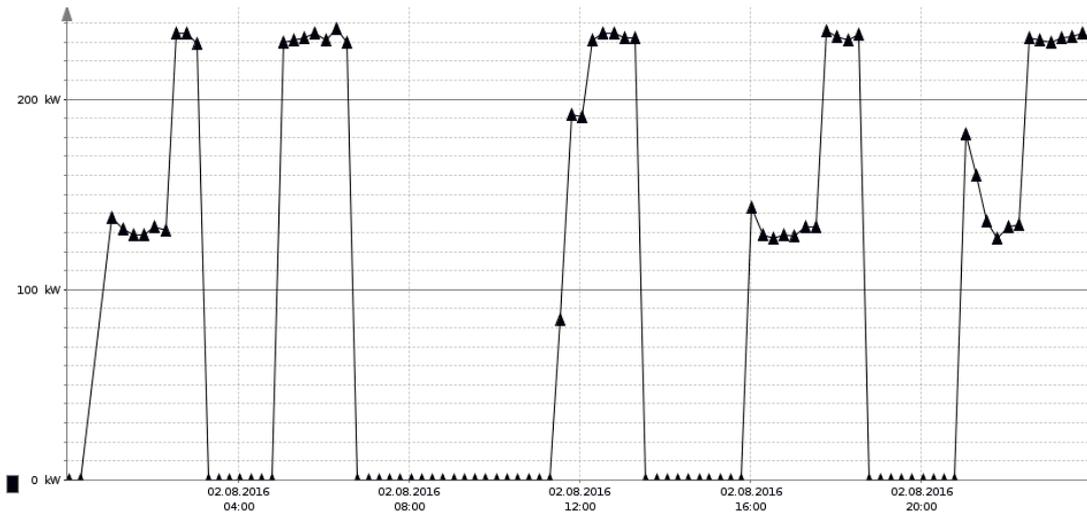


Abbildung 8: Beispiel Liniendiagramm

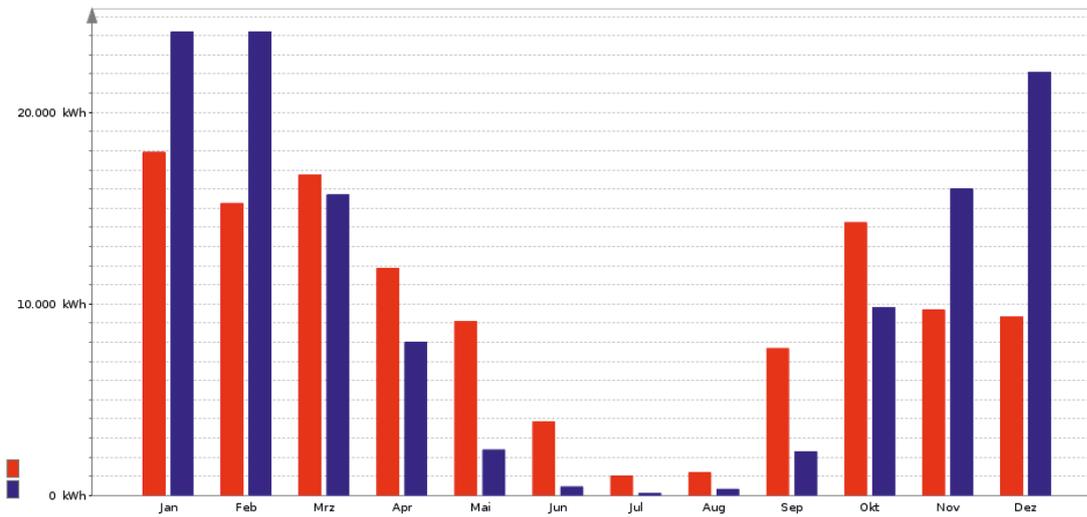


Abbildung 9: Beispiel Säulendiagramm

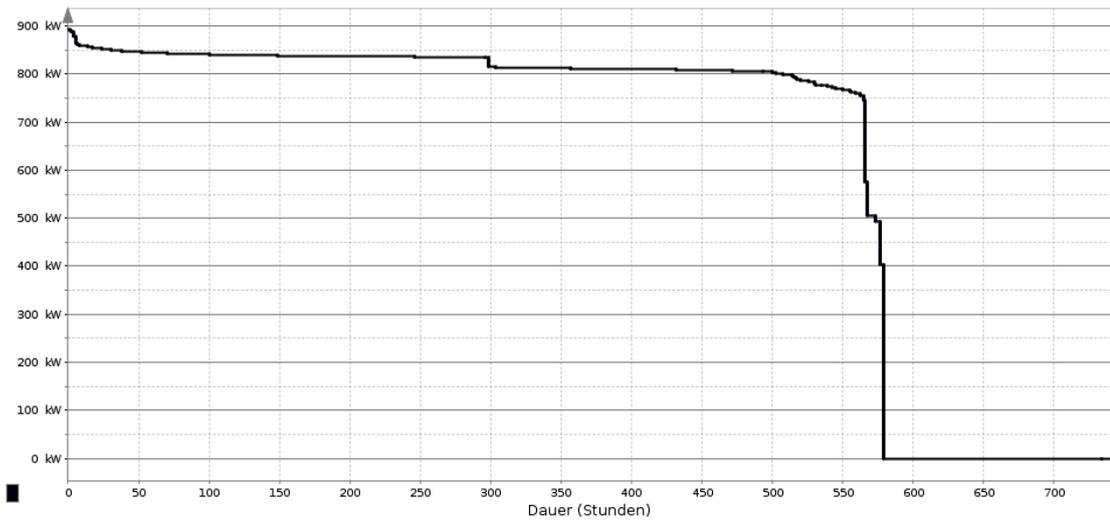


Abbildung 10: Beispiel Jahresdauerlinie

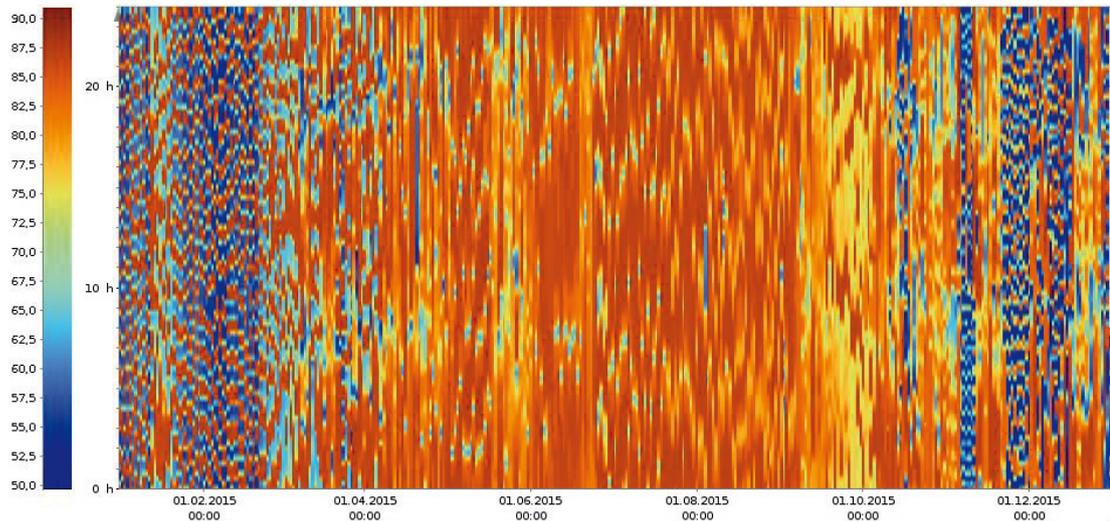


Abbildung 11: Beispiel Rasterdiagramm

3.2 Bewertungskriterien

3.2.1 Technische Bewertungskriterien

3.2.1.1 Verfügbarkeit

In Bezug auf eine BHKW-Anlage wird die verfügbare Zeit als die Zeit bezeichnet, in der die Anlage entweder in Betrieb ist oder bereitsteht um bei Empfang eines Anforderungssignals sofort in Betrieb gehen zu können. Die Verfügbarkeit einer BHKW-Anlage versteht sich als das Verhältnis aus dieser Betriebs-/Bereitschaftszeit zum gesamten Betrachtungszeitraum. Um verfügbar zu sein, muss die BHKW-Anlage eine Vielzahl an Bedingungen erfüllen, wie z. B.:

- Es dürfen keine Störungen vorliegen
- Es muss ausreichend Brennstoff für den Betrieb des BHKW bereitstehen
- Alle Wartungen und Instandhaltungen müssen erfolgreich absolviert worden sein.

3.2.1.2 Betriebsstunden

Betriebsstunden dienen als Maß für die aktive Betriebszeit eines BHKW-Moduls und werden in der Regel über einen Betriebsstundenzähler erfasst. Es wird grundsätzlich zwischen aktivem Betrieb und Stillständen unterschieden. Als Stillstände zählen:

- Zeiten in denen die Anlage zwar verfügbar ist, aber keine Anforderung erhält.
- Zeiten in denen eine Instandhaltung oder Wartung der Anlage durchgeführt wird
- Zeiten in denen es zu Ausfällen einer Anlage aufgrund von Störungen, Schäden oder Verschleiß kommt

3.2.1.3 Volllaststunden

Eine weitere wichtige Kenngröße sind die jährlichen Volllaststunden (auch als Vollbenutzungsstunden bezeichnet) als Maß für die Auslastung eines BHKW-Moduls. Die Volllaststunden sind definiert als der Quotient aus der geleisteten Jahresarbeit und der Nennleistung der Anlage und unterscheiden sich damit von den tatsächlichen Betriebsstunden pro Jahr.

Eine BHKW-Anlage könnte bei ununterbrochenem Dauerbetrieb mit Nennleistung maximal 8.760 Volllaststunden im Jahr erreichen, was in der Regel jedoch schon aufgrund der notwendigen Wartungsarbeiten nicht der Fall sein wird. Typische Volllaststunden für den wärmegeführten Betrieb liegen im Bereich 4.000 bis 6.000 Stunden pro Jahr. Eine zusätzliche Unterscheidung kann zwischen „elektrischen“ und „thermischen“ Volllaststunden getroffen werden, je nachdem ob auf die elektrische oder thermische Nennleistung der Anlage abgestellt wird. Bei Heizkesseln bezieht sich die Angabe der

Volllaststunden in der Regel auf die thermische Leistung. Bei BHKW-Anlagen ist dagegen der Bezug auf die elektrische Leistung üblich und wird so auch in einschlägigen Rechtsvorschriften angewendet, wie z. B. dem Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz [KWKG15] [IfE 2014].

- Elektrische Volllaststunden:

$$VBh_{el} = \frac{W_{el}}{P_{el}}$$

- Thermische Volllaststunden:

$$VBh_{th} = \frac{W_{th}}{P_{th}}$$

3.2.1.4 Modulationsfaktor

Um den prozentualen Anteil Modulationsbetrieb (Verhältnis Teillastbetrieb zu Nennlastbetrieb) bestimmen zu können, wird im Folgenden ein Modulationsfaktor eingeführt, der sich als Quotient aus den rechnerischen Vollbenutzungsstunden und den tatsächlichen Betriebsstunden berechnet. Diese Kenngröße beinhaltet auch die Teillastphasen bei An- und Abfahrvorgängen:

$$M = \frac{VBh}{Bh}$$

3.2.1.5 Startanzahl

Ein wichtiges Bewertungskriterium ist Anzahl der Startvorgänge pro Betriebsstunde einer BHKW-Anlage. Da jeder Startvorgang mit einer hohen mechanischen Belastung des Motors verbunden ist, geben viele BHKW-Hersteller eine Mindestbetriebsstundenzahl pro Startvorgang an, die nach Möglichkeit nicht unterschritten werden sollte, um erhöhtem Verschleiß vorzubeugen. Die Einhaltung einer definierten Mindestbetriebsstundenzahl pro Startvorgang dient oft als Kriterium für die Herstellergewährleistung. Bei Überschreiten dieser Grenzen wird das Modul außerhalb der Spezifikationen betrieben und es droht ein Verlust der Gewährleistungsansprüche bzw. die Wartungskosten erhöhen sich.

3.2.1.6 Nutzungsgrade

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 Abfahr-

vorgänge 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 aufgliedert. 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 die insgesamt abgegebene Energie im Verhältnis zum Energieeinsatz bezeichnet [FW308] [IfE 2014].

- Elektrischer Nutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{W_{el}}{W_{Br}} = \frac{W_{el}}{m_{Br}H_i}$$

- Thermischer Nutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{th} = \frac{W_{th}}{W_{Br}} = \frac{W_{th}}{m_{Br}H_i}$$

- Gesamtnutzungsgrad

$$\bar{\eta}_{el} = \frac{W_{el} + W_{th}}{W_{Br}} = \frac{W_{el} + W_{th}}{m_{Br}H_i}$$

3.2.1.7 Stromkennzahl

Die leistungsbezogene Stromkennzahl bezeichnet das Verhältnis von elektrischer Leistung zu thermischer Leistung einer BHKW-Anlage. Analog zur Unterscheidung nach Wirkungsgrad und Nutzungsgrad lässt sich zwischen einer leistungsbezogenen Stromkennzahl in einem stationären Betriebspunkt und der arbeitsbezogenen Stromkennzahl über einen längeren Betrachtungszeitraum unterscheiden [IfE2014].

- Leistungsbezogene Stromkennzahl

$$\sigma_P = \frac{P_{el}}{P_{th}} = \frac{\eta_{el}}{\eta_{th}}$$

- Arbeitsbezogene Stromkennzahl

$$\sigma_W = \frac{W_{el}}{W_{th}} = \frac{\bar{\eta}_{el}}{\bar{\eta}_{th}}$$

3.2.1.8 Thermische Speicherkapazität und Ladezustand von Wärmespeichern

Unter der thermischen Speicherkapazität versteht man die Menge an Wärme, die in einem Wärmespeicher unter Berücksichtigung der erforderlichen Systemtemperaturen gespeichert werden kann. Diese ist in erster Linie vom Fassungsvermögen des Speichers und von der spezifischen Wärmekapazität des Speichermediums abhängig. Eine wichtige Kenngröße zur Beurteilung der verfügbaren Speicherkapazität pro installierter thermischer Leistung ist das spezifische Pufferspeichervolumen:

$$v_{Puffer} = \frac{V_{Puffer}}{P_{th}}$$

Zu beachten ist dabei jedoch, dass die thermische Speicherkapazität von der Temperaturspreizung im Heizungssystem abhängt und daher keine konstante Größe ist. In der Praxis ist die nutzbare thermische Speicherkapazität relevant. Der Ladezustand eines Wärme-/Pufferspeichers kann anhand der Temperaturschichtung bestimmt werden, wobei die maximale Temperatur im Heizungsnetz (i.d.R. die max. Vorlauftemperatur) die Obergrenze für die Beladung und die minimale Temperatur (i.d.R. die min. Rücklauftemperatur) die Untergrenze darstellt.

3.2.1.9 Temperaturspreizung

In Bezug auf eine BHKW-Anlage ist insbesondere die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf eines Heizsystems von Interesse. Grundsätzlich wird eine möglichst hohe Temperaturspreizung auf einem insgesamt möglichst niedrigen Temperaturniveau angestrebt, da man dadurch die Wärmeverluste sowie den Volumenstrom und Pumpstrombedarf im Heizsystem reduzieren kann. Zu beachten ist hierbei, dass für BHKW-Module in der Regel eine Mindestrücklauftemperatur erforderlich ist, die z. B. über eine externe oder interne Rücklauftemperaturanhebung sichergestellt werden kann. Dagegen ist für die Brennwertnutzung eine möglichst niedrige Rücklauftemperatur anzustreben.

3.2.2 Wirtschaftliche Bewertungskriterien

Für die wirtschaftliche Bewertung der im Projekt umgesetzten Optimierungsmaßnahmen wurde eine einfache Methodik in Anlehnung an die Vollkostenrechnung nach VDI 2067 [VDI2067] angewendet. Da im Projekt keine investiven Maßnahmen betrachtet wurden, wurden lediglich die verbrauchs- und betriebsgebundenen Kosten sowie die Einnahmen aus der Strom- bzw. Wärmegutschrift angesetzt. Die Wärmegutschrift wurde auf Basis einer äquivalenten Wärmeerzeugung in einem Gaskessel mit einem Nutzungsgrad von 90 % unter Annahme gleicher Brennstoffkosten wie für das BHKW-Modul angesetzt. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden folgende Rahmenbedingungen als Ausgangsniveau festgelegt. Die Einflussgrößen „Stromgutschrift“ und „Brennstoffpreis“ wurden dabei in einer Sensitivitätsanalyse um jeweils $\pm 50\%$ variiert:

- Erdgaspreis: 3,5 Cent/kWh_{Hi}
- Wärmegutschrift: 3,9 Cent/kWh_{Hi}
- Stromgutschrift: 14,5 Cent/kWh_{el}
- Instandhaltungskosten nach ASUE BHKW-Kenndaten [ASUE2014]

$$k_{Instand} = 6,2728 * P_{el}^{-0,283} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}_{el}} \right]$$

3.2.3 Ökologische Bewertungskriterien

3.2.3.1 Primärenergieeinsparung

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. Die Primärenergieeinsparung berechnet sich demnach zu:

$$PEE = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el}}{\eta_{el,REF}} + \frac{\eta_{th}}{\eta_{th,REF}}}$$

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 zulässig, da die Verfahren nicht harmonisiert sind [IfE2014].

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 ab 2016 ein Referenzwirkungsgrad von 53,0 % und für die entsprechende ungekoppelte Wärmeerzeugung ein Wert von 92 % festgelegt. Dabei handelt es sich beispielsweise beim Referenzsystem für die Stromerzeugung um ein erdgasbetriebenes Gas- und Dampfkraftwerk (GuD) und bei der Wärmeerzeugung um einen Erdgas-Heizkessel. 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 9,3 °C

(Jahre 2005 – 2015), der Referenzwirkungsgrad der Stromerzeugung erhöht sich damit jeweils um 0,57 %. Für die Stromeinspeisung auf Mittelspannungsebene bis 0,45 Kilovolt beträgt der Korrekturfaktor für die vermiedenen Netzverluste 0,888, für die Stromeigennutzung 0,851. Die in der Studie angenommenen korrigierten Referenzwirkungsgrade sind in Tabelle 4 dargestellt. Alle Angaben zu Primärenergieeinsparungen in diesem Bericht beziehen sich stets auf die Definition nach 2012/27/EU [IfE2014]. Die Richtlinie 2012/27/EU unterscheidet die anzusetzenden Referenzwirkungsgrade nach Art des Brennstoffs. Für vorliegende Studie relevant sind die Brennstoffe Erdgas und Biomethan.

Tabelle 4: Referenzwirkungsgrade nach Richtlinie 2012/27/EG

Brennstoff	Referenzwirkungsgrad Stromerzeugung Einspeisung Ab 2016*			Referenzwirkungsgrad Stromerzeugung Eigennutzung Ab 2016*			Referenzwirkungsgrad Wärmeerzeugung Heißwasser	
	Vor 2012	2012-2015	Ab 2016	Vor 2012	2012-2015	Ab 2016	Vor 2016	Ab 2016
Erdgas / Biomethan	47,1 %	47,1 %	47,6 %	45,2 %	45,2 %	45,6 %	90 %	92 %
Biogas	40,2 %	40,2 %	40,2 %	39,3 %	39,3 %	39,3 %	70 %	80 %
Flüssige Biobrennstoffe	42,3 %	42,3 %	42,3 %	41,4 %	41,4 %	41,4 %	89 %	85 %

*für durchschnittliche Außentemperatur 9,3 °C und Einspeisung bzw. Eigennutzung auf Spannungsebene bis 0,45 kV; siehe Verordnung (EU) 2015/2402

Tabelle 5: Korrekturfaktoren gemäß Verordnung (EU) 2015/2402

	Korrekturfaktor
Korrekturfaktor auf der Grundlage der durchschnittlichen klimatischen Bedingungen bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom	Ref $E_{\eta, \text{original}} + 0,57 \%$
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 0,888
Korrekturfaktoren für vermiedene Netzverluste bei der Anwendung der harmonisierten Wirkungsgrad-Referenzwerte auf die getrennte Erzeugung von Strom; (Niederspannungsnetz) → vor Ort verbrauchter Strom	Faktor 0,851

3.2.3.2 CO₂-Bilanzierung

Als ökologisches Bewertungskriterium wurden die spezifischen CO₂-Emissionen für die Strom- und Wärmerzeugung herangezogen. Die verwendeten brennstoffbezogenen CO₂-Emissionsfaktoren sind in Tabelle 6 aufgelistet. Mit Hilfe der brennstoffbezogenen CO₂-Emissionen 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.

Für diesen Bericht wurde die Aufteilung nach der sogenannten „Exergetischen Methode“ gemäß VDI 4660 BI.2 vorgenommen. Hierbei werden die CO₂-Emissionen im Verhältnis der bereitgestellten Exergiemengen auf die beiden Koppelprodukte aufgeteilt. Dabei wird die elektrische Energie zu 100 % als Exergie bewertet. Die Exergie der ausgekoppelten Wärme entspricht der (mechanischen) Energie die in einem idealen Carnot-Prozess aus dieser Wärme bereitgestellt werden könnte. Die CO₂-Allokation erfolgt mit den untenstehenden Gleichungen. Eine Beispielrechnung ist im Anhang 9.1 enthalten. [VDI4660] [IfE2014].

$$m_{CO_2,ges} = m_{CO_2,el} + m_{CO_2,th} = W_{Br} * \varepsilon_{CO_2,Br}$$

$$m_{CO_2,el} = A_{Br,el} * m_{CO_2,ges}$$

$$m_{CO_2,th} = A_{Br,th} * m_{CO_2,ges}$$

$$A_{Br,el} = \frac{E_{x,el}}{E_{x,el} + E_{x,th}}$$

$$A_{Br,th} = \frac{E_{x,th}}{E_{x,el} + E_{x,th}}$$

$$\varepsilon_{CO_2,el} = \frac{m_{CO_2,el}}{E_{x,el}}$$

$$\varepsilon_{CO_2,th} = \frac{m_{CO_2,th}}{E_{x,th}}$$

$$E_{x,el} = W_{el}$$

$$E_{x,th} = W_{th} * \eta_c$$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_m}$$

$$T_m = \frac{T_{VL} - T_{RL}}{\ln \frac{T_{VL}}{T_{RL}}}$$

Tabelle 6: Brennstoffenergiebezogene CO₂-Emissionen

Brennstoff	Brennstoffenergiebezogene CO ₂ -Emissionen
Erdgas, Mittelwert [VDI4660]	203 g/kWh
Biomethan* [GEMIS]	111 g/kWh

*Biogasanlage mit Aufbereitung und Einspeisung ins Erdgasnetz; Bezugsjahr 2010; Einsatzstoff Nawaro und 30 % Gülle [GEMIS]

3.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise im Projekt ist in Abbildung 12 schematisch dargestellt. Für die Untersuchungen wurden vier BHKW-Anlagen unterschiedlicher Leistungsklassen und Konfigurationen mit einer großen Bandbreite an Anwendungen ausgewählt. Im Rahmen einer Vor-Ort-Besichtigung wurde eine Bestandsaufnahme durchgeführt, bei der u. a. die technischen Daten der jeweiligen Anlage, die installierten Mess-, Steuer- und Regelsysteme (MSR) und die installierte Leittechnik sowie die vorhandenen bzw. aufgezeichneten Betriebsdaten erfasst wurden. Ausgehend von der Bestandsaufnahme wurden für jede Anlage die für das Monitoring erforderlichen Datenpunkte auf Basis der vorhandenen Messgrößen definiert (Datenpunktliste) und das Energiemonitoringsystem wurde eingerichtet.

Anschließend wurden in einer ersten Monitoringphase die Betriebsdaten der BHKW-Anlagen erfasst und auf Basis der Bewertungskriterien aus Kapitel 3.2 ausgewertet. Die Monitoringphasen wurden anlagenindividuell festgelegt und erstrecken sich im Regelfall über ein ganzes Jahr, im kürzesten Fall über 9 Monate.

Ausgehend von den erfassten Daten wurden Optimierungspotentiale identifiziert und daraus konkrete Optimierungsvorschläge abgeleitet. Davon wurden ausgewählte Maßnahmen in Kooperation mit den Anlagenbetreibern umgesetzt. Sofern die entwickelten Maßnahmen aus betrieblichen Gründen in Rahmen des Vorhabens nicht umsetzbar waren, wurde eine Potentialanalyse auf Basis der realen Betriebsdaten durchgeführt. Die Bewertung der Optimierungsmaßnahmen wurde auf Basis der Energie- und Betriebsdatenauswertung vorher/nachher (Energieumsätze, BHKW-Nutzungsgrade, Start-Stopp-Zyklen,...) und einer ökologischen Bewertung (Primärenergieeinsparung, CO₂-Bilanz) durchgeführt. Sofern anwendbar wurde für die Optimierungsmaßnahmen eine wirtschaftliche Bewertung vorgenommen.

Die Optimierungsmaßnahmen wurden in einer zweiten Monitoringphase evaluiert. In den Fällen, in denen die erste und zweite Monitoringphase für die jeweilige Anlage unterschiedliche Zeiträume umfassen, wurde ein für beide Phasen identischer Vergleichszeitraum in zwei aufeinanderfolgenden Kalenderjahren gebildet. Um den Einfluss der Witterung zu evaluieren, wurde für den Raumwärmeanteil jeweils eine Witterungsbereinigung auf Basis von Gradtagszahlen für den Anlagenstandort durchgeführt.

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Monitoringphasen wurden in einem letzten Schritt allgemeine Handlungsempfehlungen für optimierte Monitoring-, Betriebs- und Regelstrategien bei bestehenden und neu geplanten BHKW-Anlagen erarbeitet.

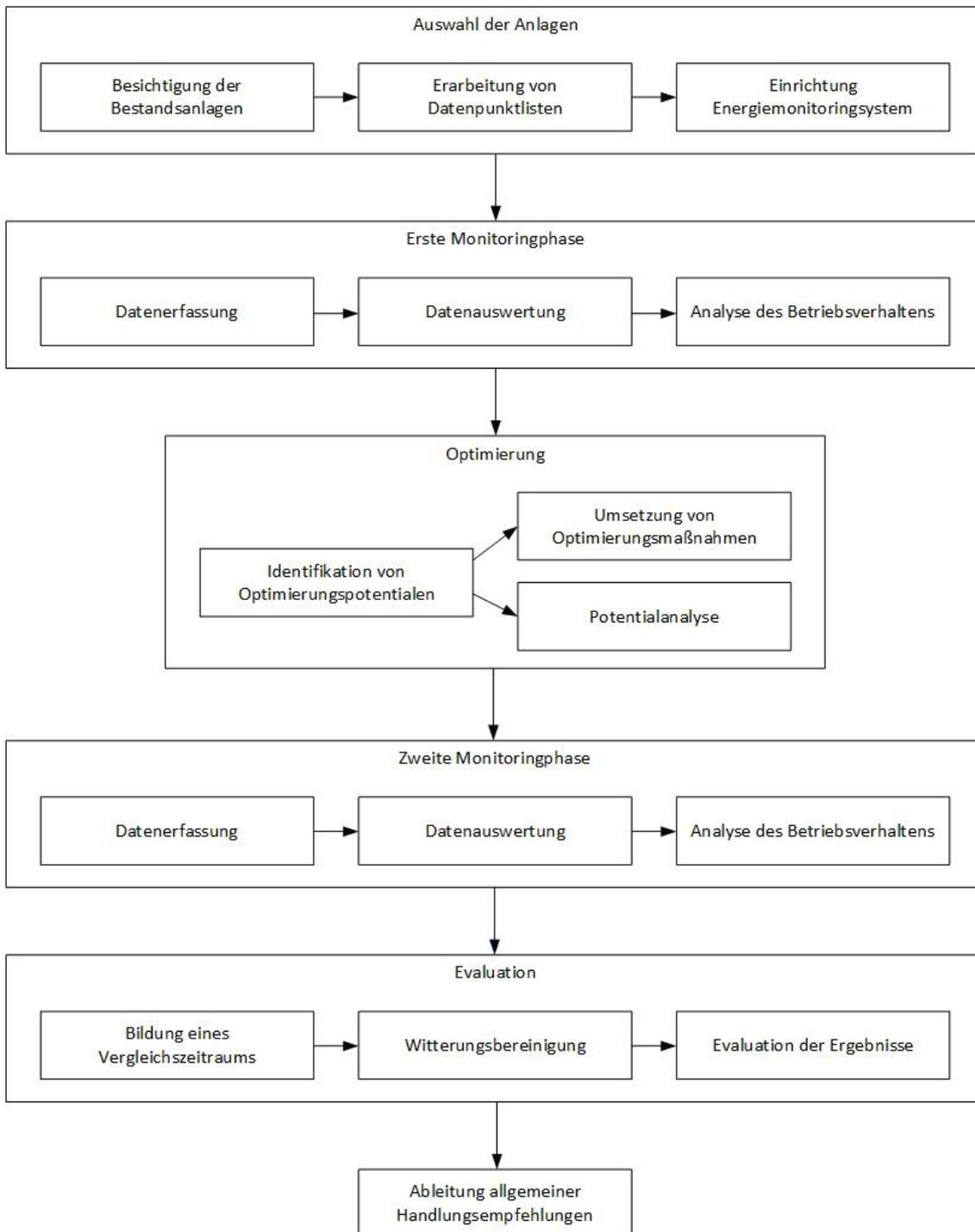


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Vorgehensweise im Projekt

4 Vorstellung der untersuchten BHKW-Anlagen

4.1 BHKW-Anlage A – Blockheizkraftwerk Kindergarten

BHKW-Anlage A versorgt ausgehend von einem Kindergarten einen kleinen Gebäudekomplex mit Strom und Wärme. Die Anlage verfügt über ein erdgasbetriebenes Mini-BHKW-Modul zur Grundlastversorgung und einen erdgasbetriebenen Spitzenlastkessel. Als Besonderheit ist das BHKW-Modul mit einem externen Brennwert-Abgaswärmetauscher ausgestattet. Das Blockheizkraftwerk wird wärmegeführt und taktend betrieben. Die wesentlichen technischen Daten der Anlage sind:

- BHKW-Modul Giese Typ Energator GB 6-12 mit $5,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ / $13,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ (davon $1,8 \text{ kW}_{\text{th}}$ durch Brennwertwärmetauscher), einem elektrischen Wirkungsgrad von 27,4 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 68,7 %, Brennstoff Erdgas
- Brennwertkessel mit $190 \text{ kW}_{\text{th}}$ zur Spitzenlastabdeckung, Brennstoff Erdgas
- Pufferspeicher 1.000 l

In Zeiten geringen Wärmebedarfs kann die Wärme in den Pufferspeicher gespeist werden. Im BHKW-Betrieb wird der Rücklauf zunächst über den Abgaswärmetauscher geführt, um den Brennwerteffekt auszunutzen. Der Brennwertkessel ist über eine hydraulische Weiche vom BHKW-Kreis getrennt.

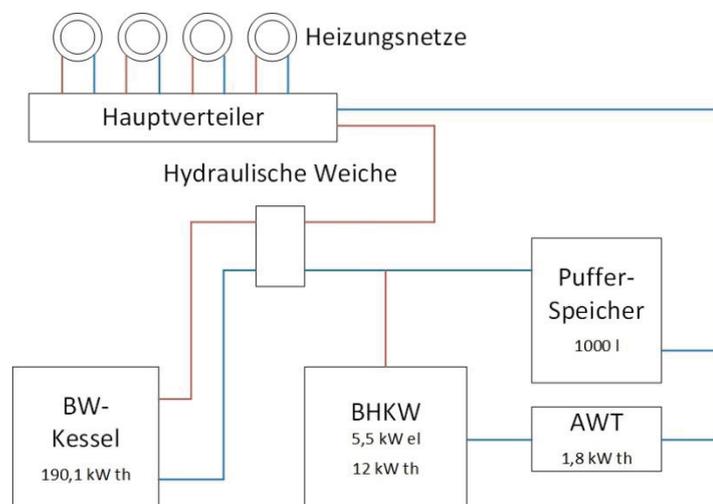


Abbildung 13: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage A

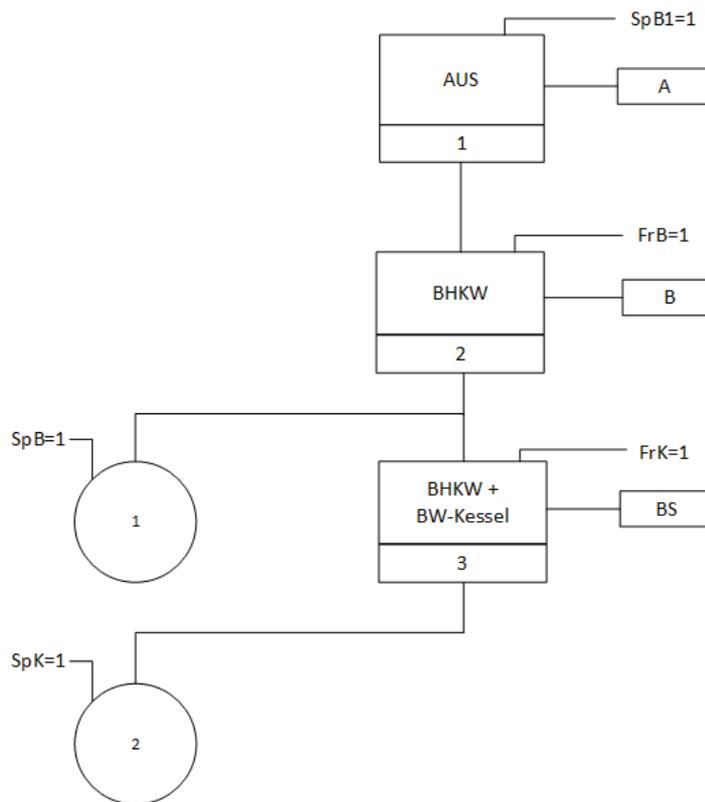


Abbildung 14: Zustandsgraph nach VDI 3814 für die BHKW-Anlage A

In Abbildung 14 ist der Zustandsgraph der BHKW-Anlage A gemäß der VDI 3814 dargestellt. Es gibt drei grundsätzliche Betriebszustände (siehe Tabelle 7). Die Anlage wird nach der Vorlauftemperatur zum Heizverteiler geregelt. Wenn eine Vorlauf-Solltemperatur unterschritten wird, werden zuerst das BHKW und dann der Erdgaskessel angefordert. Die Abschaltbedingung ist von der unteren Puffertemperatur abhängig. Wird hier ein Sollwert überschritten wird zuerst der Gaskessel und dann das BHKW ausgeschaltet. Das BHKW kann auch modulierend betrieben werden. Die Modulation wird allerdings nicht von der übergeordneten Gebäudeleittechnik geregelt, sondern über die interne BHKW-Regelung in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur. Die Bedingungen und Ereignisse der Regelung sind in Anhang 9.2.1 aufgelistet.

Tabelle 7: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten für BHKW-Anlage A

Zustandsnummer	Nutzungsart (Zustand)	Betriebsart
1	AUS	AUS (Schutz)
2	BHKW	BHKW (Modulation)
3	BHKW + BW-Kessel	BHKW+Spitzenlastkessel (Volllast)

4.2 BHKW-Anlage B – Heizkraftwerk Wohngebiet

BHKW-Anlage B wurde in den 90er Jahren zur Versorgung eines Hochhauskomplexes errichtet. Im Jahr 2011 wurde das Heizkraftwerk grundlegend modernisiert und erweitert. In Zuge der Erweiterung wurden 9 weitere Mehrfamilienhäuser an das Nahwärmenetz angeschlossen und zwei neue BHKW-Module (vgl. Abbildung 15) sowie eine komplett neue Heizungsverteilung und eine neue Leittechnik nach aktuellem Stand der Technik installiert. Das Heizkraftwerk weist nach der Modernisierung folgende Anlagenkonfiguration auf:

- 2 BHKW-Module des Herstellers Sokratherm, Baujahr 2011
 - BHKW1 Typ GG 140 mit $142 \text{ kW}_{\text{el}}$ / $216 \text{ kW}_{\text{th}}$, einem elektrischen Wirkungsgrad von 36,2 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 55,1 %, Brennstoff Erdgas
 - BHKW2 Typ GG 201 mit $205 \text{ kW}_{\text{el}}$ / $331 \text{ kW}_{\text{th}}$ einem elektrischen Wirkungsgrad von 34,6 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 55,9 %, Brennstoff Erdgas
- BHKW-Module zur Schalldämmung gekapselt
- 1 Spitzenlastkessel $1.750 \text{ kW}_{\text{th}}$ (Baujahr 1992) mit Zweistoffbrenner, Normalbetrieb mit Erdgas, Leistungsmodulation möglich
- 2 Pufferspeicher je $7,5 \text{ m}^3$ in Pendelschaltung, als hydraulische Weiche eingebunden
- Keine Not-/Bilanzkühler, 100 % wärmegeführter Betrieb
- BHKWs werden modulierend betrieben (50 - 100 % Leistungsregelung der elektrischen Nennleistung); BHKW 1 ca. 120 - 200 kW_{el} , BHKW 2 ca. 70 - 140 kW_{el} (laut Hersteller Reduzierung bis auf 50 % ohne Einschränkung möglich)

Abbildung 16 zeigt den schematischen Aufbau der Anlage. Die beiden BHKW und der Spitzenlastkessel speisen parallel in das Heizungsnetz ein und können somit unabhängig voneinander betrieben werden. Es sind zwei in Reihe geschaltete Pufferspeicher mit jeweils 7.500 l Puffervolumen eingebunden.

In Abbildung 17 ist der Zustandsgraph der BHKW-Anlage B gemäß VDI 3814 dargestellt. Es gibt bei der Anlage 7 Betriebszustände (siehe Tabelle 8). Die Anlage wird entsprechend der Vorlauftemperatur zum Heizverteiler geregelt. Wenn eine Vorlauf-Solltemperatur für eine bestimmte Zeit (Erfüllungsdauer T5B, Anhang 9.2.2) unterschritten wird, werden zuerst das BHKW-Modul 1, dann beide BHKW im Parallelbetrieb und zuletzt beide BHKW und zusätzlich der Spitzenlastkessel angefordert. Die Abschaltbedingung ist von der unteren Puffertemperatur abhängig. Wird hier ein Sollwert für eine bestimmte Zeit überschritten (Erfüllungsdauer T30K, siehe Anhang 9.2.2) werden zuerst der Gaskessel und dann die beiden BHKW-Module abgeschaltet. Beide BHKW-Module können modulierend betrieben werden. Der Modulationsbetrieb wird

von der übergeordneten Gebäudeleittechnik freigegeben, die Leistungsregelung erfolgt dann über die interne BHKW-Regelung in Abhängigkeit eines Rücklauf temperatur-Sollwerts.



Abbildung 15: Gekapselte BHKW-Module in der BHKW-Anlage B

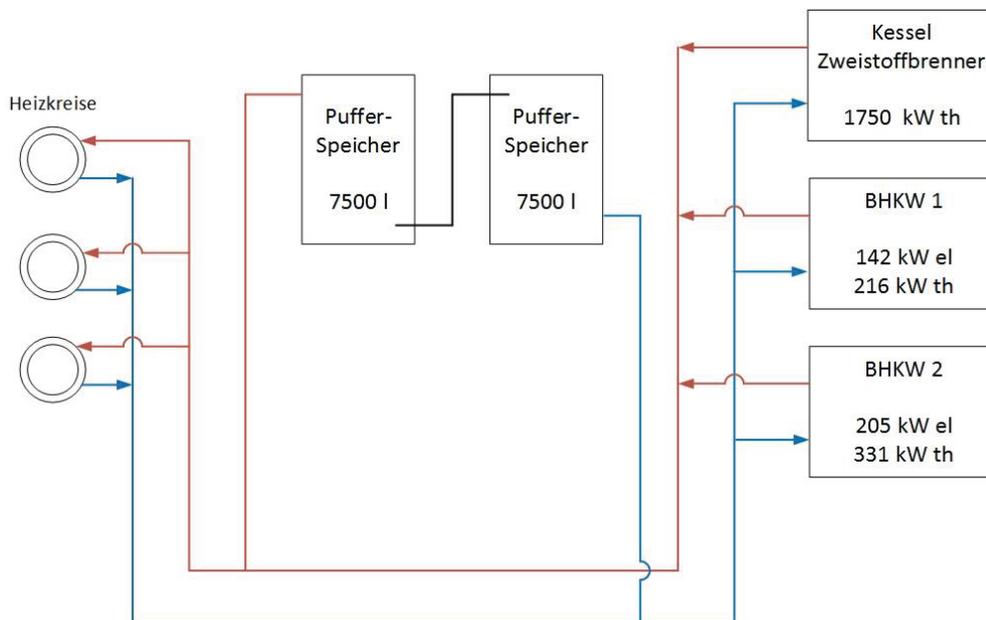


Abbildung 16: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage B

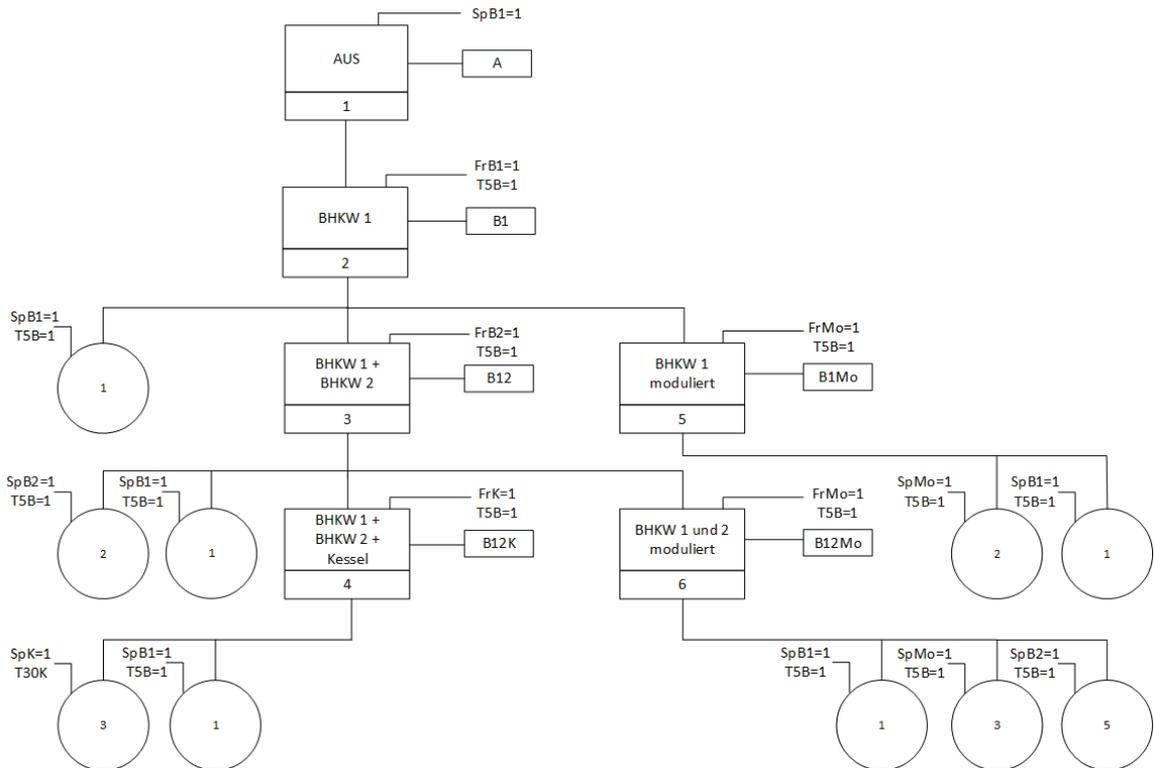


Abbildung 17: Zustandsgraph nach VDI 3814 der BHKW-Anlage B

Tabelle 8: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten BHKW-Anlage B

Zustandsnummer	Nutzungsart (Zustand)	Betriebsart
1	AUS	Schutz (Aus)
2	BHKW 1	Wärmebedarf minimal
3	BHKW 1 + BHKW 2	Wärmebedarf moderat
4	BHKW 1 + BHKW 2 + Kessel	Wärmebedarf maximal
5	BHKW 1 moduliert	Wärmebedarf minimal modulierend
6	BHKW 1 und 2 moduliert	Wärmebedarf moderat modulierend

4.3 BHKW-Anlage C – Heizkraftwerk Industrie-/Gewerbegebiet

BHKW-Anlage C (vgl. Abbildung 18) wurde in den 90er Jahren zur Versorgung eines Industrie- und Gewerbegebiets errichtet. Ursprünglich wurde ein Zündstrahl-Blockheizkraftwerk mit ca. 7.000 kW elektrischer Leistung installiert, das als Sonderanfertigung auf Basis eines Schiffsdieselmotors entwickelt wurde. Das Modul wurde im Jahr 2008 durch ein kleineres BHKW mit Gas-Otto-Motor und 825 kW elektrischer Leistung ersetzt (vgl. Abbildung 19), das mit Biomethan betrieben wird. Der über das Biomethan-BHKW erzeugte Strom wird vollständig in das öffentliche Stromnetz eingespeist und nach EEG vergütet. Besonderheiten sind die hohe Vorlauftemperatur von bis ca. 110 °C im Wärmenetz aufgrund der Anforderungen der industriellen Wärmeabnehmer sowie der sehr groß dimensionierte Pufferspeicher, der ursprünglich für die wesentlich leistungsstärkere Zündstrahl-BHKW-Anlage ausgelegt wurde. Eine weitere Besonderheit stellt die Deckung des Eigenstrombedarfs über zwei kleine Erdgas-BHKW-Module mit je 15 kW elektrischer Leistung dar, die zu Testzwecken in der Heizzentrale installiert wurden. Da die Module aufgrund der geringen Leistung in der Gesamtbilanz der BHKW-Anlage jedoch praktisch keine Rolle spielen, wurden sie für die Auswertungen im Rahmen des Vorhabens nicht weiter betrachtet. Das Heizkraftwerk weist folgende Konfiguration auf:

- 1 BHKW Modul 825 kW_{el} / 1.008 kW_{th} mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 39,9 % und einem thermischen Wirkungsgrad von 48,7 %, Fabrikat Jenbacher Serie 300, Baujahr 2008, Brennstoff Biomethan. Sonderspezifikation für hohe Vorlauftemperaturen bis zu 109 °C durch Serienschaltung von Motorkühlkreis und Abgaswärmetauscher zur Nachheizung.
- 2 BHKW Module EC Power 15 kW_{el} / 30 kW_{th} zur Eigenstromversorgung, Brennstoff Erdgas
- 2 Heizkessel mit je ca. 9.000 kW_{th}; Kessel 1 als Notfallkessel, Kessel 2 in Vorrangschaltung, Brennstoff Erdgas
- Heißwassernetz mit bis zu 110 °C Vorlauftemperatur (Anforderung aufgrund der industriellen Wärmeabnehmer im Fernwärmenetz)
- Außen aufgestellter Pufferspeicher ca. 100 m³
- 100 % wärmegeführter Betrieb



Abbildung 18: BHKW-Anlage C mit Kaminanlagen und Pufferspeicher 100 m³



Abbildung 19: BHKW-Modul mit 825 kW_{el} in BHKW-Anlage C

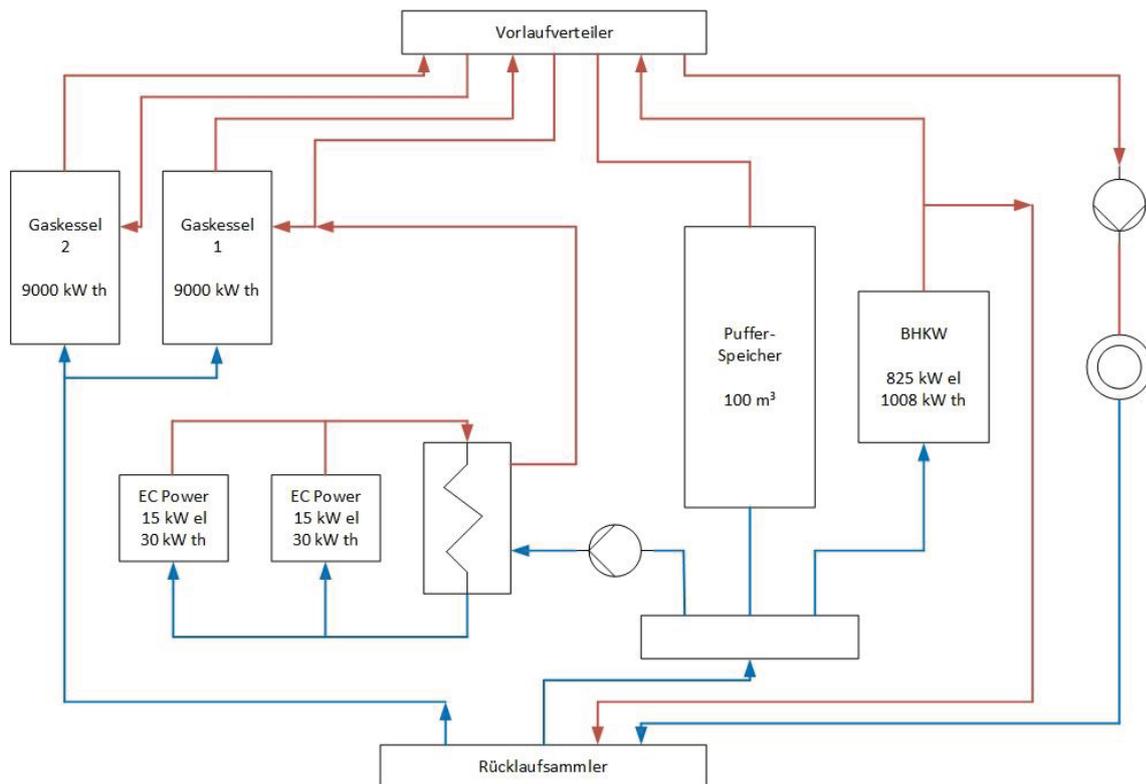


Abbildung 20: Vereinfachte schematische Darstellung BHKW-Anlage C

BHKW-Anlage C wird in erster Linie nach dem aktuellen Pufferspeicherfüllstand geregelt, der auf Basis der Puffertemperaturen berechnet wird. Je nach Pufferbeladung werden folgende Stufen ausgewählt (siehe Abbildung 21):

- Stufe 1: BHKW läuft bei Nennlast
- Stufe 2: BHKW und Gaskessel 2 laufen bei Nennlast
- Stufe 3: BHKW und Gaskessel 1 laufen bei Nennlast

Bei der Umschaltung der Stufen sind jeweils Grenzwerte für die Beladung (siehe Anhang 9.2.3: PL1, PL2 und PL3) und Entladung (siehe Anhang 9.2.3: PLE1, PLE2 und PLE3) des Pufferspeichers und Zeitverzögerungen (siehe Anhang 9.2.3: T1 und T2) in der Regelung hinterlegt. Das BHKW-Modul wird taktend betrieben, d. h. es erfolgt keine Leistungsmodulation, sondern eine direkte Abschaltung des Aggregats sobald die Übergangsbedingung erfüllt ist. Aus Sicherheitsgründen reduziert jedoch die interne BHKW-Regelung die Leistung wenn ein Sollwert der Rücklauftemperatur zum BHKW überschritten wird. Die beiden kleinen BHKW-Module dienen der Deckung des Eigenstromverbrauchs und werden nicht nach dem Pufferspeicherfüllstand geregelt, sondern nach Möglichkeit kontinuierlich betrieben. Als Sicherheitsmaßnahme wurde lediglich eine Abschaltung bei Überschreitung der zulässigen Rücklauftemperatur implementiert. Die BHKW-Module sind daher im Rahmen der Regelstrategie der Heizzentrale nicht relevant und wurden im Monitoring nicht betrachtet.

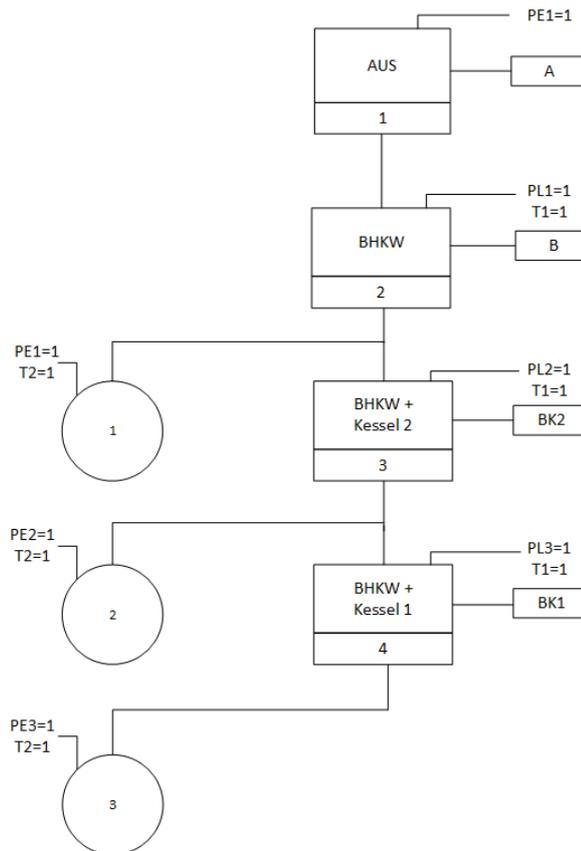


Abbildung 21: Zustandsgraph der Regelung der BHKW-Anlage C

Tabelle 9: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten BHKW-Anlage C

Zustandsnummer	Nutzungsart (Zustand)	Betriebsart
1	AUS	Schutz (Aus)
2	BHKW	Wärmebedarf minimal
3	BHKW + Kessel 2	Wärmebedarf moderat
4	BHKW + Kessel 1	Wärmebedarf maximal

4.4 BHKW-Anlage D – Klinikum

In BHKW-Anlage D wurden zwei hocheffiziente Erdgas-BHKW-Module errichtet, die mit einem elektrischen Wirkungsgrad $> 42\%$ die technologische Spitze in ihrer Leistungsklasse markieren (vgl. Abbildung 22). Bei den Aggregaten handelt es sich um sogenannte Kompaktmodule, bei denen alle wesentlichen Anlagenkomponenten (Motor, Generator, Wärmetauscher, Pumpen,...) auf einem Grundrahmen installiert und mit einer Kapselung versehen sind. Bei dem kleineren der beiden Aggregate (agenitor 406) befinden sich alle Komponenten innerhalb der Kapselung, beim größeren (avus 550plus) ist der Abgaswärmetauscher separat aufgestellt. Nachfolgend sind die wesentlichen technischen Daten der beiden Module zusammengefasst:

- 2 BHKW-Module des Herstellers 2G, Baujahr 2013
 - BHKW1 Typ agenitor 406 mit $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ / $264 \text{ kW}_{\text{th}}$ und einem elektrischen Wirkungsgrad von $41,8\%$ und einem thermischen Wirkungsgrad von $43,5\%$, Brennstoff Erdgas
 - BHKW2 Typ avus 500 plus mit $550 \text{ kW}_{\text{el}}$ / $578 \text{ kW}_{\text{th}}$ und einem elektrischen Wirkungsgrad von $42,6\%$ und einem thermischen Wirkungsgrad von $44,7\%$, Brennstoff Erdgas
- BHKW-Module zur Schalldämmung gekapselt
- 3 erdgasbetriebene Spitzenlastkessel
- 4 Pufferspeicher je 5 m^3 in Reihenschaltung, als hydraulische Weiche eingebunden
- Zusätzliches 3-Wege-Ventil zum Bypass des Pufferspeichers
- 100% wärmegeführter Betrieb vorgesehen
- Stromgeführter Betrieb möglich, da Notkühler verbaut ist. Dieser wird im wärmegeführten Betrieb nicht genutzt
- BHKWs können sowohl modulierend als auch taktend betrieben werden ($50 - 100\%$ Leistungsregelung der elektrischen Nennleistung); BHKW 1 ca. $125 - 250 \text{ kW}_{\text{el}}$, BHKW 2 ca. $550 - 275 \text{ kW}_{\text{el}}$

Die beiden Blockheizkraftwerke versorgen das Klinikum sowohl mit Wärme als auch mit Strom. Die Anlage wird wärmegeführt betrieben. Der Strom der im Klinikum nicht selbst genutzt werden kann, wird in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Zur Spitzenlastabdeckung sind in der Heizzentrale drei Gaskessel verbaut. Der Pufferspeicher ist als Kaskade aus vier in Reihe geschalteten Behältern mit je 5 m^3 Volumen ausgeführt und als hydraulische Weiche eingebunden (siehe Abbildung 23). Das Beladen des Puffers wird über ein Dreiwegeventil geregelt. Das Entladen des Puffers erfolgt über eine zusätzliche Pumpe im Vorlauf des Heizkreises.



Abbildung 22: BHKW Module agenitor 406 (vorn) und avus 550plus (hinten) in BHKW-Anlage D

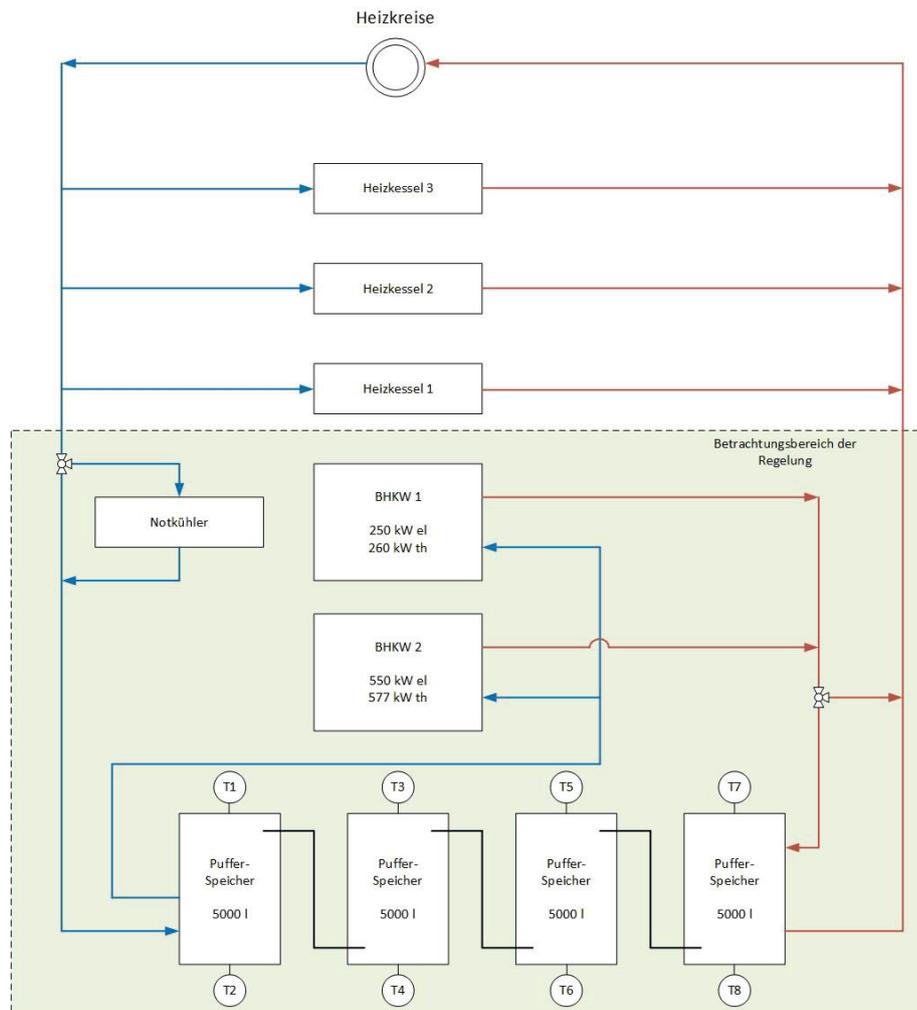


Abbildung 23: Vereinfachte schematische Darstellung der BHKW-Anlage D

Die Regelung der BHKW-Module und des Pufferspeichers (siehe Abbildung 23 grüner Bereich) erfolgt über eine übergeordnete Anlagenleittechnik, die jedoch weitestgehend entkoppelt von der Gebäudeleittechnik des Klinikums ist, über welche die Kessel geregelt werden. Die Aufteilung ist notwendig weil die BHKW-Anlage über ein Contracting-Modell betrieben wird und eine Trennung der Leittechnik-Systeme von Contractor und Contracting-Nehmer gewünscht war.

In Abbildung 24 ist der Zustandsgraph nach VDI 3814 dargestellt, zur besseren Übersichtlichkeit findet sich in Anhang 9.4 nochmals eine gesonderte Darstellung. Die beiden BHKW-Module und die Gaskessel werden nach einer Leistungsvorgabe geregelt, die von der Gebäudeleittechnik ermittelt und an die Leittechnik der BHKW-Anlage weitergegeben wird. Dabei wird anhand des Sollwerts für die Vorlauftemperatur der Heizkreise die benötigte thermische Leistung berechnet mit der der Wärmebedarf gedeckt werden kann. Folgende Leistungsstufen wurden definiert:

- Stufe 1: Leistungsvorgabe bis $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 1 wird betrieben
- Stufe 2: Leistungsvorgabe zwischen $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ und $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 2 wird betrieben
- Stufe 3: Leistungsvorgabe zwischen $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ und $700 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 1 und BHKW 2 werden betrieben
- Stufe 4: Leistungsvorgabe ab $700 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 1, BHKW 2 werden betrieben, zusätzlich schalten die Gaskessel zu

Zu jedem Umschaltvorgang sind Hysteresewerte und Zeitverzögerungen definiert. Die beiden BHKW-Module werden grundsätzlich mit Nennlast betrieben. Wird überschüssige Wärme erzeugt, wird zunächst der Pufferspeicher damit beladen. Wenn die Puffertemperatur T_3 einen Wert von 75 °C überschreitet wird der Modulationsbetrieb freigegeben. Der Modulationsbetrieb wird wieder gesperrt, wenn die Puffertemperatur T_7 einen Wert von 66 °C unterschreitet. Im Modulationsbetrieb sehen die Leistungsstufen wie folgt aus:

- Stufe 1: Leistungsvorgabe bis $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 1 wird modulierend betrieben
- Stufe 2: Leistungsvorgabe zwischen $250 \text{ kW}_{\text{th}}$ und $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 2 wird modulierend betrieben
- Stufe 3: Leistungsvorgabe zwischen $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ und $700 \text{ kW}_{\text{th}}$ → BHKW 1 wird mit Nennleistung und BHKW 2 wird modulierend betrieben

Die Be- und Entladung des Pufferspeichers wird aktiv geregelt. Dabei wird die Beladung des Pufferspeichers über ein 3-Wege-Ventil realisiert und die Entladung über eine Pumpe im Vorlauf zum Heizkreis. Die Beladung des Puffers wird anhand der globalen Vorlauftemperatur im Heizkreis zu den BHKW-Modulen geregelt. Erreicht die Vorlauftemperatur einen vorgegebenen Wert, der aus der Rücklauftemperatur zu den BHKW-Modulen zuzüglich einer frei parametrierbaren Differenz berechnet wird, wird

das 3-Wege-Ventil angesteuert und der Puffer beladen. Die Entladung erfolgt anhand des Leitungsvorgabewerts aus der übergeordneten Gebäudeleittechnik. Wenn dieser größer ist als die thermische Leistung der BHKW-Module, wird der Puffer entladen. Die Be- und Entladung des Pufferspeichers erfolgt in erster Linie während der vorgegeben Umschaltverzögerungszeiten (siehe Zeitglieder im Anhang 9.2.4) beim Wechsel zwischen den verschiedenen Leistungsstufen der Regelung. Es ist möglich, bei Stillstand der beiden BHKW und voll geladenem Pufferspeicher diesen zunächst zu entladen (siehe Abbildung 24 Zustand 12) bevor das erste BHKW gestartet wird (siehe Abbildung 24 Zustand 2).

Tabelle 10: Zuordnung von Nutzungsarten zu den Betriebsarten der BHKW-Anlage D

Zustandsnummer	Nutzungsart (Zustand)	Betriebsart
1	AUS BHKW 1 und 2 aus	Schutz (Aus), temperaturgeführt
2	BHKW 1 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
3	BHKW 2 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
4	BHKW 1 Volllast und 2 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
5	BHKW 1 moduliert (Sollwert Leistung)	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
6	BHKW 2 moduliert (Sollwert Leistung)	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
7	BHKW 1 Volllast und 2 moduliert (Sollwert Leistung)	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
8	Pufferentladung BHKW 1 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
9	Pufferentladung BHKW 2 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
11	Pufferentladung BHKW 1 Volllast und 2 moduliert	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
10	Pufferentladung BHKW 1 Volllast und 2 Volllast	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
12	Pufferentladung BHKW 1 und 2 aus	Sollwert-Wärmeleistungsgeführt
13	Pufferbeladung BHKW 1 Volllast	temperaturgeführt
14	Pufferbeladung BHKW 2 Volllast	temperaturgeführt
15	Pufferbeladung BHKW 1 und 2 Volllast	temperaturgeführt

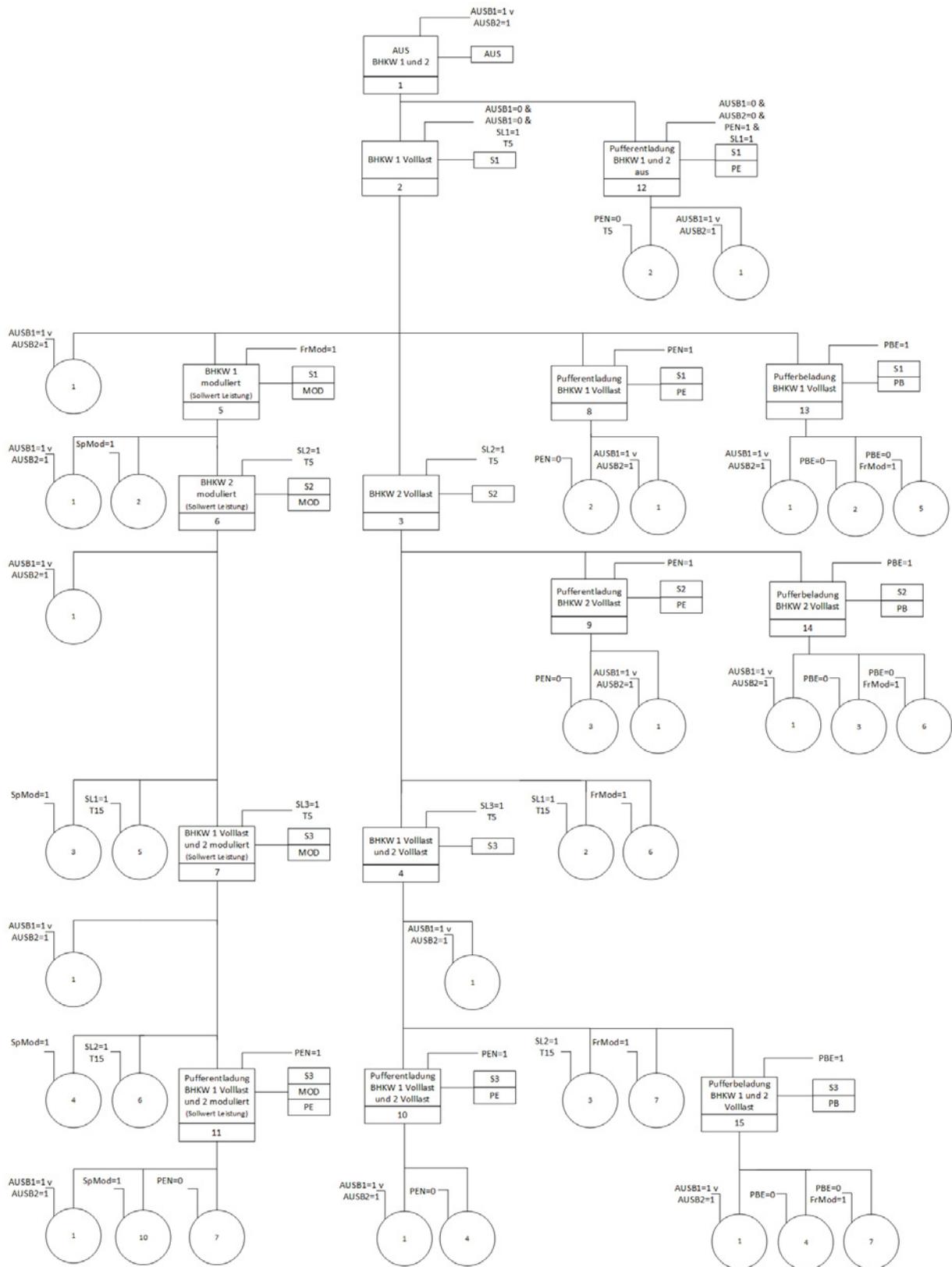


Abbildung 24: Zustandsgraph der Regelung der BHKW-Anlage D

5 Forschungsergebnisse

5.1 BHKW-Anlage A

5.1.1 Ergebnisse der ersten Monitoringphase

5.1.1.1 Energieumsätze

Im Rahmen der ersten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage A im Zeitraum vom 01.04.2015 bis zum 31.12.2015 ausgewertet, da erst ab dem 1. April alle benötigten Datenpunkte auf das Energiemonitoringsystem aufgeschaltet waren. In Tabelle 11 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz des BHKW und des Brennwertkessels im ersten Monitoringzeitraum aufgelistet. Das BHKW erzeugte ca. 18,5 MWh_{el} Strom und 43,4 MWh_{th} Wärme, der Brennwertkessel erzeugte ca. weitere 52,7 MWh_{th} Wärme. Anhand der Energieumsätze lassen sich die Nutzungsgrade des BHKW und der Brennwertkessel bestimmen. Das BHKW erreicht einen elektrischen Nutzungsgrad von 27,2 % (Datenblattangabe 27,4 %) und einen thermischen Nutzungsgrad von 63,7 % (Datenblattangabe 68,7 %). Der elektrische Nutzungsgrad liegt innerhalb des Toleranzbereichs³ der Datenblattangaben (siehe Kapitel 4.1).

In Abbildung 25 sind die monatlichen erzeugten Strom- und Wärmemengen des BHKW dargestellt. Dabei wurden die Wärmeerzeugung des BHKW und des Abgaswärmetauschers separat aufgeführt. Man erkennt deutlich, dass das BHKW in den Wintermonaten mehr Strom- und Wärme bereitstellt als im Sommer. Die geringe Strom- und Wärmeerzeugung im November und Dezember ist auf Probleme mit dem BHKW-Motor zurückzuführen, die zu Leistungsschwankungen und Stillständen führten und schließlich einen Motortausch erforderten (vgl. Analyse in Kapitel 5.1.1.5).

Tabelle 11: Energieumsätze der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

	BHKW	Brennwertkessel
Erzeugte Wärmemenge	43,4 MWh _{th}	52,7 MWh _{th}
Anteil Wärmeerzeugung Abgaswärmetauscher	2,9 MWh _{th}	
Erzeugte Strommenge	18,5 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	68,1 MWh	61,6 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	63,7 %	85,6 %
Elektrischer Nutzungsgrad	27,2 %	-

³ 5 %-Toleranz nach DIN ISO 3046-1

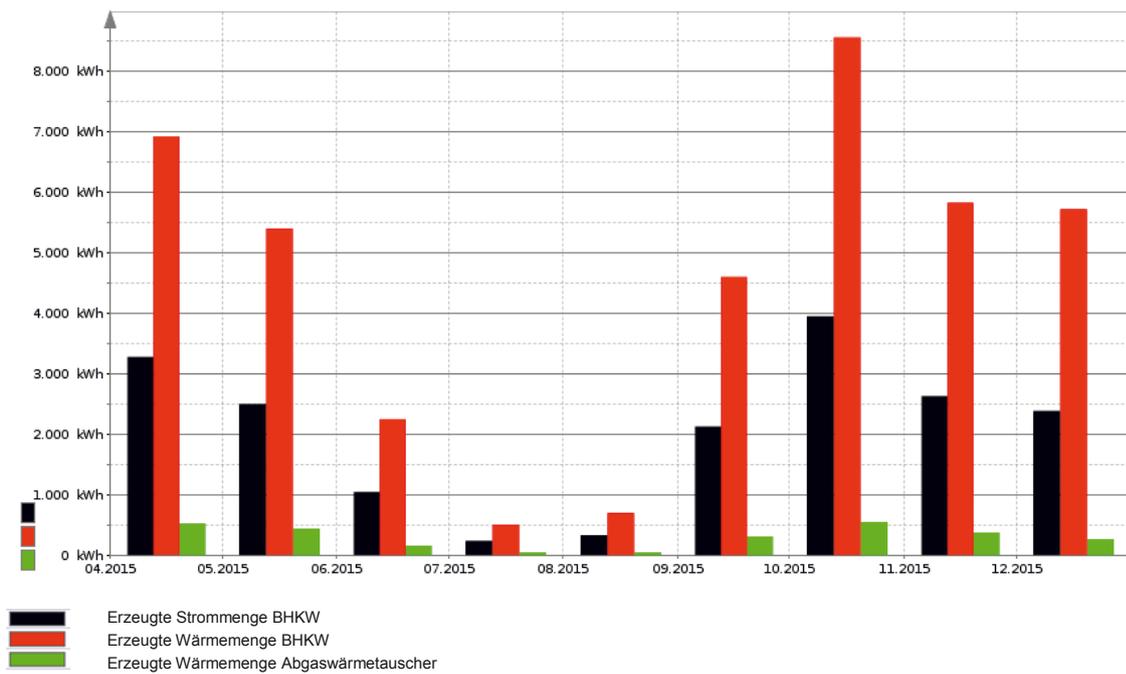


Abbildung 25: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

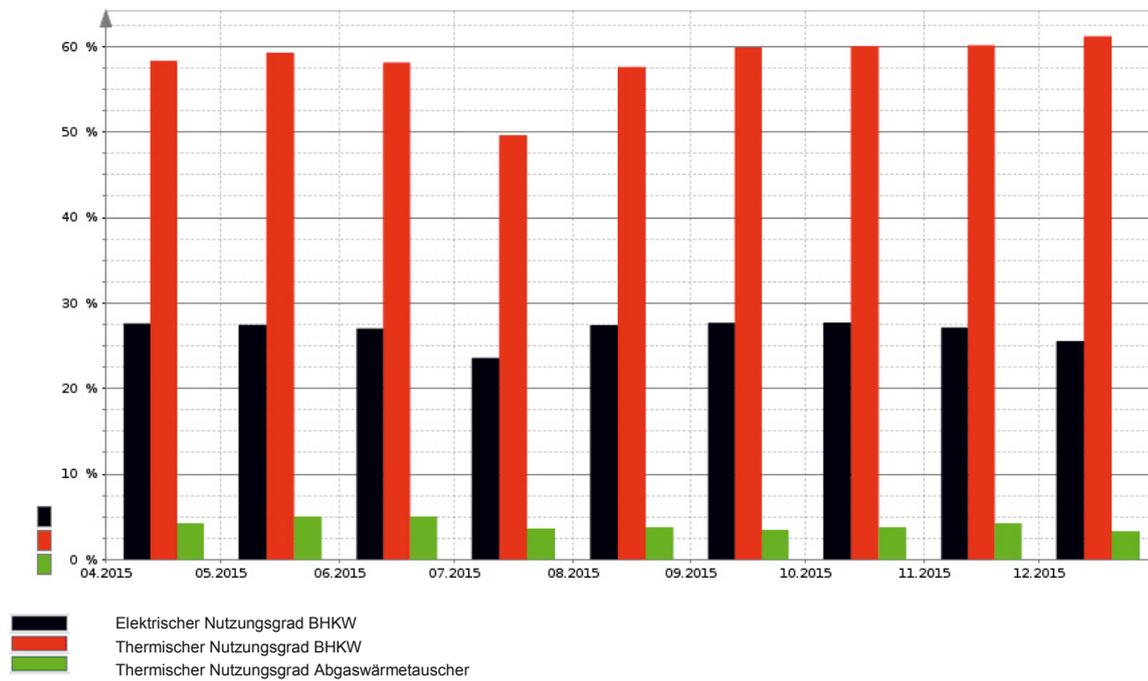


Abbildung 26: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

In Abbildung 26 sind die monatlichen Nutzungsgrade des BHKW-Moduls dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass in den Sommermonaten der Nutzungsgrad des BHKW fällt. Diese Monate wirken sich allerdings nur wenig auf den Nutzungsgrad im Betrachtungszeitraum aus, da die im Sommer erzeugte Strom- und Wärmemenge nur einen geringen Anteil der gesamten Strom- und Wärmeerzeugung ausmacht. Man erkennt außerdem, dass der elektrische Nutzungsgrad im November und Dezember wegen der oben genannten Probleme am BHKW-Motor etwas niedriger ausfällt. Aufgrund des Motortausches wurde das BHKW-Modul im Dezember 2015 teilweise mit reduzierter Leistung (Einlaufphase des neuen Motors mit 60 % der Nennlast) betrieben.

5.1.1.2 Betriebsverhalten

Das BHKW wurde während der ersten Monitoringphase durchgehend wärmeführt betrieben und erreichte im Jahr 2015 insgesamt 3.216 Betriebsstunden und 3.364 Volllaststunden. Auffällig ist, dass die errechneten Volllaststunden im Betrachtungszeitraum höher sind als die Betriebsstunden. Dies lässt sich ausgehend von den Messdaten erklären (vgl. elektrische Jahresdauerlinie in Abbildung 27), aus denen ersichtlich ist, dass das BHKW in der ersten Monitoringphase für ca. 3.000 Stunden einer Last von 6 kW_{el} betrieben wurde, obwohl die Nennleistung nach Datenblatt lediglich $5,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ beträgt. Daraufhin wurde der Stromzähler überprüft und festgestellt, dass dieser die Leistungswerte lediglich in 1 kW-Schritten ausgeben kann. Bei einer Sollleistung von $5,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ werden entweder 5 kW_{el} oder 6 kW_{el} ausgegeben. Die in der Jahresdauerlinie erkennbaren Zwischenwerte erklären sich dadurch, dass die Daten mit einer Abtastrate von 1 Minute erfasst und anschließend in 15-Minuten Mittelwerte umgerechnet wurden.

Der Gaskessel wurde insgesamt 1.134 Stunden betrieben und über 16.500-mal angefordert. Im Durchschnitt wurde der Gaskessel dabei lediglich ca. 4 Minuten lang pro Start betrieben. Dieses auffällige Betriebsverhalten des Brennwertkessels wird in Kapitel 5.1.1.4 genauer analysiert.

Tabelle 12: Betriebsdaten der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	Gaskessel
Betriebsstunden	3.216 h	1.134 h
Vollbenutzungsstunden	3.364 h	277 h
Starts	185	16.541
Betriebsstunden pro Start	17,3 h	4,1 Minuten

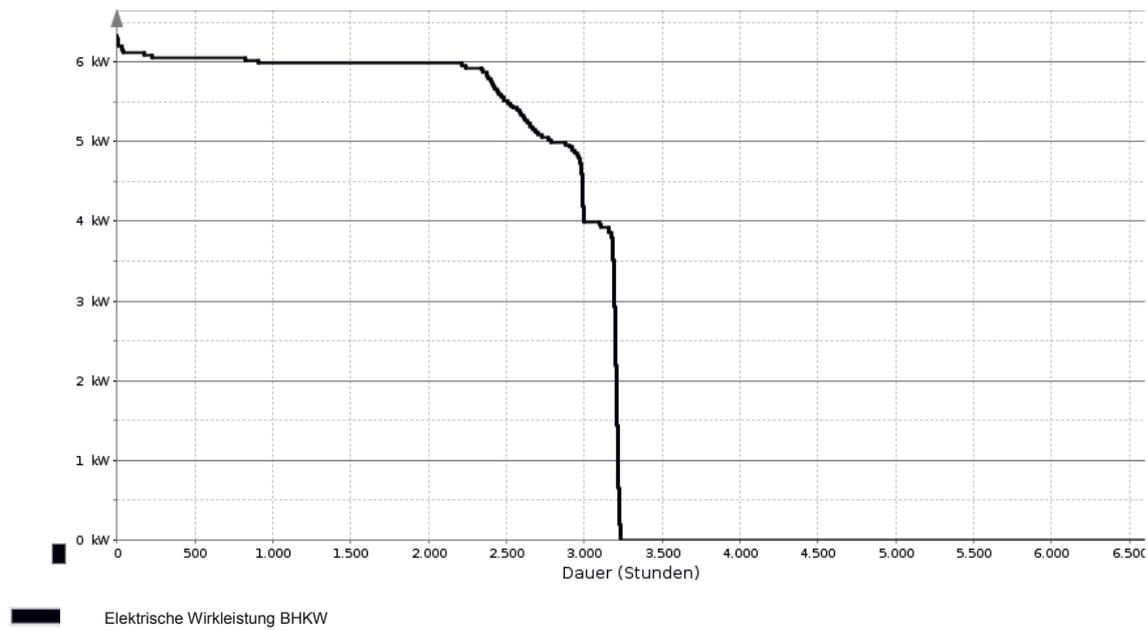


Abbildung 27: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

Betrachtet man die monatliche Startanzahl des BHKW (Abbildung 28) so kann man erkennen, dass das BHKW in den Wintermonaten weitestgehend durchgängig betrieben werden konnte und nur wenige Startvorgänge auftraten. Insbesondere in der Übergangszeit (April, Mai, September) steigt die Startanzahl dann aufgrund der taktenden Betriebsweise an. Im Sommer wird das BHKW-Modul aufgrund des geringen Wärmebedarfs insgesamt nur selten angefordert, dementsprechend fällt auch die Startanzahl gering aus.

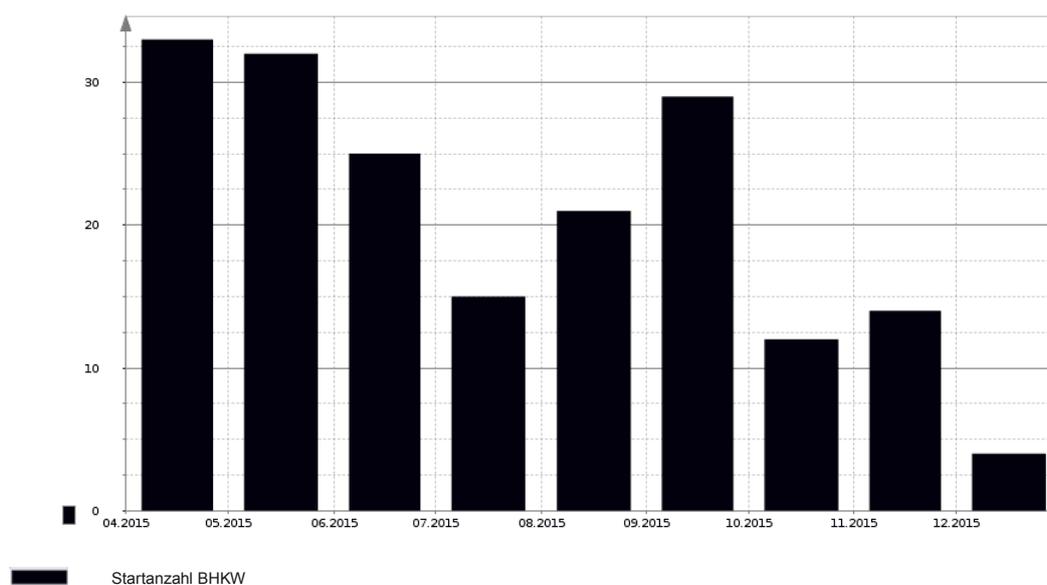


Abbildung 28: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

In Abbildung 29 sind die monatlichen Betriebsstunden pro Start des BHKW dargestellt. Auffällig sind hier die Monate Februar und März mit je mehr als 300 Betriebsstunden pro Start. Im November und Dezember konnten dagegen diesen hohen Werte aufgrund von häufigen Störfällen nicht erreicht werden. Insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer fallen die Betriebsstunden pro Start mit ca. 14,0 bzw. 4,4 ebenfalls gering aus. Der Jahresdurchschnitt von 17,3 Betriebsstunden pro Start ist dennoch als gut zu bewerten.

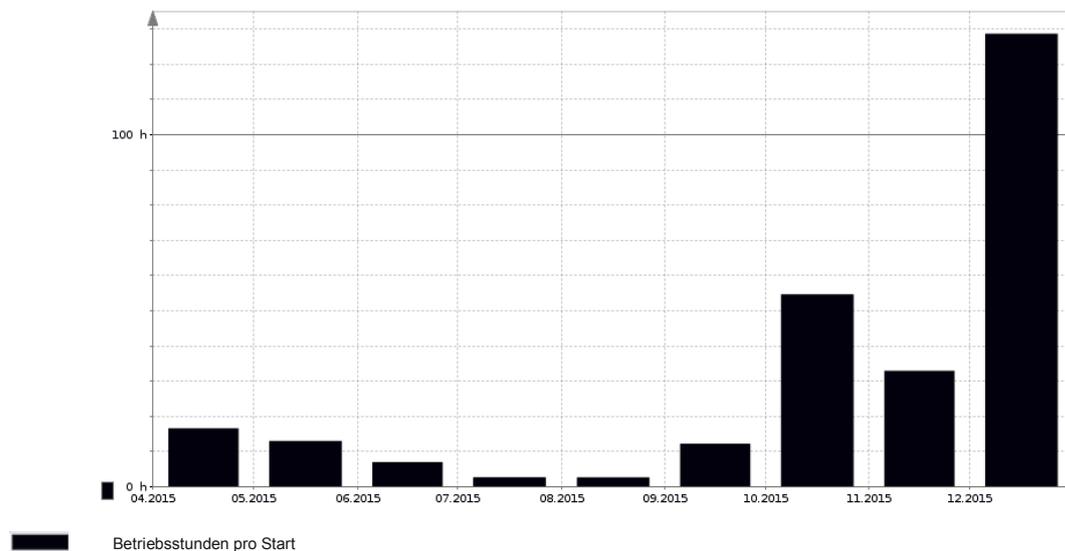


Abbildung 29: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

5.1.1.3 Ökologische Betrachtung

Die Primärenergieeinsparung wurde wie in Kapitel 3.2.3.1 beschrieben ermittelt. In der ersten Monitoringphase konnte eine Primärenergieeinsparung von im Mittel 23,6 % gegenüber einer ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung erreicht werden.

Abbildung 30 stellt die monatliche Primärenergieeinsparung dar. Man erkennt, dass Primärenergieeinsparungen von bis zu 27 % mit dem BHKW möglich sind. Die Primärenergieeinsparung sinkt in den Monaten, in denen die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade der BHKW-Anlage gering sind. Dies ist insbesondere im Juli 2015 aufgrund der geringen Betriebsstunden und Dezember 2015 aufgrund von Problemen mit dem BHKW-Motor der Fall.

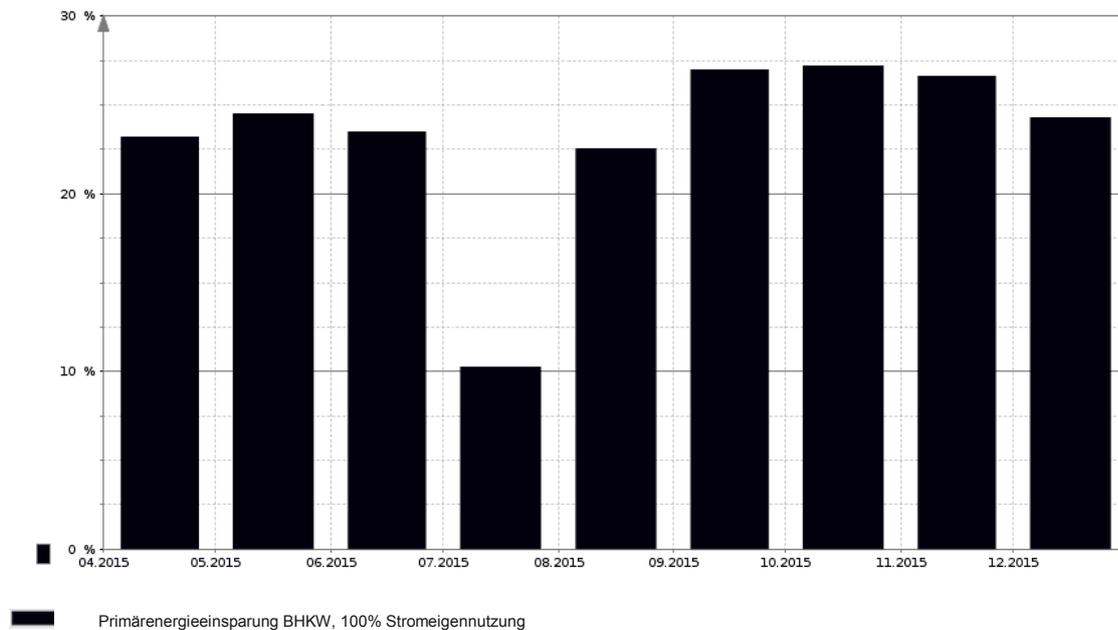


Abbildung 30: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

Im Jahr 2015 wurden vom BHKW insgesamt 13,8 t CO₂ ausgestoßen. Nach der exergetischen Allokationsmethode gemäß VDI 4660 verteilt sich der CO₂-Ausstoß wie folgt auf die Strom- und Wärmeerzeugung:

- Strom: 11,8 t CO₂
- Wärme: 2,0 t CO₂

In Abbildung 31 ist der monatlichen CO₂-Ausstoß aufgeteilt auf die Koppelprodukte Strom- und Wärme dargestellt. Der CO₂-Ausstoß ist erster Linie von den Betriebsstunden bzw. vom Brennstoffverbrauch der Anlage abhängig und somit insbesondere in den Wintermonaten hoch. Die der Stromerzeugung zugeordneten Werte des CO₂-Ausstoßes sind deutlich höher als die der Wärme zugeordneten Werte, da der Strom bei der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 höher bewertet wird.

Dies spiegelt sich auch bei den spezifischen CO₂-Emissionen wieder. In der ersten Monitoringphase betragen die auf das Koppelprodukt Strom bezogenen durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen 640 g/kWh_{el} und die auf Wärme bezogen 46 g/kWh_{th}. Die monatlichen spezifischen CO₂-Emissionen sind in Abbildung 32 dargestellt. Hohe spezifische CO₂-Emissionen treten dann auf, wenn die Nutzungsgrade der Anlage gering sind.

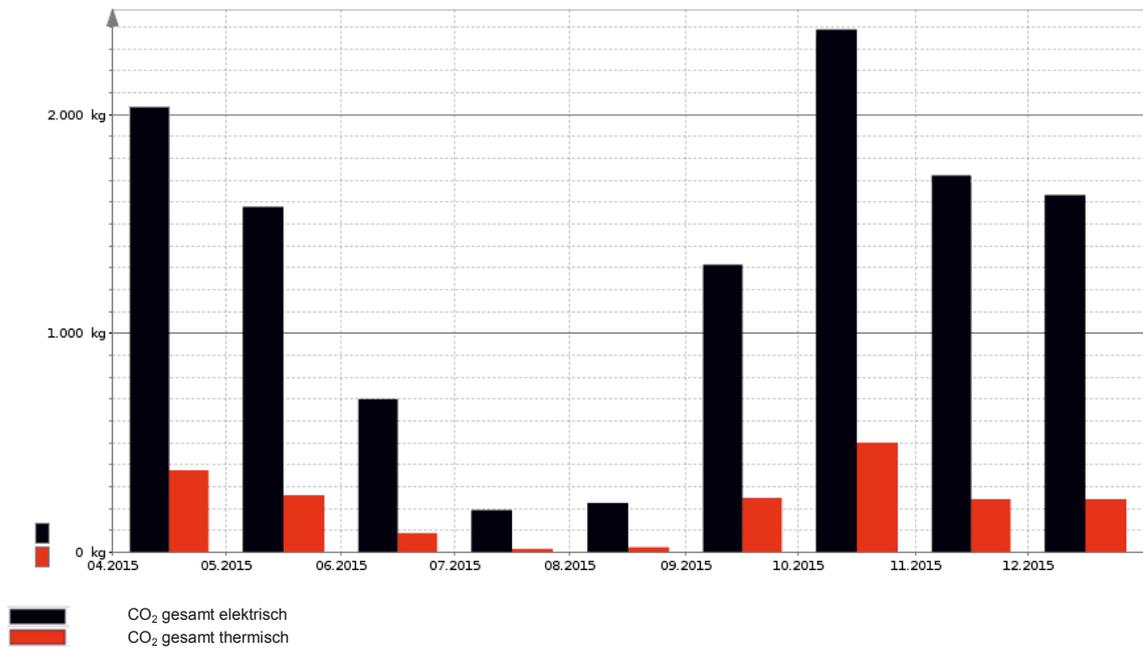


Abbildung 31: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

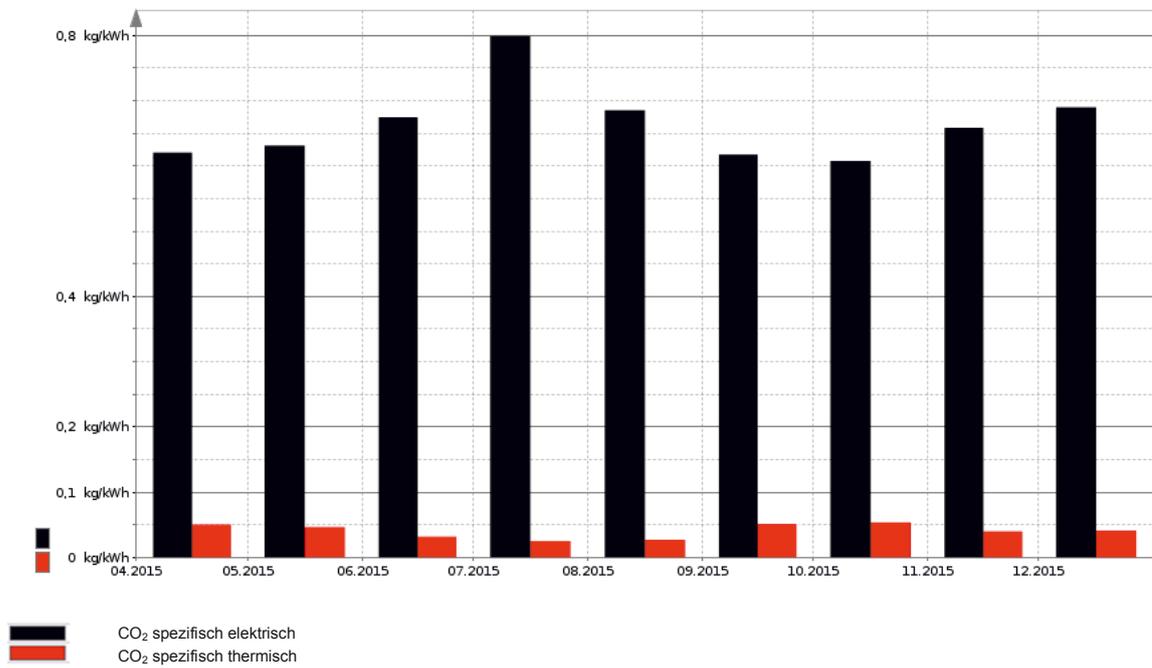


Abbildung 32: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen BHKW-Anlage A in der ersten Monitoringphase

5.1.1.4 Analyse der Kesselregelung

Im Rahmen der ersten Monitoringphase war besonders die Regelung des Brennwertkessels mit häufigen Start-Stopp-Zyklen und kurzen Betriebszeiten auffällig (> 16.500 Start, ca. 4 min Betriebszeit pro Start). In Abbildung 33 ist die Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels (schwarze Linie) vom 17.03.2015⁴ bis zum 31.07.2015 dargestellt. Zusätzlich ist die elektrische Leistung des BHKW (rot) für diesen Zeitraum dargestellt. Zum einen ist ersichtlich, dass der Brennwertkessel lediglich einmal mit der (nahezu) vollen Nennleistung betrieben wurde. In der Regel wurde der Kessel nur mit ca. 20 % bis 30 % der Nennleistung betrieben. Zum anderen erkennt man in Abbildung 33 drei unterschiedliche Regelszenarien, die jedoch wiederkehrende Muster aufweisen:

- 1) Winterbetrieb: Das BHKW läuft durchgängig mit Nennlast und der Gaskessel taktet mit ca. 20 % bis 30 % der Nennleistung.
- 2) Übergangszeit: Das BHKW taktet mit Nennleistung und Gaskessel taktet mit ca. 20 % bis 30 % der Nennleistung. Es kommt bei beiden Anlagen nur zu kurzen Stillständen.
- 3) Sommerbetrieb: Das BHKW taktet mit Nennleistung und der Gaskessel taktet mit ca. 20 % bis 30 % der Nennleistung. Beide Anlagen werden nur sporadisch betrieben.

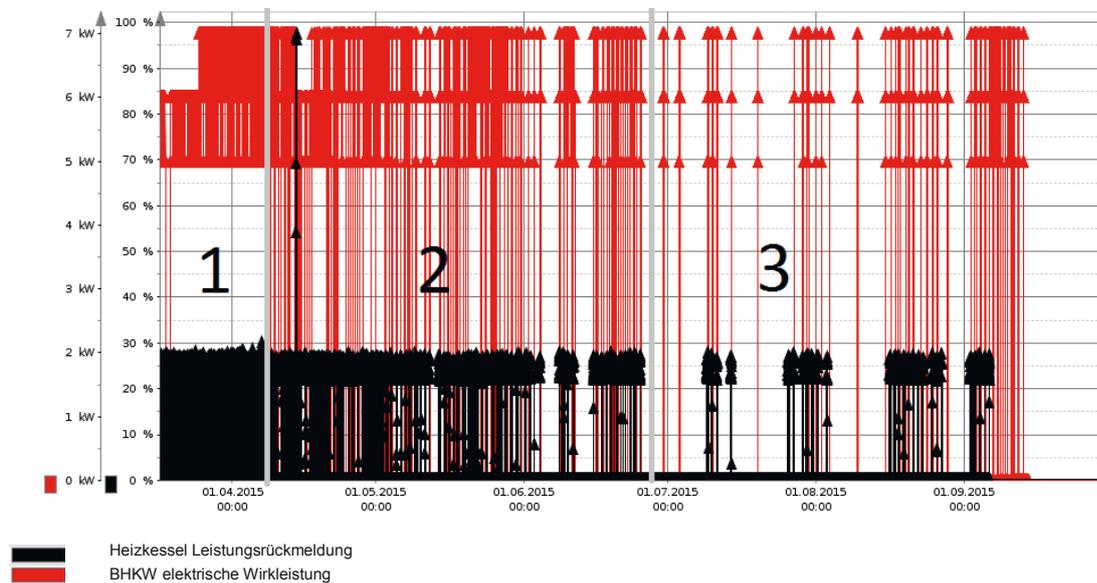


Abbildung 33: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels vom 17.03.2015 bis zu 31.07.2015

In Abbildung 34 ist ein typischer Tag im Winter dargestellt. Das BHKW läuft durchgängig mit Nennleistung, der Brennwertkessel taktet jedoch häufig. Dabei ist ein wiederkehrendes Muster zu erkennen: Der Brennwertkessel taktet für ca. 30 Minuten sehr

⁴ Die erste Monitoringphase beginnt mit dem 01.04.2015, für die Analyse der Brennwertkesselregelung konnte jedoch bereits auf Daten ab dem 17.03.2015 zurückgegriffen werden

häufig (bis zu 10-mal) und bleibt dann für ca. 30 Minuten außer Betrieb. Je höher der Wärmebedarf, desto kürzer sind diese Stillstandszeiten. In Abbildung 35 ist ein typischer Tag während der Übergangszeit dargestellt. Nachts werden weder das BHKW noch der Brennwertkessel betrieben. Ab ca. 6:00 Uhr ist Wärmebedarf vorhanden und der Brennwertkessel schaltet ein. Erst über eine Stunde später geht das BHKW in Betrieb und der Brennwertkessel schaltet ab. Das BHKW läuft bis ca. 15:30 Uhr durchgängig, der Brennwertkessel schaltet bei Bedarf taktend dazu. Ab 15:30 Uhr ist kein Wärmebedarf mehr vorhanden und weder BHKW noch Gaskessel werden betrieben.

Abbildung 36 zeigt einen typischen Tag im Sommer. Ähnlich wie in der Übergangszeit laufen nachts weder das BHKW noch der Gaskessel. In der Früh schaltet auch hier zunächst der Gaskessel zu und erst dann das BHKW. Kurzzeitig werden beide Wärmeerzeuger betrieben, wobei der Gaskessel häufig taktet. Nach ca. 30 Minuten schaltet der Gaskessel ab und es wird nur noch das BHKW - mit Nennleistung - betrieben. Sobald der Pufferspeicher voll beladen ist, schaltet das BHKW wieder ab. Im Sommer ist es möglich, dass eine Pufferspeicherladung für mehrere Tage ausreicht, sodass sowohl das BHKW als auch der Gaskessel mehrere Tage lang nicht betrieben werden müssen.

In allen drei Szenarien fallen folgende wiederkehrende Muster besonders auf:

- Der Gaskessel wird taktend mit lediglich ca. 20 % bis 30 % der Nennleistung betrieben und erreicht nur kurze Betriebszeiten pro Start. Bei höherem Wärmebedarf wird häufiger getaktet. Die Länge eines „Taktes“ bleibt in etwa gleich.
- In der Übergangszeit wird nach längerem Stillstand zuerst der Brennwertkessel angefordert. Das BHKW, das eigentlich als Grundlastversorger dient, wird erst später angefordert

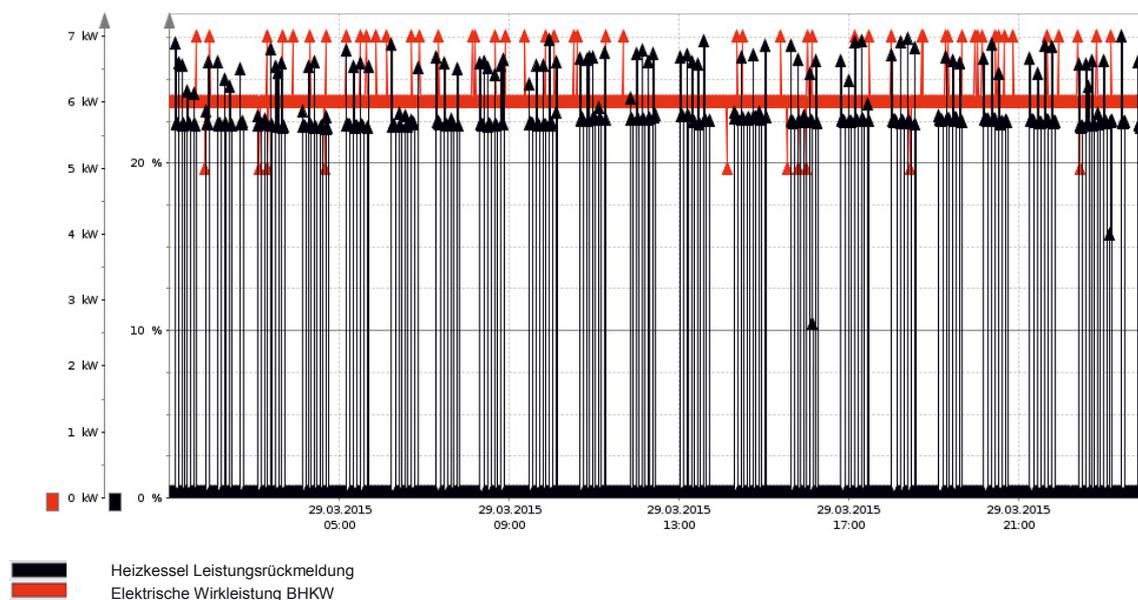


Abbildung 34: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 29.03.2015 (Winterbetrieb)

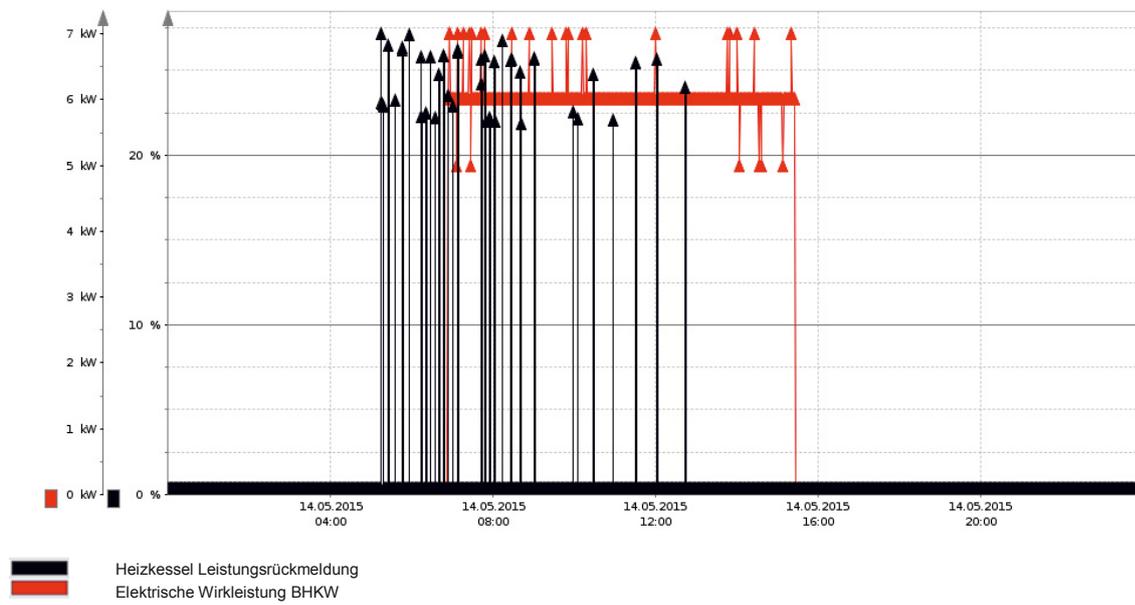


Abbildung 35: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 14.05.2015

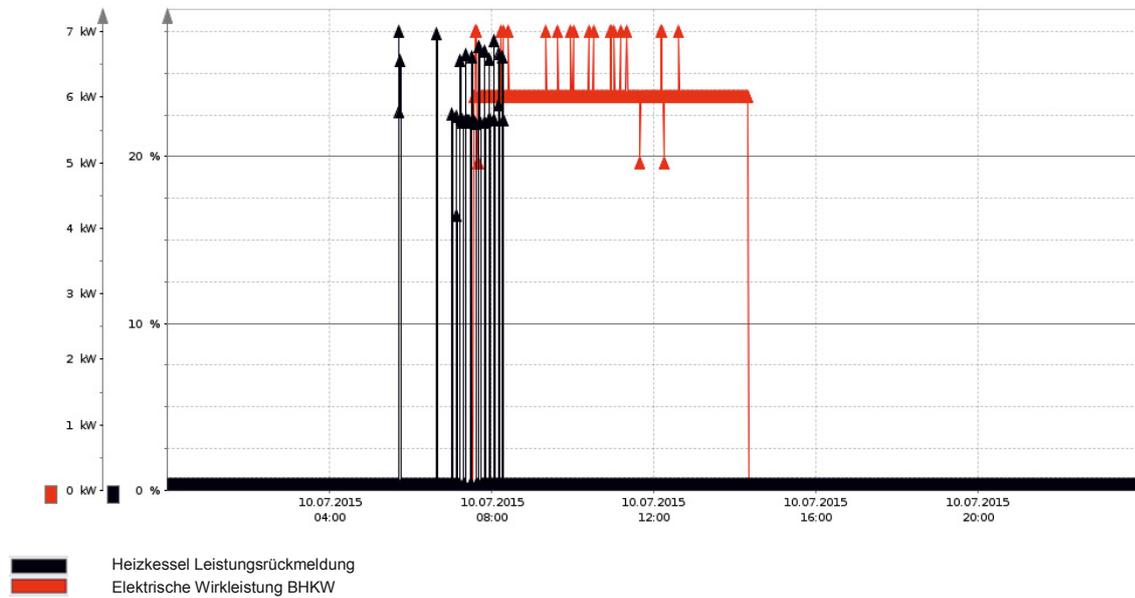


Abbildung 36: Leistungsrückmeldung des Brennwertkessels am 10.07.2015

5.1.1.5 Analyse der BHKW-Motorprobleme

Im November 2015 wurde an der BHKW Anlage eine ungewöhnliche Schwankung der elektrischen Leistung festgestellt (siehe Abbildung 37), weiterhin lief das BHKW sehr unruhig. Bei der Überprüfung stellt der Hersteller der BHKW Anlage fest, dass der Druckaufbau in einem Zylinder nicht ausreichend war. Daraufhin wurde der komplette Motor ausgetauscht. Die Inbetriebnahme des neuen Motors erfolgte am 10. Dezember 2015. Für die ersten 200 Betriebsstunden wurde der Motor auf eine Leistung von 60 % eingedrosselt (Einlaufphase). Am 18. Dezember 2015 wurde an dem neuen Motor die erste Wartung durchgeführt, anschließend wurde die elektrische Leistung auf den Sollwert von 5,5 kW eingestellt.

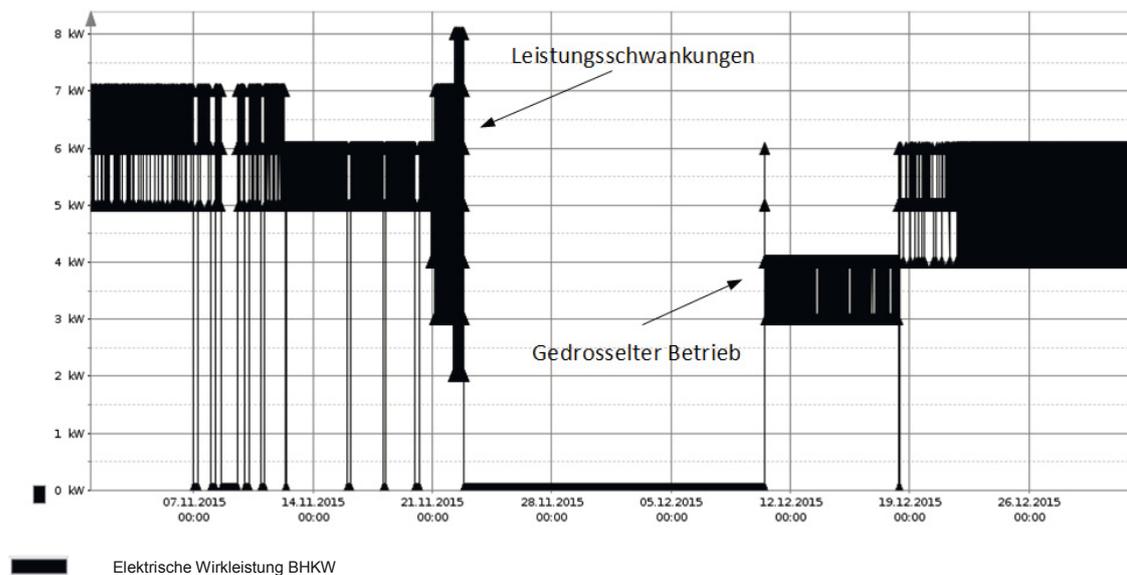


Abbildung 37: Elektrische Leistung der BHKW-Anlage A im November und Dezember 2015

Am 4. Januar 2016 kam es zu einem erneuten Ausfall der BHKW Anlage. Nach Überprüfung stellte sich heraus, dass das BHKW wegen Kühlwassermangel abgeschaltet hatte. Der Kühlwasserstand war jedoch ausreichend. Eine Wiederinbetriebnahme der BHKW Anlage war auch nach Quittierung der Störung zunächst nicht möglich, sondern erst nach Eingriff des Herstellers über die Fernwartung am 11. Januar. Die Fehlerursache konnte nicht abschließend ermittelt werden.

Im Zuge der Optimierungsarbeiten an der Regelung des Brennwertkessel (vgl. Kapitel 5.1.2) wurde am 12.01.2016 festgestellt, dass die Leistungsschwankungen wieder auftraten (siehe Abbildung 38). Weiterhin vibrierte das BHKW sehr stark. Als Ursache für die Störung wurde ein Fehler durch die Verwendung eines falschen Bauteils am Ventiltrieb des Motors identifiziert. Nach Austausch des Zylinderkopfs mit dem fehlerhaften Bauteil konnte die BHKW Anlage am 21. Januar wieder in Betrieb genommen werden und läuft seitdem stabil.

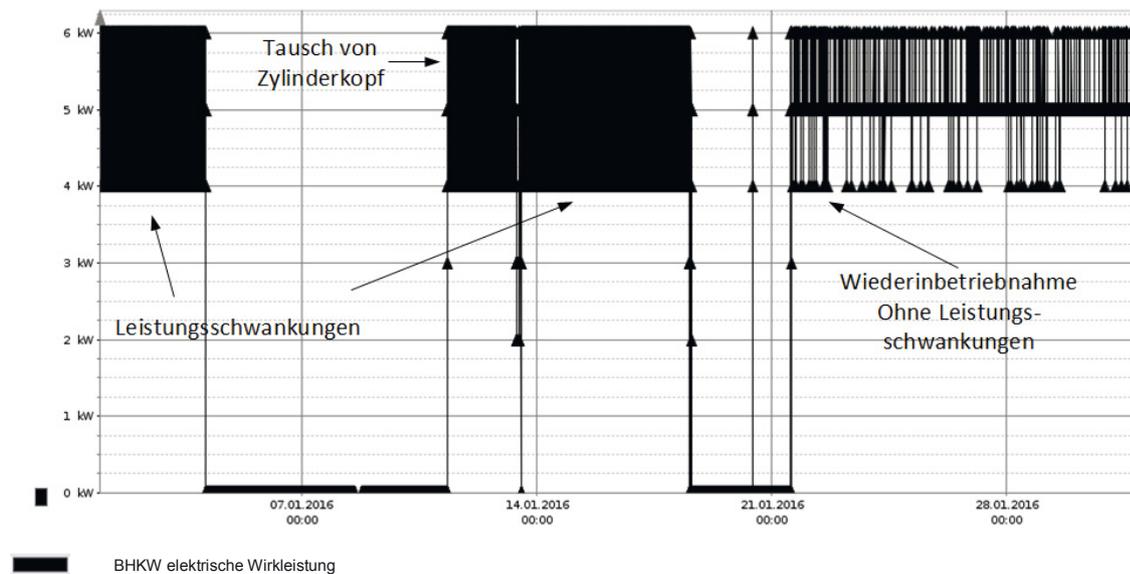


Abbildung 38: Elektrische Leistung der BHKW-Anlage A im Januar 2016

5.1.2 Identifikation und Umsetzung von Optimierungspotentialen

Ausgehend von den Ergebnissen der ersten Monitoringphase wurde bei BHKW-Anlage A die Regelung des Brennwert-Spitzenlastkessels als wesentlicher Ansatzpunkt für Optimierungen identifiziert. Ausgehend von den Beobachtungen in der ersten Monitoringphase sollte v. a. der Vorrang des Blockheizkraftwerks vor dem Spitzenlastkessel sichergestellt werden und das häufige Takten mit kurzen Betriebsdauern verringert werden.

Auf Basis der Erkenntnisse aus Kapitel 5.1.1.4 wurden am 12.01.2016 regelungstechnische Optimierungen an der Regelung des Brennwertkessels durchgeführt. Dabei wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Änderung der Freigabe des Brennwertkessels
- Änderung der Leistungsvorgabe des Brennwertkessels

In der ursprünglichen Konfiguration erhielt der Brennwertkessel die Freigabe von der Gebäudeautomation bei Unterschreitung des Vorlauftemperatursollwertes zum Hauptverteiler. Durch die Freigabe wird die interne Kesselregelung freigegeben, die Kesselkreispumpe im Primärkreislauf der hydraulischen Weiche schaltet ein und anschließend geht der Brennwertkessel in Betrieb. Der Gebläsebrenner wird über die interne Kesselregelung mit Einbindung eines externen vorgegebenen Sollwertes in seiner Leistung geregelt.

Für das Abschalten des Brennwertkessels wurde die untere Pufferspeichertemperatur herangezogen. Sobald diese Temperatur einen eingestellten Sollwert überschritten hatte, wurde die Freigabe für den Brennwertkessel von der Gebäudeautomation entzogen. Nach Auswertung der Anlagenwerte stellte sich heraus, dass diese Art des Aus-

schaltens nicht praktikabel ist, da das Abschaltkriterium in der Praxis nur selten erfüllt wurde. Dadurch stand die Freigabe seitens der übergeordneten Regelung praktisch dauerhaft an und die Kesselkreispumpe im Primärkreislauf der hydraulischen Weiche war fast immer in Betrieb, obwohl die interne Kesselregelung der Brenner bereits ausgeschaltet hatte.

Im Zuge der Optimierung wurde eine Verzögerungszeit für die Freigabe hinzugefügt. Dies bedeutet, dass bei Unterschreiten des Sollwertes der Brennwertkessel nicht sofort freigegeben wird, sondern erst nach Ablauf der Verzögerungszeit. Die Verzögerungszeit kann vom Betreiber der Anlage über eine Eingabemaske in der Anlagenvisualisierung geändert werden. Der Entzug der Freigabe durch die Gebäudeautomation ist nun wie folgt abgeändert worden: sobald die interne Kesselregelung den Brennwertkessel ausschaltet, bekommt die Gebäudeautomation den Leistungswert 0 übermittelt. Auf Basis dieser Rückmeldung vom Brennwertkessel wird die Freigabe für den Brennwertkessel von der Gebäudeautomation sofort entzogen. Die Kesselkreispumpe auf der Primärseite der hydraulischen Weiche läuft noch 2 Minuten nach und schaltet danach aus. Die Nachlaufzeit der Kesselkreispumpe wird von der internen Kesselregelung übernommen.

Im Abbildung 39 sind die neu hinzugefügten parametrierbaren Felder zu sehen:

- Freigabe < Kessel Start
- Kessel Stopp Leistung < „20 %“
- Anlaufverzögerung
- Leistung

Vor der Optimierung erhielt der Brennwertkessel seine Leistungsvorgabe in Form eines 0...10 V Signals. Für diese Leistungsvorgabe wurde der maximale Temperatursollwert aus den vier Heizkreisen ermittelt. Dieser maximale Sollwertwert wurde anschließend mit einer festen Sollwertanhebung von 10 K erhöht. Der sich daraus ergebende Temperaturwert wurde in eine Leistungsvorgabe von 0...100 % bzw. ein 0...10 V Signal umgewandelt und dem Brennwertkessel vorgegeben.

Im Zuge der Optimierungen wurde die Regelung nach vorgegebener Leistung (Leistungsvorgabe) in eine Regelung nach vorgegebener Temperatur (Temperaturvorgabe) abgeändert. Hier wird zunächst ebenfalls der maximale Temperatursollwert aus den vier Heizkreisen ermittelt, anschließend jedoch nicht über eine feste, sondern über eine frei einstellbare Sollwertanhebung angehoben. Dieser Temperatursollwert wird nun im Unterschied zur vorherigen Konfiguration ohne Umrechnung in eine Leistungsvorgabe direkt in ein 0...10 V Signal umgewandelt und der internen Kesselregelung des Brennwertkessels als Temperatursollwert vorgegeben.

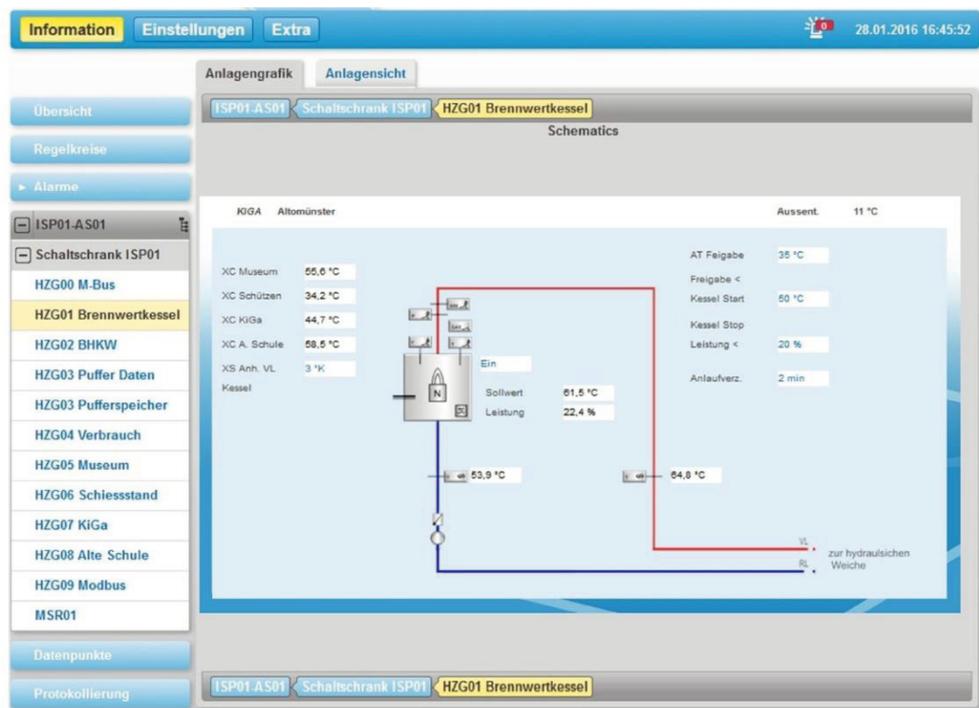


Abbildung 39: Anlagensvisualisierung (Brennwertkessel nach Optimierung)

In Abbildung 39 sind die umgesetzten Optimierungen in der Visualisierung der Kesselregelung zu erkennen. Auf der oberen linken Seite werden die aktuellen Sollwerte angezeigt, die für die einzelnen Heizkreise auf Basis der Außentemperatur und der Heizkurven berechnet werden. Unterhalb ist das Eingabefeld „XS Anh. VL“ für die frei einstellbare Anhebung des Maximalsollwertes aus den Heizkreisen zu erkennen. Der aktuelle Sollwert in Abbildung 39 von $61,5\text{ °C}$ errechnet sich aus diesem Maximalsollwert (hier $58,5\text{ °C}$) zuzüglich einer Sollwertanhebung von 3 K . Bei Erreichen dieses Sollwerts wird der Brennwertkessel über die interne Kesselregelung abgeschaltet.

5.1.3 Ergebnisse der zweiten Monitoringphase

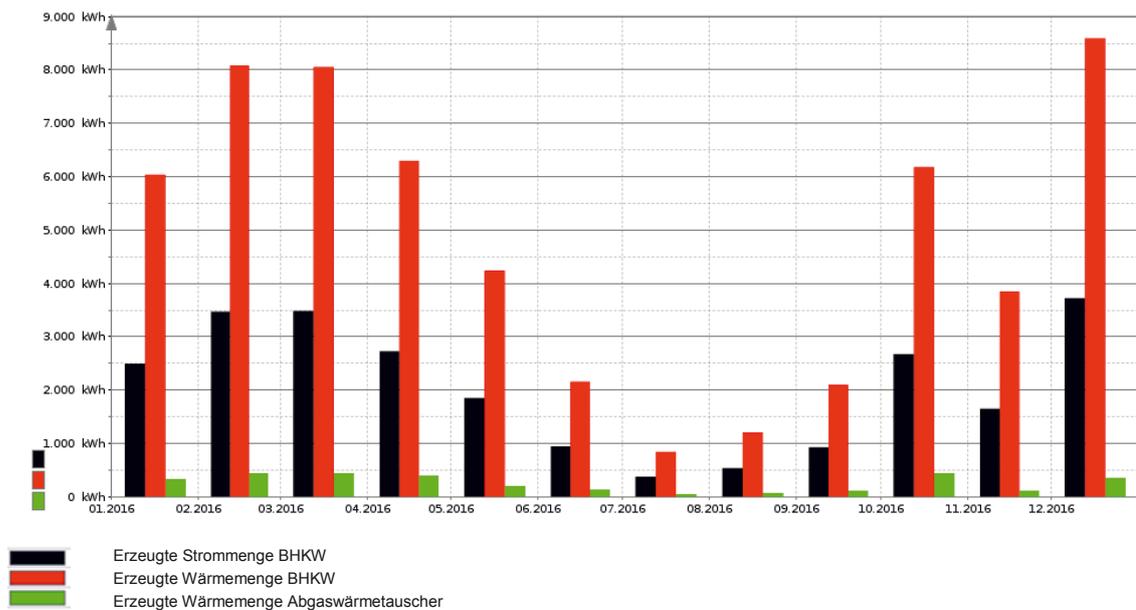
5.1.3.1 Energieumsätze

Im Rahmen der zweiten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage A im Zeitraum vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2016 ausgewertet. In Tabelle 13 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz des BHKWs und des Brennwertkessels aufgelistet. Das BHKW erzeugte ca. $24,9\text{ MWh}_{\text{el}}$ Strom und $61,3\text{ MWh}_{\text{th}}$ Wärme und der Brennwertkessel erzeugte ca. weitere $114,7\text{ MWh}_{\text{th}}$ Wärme. Ausgehend von den Energieumsätzen lassen sich die Nutzungsgrade des BHKW und der Brennwertkessel bestimmen. Das BHKW erreicht einen elektrischen Nutzungsgrad von $26,2\%$ (Datenblattangabe $27,4\%$) und einen thermischen Nutzungsgrad von $64,5\%$ (Datenblattangabe $68,7\%$). Der elektrische Nutzungsgrad ist im Vergleich zur ersten Monitoringphase etwas geringer, der thermische Nutzungsgrad dagegen etwas höher.

Tabelle 13: Energieumsätze der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

	BHKW	Brennwertkessel
Erzeugte Wärmemenge	61,3 MWh _{th}	114,7 MWh
Anteil Wärmeerzeugung Abgaswärmetauscher	3,6 MWh _{th}	
Erzeugte Strommenge	24,9 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	95,0 MWh	146,3 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	64,5 %	78,4 %
Elektrischer Nutzungsgrad	26,2 %	-

In Abbildung 40 ist die monatliche Strom- und Wärmeerzeugung des BHKW während der zweiten Monitoringphase dargestellt. Man erkennt wieder deutlich, dass das BHKW aufgrund des höheren Wärmebedarfs im Winter länger betrieben werden kann als in den Sommermonaten. Die im Vergleich zu Februar und März geringere Strom- und Wärmebereitstellung im Januar 2016 ist auf die oben erläuterten Ausfälle des BHKW-Moduls zurückzuführen (siehe Kapitel 5.1.1.5).

**Abbildung 40: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase**

In Abbildung 41 sind die monatlichen Nutzungsgrade des BHKW während der zweiten Monitoringphase dargestellt. Die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade des BHKW blieben über den gesamten Zeitraum relativ konstant. Eine Ausnahme bildet der Januar 2016. Hier fiel der elektrische Nutzungsgrad des BHKW aufgrund der in Kapitel 5.1.1.5 beschriebenen Motorprobleme etwas geringer aus.

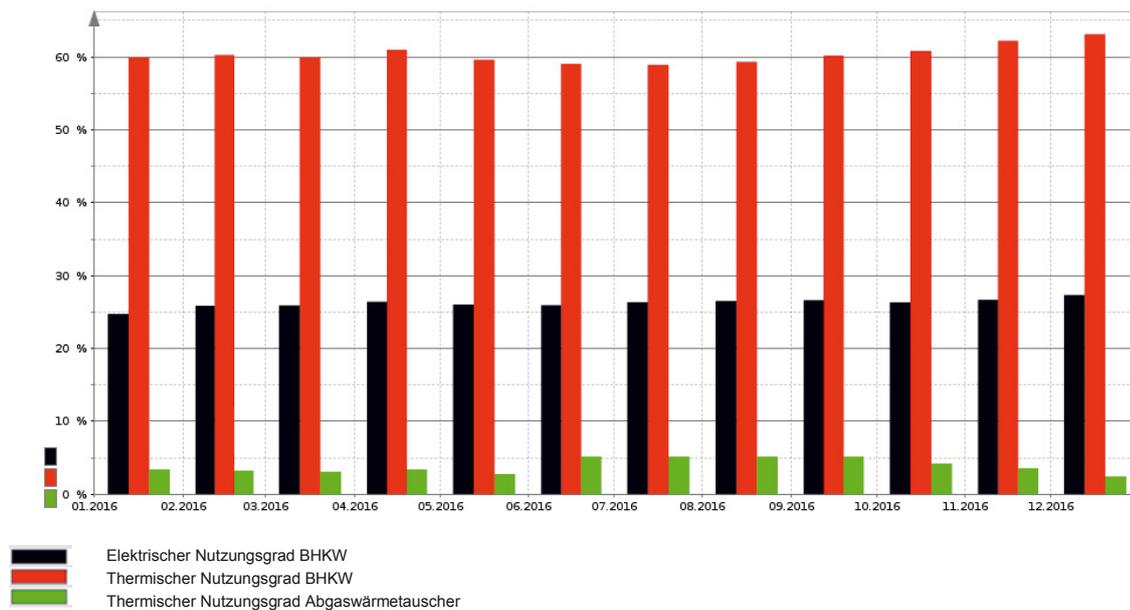


Abbildung 41: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

5.1.3.2 Betriebsverhalten

Das BHKW erreichte in der zweiten Monitoringphase insgesamt 4.977 Betriebsstunden und 4.527 Vollbenutzungsstunden (vgl. auch geordnete elektrische Dauerlinie Abbildung 42). Zu erkennen ist, dass das Modul in der zweiten Monitoringphase mit einer etwas geringeren durchschnittlichen Leistung von lediglich 5 kW_{el} betrieben wurde. Hierbei ist jedoch die bereits in der ersten Monitoringphase beschriebene Problematik bezüglich der BHKW-Leistungsdaten (Ausgabe in Schritten von 1 kW) zu beachten, sodass die tatsächliche durchschnittliche Leistung etwas höher liegen kann. Der Gaskessel wurde insgesamt 2.572 Stunden betrieben und wurde über 20.000-mal angefordert. Im Durchschnitt wurde der Gaskessel ca. 7,7 Minuten lang pro Start betrieben. Dies ist etwas länger als in der ersten Monitoringphase.

Tabelle 14: Betriebsdaten der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	Gaskessel
Betriebsstunden	4.977 h	2.572 h
Vollbenutzungsstunden	4.527 h	603 h
Starts	160	20.070
Betriebsstunden pro Start	31,1 h	7,7 Minuten

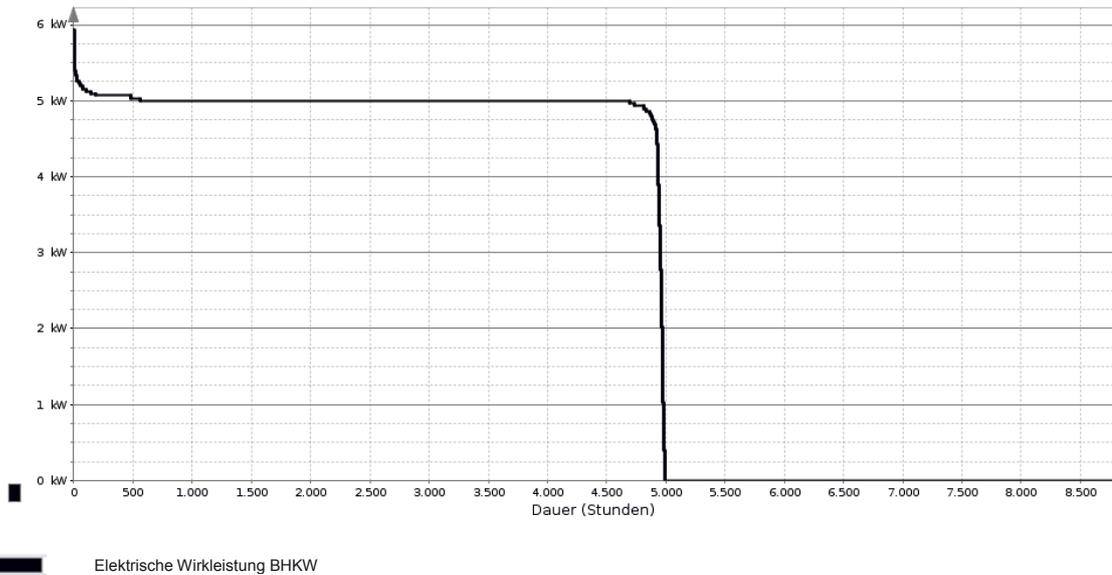


Abbildung 42: Geordnete, elektrische Dauerlinie der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

Betrachtet man die monatliche Startanzahl des BHKW (siehe Abbildung 43) so kann man erkennen, dass das BHKW in den Wintermonaten deutlich weniger taktet als in der Übergangszeit und in den Sommermonaten. Im Dezember 2016 wurde das BHKW durchgängig betrieben und weist deshalb keinen Startvorgang auf. Die etwas höhere Startanzahl im Januar 2016 ist auf die in Kapitel 5.1.1.5 beschriebenen Motorprobleme zurückzuführen. In der Übergangszeit und im Sommer steigt die Startanzahl gegenüber den Wintermonaten deutlich an, jedoch taktet das BHKW im Vergleich zur ersten Monitoringphase insgesamt weniger häufig.

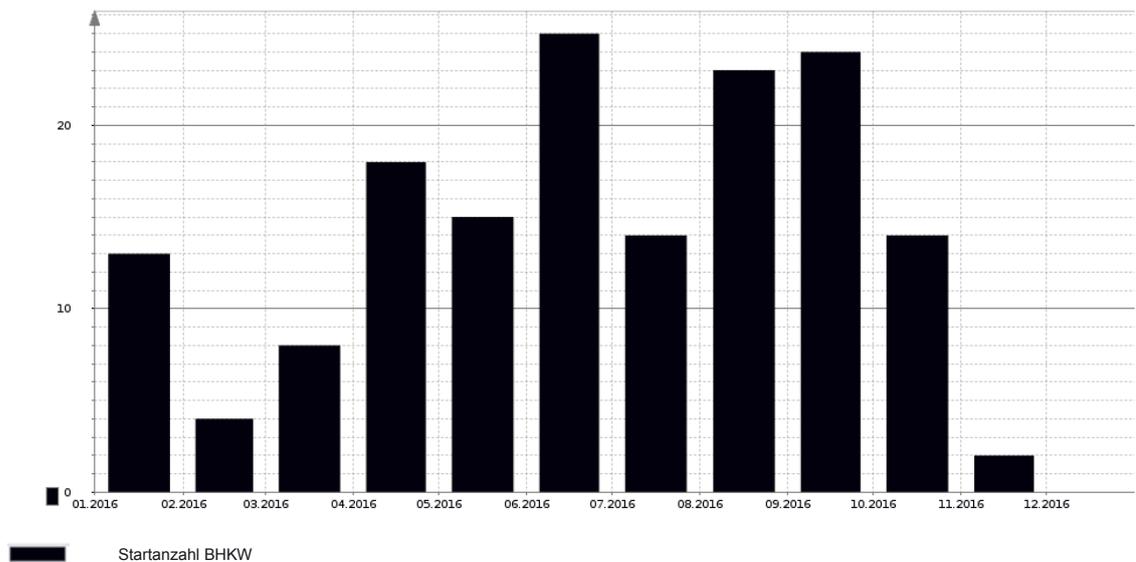


Abbildung 43: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

In Abbildung 44 sind die monatlichen Betriebsstunden pro Start des BHKW dargestellt. Die Monate Februar, November und Dezember schneiden am besten ab. Im Dezember 2015 konnte das BHKW sogar durchgängig betrieben werden. Die geringeren Betriebsstunden pro Start im Januar 2016 sind auf die bereits beschriebenen Motorprobleme zurückzuführen. Insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer fallen die Betriebsstunden pro Start mit Werten von ca. 14,0 bzw. 4,4 nochmals geringer aus. Der Jahresdurchschnitt von 31,1 Betriebsstunden pro Start ist jedoch deutlich höher als während der ersten Monitoringphase.

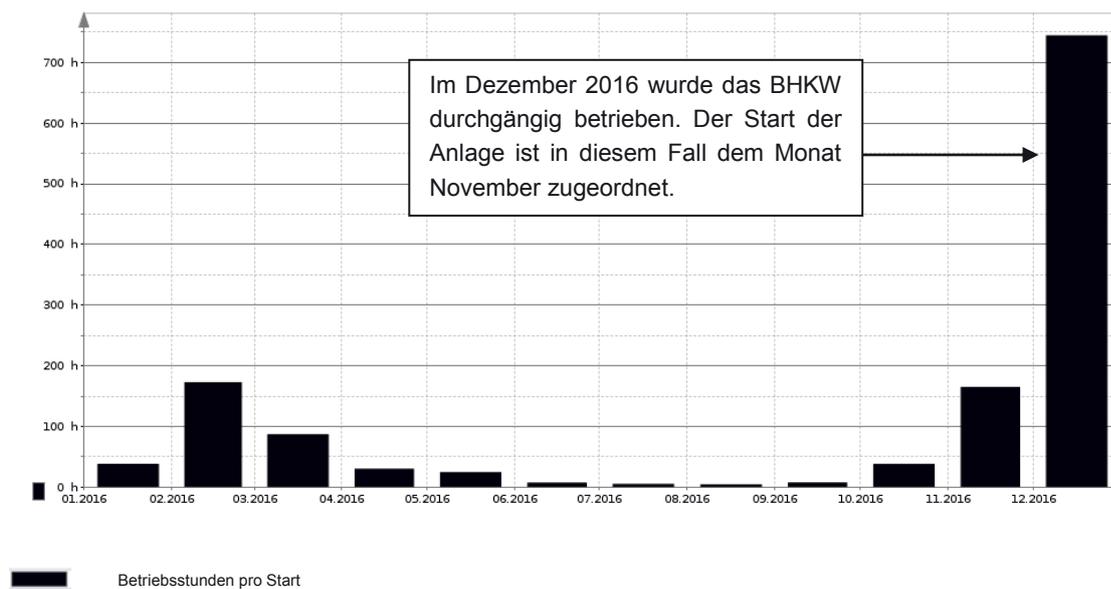


Abbildung 44: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

5.1.3.3 Ökologische Betrachtung

In der zweiten Monitoringphase konnte im Mittel eine Primärenergieeinsparung von 22,9 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung erreicht werden. Dies ist etwas niedriger als in der ersten Monitoringphase und lässt sich in erster Linie auf den niedrigeren elektrischen Nutzungsgrad der Anlage in diesem Zeitraum zurückführen. Die Monatswerte der Primärenergieeinsparung sind in Abbildung 45 dargestellt. Die erzielbare Primärenergieeinsparung korreliert mit den BHKW-Nutzungsgraden, dementsprechend werden in den Monaten mit hohen Nutzungsgraden (vgl. Abbildung 41) auch hohe Primärenergieeinsparungen erzielt.

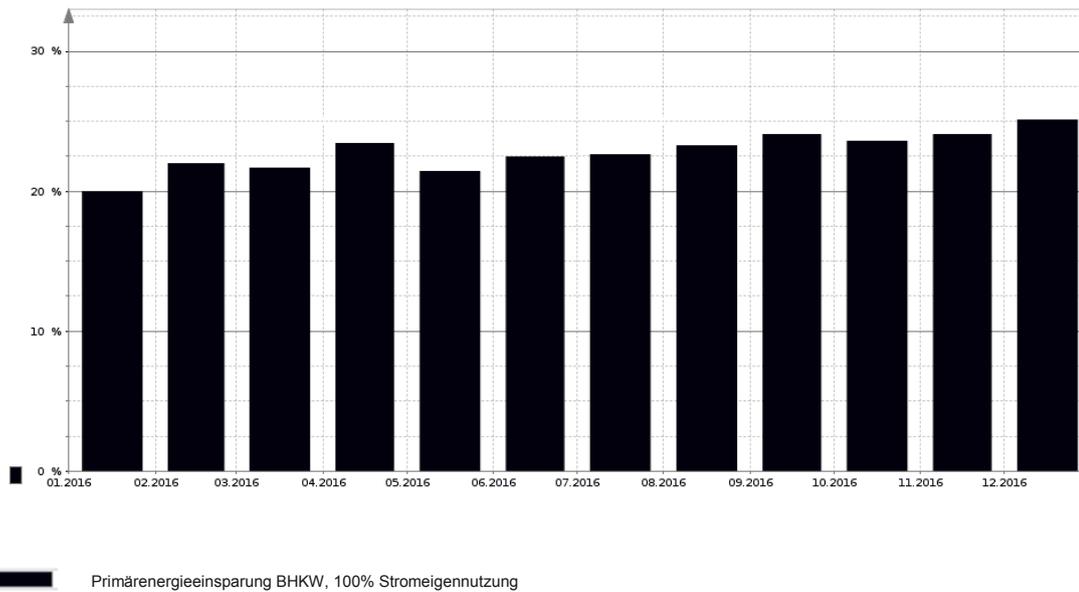


Abbildung 45: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

In der zweiten Monitoringphase wurden über das BHKW insgesamt 19,3 t CO₂ emittiert. Nach der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 verteilt sich der CO₂-Ausstoß wie folgt auf die Strom- und Wärmeerzeugung:

- Strom: 16,4 t CO₂
- Wärme: 2,9 t CO₂

In Abbildung 46 ist der monatlichen CO₂-Ausstoß der Anlage aufgeteilt auf die Strom- und Wärmeerzeugung dargestellt. Der absolute CO₂-Ausstoß ist erster Linie von den Betriebsstunden bzw. vom Kraftstoffverbrauch der Anlage abhängig und somit insbesondere in den Wintermonaten hoch. Die der Stromerzeugung zugeordneten Werte des CO₂-Ausstoßes sind deutlich höher als die der Wärme zugeordneten Werte, da der Strom bei der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 höher bewertet wird.

Dies spiegelt sich auch bei den spezifischen CO₂-Emissionen wieder. Im Jahr 2016 betragen die strombezogenen durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen 659 g/kWh_{el} und die wärmebezogenen 47 g/kWh_{th}. Die monatlichen spezifischen CO₂-Emissionen sind in Abbildung 47 dargestellt. Diese Werte entsprechen in etwa denen aus der ersten Monitoringphase.

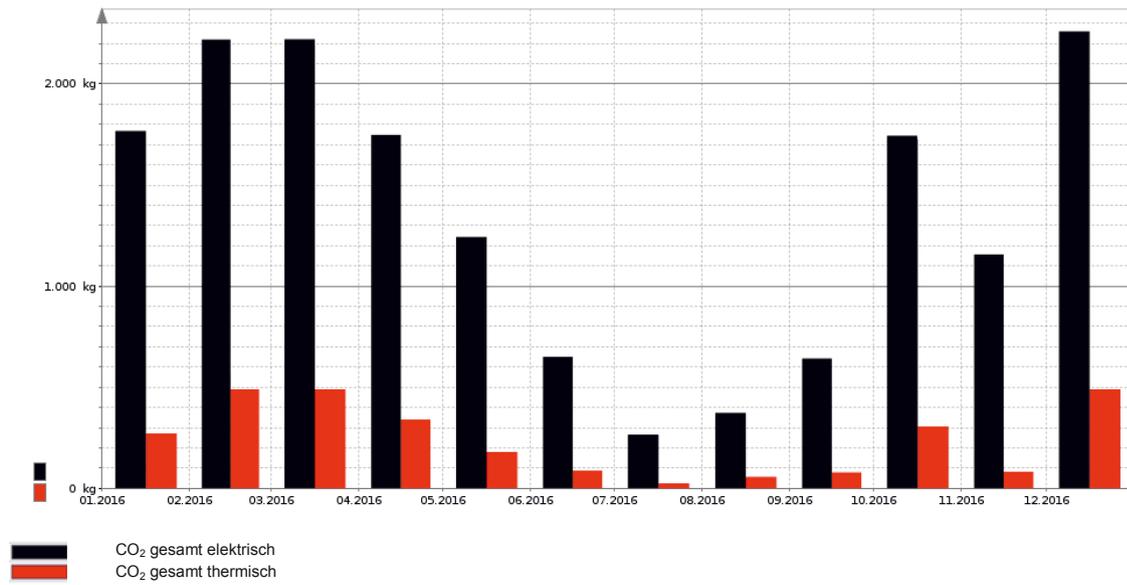


Abbildung 46: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

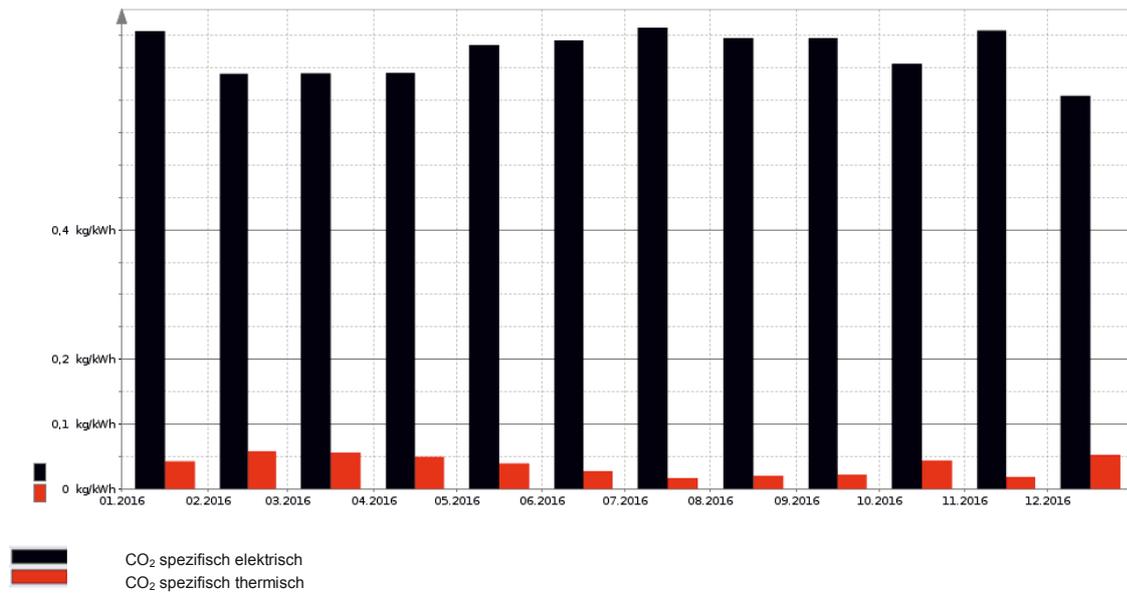


Abbildung 47: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage A in der zweiten Monitoringphase

5.1.4 Evaluation

5.1.4.1 Evaluation der optimierten Kesselregelung

Wie in Kapitel 5.1.2 beschrieben wurde am 12.01.2016 die Regelung des Brennwertkessels umgestellt. Ziel der Umstellung war in erster Linie, längere Laufzeiten des Brennwertkessels und geringere Start-Stopp-Zyklen zu erzielen. Um die Auswirkungen der Änderungen zu analysieren, wurden stichprobenartig verschiedene Tage direkt vor und nach der Umstellung ausgewählt an denen die Betriebsweise des BHKW und des Brennwertkessels analysiert wurden. Bei der Auswahl wurde darauf geachtet, dass das BHKW über den Betrachtungszeitraum von 24 Stunden durchgängig bei Nennlast betrieben wurde. Es wurden insgesamt 4 Tage betrachtet:

- Vor der Umstellung der Regelung: 03.01.2016
- Tag der Umstellung: 12.01.2016
- Nach der Umstellung: 15.01.2016 und 25.01.2016

Der Betrieb des BHKW und des Brennwertkessels sind für die betrachteten Tage in Abbildung 48 bis Abbildung 51 dargestellt und die Betriebsdaten dieser Tage sind in Tabelle 15 aufgelistet. Vor der Umstellung bzw. am Tag der Umstellung (vgl. Abbildung 48 und Abbildung 49) taktete der Kessel sehr häufig und wurde fast durchgängig nur mit der minimal möglichen Leistung betrieben. Im Durchschnitt wurde der Kessel ca. 6 bis 7 Minuten pro Startvorgang betrieben. Nach der Umstellung (insbesondere am 15.01.2016) erreichte der Brennwertkessel aufgrund der implementierten Sperrzeit eine durchschnittlich fast 20 Minuten längere Laufzeit pro Startvorgang als zuvor. Allerdings wurde der Brennwertkessel immer noch mit minimaler Leistung betrieben. Bei der zweiten Stichprobenanalyse am 25.01.2016 war es deutlich wärmer als an den restlichen Tagen, dennoch konnten auch an diesem Tag mit durchschnittlich 10 Minuten pro Startvorgang längere Laufzeiten erreicht werden.

Mit der Umstellung der Regelung konnte eine geringfügige Verbesserung des Betriebs des Brennwertkessels erreicht werden, dennoch ist das Ergebnis nicht vollends befriedigend. Bei der betrachteten Anlage werden die Grenzen einer ausschließlich regelungs-basierten Optimierung erreicht. Um längere Betriebszeiten erzielen zu können, müssten die Anlagenhydraulik bzw. die Wärmeerzeuger überarbeitet werden. Beispielsweise könnten durch einen Kessel bzw. eine Brennwerttherme mit geringerer Nennleistung höhere Betriebsstunden bzw. weniger Startvorgänge erreicht werden. Es ist jedoch wichtig hervorzuheben, dass der bestehende Brennwertkessel für die Deckung der Wärmebedarfsspitzen ausgelegt ist und in dieser Form beibehalten werden muss. Es könnte lediglich ein zweiter kleinerer Kessel nachgerüstet werden, was aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist.

Tabelle 15: Betriebsdaten des BHKW und Heizkessels vor und nach Umstellung der Regelung

Betrachteter Tag	Mittl. Außen-temperatur (Quelle DWD)	BHKW			Heizkessel		
		Betriebs-stunden	Starts	Bh pro Start	Betriebs-stunden	Starts	Bh pro Start
03.01.2016	-1,3 °C	24 h	0	-	14,2 h	124	6,8 min
12.01.2016	3,9 °C	24 h	0	-	13,7 h	130	6,3 min
15.01.2016	-0,3 °C	24 h	0	-	15,0 h	48	18,8 min
25.01.2016	4,6 °C	24 h	0	-	12,7 h	76	10,0 min

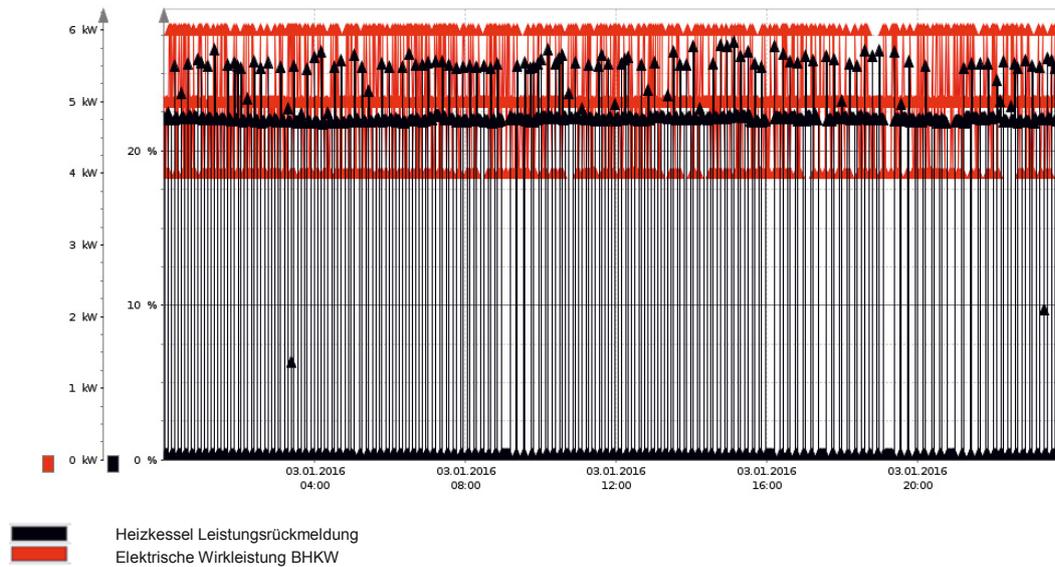


Abbildung 48: Betrieb des BHKW und des Heizkessels am 03.01.2016

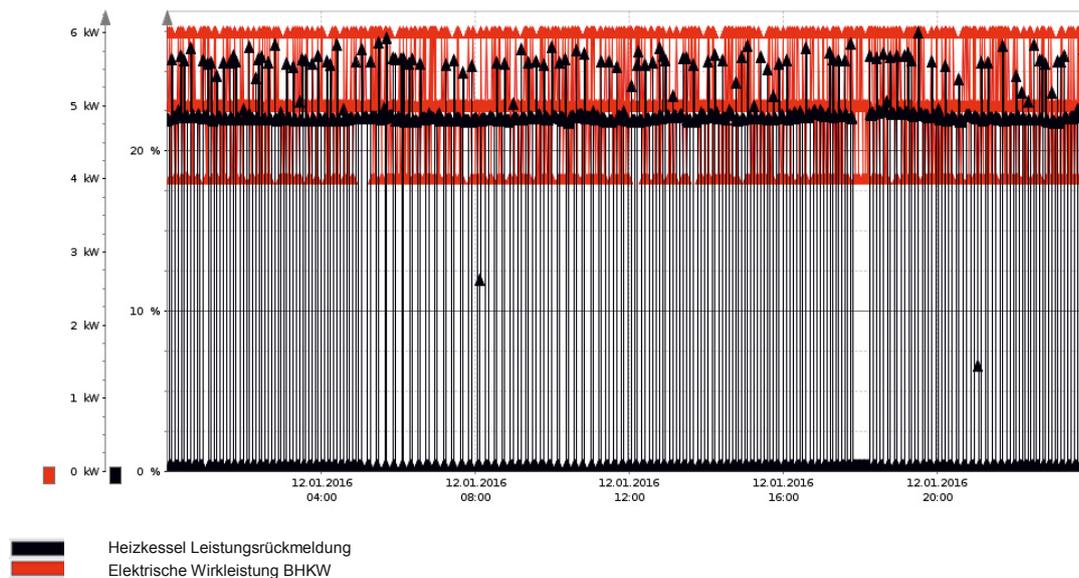


Abbildung 49: Betrieb des BHKW und des Heizkessels am 12.01.2016

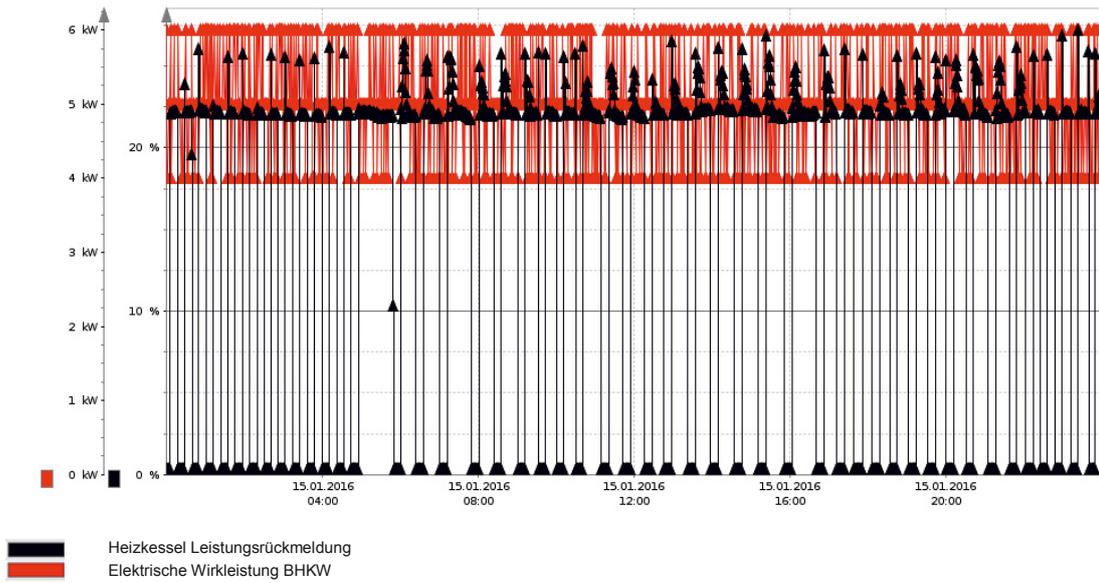


Abbildung 50: Betrieb des BHKW und Heizkessels am 15.01.2016

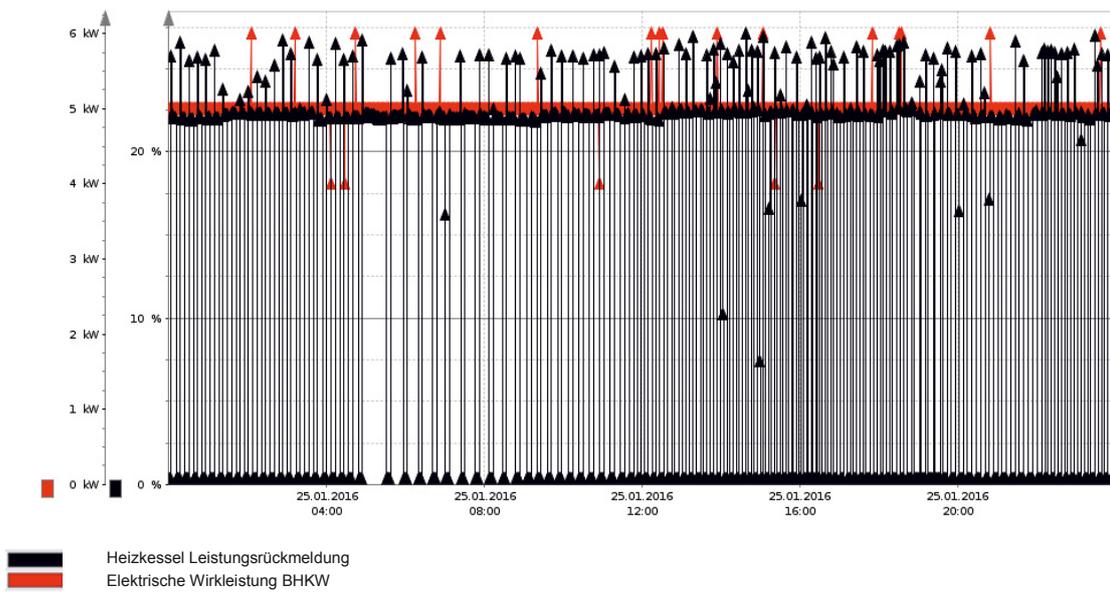


Abbildung 51: Betrieb des BHKW und Heizkessels am 25.01.2016

5.1.4.2 Einfluss der Witterung

Um einen repräsentativen Vergleich der beiden Monitoringphasen zu ermöglichen, muss der Einfluss der Witterung berücksichtigt werden. Hierzu wurde die monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage A in den beiden Betrachtungszeiträumen mit den monatlichen Gradtagszahlen für den Anlagenstandort verglichen. Da die beiden Monitoringphasen unterschiedliche Zeiträume umfassen, wurde für die zusammenfassende Betrachtung ein Vergleichszeitraum gebildet, der in diesem Fall jeweils die Monate April bis einschließlich Dezember umfasst. Für die Betrachtung wurden die vom Institut für Wohnen und Umwelt herausgegebenen Gradtagszahlen herangezogen [IWU17].

Abbildung 52 stellt die monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage und die korrespondierenden monatlichen Gradtagszahlen für die Jahre 2015 und 2016 dar. Vergleicht man die monatliche Wärmebereitstellung der beiden Jahre miteinander, ist zu erkennen, dass die Wärmebereitstellung größtenteils gut mit den entsprechenden Gradtagszahlen korreliert. Eine Ausnahme bildet hier lediglich der Oktober (vgl. Abbildung 52). Hier wurde im Oktober 2016 deutlich weniger Wärme bereitgestellt als im gleichen Zeitraum des Jahres 2015, obwohl die Gradtagszahlen nahezu identisch sind. Die Ursache hierfür konnte auf Basis der Monitoringdaten nicht geklärt werden und ist vermutlich auf witterungsunabhängige Faktoren (z. B. Nutzerverhalten) zurückzuführen.

Die Gradtagszahlen für November und Dezember 2016 sind deutlich höher als im Jahr 2015. Dies bedeutet, dass aufgrund von niedrigeren Außentemperaturen im November und Dezember 2016 mehr geheizt werden musste als im Vorjahr. Die zusätzlich benötigte Wärme wurde in diesem Fall in erster Linie über den Spitzenlastkessel bereitgestellt, da das BHKW in diesem Zeitraum bereits durchgängig mit Nennleistung betrieben wurde. Die Unterschiede im Wärmebedarf wirken sich daher nicht auf die BHKW-Betriebsstunden aus.

Mittels der Gradtagszahlen der Jahre 2015 und 2016 und den Gradtagszahlen des langjährigen Mittels (bezogen auf die Jahre 1976 bis 2016) wurde eine Witterungsbereinigung durchgeführt werden, die Ergebnisse sind in Tabelle 16 aufgelistet. Nach der Witterungsbereinigung und Abzug der witterungsunabhängigen Wärmegrundlast verbleibt eine Differenz von ca. 5,4 MWh_{th} bzw. 5,9 % zwischen den Jahren 2016 und 2015, die nicht direkt auf die Witterung zurückgeführt werden kann, sondern durch andere Einflussgrößen (z. B. Nutzerverhalten) bedingt ist. Insgesamt ist diese Differenz jedoch als gering zu bewerten, die beiden Monitoringphasen können daher in Bezug auf den Wärmebedarf als gut vergleichbar angesehen werden.

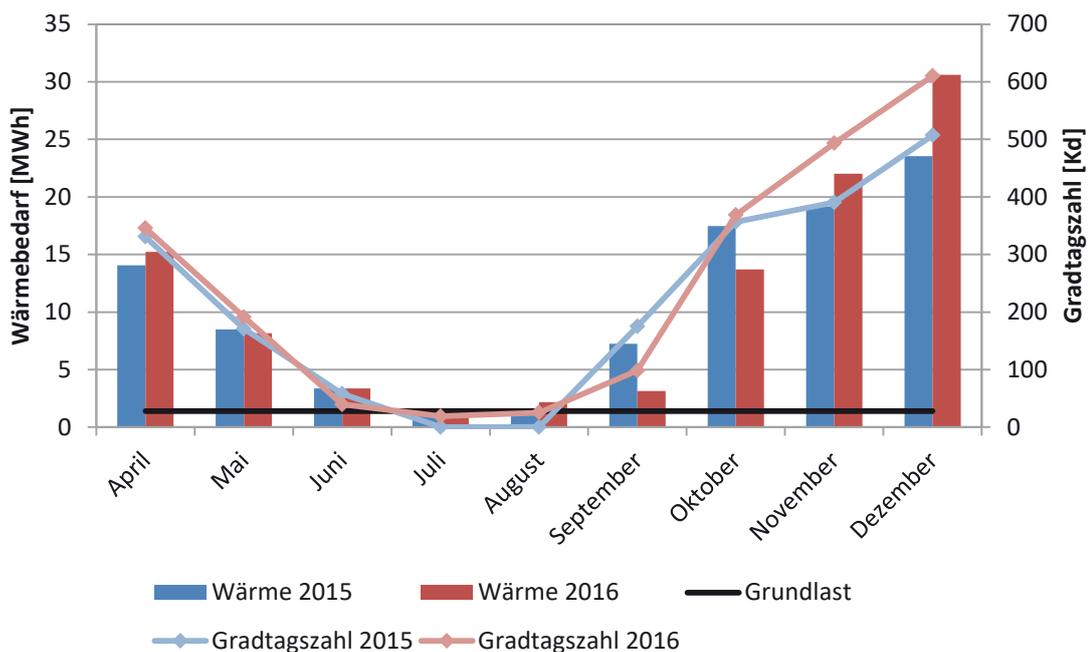


Abbildung 52: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage A und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) für die Vergleichszeiträume 2015 und 2016

Tabelle 16: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen [IWU17] der BHKW-Anlage A für die Vergleichszeiträume 2015 und 2016

	Gradtagszahl	Gradtagzahl des langjährigen Mittels	Korrekturfaktor (gerundet)	Raumwärmebereitstellung ohne Grundlastanteil	Raumwärmebereitstellung bezogen auf langjähriges Mittel
Vergleichszeitraum 2015	1988 Kd	2175 Kd	0,91	83,6 MWh _{th}	91,9 MWh _{th}
Vergleichszeitraum 2016	2191 Kd	2175 Kd	1,01	87,4 MWh _{th}	86,53 MWh _{th}

5.1.5 Zusammenfassung der Monitoringphasen

Im Rahmen des Monitorings der BHKW-Anlage A wurden zwei Phasen betrachtet:

- Erste Monitoringphase 01.04.2015 bis 31.12.2015
- Zweite Monitoringphase 01.01.2016 bis 31.12.2016

Da die beiden Monitoringphasen unterschiedliche Zeiträume umfassen, wurde für die zusammenfassende Betrachtung ein Vergleichszeitraum gebildet, der in diesem Fall jeweils die Monate April bis einschließlich Dezember umfasst. Die nachfolgenden Erläuterungen beziehen sich auf diesen Vergleichszeitraum. Für den Vergleichszeitraum wurden die Energieumsätze sowie das Betriebsverhalten des BHKW-Moduls und des Brennwärtekessels untersucht. Außerdem wurden die Primärenergieeinsparung und die

CO₂-Emissionen des BHKW betrachtet. Die Ergebnisse der beiden Monitoringphasen sind in Tabelle 17 aufgelistet.

Im Vergleich zur ersten Vergleichsphase sank in der zweiten Phase der elektrische Nutzungsgrad, während der thermische Nutzungsgrad stieg. Dies deutet darauf hin, dass das BHKW in der ersten Phase tatsächlich mit etwas mehr als der Nennlast von 5,5 kW und in der zweiten Phase im Mittel mit etwas weniger als der Nennlast betrieben wurde. In diesem Zusammenhang sei nochmals darauf hingewiesen, dass aus die BHKW-Leistungswerte nur in Schritten von 1 kW ausgegeben werden konnten, was auch das unplausible Ergebnis für die Vollaststunden in der ersten Vergleichsphase erklärt (Vollaststunden > Betriebsstunden). In Bezug auf das Betriebsverhalten konnten in der zweiten Phase mit nunmehr fast 23 Stunden pro Start eine Verbesserung erzielt werden. In der ökologischen Betrachtung ergeben sich keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Phasen, lediglich die Gewichtung der CO₂-Emissionen verschiebt sich aufgrund der unterschiedlichen elektrischen und thermischen Nutzungsgrade etwas.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Ergebnisse im Vergleichszeitraum für BHKW-Anlage A

	Erster Vergleichszeitraum		Zweiter Vergleichszeitraum	
	BHKW	Heizkessel	BHKW	Heizkessel
Erzeugte Wärmemenge	40,5 MWh _{th}	52,7 MWh _{th}	37,7 MWh _{th}	62,2 MWh
Anteil Wärmezeugung Abgaswärmetauscher	2,9 MWh _{th}	-	2,3 MWh _{th}	-
Erzeugte Strommenge	18,5 MWh _{el}	-	15,4 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	68,1 MWh	61,6 MWh	58,0 MWh	77,4 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	63,7 %	85,6 %	65,1 %	80,3 %
Elektrischer Nutzungsgrad	27,2 %	-	26,6 %	-
Betriebsstunden	3.216 h	1.134 h	3.088 h	1.362 h
Vollbenutzungsstunden	3.364 h	277 h	2.800 h	327 h
Starts	185	16.541	135	16.696
Betriebsstunden pro Start	17,3 h	4,1 Minuten	22,9 h	4,9 Minuten
Primärenergieeinsparung	23,6 %	-	23,7 %	-
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	11,8 t CO ₂	-	10,2 t CO ₂	-
CO ₂ -Ausstoß der Wärmezeugung	2,0 t CO ₂	-	1,6 t CO ₂	-
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	640 g/kWh _{el}	-	659 g/kWh _{el}	-
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmezeugung	46 g/kWh _{th}	-	43 g/kWh _{th}	-

Die Regelung des Brennwertkessels wurde im Detail betrachtet. Während der ersten Monitoringphase wurde festgestellt, dass der Brennwertkessel sehr häufig taktet. Daraufhin wurden im Januar 2016 Änderungen an der Regelung des Brennwertkessels vorgenommen, um längere Laufzeiten des Brennwertkessels zu erzielen. Durch die Umstellung konnte eine geringfügige Verbesserung der Laufzeiten erzielt werden, die sich in den geringeren Betriebsstunden pro Start in der zweiten Monitoringphase widerspiegelt (siehe Tabelle 17). Jedoch stößt man bei der betrachteten Anlage an die Grenzen einer ausschließlich regelungs-basierten Optimierung, insbesondere da der Brennwertkessel auf die thermische Spitzenlast ausgelegt ist und einen sehr weiten Leistungsbereich abdecken muss. Um weitere Verbesserungen zu erzielen, müssten die Anlagenhydraulik bzw. die Wärmeerzeuger überarbeitet werden, was aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll ist.

Die Umstellung der Regelung des Brennwertkessels hatte zusätzlich eine Verbesserung der Pufferspeicherausnutzung zur Folge. In Abbildung 53 ist der Pufferspeicher-Füllstand in Prozent als Rasterdiagramm über beide Monitoringphasen dargestellt. Man erkennt anhand der Kontraste zwischen unbeladen (blau) und beladen (rot) deutlich, dass der Pufferspeicher im Sommer 2016 besser ausgenutzt und auch höher beladen wurde (höhere Temperaturen, dunkelrote Färbung).

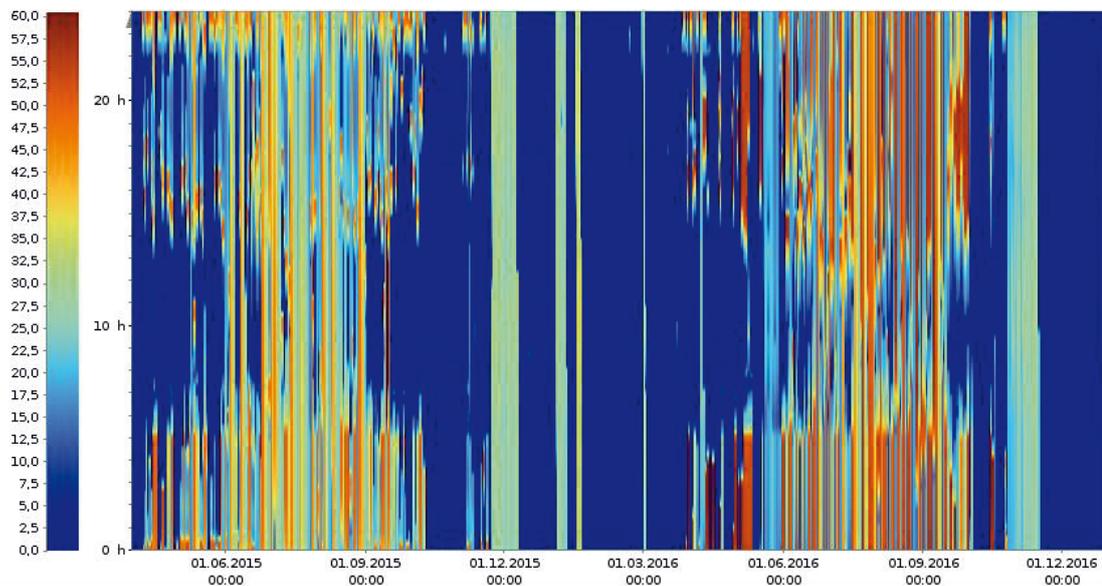


Abbildung 53: Rasterdiagramm des Pufferspeicher-Füllstands der BHKW-Anlage A über beide Monitoringphasen

5.2 BHKW-Anlage B

5.2.1 Ergebnisse der ersten Monitoringphase

5.2.1.1 Energieumsätze

Im Rahmen der ersten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage B im Zeitraum vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2015 ausgewertet. In Tabelle 18 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz der beiden BHKW-Module aufgelistet. Das BHKW1 erzeugte ca. 743 MWh_{el} Strom und 1.238 MWh_{th} Wärme und das BHKW2 erzeugte ca. weitere 925 MWh_{el} Strom und 1.620 MWh_{th} Wärme. Anhand der Energieumsätze lassen sich die Jahresnutzungsgrade der beiden BHKW bestimmen. Das BHKW1 erreicht einen elektrischen Jahresnutzungsgrad von 34,4 % (Datenblattangabe 36,2 %) und einen thermischen Jahresnutzungsgrad von 57,4 % (Datenblattangabe 55,1 %). Das BHKW2 erreichte einen elektrischen Jahresnutzungsgrad von 33,4 % (Datenblattangabe 34,6 %) und einen thermischen Jahresnutzungsgrad von 58,6 % (Datenblattangabe 55,9 %).

In Abbildung 54 sind die täglich erzeugten Wärmemengen der beiden BHKW und die Gesamtwärmeerzeugung des Heizkraftwerks dargestellt. Man erkennt, dass im Winter beide BHKW bei Nennleistung betrieben werden können. Die Wärmebedarfsspitzen werden über den Erdgas-Spitzenlastkessel gedeckt. In der Übergangszeit zum Sommer fiel der Wärmebedarf stark ab und konnte nahezu vollständig mit nur einem der BHKW-Module gedeckt werden. Zu Beginn wurde hierfür das BHKW2 eingesetzt, diese Vorrangschaltung wurde ab Ende Mai 2015 im Zuge von Optimierungsmaßnahmen geändert (vgl. hierzu gesonderte Darstellung in Kapitel 5.2.2.2 und Evaluierung in Kapitel 5.2.4.1).

Tabelle 18: Energieumsätze der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.238,8 MWh _{th}	1.620,0 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	743,0 MWh _{el}	924,9 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	2.157,6 MWh	2.766,1 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	57,4 %	58,6 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	34,4 %	33,4 %

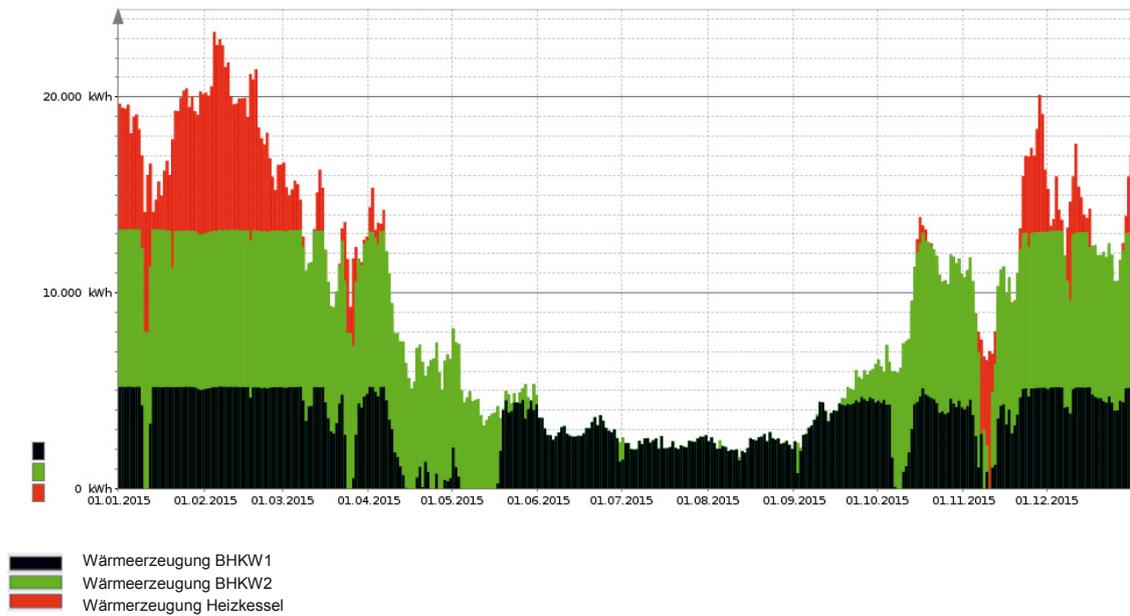


Abbildung 54: Tägliche Gesamtwärmeerzeugung der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

In Abbildung 55 sind die monatlichen Nutzungsgrade der beiden BHKW dargestellt. Betrachtet man die elektrischen Nutzungsgrade der beiden BHKW, so kann man erkennen, dass die Nutzungsgrade insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer niedriger sind als im Winter. Dies liegt daran, dass in der Übergangszeit und im Sommer beide Module häufig im Teillastbereich (modulierend) betrieben wurden, wo beide Module geringere elektrische Wirkungsgrade aufweisen (vgl. auch elektrische Jahresdauerlinie in Abbildung 56).

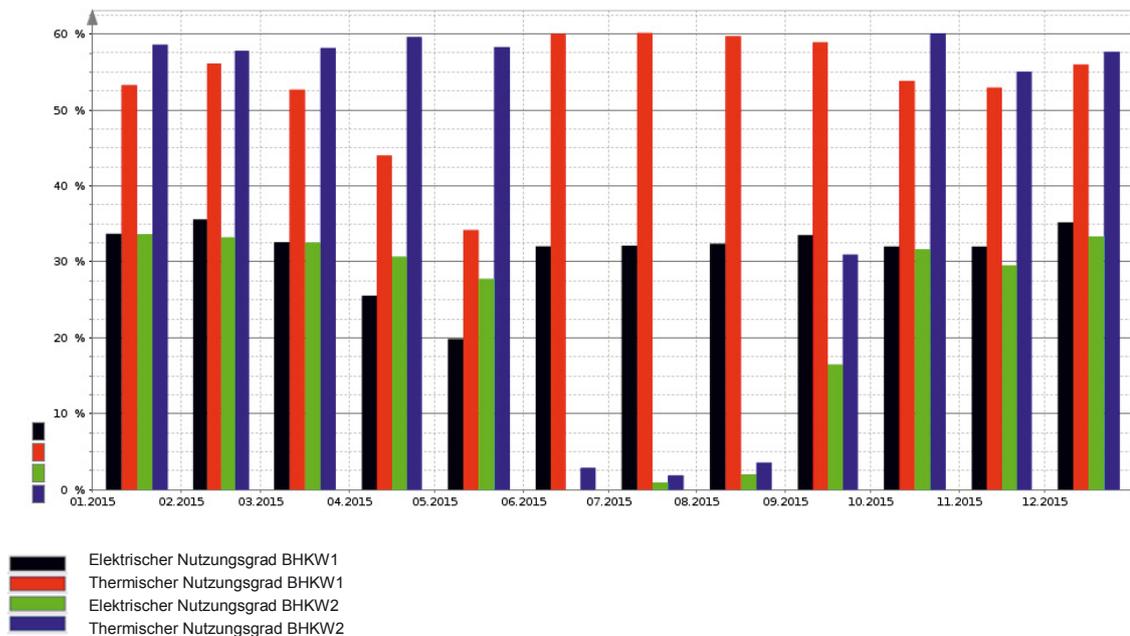


Abbildung 55: Nutzungsgrade der beiden BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

5.2.1.2 Betriebsverhalten

Die beiden BHKW-Module wurden während der ersten Monitoringphase ausschließlich wärmeführt betrieben. Die elektrischen Jahresdauerlinien für die BHKW-Module sind in Abbildung 56 dargestellt. Besonders auffällig sind hier die vielen Betriebsstunden bei denen beide BHKW mit reduzierter Leistung betrieben wurden (modulierender Betrieb bis 50 % der Nennleistung). BHKW2 wurde fast 1.000 h mit lediglich 50 % der Nennleistung betrieben, bei BHKW1 sind es fast 2.000 h. Insgesamt erreichte BHKW1 im Jahr 2015 6.651 Betriebsstunden / 5.233 Vollbenutzungsstunden und BHKW2 5.270 Betriebsstunden / 4.511 Vollbenutzungsstunden.

Tabelle 19: Betriebsdaten der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Betriebsstunden	6.651 h	5.270 h
Vollbenutzungsstunden	5.233 h	4.511 h
Starts	402	196
Betriebsstunden pro Start	16,5 h	26,9 h

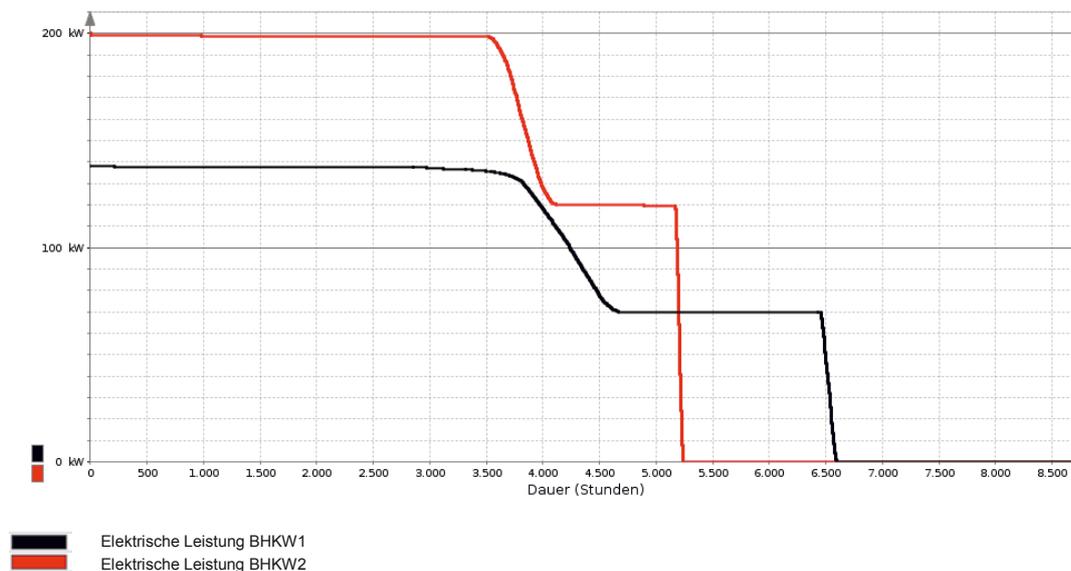


Abbildung 56: Geordnete elektrische Jahresdauerlinien der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

Betrachtet man die monatliche Startanzahl der beiden BHKW so kann man erkennen, dass die beiden BHKW-Module in den Wintermonaten weitestgehend durchgängig betrieben werden konnten (siehe Abbildung 57). In der Übergangszeit stieg die Startanzahl beider Module erwartungsgemäß deutlich an. Im Sommer weist BHKW1 eine wesentlich höhere Startzahl als BHKW2 auf, wobei hier zu berücksichtigen ist, dass im Sommer praktisch nur BHKW1 betrieben wurde. In Abbildung 58 sind die monatlichen

Betriebsstunden pro Start für die beiden BHKW-Module dargestellt. Während v. a. im Januar und Februar beide Module mit jeweils mehr als 300 Betriebsstunden pro Start praktisch durchgängig betrieben werden konnten, fallen in der Übergangszeit und im Sommer die Betriebsstunden pro Start deutlich geringer aus. In der Übergangszeit kommt BHKW1 ca. auf 22,9 Betriebsstunden pro Start und im Sommer nur auf 6,2 Betriebsstunden pro Start. BHKW2 kommt in der Übergangszeit auf ca. 8,9 Betriebsstunden pro Start und im Sommer auf ca. 1,8 Betriebsstunden pro Start. Der Jahresdurchschnitt von 16,5 für BHKW1 und 26,9 Betriebsstunden pro Start für BHKW2 ist insgesamt betrachtet jedoch als gut zu bewerten.

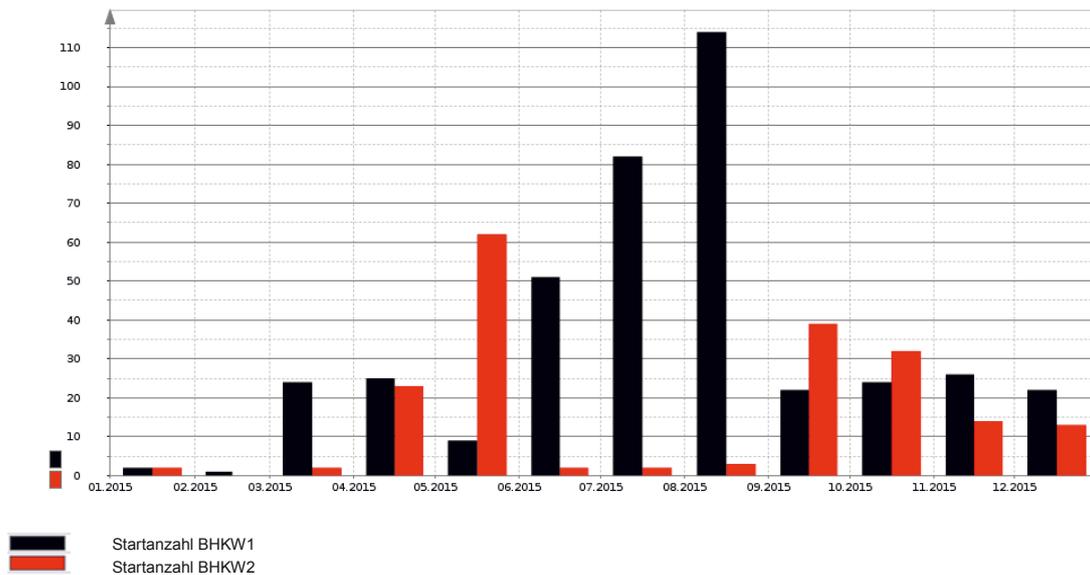


Abbildung 57: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

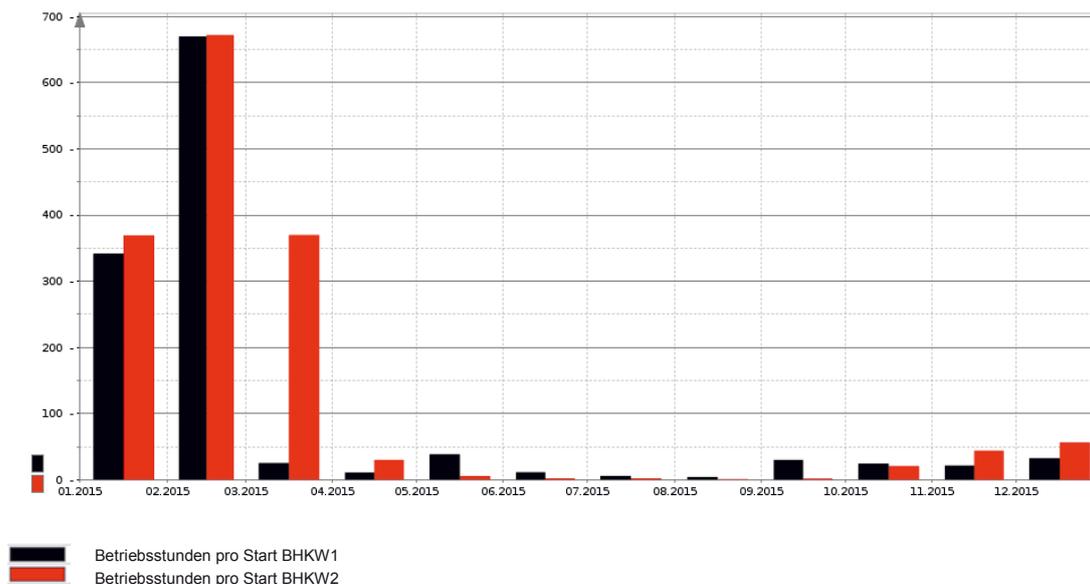


Abbildung 58: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

5.2.1.3 Ökologische Betrachtung

Die Primärenergieeinsparung wurde nach der in Kapitel 3.2.3.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Im Jahr 2015 konnte das BHKW1 im Mittel eine Primärenergieeinsparung von 27,0 % und BHKW2 eine Primärenergieeinsparung von 26,5 % gegenüber einer ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung aufweisen. Die monatlich aufgeschlüsselte Primärenergieeinsparung ist in Abbildung 59 dargestellt.

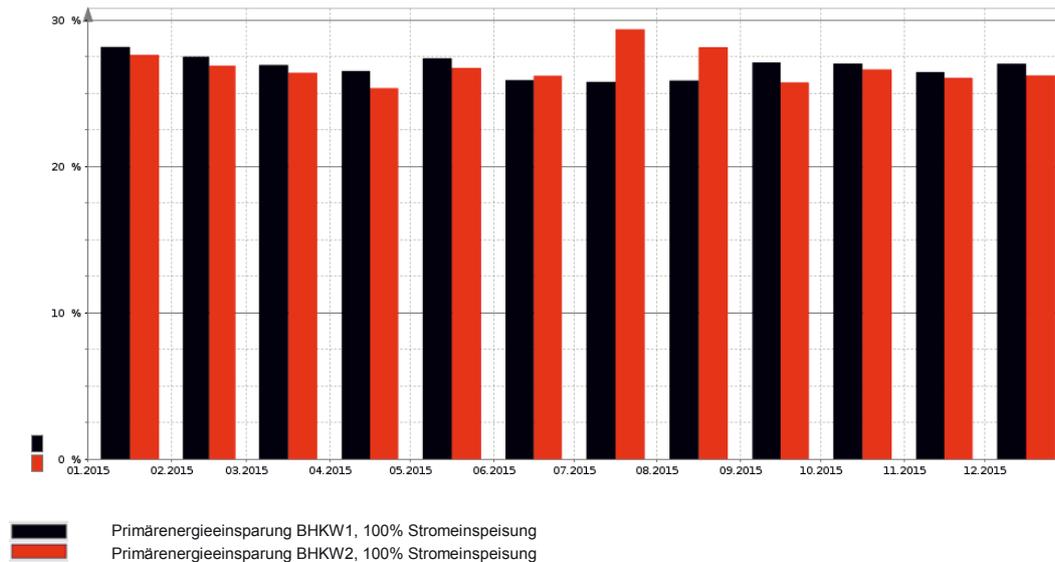


Abbildung 59: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

Im Jahr 2015 wurden von BHKW1 insgesamt 438,0 t CO₂ und vom BHKW2 insgesamt 561,5 t CO₂ emittiert. Nach der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 teilt sich der CO₂-Ausstoß auf die Strom- und Wärmeerzeugung auf (siehe Tabelle 20). In Abbildung 60 ist der absolute monatliche CO₂-Ausstoß der beiden BHKW dargestellt. Der CO₂-Ausstoß ist in erster Linie von den Betriebsstunden der Anlagen abhängig und somit insbesondere in den Wintermonaten hoch. Die der Stromerzeugung zugeordneten Werte des CO₂-Ausstoßes sind deutlich höher als die der Wärme zugeordneten Werte, da der Strom bei der exergetischen Allokationsmethode nach VDI 4660 höher bewertet wird. Dies spiegelt sich auch bei den spezifischen CO₂-Emissionen wieder. Die durchschnittlichen, spez. CO₂-Emissionen des Jahres 2015 sind in Tabelle 21 aufgelistet. Die monatlichen spez. CO₂-Emissionen sind in Abbildung 61 dargestellt.

Tabelle 20: CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	353,2 t CO ₂	480,3 t CO ₂
Wärmeerzeugung	74,8 t CO ₂	81,2 t CO ₂

Tabelle 21: Spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	489 g CO ₂ /kWh _{el}	519 g CO ₂ /kWh _{el}
Wärmeerzeugung	60 g CO ₂ /kWh _{th}	50 g CO ₂ /kWh _{th}

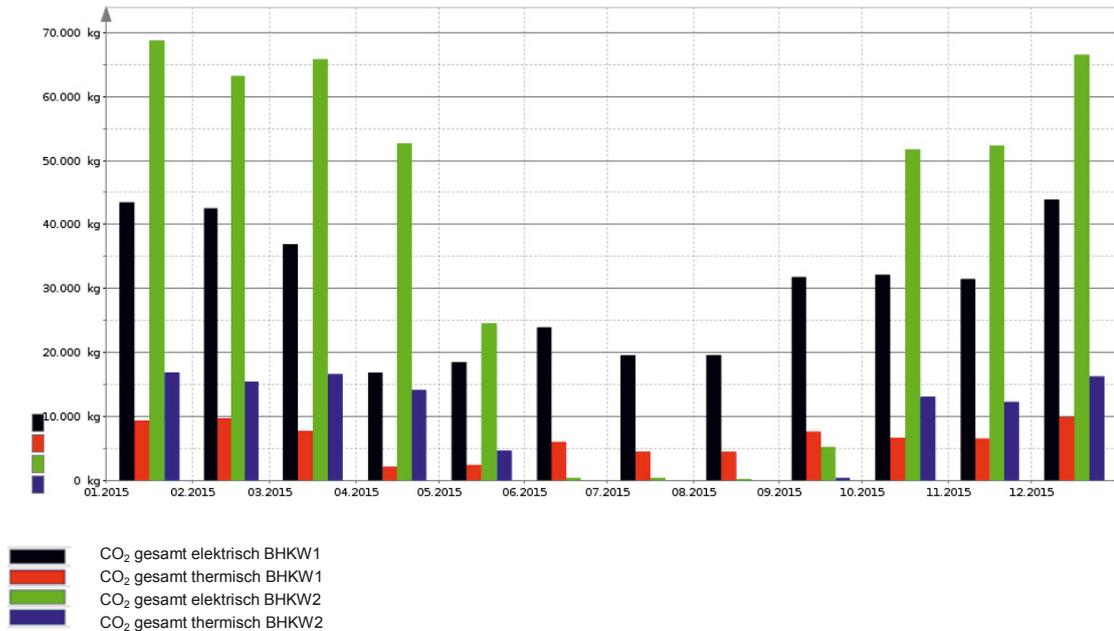


Abbildung 60: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage B im Jahr 2015

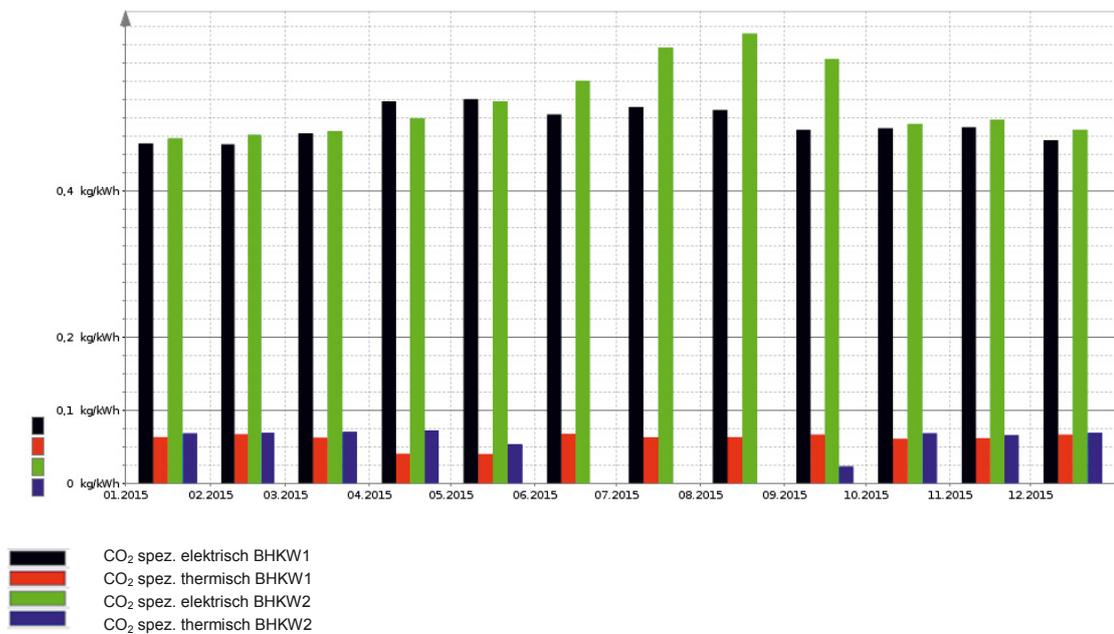


Abbildung 61: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage B in der ersten Monitoringphase

5.2.2 Identifikation und Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen

5.2.2.1 Teillastverhalten der BHKW-Module

Da die beiden BHKW-Module der BHKW-Anlage B in der Übergangszeit und im Sommerbetrieb mit bis zu 50 % der Nennleistung modulierend betrieben werden, wurden im Rahmen der ersten Monitoringphase Wirkungsgradmessungen zur Analyse des Teillastverhaltens durchgeführt. Der Betrieb bei Teillast hat einen erheblichen Einfluss auf die elektrischen Wirkungsgrade von BHKW-Anlagen, zudem erhöhen sich die Betriebsstunden und damit die Wartungskosten. Gegebenenfalls ist es daher sinnvoller, die BHKW-Module taktend bei Nennlast mit hohen Wirkungsgraden zu betreiben und die dabei auftretenden zusätzlichen Start-Stopp-Zyklen in Kauf zu nehmen.

Tabelle 22: Datenblattangaben und Ergebnisse der BHKW-Anlage B

	Messwert BHKW1	Datenblattangabe BHKW1	Messwert BHKW2	Datenblattangabe BHKW2
Elektrischer Wirkungsgrad	35,0 %	36,2 %	32,8 %	34,6 %
Thermischer Wirkungsgrad	57,0 %	55,1 %	56,9 %	55,9 %

BHKW1 erreichte bei der Messung Nennleistung einen elektrischen Wirkungsgrad von 35,0 % und einen thermischen Wirkungsgrad von 57,0 %. Bei BHKW2 wurden ein elektrischer Wirkungsgrad von 32,8 % und ein thermischer Wirkungsgrad von 56,9 % gemessen. Der elektrischen Wirkungsgrade beider Module liegen etwas unter den Datenblattangaben, aber unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten noch knapp in dem für BHKW-Module üblichen Toleranzbereich von 5 %. Die thermischen Wirkungsgrade beider Anlagen liegen etwas über den Datenblattangaben, jedoch ebenfalls noch im üblichen Toleranzbereich, der für die thermischen Leistungswerte in der Regel 8 % beträgt.

In Abbildung 62 sind die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade beider BHKW in Abhängigkeit der elektrischen Leistung dargestellt. Man erkennt, dass der elektrische Wirkungsgrad beider BHKW im Teillastbereich merklich abfällt, im Gegenzug steigt jedoch der thermische Wirkungsgrad. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei Teillast der Brennstoff weniger effizient in mechanische bzw. elektrische Energie umgesetzt wird und im Verhältnis mehr Abwärme entsteht. Von praktischer Bedeutung sind im vorliegenden Fall v. a. die Teillastwirkungsgrade im Überlappungsbereich beider Module (ca. 120 kW_{el} bis 140 kW_{el}). So ist der elektrische Wirkungsgrad von BHKW1 im Nennlastpunkt bei 140 kW_{el} über 5 Prozentpunkte höher, als der von BHKW2 im gleichen Betriebspunkt.

Für die BHKW-Betriebsstrategie bedeutet dies, dass bei einer Leistungsanforderung in dieser Größenordnung aus Effizienzgründen vorrangig BHKW1 betrieben werden soll-

te, anstatt BHKW2 in der Leistung zu modulieren. Diese Änderung der Vorrangschaltung wurde als Optimierungsmaßnahme im Verlauf der ersten Monitoringphase umgesetzt (siehe Kapitel 5.2.2.2). Im Rahmen einer Potentialanalyse wurde darüber hinaus eine Umstellung von modulierenden auf taktenden Betrieb untersucht (siehe Kapitel 5.2.4.2)

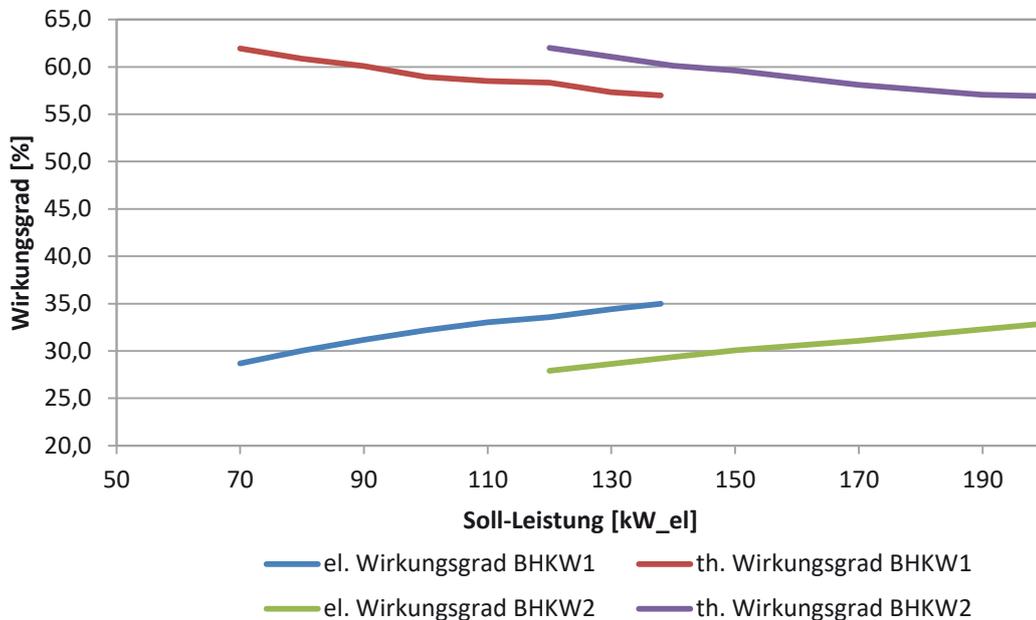


Abbildung 62: Ergebnisse der Wirkungsgradmessung der BHKW-Anlage B

5.2.2.2 Vorrangschaltung der BHKW-Module

Ausgehend von der oben dargestellten Wirkungsgradbestimmung im Teillastbetrieb wurde die Vorrangschaltung der BHKW-Module in der ersten Monitoringphase analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass bei rückläufiger Wärmeabnahme zunächst das kleinere der beiden Module (BHKW1) abschaltet, während das größere Modul (BHKW2) gleichzeitig in den Modulationsbetrieb mit reduzierter Leistung geht (vgl. rot markierten Bereich in Abbildung 63). Im betreffenden Zeitraum könnte der Wärmebedarf jedoch nahezu vollständig auch mit dem kleinen Modul gedeckt werden, das hierbei zudem mit Nennlast und wesentlich besseren elektrischen Wirkungsgraden betrieben werden könnte. Als Optimierungsmaßnahme wurde daher ab 19.05.2015 die Vorrangschaltung geändert, sodass nun bei geringem Wärmebedarf zunächst BHKW1 – möglichst mit Nennlast – betrieben wird und BHKW2 erst danach zuschaltet. Die Maßnahme wurde in Kapitel 5.2.4.1 gesondert evaluiert.

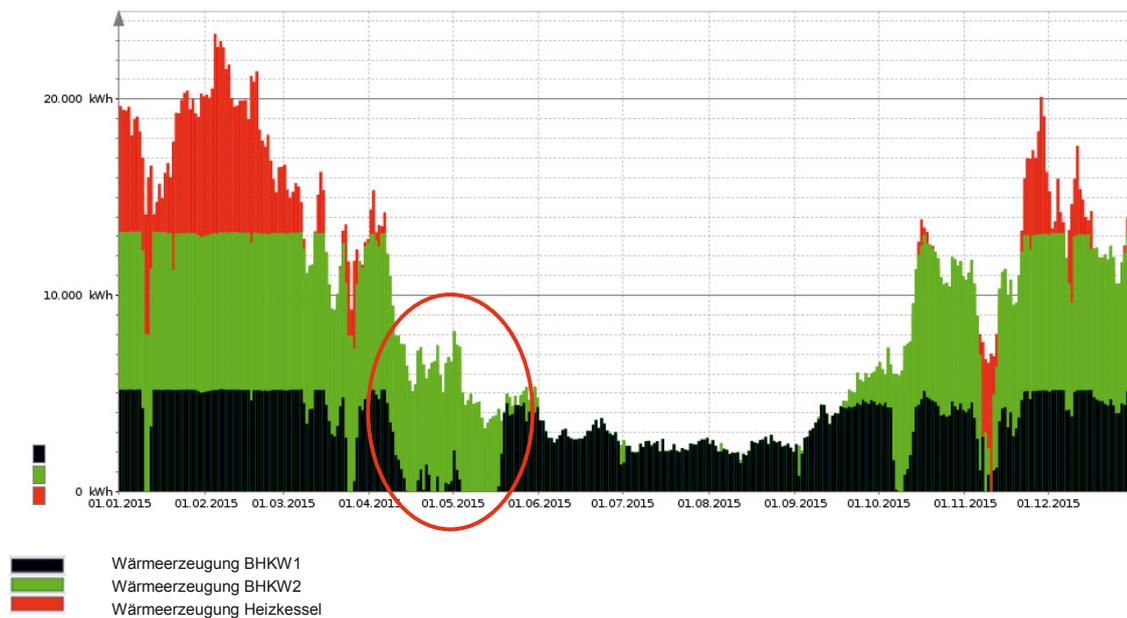


Abbildung 63: Ungünstige BHKW-Vorrangschaltung

5.2.3 Ergebnisse der zweiten Monitoringphase

5.2.3.1 Energieumsätze

Im Rahmen der zweiten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage B im Zeitraum vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2016 ausgewertet. In Tabelle 23 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz der beiden BHKW aufgelistet. Das BHKW1 erzeugte ca. 736,7 MWh_{el} Strom und 1.196,4 MWh_{th} Wärme und das BHKW2 erzeugte weitere 941,7 MWh_{el} Strom und 1.565,2 MWh_{th} Wärme. Das BHKW1 kommt auf einen elektrischen Nutzungsgrad von 34,3 % und einen thermischen Nutzungsgrad von 55,7 %. Das BHKW2 erreichte einen elektrischen Nutzungsgrad von 33,6 % und einen thermischen Nutzungsgrad von 55,8 %. Die thermischen Nutzungsgrade beider Module – und damit auch der Gesamtnutzungsgrad – sanken im Vergleich zur ersten Monitoringphase geringfügig.

Tabelle 23: Energieumsätze der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.196,4 MWh _{th}	1.565,2 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	736,7 MWh _{el}	941,7 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	2.147,0 MWh	2.804,7 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	55,7 %	55,8 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	34,3 %	33,6 %

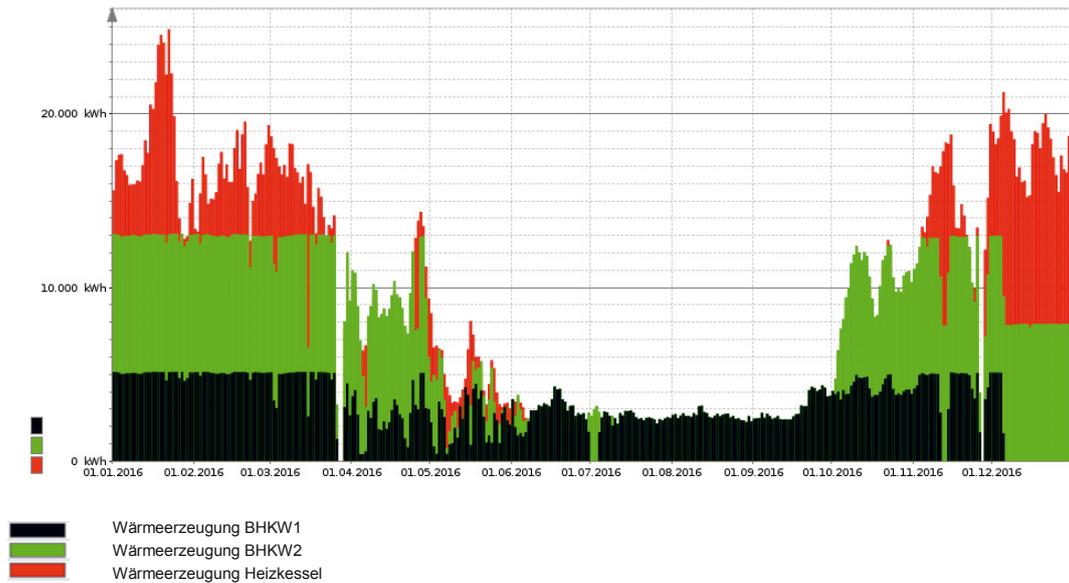


Abbildung 64: Tägliche Gesamtwärmeerzeugung der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

In Abbildung 64 sind die täglich erzeugten Wärmemengen der beiden BHKW und die Gesamtwärmeerzeugung des Heizkraftwerks dargestellt. Abgesehen vom Dezember 2016, in dem BHKW1 ausfiel, ist das gleiche Muster wie in der ersten Monitoringphase zu erkennen: im Winter können beide BHKW bei Nennleistung betrieben werden und die Wärmebedarfsspitzen werden über den Erdgas-Spitzenlastkessel gedeckt. In der Übergangszeit zum Sommer fällt der Wärmebedarf stark ab und die benötigte Wärme wird nahezu ausschließlich über die beiden BHKW-Module bereitgestellt. Im Sommer kann der Wärmebedarf fast ausschließlich über das BHKW1 gedeckt werden.

In Abbildung 65 sind die monatlichen Nutzungsgrade der beiden BHKW dargestellt. Betrachtet man die elektrischen Nutzungsgrade der beiden BHKW, so kann man erkennen, dass diese insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer niedriger sind als im Winter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Übergangszeit und im Sommer beide Module häufig in Teillast betrieben wurden.

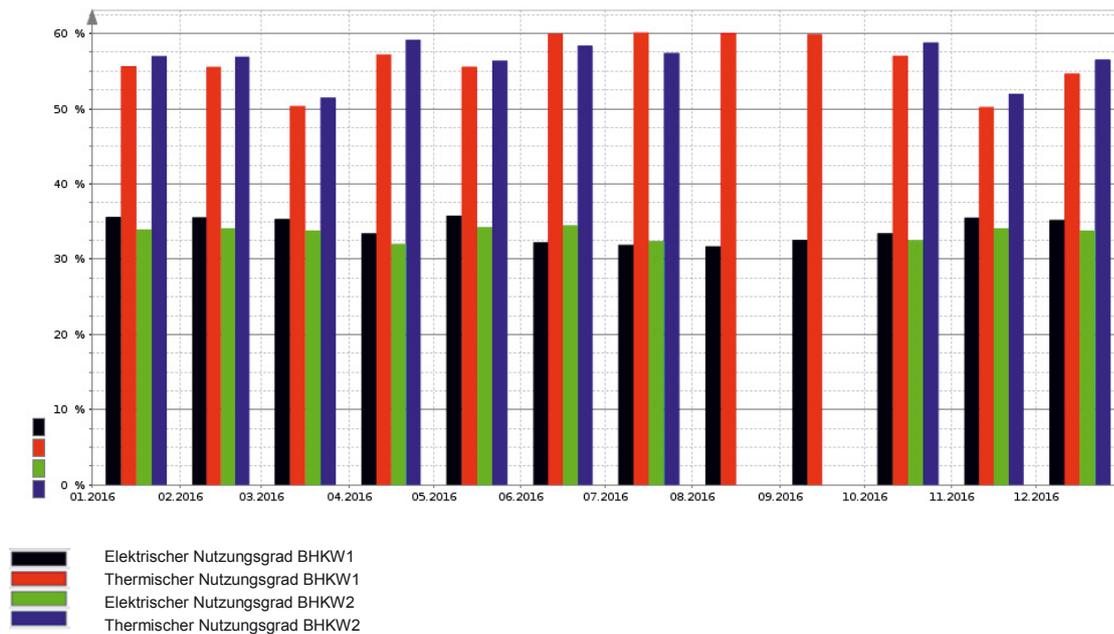


Abbildung 65: Nutzungsgrade der beiden BHKW der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

5.2.3.2 Betriebsverhalten

Das BHKW1 erreichte während der zweiten Monitoringphase insgesamt 6.666 Betriebsstunden / 5.097 Vollbenutzungsstunden und das BHKW2 5.118 Betriebsstunden / 4.505 Vollbenutzungsstunden (vgl. geordnete elektrische Jahresdauerlinie siehe Abbildung 66). Besonders auffällig sind hier wie bereits in der ersten Monitoringphase die vielen Betriebsstunden bei denen beide BHKW mit reduzierter Leistung betrieben wurden (modulierender Betrieb). BHKW1 wurde fast 2000 h mit nur 50 % der Nennleistung betrieben. Gegenüber der ersten Monitoringphase konnten jedoch die Teillastbetriebsstunden um 500 h reduziert werden, was in erster Linie auf die in Kapitel 5.2.2.2 dargestellte Umstellung der Vorrangschaltung der beiden BHKW-Module zurückzuführen ist (vgl. hierzu gesonderte Evaluation in Kapitel 5.2.4.1).

Tabelle 24: Betriebsdaten der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Betriebsstunden	6.666 h	5.118 h
Vollbenutzungsstunden	5.097 h	4.505 h
Starts	543	207
Betriebsstunden pro Start	12,3 h	24,7 h

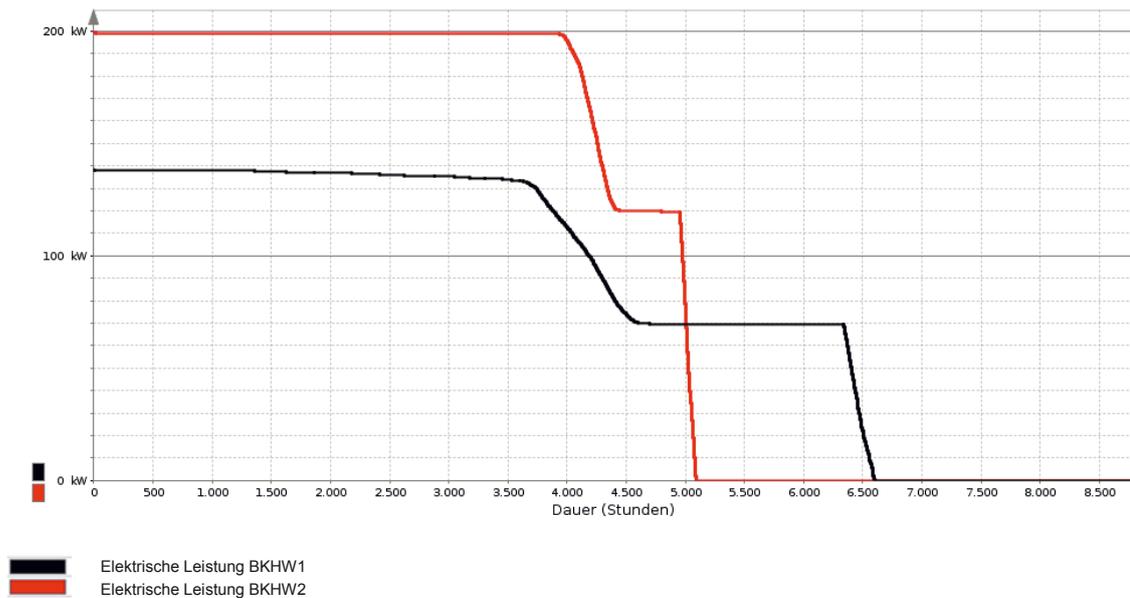


Abbildung 66: Geordnete, elektrische Jahresdauerlinien der beiden BHKW der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

Betrachtet man die monatliche Startanzahl der beiden BHKW so kann man erkennen, dass die beiden BHKW in den Wintermonaten weitestgehend durchgängig betrieben werden konnten (siehe Abbildung 67). In der Übergangszeit stieg die Startanzahl beider Module deutlich an. Im Sommer wurde fast ausschließlich das kleinere der beiden Module (BHKW1) betrieben, die Startanzahl im Juli und August 2016 lag durchschnittlich bei fast 3 Starts pro Tag.

In Abbildung 68 sind die monatlichen Betriebsstunden pro Start der beiden BHKW dargestellt. Im Januar und Februar 2016 konnte wie schon in der ersten Monitoringphase eine vergleichsweise hohe Zahl von Betriebsstunden pro Start erreicht werden. Insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer fielen die Betriebsstunden pro Start wieder deutlich geringer aus. In der Übergangszeit erreicht BHKW1 ca. 22,9 Betriebsstunden pro Start und im Sommer etwa 6,2 Betriebsstunden pro Start. BHKW2 erreicht in der Übergangszeit ca. 8,9 Betriebsstunden pro Start und im Sommer ca. 1,8 Betriebsstunden pro Start. Der Durchschnittswert der zweiten Monitoringphase liegt mit 12,3 Betriebsstunden pro Start für BHKW1 etwas unterhalb des Werts der ersten Monitoringphase. Mit 24,7 Betriebsstunden pro Start ist der Wert für BHKW2 im Vergleich zur ersten Monitoringphase ungefähr gleich geblieben.

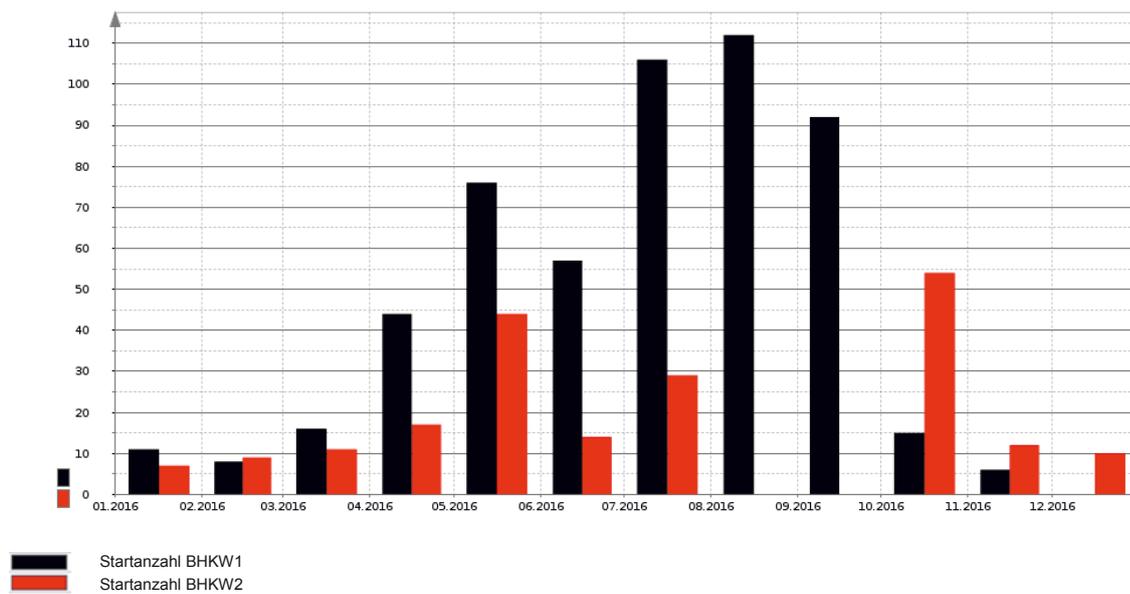


Abbildung 67: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

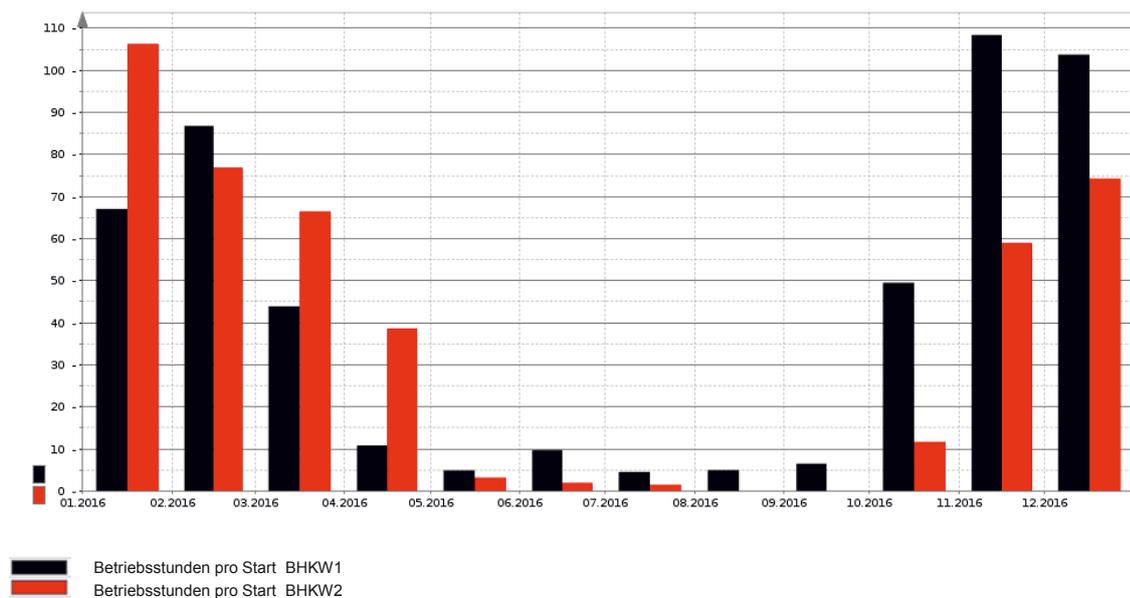


Abbildung 68: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

5.2.3.3 Ökologische Betrachtung

Die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung für die zweite Monitoringphase sind in Abbildung 69 bis Abbildung 71 und Tabelle 25 bis Tabelle 26 zusammengefasst. BHKW1 erzielte im Mittel eine Primärenergieeinsparung von 25,8 % und BHKW2 von 25,5 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung. Der CO₂-Ausstoß betrug in Summe 435,8 t CO₂ für BHKW1 und 569,4 t CO₂ für BHKW2. Die spezifischen CO₂-Emissionen entsprechen in etwa den Werten der ersten Monitoringphase.

Tabelle 25: CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	359,0 t CO ₂	494,2 t CO ₂
Wärmeerzeugung	76,8 t CO ₂	75,2 t CO ₂

Tabelle 26: Spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	487 g/kWh _{el}	525 g/kWh _{el}
Wärmeerzeugung	64 g/kWh _{th}	48 g/kWh _{th}

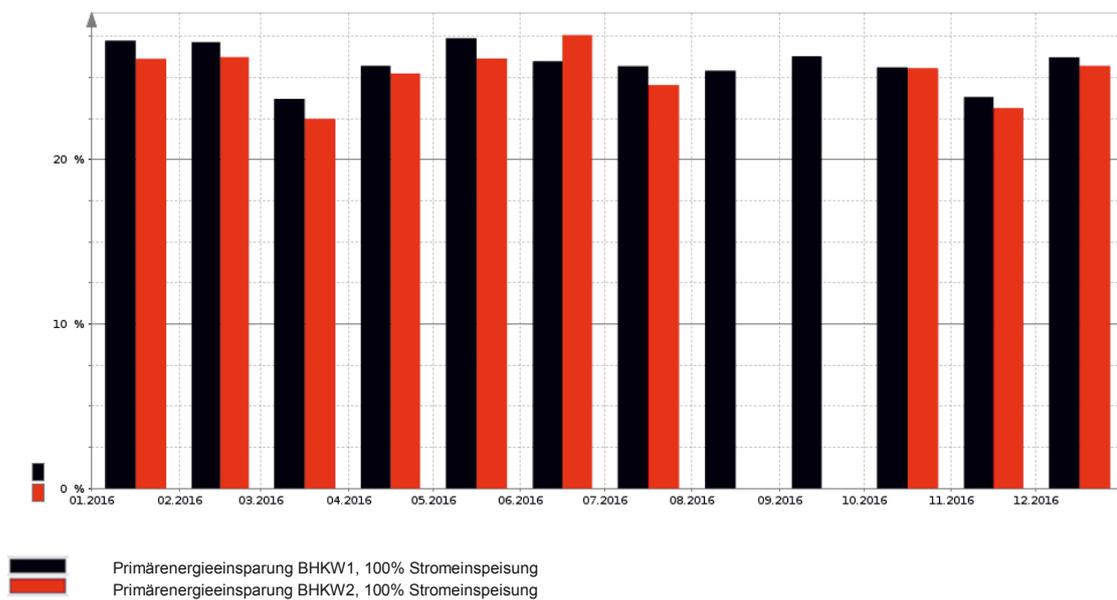


Abbildung 69: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

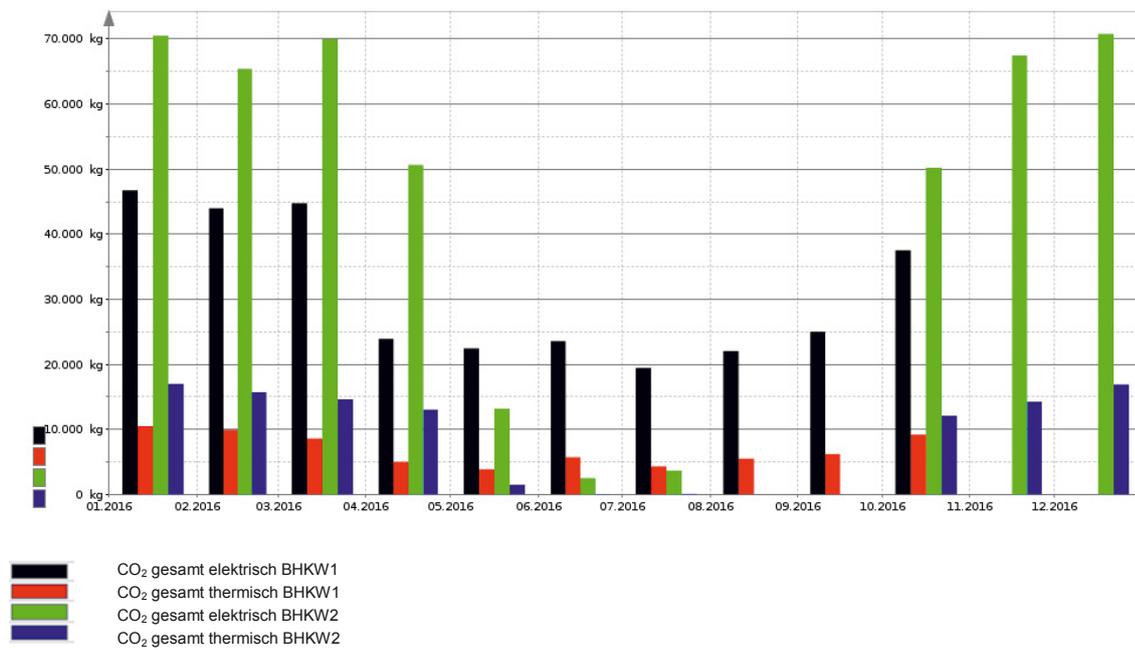


Abbildung 70: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

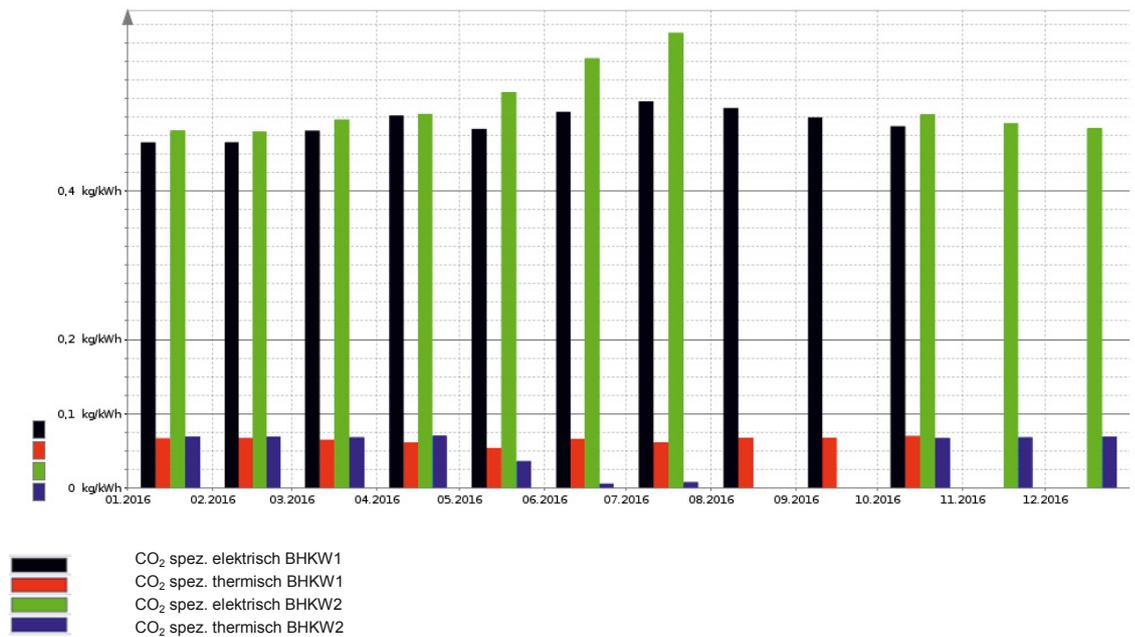


Abbildung 71: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage B in der zweiten Monitoringphase

5.2.4 Evaluation

5.2.4.1 Evaluation der optimierten Vorrangschaltung

Wie in Kapitel 5.2.2.2 beschrieben, wurde im Zuge der ersten Monitoringphase die Vorrangschaltung der BHKW-Module so geändert, dass nun das kleinere BHKW1 vorrangig betrieben wird und BHKW2 erst bei höherem Wärmebedarf zuschaltet. Der Vorteil besteht hier in erster Linie darin, dass BHKW1 einen höheren elektrischen Wirkungsgrad aufweist und zudem auch bei geringer Wärmeabnahme noch über einen längeren Zeitraum bei Nennlast betrieben werden kann. Neben den Wirkungsgradvorteilen steigt dadurch auch die Auslastung der BHKW-Module (Verhältnis Betriebsstunden zu Volllaststunden) und die spezifischen Wartungskosten sinken.

Die Ergebnisse der Umstellung sind in Abbildung 72 und Abbildung 73 sowie Tabelle 27 zusammengefasst. Abbildung 72 zeigt den Betrieb für den Zeitraum von zwei Wochen vor der Umstellung. Aufgrund des geringen Wärmebedarfs ist nur ein BHKW-Modul in Betrieb, in diesem Fall aufgrund der Vorrangschaltung das größere der beiden Module (BHKW2). Das Modul wird jedoch aufgrund der zu geringen Wärmeabnahme fast durchgehend mit nur 50 % Last und zudem häufigen Start-Stopp-Zyklen betrieben.

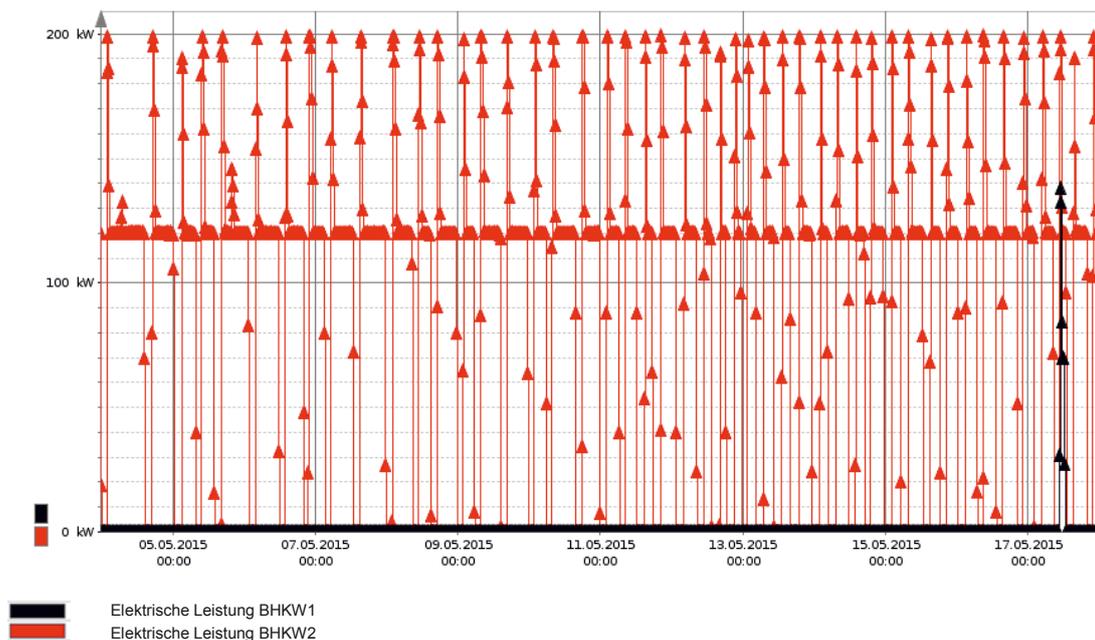


Abbildung 72: Elektrische Leistung der beiden BHKW-Module vor der Umstellung der Vorrangschaltung

Abbildung 73 zeigt den Betrieb für den Zeitraum von zwei Wochen nach Änderung der Vorrangschaltung. Deutlich zu erkennen ist, dass nun vorrangig BHKW1 in Betrieb ist und BHKW2 nur zeitweise kurz zuschaltet. Da BHKW1 nur ca. 65 % der thermischen Leistung von BHKW2 aufweist, kann es zudem auch bei geringer Wärmeabnahme noch deutlich länger bei Nennlast betrieben werden und erreicht insgesamt eine höhere Laufzeit.

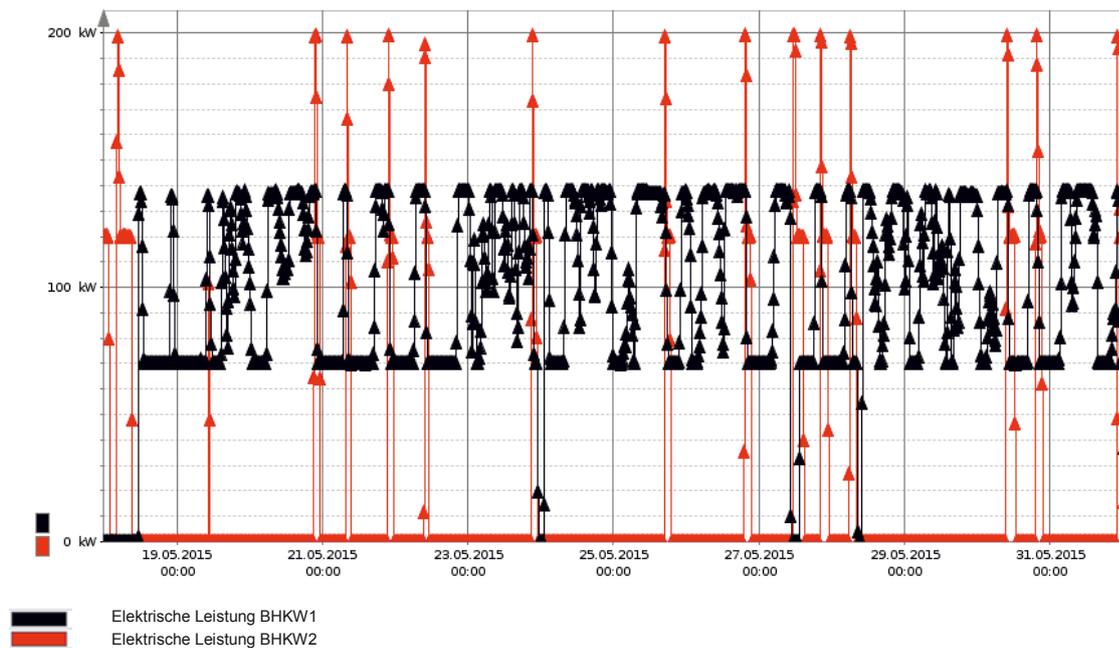


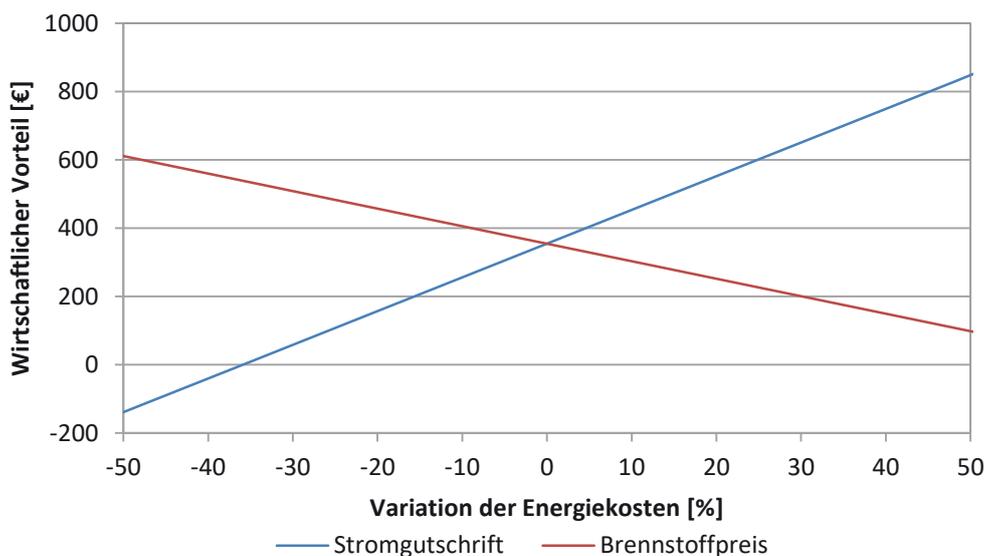
Abbildung 73: Elektrische Leistung der beiden BHKW-Module nach der Umstellung der Vorrangschaltung

Wie in Tabelle 27 für den Zeitraum von zwei Wochen vor und nach der Umstellung dargestellt, konnte durch Änderung der Vorrangschaltung in nahezu allen Bereichen eine Verbesserung erzielt werden. Der mittlere elektrische Nutzungsgrad der BHKW-Anlage steigt um ca. 2 Prozentpunkte, der Gesamtnutzungsgrad steigt trotz etwas geringeren thermischen Nutzungsgrad ebenfalls leicht an. Durch die Effizienzvorteile erhöht sich die Primärenergieeinsparung und die spezifischen CO₂-Emissionen sinken. Die Startanzahl konnte mit insgesamt 18 gegenüber 48 Starts (jeweils Summe über beide Module) deutlich reduziert werden. Für BHKW1 ergibt sich mit fast 80 Betriebsstunden pro Start nunmehr ein sehr günstiges Start-Stopp-Verhältnis, während BHKW2, das in der neuen Vorrangschaltung nur noch sporadisch zuschaltet, hier schlechter abschneidet als vor der Umstellung. Für die BHKW-Anlage als Ganzes betrachtet können die Betriebsstunden pro Start jedoch deutlich verbessert werden.

In Abbildung 74 ist der wirtschaftliche Vorteil, hier bezogen auf den betrachteten Zeitraum von zwei Wochen, durch die Änderung der Vorrangschaltung als Sensitivitätsanalyse dargestellt. Ausgehend vom Ausgangsniveau mit einem Erdgaspreis von 3,5 Cent/kWh_{Hi} und einer Stromgutschrift von 14,5 Cent/kWh_{el} (vgl. Kapitel 3.2.2) kann bei einer Variation von $\pm 50\%$ in nahezu allen Fällen ein positives Ergebnis erzielt werden. Auch wenn der erzielbare Vorteil absolut gesehen mit dreistelligen Eurosummen relativ gering ist, so besteht hochgerechnet auf den relevanten Zeitraum von ca. Anfang Mai bis Ende September doch das Potential für erhebliche Einsparungen, insbesondere in Anbetracht des vergleichsweise kleinen regelungstechnischen Eingriffs.

Tabelle 27: Energieumsätze, Nutzungsgrade und Betriebsdaten der BHKW-Anlage B vor und nach der Umstellung der Vorrangschaltung

		Zeitraum 1	Zeitraum 2
		Vorrang BHKW2: 04.05. bis 17.05.	Vorrang BHKW1: 18.05. bis 31.05.
Erzeugte Strommenge	[MWh _{el}]	30,4	37,2
Erzeugte Wärmemenge	[MWh _{th}]	58,7	65,7
Brennstoffeinsatz	[MWh]	96,9	111,5
Elektrischer Nutzungsgrad	[%]	31,4	33,3
Thermischer Nutzungsgrad	[%]	60,7	58,9
Gesamtnutzungsgrad	[%]	92,0	92,3
Primärenergieeinsparung	[%]	25,3	26,6
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	[t]	17	19,8
CO ₂ -Ausstoß der Wärmeerzeugung	[t]	2,6	2,8
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	[g/kWh]	561	533
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung	[g/kWh]	45	43
Betriebsstunden BHKW1	[h]	2	319
Betriebsstunden BHKW2	[h]	237	38
Startanzahl BHKW1	[-]	1	4
Startanzahl BHKW2	[-]	47	14
Bh pro Start BHKW1	[h]	2	79,8
Bh pro Start BHKW2	[h]	5,0	2,7

**Abbildung 74: Wirtschaftlicher Vorteil durch Umstellung der Vorrangschaltung von BHKW2 auf BHKW1**

5.2.4.2 Potentialanalyse taktender versus modulierender Betrieb

Ausgehend von der Untersuchung des Teillastverhaltens (siehe Kapitel 5.2.2.1) der BHKW-Module und der oben dargestellten Änderung der Vorrangschaltung wurde als zusätzliche Optimierungsmaßnahme eine Umstellung des BHKW1 von modulierenden auf taktenden Betrieb im Rahmen einer Potentialanalyse untersucht.

Die Umstellung ist in Abbildung 75 anhand der elektrischen Jahresdauerlinie für BHKW1 dargestellt. Für die Potentialanalyse wurde ausschließlich der Zeitraum betrachtet, in dem das BHKW-Modul modulierend betrieben wird (Szenario 1, blau markierter Bereich). Dieser Zeitraum wurde rechnerisch durch einen äquivalenten taktenden Betrieb ersetzt, bei dem die gleiche Wärmemenge bereitgestellt wird (Szenario 2, rot markierter Bereich). Die Zeiten in denen das BHKW-Modul ohnehin schon bei Nennlast betrieben wird, wurden ausgeklammert, da sie das Gesamtergebnis nicht beeinflussen. Auch im taktenden Betrieb (Szenario 2, rot gestrichelte Kurve) verbleibt ein kleiner Bereich in dem das BHKW1 modulierend betrieben wird, erkennbar am Absatz in der Jahresdauerlinie. Dies ist v. a. auf Ausregelphasen zurückzuführen, in denen aufgrund von kurzzeitigen Überschneidungen mit dem Betrieb der anderen Wärmerzeuger (BHKW2, Heizkessel) kein Nennlastbetrieb möglich ist. Im Vergleich zu Szenario 1 (blaue durchgezogene Linie) kann der Teillastbetrieb jedoch deutlich reduziert werden.

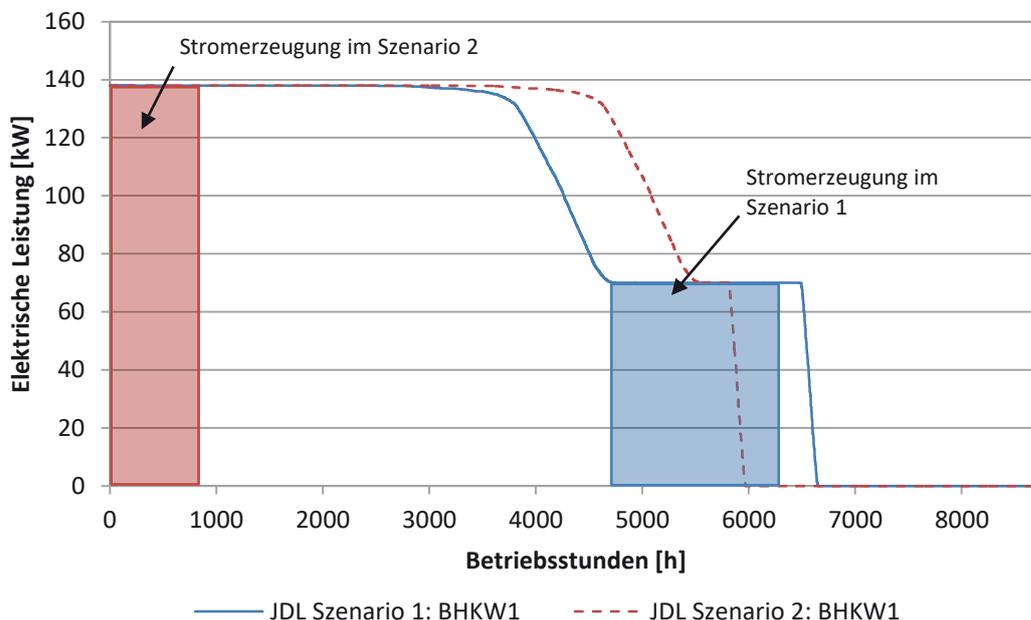


Abbildung 75: Darstellung der Szenarien 1 und 2 als geordnete Jahresdauerlinien

Die Ergebnisse der Potentialanalyse sind in Tabelle 28 zusammengefasst. Das BHKW-Modul stellt in beiden Fällen die gleiche thermische Energiemenge bereit, jedoch erhöht sich aufgrund des im taktenden Betrieb höheren elektrischen Wirkungsgrads die bereitgestellte Strommenge deutlich. Aufgrund der Effizienzvorteile steigt die erzielbare Primärenergieeinsparung und die spezifischen CO₂-Emissionen sinken. Aufgrund der

geringeren Betriebsstunden sinken spezifisch betrachtet die Wartungskosten, was sich in Verbindung mit der höheren Stromausbeute positiv in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung widerspiegelt (vgl. Sensitivitätsanalyse Abbildung 76). Ausgehend vom Ausgangsniveau mit einem Erdgaspreis von 3,5 Cent/kWh_{Hi} und einer Stromgutschrift von 14,5 Cent/kWh_{el} (vgl. Kapitel 3.2.2) konnte durch die Umstellung von modulierenden auf taktenden Betrieb in der Potentialanalyse in allen Fällen (Einflussgrößenvariation $\pm 50\%$) ein positives Ergebnis im mittleren vierstelligen Eurobereich erzielt werden.

Tabelle 28: Ergebnisse der Potentialanalyse taktender versus modulierender Betrieb

		Szenario 1	Szenario 2
		BHKW1	BHKW1
		Modulierender Betrieb	Taktender Betrieb
		(50 % Nennleistung)	(100 % Nennleistung)
Elektrische Leistung	[kW _{el}]	70	138
Thermische Leistung	[kW _{th}]	147	220
Elektrische Wirkungsgrad	[%]	29,4	35,5
Thermischer Wirkungsgrad	[%]	62	57
Gesamtwirkungsgrad	[%]	91,4	92,5
Betriebsstunden	[h]	1500	999
Erzeugte Strommenge	[MWh _{el}]	105,0	137,9
Erzeugte Wärmemenge	[MWh _{th}]	220,4	220,4
Brennstoffeinsatz	[MWh]	357,1	388,5
Primärenergieeinsparung	[%]	23,8	27,9
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	[t]	62,1	69,1
CO ₂ -Ausstoß der Wärmeerzeugung	[t]	10,4	8,9
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	[g/kWh]	591	507
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung	[g/kWh]	47	41

In der Praxis muss der taktende Betrieb jedoch nicht in allen Fällen zwangsläufig zu einer besseren Wirtschaftlichkeit führen. Beispielsweise spielt in Konstellationen mit sehr geringen Stromgutschriften (Wert des Stroms < Wert der Wärme), die hier nicht untersucht wurden, der elektrische Wirkungsgradverlust bei Teillast praktisch keine Rolle und die Wirtschaftlichkeit wird entscheidend vom Wärmepreis beeinflusst. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, die BHKW-Module bei Teillast mit höherem thermischem Wirkungsgrad zu betreiben. Wenn zudem die Wartungskosten pro Betriebsstunde vergleichsweise gering sind, z. B. weil die Wartung vom eigenen Servicepersonal des Betreibers übernommen wird, wirkt sich auch die Erhöhung der jährlichen Betriebsstunden im modulierenden Betrieb kaum negativ aus und der Vorteil für den takt-

enden Betrieb fällt geringer aus. In der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ebenfalls nicht berücksichtigt wurde die Zunahme der Start-Stopp-Zyklen im taktenden Betrieb, die gegebenenfalls zu einem höheren Verschleiß des BHKW-Moduls führen kann. Dieser Einfluss ist wirtschaftlich jedoch nur schwer bewertbar solange sich die Start-Stopp-Zyklen innerhalb der zulässigen Herstellerspezifikationen bewegen und ist im Wesentlichen von stochastischen Größen abhängig (Ausfallwahrscheinlichkeit einzelner Bauteile bzw. Komponenten).

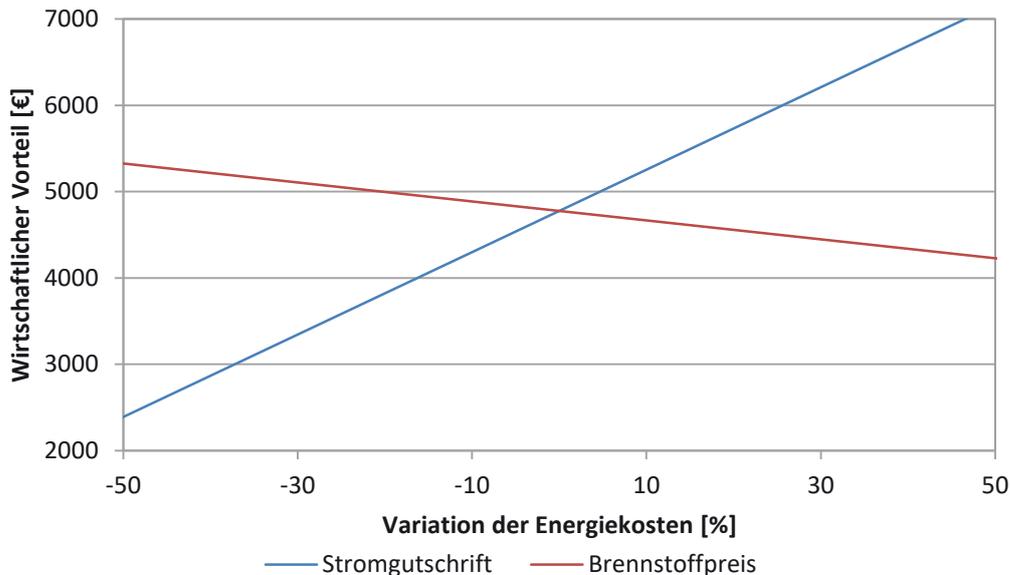


Abbildung 76: Wirtschaftlicher Vorteil durch Umstellung der Betriebsweise des BHKW1 von modulierend auf taktend

5.2.4.3 Einfluss der Witterung

Um den Einfluss der Witterung zu berücksichtigen, wurde die monatliche Wärmebereitstellung von BHKW-Anlage B in den beiden Betrachtungszeiträumen mittels der monatlichen Gradtagszahlen des Instituts für Wohnen und Umwelt [IWU17] für den Anlagenstandort normiert.

Abbildung 77 stellt sowohl die monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage B als auch die monatlichen Gradtagszahlen für die Jahre 2015 und 2016 dar. Vergleicht man die monatliche Wärmebereitstellung der beiden Jahre miteinander, ist zu erkennen, dass sich die Wärmebereitstellung größtenteils analog zur korrespondierenden Gradtagszahl verhält. Gut zu erkennen ist, dass bei BHKW-Anlage B eine von der Witterung weitestgehend unabhängige Wärmegrundlast für die Warmwasserbereitstellung vorhanden ist, die im Sommer zu einem wesentlich höheren Wärmebedarf führt, als sich ausgehend von der Gradtagzahl berechnet.

Die Gradtagszahlen waren im November und Dezember 2016 aufgrund niedrigerer Außentemperaturen deutlich höher als für den gleichen Zeitraum im Jahr 2015, was zu

einem höheren Heizwärmebedarf führt. Dies erklärt auch die Unterschiede in der Wärmebereitstellung zwischen den Jahren 2015 und 2016. Die zusätzlich benötigte Wärmeleistung wurde in diesem Fall in erster Linie über den Spitzenlastkessel bereitgestellt, da die BHKW-Module bereits durchgängig mit Nennleistung betrieben wurden (vgl. Abbildung 64). Die witterungsbedingten Unterschiede im Wärmebedarf haben daher keine Auswirkungen auf den BHKW-Betrieb.

Anhand der Gradtagszahlen der Jahre 2015 und 2016 und der Gradtagszahl des langjährigen Mittels (bezogen auf die Jahre 1976 bis 2016) wurde eine Witterungsbereinigung durchgeführt, wobei der witterungsunabhängige Grundlastwärmebedarf abgezogen wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 aufgelistet. Bezieht man die Wärmebereitstellung der Jahre 2015 und 2016 auf das langjährige Mittel, so wurden im Jahr 2016 ca. 85,0 MWh_{th} mehr Wärme als im Jahr 2015 bereitgestellt. Witterungsbereinigt ist somit ein Unterschied im Wärmebedarf von lediglich 3,0 % zwischen den beiden Jahren vorhanden, sodass die Monitoringphasen als sehr gut vergleichbar angesehen werden können.

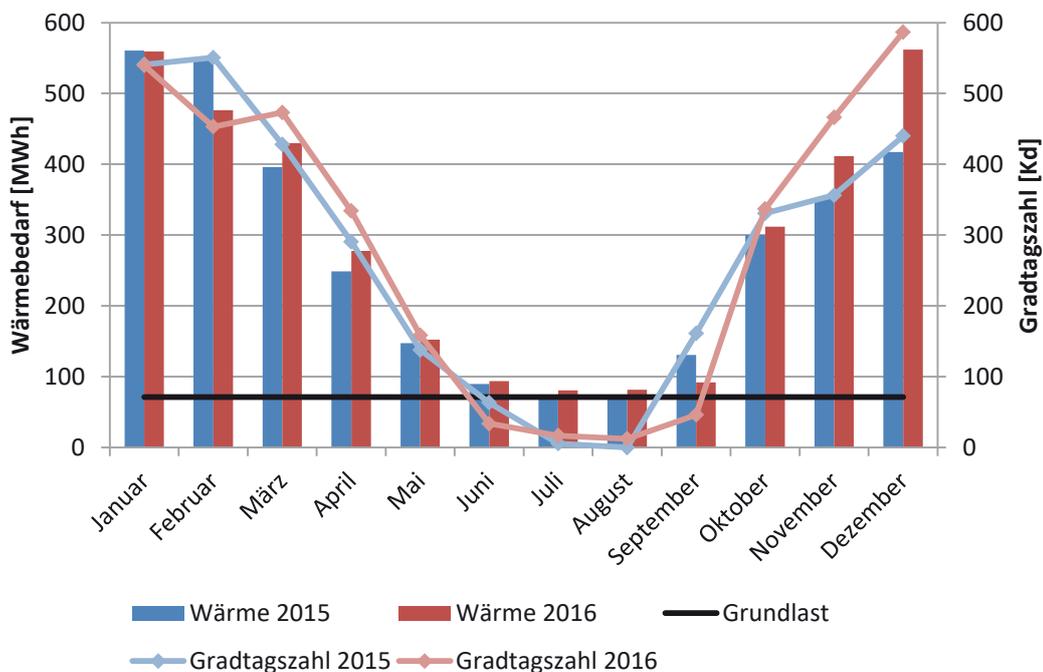


Abbildung 77: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage B und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016

Tabelle 29: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage B in den Jahren 2015 und 2016

	Gradtagszahl	Gradtagzahl des langjährigen Mittels	Korrekturfaktor (gerundet)	Raumwärmebereitstellung ohne Grundlastanteil	Raumwärmebereitstellung bezogen auf langjähriges Mittel
Jahr 2015	3305 Kd	3729 Kd	0,89	2.480 MWh _{th}	2.787 MWh _{th}
Jahr 2016	3457 Kd	3729 Kd	0,93	2.671 MWh _{th}	2.872 MWh _{th}

5.2.5 Zusammenfassung der Monitoringphasen

Im Rahmen des Monitoring der BHKW-Anlage B wurden zwei Phasen betrachtet:

- Erste Monitoringphase 01.01.2015 bis 31.12.2015
- Zweite Monitoringphase 01.01.2016 bis 31.12.2016

In beiden Phasen wurden jeweils die Energieumsätze, das Betriebsverhalten (Start-Stopp-Zyklen) sowie die Primärenergieeinsparung und die CO₂-Emissionen der beiden BHKW-Module ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 30 zusammenfassend dargestellt.

Die thermischen Nutzungsgrade der beiden BHKW-Module sind in der zweiten Monitoringphase geringfügig zurückgegangen, was in Summe zu einem leichten Rückgang des Gesamtnutzungsgrades und der Primärenergieeinsparung führt. Die spezifischen CO₂-Emissionen der beiden BHKW bleiben nahezu unverändert. Der Durchschnittswert von 12,3 Betriebsstunden pro Start für BHKW1 liegt in der zweiten Monitoringphase etwas unter dem Wert der ersten Monitoringphase. Die 24,7 Betriebsstunden pro Start des BHKW2 entsprechen in etwa den in der ersten Monitoringphase erreichten Werten.

Bereits im Mai 2015 und damit noch in der ersten Monitoringphase wurde die Vorrangschaltung der beiden BHKW geändert (vgl. Kapitel 5.2.2.2 und 5.2.4.1), wodurch nun in der Übergangszeit bevorzugt das BHKW1 betrieben wird, das bessere elektrische Wirkungsgrade aufweist, wie die Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen bestätigen (vgl. Kapitel 5.2.2.1). Eine weitere Optimierung könnte durch eine Umstellung von modulierenden auf taktenden Betrieb erzielt werden, wie die Potentialanalyse zeigt (vgl. Kapitel 5.2.4.2).

Abbildung 78 zeigt den Pufferspeicher-Füllstand als Rasterdiagramm über beide Monitoringphasen dargestellt. Man erkennt, dass der Pufferspeicher im Winter nur selten beladen wird, da zu diesen Zeiten der Wärmebedarf entsprechend hoch ist und die erzeugte Wärme der beiden BHKW direkt ins Heizungsnetz einspeist wird: es besteht

in diesem Zeitraum kein Bedarf für eine Zwischenspeicherung der bereitgestellten Wärme. Im Sommer wird der Pufferspeicher dagegen regelmäßig be- und entladen. Zwischen den beiden Monitoringphasen sind dabei keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitorings der BHKW-Anlage B

	Erste Monitoringphase		Zweite Monitoringphase	
	BHKW1	BHKW2	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.238,8 MWh _{th}	1.620,0 MWh _{th}	1.196,4 MWh _{th}	1.565,2 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	743,0 MWh _{el}	924,9 MWh _{el}	736,7 MWh _{el}	941,7 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	2.157,6 MWh	2.766,1 MWh	2.147,0 MWh	2.804,7 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	57,4 %	58,6 %	55,7 %	55,8 %
Elektrischer Nutzungsgrad	34,4 %	33,4 %	34,3 %	33,6 %
Betriebsstunden	6.651 h	5.270 h	6.666 h	5.118 h
Vollbenutzungsstunden	5.233 h	4.511 h	5.097 h	4.505 h
Starts	402	196	543	207
Betriebsstunden pro Start	16,5 h	26,9 h	12,3 h	24,7 h
Primärenergieeinsparung	26,9 %	26,5 %	25,8 %	25,5 %
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	353,2 t CO ₂	480,3 t CO ₂	359,0 t CO ₂	494,2 t CO ₂
CO ₂ -Ausstoß der Wärmeerzeugung	74,8 t CO ₂	81,2 t CO ₂	76,8 t CO ₂	75,2 CO ₂
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	489 g/kWh _{el}	519 g/kWh _{el}	487 g/kWh _{el}	525 g/kWh _{el}
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung	60 g/kWh _{th}	50 g/kWh _{th}	64 g/kWh _{th}	48 g/kWh _{th}

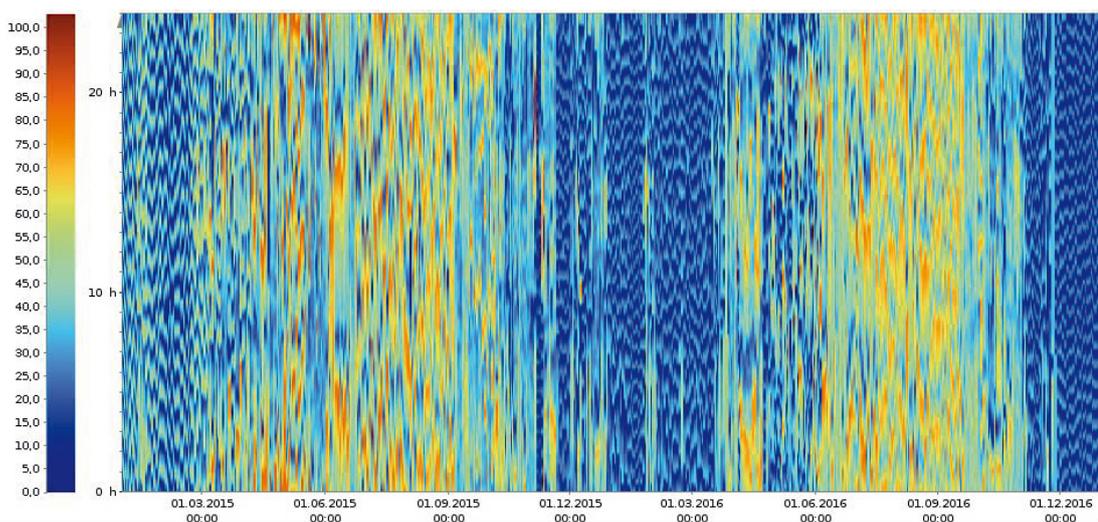


Abbildung 78: Rasterdiagramm des Pufferspeicher-Füllstands der BHKW-Anlage B über beide Monitoringphasen

5.3 BHKW-Anlage C

5.3.1 Ergebnisse der ersten Monitoringphase

5.3.1.1 Energieumsätze

Im Rahmen der ersten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage C für den Zeitraum vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2015 erfasst. In Tabelle 31 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz des BHKW aufgelistet. Das BHKW erzeugte im Jahr 2015 ca. 4.515,0 MWh_{el} Strom und 5.386,7 MWh_{th} Wärme. Es wurden insgesamt 11.981 MWh Biomethan verbraucht. Das BHKW erreichte im Betrachtungszeitraum einen elektrischen Nutzungsgrad von 37,7 % und einen thermischen Nutzungsgrad von 45,0 %. Die beiden Gaskessel erzeugten insgesamt 10.350,0 MWh_{th} Wärme mit einem Nutzungsgrad von 90,0 %.

Tabelle 31: Energieumsätze der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

	BHKW	Gaskessel 1+2
Erzeugte Wärmemenge	5.386,7 MWh _{th}	10.350,0 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	4.515,0 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	11.981,0 MWh	11.495,0 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	45,0 %	90,0 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	37,7 %	-

In Abbildung 79 sind die monatlich erzeugten Strom- und Wärmemengen des BHKW und die Wärmeerzeugung der Gaskessel dargestellt. Der Wärmebedarf ist stark witterungsabhängig, was darauf schließen lässt, dass aus dem Fernwärmenetz in erster Raumwärme entnommen wird und der Anteil der Prozesswärmeverbraucher vergleichsweise gering ist. Das BHKW deckt den Grundlastsockel, die Lastspitzen werden über die Gaskessel gedeckt. Im Januar 2015 kam es zu einem Ausfall des BHKW-Moduls, weshalb hier die Wärmeerzeugung fast ausschließlich durch den Gaskessel erfolgte.

In Abbildung 80 sind die monatlichen elektrischen und thermischen Nutzungsgrade des BHKW dargestellt. In den Sommermonaten weist das BHKW-Modul etwas geringere Nutzungsgrade auf als im Mittel, was auf die vergleichsweise geringen Betriebsstunden (vgl. auch Abbildung 83) während dieser Zeit und die dadurch anteilig höheren Verluste zurückzuführen ist (An- und Abfahrvorgänge, Wärmeverluste,...).

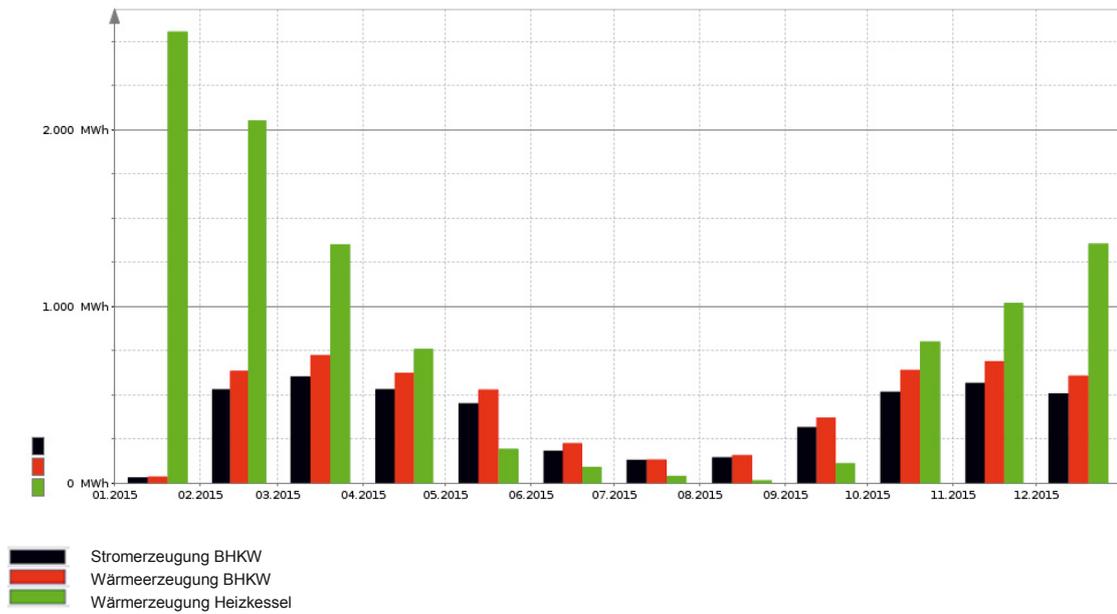


Abbildung 79: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

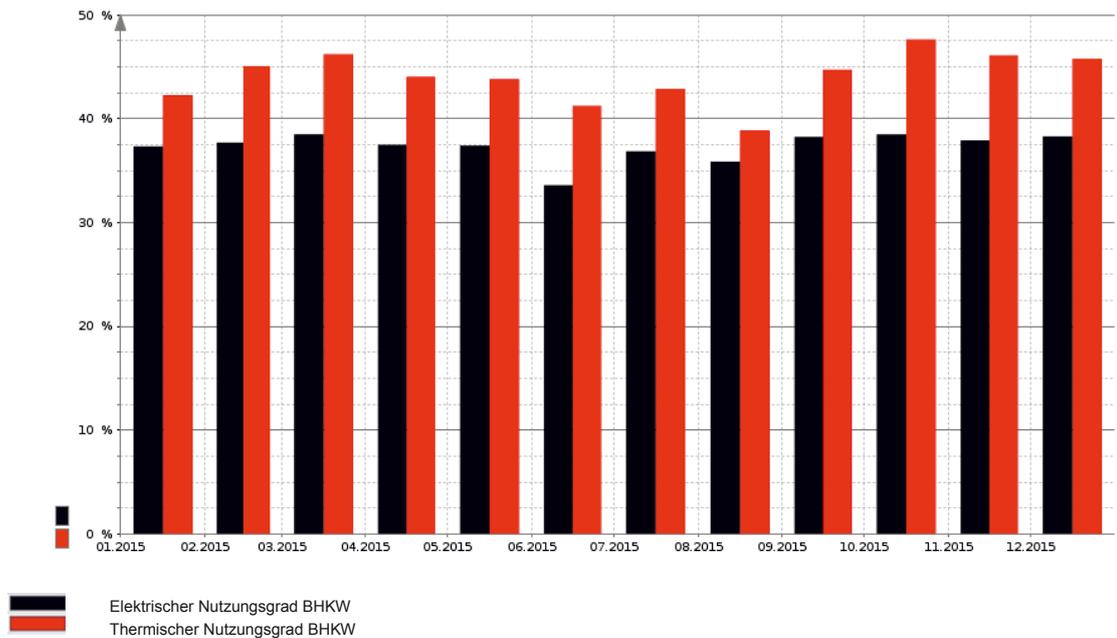


Abbildung 80: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

5.3.1.2 Betriebsverhalten

Die Betriebsdaten des BHKW und der Gaskessel sind in Tabelle 32 aufgelistet. Das BHKW erreichte im Jahr 2015 insgesamt 5.526 Betriebsstunden und 5.473 h Vollbenutzungsstunden (vgl. auch elektrische Jahresdauerlinie Abbildung 81). Die nur sehr geringe Differenz zwischen den tatsächlichen Betriebsstunden und den berechneten

Volllaststunden erklärt sich durch die taktende Betriebsweise. Die beiden Gaskessel erreichten insgesamt 2.213 Betriebsstunden / 1.150 Vollbenutzungsstunden.

Tabelle 32: Betriebsdaten der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

	BHKW	Gaskessel 1+2
Betriebsstunden	5.526 h	2.213 h
Vollbenutzungsstunden	5.473 h	1.150 h
Starts	552	2534
Betriebsstunden pro Start	10,0 h	0,9 h

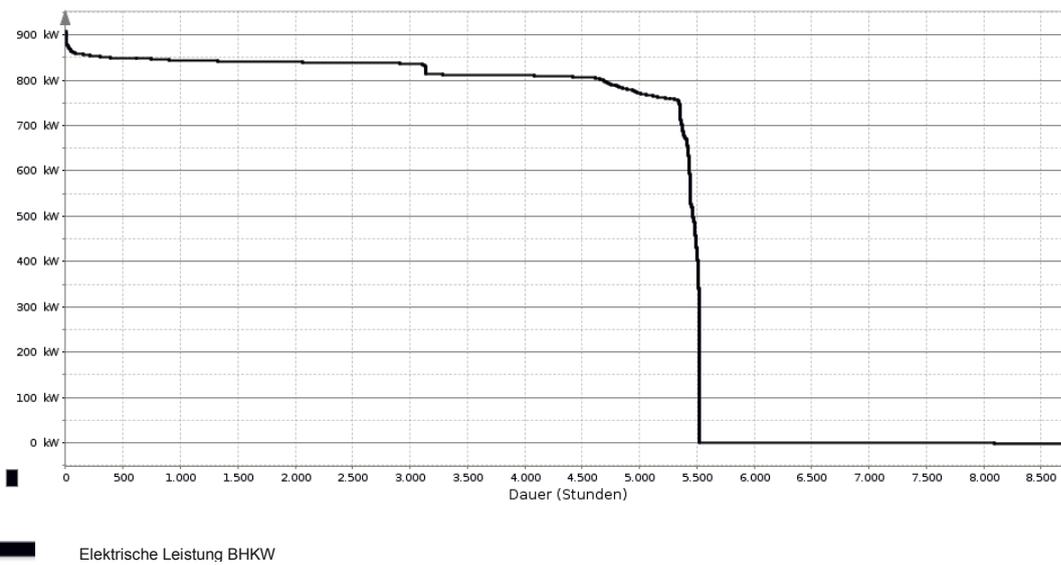


Abbildung 81: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

In Abbildung 82 und Abbildung 83 sind die monatlichen Startanzahlen und Betriebsstunden pro Start des BHKW-Moduls im Jahr 2015 dargestellt. Man kann erkennen, dass in den Wintermonaten das BHKW nur wenige Schaltspiele aufweist und bis auf Abschaltzeiten für Wartungsarbeiten fast durchgängig betrieben werden kann. Im Sommer steigt die Startanzahl aufgrund der taktenden Betriebsweise deutlich an. In der Übergangszeit erreicht das BHKW ca. 8,8 Betriebsstunden pro Start und im Sommer ca. 2,2 Betriebsstunden pro Start. Über das ganze Jahr 2015 gemittelt wurden im Schnitt 10,0 Betriebsstunden pro Start erreicht.

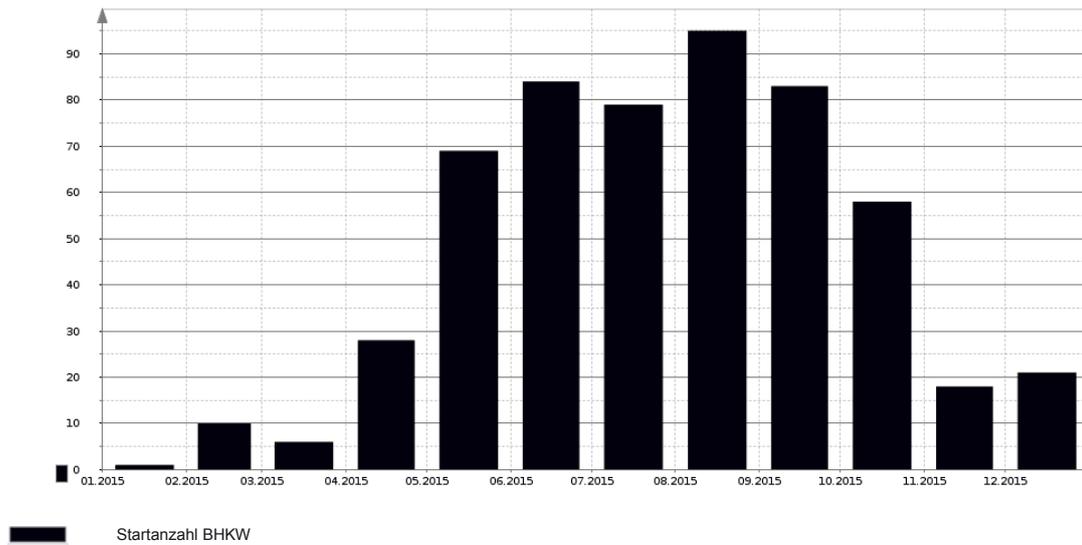


Abbildung 82: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

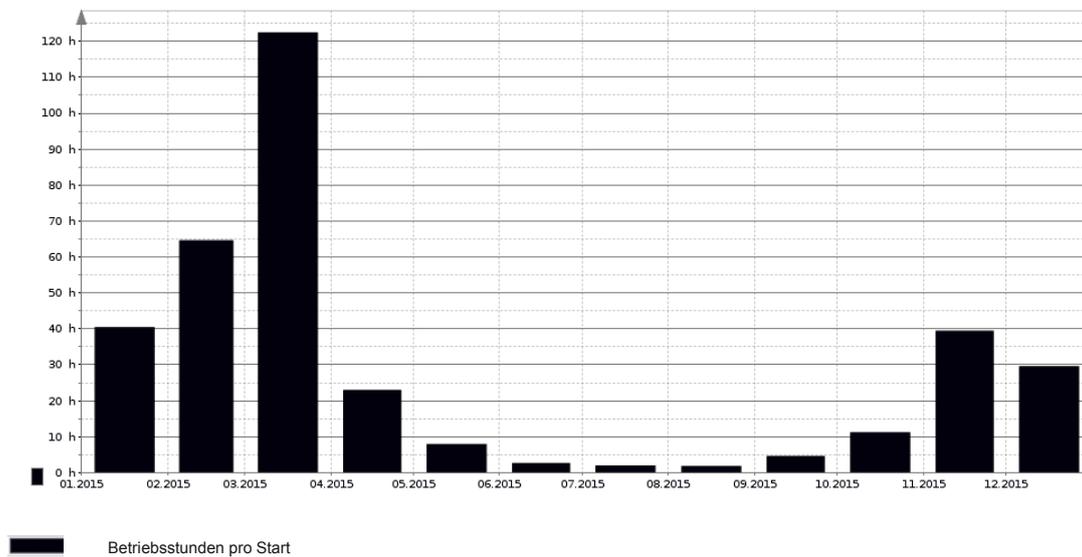


Abbildung 83: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

5.3.1.3 Ökologische Betrachtung

Die Primärenergieeinsparung wurde nach der in Kapitel 3.2.3.1 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Im Jahr 2015 konnte im Schnitt eine Primärenergieeinsparung von 23,1 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung erreicht werden. Die monatlichen Einzelwerte der Primärenergieeinsparung sind in Abbildung 84 dargestellt. Während der ersten Monitoringphase wurden über das BHKW insgesamt 1.330 t CO₂ ausgestoßen. Nach der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 verteilt sich der CO₂-Ausstoß wie folgt auf die Strom- und Wärmeerzeugung:

- Strom: 1.108 t CO₂
- Wärme: 222 t CO₂

In Abbildung 85 ist der monatlichen CO₂-Ausstoß der Anlage aufgeteilt auf die Strom- und Wärmeerzeugung dargestellt. Im Jahr 2015 betragen die auf die Stromerzeugung bezogenen spezifischen CO₂-Emissionen im Schnitt 245 g/kWh_{el} und die wärmebezogenen CO₂-Emissionen 41 g/kWh_{th}. Die monatlichen Einzelwerte der spezifischen CO₂-Emissionen sind in Abbildung 86 dargestellt.

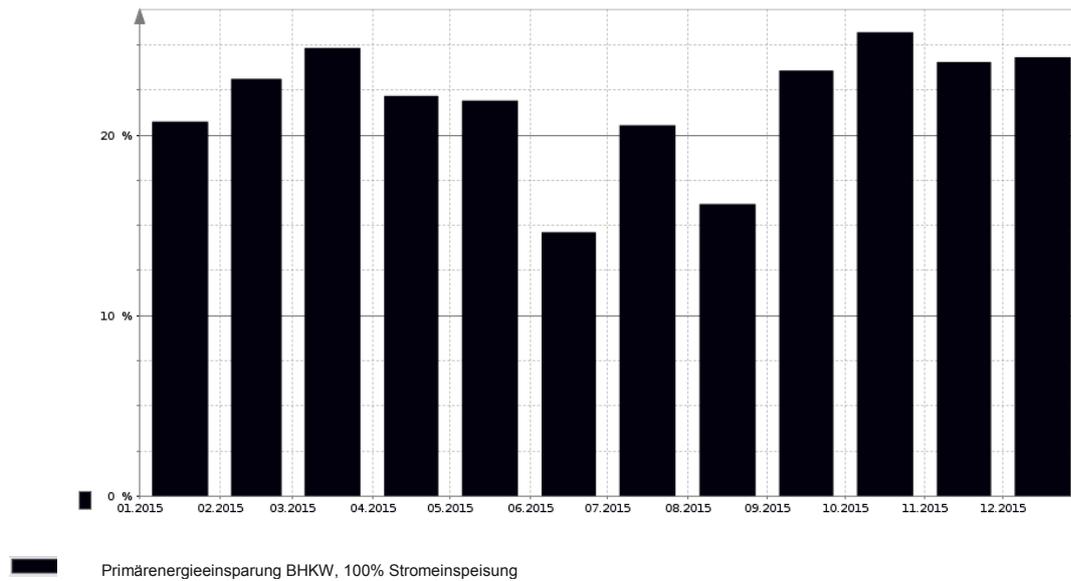


Abbildung 84: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

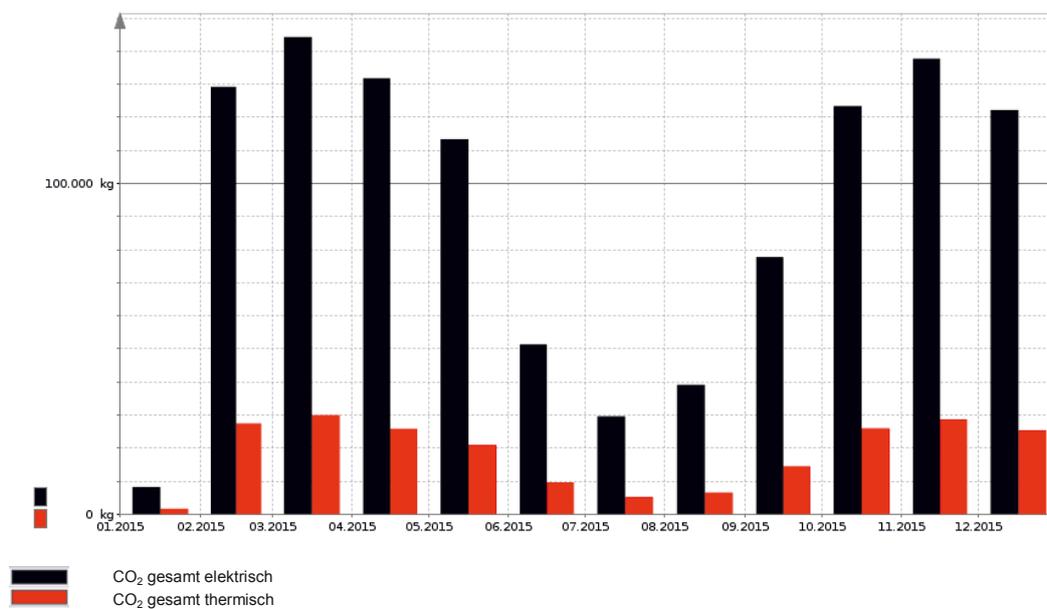


Abbildung 85: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

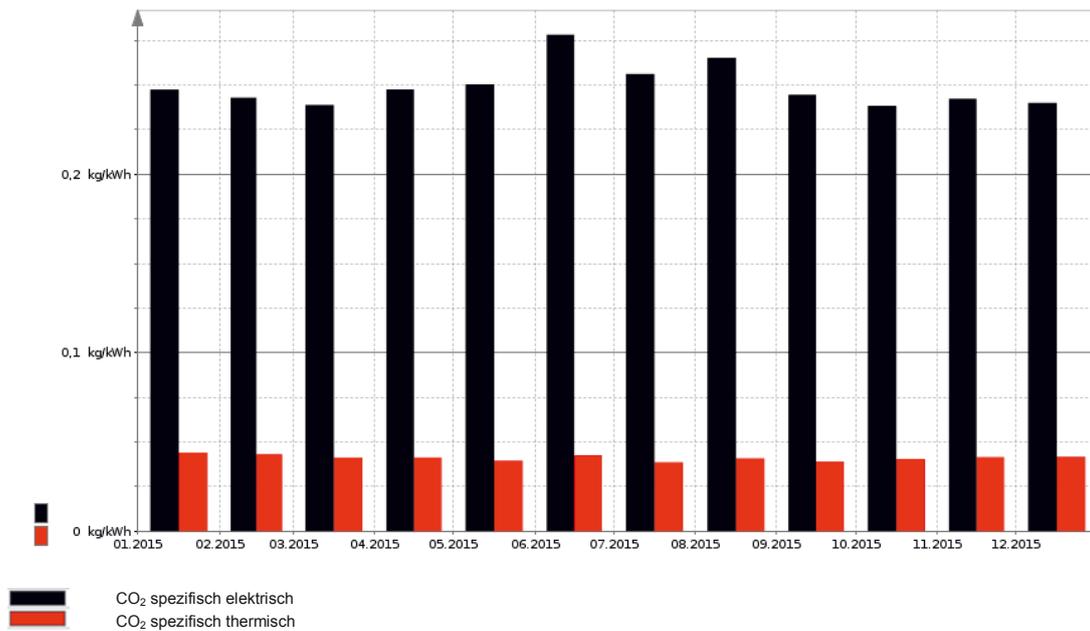


Abbildung 86: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage C in der ersten Monitoringphase

5.3.2 Ergebnisse der zweiten Monitoringphase

5.3.2.1 Energieumsätze

Im Rahmen der zweiten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der BHKW-Anlage C im Zeitraum vom 01.01.2016 bis zum 31.8.2016 erfasst. In Tabelle 33 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz des BHKW aufgelistet. Das BHKW erzeugte im Betrachtungszeitraum ca. 2.767,3 MWh_{el} Strom und 3.211,9 MWh_{th} Wärme. Es wurden insgesamt 8.206 MWh Biomethan verbraucht. Der elektrische Nutzungsgrad lag bei 37,4 % und der thermische Nutzungsgrad bei 43,4 %. Die beiden Gaskessel erzeugten insgesamt 7.092 MWh_{th} Wärme mit einem mittleren Nutzungsgrad von 93,3 %.

Tabelle 33: Energieumsätze der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

	BHKW	Gaskessel 1+2
Erzeugte Wärmemenge	3.211,9 MWh _{th}	7.092,0 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	2.767,3 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	8.206,0 MWh	7.596,7 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	43,4 %	93,3 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	37,4 %	-

In Abbildung 87 sind die monatlich erzeugten Strom- und Wärmemengen des BHKW und die Wärmeerzeugung der Gaskessel dargestellt, in Abbildung 88 sind die monatlichen elektrischen und thermischen Nutzungsgrade des BHKW aufgetragen. Der Trend folgt im Wesentlichen den Ergebnissen der ersten Monitoringphase, mit dem Unterschied, dass das BHKW im Januar voll betrieben werden konnte.

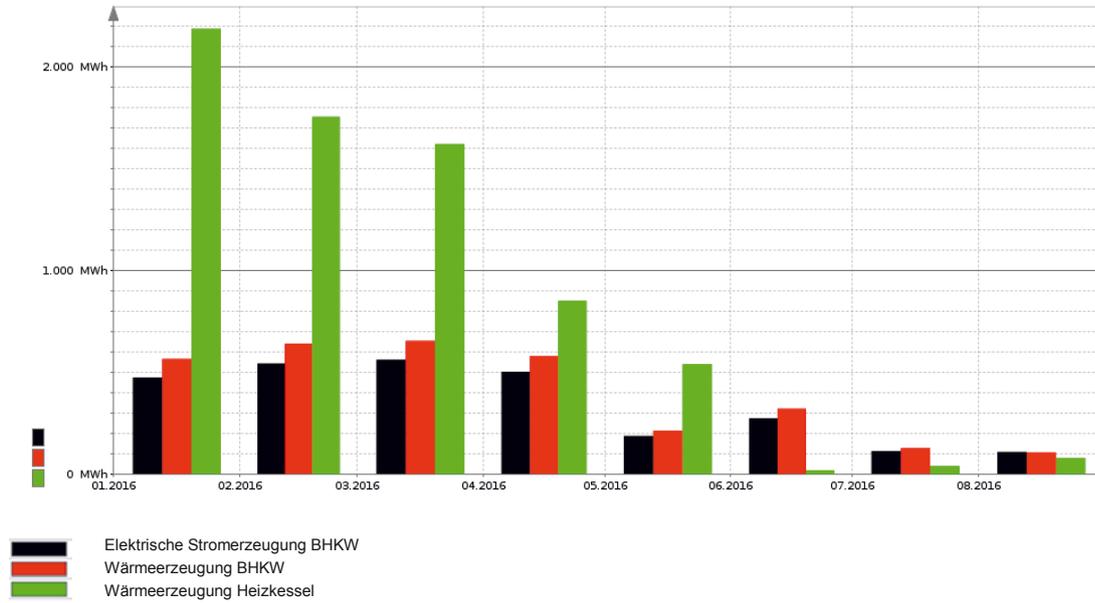


Abbildung 87: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

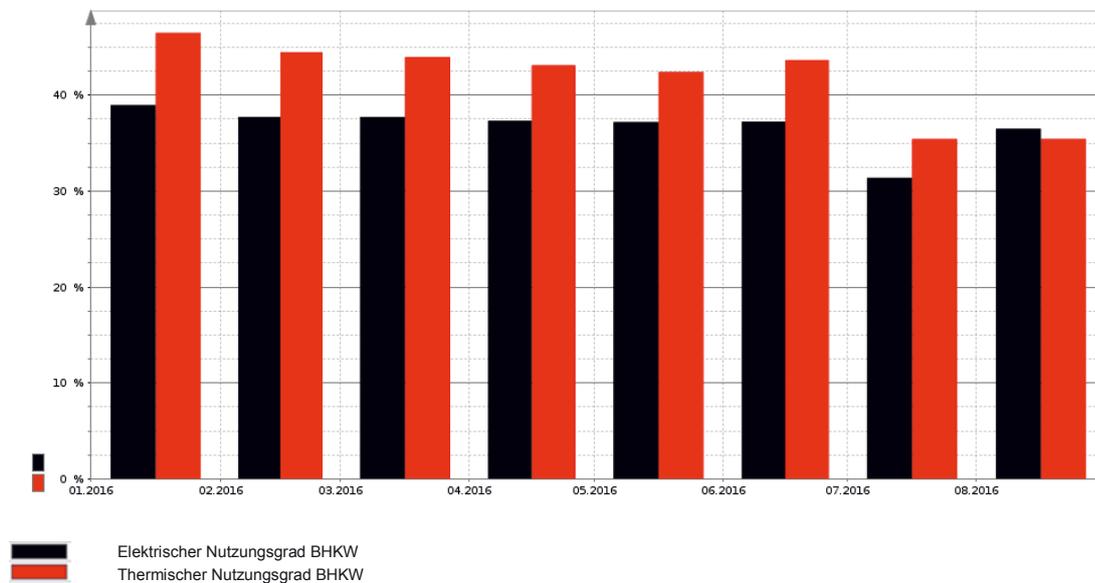


Abbildung 88: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

5.3.2.2 Betriebsverhalten

Die Betriebsdaten des BHKW und der Gaskessel sind in Tabelle 34 aufgelistet. Das BHKW erreichte in der zweiten Monitoringphase insgesamt 3.399 Betriebsstunden und 3.354 Vollbenutzungsstunden (vgl. elektrischen Jahresdauerlinie Abbildung 89). Die beiden Gaskessel erreichten insgesamt 1.688 Betriebsstunden und 788 Vollbenutzungsstunden.

Tabelle 34: Betriebsdaten der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

	BHKW	Gaskessel 1+2
Betriebsstunden	3.399 h	1688 h
Vollbenutzungsstunden	3.354 h	788 h
Starts	344	1480
Betriebsstunden pro Start	9,9 h	1,1 h

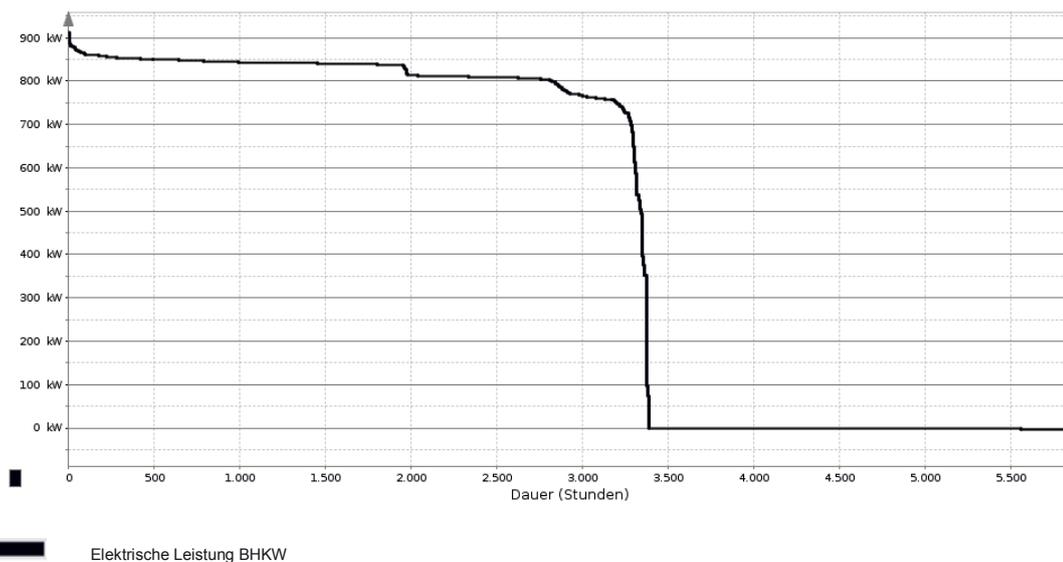


Abbildung 89: Geordnete elektrische Dauerlinie BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

In Abbildung 90 und Abbildung 91 sind die monatlichen Startanzahlen und die Betriebsstunden pro Start des BHKW in der zweiten Monitoringphase dargestellt. Der Trend folgt auch hier im Wesentlichen den Ergebnissen aus der ersten Monitoringphase. In der Übergangszeit erreicht das BHKW ca. 11,4 Betriebsstunden pro Start und im Sommer ca. 2,6 Betriebsstunden pro Start. Der Durchschnittswert liegt mit 9,9 Betriebsstunden pro Start fast gleichauf mit der ersten Monitoringphase.

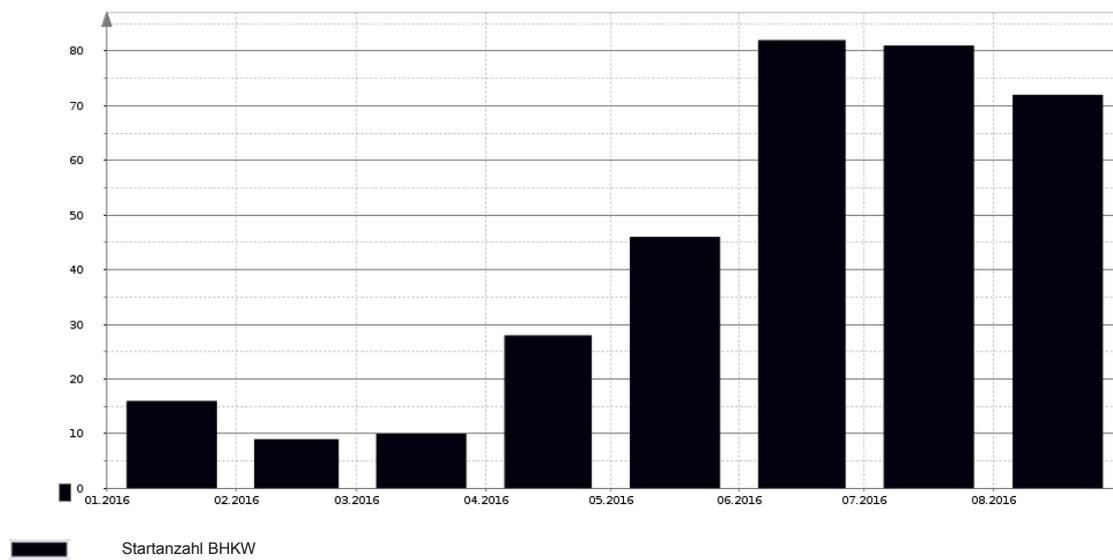


Abbildung 90: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

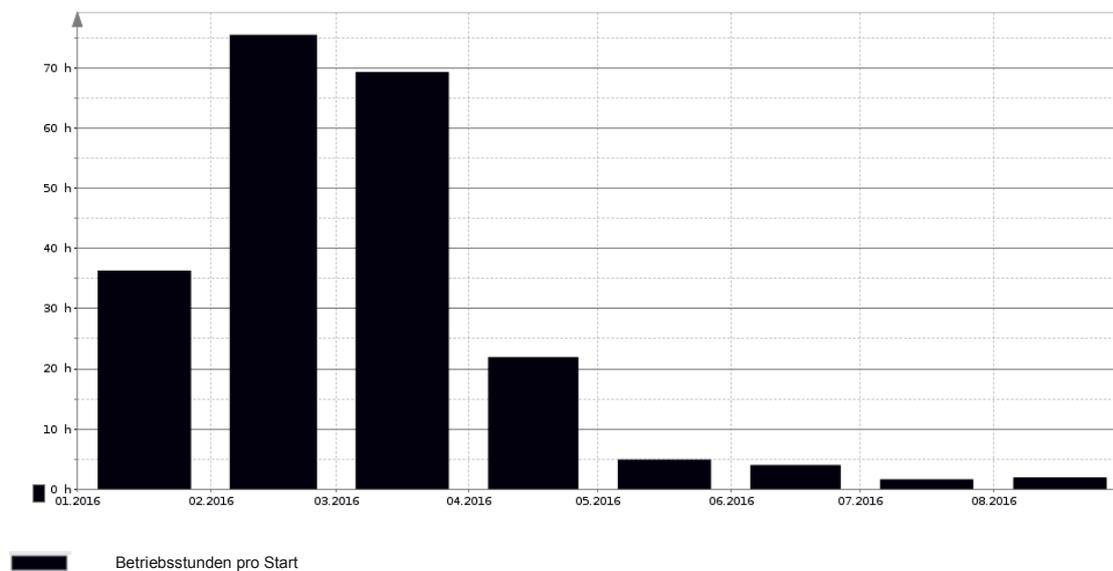


Abbildung 91: Monatliche Betriebsstunden pro Start der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

5.3.2.3 Ökologische Betrachtung

In der zweiten Monitoringphase konnte im Schnitt eine Primärenergieeinsparung von 21,7 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung erreicht werden. Die Monatswerte der Primärenergieeinsparung sind in Abbildung 92 dargestellt.

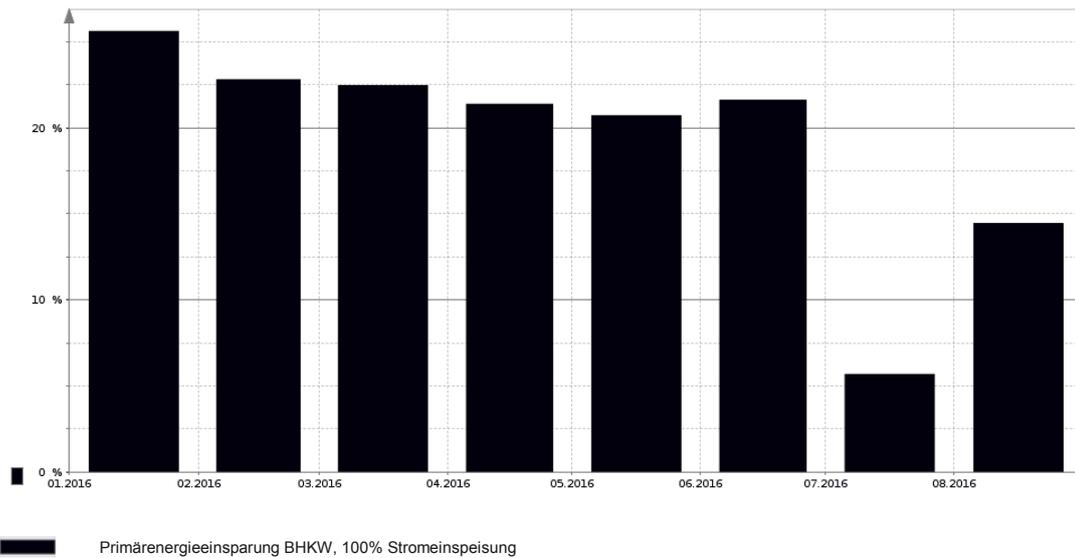


Abbildung 92: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

In der zweiten Monitoringphase wurden über das BHKW-Modul insgesamt 821 t CO₂ ausgestoßen, die sich wie folgt auf die Strom- und Wärmerzeugung aufteilen:

- Strom: 686 t CO₂
- Wärme: 135 t CO₂

Die Monatswerte der CO₂-Emissionen sind als Absolutwerte in Abbildung 93 und als spezifische Werte in Abbildung 94 dargestellt. Im Mittel betragen die spezifischen CO₂-Emissionen 248 g/kWh_{el} und 42 g/kWh_{th}.

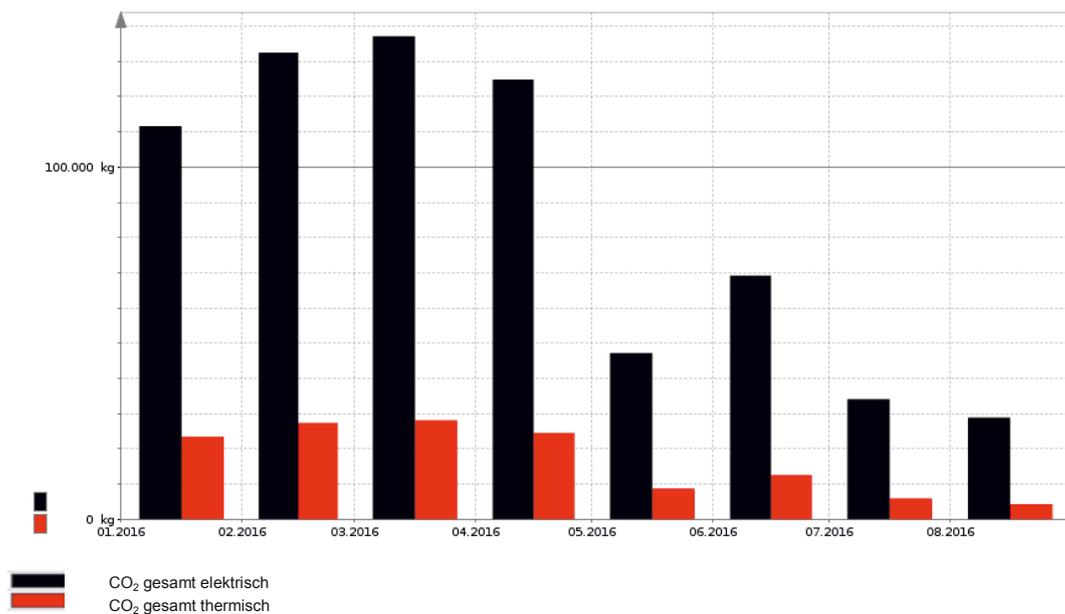


Abbildung 93: Monatlicher CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

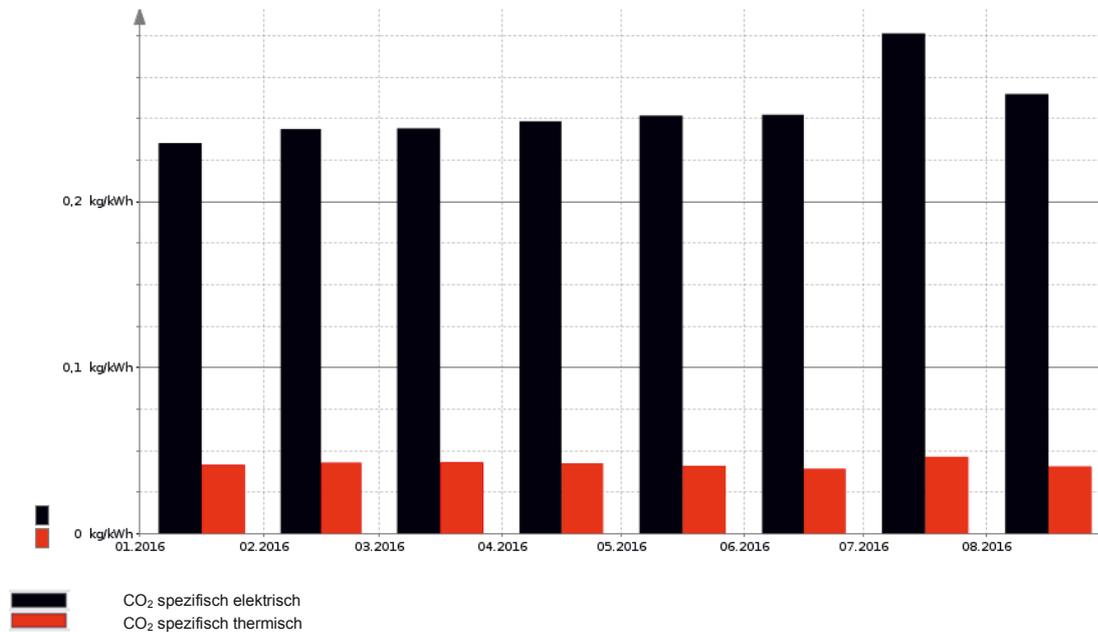


Abbildung 94: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage C in der zweiten Monitoringphase

5.3.3 Evaluation

5.3.3.1 Bewertung des Anlagenbetriebs

BHKW-Anlage C ist bezogen auf die elektrische Leistung die größte im Projekt betrachtete Anlage, jedoch vergleichsweise einfach aufgebaut. Abgesehen von den beiden Mini-BHKW-Modulen zur Eigenstromversorgung, die im Rahmen des Projekts nicht weiter betrachtet wurden, besteht die Anlage aus nur einem BHKW-Modul, einem Pufferspeicher und zwei Spitzenlastkesseln, von denen in der Regel nur einer betrieben wird.

Auch die Regelungs- und Betriebsstrategie der Anlage ist einfach gehalten. Das BHKW-Modul wird wärmegeführt und taktend mit Volleinspeisung des erzeugten Stroms nach EEG betrieben. Von Vorteil ist hier v. a. der groß dimensionierte Pufferspeicher, durch den trotz der hohen thermischen Leistung des BHKW-Moduls auch im Sommer bei geringer Wärmeabnahme noch vertretbare Betriebsstunden pro Start und Start-Stopp-Zyklen gewährleistet werden können.

Im Rahmen der technischen Gegebenheiten und wirtschaftlichen Randbedingungen wird BHKW-Anlage C bereits optimal betrieben und es besteht kein wesentliches Potential für nicht-investive regelungs- oder betriebstechnische Verbesserungen. Im Rahmen des Vorhabens wurde BHKW-Anlage C daher über beiden Monitoringphasen hinweg als Referenzanlage behandelt, an der keine Optimierungsmaßnahmen umgesetzt wurden.

5.3.3.2 Einfluss der Witterung

Um den Einfluss der Witterung abzuschätzen, wurde die monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage C in den beiden Betrachtungszeiträumen mittels der monatlichen Gradtagszahlen des Instituts für Wohnen und Umwelt [IWU17] für den Anlagenstandort witterungsbereinigt (vgl. Abbildung 95).

Vergleicht man die monatliche Wärmebereitstellung der beiden Jahre miteinander, ist zu erkennen, dass sich die Wärmebereitstellung abgesehen von einem witterungsunabhängigen Grundlastsockel größtenteils analog zur korrespondierenden Gradtagszahl verhält. Die Ergebnisse der Witterungsbereinigung nach Abzug des Grundlastsockels sind in Tabelle 16 aufgelistet. Bezieht man die Raumwärmebereitstellung in den Jahren 2015 und 2016 auf das langjährige Mittel, so verbleibt eine Differenz von lediglich ca. 946 MWh_{th} bzw. 6,3 % zwischen den beiden Jahren, die nicht auf Witterungseinflüsse zurückzuführen ist.

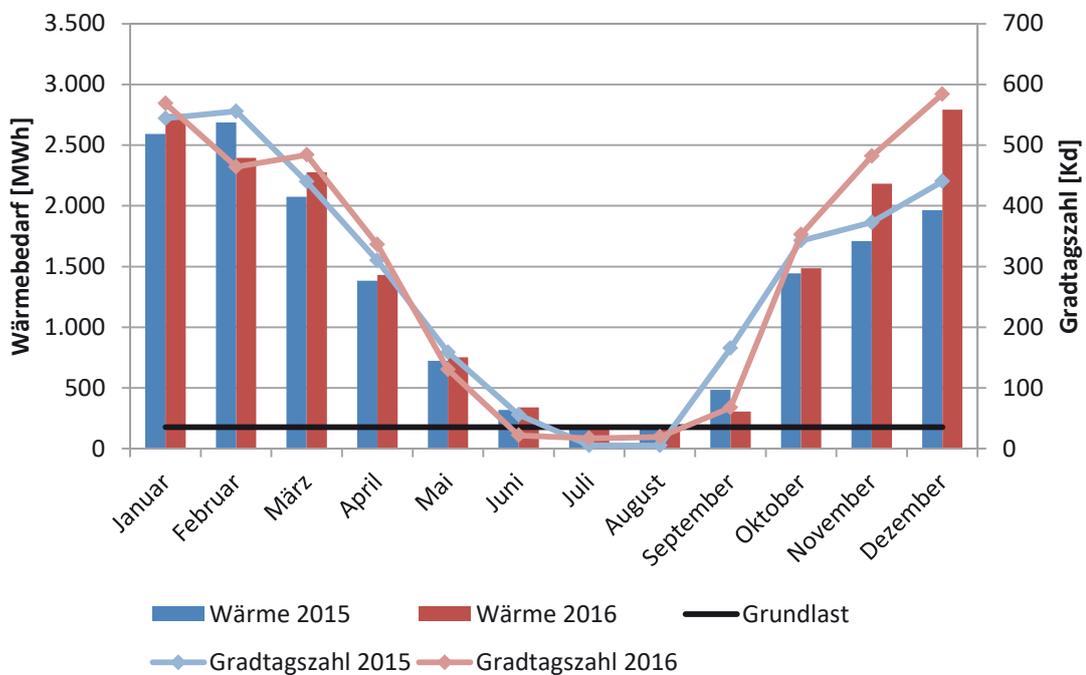


Abbildung 95: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage C und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016

Tabelle 35: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage C der Jahre 2015 und 2016

	Gradtagszahl	Gradtagzahl des langjährigen Mittels	Korrekturfaktor (gerundet)	Raumwärmebereitstellung ohne Grundlastanteil	Raumwärmebereitstellung bezogen auf langjähriges Mittel
2015	3396 Kd	3786 Kd	0,90	13.617 MWh _{th}	15.130 MWh _{th}
2016	3528 Kd	3786 Kd	0,93	14.950 MWh _{th}	16.076 MWh _{th}

5.3.4 Zusammenfassung der Monitoringphasen

Im Rahmen des Monitorings der BHKW-Anlage C wurden zwei Phasen betrachtet:

- Erste Monitoringphase 01.01.2015 bis 31.12.2015 (Ausfall des BHKW im Januar 2015)
- Zweite Monitoringphase 01.01.2016 bis 31.08.2016

Da die beiden Monitoringphasen nicht die gleichen Zeiträume umfassen und das BHKW zudem während der ersten Monitoringphase im Januar ausfiel, wurde ein Vergleichszeitraum über die Monate Februar bis einschließlich August gebildet. Die Ergebnisse für diesen Vergleichszeitraum sind in Tabelle 36 aufgelistet.

Auffällig ist, dass im zweiten Vergleichszeitraum bei annähernd gleichbleibendem Gesamtwärmebedarf das BHKW einen geringeren Anteil abdeckt als in der ersten Vergleichsphase und dafür der Gaskessel einen höheren Anteil erreicht. Entsprechend verschieben sich die thermischen Nutzungsgrade etwas (Verschlechterung beim BHKW-Module, Verbesserung beim Heizkessel). Dementsprechend verringert sich die auch Primärenergieeinsparung etwas. Dies ist auf mehrere kurze Ausfälle des BHKW-Moduls verteilt über die zweite Vergleichsphase zurückzuführen, die sich auf eine Differenz von knapp 300 Betriebsstunden zu ersten Vergleichsphase summieren. Die spezifischen CO₂-Emissionen bleiben dagegen in den beiden Vergleichsphasen nahezu unverändert, ebenso wie das Betriebsverhalten, mit 8,4 in der ersten bzw. 8,6 Betriebsstunden pro Start in der zweiten Phase.

Tabelle 36: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitoring der BHKW-Anlage C

	Erster Vergleichszeitraum		Zweiter Vergleichszeitraum	
	BHKW	Heizkessel	BHKW	Heizkessel
Erzeugte Wärmemenge	3.037,2 MWh _{th}	4.506,0 MWh _{th}	2.645,7 MWh _{th}	4.904,0 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	2.568,7 MWh _{el}	-	2.292,7 MWh _{el}	-
Brennstoffeinsatz (H _i)	6.885,9 MWh	5.097,7 MWh	6.175,6 MWh	5.252,9 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	44,1 %	88,4 %	42,8 %	93,4 %
Elektrischer Nutzungsgrad	37,3 %	-	37,1 %	-
Betriebsstunden	3.116 h	963 h	2.819 h	1.246 h
Vollbenutzungsstunden	3.114 h	501 h	2.779 h	545 h
Starts	371	1.238	328	1.122
Betriebsstunden pro Start	8,4 h	0,8 h	8,6 h	1,1 h
Primärenergieeinsparung	22,0 %	-	20,9 %	-
CO ₂ -Ausstoß Strom	638,8 t CO ₂	-	573,9 t CO ₂	-
CO ₂ -Ausstoß Wärme	125,6 t CO ₂	-	111,6 t CO ₂	-
Spez. CO ₂ -Emissionen Strom	249 g/kWh _{el}	-	250 g/kWh _{el}	-
Spez. CO ₂ -Emissionen Wärme	41 g/kWh _{th}	-	42 g/kWh _{th}	-

5.4 BHKW-Anlage D

5.4.1 Ergebnisse der ersten Monitoringphase

5.4.1.1 Energieumsätze

Im Rahmen der ersten Monitoringphase von BHKW-Anlage D wurde der Zeitraum vom 01.01.2015 bis zum 31.12.2015 betrachtet. Die in diesem Zeitraum erzeugten Strom- und Wärmemengen sowie der Brennstoffeinsatz der beiden BHKW-Module sind in Tabelle 37 aufgelistet. Das Modul BHKW1 erzeugte in diesem Zeitraum ca. 1.354 MWh Strom und stellte ca. 1.277 MWh Wärme bereit. Dabei wurden ca. 3.292 MWh_{Hi} Erdgas verbraucht. Das Modul BHKW2 erzeugte ca. 3.008 MWh Strom, stellte ca. 2.999 MWh Wärme bereit und verbrauchte etwa 7.020 MWh_{Hi} Erdgas.

Das BHKW1 erreichte einen elektrischen Jahresnutzungsgrad von 41,1 % (Datenblattangabe 41,8 %). Der elektrische Jahresnutzungsgrad liegt innerhalb des Toleranzbereichs⁵ der Herstellerangaben (vgl. Kapitel 4.4). Dagegen fällt der thermische Jahresnutzungsgrad des Moduls mit ca. 38,8 % geringer aus als die Datenblattangabe (43,5 %). Das BHKW2 erreicht einen elektrischen Jahresnutzungsgrad von ca. 42,9 % (Datenblattangabe 42,6 %) und einen thermischen Jahresnutzungsgrad von ca. 42,7 % (Datenblattangabe 44,7 %).

Die monatlich erzeugten Strom- und Wärmemengen sind in Abbildung 96 und die Monatswerte der Nutzungsgrade sind in Abbildung 97 dargestellt. Die geringeren Strom- und Wärmemengen des BHKW1 im Januar und Februar 2015 sind auf Ausfälle des Moduls aufgrund von Problemen mit der Zündanlage zurückzuführen.

Tabelle 37: Energieumsätze der beiden BHKW-Module in BHKW-Anlage D im Jahr 2015

	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.277,0 MWh _{th}	2.998,5 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	1.354,1 MWh _{el}	3.008,7 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	3.292,2 MWh	7.020,5 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	38,8 %	42,7 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	41,1 %	42,9 %

⁵ 5 %-Toleranz nach DIN ISO 3046-1

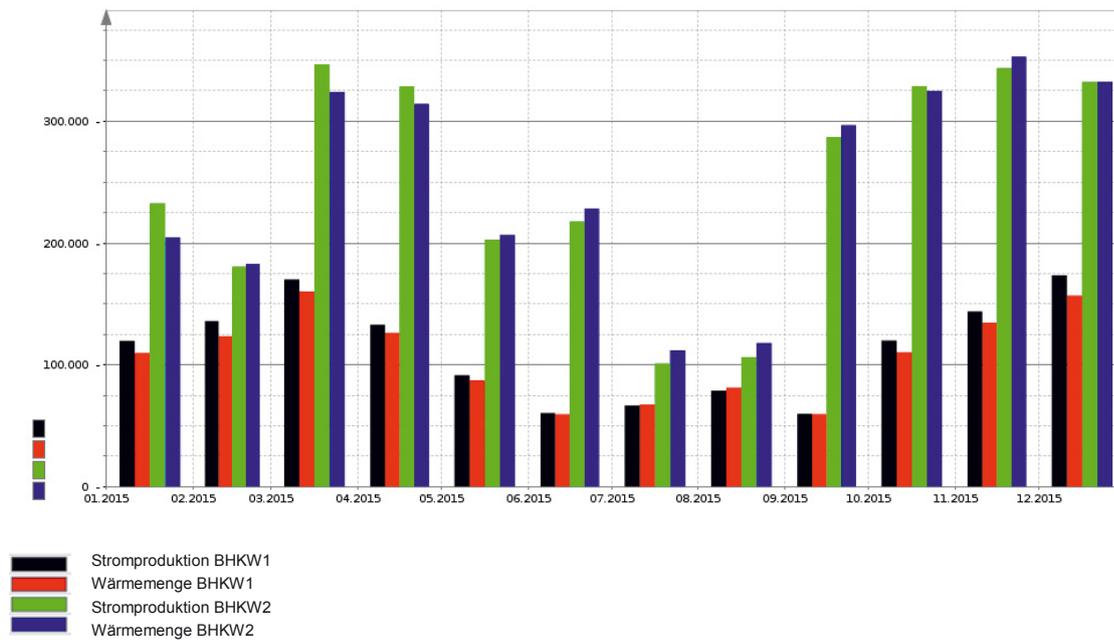


Abbildung 96: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage D im Jahr 2015

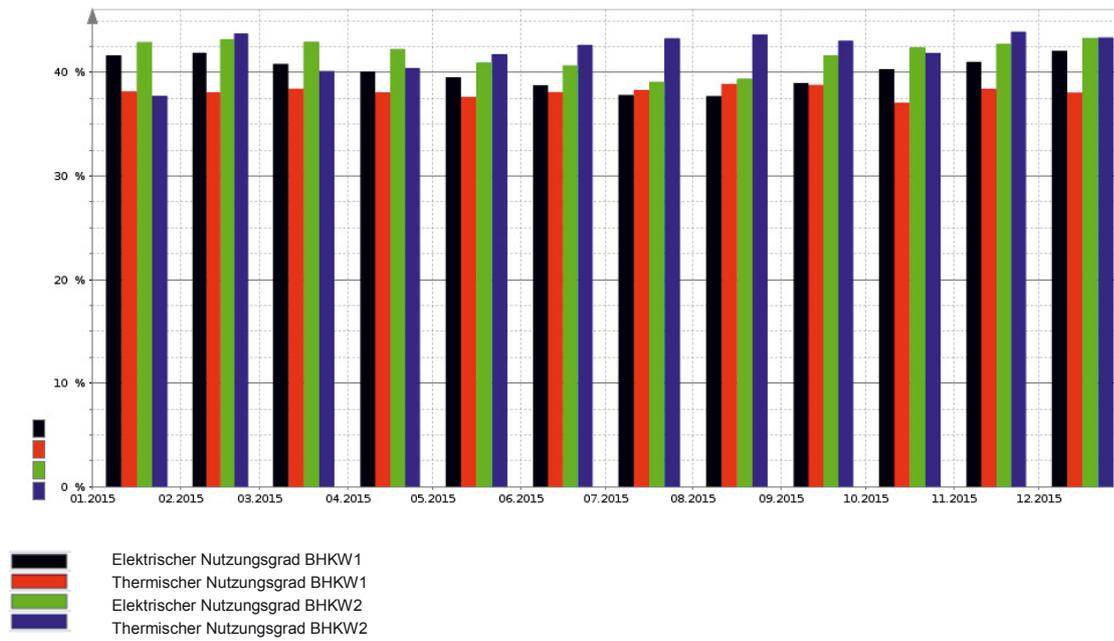


Abbildung 97: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

5.4.1.3 Betriebsverhalten

Die beiden BHKW-Module wurden während der ersten Monitoringphase ausschließlich wärmegeführt betrieben und in Abhängigkeit des Wärmebedarfs in drei Stufen angefordert:

- Betrieb des BHKW1: Wärmeforderung $< 250 \text{ kW}_{\text{th}}$
- Betrieb des BHKW2: Wärmeforderung $250 < x < 500 \text{ kW}_{\text{th}}$
- Betrieb beider BHKWs: Wärmeforderung $> 500 \text{ kW}_{\text{th}}$

Im Betrachtungszeitraum erreichte BHKW1 5.869 Betriebsstunden und 5.416 Vollbenutzungsstunden, BHKW 2 erreichte 6.330 Betriebsstunden und 5.470 Vollbenutzungsstunden (siehe Tabelle 38). BHKW2 weist aufgrund eines höheren Anteils Modulationsbetrieb bei annähernd gleichen Vollbenutzungsstunden etwa 500 Betriebsstunden mehr auf als BHKW1. Dies lässt sich auch an der elektrischen Jahresdauerlinie für beide Module ablesen. BHKW1 taktet dagegen häufiger und weist daher über das Jahr gesehen fast 200 Startvorgänge mehr auf als BHKW2.

An der elektrischen Jahresdauerlinie (Abbildung 98) lassen sich die Modulationsstufen der BHKW-Module erkennen. Für BHKW1 sind dies:

- Stufe 1.0: $250 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Nennlast)
- Stufe 1.1: ca. $230 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Stufe 1.2: ca. $200 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Stufe 1.3: ca. $125 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Minimallast)

Bei der Stufe 1.3 handelt es sich um die minimale zulässige Dauerleistung des Moduls. Diese Stufe wird in erster Linie im Sommerbetrieb bei geringem Wärmebedarf angefahren. Die Modulationsstufen für BHKW2 sind:

- Stufe 2.0: $550 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Nennlast)
- Stufe 2.1: ca. $500 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Stufe 2.2: ca. $410 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Stufe 2.3: ca. $275 \text{ kW}_{\text{el}}$ (Minimallast)

Bei der Interpretation von Abbildung 98 ist zu beachten, dass die Betriebsstunden in der Jahresdauerlinie nicht vollständig mit den über die Betriebsstundenzähler erfassten Werten (siehe Tabelle 38) übereinstimmen, da es in der Monitoringphase zu Ausfällen bei der Datenerfassung kam. Diese Ausfälle betreffen jedoch nur die für die Erstellung der Jahresdauerlinie maßgeblichen Leistungswerte, die weiter oben dargestellten Energiemengen und Betriebsstunden wurden korrekt erfasst.

Tabelle 38: Betriebsdaten der BHKW-Anlage D im Jahr 2015

	BHKW1	BHKW2
Betriebsstunden	5869 h	6330 h
Vollbenutzungsstunden	5416 h	5470 h
Starts	1142	971
Betriebsstunden pro Start	5,1 h	6,5 h

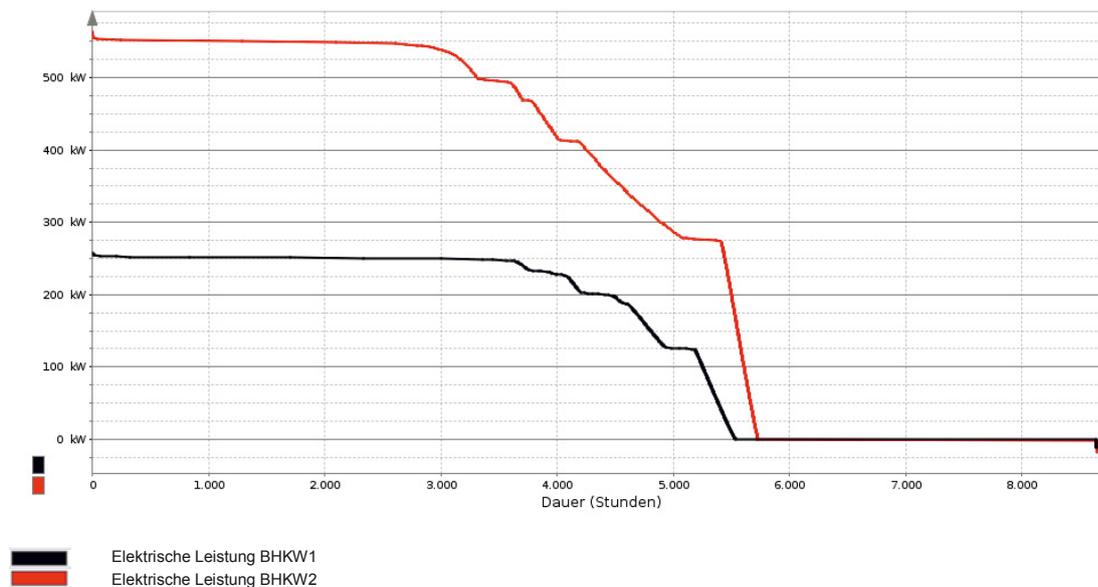


Abbildung 98: Geordnete elektrische Jahresdauerlinie für BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

In Abbildung 99 ist die monatliche Summe an Starts der beiden BHKW-Module dargestellt. Wie erwartet steigt die Anzahl an Startvorgängen in den Sommermonaten im Vergleich zum Winter deutlich an. Mit einer durchschnittlichen Zahl von 5 bis 6 Startvorgängen pro Tag ist die Starthäufigkeit im Sommer in Anbetracht des vorhandenen Puffervolumens von 20 m³ und des modulierenden Betriebs allerdings als sehr hoch zu bewerten und lässt Raum für Optimierungen der Regelstrategie.

Auffällig ist auch die hohe Starthäufigkeit des BHKW1 im Februar. Hier wäre davon auszugehen, dass das BHKW annähernd durchgängig betrieben werden kann. Betrachtet man den Zeitraum genauer (siehe Abbildung 100), ist zu erkennen, dass BHKW1 jeweils im Zeitraum vom 08.02 bis 10.02 und vom 14.02 bis 16.02 sehr häufig gestartet ist. Dies ist auf die bereits oben genannten Probleme an der Zündanlage des BHKW-Moduls zurückzuführen.

Im Juni 2015 sind die Startanzahlen beider Module im Vergleich zu den vorhergehenden und nachfolgenden Monaten auffällig gering. Dies spiegelt nicht den tatsächlichen Betrieb wieder, sondern ist auf einen Ausfall der Datenerfassung über die Dauer von

ca. zwei Wochen zurückzuführen. Die Daten für Juni 2015 sind daher nicht vollständig, die tatsächliche Startanzahl dürfte wesentlich höher liegen.

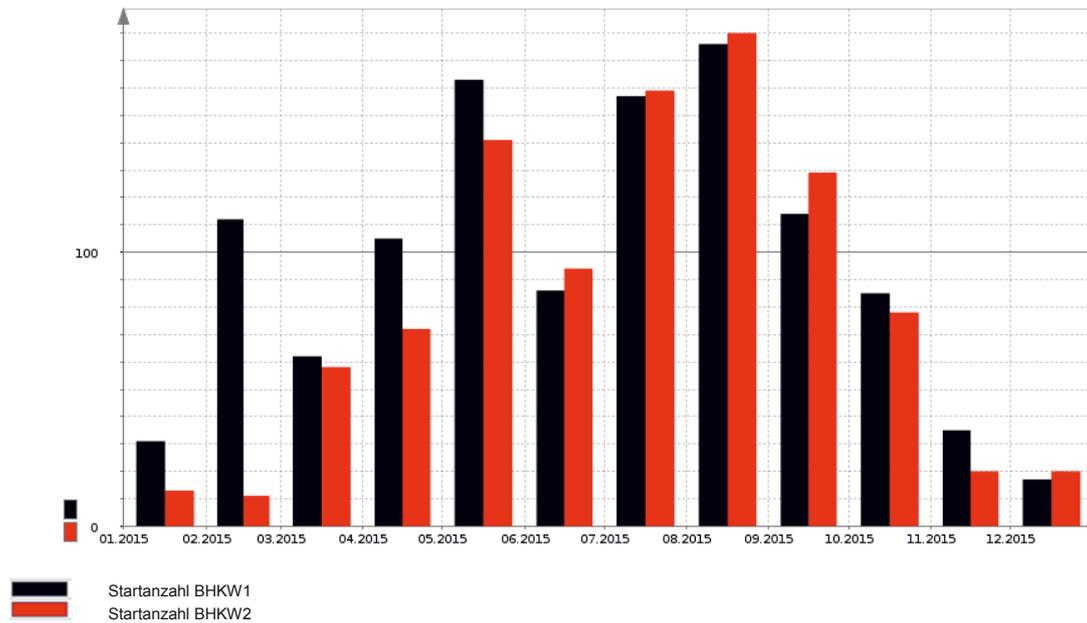


Abbildung 99: Monatliche Startanzahl der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

Abbildung 101 stellt die monatlichen durchschnittlichen Betriebsstunden pro Start dar. Zu erkennen ist, dass die beiden Module im Winter bis auf die beschriebene Abweichung bei BHKW1 deutlich mehr Betriebsstunden pro Start erreichen als im Sommer. In den Sommermonaten werden beide Module trotz der vorhandenen Möglichkeiten für die Leistungsanpassung (modulierender Betrieb) und des Pufferspeichervolumens von 20 m³ im Durchschnitt lediglich 2 bis 3 Stunden pro Start betrieben. Dies deutet auf eine nicht optimal abgestimmte Regelung hin und kann negative Folgen sowohl für den Verschleiß der Anlagen als auch für die Wartungskosten haben.

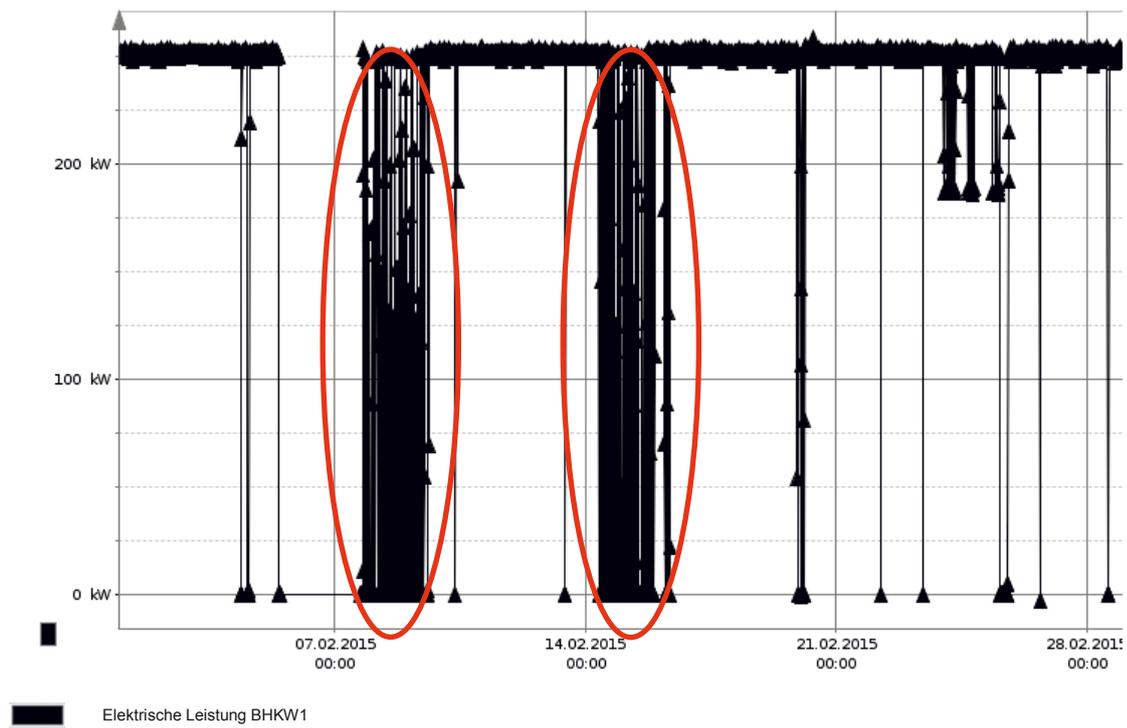


Abbildung 100: Elektrische Leistung BHKW1 (Februar 2015)

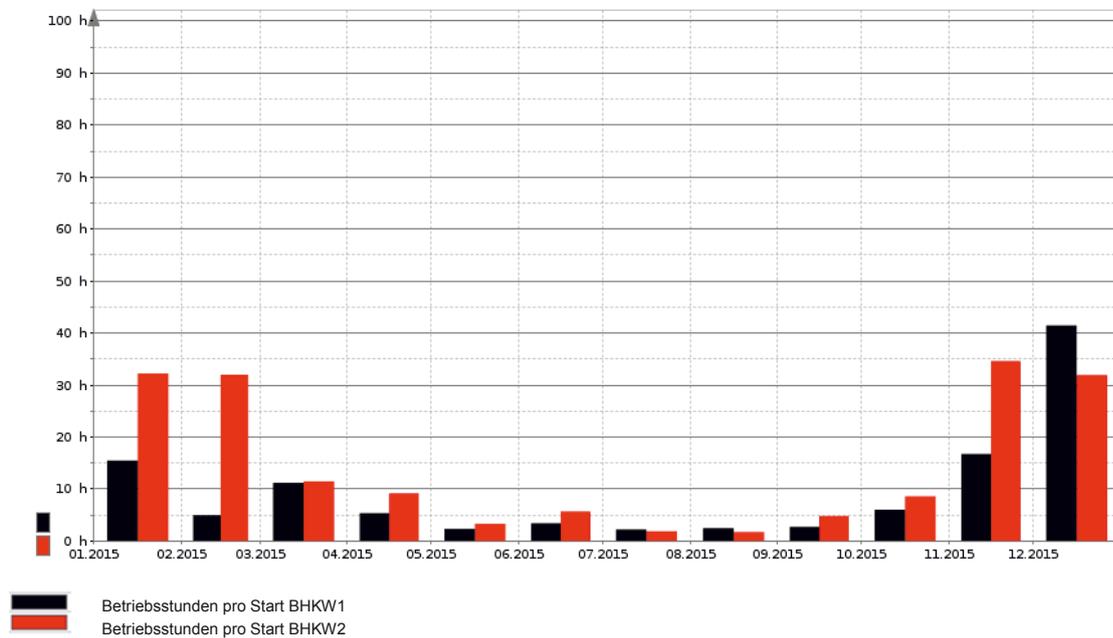


Abbildung 101: Durchschnittliche Betriebsstunden der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

5.4.1.4 Ökologische Betrachtung

Die Primärenergieeinsparung für BHKW-Anlage D wurde nach dem in Kapitel 3.2.3.1 beschriebenen Verfahren ermittelt. Im Jahr 2015 konnte das BHKW1 eine Primärenergieeinsparung von im Mittel 24,2 % und das BHKW2 eine Primärenergieeinsparung von 28,5 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung aufweisen. Die Monatswerte der Primärenergieeinsparung sind in Abbildung 102 dargestellt. Die sowohl im Jahresmittel als auch in der monatlichen Betrachtung deutlich höhere Primärenergieeinsparung von BHKW2 lässt sich auf die höheren thermischen Nutzungsgrade des Moduls zurückführen, wodurch dieses im Vergleich mit dem Referenzsystem besser abschneidet als BHKW1.

Im Jahr 2015 wurden über das BHKW1 insgesamt 679,7 t CO₂ und über das leistungsstärkere BHKW2 insgesamt 1.449,4 t CO₂ ausgestoßen. Nach der exergetischen Allokationsmethode teilt sich der CO₂-Ausstoß zum Großteil auf die Stromerzeugung und zum geringeren Anteil auf die Wärmeerzeugung auf (vgl. Tabelle 39). In Abbildung 103 sind die zugehörigen Monatswerte der CO₂-Emissionen der beiden BHKW-Module bezogen auf die Strom- und Wärmeerzeugung dargestellt. Die durchschnittlichen spezifischen CO₂-Emissionen des Jahres 2015 sind in Tabelle 40 aufgelistet, die spezifischen Monatswerte sind in Abbildung 104 dargestellt.

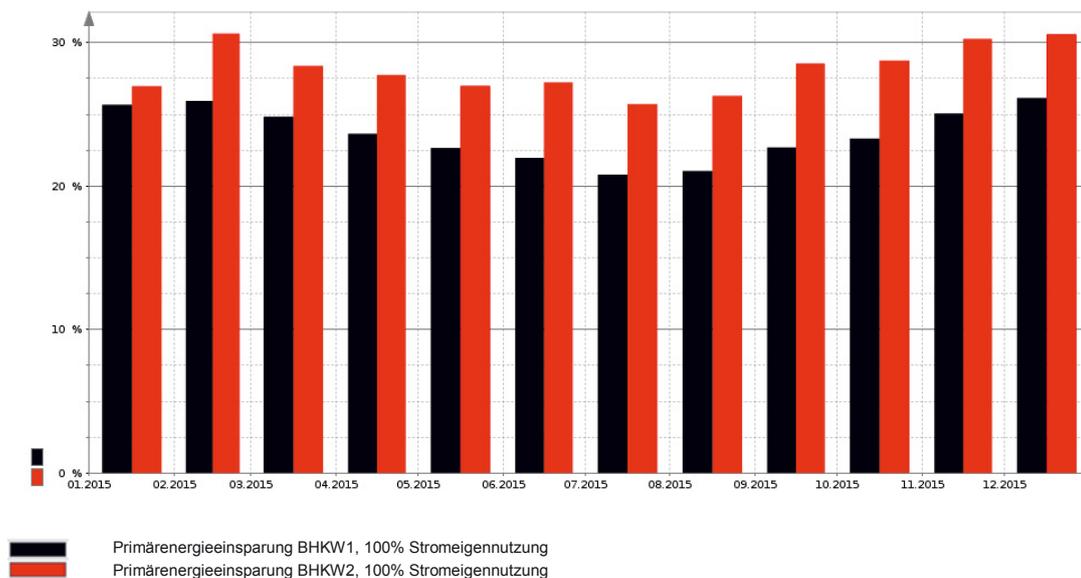


Abbildung 102: Monatliche Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

Tabelle 39: CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	625,6 t CO ₂	1.319,3 t CO ₂
Wärmeerzeugung	54,1 t CO ₂	130,1 t CO ₂

Tabelle 40: Spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	489 g CO ₂ /kWh _{el}	519 g CO ₂ /kWh _{el}
Wärmeerzeugung	60 g CO ₂ /kWh _{th}	50 g CO ₂ /kWh _{th}

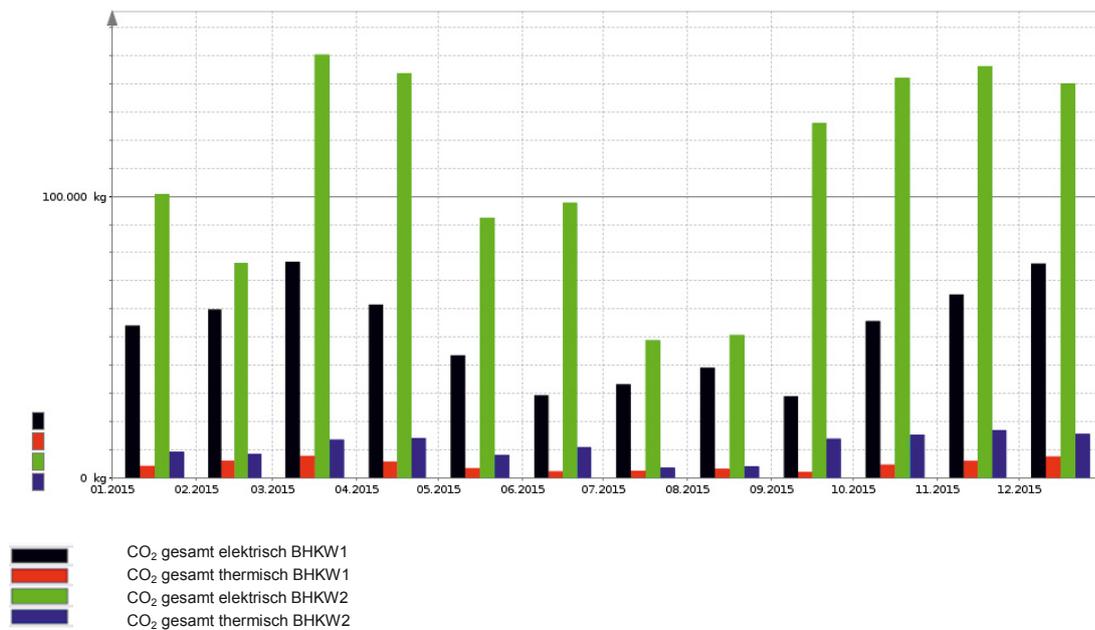


Abbildung 103: Monatlicher CO₂-Ausstoß von BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

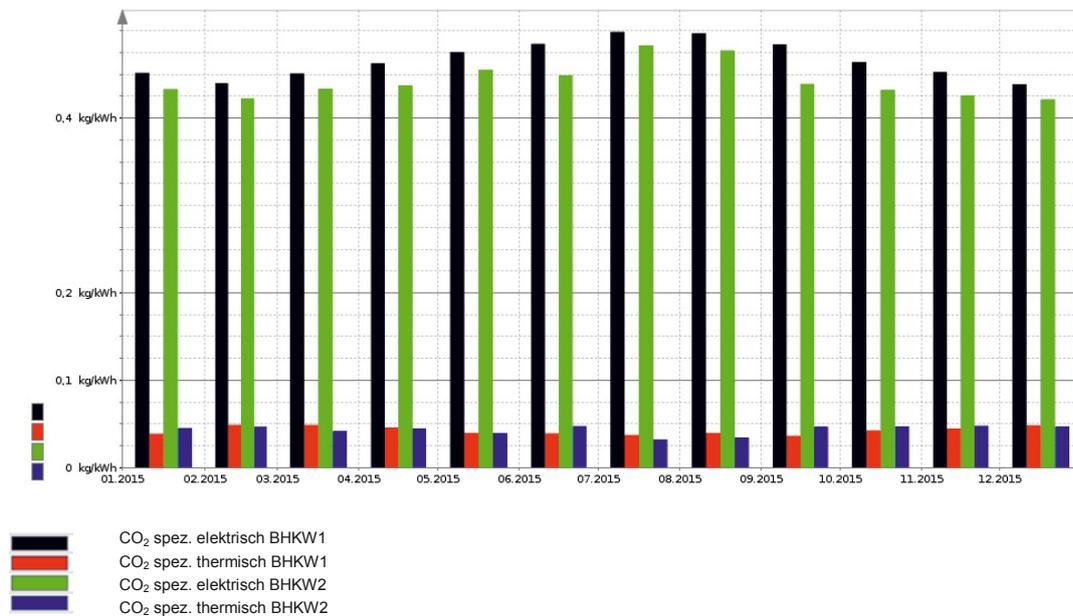


Abbildung 104: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen von BHKW-Anlage D in der ersten Monitoringphase

5.4.2 Identifikation und Umsetzung von Optimierungspotentialen

5.4.2.1 Optimierung des Regelverhaltens im Sommerbetrieb

Im Rahmen der ersten Monitoringphase fielen insbesondere die häufigen Startvorgänge beider Module im Sommerbetrieb und in der Übergangszeit auf. Abbildung 105 und Abbildung 106 zeigen im Detail jeweils den typischen Betrieb der beiden BHKW im August 2015 (Sommerbetrieb) und September 2015 (Übergangszeit). Es wurden folgende Betrachtungszeiträume ausgewählt:

- Sommerbetrieb: 27.08.2015 bis 01.09.2015
- Übergangszeit: 25.09.2015 bis 28.09.2015

Wie aus Abbildung 105 ersichtlich, wird im Sommer abwechselnd immer nur eines der beiden BHKW-Module angefordert. Die Umschaltung zwischen beiden Modulen erfolgt häufig, zudem werden beiden Module modulierend bis auf etwa 50 % der Nennlast betrieben. Als grüne Linie ist in Abbildung 105 zusätzlich der berechnete Pufferspeicherfüllstand dargestellt. Auffällig ist, dass der Pufferspeicher die meiste Zeit nur bis zu etwa 50 % beladen wird, während gleichzeitig die BHKW-Module abgeschaltet oder in der Leistung reduziert werden.

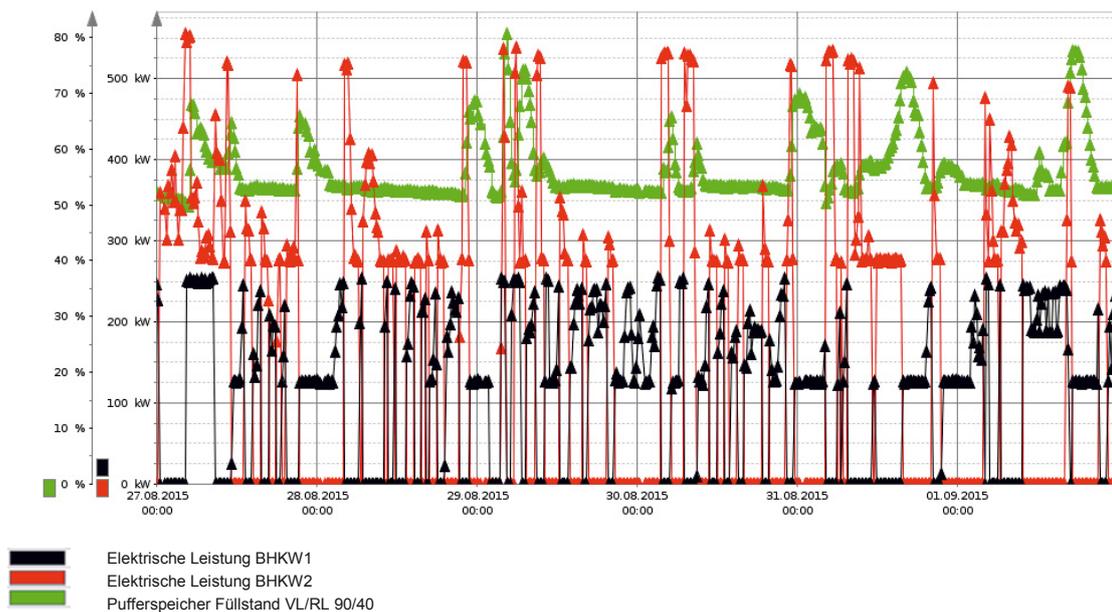


Abbildung 105: Betrieb der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D Ende August 2015

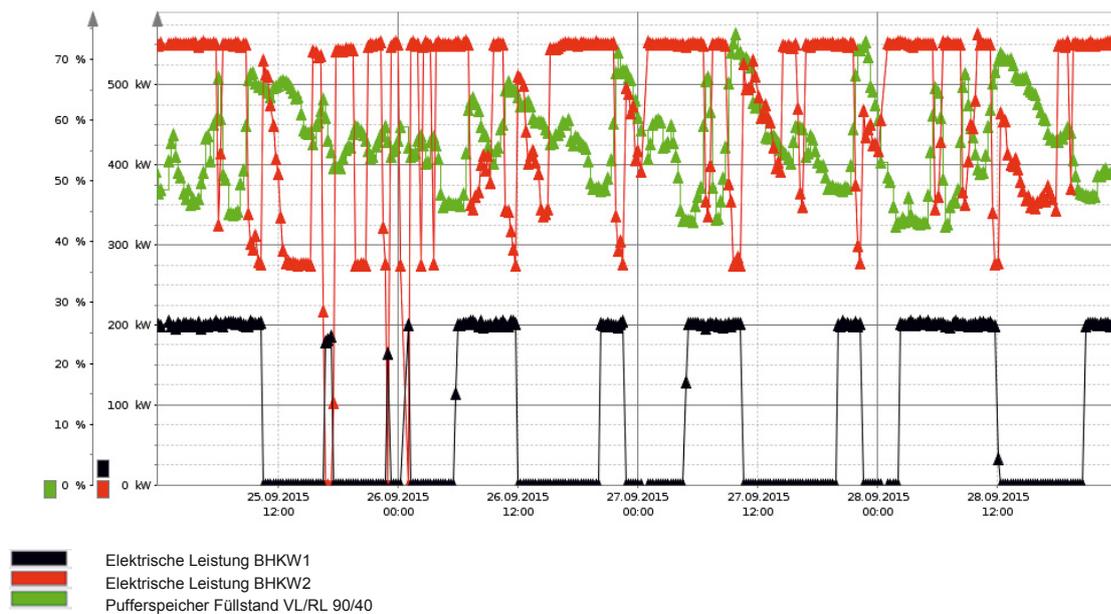


Abbildung 106: Betrieb der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D Ende September 2015

In der Übergangszeit (vgl. Abbildung 106) liegt ein höherer Wärmebedarf vor und die beiden BHKW-Module takteten seltener, jedoch wird insbesondere BHKW2 noch häufig in Teillast betrieben. Der Pufferspeicher wird besser genutzt, erreicht aber auch in der Übergangszeit nur Füllstände bis knapp 70 %, während die BHKW-Module bereits abgeschaltet oder in der Leistung reduziert werden, obwohl noch Speicherkapazitäten vorhanden wären.

In Tabelle 41 sind die Betriebsdaten für die beiden betrachteten Zeiträume zusammenfassend dargestellt. Die beiden BHKW wurden im Betrachtungszeitraum „Sommerbetrieb“ durchschnittlich lediglich ca. 2 Stunden pro Start betrieben. In Betrachtungszeitraum „Übergangszeit“ erhöhten sich die durchschnittlichen Betriebsstunden pro Start auf ca. 5 Stunden (BHKW1) bzw. ca. 9 Stunden (BHKW2). In beiden Zeiträumen fällt die schlechte Ausnutzung des Pufferspeichers auf, die zu häufigen Start-Stopp-Zyklen und geringen Betriebsstunden pro Start führt.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde im Rahmen der zweiten Monitoringphase die übergeordnete Regelung der beiden BHKW-Module für den Sommerbetrieb optimiert. Ziel der Umstellung war es, längere Laufzeiten pro Schaltzyklus für beide BHKW-Module zu erreichen. Außerdem sollte die Beladung des Pufferspeichers optimiert werden, um eine bessere Ausnutzung der vorhandenen Speicherkapazitäten zu erreichen. Hierzu wurde die Bedingung für die Freischaltung des modulierenden Betriebs der beiden BHKW-Module geändert. Anfangs erfolgte die Freischaltung des modulierenden Betriebs bei Überschreitung eines einzelnen festgelegten Temperaturwerts in einem der kaskadierten Pufferspeicher. Eine echte Information über den aktuellen Speicherfüllstand lag nicht vor. Um eine bessere Auslastung des Pufferspeichers zu erzielen, wurde im Zuge der Optimierung eine Speicherfüllstandsberechnung in den Regelalgorithmus implementiert.

Nach der Umstellung erfolgt die Sollwertvorgabe nunmehr über einen berechneten Pufferspeicherfüllstand, der unter Einbeziehung aller vorhandenen Temperaturfühler in den kaskadierten Speichern ermittelt wird. Dadurch wird eine wesentlich genauere Aussage über den Speicherfüllstand möglich. Der modulierende Betrieb wird nun erst bei Überschreitung eines in der Regelung parametrierbaren Sollwerts für den Pufferspeicherfüllstand freigegeben.

Tabelle 41: Betriebsdaten der beiden BHKW-Module von BHKW-Anlage D in den betrachteten Zeiträumen

	BHKW1				BHKW2			
	Mittl. Außentemperatur ⁶	Betrachtungszeitraum	Bh	Starts	Bh pro Start	Bh	Starts	Bh pro Start
Sommerbetrieb	22,6 °C	144 h	86 h	37	2,3 h	63 h	36	1,75 h
Übergangszeit	11,2 °C	96 h	42 h	8	5,25 h	94 h	10	9,4 h

5.4.2.2 Stromgeführter Sommerbetrieb

BHKW-Anlage D wird bisher wärmegeführt betrieben, weshalb die bereitgestellten Strommengen bei abnehmendem Wärmebedarf im Sommer ebenfalls zurückgehen (vgl. Abbildung 107). Im Fall der betrachteten Anlage mit Stromeigennutzung im Klinikum kann der erzeugten elektrischen Energie jedoch ein vergleichsweise hoher Wert beigemessen werden (hohe Stromgutschrift), weshalb eine durchgängig hohe Strombereitstellung über die BHKW-Module wünschenswert wäre. Da die Anlage zudem bereits über einen Notkühler verfügt, bietet sich daher – zumindest während der Sommermonate – ein stromgeführter Betrieb an. Zu beachten ist dabei, dass im Jahresmittel die erforderlichen Nutzungsgrade für einen qualifizierten KWK-Betrieb im Sinne der einschlägigen Richtlinien (z. B. Energiesteuergesetz, AGFW Richtlinie FW308) durch den zeitweise ungekoppelten Betrieb nicht unterschritten werden. Da der stromgeführte Betrieb im Rahmen des Projekts aus betrieblichen Gründen nicht in die Praxis umgesetzt werden konnte, wurde zur Abschätzung der erzielbaren wirtschaftlichen Vorteile eine Potentialanalyse durchgeführt (vgl. Kapitel 5.4.4.2).

⁶ Quelle: Daten des Deutschen Wetterdienstes für den Anlagenstandort

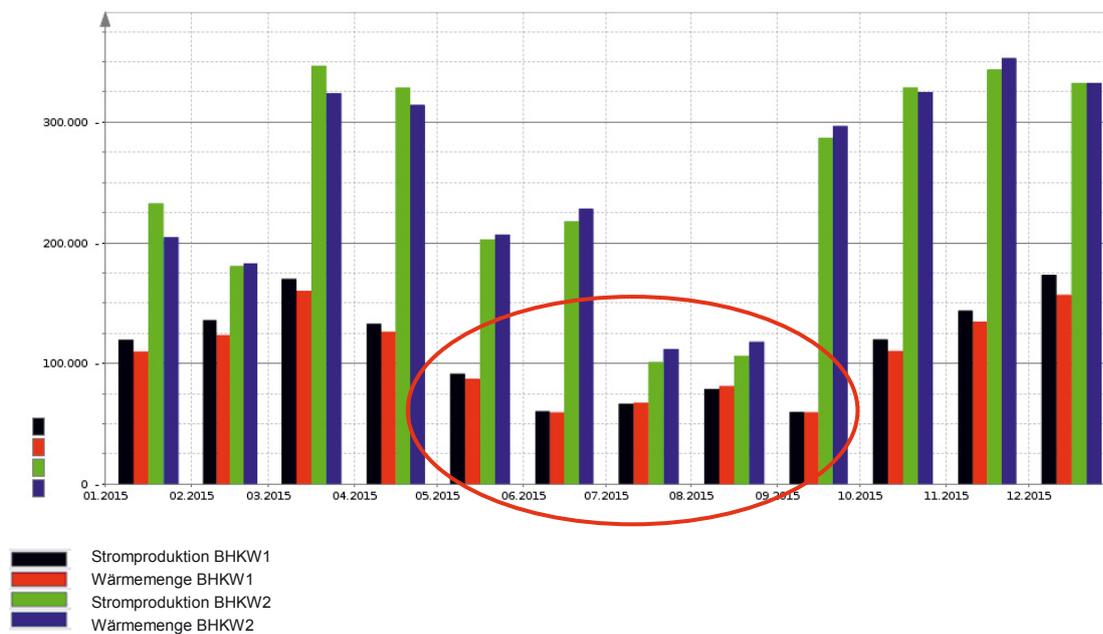


Abbildung 107: Rückgang der Strombereitstellung in den Sommermonaten bei BHKW-Anlage D

5.4.3 Ergebnisse der zweiten Monitoringphase

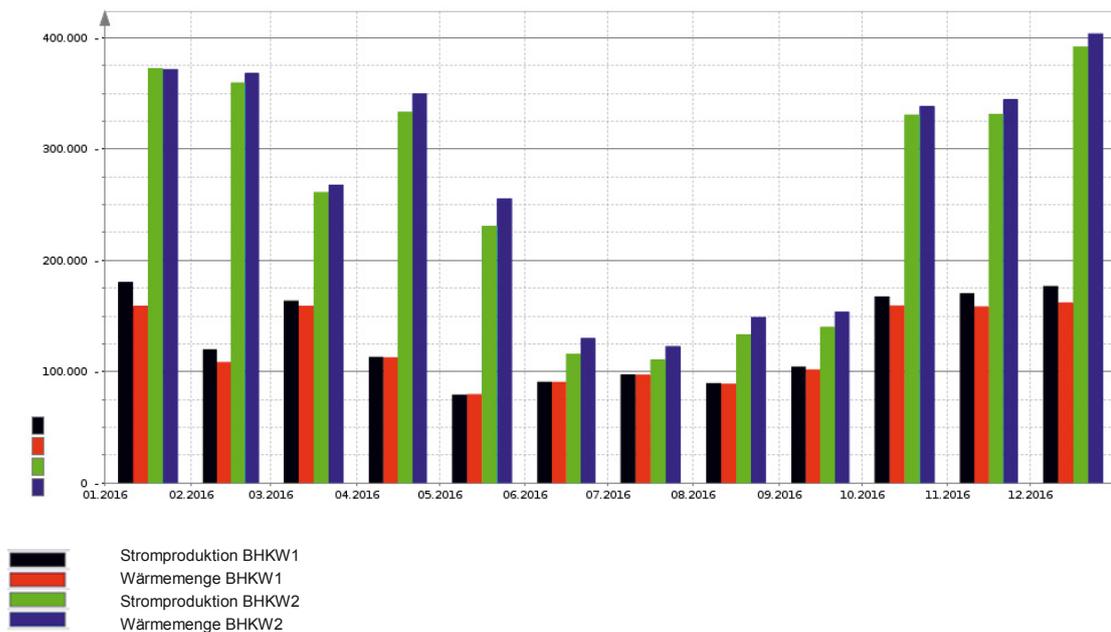
5.4.3.1 Energieumsätze

Im Rahmen der zweiten Monitoringphase wurden die Energieumsätze der beiden BHKW-Module für den Zeitraum vom 01.01.2016 bis zum 31.12.2016 ausgewertet. In Tabelle 42 sind sowohl die erzeugten Strom- und Wärmemengen als auch der Brennstoffeinsatz der BHKW-Module in der zweiten Monitoringphase aufgelistet. Das BHKW1 erzeugte in diesem Zeitraum ca. 1.555,6 MWh Strom und stellte ca. 1.479,2 MWh Wärme bereit. Es wurden ca. 3.737,3 MWh_{Hi} Erdgas verbraucht. Das BHKW2 erzeugte ca. 3.112,8 MWh Strom, stellte ca. 3.256,4 MWh Wärme bereit und verbrauchte etwa 7.452,1 MWh_{Hi} Erdgas.

Aus den Energieumsätzen lassen sich die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade bestimmen. Das BHKW1 erreichte einen elektrischen Nutzungsgrad von 41,6 %, was eine Verbesserung von 0,5 Prozentpunkten gegenüber der ersten Monitoringphase bedeutet. Der thermische Nutzungsgrad lag mit 39,6 % ebenfalls höher als in der ersten Monitoringphase. Der elektrische Nutzungsgrad des BHKW2 verschlechterte sich in der zweiten Monitoringphase von 42,9 % auf 41,8 %, im Gegenzug verbesserte sich der thermische Nutzungsgrad um einen Prozentpunkt auf 43,7 %.

Tabelle 42: Energieumsätze der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.479,2 MWh _{th}	3.256,4 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	1.555,6 MWh _{el}	3.112,8 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	3.737,3 MWh	7.452,1 MWh
Thermischer Jahresnutzungsgrad	39,6 %	43,7 %
Elektrischer Jahresnutzungsgrad	41,6 %	41,8 %


Abbildung 108: Monatliche Strom- und Wärmeerzeugung der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

In Abbildung 108 sind die monatlich erzeugten Strom- und Wärmemengen während der zweiten Monitoringphase dargestellt. Der Trend folgt im Wesentlichen den Ergebnissen aus der ersten Monitoringphase, lediglich der Monat Februar stellt eine Ausnahme dar. Hier kam es bedingt durch Umbauarbeiten aufgrund des Rückbaus von Messtechnik aus einem anderen Vorhaben zu zeitweisen Stillständen von BHKW1.

In Abbildung 109 sind die elektrischen und thermischen Nutzungsgrade der BHKW-Module aufgeschlüsselt nach Monaten dargestellt. Man kann man erkennen, dass die elektrischen Nutzungsgrade der beiden BHKW im Sommer aufgrund des Teillastbetriebs der BHKW-Module etwas sinken, im Gegenzug steigen die thermischen Wirkungsgrade.

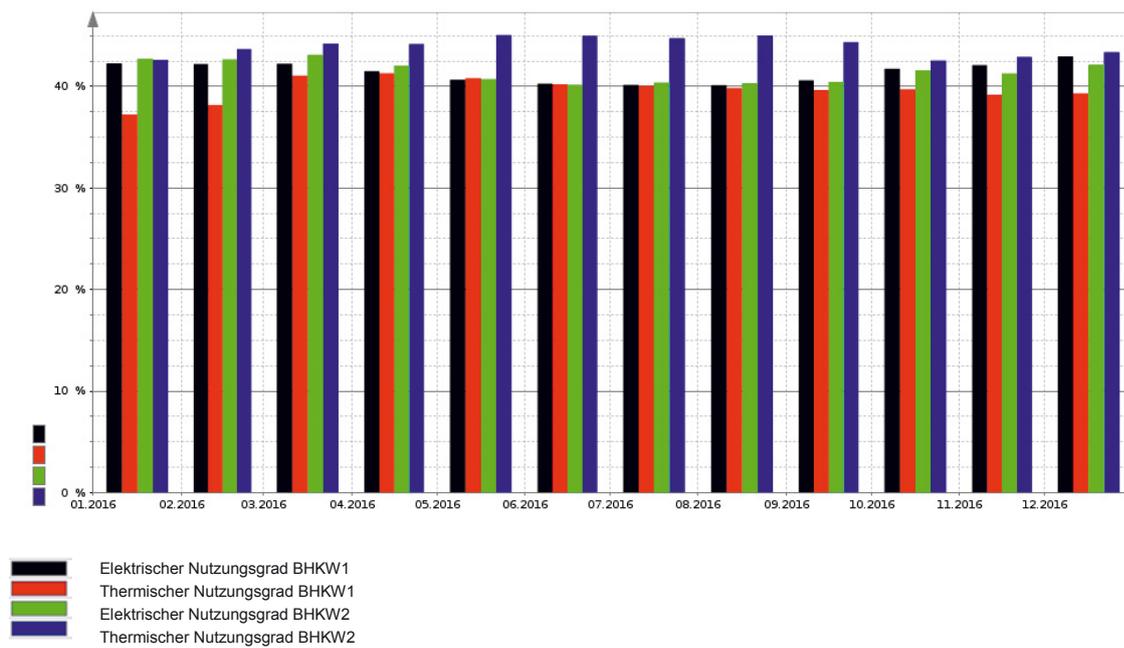


Abbildung 109: Monatliche Nutzungsgrade der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

5.4.3.2 Betriebsverhalten

Das BHKW1 erreichte während der zweiten Monitoringphase 6.697 Betriebsstunden / 6.222 Volllaststunden, das BHKW2 erreichte im gleichen Zeitraum 6.285 Betriebsstunden / 5.659 Volllaststunden.

Wie aus der geordneten elektrischen Jahresdauerlinie (siehe Abbildung 110) ersichtlich wurden die BHKW-Module auch in der zweiten Monitoringphase modulierend in mehreren Leistungsstufen betrieben. Zusätzlich sind bei BHKW1 (schwarze Linie) mehrere Leistungsstufen knapp unterhalb der Nennlast zu erkennen. Diese sind auf Zeiträume zurückzuführen, in denen BHKW1 mit etwas gedrosselter Leistung betrieben wurde, da der Betreiber aufgrund der wiederholt auftretenden Probleme an der Zündanlage einen schonenderen Motorbetrieb gewährleisten wollte.

Tabelle 43: Betriebsdaten der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Betriebsstunden	6.697 h	6.285 h
Vollbenutzungsstunden	6.222 h	5.659 h
Starts	651	672
Betriebsstunden pro Start	10,3 h	9,4 h

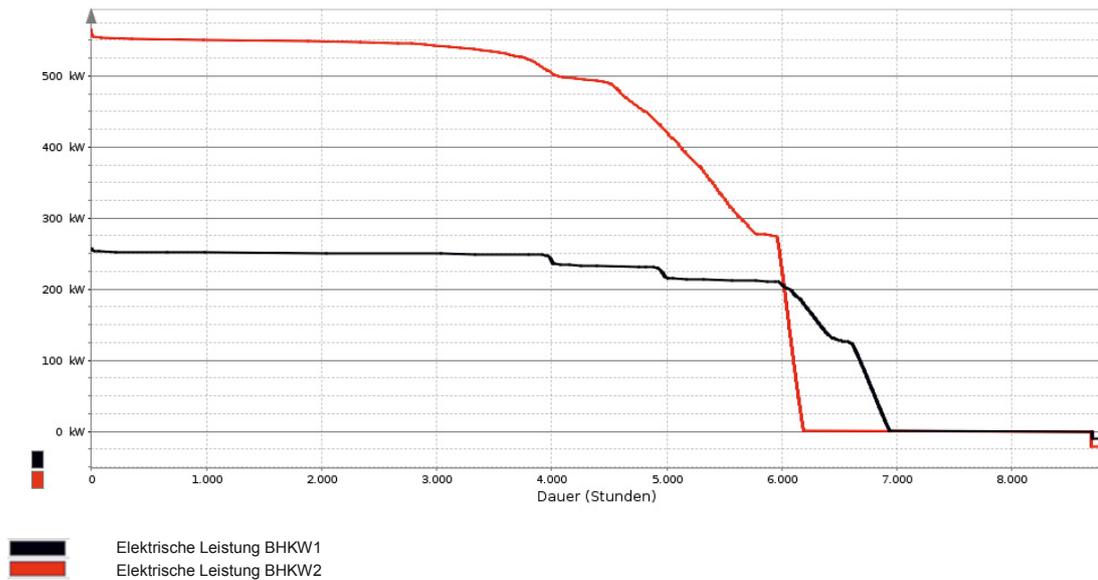


Abbildung 110: Geordnete elektrische Dauerlinie für BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

Betrachtet man die monatliche Startanzahl und die durchschnittlichen Betriebsstunden pro Start (Abbildung 111 und Abbildung 112) so ist zu erkennen, dass die BHKW-Module in den Wintermonaten weitestgehend durchgängig betrieben werden konnten. Bei BHKW1 bildet der Februar hier aufgrund der oben erläuterten Ausfallzeiten eine Ausnahme.

In der Übergangszeit und im Sommer stieg die Startanzahl beider Module deutlich an und die Betriebsstunden pro Start sanken, wie bereits in der ersten Monitoringphase beobachtet. In der Übergangszeit erreichte BHKW1 ca. 5,3 Betriebsstunden pro Start, im Sommer ca. 5,1 Betriebsstunden pro Start. Gegenüber der ersten Monitoringphase konnte bei BHKW1 im Sommerbetrieb somit eine Verbesserung um ca. 3 Betriebsstunden pro Start erreicht werden. BHKW2 erreicht in der Übergangszeit ca. 7,9 Betriebsstunden pro Start und im Sommer ca. 2,3 Betriebsstunden pro Start. Diese Werte stimmen gut mit der ersten Monitoringphase überein. Die Betriebsstunden pro Start sind über das Jahr gemittelt mit 10,3 für BHKW1 und 9,4 für BHKW2 deutlich besser als in der ersten Monitoringphase.

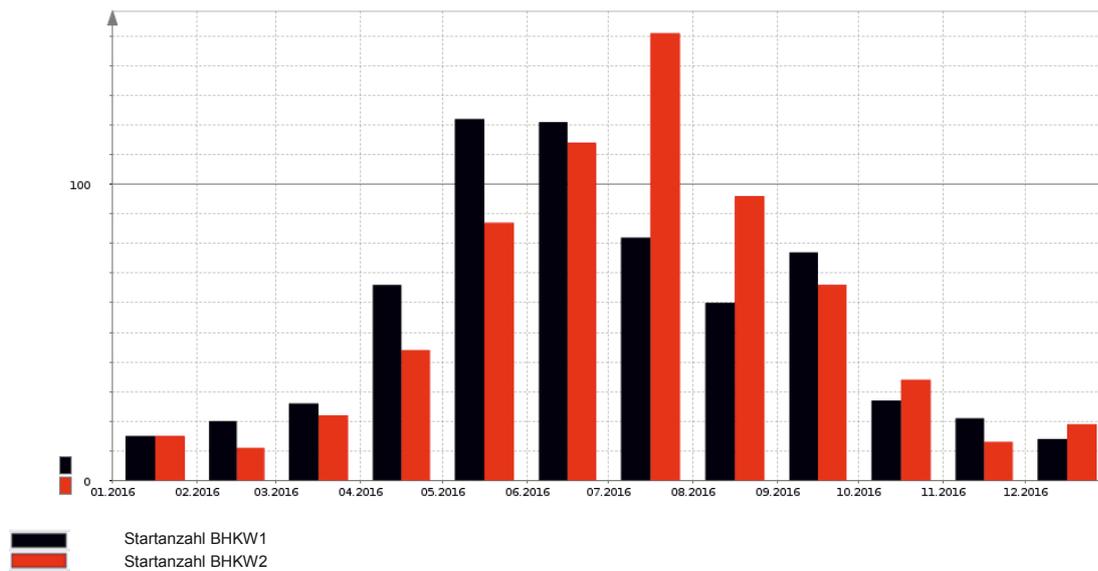


Abbildung 111: Startanzahl der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase

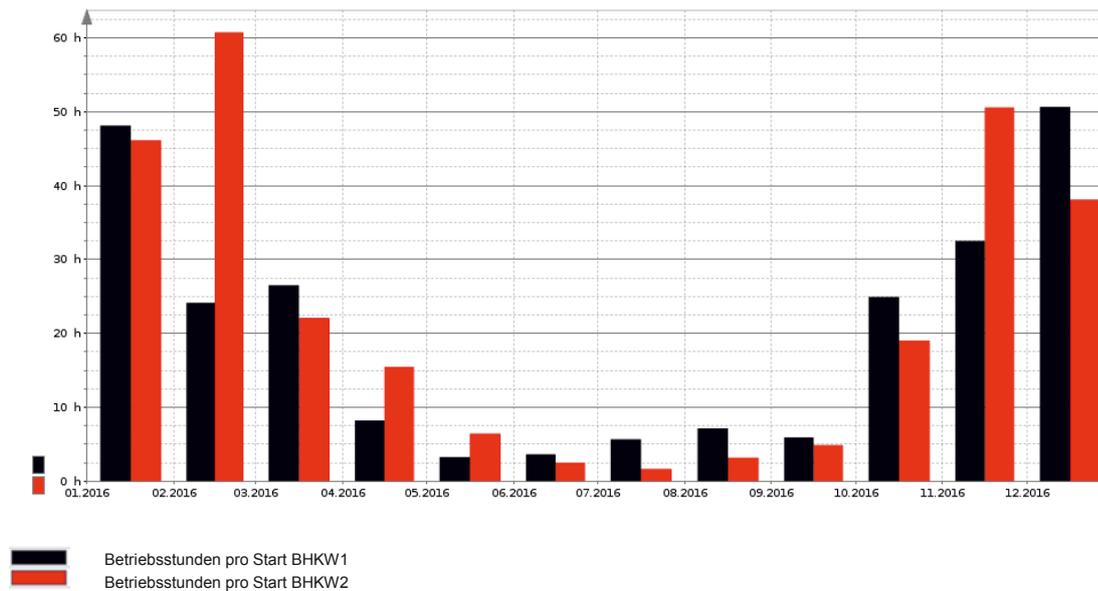


Abbildung 112: Durchschnittliche Betriebsstunden pro Start der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase

5.4.3.3 Ökologische Betrachtung

Während der zweiten Monitoringphase konnte BHKW1 eine Primärenergieeinsparung von 26,3 % und BHKW2 eine Primärenergieeinsparung von 28,9 % gegenüber der ungekoppelten Strom- und Wärmeerzeugung aufweisen. Diese Werte sind geringfügig höher als in der ersten Monitoringphase, was auf die etwas höheren Gesamtnutzungsgrade zurückzuführen ist. Abbildung 113 stellt die Monatswerte der Primärenergieein-

sparung dar. Wie bereits in der ersten Monitoringphase sinken die erzielbaren Einsparungen in den Sommermonaten etwas, da die BHKW-Module hier aufgrund der takten- und modulierenden Betriebsweise nur geringere Nutzungsgrade erreichen.

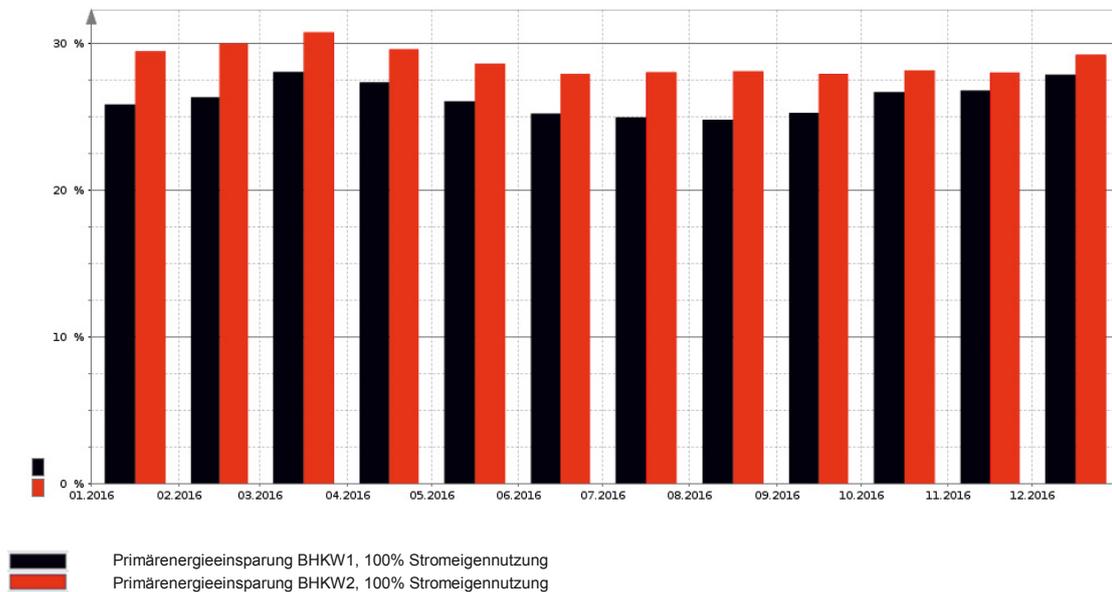


Abbildung 113: Monatliche Primärenergieeinsparung der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase

In der zweiten Monitoringphase wurden über das BHKW1 insgesamt 758,7 t CO₂ und über das BHKW2 insgesamt 1.512,7 t CO₂ ausgestoßen. Nach der exergetischen Allokationsmethode der VDI 4660 verteilt sich der CO₂-Ausstoß wie in Tabelle 44 dargestellt auf die beiden Koppelprodukte. In Abbildung 114 sind die monatlichen Absolutwerte des CO₂-Ausstoßes der beiden BHKW-Module aufgeteilt auf die Strom- und Wärmeerzeugung dargestellt. Die spezifischen strom- bzw. wärmebezogenen Werte sind in Abbildung 115 und Tabelle 45 wiedergegeben.

Tabelle 44: CO₂-Ausstoß der BHKW- Anlage D in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	669,5 t CO ₂	1.359,9 t CO ₂
Wärmeerzeugung	62,2 t CO ₂	152,8 t CO ₂

Tabelle 45: Spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

	BHKW1	BHKW2
Stromerzeugung	451 g/kWh _{el}	442 g/kWh _{el}
Wärmeerzeugung	41 g/kWh _{th}	45 g/kWh _{th}

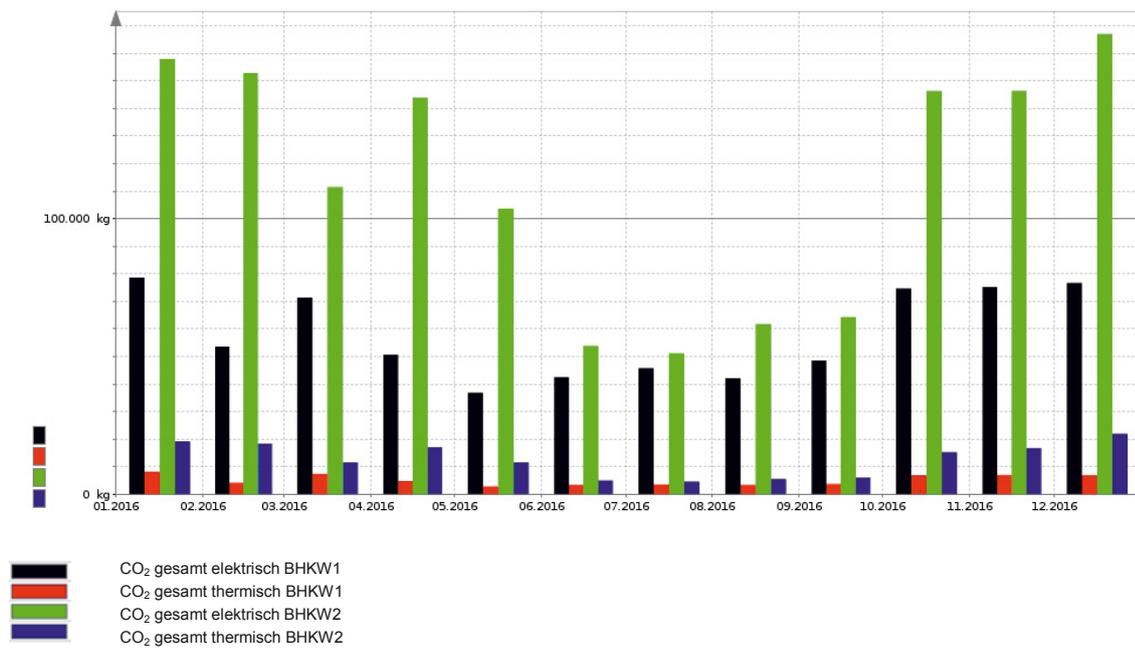


Abbildung 114: Monatlicher CO₂-Ausstoß der beiden BHKW der zweiten Monitoringphase

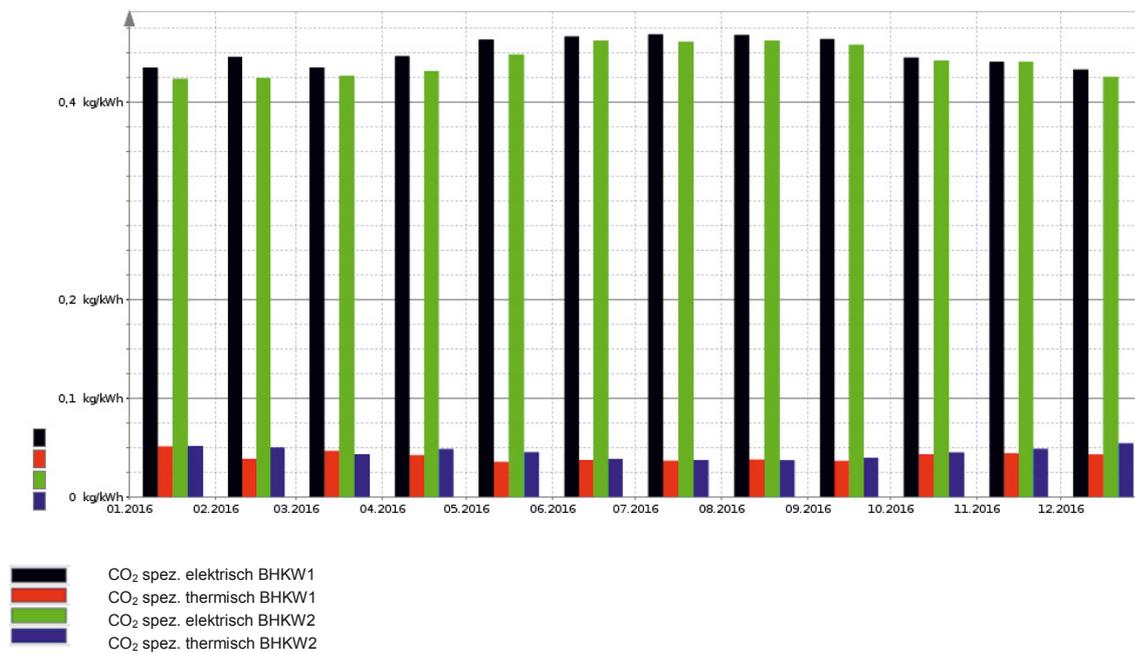


Abbildung 115: Monatliche spezifische CO₂-Emissionen der BHKW-Anlage D in der zweiten Monitoringphase

5.4.4 Evaluation

5.4.4.1 Evaluation des optimierten Sommerbetriebs

Die oben beschriebene Umstellung der Regelung zur Optimierung des Sommerbetriebs (vgl. Kapitel 5.4.2.1) erfolgte in der Nacht vom 01.09.2016 zum 02.09.2016. Abbildung 116 und Abbildung 117 zeigen den Betrieb der beiden BHKW direkt vor und nach der Umstellung der Regelung. Die Betriebsoptimierung ist deutlich erkennbar. Insbesondere das Takten des BHKW2 konnte stark reduziert werden. In Tabelle 46 sind die Betriebsdaten der beiden BHKW vor und nach der Umstellung der Regelung aufgelistet. Durch die Umstellung der Regelung konnten im Sommerbetrieb die durchschnittlichen Betriebsstunden pro Start für BHKW1 von ca. 3 Stunden auf über 7 Stunden und für BHKW2 von ca. 1 Stunde auf über 3 Stunden erfolgreich erhöht werden.

Auch bei der Pufferspeicherausnutzung konnte eine deutliche Verbesserung erzielt werden. Abbildung 118 zeigt den Pufferspeicherfüllstand während der beiden Monitoringphasen als Rasterdiagramm. Betrachtet man das Diagramm ab der Umstellung im September 2016, so kann man einen deutlich höheren Kontrast zwischen beladenen und nicht-beladenen Phasen erkennen, was für eine bessere zyklische Nutzung des Puffers spricht. Der Pufferspeicher wird zudem häufiger voll beladen (dunkelrote Färbung), als dies vorher der Fall war.

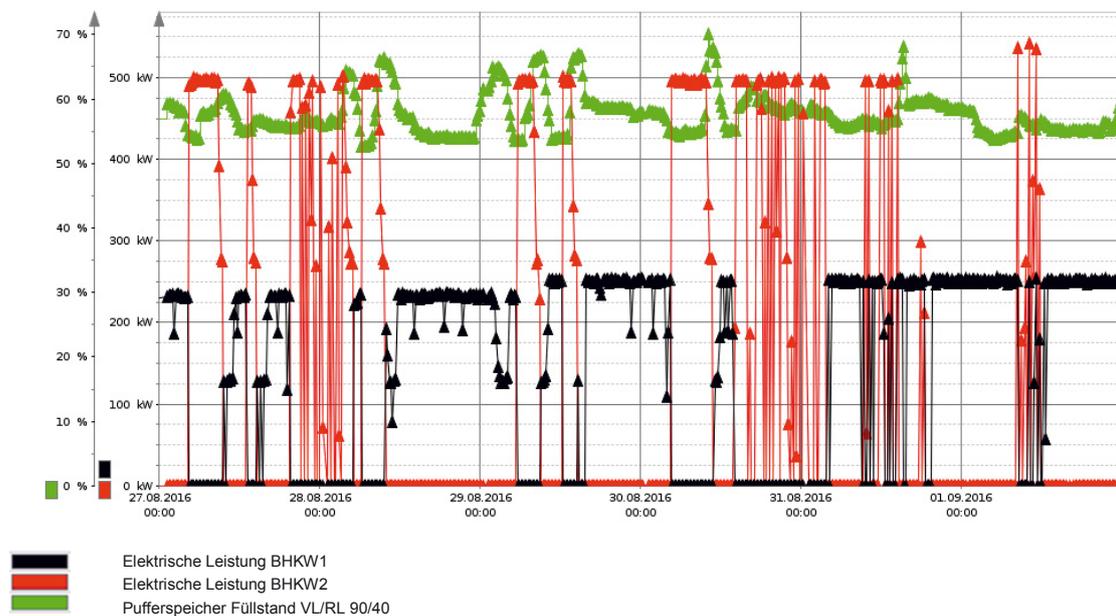


Abbildung 116: Betrieb der beiden BHKW vor der Umstellung der Regelung

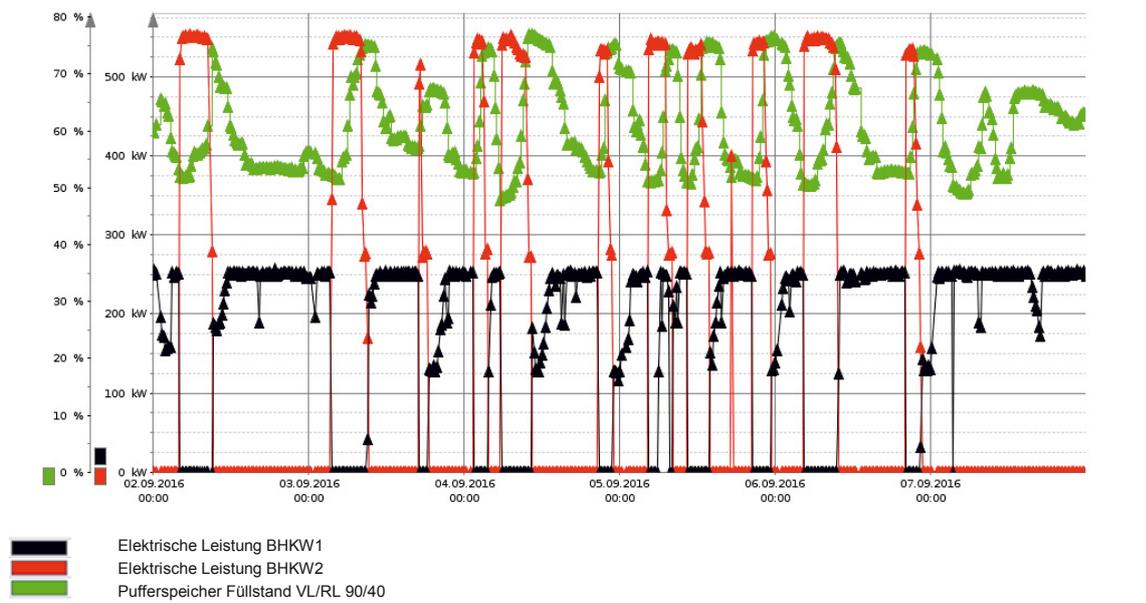


Abbildung 117: Betrieb der beiden BHKW nach der Umstellung der Regelung

Tabelle 46: Betriebsdaten der beiden BHKW vor und nach der Umstellung der Regelung

	BHKW1			BHKW2			
	Durchschnittliche Außen-temperatur ⁷	Betrachtungs-zeitraum	Starts	Betriebs-stunden pro Start	Betriebs-stunden	Starts	Betriebs-stunden pro Start
Vor Umstel-lung	20,0 °C	90,7 h	29	3,1 h	42,5 h	40	1,1 h
Nach Um-stellung	17,4 °C	104 h	14	7,4 h	41 h	12	3,4 h

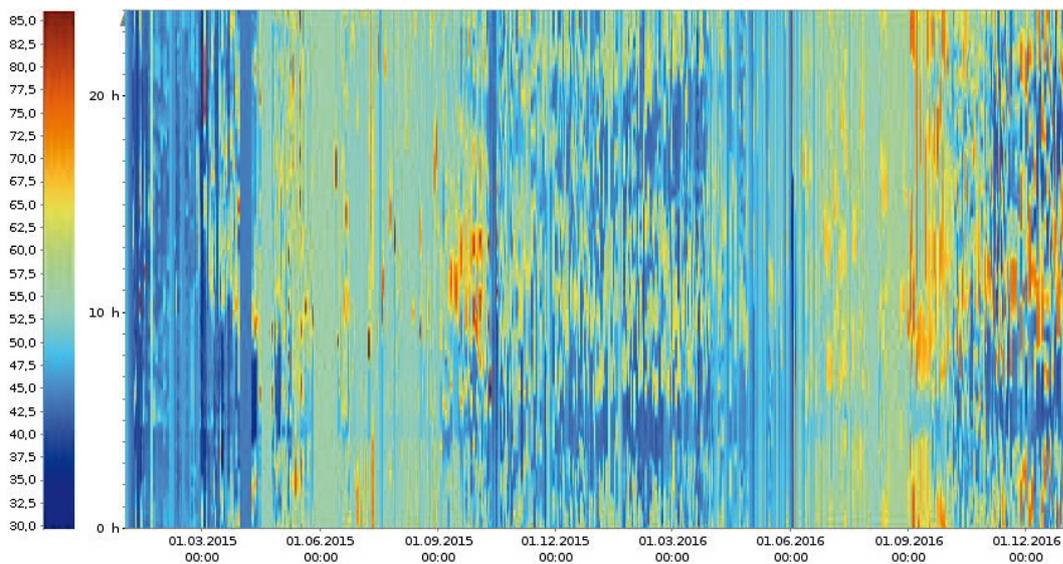


Abbildung 118: Rasterdiagramm des Pufferspeicherfüllstands über beide Monitoringphasen

⁷ Quelle: Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes für den Anlagenstandort

5.4.4.2 Potentialanalyse stromgeführter Betrieb

Bei BHKW-Anlage D besteht aufgrund des vorhandenen Notkühlers die Möglichkeit, einen stromgeführten Betrieb umzusetzen. Im Rahmen des Projekts konnte diese Betriebsweise jedoch aufgrund von praktischen Restriktionen nicht im Realbetrieb untersucht werden. Daher wurde auf Basis eines Simulationsmodells eine rechnerische Potentialanalyse des stromgeführten Betriebs in der Variante „Netzbezugsregelung“ durchgeführt (siehe Kapitel 2.6.3).

Das Simulationsmodell für die Anlage wurde in der Softwareumgebung Matlab/Simulink aufgebaut. Die wesentlichen Bestandteile des Modells sind die beiden BHKW-Module, der Pufferspeicher mit 20 m³ Speichervolumen, ein erdgasbetriebener Spitzenlastkessel und der Notkühler. Als Basis für die Simulation dient der tatsächliche Strombedarf des Klinikums, der als elektrischer Lastgang vorgegeben wird. Je nach Leistungsanforderung entscheidet der im Modell implementierte Regelalgorithmus, welches der beiden BHKW-Module vorrangig betrieben wird bzw. wann beide Module gemeinsam angefordert werden.

Die erzeugte Wärme der beiden BHKW-Module wird im Simulationsmodell vorrangig zur Deckung des Wärmebedarfs im Klinikum genutzt. Als Basis für die Berechnung dient hier der tatsächliche Wärmebedarf, der als Lastgang vorgegeben wird. Wärmeüberschüsse werden über den Notkühler abgeführt. In der Simulation wird im Fall eines Leistungsüberschusses vorrangig die Wärme von BHKW2 über den Notkühler abgeführt. Dies hat jedoch nur rechnerische bzw. bilanzielle Gründe und spielt in der Praxis keine Rolle, da die Wärme beider Module stets in ein gemeinsames Heizungsnetz eingespeist wird und eine modulscharfe Aufteilung der abgeführten Wärme auf die unterschiedlichen Wärmeerzeuger physikalisch nicht möglich ist. Entscheidend ist im Rahmen der Potentialanalyse vielmehr die Energiebilanz der Gesamtanlage.

In der Praxis ist ein stromgeführter Betrieb der BHKW-Anlage D insbesondere im Sommer interessant. In den Wintermonaten werden die beiden BHKW-Module aufgrund des hohen Wärmebedarfs ohnehin nahezu durchgängig betrieben, sodass eine Umstellung auf explizit stromgeführten Betrieb keine Vorteile bringt. Im Rahmen der Potentialanalyse wurde für die Simulation ein Betrachtungszeitraum vom 01.01. bis 31.12. festgelegt, wobei lediglich für den Zeitraum vom 15.06 bis zum 31.07 auf stromgeführten Betrieb umgestellt wurde und für den restlichen Zeitraum ein wärmegeführter Betrieb angenommen wurde. Für den wärmegeführten Betrieb wurden aus Vergleichbarkeitsgründen die tatsächlichen Betriebsdaten aus der zweiten Monitoringphase (01.01.2016 bis 31.12.2016) angesetzt.

Die Simulationsergebnisse (vgl. Tabelle 47) zeigen, dass die beiden BHKW-Module durch die kurzzeitige Umstellung auf stromgeführten Sommerbetrieb deutlich längere Laufzeiten erreichen können. Im Betrachtungszeitraum vom 01.01 bis 31.12 können die Betriebsstunden von BHKW1 von insgesamt 6679 h auf 7013 h bzw. von BHKW2 von 6285 h auf 7042 h erhöht werden. In der Simulation können die beiden BHKW im Zeitraum vom 17.06 bis 31.07 weitestgehend durchgängig bei Nennlast betrieben wer-

den. Dadurch verringert sich im Gesamtbetrachtungszeitraum die Startanzahl des BHKW1 von 651 Starts auf 575 Starts bzw. des BHKW2 von 672 Starts auf 548 Starts.

In Abbildung 119 ist die zusätzliche Stromerzeugung der BHKW-Anlage im wärmegeführten Betrieb im Vergleich zu den Simulationsergebnissen mit stromgeführten Sommerbetrieb dargestellt. Da die Simulation auf den Daten der zweiten Monitoringphase basiert, sind die Werte der Stromerzeugung für die Monate Januar bis Mai und August bis Dezember identisch. In diesen Monaten wurde die BHKW-Anlage in der Simulation unverändert wärmegeführt betrieben. Lediglich in den Monaten Juni und Juli werden aufgrund der stromgeführten Betriebsweise insgesamt 514 MWh_{el} mehr Strom erzeugt.

In der Simulation kann im Zeitraum vom 17.06 bis 31.07 der erzeugte Strom vollständig im Klinikum genutzt werden. Aufgrund der Betriebsart „Netzbezugsregelung“ wird bis auf minimale Regelabweichungen kein überschüssiger Strom ins öffentliche Netz eingespeist. Es werden allerdings ca. 521 MWh_{th} überschüssige Wärme erzeugt, die über den Notkühler abgeführt werden müssen. Über den gesamten Betrachtungszeitraum von einem Jahr werden dennoch ca. 90 % der bereitgestellten Wärme genutzt, sodass der Gesamtwirkungsgrad lediglich um ca. 3,5 Prozentpunkte auf 80,5 % fällt. Damit werden die Kriterien für den KWK-Betrieb im Sinne des AGFW Arbeitsblatts FW308 (80 % Nutzungsgradpotential [FW308]) und des Energiesteuergesetzes eingehalten (> 70 % Nutzungsgrad für die vollständige Steuerentlastung [EnergieStG]).

Die Verringerung des Gesamtnutzungsgrads hat auch Auswirkungen auf die Primärenergieeinsparung der BHKW-Anlage, die um 2,7 Prozentpunkte sinkt. Betrachtet man die CO₂-Emissionen ist zu erkennen, dass der CO₂-Ausstoß der BHKW-Anlage in der Simulation aufgrund der höheren Betriebsstunden der beiden BHKW-Module absolut betrachtet höher liegt. Die spezifischen CO₂-Emissionen, sowohl elektrisch als auch thermisch, sind dagegen nahezu identisch.

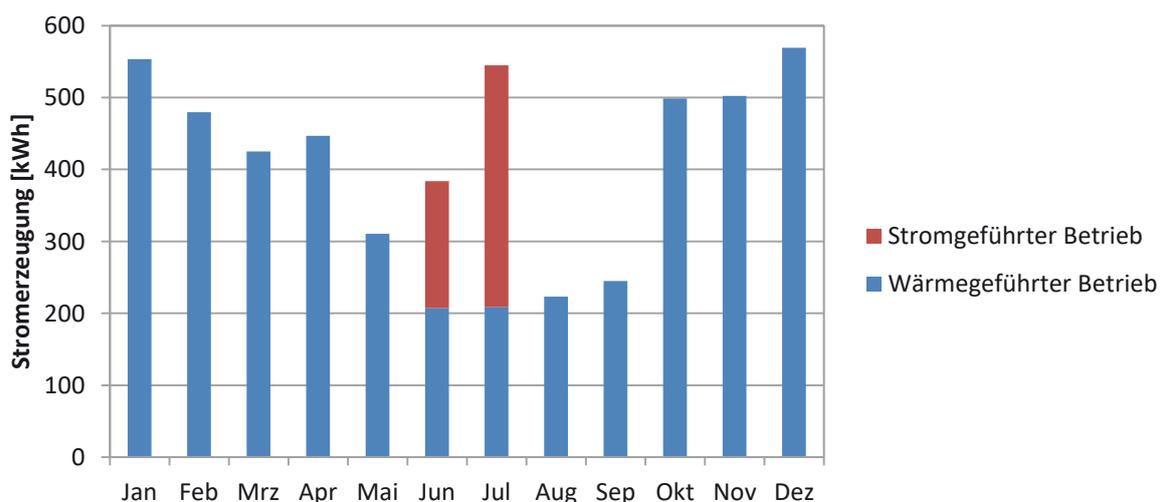


Abbildung 119: Vergleich der tatsächlichen Stromerzeugung der BHKW-Anlage mit der Simulation im Betrachtungszeitraum

Tabelle 47: Vergleich des tatsächlichen Betriebs der BHKW-Anlage mit den Ergebnissen der Simulation

		Zweite Monitoringphase Wärmegeführter Betrieb 01.01. bis 31.12.	Simulationsergebnisse Wärmegeführter Betrieb 01.01. bis 17.06. und 01.08. bis 31.12. Stromgeführter Betrieb 17.06. bis 31.07.
Erzeugte Strommenge	[MWh _{el}]	4.668	5.182
Erzeugte Wärmemenge	[MWh _{th}]	4.736	5.290
Überschüssige Wärmemenge	[MWh _{th}]	0	521
Nutzbare Wärmemenge		4.736	4.769
Brennstoffeinsatz	[MWh]	11.189	12.367
Elektrischer Nutzungsgrad	[%]	41,7	41,9
Thermischer Nutzungsgrad	[%]	42,3	38,6
Gesamtnutzungsgrad	[%]	84,0	80,5
Primärenergieeinsparung	[%]	28,9	26,2
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	[t]	2.101	2.338
CO ₂ -Ausstoß der Wärmeerzeugung	[t]	170	172
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	[g/kWh]	450	451
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung	[g/kWh]	36	36
Betriebsstunden BHKW1	[h]	6.679	7.013
Betriebsstunden BHKW2	[h]	6.285	7.042
Startanzahl BHKW1	[-]	651	575
Startanzahl BHKW2	[-]	672	548

Im Rahmen der Potentialanalyse wurde zusätzlich zur energetischen und ökologischen Betrachtung die Wirtschaftlichkeit der stromgeführten Betriebsweise nach der in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Vorgehensweise untersucht. Als Ausgangsbasis für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dienen die Energieumsätze und Betriebsdaten der zweiten Monitoringphase sowie die Simulationsergebnisse der Potentialanalyse. Der wirtschaftliche Vorteil durch den stromgeführten Betrieb ist in Abbildung 120 in Form einer Sensitivitätsanalyse in Abhängigkeit der Einflussgrößen „Stromgutschrift“ (Ausgangsniveau 14,5 Cent/kWh_{el}) und „Brennstoffpreis“ (Ausgangsniveau 3,5 Cent/kWh_{th}) mit einem Variationsbereich von ± 50 % dargestellt.

Durch die Umstellung der Betriebsweise von wärmegeführt auf stromgeführt über den Zeitraum von sechs Wochen im Sommer, kann im betrachteten Fall ein deutlicher wirtschaftlicher Vorteil erzielt werden, der in erster Linie auf die Mehreinnahmen aus der

Stromgutschrift zurückzuführen ist. Ein weiterer geringer Vorteil ergibt sich dadurch, dass der Spitzenlastkessel in den Sommermonaten praktisch nicht mehr betrieben werden muss, da die BHKW-Module ohnehin genug Wärme zur Verfügung stellen (Einsparung von Brennstoffkosten für den Gaskessel). Den Einsparungen stehen Mehrausgaben für die Brennstoffversorgung und Instandhaltung der BHKW-Module gegenüber.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass der wirtschaftliche Vorteil des stromgeführten Betriebs stark von der Höhe der Stromgutschrift bzw. vom Brennstoffpreis abhängt. Je höher der Wert der erzeugten Stroms, desto höher der wirtschaftliche Vorteil. Je höher dagegen die Kosten für den Brennstoff sind, desto geringer fällt der wirtschaftliche Vorteil aus. Im betrachteten Fall ist das Ergebnis jedoch fast über den gesamten Variationsbereich hinweg positiv.

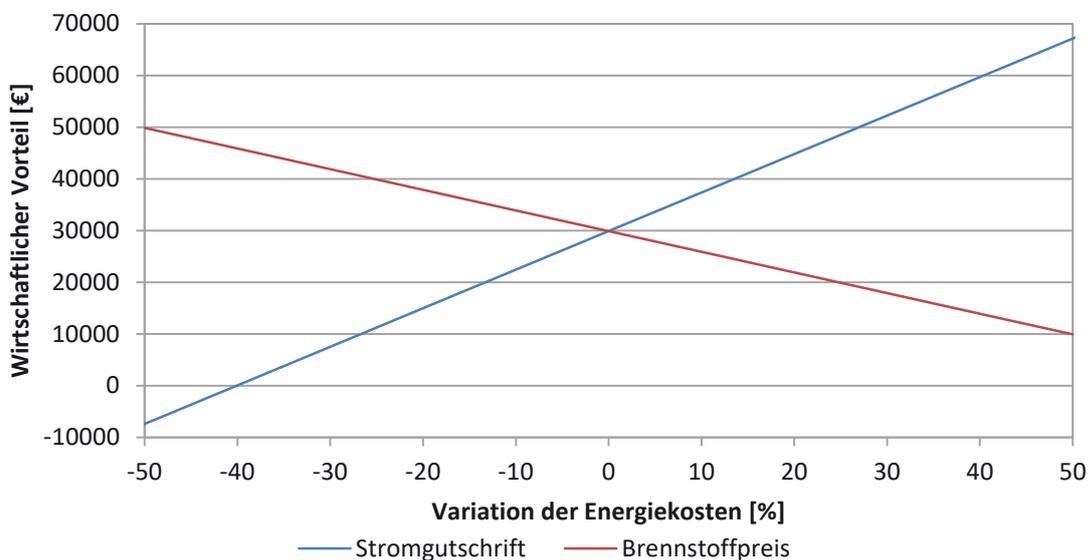


Abbildung 120: Wirtschaftlicher Vorteil des stromgeführten Betriebs im Sommer gegenüber dem wärmegeführten Betrieb

5.4.4.3 Einfluss der Witterung

Um den Einfluss der Witterung zu analysieren, wurden die monatlichen Gradtagszahlen des Instituts für Wohnen und Umwelt [IWU17] für eine Witterungsbereinigung herangezogen. In Abbildung 121 sind sowohl die monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage D als auch die monatlichen Gradtagszahlen für die Jahre 2015 und 2016 dargestellt. Für die Witterungsbereinigung wurde der witterungsunabhängige Grundlastsockel abgezogen, der sich im Fall des Klinikums in erster Linie aus dem Wärmebedarf für die Brauchwassererwärmung zusammensetzt und u. a. von der Bettenbelegung abhängig ist.

Die Gradtagszahlen waren im November und Dezember 2016 deutlich höher als im Jahr 2015. Dies bedeutet, dass aufgrund von niedrigeren Außentemperaturen im November und Dezember 2016 mehr geheizt werden musste als im Vorjahr. Dies bestätigen auch die Werte der Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage D. Die zusätzlich benötigte Wärme wurde in diesem Fall über die Gaskessel bereitgestellt, da die BHKW-Module in diesen Zeiträumen bereits durchgängig mit Nennleistung betrieben wurden. Die witterungsbedingten Unterschiede des Wärmebedarfs in den beiden Monitoringphasen haben somit kaum Auswirkungen auf den BHKW-Betrieb.

Die Ergebnisse der Witterungsreinigung nach Abzug des Grundlastsockels sind zusammengefasst in Tabelle 48 aufgelistet. Vergleicht man die auf das langjährige Mittel normierte Raumwärmebereitstellung, so beträgt der Unterschied zwischen den beiden Monitoringphasen ca. 271 MWh_{th} bzw. 5,7 %. Die beiden Phasen können daher als gut vergleichbar angesehen werden.

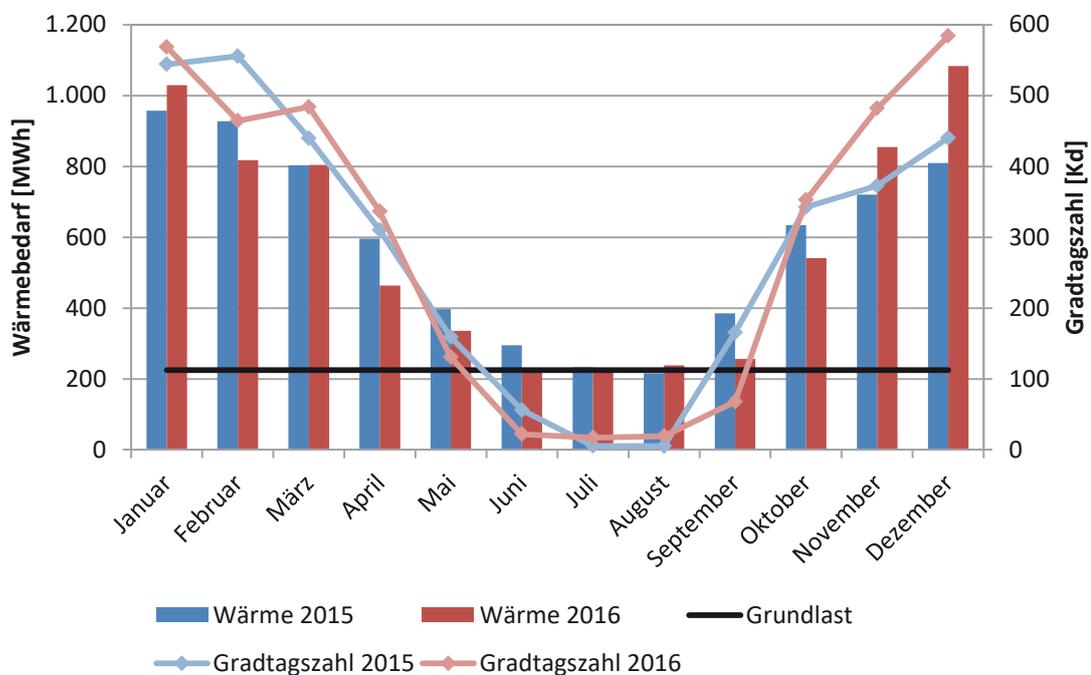


Abbildung 121: Monatliche Wärmebereitstellung der BHKW-Anlage D und die monatliche Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der Jahre 2015 und 2016

Tabelle 48: Jährliche Wärmebereitstellung und Gradtagszahlen (Daten von [IWU17]) der BHKW-Anlage D der Jahre 2015 und 2016

	Gradtagszahl	Gradtagzahl des langjährigen Mittels	Korrekturfaktor (gerundet)	Raumwärmebereitstellung ohne Grundlastanteil	Raumwärmebereitstellung bezogen auf langjähriges Mittel
Jahr 2015	3396 Kd	3786 Kd	0,90	4.279 MWh _{th}	4.754 MWh _{th}
Jahr 2016	3528 Kd	3786 Kd	0,93	4.169 MWh _{th}	4.483 MWh _{th}

5.4.5 Zusammenfassung der Monitoringphasen

Im Rahmen des Monitorings der BHKW-Anlage D wurden zwei Phasen betrachtet:

- Erste Monitoringphase 01.01.2015 bis 31.12.2015
- Zweite Monitoringphase 01.01.2016 bis 31.12.2016

Die Ergebnisse der beiden Monitoringphasen sind in Tabelle 49 zusammenfassend dargestellt. Betrachtet man die Effizienz der beiden BHKW kann man erkennen, dass der elektrische Nutzungsgrad des BHKW1 sich in der zweiten Monitoringphase um 0,5 Prozentpunkte verbesserte. Bei BHKW2 verschlechterte sich der elektrische Nutzungsgrad in der zweiten Monitoringphase dagegen um ca. einen Prozentpunkt. Der thermische Nutzungsgrad beider BHKW-Module verbesserte sich um 0,8 Prozentpunkte (BHKW1) bzw. 1,0 Prozentpunkte (BHKW2).

Im Monitoring zeigte sich insbesondere der Betrieb in der Übergangszeit und in den Sommermonaten aufgrund der zahlreichen Start-Stopp-Vorgänge und der geringen Betriebsstunden pro Start optimierungsbedürftig. Wie in Kapitel 5.4.4.1 beschrieben, konnte durch eine Überarbeitung der Regelung und eine Anpassung der Regelparameter für den Sommerbetrieb zum Zeitpunkt der Umstellung eine deutliche Verbesserung der Betriebsstunden pro Start erzielt werden. Da die Umstellung jedoch erst im September 2016 und damit gegen Ende der zweiten Monitoringphase durchgeführt werden konnte, konnte eine abschließende Bewertung der Optimierungen im Rahmen des Projekts nicht mehr durchgeführt werden. Es zeigen sich in der zweiten Monitoringphase jedoch mit Werten von durchschnittlich 10,3 zu 5,1 (BHKW1) und 9,4 zu 6,5 (BHKW2) Betriebsstunden pro Start auch bereits im Vorfeld deutliche Verbesserungen gegenüber der ersten Monitoringphase.

Betrachtet man die Primärenergieeinsparung der beiden BHKW so erkennt man, dass in der zweiten Monitoringphase im Vergleich zur ersten Phase eine etwas höhere Einsparung erzielt werden konnte. Dies erklärt sich in erster Linie durch die in Summe etwas höheren Nutzungsgrade in diesem Zeitraum, die bei der verwendeten Berechnungsmethode zu einem besseren Abschneiden gegenüber dem Referenzsystem führen. Analog hierzu fielen auch die spezifischen CO₂-Emissionen der beiden BHKW-Module in der zweiten Monitoringphase etwas geringer aus.

Eine weitere wirtschaftliche Optimierung des Anlagenbetriebs ließe sich durch eine zeitweise Umstellung auf stromgeführten Betrieb in den Sommermonaten erzielen (vgl. Potentialanalyse Kapitel 5.4.4.2). Die Ergebnisse der Potentialanalyse zeigen in der untersuchten Konstellation einen wirtschaftlichen Vorteil im fünfstelligen Eurobereich, Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass im Jahresmittel die Nutzungsgradanforderungen für einen qualifizierten KWK-Betrieb nach AGFW FW308 bzw. EnergieStG weiterhin erfüllt werden.

Tabelle 49: Zusammenfassung der Ergebnisse des Monitorings für BHKW-Anlage D

	Erste Monitoringphase		Zweite Monitoringphase	
	BHKW1	BHKW2	BHKW1	BHKW2
Erzeugte Wärmemenge	1.277,0 MWh _{th}	2.998,5 MWh _{th}	1.479,2 MWh _{th}	3.256,4 MWh _{th}
Erzeugte Strommenge	1.354,1 MWh _{el}	3.008,7 MWh _{el}	1.555,6 MWh _{el}	3.112,8 MWh _{el}
Brennstoffeinsatz (H _i)	3.292,2 MWh	7.020,5 MWh	3.737,3 MWh	7.452,1 MWh
Thermischer Nutzungsgrad	38,8 %	42,7 %	39,6 %	43,7 %
Elektrischer Nutzungsgrad	41,1 %	42,9 %	41,6 %	41,8 %
Betriebsstunden	5869 h	6330 h	6.697 h	6.285 h
Vollbenutzungsstunden	5416 h	5470 h	6.222 h	5.659 h
Starts	1142	971	651	672
Betriebsstunden pro Start	5,1 h	6,5 h	10,3 h	9,4 h
Primärenergieeinsparung	24,2 %	28,5 %	26,3 %	28,9 %
CO ₂ -Ausstoß der Stromerzeugung	625,6 t CO ₂	1.319,3 t CO ₂	669,5 t CO ₂	1.359,9 t CO ₂
CO ₂ -Ausstoß der Wärmeerzeugung	54,1 t CO ₂	130,1 t CO ₂	62,2 t CO ₂	152,8 t CO ₂
Spez. CO ₂ -Emissionen der Stromerzeugung	489 g/kWh _{el}	519 g/kWh _{el}	451 g/kWh _{el}	442 g/kWh _{el}
Spez. CO ₂ -Emissionen der Wärmeerzeugung	60 g/kWh _{th}	50 g/kWh _{th}	41 g/kWh _{th}	45 g/kWh _{th}

5.5 Potentialanalyse Regelenergie

Im Rahmen des Projekts wurde für alle untersuchten BHKW-Anlagen eine Potentialanalyse zur Abschätzung der möglichen Erlöse bei Teilnahme an der Regelenergievermarktung durchgeführt. Dabei wurde sowohl eine Vermarktung von Minutenregelleistung (MRL) als auch Vermarktung von Sekundärregelleistung (SRL) untersucht. Beide Regelleistungsprodukte lassen sich mit BHKW-Modulen nach aktuellem Stand der Technik in der Regel problemlos darstellen. Die Vermarktung von Primärregelleistung (PRL) wurde im Rahmen der Potentialanalyse nicht betrachtet, da sie technisch höhere Anforderungen⁸ stellt und in der Praxis für BHKW-Anlagen daher noch eine untergeordnete Rolle spielt. Die Erlöse bei der Teilnahme an der Regelenergievermarktung sind in erster Linie von vier Faktoren abhängig: a) der elektrischen Leistung der KWK-Anlage, b) den erreichten Betriebsstunden, c) dem gebotenen Leistungspreis und d) dem gebotenen Arbeitspreis.

⁸ Insbesondere muss PRL symmetrisch positiv und negativ angeboten werden, was sich bei BHKW-Anlagen nur schlecht umsetzen lässt. In der Praxis ist dies bisher nur mittels eines durchgängigen Teillastbetriebs möglich, aus dem die KWK-Anlage dann innerhalb der geforderten Reaktionszeiten (30 s) auf die angebotene positive bzw. negative Leistungsstufe hoch- bzw. abgeregelt werden kann.

Die vermarktbare elektrische Leistung ist durch die technischen Spezifikationen des jeweiligen BHKW-Moduls begrenzt. So beschränken viele BHKW-Hersteller z. B. den zulässigen Regelbereich ihrer Module auf 100 % bis 50 % der Nennleistung, neuere Anlagen mit spezieller Spezifikation für den Regelenergiebetrieb erlauben einen Regelbereich bis 35 % der Nennleistung. Die jährlichen Betriebsstunden bzw. die jährliche Verfügbarkeit der jeweiligen BHKW-Anlage sind ebenfalls entscheidend für die erzielbaren Erlöse. Eine BHKW-Anlage, die ganzjährig mit hoher Auslastung betrieben wird, kann auch im Sommer an der Regelenergievermarktung teilnehmen, während dies bei einer BHKW-Anlage, die im Sommer nur sporadisch betrieben wird, nicht ohne Weiteres möglich ist.

Die Erlöse der Regelenergievermarktung teilen sich in einen Leistungs- und einen Arbeitspreis auf. Der Leistungspreis stellt die Vergütung für das Bereithalten der angebotenen Leistung dar und ist unabhängig von der tatsächlichen Anforderung. Der Arbeitspreis wird dagegen erst dann bezahlt, wenn die jeweilige Anlage im Rahmen eines Regelenergieabrufs tatsächlich angefordert wird. Dabei richtet sich der Arbeitspreis nach der merit order, d. h. es wird vom Übertragungsnetzbetreiber zunächst die Anlage mit dem günstigsten angebotenen Arbeitspreis angefordert. Im Rahmen der Potentialanalyse wurden lediglich die Erlöse aus dem Leistungspreis betrachtet, da diese auf Basis öffentlich zugänglicher Daten ermittelt werden können. Eine belastbare Prognose des Arbeitspreises und der tatsächlichen Regelenergieabrufe ist dagegen kaum möglich. Sowohl die Leistungs- als auch die Arbeitspreise sind stark von der aktuellen Marktsituation abhängig und können daher stark variieren.

Die Potentialanalyse wurde auf Basis der in den Jahren 2015 und 2016 gültigen regulatorischen Rahmenbedingungen durchgeführt und beschränkt sich auf die negative Regelleistung, die mit BHKW-Modulen technisch vergleichsweise einfach durch eine Leistungsreduzierung bzw. Abschaltung aus dem laufenden Betrieb heraus umgesetzt werden kann. Für die Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass jeweils die volle installierte Leistung angeboten werden kann, das BHKW bei einer Anforderung also abgeschaltet wird. Die mittleren Leistungspreise pro Megawatt angebotener Leistung und Jahr wurden auf Basis von Daten der „Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung“ berechnet [IVR2017].

Abbildung 122 stellt die potentiellen jährlichen Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der MRL-Vermarktung dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Erlöse in erster Linie von der installierten elektrischen Leistung des BHKW-Moduls abhängen. Beispielsweise könnte BHKW-Anlage C aufgrund der hohen elektrischen Leistung und der nahezu ganzjährigen Verfügbarkeit absolut betrachtet deutlich höhere Erlöse erzielen als die anderen BHKW-Anlagen.

Ein BHKW in der Größenordnung der BHKW-Anlage A würde dagegen in der Praxis nicht am Regelenergiemarkt teilnehmen, da der wirtschaftliche Mehrertrag den technischen und administrativen Aufwand für die Vermarktung nicht rechtfertigt. Insgesamt betrachtet waren die potentiellen Erlöse im Jahr 2015 noch deutlich höher als im Jahr

2016. Dies liegt insbesondere daran, dass die mittleren Leistungspreise im Jahr 2016 aufgrund der steigenden Anzahl von Anbietern auf dem Regelenergiemarkt deutlich gefallen sind.

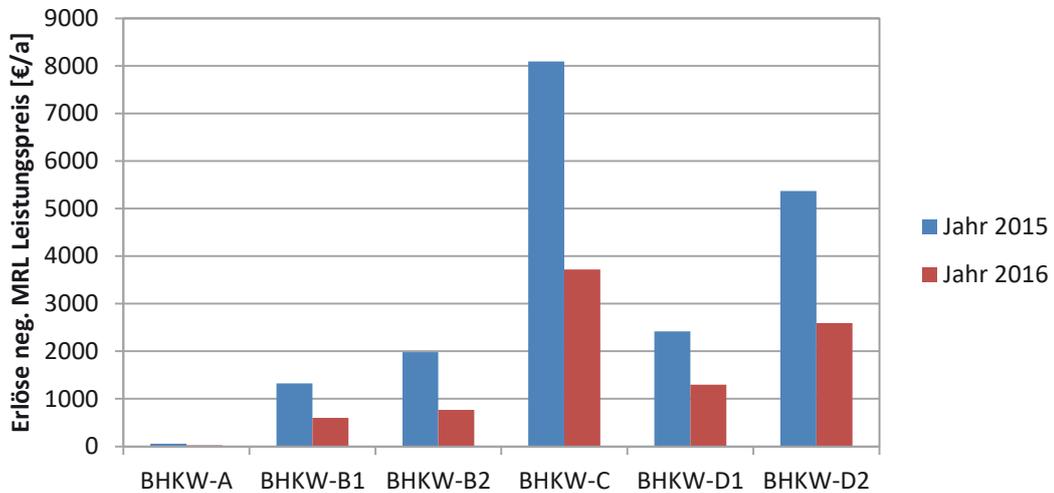


Abbildung 122: Potentielle Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der MRL-Vermarktung

Abbildung 123 stellt die potentiellen jährlichen Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der SRL-Vermarktung dar. Hier ist ein ähnliches Bild zu erkennen wie bei der MRL-Vermarktung. Insbesondere die BHKW-Anlagen mit hoher elektrischer Leistung können absolut betrachtet hohe Erlöse erzielen. Im Vergleich zur MRL-Vermarktung können bei der SRL-Vermarktung insgesamt höhere Erlöse erzielt werden, allerdings ist auch hier ein deutlicher Preisabfall von 2015 auf 2016 zu beobachten.

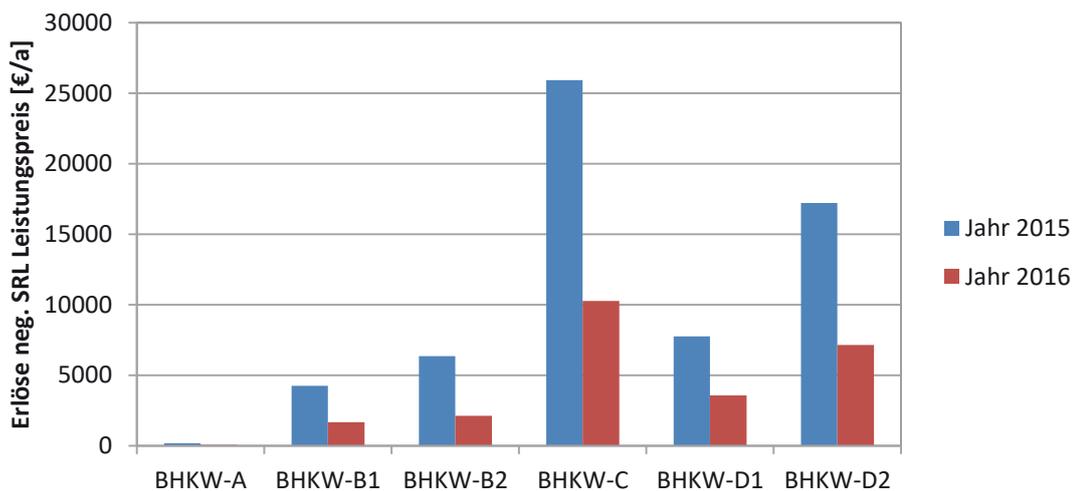


Abbildung 123: Potentielle Erlöse der untersuchten BHKW bei Teilnahme an der SRL-Vermarktung

6 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

6.1 Energiemonitoring

Das Energiemonitoringsystem hat sich im Rahmen des Projekts als hilfreiches Instrument für die Analyse des Betriebs- und Regelverhaltens von BHKW-Anlagen erwiesen. Insbesondere die zeitlich hoch aufgelöste Datenerfassung und die für alle Anlagen einheitlichen, plattformunabhängigen Auswerteroutinen haben sich bewährt.

Vom Energiemonitoring abzugrenzen ist die BHKW-Betriebsdatenerfassung über die BHKW-Modulsteuerung sowie die Aufschaltung auf das jeweilige Serviceportal des BHKW-Herstellers, über das in der Regel ein Fernzugriff auf die Anlagendaten möglich ist. Diese Funktionalität wird, je nach Hersteller in unterschiedlichem Umfang, bereits ab Werk angeboten und ist in jedem Fall empfehlenswert, in Verbindung mit Vollwartungsverträgen meist sogar unumgänglich. Über diese Schnittstellen sind jedoch in der Regel nur Daten zum einzelnen BHKW-Modul und gegebenenfalls wenige weitere Informationen zum Heizungssystem (z. B. Vorlauf-/Rücklauftemperaturen) sowie rudimentäre Auswertefunktionen verfügbar, was für ein umfassendes Monitoring allenfalls bei kleinen einfach aufgebauten BHKW-Anlagen (Mini-BHKW für Ein- und Mehrfamilienhäuser) ausreichend ist.

Ausgehend von den Erfahrungen im Projekt wurde eine Muster-Datenpunktliste für ein sinnvolles Energiemonitoring einer BHKW-Anlage erarbeitet (vgl. Anhang 9.3). Die Liste der Datenpunkte bezieht sich auf eine BHKW-Anlage in der Minimalkonfiguration mit einem gasbetriebenen BHKW, einem Gaskessel zur Abdeckung der Spitzenlast und einem Pufferspeicher. Bei Mehrmodulanlagen sind die einzelnen Datenpunkte für die BHKW-Module entsprechend der Anzahl der Module zu multiplizieren. Mehrere Spitzenlastkessel können dagegen meist zusammengefasst als ein Wärmeerzeuger betrachtet werden, sofern das Regelungsverhalten der einzelnen Kessel nicht im Detail von Interesse ist. Sind weitere Systemkomponenten vorhanden, wie z. B. gesonderte hydraulische Weichen, Abhitzedampfkessel, externe Abgaswärmetauscher usw. können weitere Datenpunkte erforderlich werden. Ebenso können beim Einsatz von weiteren Brennstoffen (flüssige oder feste Energieträger) weitere Datenpunkte zur genauen Erfassung des Brennstoffeinsatzes notwendig sein.

In der Muster-Datenpunktliste sind zusätzlich Vorschläge für sinnvolle Abtast- und Ablageraten für die verschiedenen Messgrößen aufgelistet. Bei manchen Messgrößen ist eine hohe zeitliche Auflösung erforderlich, um das Regelverhalten im Detail beurteilen zu können (z. B. elektrische Ist-Leistung des BHKW), während bei anderen Größen geringere zeitliche Auflösungen ausreichend sind (z. B. Außentemperaturen, Energiezählerdaten,...). Im Projekt hat sich für das Monitoring grundsätzlich ein Zeitschritt von minimal 1 Minute⁹ als ausreichend erwiesen, für die meisten Messgrößen sind auch

⁹ Für die interne Regelung und Überwachung der BHKW-Module (Aggregatesteuerung) sind dagegen wesentlich kürzere Zeitintervalle im Sekundenbereich bzw. im Millisekundenbereich (Motorsteuerung/Netzregler) notwendig

15min Intervalle ausreichend. Eine noch höhere Zeitauflösung (z. B. Sekundenwerte) führt zu wesentlichen höheren Datenvolumina und einem höheren Datenverarbeitungsaufwand, ohne einen wesentlichen Mehrwert zu bieten.

Grundsätzlich erfolgt die Datenerfassung im Energiemonitoringsystem stets auf Basis der an der jeweiligen Anlage vorhandenen Messwerte, die meist auf einem Leittechniksystem auflaufen und mittels einer geeigneten Schnittstelle in das Monitoringsystem übertragen werden. Sind einzelne Messgrößen aus der Datenpunktliste nicht verfügbar, müssen entsprechende Messeinrichtungen nachgerüstet werden oder es müssen geeignete alternative Messgrößen identifiziert werden, aus denen die benötigten Kennwerte berechnet werden können. Als geeignetes und universell anwendbares Schnittstellenformat, das in den meisten heute üblichen MSR- und Leittechniksystemen als Ausgabemöglichkeit implementiert ist, hat sich das CSV-Dateiformat erwiesen. Sinnvollerweise erfolgt der Datenexport und -import automatisiert, z. B. per täglichem E-Mailversand. Ein manueller Import ist weniger zu empfehlen, da dies aufwändig und zeitintensiv ist und zu Fehlern in den aufgenommen Daten führen kann.

Problematisch sind in jedem Fall Datenausfälle oder fehlerhaft erfasste Daten, insbesondere wenn automatisierte Auswerteroutinen und Berechnungsformeln verwendet werden. Die Datenplausibilisierung und Fehlerbehandlung ist daher von entscheidender Bedeutung für konsistente Ergebnisse. Im Rahmen des Projekts wurde die Korrektur fehlerhafter Daten oder nicht vollständiger Daten manuell vorgenommen, dies ist jedoch nur bei vergleichsweise kleinen Datenmengen praktikabel.

Von Vorteil ist grundsätzlich eine möglichst kontinuierliche Datenerfassung in konstanten Zeitschritten. Datenausfälle und nicht-konstante Zeitschritte erwiesen sich im Projekt als problematisch für die Implementierung des Energiemonitorings, da in diesem Fall viele automatisierte Routinen nicht ohne Weiteres anwendbar sind. Die betrifft insbesondere Datenerfassungssysteme, die nicht mit festen Erfassungsintervallen arbeiten, sondern Datenwerte nur dann aufnehmen, wenn sich der Zustand des Datenpunkts ändert. Solche Daten erfordern eine aufwändigere Behandlung im Energiemonitoringsystem, da sie zunächst auf eine einheitliche und mit den anderen Messgrößen kompatible Zeitbasis zurückgeführt werden müssen.

Als ein wesentlicher Problempunkt stellte sich im Projektverlauf heraus, dass die Änderung von Regelparametern und Sollwerten seitens der Betreiber bzw. der Bediener und Einrichter von MSR-Systemen oftmals nicht konsequent dokumentiert wird. In vielen Fällen ist daher nicht nachvollziehbar, wann welche Änderungen an der Regelung vorgenommen wurden und ob die Parameter noch dem Stand bei der ursprünglichen Einregulierung der Anlage entsprechen. Hinzu kommt, dass im Zuge von Wartungsarbeiten einzelne Regelparameter, z. B. für die Brennerregelung von Heizkesseln, oftmals auf werksseitige Einstellungen zurückgesetzt werden. Dies erschwert die Identifikation von regelungstechnischen Problemen. Hier empfiehlt sich die Einrichtung und konsequente Nutzung eines Logbuchs, in dem Änderungen an der Parametrierung von Regelungssystemen – am besten automatisiert – dokumentiert werden.

Ausgehend von den Projektergebnissen empfiehlt sich ein Energiemonitoring auch für kleinere BHKW-Anlagen (siehe Ergebnisse für BHKW-Anlage A in Kapitel 5.1), wobei hier der Aufwand ins Verhältnis zum Nutzen gesetzt werden muss. Je größer und komplexer BHKW-Anlagen aufgebaut sind und je größer die Freiheitsgrade für den BHKW-Betrieb sind (z. B. bei Mehrmodulanlagen, mehrere Pufferspeicher, modulierende Betriebsweise, strommarktorientierte Fahrweisen, usw.) desto wichtiger ist dagegen ein umfassendes Energiemonitoring, um das tatsächliche Betriebs- und Regelverhalten des Gesamtsystems zu überwachen und Abweichungen von den Soll-Bedingungen und Vorgaben korrigieren zu können.

In Bezug auf die im Projekt verwendete Energiemonitoringsoftware erwies sich v. a. die Darstellungsmöglichkeit von großen Datenmengen beispielsweise als Jahresdauerlinie oder Rasterdiagramm als besonders nützlich, um schnell Muster im Betriebsverhalten der betrachteten BHKW-Anlagen zu erkennen. Auch komplexere Berechnungen, wie die Bildung von Integralwerten erwiesen sich als einfach und schnell umsetzbar. Dagegen stellten sich eher einfache Berechnungen teilweise deutlich aufwändiger dar als mit handelsüblichen Tabellenkalkulationsprogrammen. Insgesamt gestaltete sich die Ersteinrichtung dadurch vergleichsweise aufwändig und zeitintensiv und ist nur von geschultem Personal leistbar. Der Aufbau einer eigenen individuellen Energiemonitoringlösung empfiehlt sich basierend auf den Erfahrungen im Projekt daher allenfalls für sehr große, komplexe Anlagen oder wenn unterschiedliche Anlagen in einem Pool mit einem einheitlichen Monitoringsystem überwacht werden sollen. Für BHKW-Einzelanlagen üblicher Größenordnung ist es dagegen sinnvoller, auf spezialisierte Dienstleister für Softwareeinrichtung und -service zurückzugreifen, die nach Möglichkeit standardisierte Datenerfassungs- und Auswertemodule bereits fertig implementiert vorliegen haben und diese mit geringem Aufwand auf die jeweilige BHKW-Anlage anpassen können. Ist das Monitoringsystem einmal implementiert, bietet es umfangreiche Kontrollmöglichkeiten für den BHKW-Betrieb und kann über die im Projekt implementierten Auswertungen hinaus auf viele zusätzliche Bereiche erweitert werden, wie z. B. die betriebswirtschaftliche Überwachung, die automatische Generierung von Berichten für betriebliche Managementsysteme (Energie- und Umweltmanagement,...) oder die automatische Generierung von meldepflichtigen Datenzusammenstellungen, z. B. für die Meldepflichten nach KWKG oder der Energiesteuer-Transparenzverordnung.

6.2 Betriebsstrategie

6.2.1 Wärmegeführter Betrieb

Der wärmegeführte Betrieb wie in Kapitel 2.3 beschrieben ist die in der Praxis am häufigsten angewendete Betriebsweise für Blockheizkraftwerke. Alle im Rahmen des Projekts untersuchten BHKW-Anlagen wurden ausschließlich wärmegeführt betrieben. Grundsätzlich unterscheiden lassen sich dabei taktende Betriebsstrategien (BHKW-Anlage A und C) und modulierende Betriebsstrategien (BHKW-Anlage B und D). Alle

betrachteten BHKW-Anlagen sind auf die Deckung der Wärmegrundlast mit einem oder mehreren BHKW-Modulen im Verbund mit einem oder mehreren Spitzenlastkesseln ausgelegt und verfügen über Pufferspeicher.

Im Winter konnten alle betrachteten BHKW-Anlagen fast durchgängig bei Nennlast betrieben werden, im Falle von Bedarfsspitzen wurden zusätzlich die Spitzenlastkessel angefordert. Wie aus dem Überblick in Tabelle 50 ersichtlich, sind die BHKW-Anlagen bedarfsgerecht richtig dimensioniert und erreichen – inklusive etwaiger Ausfälle und Störungen – zwischen 4.500 und 6.200 Vollbenutzungsstunden pro Jahr. Potential für Optimierungen besteht insbesondere in der Übergangszeit und im Sommer, wenn die BHKW-Anlagen aufgrund der geringeren Wärmeabnahme nicht mehr durchgängig betrieben werden und entweder takten oder modulieren. Aus dem in Tabelle 50 angegebenen Modulationsfaktor (Quotient aus Volllaststunden und Betriebsstunden) lässt sich ablesen, wie viele Betriebsstunden das jeweilige BHKW-Modul prozentual mit Nennlast betrieben wurde. BHKW-Anlage C ist mit 99 % Nennlastbetrieb der typische Vertreter für den taktenden Betrieb, BHKW-Anlage B ist mit bis zu 76 % Nennlast typisch für die modulierende Betriebsweise.

Sofern nicht spezielle Gründe dagegen sprechen, zeigte sich im Projekt der taktende Betrieb grundsätzlich im Vorteil gegenüber einer modulierenden Betriebsweise, sowohl was die Effizienz als auch die Wirtschaftlichkeit und die Ökobilanz angeht. Dies resultiert in erster Linie aus zwei Faktoren:

- BHKW-Module erreichen im Allgemeinen bei Nennlast den besten elektrischen Wirkungsgrad, bei Teillast sinken die Wirkungsgrade. Da der Wert elektrischer Energie in vielen Fällen höher angesetzt werden kann als der Wert der thermischen Energie, ist im Verhältnis zur gegebenen Wärmeabnahme in der Regel eine möglichst hohe Stromerzeugung anzustreben.
- Die Wartungskosten für BHKW-Module werden in der Regel als Preis pro Betriebsstunde kalkuliert und verrechnet. Die BHKW-Hersteller gehen dabei in der Regel vom Nennlastbetrieb aus. Im modulierenden Betrieb werden spezifisch gesehen pro Betriebsstunde geringere Energiemengen erzeugt; das Verhältnis von Wartungskosten zu Energieerzeugung wird also schlechter und die spezifischen Wartungskosten pro Energieeinheit erhöhen sich.

Als schwierig zu beurteilen erwiesen sich in diesem Zusammenhang die eventuellen Auswirkungen des taktenden Betriebs auf den Verschleiß und die Wartungsintensität von BHKW-Modulen. Solange sich die Startanzahl pro Tag sowie die Betriebsstunden pro Start innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Spezifikationen bewegen, hat der taktende Betrieb keine unmittelbaren Auswirkungen auf die Wartungskosten und die Gewährleistung. Unter anderem daraus resultiert der oben beschriebene Vorteil gegenüber dem modulierenden Betrieb. Systematische Untersuchungen inwieweit der modulierende Betrieb in Bezug auf den Verschleiß und Wartungsbedarf Vorteile aufweisen könnte, fehlen bislang noch.

Im Falle von pauschalen, betriebsstundenunabhängigen Wartungsverträgen, wie sie z. B. für Mini-KWK-Anlagen angeboten werden, spielt es dagegen eine untergeordnete Rolle, ob die Anlage taktet oder moduliert.

Insbesondere bei BHKW-Anlagen die nur über vergleichsweise geringe Pufferspeicherkapazitäten verfügen kann der modulierende Betrieb im Hinblick auf die Startanzahl vorteilhaft sein. Aus dem Überblick in Tabelle 50 ist ersichtlich, dass die im Projekt untersuchten BHKW-Anlagen mit taktendem Betrieb (A und C) über deutlich höhere spezifische Pufferspeichervolumina verfügen als die Anlagen mit modulierender Betriebsweise (B und D). Bei den beiden modulierenden Anlagen bewegt sich das spezifische Puffervolumen im Bereich von etwa 25 Liter pro kW thermischer Leistung, was in der Praxis bei einer Temperaturspreizung von 20 °C bis 25 °C einen Volllastbetrieb über etwa 30 bis 45 Minuten ermöglicht. Demgegenüber können die taktenden Anlagen gleicher Spreizung mehr als 2 Stunden mit Nennlast betrieben werden.

Ausgehend von den Ergebnissen des Projekts sollten daher grundsätzlich bereits bei der Planung von BHKW-Anlagen ausreichend große Pufferspeichervolumina vorgesehen werden und möglichst hohe Temperaturspreizungen – am besten durch eine weitest mögliche Absenkung der Rücklaufemperatur im System – angestrebt werden, um ein großes nutzbares Speichervolumen zu erzielen. Dadurch lassen sich ausgehend vom Wärmespeicher als zentraler Komponente auch künftige Anwendungen mit hohem thermischem Speicherbedarf, wie Power-to-Heat-Konzepte, leicht integrieren.

In der Praxis ist dies jedoch aufgrund baulicher Gegebenheiten in vielen Fällen nur eingeschränkt möglich. Bei geringen Pufferspeichervolumina kann sich daher eine gemischte Betriebsweise aus modulierend und taktend als vorteilhaft erweisen, um die Startanzahl nicht unnötig in die Höhe zu treiben. Dabei wird das BHKW-Modul grundsätzlich taktend betrieben, muss jedoch nach einem Start eine festgelegte Mindestlaufzeit erreichen und kann bei rückläufiger Wärmeabnahme dafür gegebenenfalls modulierend die Leistung reduzieren.

Tabelle 50: Jährliche Betriebskennwerte der betrachteten BHKW-Anlagen im Vergleich

	BHKW-Anlage A	BHKW-Anlage B		BHKW-Anlage C*	BHKW-Anlage D	
		BHKW1	BHKW2		BHKW1	BHKW2
Betriebsstunden	4.977 h	6.666 h	5.118 h	5.526 h	6.697 h	6.285 h
Volllaststunden	4.527 h	5.097 h	4.505 h	5.473 h	6.222 h	5.659 h
Modulationsfaktor	0,91	0,76	0,88	0,99	0,93	0,90
Starts	160	543	207	552	651	672
Betriebsstunden pro Start	31,1 h	12,3 h	24,7 h	10,0 h	10,3 h	9,4 h
Spez. Puffervolumen	72,5 l/kW _{th}	27,4 l/kW _{th}		99 l/kW _{th}	23,8 l/kW _{th}	

* Daten jeweils für 12 Monate (Bezugsjahr 2016), für BHKW-Anlage C nur 11 Monate (Bezugsjahr 2015) aufgrund eines Ausfalls, erreichbare Volllaststunden bei störungsfreiem Betrieb daher höher

6.2.2 Stromgeführter Betrieb

Der stromgeführte Betrieb kann bei BHKW-Anlagen eine wirtschaftlich interessante Option darstellen, da im Allgemeinen der Wert des Koppelprodukts Strom höher angesetzt werden kann als der Wert der ausgekoppelten Wärme. Im Projekt wurde ausgehend von BHKW-Anlage D eine Potentialanalyse für den stromgeführten Betrieb durchgeführt (siehe Kapitel 5.4.4.2). Die Potentialanalyse zeigt, dass ein stromgeführter Betrieb aus wirtschaftlicher Sicht unter folgenden Voraussetzungen durchaus interessant sein kann.

- Es ist eine Wärmeabfuhr über einen Notkühler oder eine vergleichbare Wärmesenke möglich.
- Die BHKW-Module weisen einen hohen elektrischen Wirkungsgrad bzw. eine hohe Stromkennzahl auf, um die Verluste durch die ungenutzte Wärme möglichst gering zu halten.
- Der Wert elektrischer Energie kann im Vergleich zur thermischen Energie bzw. zu den Brennstoffpreisen deutlich höher angesetzt werden.
- Die Gesamteffizienz der BHKW-Anlage entspricht übers Jahr betrachtet weiterhin den Anforderungen, um die Ansprüche auf Förderung nach dem KWKG bzw. EnergieStG zu erhalten.

In der Praxis bedeutet dies, dass ein wirtschaftlicher stromgeführter Betrieb eines Blockheizkraftwerks in der Regel nur in Kombination mit einer im Jahresmittel ausreichenden Wärmenutzung umsetzbar ist. Die KWK-Anlage muss also grundsätzlich am Wärmebedarf orientiert ausgelegt sein und sollte zumindest in den Wintermonaten im KWK-Betrieb mit voller Wärmenutzung betrieben werden können. Eine sinnvolle Umsetzung des stromgeführten Betriebs kann z. B. ein „Sommerbetriebsmodus“ sein, bei dem die BHKW-Anlage im Winter und in der Übergangszeit grundsätzlich wärmegeführt betrieben wird und lediglich im Sommer auf stromgeführten Betrieb umgeschaltet wird. Auf diese Weise kann der elektrische Bedarf einer Liegenschaft über das Jahr hinweg bestmöglich gedeckt werden, ohne allzu große Einbußen bei der Gesamtsystemeffizienz in Kauf nehmen zu müssen. Alternativ besteht – als investive Maßnahme – die Möglichkeit, zusätzliche Nutzwärmeabnehmer mit ganzjährigem Bedarf zu erschließen, wie z. B. Prozesswärmekunden oder Kälteabnehmer, die über Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) versorgt werden können.

Für die praktische Umsetzung des stromgeführten Betriebs bietet sich, v. a. für BHKW, die nach dem KWKG mit vorrangiger Eigenstromnutzung betrieben werden, die sogenannte Netzbezugsregelung an. Dabei wird über die BHKW-Regelung der Stromaustausch mit dem öffentlichen Netz möglichst bei null gehalten, d. h. das BHKW-Modul folgt innerhalb seiner Leistungsgrenzen dem elektrischen Lastgang im jeweiligen Hausnetz. Eine Einspeisung von Überschussstrom ins öffentliche Netz, die meistens mit schlechteren finanziellen Konditionen verbunden ist, wird vermieden.

6.2.3 Systemdienstleistungen

Sowohl bei wärmegeführter als auch bei stromgeführter Betriebsweise ist es möglich, mit Blockheizkraftwerken Systemdienstleistungen im elektrischen Netz anzubieten und darüber zusätzliche Erlöse zu generieren. Von praktischer Bedeutung ist dabei die Frequenzhaltung im elektrischen Netz, die über die sogenannte Regelernergie gewährleistet wird, die in drei Abstufungen gehandelt wird:

- Minuten- bzw. Tertiärregelleistung (MRL)
- Sekundärregelleistung (SRL)
- Primärregelleistung (PRL)

Für Blockheizkraftwerke in erster Linie relevant ist die negative Minuten- und negative Sekundärregelleistung (siehe Erläuterungen in Kapitel 2.4). Im Rahmen einer Potentialanalyse (siehe Kapitel 5.5) wurde für die BHKW-Anlagen im Projekt untersucht, welche Zusatzerlöse sich durch die Vermarktung negativer MRL und SRL erzielen lassen. Aus der Potentialanalyse lassen sich folgenden Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Vermarktung von Regelernergie stellt grundsätzlich eine attraktive und vergleichsweise einfach umsetzbare Option zur Generierung zusätzlicher Erlöse bei BHKW-Anlagen dar.
- Die Höhe der Erlöse bei Teilnahme an der Regelergievermarktung ist in erster Linie von vier Faktoren abhängig: a) der vermarktbaren elektrischen Leistung b) der jährlichen Verfügbarkeit, c) dem gebotenen Leistungspreis und d) dem gebotenen Arbeitspreis.
- Die vermarktbare elektrische Leistung ist durch die technischen Spezifikationen des jeweiligen BHKW-Moduls begrenzt. So beschränken viele BHKW-Hersteller z. B. den zulässigen Teillastregelbereich ihrer Module auf 100 % bis 50 % der Nennleistung, neuere Anlagen mit spezieller Spezifikation für den Regelergiebetrieb erlauben einen Regelbereich bis 35 % der Nennleistung. Die jährliche Verfügbarkeit der BHKW-Anlage ist ebenfalls entscheidend für die erzielbaren Erlöse. Eine BHKW-Anlage, die ganzjährig mit hoher Auslastung betrieben wird, kann auch im Sommer an der Regelergievermarktung teilnehmen, während dies bei einer BHKW-Anlage, die im Sommer nur sporadisch betrieben wird, nicht ohne Weiteres möglich ist.
- Aufgrund der vergleichsweise hohen Hürden für die direkte Teilnahme am Regelergiemarkt, bietet sich in der Praxis die Vermarktung über Poolbetreiber an, die verschiedene Erzeugungsanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk bündeln und damit auch die Besicherung der angebotenen Leistung sicherstellen.
- Die erzielbaren Leistungs- und Arbeitspreise sind vom aktuellen Markt abhängig und können daher stark variieren. Für die Leistungspreise liegen veröffentlichte historische Daten vor, die für eine Prognose herangezogen werden können.

nen, für die Arbeitspreise ist eine belastbare Prognose ohne detaillierte Kenntnis der jeweiligen Vermarktungsstrategie kaum möglich.

- Aufgrund der zunehmenden Anzahl an Anlagen die am Regelenergiemarkt teilnehmen, ist im betrachteten Zeitraum 2015 bis 2016 ein deutlicher Rückgang der erzielbaren Leistungspreise zu beobachten. Sofern sich die regulatorischen und wirtschaftlichen Randbedingungen nicht ändern, ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend fortsetzt bzw. die erzielbaren Erlöse langfristig auf niedrigem Niveau stagnieren.
- Aufgrund des technischen und administrativen Aufwands ist in der Praxis die Vermarktung von Regelenergie derzeit v. a. für größere BHKW-Anlagen relevant. Bei Mini-KWK-Anlagen rechtfertigen die erzielbaren Erlöse den Zusatzaufwand nach heutigem Stand nicht.

6.2.4 Anmerkungen zu Störungen und Ausfällen

Auffällig war, dass unabhängig von der jeweiligen Betriebs- und Regelstrategie bei allen im Projekt untersuchten BHKW-Anlagen in mindestens einem der Betrachtungszeiträume längerfristige ungeplante Ausfälle eines BHKW-Moduls für Zeiträume von mehreren Wochen zu verzeichnen waren. Dies unterstreicht die Bedeutung eines durchdachten Wartungsmanagements mit schnellen Reaktionszeiten der zuständigen Wartungsteams und einer gesicherten Ersatzteilversorgung.

Hier empfiehlt sich insbesondere bei größeren Anlagen, bei denen bereits kurze Ausfallzeiten zu einem hohen wirtschaftlichen Schaden führen können, der Abschluss eines Vollwartungs- oder Full-Service-Vertrags. Im Vertrag sollte auch Aufschaltung auf ein Serviceportal des Herstellers und die Störungsbeseitigung innerhalb einer garantierten Zeitspanne (z. B. 24-Stunden Reaktionszeit) geregelt sein. Möglich ist auch die Vereinbarung einer Verfügbarkeitsgarantie. Zudem sollten die finanziellen Folgen eines Ausfalls ab einer gewissen Größenordnung durch eine Versicherung abgedeckt sein.

Bei der Planung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von BHKW-Anlagen sollten außerplanmäßige Ausfälle in den Wartungskosten einkalkuliert werden, zudem sollte ausgehend von den prognostizierten Laufzeiten ein Abschlag für die Verfügbarkeit des BHKW-Moduls angesetzt werden, der geplante und außerplanmäßige Wartungen abdeckt. Sinnvolle Annahmen zur Verfügbarkeit neu installierter Anlagen mit Vollwartungsvertrag bewegen sich im Bereich von 98 %. Darüber hinaus sollte bei jeder BHKW-Anlage grundsätzlich ein gewisser Grad an Redundanz durch einen zweiten Wärmeerzeuger – in der Regel der Spitzenlastkessel und/oder ein zweites BHKW-Modul – vorgesehen werden.

6.3 Regelstrategie

In Bezug auf die Regelung haben sich im Projekt einfach aufgebaute Anlagen mit nur einem BHKW-Modul und einem passiv als hydraulische Weiche eingebundenem Pufferspeicher, der Nennlast-Laufzeiten > 2 Stunden ermöglicht, als vorteilhaft erwiesen, wie aus den Ergebnissen für BHKW-Anlage C ersichtlich (vgl. Kapitel 5.3.3.1). Dagegen erwies sich die Regelung von Mehrmodulanlagen als deutlich komplexer und anfälliger für Fehlparametrierungen. Optimierungspotential zeigt sich dabei, wie schon in Bezug auf die Betriebsweise festgestellt, in erster Linie in der Übergangszeit und im Sommer, während sich der Betrieb in den Wintermonaten bei hoher Wärmeabnahme meist unproblematisch erweist.

Besonderes Augenmerk ist bei Mehrmodulanlagen v. a. auf die Vorrangschaltung zu legen, insbesondere bei BHKW-Modulen mit unterschiedlicher Leistung, wie die Ergebnisse für BHKW-Anlage B zeigen (vgl. Kapitel 5.2.4.1). Grundsätzlich sollte stets das Modul mit dem höchsten elektrischen Wirkungsgrad vorrangig betrieben werden bzw. das Modul das bei einer gegebenen Wärmeabnahme noch bei Nennlast betrieben werden kann. In der Praxis kann dies – je nach Auslegung der Anlage – z. B. durch eine Vorrangschaltung für das kleinere Modul erfolgen, wie bei BHKW-Anlage B im Projekt umgesetzt. Einfacher gestaltet sich die Regelung grundsätzlich bei zwei baugleichen BHKW-Modulen, hier ist im Hinblick das Wartungsmanagement lediglich auf eine gleichmäßige Auslastung beider Module übers Jahr hinweg zu achten.

Ebenfalls als kritisch erweist sich in der Praxis oftmals die Abstimmung der Regelung für den Spitzenlastkessel, insbesondere wenn dieser eine vielfach höhere thermische Leistung als das BHKW-Modul aufweist, wie die Ergebnisse für BHKW-Anlage A zeigen (vgl. Kapitel 5.1.1.4 und 5.1.4.1). Hier ist darauf zu achten, dass zumindest der untere Teillastbereich des Kessels mit der thermischen BHKW-Leistung überlappt oder nicht allzu sehr darüber liegt, um zu große Lastsprünge zu vermeiden. Bei der im Projekt betrachteten BHKW-Anlage A erreicht der Kessel bei Mindestleistung bereits mehr als 2,5fache der thermischen BHKW-Leistung, wodurch im Übergangsbereich zwischen BHKW- und Kesselbetrieb eine sanfte Nachführung der Wärmeleistung kaum möglich ist und der Kessel meist nur kurz taktend zuschaltet.

Grundsätzlich hat sich im Projekt gezeigt, dass eine rein regelungsbasierte Optimierung schnell an Grenzen stößt, wenn die hydraulische Einbindung bzw. die Auslegung und Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten untereinander nicht optimal ist, wie das Beispiel von BHKW-Anlage A zeigt. Bei dieser Anlage wären investive Maßnahmen an der Hydraulik und der Kesselanlage notwendig, um eine weitere Optimierung zu erzielen.

Als wichtig hat sich zudem erwiesen, dass die für die Regelung benötigten Führungsgrößen richtig bestimmt werden. Beispielsweise kann die Auswahl eines ungeeigneten Temperaturfühlers als Maß für die Pufferspeicherbeladung zu einer schlechten Ausnutzung des Speichers führen, wie bei BHKW-Anlage D im Projekt festgestellt (siehe

Kapitel 5.4.2.1). Grundsätzlich hat sich in Bezug auf die Pufferspeicherausnutzung die Regelung nach dem Speicherfüllstand, der aus dem Temperaturprofil im Speicher berechnet werden kann, als vorteilhaft erwiesen, anstatt nur eine einzelne Temperatur als Führungsgröße zu nutzen. Eine optimale Nutzung des vorhandenen Speichervolumens ist eine der effektivsten Maßnahmen für die Optimierung des BHKW-Betriebs, weshalb generell eine großzügige Ausstattung des Pufferspeichers mit Temperaturfühlern (je nach Größe und Höhe des Puffers z. B. in 4 bis 10 Schichten) zu empfehlen ist.

Komplexe Regelungen, die eine Vielzahl von Parametern berücksichtigen, wie z. B. Leistungsvorgaben für einzelne Module, Modulationsbetrieb oder aktive Pufferladestrategien, haben sich im Projekt gegenüber einfacher aufgebauten Regelungsstrategien, die z. B. lediglich nach dem Pufferspeicherfüllstand regeln, nicht als vorteilhaft erwiesen. Im Gegenteil: die Vielzahl an möglichen Zuständen und ihrer Wechselwirkungen ist bei solchen Anlagen für den Bediener kaum zu überblicken, wie der komplexe Zustandsgraph für BHKW-Anlage D zeigt (vgl. Abbildung 24 und Anhang 9.4). Erschwerend kommt hinzu, dass die Sollwerte und Regelparameter häufig auf Basis von Erfahrungs- und Schätzwerten eingestellt werden und Änderungen nicht konsequent dokumentiert werden, wie bereits in den Schlussfolgerungen zum Energiemonitoring angemerkt. Hierbei ist außerdem zu beachten, dass sich Parameteränderungen zum gegebenen Zeitpunkt zwar durchaus positiv auswirken können, die Einstellung allerdings zu einer anderen Jahreszeit ganz andere Auswirkungen haben kann. Je komplexer die Anlage, umso schwieriger sind solche Zusammenhänge zu erkennen.

Grundsätzlich sind daher möglichst einfache Regelstrategien vorzuziehen, die nur so viel Funktionalität aufweisen wie notwendig. Die Regelung von BHKW-Anlage B erfüllt beispielweise grundlegend die gleiche Funktionalität wie bei Anlage D (Regelung einer BHKW-Anlage mit 2 Modulen und Modulationsbetrieb), bei deutlich geringerer Komplexität, wie aus dem Zustandsgraphen ersichtlich (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 24). Als Musterbeispiel für eine einfach aufgebaute Regelung für ein taktend betriebenes BHKW kann BHKW-Anlage C dienen (vgl. Zustandsgraph Abbildung 21). Die Wärmerzeuger werden hier nach einfachen Kriterien kaskadiert zugeschaltet, was auch die nachträgliche Erweiterung um zusätzliche BHKW-Module einfach möglich macht.

7 Zusammenfassung

Für den Ausbau der KWK-Nettostromerzeugung gemäß den Zielen der Bundesregierung bis auf 110 Terawattstunden im Jahr 2020 sowie 120 Terawattstunden im Jahr 2025 [KWKG15] spielen kompakte KWK-Anlagen, sogenannte Blockheizkraftwerke (BHKW), die dezentral zur Versorgung von Liegenschaften und Wärmenetzen eingesetzt werden, eine wichtige Rolle. Sowohl für neu geplante als auch bestehende BHKW-Anlagen gilt es dabei, die Auslegung sowie die Betriebs- und Regelstrategie optimal auf den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen, um das Effizienzpotential voll auszuschöpfen. Dies ist insbesondere von Bedeutung, da BHKW-Anlagen einerseits eine vergleichsweise hohe Investition darstellen, die wirtschaftlich optimal genutzt werden soll, andererseits jedoch auch systemtechnisch eine wichtige Doppelrolle sowohl für die elektrische als auch die thermische Energieversorgung erfüllen und oftmals in komplexe übergeordnete Energiesysteme eingebunden sind.

Basierend auf dieser Ausgangslage wurden im hier dargestellten Vorhaben gezielt die Potentiale zur nicht-investiven bzw. gering-investiven Betriebsoptimierung durch die Umsetzung optimierter Monitoring-, Betriebs und Regelstrategien in der Praxis untersucht. Für die Untersuchungen wurden vier BHKW-Anlagen in vier unterschiedlichen Anwendungen mit einer Bandbreite von bis 5,5 kW bis 825 kW installierter elektrischer Leistung ausgewählt.

Entscheidend für die Optimierung von Betriebs- und Regelstrategien ist eine zeitlich hoch aufgelöste Datenbasis, die eine umfassende Beurteilung des Anlagenbetriebs inklusive dynamischer Effekte erlaubt, da nur auf diese Weise schlecht abgestimmte Regelsysteme oder ungünstige Betriebsmodi erkannt werden können. In der Praxis liegen diese Daten jedoch meist nicht oder nur unzureichend vor, oder werden nicht zielgerichtet ausgewertet. Wesentlicher Ansatzpunkt des Projekts war daher zunächst die Umsetzung eines Monitoringkonzepts zur Generierung der benötigten Daten im BHKW-Praxisbetrieb. Zur Datenerfassung wurde ein softwaregestütztes Energiemonitoringsystem eingesetzt, das auf der an den Anlagen vorhandenen Messtechnik aufbaut und mittels dem die Betriebsdaten auf einer unabhängigen Plattform erfasst, visualisiert und ausgewertet werden können. Vorteil dieser Lösung ist, dass kein Eingriff in die bestehenden Mess-, Steuer- und Regel- sowie Leittechniksysteme erforderlich war und dass alle für das Projekt erforderlichen Daten unabhängig von den verschiedenen vor Ort eingesetzten Systemen in einem einheitlichen Format gesammelt und analysiert werden konnten.

Zur Generierung der benötigten Datenbasis wurden in einer ersten Monitoringphase zunächst die Betriebsdaten der jeweiligen BHKW-Anlage zeitlich hoch aufgelöst erfasst und analysiert. Ausgehend von der Analyse wurden für die jeweilige Anlage Verbesserungspotentiale herausgearbeitet und daraus optimierte Betriebs- und Regelstrategien entwickelt sowie ausgewählte Maßnahmen umgesetzt. Sofern die entwickelten Maßnahmen aus betrieblichen Gründen in Rahmen des Vorhabens nicht umsetzbar waren,

wurde eine Potentialanalyse auf Basis der realen Betriebsdaten durchgeführt. Um den Erfolg der Maßnahmen zu beurteilen, wurden in einer zweiten Monitoringphase wiederum die Betriebsdaten erfasst und im Vergleich mit der ersten Monitoringphase analysiert.

Im Rahmen des Vorhabens konnten an drei der untersuchten BHKW-Anlagen Optimierungsmaßnahmen erfolgreich umgesetzt werden, zusätzlich wurde drei Maßnahmen identifiziert, die im Rahmen einer Potentialanalyse untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen v. a. in der Übergangszeit und im Sommerbetrieb Optimierungspotential, insbesondere bei komplexeren Anlagen mit mehreren Modulen. Im Winterbetrieb konnten dagegen alle untersuchten Anlagen zufriedenstellend betrieben werden.

Insgesamt betrachtet stellte sich im Projekt eine möglichst einfache Anlagenkonfiguration mit nur einem BHKW-Modul, einem groß dimensioniertem Pufferspeicher und taktenden Betrieb im Verbund mit einem Spitzenlastkessel als vorteilhaft und regelungstechnisch einfach handhabbar heraus. In der Praxis werden aus Redundanzgründen und zur besseren Lastanpassung dagegen oftmals Mehrmodulanlagen bevorzugt, die aus Platzgründen mit kleineren Pufferspeichern ausgestattet sind. Hier ist auf eine sorgfältige Abstimmung der Vorrangschaltung zwischen den BHKW-Modulen zu achten, insbesondere wenn diese unterschiedliche Leistungen aufweisen. Ebenfalls als kritisch erweist sich in der Praxis die Regelung des Spitzenlastkessels, insbesondere wenn dieser eine vielfach höhere thermische Leistung als das BHKW-Modul aufweist. Hier ist darauf zu achten, dass zumindest der untere Teillastbereich des Kessels mit der thermischen BHKW-Leistung überlappt oder nicht allzu sehr darüber liegt, da sonst eine sanfte Nachführung der Wärmeleistung kaum möglich ist.

Im Hinblick auf die Effizienz und die Wartungskosten ist der taktende Betrieb bei Nennlast gegenüber dem modulierenden Betrieb mit häufigen Teillastphasen grundsätzlich im Vorteil, sofern die Startanzahl und die Betriebsstunden pro Start sich im zulässigen Toleranzbereich bewegen. Kann dies nicht gewährleistet werden, kann dagegen ein modulierender Betrieb sinnvoll sein, um die geforderten Mindestlaufzeiten pro Start sicherzustellen.

Rein stromgeführte Betriebsweisen spielen für BHKW-Anlagen in der Wärmewirtschaft (Gebäudeenergieversorgung, Fernwärme,...) eine untergeordnete Rolle, können jedoch in Kombination mit wärmegeführten Strategien sinnvoll eingesetzt werden. Interessant kann hier z. B. ein „Sommerbetriebsmodus“ sein, bei dem die BHKW-Anlage im Winter und in der Übergangszeit grundsätzlich wärmegeführt betrieben wird und lediglich im Sommer auf stromgeführten Betrieb umgeschaltet wird. Auf diese Weise kann der elektrische Bedarf einer Liegenschaft über das Jahr hinweg bestmöglich gedeckt werden, ohne allzu große Einbußen bei der Gesamtsystemeffizienz in Kauf nehmen zu müssen. Für die praktische Umsetzung des stromgeführten Betriebs bietet sich v. a. für BHKW die nach dem KWKG mit vorrangiger Eigenstromnutzung betrieben werden eine Netzbezugsregelung an, bei welcher der Stromaustausch mit dem öffent-

lichen Netz möglichst bei null gehalten wird und die Einspeisung von Überschussstrom ins öffentliche Netz weitestgehend vermieden wird.

Sowohl bei wärmegeführter als auch bei stromgeführter Betriebsweise können durch die Erbringung von Systemdienstleistungen zusätzliche Erlöse generiert werden. Für Blockheizkraftwerke in erster Linie relevant ist die negative Minuten- und negative Sekundärregelleistung, die sich technisch vergleichsweise einfach umsetzen lässt. Aufgrund der vergleichsweise hohen Hürden für die direkte Teilnahme am Regelenergiemarkt, bietet sich in der Praxis die Vermarktung über Poolbetreiber an, die verschiedene Erzeugungsanlagen zu einem virtuellen Kraftwerk bündeln und damit auch die Besicherung der angebotenen Leistung sicherstellen.

Ausgehend von den Projektergebnissen empfiehlt sich ein Energiemonitoring auch bereits bei kleineren BHKW-Anlagen, wobei hier der Aufwand ins Verhältnis zum Nutzen gesetzt werden muss. Je größer und komplexer BHKW-Anlagen aufgebaut sind und je größer die Freiheitsgrade für den BHKW-Betrieb sind (z. B. Mehrmodulanlagen, mehrere Pufferspeicher, modulierende Betriebsweise, strommarktorientierte Fahrweisen, usw.) desto wichtiger ist dagegen ein umfassendes Energiemonitoring, um das tatsächliche Betriebs- und Regelverhalten des Gesamtsystems zu überwachen und Abweichungen von den Soll-Bedingungen und Vorgaben korrigieren zu können. Der Aufbau einer eigenen individuellen Energiemonitoringlösung empfiehlt sich basierend auf den Erfahrungen im Projekt jedoch allenfalls für sehr große, komplexe Anlagen oder wenn viele unterschiedliche Anlagen in einem Pool mit einem einheitlichen Monitoringsystem überwacht werden sollen. Für BHKW-Einzelanlagen üblicher Größenordnung ist es dagegen sinnvoller, auf spezialisierte Energiemonitoring-Dienstleister zurückzugreifen, die nach Möglichkeit standardisierte Datenerfassung- und Auswertemodule bereits fertig implementiert vorliegen haben und diese mit geringem Aufwand auf die jeweilige BHKW-Anlage anpassen können.

Als geeignetes und universell anwendbares Schnittstellenformat, das in den meisten heute üblichen MSR- und Leitechniksystemen als Ausgabemöglichkeit implementiert ist, hat sich das CSV-Dateiformat erwiesen. Sinnvollerweise erfolgt der Datenexport und -import automatisiert, z. B. per täglichem E-Mailversand. Ein manueller Import ist weniger zu empfehlen, da dies aufwändig und zeitintensiv ist und zu Fehlern in den aufgenommenen Daten führen kann. Bezüglich der Einstellung von Regelparametern und Sollwerten empfiehlt sich die Einrichtung und konsequente Nutzung eines Logbuchs, in dem Änderungen an der Parametrierung von Regelungssystemen automatisiert dokumentiert werden. Ausgehend von den Erfahrungen im Projekt wurde eine Muster-Datenpunktliste für das Energiemonitoring einer BHKW-Anlage erarbeitet, die als Anhang zu diesem Bericht beigefügt ist (vgl. Anhang 9.3).

Grundsätzlich hat sich im Projekt gezeigt, dass eine rein regelungsbasierte Optimierung schnell an Grenzen stößt, wenn die hydraulische Einbindung bzw. die Auslegung und Abstimmung der einzelnen Systemkomponenten untereinander nicht optimal ist. Komplexe Regelungen, die eine Vielzahl von Parametern, wie z. B. Leistungsvorgaben

für einzelne Module, Modulationsbetrieb oder aktive Pufferladestrategien berücksichtigen, haben sich im Projekt gegenüber einfacher aufgebauten Regelungsstrategien, die z. B. lediglich nach dem Pufferspeicherfüllstand regeln, nicht als vorteilhaft erwiesen. Die Vielzahl an möglichen Zuständen und ihrer Wechselwirkungen ist bei solchen Anlagen für den Bediener oftmals kaum zu überblicken. Erschwerend kommt hinzu, dass die Sollwerte und Regelparameter häufig auf Basis von Erfahrungs- und Schätzwerten eingestellt werden und Änderungen nicht konsequent dokumentiert werden. Zudem können sich Parameteränderungen zum Zeitpunkt der Umsetzung zwar durchaus positiv auswirken, die Einstellung kann allerdings zu einer anderen Jahreszeit ganz andere Auswirkungen haben. Je komplexer die Anlage, umso schwieriger sind solche Zusammenhänge zu erkennen. Nach Möglichkeit sind daher möglichst einfache Regelstrategien vorzuziehen, die nur so viel Funktionalität aufweisen wie notwendig.

8 Quellenangaben

- [ASUE2014] ASUE Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. (Hrsg.): BHKW-Kenndaten 2014/2015. Essen, energiedruck, 2014.
- [FW308] AGFW- Arbeitsblatt FW 308 -Zertifizierung von KWK-Anlagen- Ermittlung des KWK-Stromes; Internetseite www.agfw.de; Abfrage 16.05.2014
- [VDI4660] VDI 4660, Bl.2: Ermittlung zielenergiebezogener Emissionen bei der Energiewandlung. Mai 2003
- [Mauch2012] MAUCH, W. et.al.: Allokationsmethoden für spezifische CO₂-Emissionen von Strom und Wärme aus KWK-Anlagen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Jg. 55, Heft 9, 2010
- [Lehnhoff2010] LEHNHOFF, Sebastian: Dezentrales vernetztes Energiemanagement; 1. Auflage; Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden; 2010; ISBN 978-3-8348-1270-4
- [VDI3814] VDI-Richtlinie 3814 - Gebäudeautomation. Begriffe, Definitionen, Strukturen (2004). Entwurf. Düsseldorf: VDI (VDI-Richtlinien).
- [KWE2012] KW Energie (2012): Aufstellung und Einbindung des BHKW (Gas). Hg. v. www.kwenergie.de. KW Energie GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter https://www.kwenergie.de/wp-content/uploads/2012/12/KWE_03_BA-Aufstellung_GAS_002.pdf, zuletzt geprüft am 08.09.2016.
- [Schaumann2010] Schaumann, Gunter; Schmitz, Karl W. (2010): Kraft-Wärme-Kopplung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- [Schellong2016] Schellong, Wolfgang (2016): Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen. 1. Aufl. 2016. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg.
- [IfE2014] Lechner, Raphael; O'Connell, Nicholas; Brautsch, Markus: 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. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2015. Forschungsinitiative ZukunftBau F2943.3816794718
- [IfE2012] Lechner, Raphael; Brautsch, Markus: Effizienzsteigerung durch Modellkonfiguration in BHKW-Anlagen. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2012. Forschungsinitiative ZukunftBau
- [Bafa17] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (Bafa): Energiemanagementsysteme; http://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Energiemanagementsysteme/energiemanagementsysteme_node.html; Abruf am 06.06.2017

- [EANRW17] EnergieAgentur.NRW GmbH: EMS.Marktspiegel;
<http://www.energieagentur.nrw/energieeffizienz/ems.marktspiegel>; Ab-
ruf am 06.06.2017
- [IWU17] Excel-Tool: Gradtagszahlen_Deutschland des Instituts für Wohnen und
Umwelt GmbH;
[http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gr
adtagszahlen_Deutschland.xls](http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/Gradtagszahlen_Deutschland.xls); Abruf am 12.06.2017
- [KWKG15] Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-
Wärme-Kopplung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz - KWKG); Ausferti-
gungsdatum: 21.12.2015
- [EnergieStG] Energiesteuergesetz vom 15. Juli 2006 (BGBl. I S. 1534; 2008 I S. 660,
1007), das zuletzt durch Artikel 9 des Gesetzes vom 10. März 2017
(BGBl. I S. 420) geändert worden ist
- [GEMIS] IINAS Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -
strategien: GEMIS 4.9 - Globales Emissions-Modell integrierter Systeme
- [VDI2067] Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 "Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anla-
gen - Grundlagen und Kostenberechnung". September 2009
- [IVR2017] Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung; Internetseite
www.regelleistung.net; Abfrage am 10.08.2017

9 Anhang

9.1 Beispielberechnung CO₂-Bilanzierung

Bei der Beispielsrechnung der CO₂-Bilanzierung nach der Exergetischen Methode gemäß VDI 4660 Bl.2 wird ein Erdgas-BHKW mit folgenden Rahmenbedingungen betrachtet:

- Elektrische Leistung: $P_{el} = 240 \text{ kW}_{el}$
- Thermische Leistung: $P_{th} = 240 \text{ kW}_{th}$
- Feuerungswärmeleistung: $P_{FWL} = 570 \text{ kW}$
- Vollbenutzungsstunden: $VBh = 6000 \text{ h/a}$
- Umgebungstemperatur: $T_{Umgebung} = 20 \text{ °C} = 293 \text{ K}$
- Vorlauftemperatur: $T_{VL} = 90 \text{ °C} = 363 \text{ K}$
- Rücklauftemperatur: $T_{RL} = 70 \text{ °C} = 343 \text{ K}$
- CO₂-Äquivalent: $\varepsilon_{CO_2,Br} = 203 \text{ g/kWh}$

Die Berechnung erfolgt auf folgende Art und Weise:

$$W_{el} = P_{el} * VBh = 240 \text{ kW}_{el} * 6000 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 1440000 \text{ kWh}_{el}$$

$$W_{th} = P_{th} * VBh = 240 \text{ kW}_{th} * 6000 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 1440000 \text{ kWh}_{th}$$

$$W_{Br} = P_{FWL} * VBh = 240 \text{ kW} * 6000 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 3420000 \text{ kWh}$$

$$T_m = \frac{T_{VL} - T_{RL}}{\ln \frac{T_{VL}}{T_{RL}}} = \frac{363 \text{ K} - 343 \text{ K}}{\ln \frac{363 \text{ K}}{343 \text{ K}}} = 353 \text{ K}$$

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{Umgebung}}{T_m} = 1 - \frac{293 \text{ K}}{353 \text{ K}} = 0,17$$

$$E_{x,el} = W_{el} = 1440000 \text{ kWh}_{el}$$

$$E_{x,th} = W_{th} * \eta_c = 1440000 \text{ kWh}_{th} * 0,17 = 244439 \text{ kWh}_{th}$$

$$\begin{aligned} m_{CO_2,ges} &= W_{Br} * \varepsilon_{CO_2,Br} = 3420000 \text{ kWh} * 203 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}} \\ &= 694260 \text{ kg CO}_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{Br,el} &= \frac{E_{x,el}}{E_{x,el} + E_{x,th}} = \frac{1440000 \text{ kWh}_{el}}{1440000 \text{ kWh}_{el} + 244439 \text{ kWh}_{th}} \\ &= 0,855 \end{aligned}$$

$$A_{Br,th} = \frac{E_{x,th}}{E_{x,el} + E_{x,th}} = \frac{244439 \text{ kWh}_{th}}{1440000 \text{ kWh}_{el} + 244439 \text{ kWh}_{th}} = 0,145$$

$$m_{CO_2,el} = A_{Br,el} * m_{CO_2,ges} = 0,855 * 694260 \text{ kg CO}_2 = 593512 \text{ kg CO}_2$$

$$m_{CO_2,th} = A_{Br,th} * m_{CO_2,ges} = 0,145 * 694260 \text{ kg CO}_2 = 100748 \text{ kg CO}_2$$

$$\varepsilon_{CO_2,el} = \frac{m_{CO_2,el}}{E_{x,el}} = \frac{593512 \text{ kg CO}_2}{1440000 \text{ kWh}_{el}} = 412 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}_{el}}$$

$$\varepsilon_{CO_2,th} = \frac{m_{CO_2,th}}{E_{x,th}} = \frac{100748 \text{ kg CO}_2}{244439 \text{ kWh}_{th}} = 70 \frac{\text{g CO}_2}{\text{kWh}_{th}}$$

9.2 Zuordnungstabellen zu den Zustandsgraphen

9.2.1 BHKW-Anlage A

Nr.	Datenpunkt Benennung	Zeilen-Nr. GA-FL	Kurz-Zeichen	Logische Zuordnung
Eingänge:				
1	BHKW Freigabe	1	FrB	Vorlauftemperatur < Sollwert: FrB=1
2	BHKW gesperrt	1	SpB	Untere Pufferspeichertemperatur >= Sollwert: SpB=1
3	BW-Kessel Freigabe	2	FrK	Vorlauftemperatur < Sollwert: FrK=1
4	BW-Kessel gesperrt	2	SpK	Untere Puffertemperatur > Sollwert: SpK=1
Ausgänge:				
5	AUS	1	A	BHKW aus, BW-Kessel aus
6	BHKW	1	B	BHKW an, BW-Kessel aus
7	BHKW+Spitzenlastkessel	1	BS	BHKW an, BW-Kessel ein

9.2.2 BHKW-Anlage B

Nr.	Datenpunkt Benennung	Zeilen-Nr. GA-FL	Kurz- Zeichen	Logische Zuordnung
Eingänge:				
1	BHKW 1 Freigabe	1	FrB1	Vorlauftemperatur < Soll-Vorlauftemperatur: FrB1=1
2	BHKW 1 gesperrt	1	SpB1	Ausgewählte Pufferspeichertemperatur >= Grenzwert: SpB=1
3	BHKW 2 Freigabe	2	FrB2	Vorlauftemperatur < Soll- Vorlauftemperatur: FrB2=1
4	BHKW 2 gesperrt	2	SpB2	Ausgewählte Pufferspeichertemperatur >= Grenzwert: SpB=1
5	BHKW-Modulation Freigabe	3	FrMo	Ausgewählte Pufferspeichertemperatur >= Grenzwert: FrMo=1
6	BHKW-Modulation gesperrt	3	SpMo	Ausgewählte Pufferspeichertemperatur < Grenzwert: SpMo=1
7	Kessel Freigabe	4	FrK	Vorlauftemperatur < Soll-Vorlauftemperatur: FrK=1
8	Kessel gesperrt	4	SpK	Vorlauftemperatur > Soll-Vorlauftemperatur: SpK=1
Ausgänge:				
9	AUS	1	A	BHKW 1 und 2 aus, Kessel aus
10	BHKW 1	1	B1	BHKW 1 an, BHKW 2 und Kessel aus
11	BHKW 1 + BHKW 2	1	B12	BHKW 1 und 2 an, Kessel aus
12	BHKW 1 + BHKW 2 + Kessel	1	B12K	BHKW 1 und 2 an, Kessel an
13	BHKW 1 moduliert	1	B1Mo	BHKW 1 moduliert, BHKW 2 und Kes- sel aus
14	BHKW 1 und 2 moduliert	1	B12Mo	BHKW 1 und 2 moduliert, Kessel aus
Zeitglieder:				
15	Erfüllungsdauer BHKW ein/aus und Kessel ein	1	T5Be	T5Be=1: Umschaltverzögerung für BHKW 1 und 2, sowie Kessel an
16	Erfüllungsdauer Kessel aus	1	T30K	T30=1: Umschaltverzögerung für Kes- sel aus

9.2.3 BHKW-Anlage C

Nr.	Datenpunkt Benennung	Zeilen-Nr. GA-FL	Kurz-Zeichen	Logische Zuordnung
Eingänge:				
1	Pufferladezustand 1	1	PL1	Ladezustand < Grenzwert 1a %: PL1=1
2	Pufferladezustand 2	1	PL2	Ladezustand < Grenzwert 2a %: PL2=1
3	Pufferladezustand 3	1	PL3	Ladezustand < Grenzwert 3a: PL3=1
4	Pufferentladezustand 1	1	PE1	Ladezustand > Grenzwert 3b %: PE1=1
5	Pufferentladezustand 2	1	PE2	Ladezustand > Grenzwert 2b %: PE2=1
6	Pufferentladezustand 3	1	PE3	Ladezustand > Grenzwert 1b %: PE3=1
Ausgänge:				
7	AUS	2	A	BHKW aus, Kessel 2 aus und 1 aus
8	BHKW	3	B	BHKW an, Kessel 2 aus und 1 aus
9	BHKW + Kessel 2	3	BK2	BHKW an, Kessel 2 an und 1 aus
10	BHKW + Kessel 1	3	BK1	BHKW an, Kessel 2 aus und 1 an
Zeitglieder:				
11	Erfüllungsdauer BHKW, Kessel an	4	T1	T1=1: Umschaltverzögerung für BHKW 1 und 2, sowie Kessel an
12	Erfüllungsdauer BHKW, Kessel aus	4	T2	T2=1: Umschaltverzögerung für BHKW 1 und 2, sowie Kessel aus

9.2.4 BHKW-Anlage D

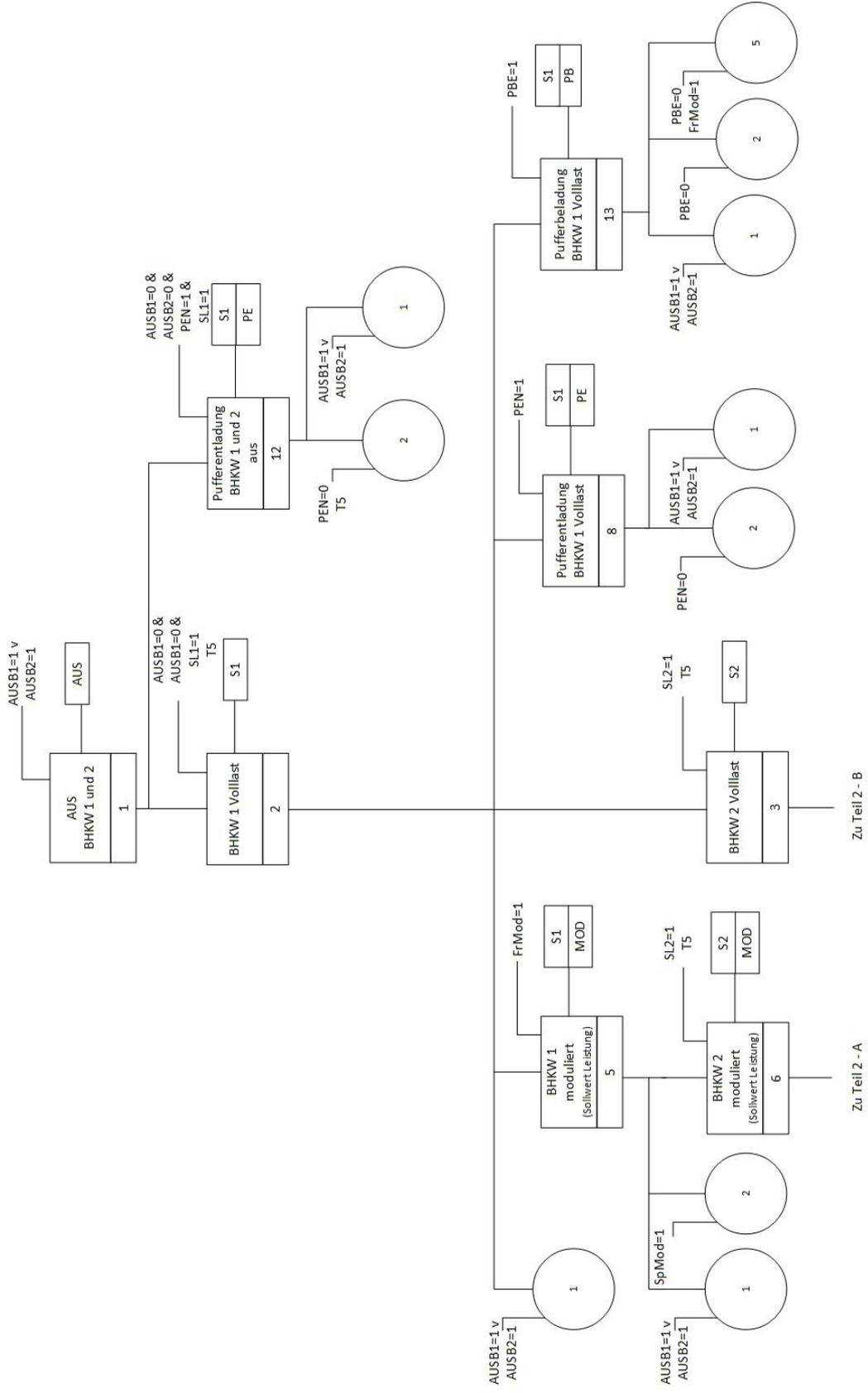
Nr.	Datenpunkt Benennung	Zeilen-Nr. GA-FL	Kurz-Zeichen	Logische Zuordnung
Eingänge:				
1	Sollwert Leistung Einzelbetrieb BHKW 1	1	SL1	0 kW < Sollwert-Wärmeleistung <= 250 kW
2	Sollwert Leistung Einzelbetrieb BHKW 2	1	SL2	250 kW <= Sollwert-Wärmeleistung <= 550 kW
3	Sollwert Leistung Parallelbetrieb BHKW 2 + BHKW1	1	SL3	500 kW < Sollwert-Wärmeleistung <= 700 kW
4	Sperre Modulation	2	SpMod	Puffertemperatur T7 < Sollwert
5	Freigabe Modulation	2	FrMod	Puffertemperatur T3 > Sollwert
6	Pufferentladezustand	3	PEN	Sollwert-Wärmeleistung > Erzeugung BHKWs
7	Pufferbeladezustand	4	PBE	VL-Temperatur Heizkreis > Sollwert
8	Sollwert Abschaltung Motoreintritt BHKW 1	5	AUSB1	Rücklauftemperatur BHKW 1 >= Grenzwert
9	Sollwert Abschaltung Motoreintritt BHKW 2	5	AUSB2	Rücklauftemperatur BHKW 2 >= Grenzwert
Ausgänge:				
10	Schutz (Aus)	1	AUS	BHKW 1 und 2 aus
11	Stufe 1 BHKW	1	S1	BHKW 1 Einzelbetrieb
12	Stufe 2 BHKW	1	S2	BHKW 2 Einzelbetrieb
13	Stufe 3 BHKW	1	S3	BHKW Parallelbetrieb
14	Modulationsbetrieb	2	MOD	Modulation freigegeben
15	Pufferentladung	3	PE	Puffer wird entladen
16	Pufferbeladung	4	PB	Puffer wird beladen
Zeitglieder:				
17	Wartezeit Hochschalten		T5	T5 (Einschaltverzögerung)
18	Wartezeit Runterschalten		T15	T15 (Abschaltverzögerung)

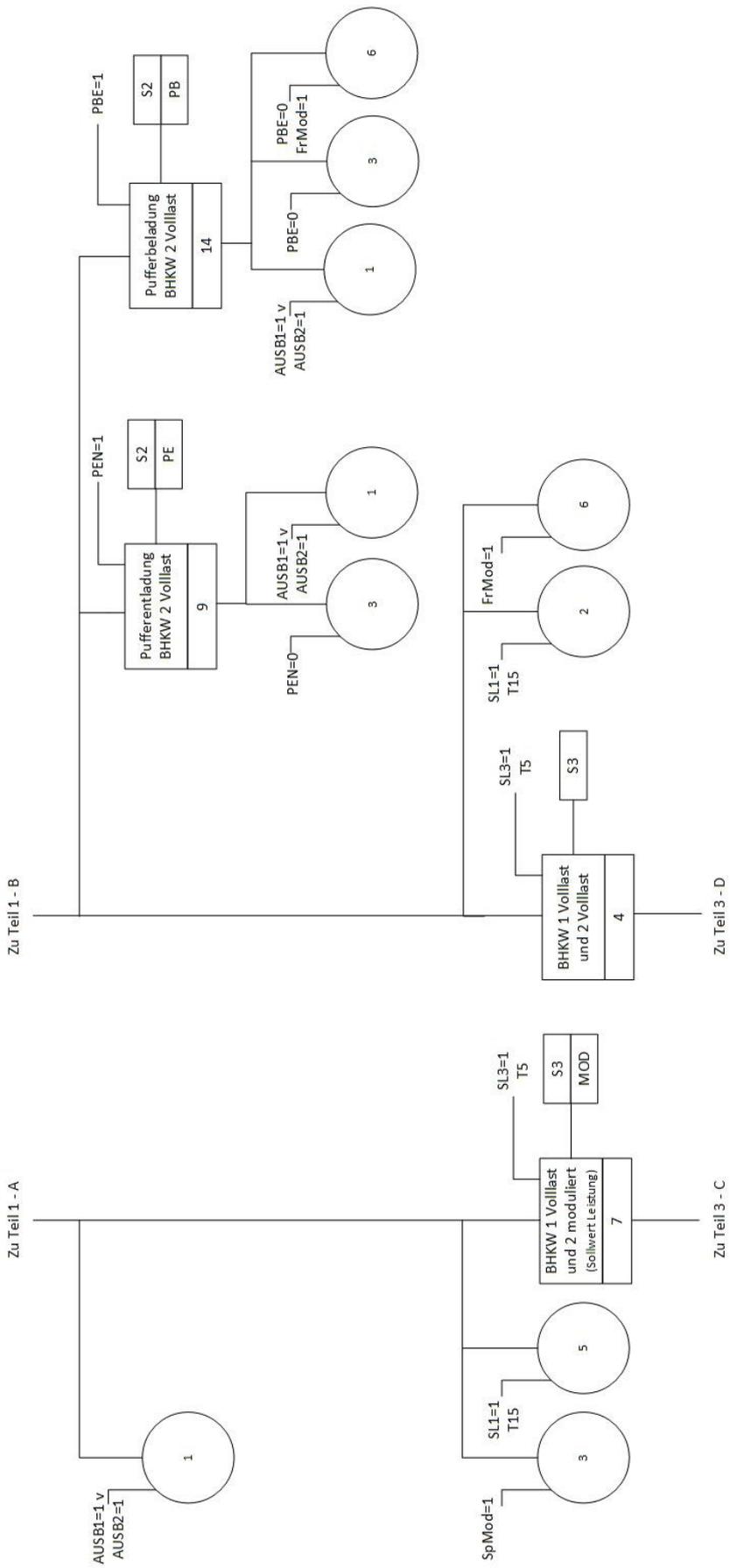
9.3 Muster-Datenpunktliste für Energiemonitoring

Untergruppe	Datenpunkt	Wichtig-keit	Zeitinter-vall	Einheit	Anforderungen Messeinrich-tung
BHKW	Elektrische Ist-Leistung	notwendig	1 min	kW	
BHKW	Elektrische Energieerzeugung	notwendig	15 min	kWh	geeicht
BHKW	Elektrischer Hilfsenergieverbrauch	notwendig	15 min	kWh	geeicht
BHKW	Elektrische Überschusseinspeisung	notwendig	15 min	kWh	geeicht
BHKW	Thermische Ist-Leistung	optional	15 min	kW	
BHKW	Wärmemengen	notwendig	15 min	kWh	geeicht
BHKW	Brennstoffverbrauch	notwendig	15 min	kWh	geeicht
BHKW	Gasdruck	optional	15 min	mbar	
BHKW	Gastemperatur	optional	15 min	°C	
BHKW	VL-Temperatur	notwendig	1 min	°C	
BHKW	RL-Temperatur	notwendig	1 min	°C	
BHKW	Betriebsstunden	notwendig	1 h	h	
BHKW	Startanzahl	notwendig	1 h	-	
BHKW	Betriebsmeldung	optional	15 min	-	
BHKW	Freigabe Modulationsbetrieb	optional	15 min	-	
BHKW	Freigabe	optional	15 min	-	
Heizzentrale	Wärmeabnahme Ist-Leistung	notwendig	15 min	kW	
Heizzentrale	Wärmebedarf	notwendig	15 min	kWh	geeicht
Heizzentrale	RL-Temperatur Heizkreis	optional	1 min	°C	
Heizzentrale	VL-Temperatur Heizkreis	optional	1 min	°C	
Heizzentrale	Wärmebedarf Unterverteilungen	optional	15 min	kWh	geeicht
Heizzentrale	Strombezug gesamt	notwendig	15 min	kWh	geeicht
Heizzentrale	Brennstoffverbrauch gesamt	notwendig	15 min	kWh	geeicht
Heizzentrale	Außentemperatur	notwendig	15 min	°C	
Heizzentrale	Sollwertvorgaben	notwendig	1 h	-	
Heizzentrale	Auswahlfühler	optional	15 min	-	
Heizzentrale	Brennwert / Heizwert	optional	Bei Bedarf	kWh/kg kWh/Nm ³	
Pufferspeicher	Pufferspeichertemperaturen	notwendig	1 min	°C	

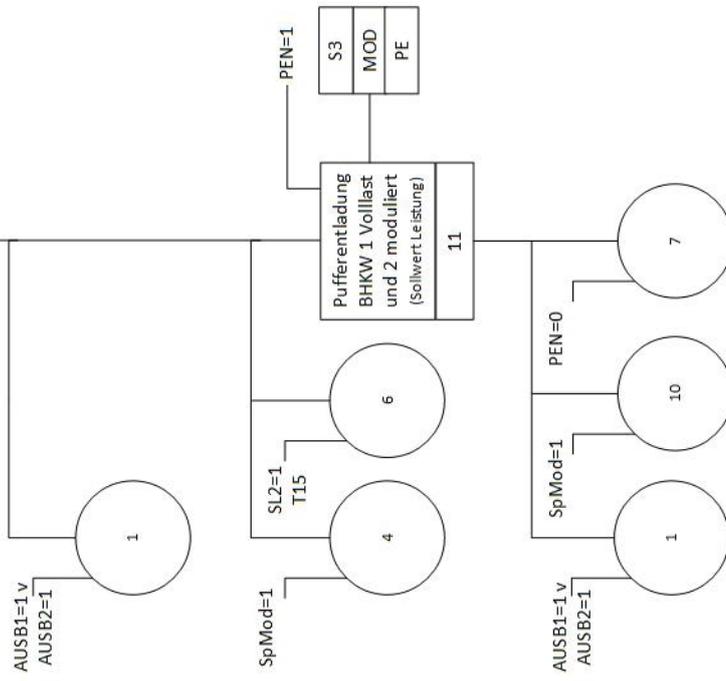
Pufferspeicher	Pufferspeicher-Füllstand	optional	1 min	%	
Kessel	Betriebsmeldung	optional	15 min	-	
Kessel	VL-Temperatur	optional	1 min	°C	
Kessel	RL-Temperatur	optional	1 min	°C	
Kessel	Thermische Ist-Leistung	notwendig	1 min	kW	
Kessel	Wärmemenge	notwendig	15 min	kWh	geeicht
Kessel	Brennstoffverbrauch	notwendig	15 min	kWh	geeicht
Kessel	Gasdruck	optional	15 min	mbar	
Kessel	Gastemperatur	optional	15 min	°C	
Kessel	Freigabe	optional	15 min	-	

9.4 Zustandsdiagramm der BHKW-Anlage D





Zu Teil 2 - C



Zu Teil 2 - D

