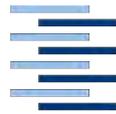


C4DSI

Center for Demand Side Integration



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

BHKW für die Energiewende: Analyse stromgeführter Anlagenvarianten am
Beispiel des wärmenetzgekoppelten Bürgerkraftwerkes KEBAP

Masterthesis

Master for Renewable Energysystems

vorgelegt von

Maurizio Galati
2038259

Hamburg

am 20.Mai 2013

Gutachter: Prof. Dr. A. Gregorzewski (HAW Hamburg)

Gutachter: Dipl.-Ing. H. Schäfers (FH) (HAW Hamburg, C4DSI)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt im
Center For Demand Side Integration (C4DSI)

Inhaltsverzeichnis

1. VERZEICHNISSE	6
1.1 ABILDUNGSVERZEICHNIS.....	6
1.2 TABELLENVERZEICHNIS.....	9
1.3 FORMELVERZEICHNIS.....	9
2. EINLEITUNG	11
3. AUFGABENSTELLUNG	13
3.1 BESCHREIBUNG DER BETRIEBSKONZEPTE.....	14
4. STAND DER TECHNIK	17
4.1 BLOCKHEIZKRAFTWERKE MIT VERBRENNUNGSMOTOREN.....	17
4.2 KRAFT-WÄRME-KOPPLUNG.....	19
4.3 DAS ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEM IN DER BRD.....	20
4.3.1 REGELENERGIE.....	22
4.3.2 STROMPREIS	23
4.3.3 BILANZKREIS UND AUSGLEICHSENERGIE	25
4.3.4 STROMGEFÜHRT BETRIEBSWEISE VON BHKW	25
5. DAS KULTURENERGIEBUNKERALTONAPROJEKT	27
5.1 DER BUNKER	29
5.2 RAHMENBEDINGUNGEN DES PROJEKTS.....	29
5.2.1 MONETÄRE RAHMENBEDINGUNGEN	29
5.2.2 SONSTIGE RAHMENBEDINGUNGEN.....	30
5.2.3 WÄRMEKUNDEN.....	30
5.2.4 NUTZUNG DES FERNWÄRMENETZES	30
5.2.5 SPEICHERGRÖÖBE	31
5.2.6 PLATZBEDARF.....	31
6. SIMULATIONSMODELLE.....	32
6.1 AUFBAU DER MODELLE.....	32

6.2	DER LINEARE OPTIMIERER – EIN TOOL ZUR KOSTENOPTIMIERTEN FAHRPLANGENERIERUNG	34
6.3	BESCHREIBUNG DER MODELL-VARIANTEN	35
6.3.1	VARIANTE A: WÄRMEGEFÜHRTER BETRIEB (REFERENZFALL)	35
6.3.2	VARIANTE B1: STROMGEFÜHRTER BETRIEB	36
6.3.3	VARIANTE B2: STROMGEFÜHRTER BETRIEB MIT ZWEI BAUGLEICHEN BLOCKHEIZKRAFTWERK-MODULEN	38
6.3.4	VARIANTE C: STROMGEFÜHRTER BETRIEB MIT NEGATIVER MINUTENRESERVELEISTUNG	38
6.3.5	VARIANTE D: STROMGEFÜHRTER BETRIEB MIT BILANZKREISAUSGLEICH	39
6.4	BESCHREIBUNG DER DATENGRUNDLAGEN UND ANNAHMEN	42
6.4.1	ZEITRAUM	42
6.4.2	THERMISCHES LASTPROFIL	42
6.4.3	VERLUSTE	43
6.4.4	PREISE	44
6.4.5	STROMPREIS	44
6.4.6	GASPREIS	44
6.4.7	KWK-VERGÜTUNG	44
6.4.8	NEGATIVE REGELLEISTUNG	45
6.4.9	AUSGLEICHSENERGIEPREIS	46
6.4.10	BHKW-KENNDATEN	46
6.4.11	INVESTITION TECHNIK	48
6.4.12	INVESTITION	48
6.5	ALTERNATIVE SIMULATION	49
6.6	SCHWACHSTELLEN UND SCHWERPUNKTE DES TOOLS	50
7.	<u>AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE</u>	<u>53</u>
7.1	TECHNISCHE ANALYSE	53
7.1.1	BETRIEBSSTUNDEN UND WÄRMEDECKUNGSANTEILE	54
7.1.2	STROMPRODUKTION	55
7.1.3	BETRIEBSSTARTS	56
7.1.4	DURCHSCHNITTLICHER STROMPREIS	57
7.1.5	SPEICHERGRÖÖE	58
7.1.6	AUSWERTUNG DES STROMGEFÜHRTEN BETRIEBES AM BEISPIEL VON ZWEI BHKW-LEISTUNGSKLASSEN	59
7.1.7	GEORDNETE JAHRESDAUERLINIE	60
7.1.8	SPEICHERAUSLASTUNG	60
7.1.9	WÄRMESPRODUKTION NACH ERZEUGER	63

7.1.10	TÄGLICHE BETRIEBSSTARTS, BETRIEBSSTUNDEN UND MAXIMALE STILLSTANDSZEITEN	63
7.1.11	AUSWERTUNG DER VORHALTUNG UND DES ABRUFS NEGATIVER MINUTENRESERVELEISTUNG (VARIANTE C).....	67
7.1.12	AUSWERTUNG BILANZKREISAUSGLEICH (VARIANTE D)	68
7.2	EMISSIONSBETRACHTUNG	69
7.2.1	SPEZIFISCHE CO ₂ -EMISSIONEN DER BHKW	69
7.2.2	ABSOLUTE CO ₂ -EMISSIONEN NACH ENERGIEART	71
7.2.3	RELATIVE CO ₂ -VERMEIDUNG	72
7.3	WIRTSCHAFTLICHE ANALYSE	73
7.3.1	ERLÖSE UND KOSTEN	73
7.3.2	GEMITTELTE GEWINNE UND WÄRME-GRENZPREIS	78
7.3.3	VARIANZ IM WÄRMEBEDARF	80
7.3.4	VARIANZ IM STROMPREISNIVEAU	82
7.3.5	VARIANZ ZWISCHEN BASELOAD- UND PEAKLOADPREIS	84
7.4	DISKUSSION DER SIMULATIONS DATEN.....	87
7.4.1	VARIANTE B1 UND B2	87
7.4.2	VARIANTE C.....	89
7.4.3	VARIANTE D.....	89
8.	<u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	91
9.	<u>LITERATURVERZEICHNIS.....</u>	92
10.	<u>VERSICHERUNG ÜBER SELBSTSTÄNDIGKEIT</u>	95

1. Verzeichnisse

1.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines netzgekoppelten Blockheizkraftwerkes, Quelle: ASUE	18
Abbildung 2: Primärenergieeinsparung bei der Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur getrennten Erzeugung gleicher Energiemengen, Quelle: ASUE	20
Abbildung 3: Schematische Darstellung von Grund-, Mittel, und Spitzenlast am Beispiel eines Tageslastgangs, Quelle: eigene Darstellung	21
Abbildung 4: oben: Verlauf des EEX-Spotmarktpreises des Jahres 2012, ...	24
Abbildung 5: Base- und Peakloadpreise auf Basis des Tagesindex, Quelle EEX.....	25
Abbildung 6: oben: Strompreisverlauf mit der Information über den Betriebszustand des BHKW (rot = BHKW in Betrieb), unten: exemplarischer Verlauf des kumulierten Wärmebedarfs (durchgezogene, rote Linie), der oberen Speichergrenze (gestrichelte, rote Linie) und der Differenz zwischen Wärmeproduktion und –bedarf (blaue Linie), Quelle: eigene Darstellung	37
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Fahrplangenerierung zur Reduzierung der Bilanzkreisabweichung, Quelle: eigene Darstellung ...	41
Abbildung 8: oben: gemittelte Außentemperatur pro Tag, Mitte: Thermisches Lastprofil in stündlicher Auflösung, unten: wöchentlicher Bedarfsverlauf einer Beispielwoche, Quelle: eigene Darstellung.....	43
Abbildung 9: blau: Staffelung der KWK-Vergütung, grün: maximaler Förderbetrag bei einer gesamten Vollbenutzungsdauer von 30.000 Stunden, Quelle: eigene Darstellung	45
Abbildung 10: Strom-, Wärme- und Brennstoffausbeute über die elektrische Leistung, Quelle: eigene Darstellung	47

Abbildung 11: Stromkennzahl in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKW, Quelle: eigene Darstellung.....	47
Abbildung 12: Investitionskosten und Förderung in Abhängigkeit der BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung.....	49
Abbildung 13: Jährliche Betriebsstunden und Anteil an der Wärmeproduktion des BHKW beziehungsweise der BHKW, Quelle: eigene Darstellung ...	54
Abbildung 14: Eingespeiste Strommengen über die BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung.....	55
Abbildung 15: Anzahl der Betriebstarts je Variante, Quelle: eigene Darstellung.....	56
Abbildung 16: Anzahl der Kaltstarts je Variante, Quelle: eigene Darstellung	57
Abbildung 17: Durchschnittlicher Strompreis je Variante und theoretisch erzielbarer Strompreis , Quelle: eigene Darstellung	58
Abbildung 18: Durchschnittlicher Strompreis über die BHKW-Leistung für unterschiedliche Speichergrößen, Quelle: eigene Darstellung	59
Abbildung 19: Geordnete Jahresdauerlinie und die geordneten Betriebsstunden für zwei ausgewählte BHKW-Leistungen der Variante B1, Quelle: eigene Darstellung	60
Abbildung 20: Speicherauslastung und BHKW-Flexibilität am Beispiel einer typischen Winter- und einer Sommerwoche, 1MW BHKW, Variante B1, Quelle: Eigene Darstellung	61
Abbildung 21: Speicherauslastung und BHKW-Flexibilität am Beispiel einer typischen Winter- und einer Sommerwoche, 8 MW BHKW, Variante B1, Quelle: Eigene Darstellung	62
Abbildung 22: Wärmeproduktion nach Erzeuger für zwei ausgewählte BHKW-Leistungen der Variante B1, Quelle: eigene Darstellung	63
Abbildung 23: Variante B1, 1 MW BHKW	64
Abbildung 24: Variante B1, 8 MW BHKW	65
Abbildung 25: oben: durchschnittlicher Strompreis pro Woche für die 1 MW und 8 MW-Variante, Mitte: durchschnittlicher Strompreis pro Woche, unten: durchschnittliche Heizlast pro Woche, Quelle: eigene Darstellung	66

Abbildung 26: Absolute und relative Häufigkeit von Leistungsvorhaltung und -Abruf, Variante C, Quelle: eigene Darstellung	67
Abbildung 27: Absolute und relative Reduzierung der Abweichung des Bilanzkreises über die BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung.....	69
Abbildung 28: Spezifische CO ₂ -Emissionen über die BHKW-Leistung für die Variante B1 (ein BHKW-Modul) und die Variante B2 (zwei BHKW-Module), Quelle: eigene Darstellung.....	70
Abbildung 29: Spezifische CO ₂ -Emissionen über die BHKW-Leistung für verschiedene Kraftwerkstypen nach (statistika, 2013) , Quelle: eigene Darstellung	71
Abbildung 30: Emissionen pro Jahr über die BHKW-Leistung nach Energieart im Vergleich zu konventioneller Erzeugung, Quelle: eigene Darstellung	72
Abbildung 31: Vermiedene CO ₂ -Emissionen über die BHKW- Leistung nach Energieart für die gesamte Energieproduktion, Quelle: eigene Darstellung.....	73
Abbildung 32: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante A (Referenzfall), Quelle: eigene Darstellung	74
Abbildung 33: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung.....	75
Abbildung 34: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante B2, Quelle: eigene Darstellung.....	76
Abbildung 35: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante C, Quelle: eigene Darstellung.....	77
Abbildung 36: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante D, eigene Darstellung	78
Abbildung 37: Gemittelter Gewinn über 20 Jahre über die BHKW-Leistung je Variante, eigene Darstellung.....	79
Abbildung 38: Wärme-Grenzpreis über die BHKW-Leistung je Variante, eigene Darstellung	80
Abbildung 39: Gemittelter Gewinn über die BHKW-Leistung für verschiedene Wärmebedarfe, Variante B2, Quelle: eigene Darstellung	81
Abbildung 40: Gemittelter Gewinn über die BHKW-Leistung für verschiedene Wärmebedarfe, Variante C, Quelle: eigene Darstellung	82

Abbildung 41: Absolute Veränderung des Gewinnes über die BHKW-Leistung bei Varianz im Strompreisniveau, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung.....	83
Abbildung 42: Relative Veränderung des Gewinns über die BHKW-Leistung bei Varianz im Strompreisniveau, Variante B1 und C, Quelle: eigene Darstellung.....	84
Abbildung 43: Spreizung des Strompreises, Quelle: eigene Darstellung	85
Abbildung 44: Absolute Veränderung des Gewinns bei Varianz zwischen Baseload- und Peakloadpreis, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung	86
Abbildung 45: Absolute Veränderung des Gewinns bei Varianz zwischen Baseload- und Peakloadpreis, Variante C, Quelle: eigene Darstellung..	86

1.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Vergleich der Simulationsergebnisse von zwei verschiedenen Optimierern, Quelle: eigene Darstellung.....	50
--	----

1.3 Formelverzeichnis

Gesamtwirkungsgrad BHKW Ausdruck I (1)	18
Gesamtwirkungsgrad BHKW Ausdruck II (2)	18
Stromkennzahl (3)	18
Nebenbedingung des linearen Optimierers (4).....	34
Hauptbedingung des linearen Optimierers (5).....	34

Energie ist ein Grundbedürfnis, keine Ware!

2. Einleitung

Der Umbau der Stromerzeugungsinfrastruktur auf regenerative Energieträger ist langfristig alternativlos. Die Herausforderung der sogenannten Energiewende liegt im stetigen Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) bei gleichzeitigem Rückbau von klimaschädlichen Kohle- und risikoreichen Kernkraftwerken. Dieser Umbau soll ohne Beeinträchtigung der Versorgungssicherheit vollzogen werden. Durch die steigende Anzahl dargebotsabhängiger regenerativer Kraftwerke steigt auch der Anteil von fluktuierend eingespeistem Strom in das Stromnetz. Um diese Schwankungen in der Stromproduktion zu kompensieren und auch in Zukunft die Netzstabilität gewährleisten zu können, existieren drei grundlegende Möglichkeiten: die Anpassung des Strombedarfs an die Erzeugung, der Ausbau von Speicherkapazitäten und der Ausbau von flexibel steuerbaren Kraftwerken (vgl. (VDE-Studie, 2012)). Neben den ökologischen und gesundheitlichen Bedenken gegenüber den eingangs erwähnten konventionellen Kraftwerksarten, gibt es auch Vorbehalte aus technischer Perspektive: Kohle- und Kernkraftwerke, die hauptsächlich Grundlast liefern, dominieren den Kraftwerkspark in Deutschland und stellen einen Systemkonflikt bezüglich der Integration EE dar (SRU, 2009, S. 12). Das Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik Kassel prognostiziert, dass ein "Dauerbetrieb von konventionellen Kraftwerken in Zukunft abnimmt und diese einem flexibleren Fahrplan folgen müssen" (IWES, 2009).

Vor diesem Hintergrund ist die Rolle von dezentralen und regelbaren Blockheizkraftwerken im zukünftigen Energiesystem zu betrachten. Besonders Motor-BHKW sind für dynamische Lastwechsel und häufiges An- und Abfahren geeignet und zeichnen sich durch hohe Wirkungsgrade im Teillastbereich aus. Durch die Kombination von BHKW mit einem thermischen Speicher kann die Wärmeproduktion vom Wärmebedarf

entkoppelt werden. Damit ist die Voraussetzung für einen flexibel regelbaren Einsatz des BHKW gegeben.

3. Aufgabenstellung

In dieser Arbeit werden alternative Betriebsweisen von Blockheizkraftwerken analysiert und bewertet. Im Fokus der Analyse liegt ein optimierter Einsatz der erzeugten elektrischen Energiemengen. Die Grundlage für alternative Betriebsweisen ist durch die Verbindung eines BHKW mit einem thermischen Speicher gegeben. Dadurch können Wärmebedarf und Wärmeproduktion voneinander entkoppelt werden. Solange die Wärmeversorgung sichergestellt ist, also ausreichend Energie im Speicher vorhanden ist, kann der Betrieb des BHKW flexibel gestaltet werden und beispielsweise durch ein externes Signal geregelt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es zu untersuchen, unter welchen Bedingungen die Erlöse aus dem Verkauf der generierten Strommenge gesteigert werden können. Dies wird einerseits durch einen hohen durchschnittlichen Strompreis erzielt und andererseits durch die jährlich eingespeiste Gesamtmenge. Beides wird durch die Wahl der BHKW-Leistung beeinflusst. Für einen konstanten Nennwärmebedarf wird daher die BHKW-Leistung schrittweise von 0,5 MW bis 10 MW gesteigert und der Einfluss auf Kosten und Erlöse ermittelt.

Für unterschiedliche Betriebsvarianten werden für den stromgeführten Betrieb die ökonomischen Auswirkungen, die CO₂-Bilanzen und die technischen Anforderungen am Beispiel des KulturEnergieBunkerAltonaProjekts (vgl. Abschnitt 5) untersucht.

Für einen Nennwärmebedarf von 10 GWh und einem thermischen Speicher von 1000 m³ werden auf der Grundlage eines Referenzjahres die folgenden Anlagenvarianten analysiert und verglichen:

- Variante B1: Strompreis-optimierter Betrieb eines BHKW in Kombination mit einem Spitzenlastkessel.

- Variante B2: Diese Variante entspricht der B1 mit der Aufteilung der BHKW-Leistung auf zwei baugleiche Module.
- Variante C: Strompreis-optimierter Betrieb eines BHKW in Kombination mit einem Spitzenlastkessel und einer Elektrowiderstandsheizung. Zusätzliche Optimierung auf die Vorhaltung und Bereitstellung von negativer Minutenreserveleistung.
- Variante D: Strompreis-optimierter Betrieb eines BHKW bestehend aus zwei Modulen in Kombination mit einem Spitzenlastkessel. Zusätzliche Optimierung auf einen Bilanzkreisausgleich.

Als Referenzszenario dient ein wärmegeführter Betrieb eines BHKW in Kombination mit einem Spitzelastkessel.

Die generierten Daten werden den Initiator_innen von KEBAP zur Verfügung gestellt, um die Weiterentwicklung des Projektes zu unterstützen.

Außerdem sollen grundsätzliche Anforderungen an Technik und wirtschaftliche Rahmenbedingungen für stromgeführte BHKW analysiert werden.

3.1 Beschreibung der Betriebskonzepte

In der ersten stromgeführten Variante (Variante B1) wird ein BHKW in Kombination mit einem thermischen Speicher Strompreis-optimiert betrieben. Die Flexibilität im BHKW-Fahrplan wird dazu genutzt um hauptsächlich in den Stunden in Betrieb zu gehen, in denen die elektrische Energie hoch vergütet wird. Als Preissignal wird der stündlich fluktuierende Spotmarkt-Strompreis der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig herangezogen. Die Flexibilität in der Wahl der Betriebsstunden ist dabei nur dann gegeben, solange der thermische Speicher weder leer noch komplett beladen ist. Die Einhaltung der thermischen Regelungsgrenzen ist daher die Hauptbedingung für den BHKW-Betrieb. Die Auswahl der ertragreichsten Stunden nach dem Börsenstrompreis ist die Nebenbedingung.

Die Variante B2 unterscheidet sich von der Variante B1 lediglich in der Aufteilung der gesamten BHKW-Leistung auf zwei baugleiche BHKW-Module. Dadurch erweitert sich das Leistungsband, welches die BHKW zusammen bereitstellen können. Anstatt im Sommer bei geringem Wärmebedarf den Spitzenlastkessel zu betreiben, kann der Bedarf durch ein Modul gedeckt werden. Ein weiterer finanzieller Vorteil kann unter bestimmten Bedingungen mit der KWK-Vergütung erreicht werden. Liegt zwischen der Inbetriebnahme der Module ein ganzes Jahr, so wird die erzeugte elektrische Energie beider Module separat vergütet.

Die Variante C ist eine Erweiterung der Variante B1. Hier wird neben der Optimierung auf den Börsenstrompreis zusätzlich einerseits die Vorhaltung und andererseits die Bereitstellung negativer Regelleistung (vgl. 4.3.1) vergütet. Im Falle der Bereitstellung negativer Reserveleistung, also dem Abschalten eines Stromerzeugers, wird das BHKW abgeschaltet und zusätzlich eine Elektrowiderstandsheizung (im Folgenden nur Heizstab genannt) betrieben. Diese versorgt anstelle des BHKW den Speicher mit thermischer Energie und kann somit die anzubietende Reserveleistung mehr als verdoppeln.

In der Variante D wird zusätzlich zu einer Optimierung auf den Börsenstrompreis der BHKW-Betrieb genutzt, um Abweichungen innerhalb eines Bilanzkreises zu kompensieren beziehungsweise zu reduzieren. Für diese Variante stehen Prognose- und Einspeisedaten einer 4 MW Windenergieanlage zur Verfügung. Abweichungen von dem angemeldeten Fahrplan der Windenergieanlage müssen durch den Zu- oder Verkauf sogenannter Ausgleichsenergie zu vorgegeben Ausgleichsenergiepreisen bilanziell kompensiert werden. Mit Hilfe dieses Modells soll untersucht werden, welche BHKW-Leistung die größte Reduzierung der Bilanzkreisabweichung erreicht und welche finanziellen Auswirkungen dies hat.

Als Referenzfall (Variante A) wird ein wärmegeführtes BHKW herangezogen, bei dem die erzeugte Strommenge nach dem üblichen Baseloadpreis des jeweiligen Quartals vergütet wird. Dimensioniert wird dieses Kraftwerk nach der Faustformel für wärmegeführte BHKW des „BHKW-Check“, das von der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt herausgegeben wurde (HGC Hamburg, 2011). Mit dieser Dimensionierung wird das Kraftwerk in erster Linie im Dauerbetrieb betrieben und somit eine hohe Anzahl jährlicher Betriebsstunden erreicht. Das BHKW produziert dabei lediglich einen Teil der benötigten Wärmemenge, die Differenz wird hauptsächlich durch einen Spitzenlastkessel erzeugt.

4. Stand der Technik

4.1 Blockheizkraftwerke mit Verbrennungsmotoren

Für Blockheizkraftwerke (BHKW) mit Verbrennungsmotoren kommen technisch angepasste Motoren aus dem Bereich der PKW, LKW oder Schiffsmotorentechnik zum Einsatz. Die wichtigsten Bestandteile sind ein Verbrennungsmotor, ein Generator, ein oder mehrere Wärmetauscher und eine Steuereinheit. Der Motor wandelt die chemisch gebundene Energie des Brennstoffes in Rotationsenergie um, diese wiederum wird durch den Generator in elektrische Energie gewandelt. Durch Wärmetauscher im Kühlwasser- und Schmierölkreislauf sowie in der Abgasführung kann ein Großteil der gleichzeitig freigesetzten thermischen Energie nutzbar gemacht werden. BHKW existieren in Leistungsgrößen von einigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt. Sie zeichnen sich durch ihre hohen Brennstoffausnutzungsgrade von bis zu 99 % aus (ASUE, 2011, S. 9). Sie besitzen im Vergleich zu Gasturbinen ein deutlich besseres Teillastverhalten und können mit nahezu allen gasförmigen und flüssigen Brennstoffen betrieben werden (HGC Hamburg, 2011, S. 7).

Weitere Vorteile sind

- hohe Lastgradienten,
- niedrige Mindestlast,
- häufiges An- und Abfahren möglich.

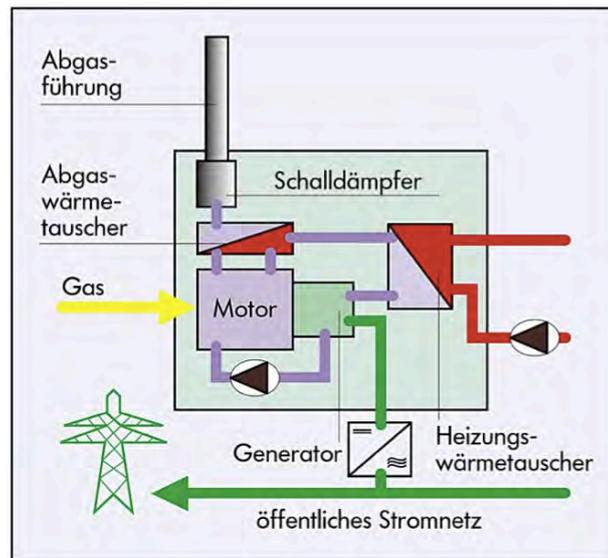


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines netzgekoppelten Blockheizkraftwerkes, Quelle: ASUE

Um verschiedene BHKW miteinander und ähnlichen Energiewandlungsanlagen vergleichen zu können, wurden Kennzahlen definiert, die im Folgenden erläutert werden.

Der Gesamtwirkungsgrad eines BHKW ist die Summe aus dem elektrischen und dem thermischen Wirkungsgrad:

$$\eta_{ges} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad (1)$$

Ebenso ist der Gesamtwirkungsgrad der Quotient aus der gesamten Nutzenergie und der eingesetzten Primärenergie:

$$\eta_{ges} = \frac{Q_{el} + Q_{th}}{Q_P} = \frac{Q_{el}}{Q_P} + \frac{Q_{th}}{Q_P} \quad (2)$$

Eine weitere Kennzahl bezeichnet das Verhältnis von elektrischer Leistung zu Wärmestrom:

$$\sigma = \frac{P_{el}}{\dot{Q}} \quad (3)$$

Die Stromkennzahl wird nicht nur für BHKW verwendet, sondern kann für alle Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (siehe 4.2) bestimmt werden.

4.2 Kraft-Wärme-Kopplung

Kraft-Wärme-Kopplung bezeichnet die gleichzeitige Nutzung der Abwärme bei der Gewinnung von elektrischer Energie. Die thermische Energie wird beispielsweise für Heizzwecke oder als Prozesswärme verwendet. KWK-Anlagen reichen von einigen Kilowatt (zum Beispiel bei BHKW) bis zu mehreren hundert Megawatt (zum Beispiel bei Dampfkraftwerken). Sie zeichnen sich durch den hohen Brennstoffausnutzungsgrad im Vergleich zu der separaten Wandlung von thermischer und elektrischer Energie aus. Dieses entscheidende Merkmal einer KWK-Anlage ist in Abbildung 2 dargestellt. In diesem Beispiel werden von 100 % des eingesetzten Brennstoffes ca. 38 % in Strom und 50 % Wärme umgewandelt, die restlichen 12 % gehen in Form von nicht nutzbarer Abwärme an die Umwelt. Um die gleiche Menge an Strom und Wärme in getrennten Umwandlungsanlagen bereitzustellen, müssen 166 % Primärenergie eingesetzt werden. Die Gesamtverluste betragen 72 % bei der Stromwandlung im Kraftwerk und 6 % bei der Wärmegewinnung im Referenzkessel.

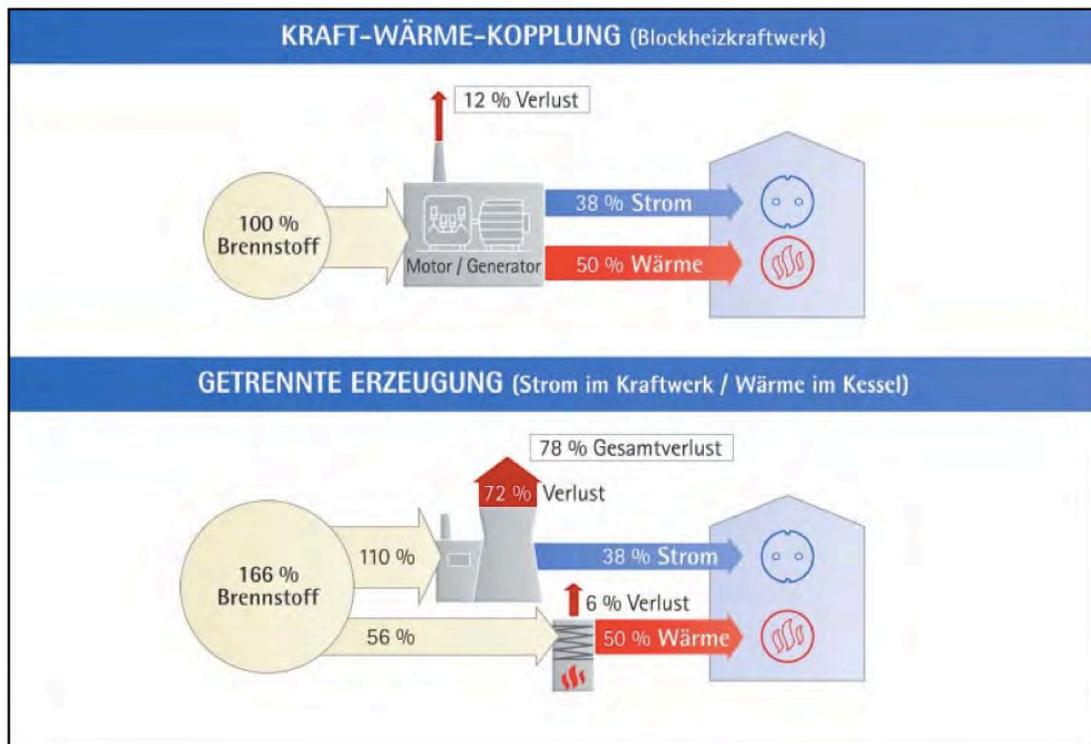


Abbildung 2: Primärenergieeinsparung bei der Kraft-Wärme-Kopplung im Vergleich zur getrennten Erzeugung gleicher Energiemengen, Quelle: ASUE

Die Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit propagiert mit dem 2007 verabschiedeten „Integrierten Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP)“ eine Steigerung der aus KWK-Anlagen erzeugten Stromproduktion von zur Zeit etwa 12 %. Dies soll mit einer Novelle des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes erreicht werden, durch das die elektrische Energiemenge aus KWK-Anlagen mit dem sogenannten KWK-Bonus vergütet wird (BMU, 2007).

4.3 Das elektrische Energiesystem in der BRD

Elektrische Energie ist für große Teile der Bevölkerung ein unverzichtbarer Bestandteil des Alltages geworden und ihre permanente Verfügbarkeit wird als selbstverständlich erachtet.

Dabei steht hinter der elektrischen Energieversorgung ein komplexes System, das die drei Elemente Erzeugung, Verteilung und Verbrauch miteinander verbindet. Da elektrische Energie zur Zeit nicht in relevanten Mengen gespeichert werden kann, müssen Bedarf und Erzeugung zu jedem Moment im Gleichgewicht sein. Auf der Erzeugerseite steht dafür ein umfangreicher Kraftwerkspark zur Verfügung, der durch die sogenannte Energiewende zukünftig einem bedeutungsvollen Wandel unterzogen wird. Kraftwerke werden entsprechend ihrer technischen Eigenschaften unterteilt in Grundlast-, Mittellast-, und Spitzenlastkraftwerke. Diese Einteilung bezieht sich auf das Potenzial, auf Laständerungen zu reagieren. Grundlastkraftwerke besitzen meist eine geringe Laständerungsgeschwindigkeit und werden aus ökonomischen Gesichtspunkten bei konstanter Leistungsabgabe betrieben (Kamper, 2010, S. 19). Sie liefern den ganztägig vorhanden Grundbedarf an elektrischer Energie (SRU, 2009). Der Bedarf oberhalb dieses Grundsockels wird in Mittel- und Spitzenlast unterteilt und entsprechend von Mittel- und Spitzenlastkraftwerken gedeckt.

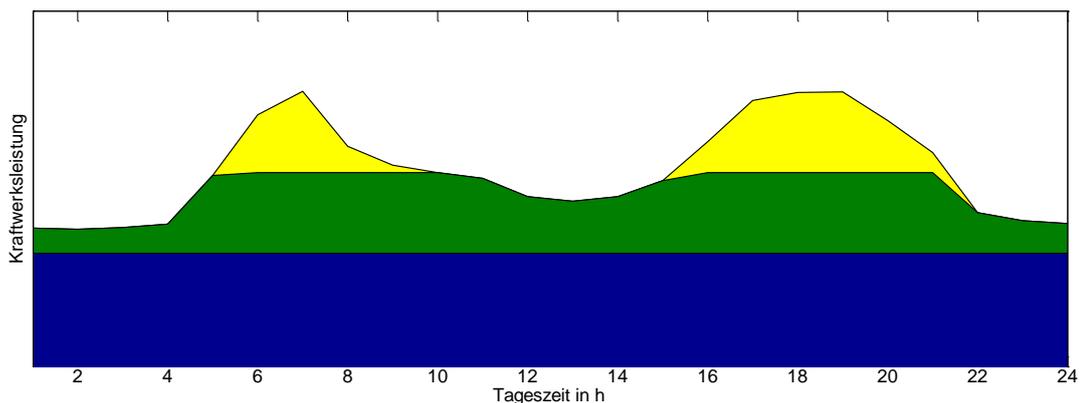


Abbildung 3: Schematische Darstellung von Grund-, Mittel-, und Spitzenlast am Beispiel eines Tageslastgangs, Quelle: eigene Darstellung

Abbildung 3 zeigt diese Unterteilung am Beispiel eines Tageslastgangs. Für jeden Tag wird anhand einer Prognose des Strombedarfes ermittelt, welche Kraftwerke mit wie viel Leistung betrieben werden, um die Energie zu produzieren, die gleichzeitig dem Netz entnommen wird.

Aufgrund verschiedener Ursachen wie zum Beispiel Kraftwerksausfälle und Prognosefehler kommt es permanent zu unerwarteten oder unvermeidbaren Abweichungen dieses Gleichgewichtes (CONSENTEC, 2008, S. 3). Dafür wurde ein Regelsystem installiert, dass im Abschnitt 4.3.1 beschrieben wird.

4.3.1 Regelenergie

Wird dem elektrischen Netz mehr Energie entnommen als eingespeist wird, fällt die Netzfrequenz von 50 Hz ab. Umgekehrt steigt die Frequenz bei einer Überdeckung. Als Regelenergie wird die Energie bezeichnet, die eingesetzt wird, um diese Schwankungen nicht weiter ansteigen zu lassen und auszugleichen. Dafür wurde ein ausgefeiltes System entwickelt, dass die benötigte Energie in Primär-, Sekundär- und Minutenreserveleistung nach ihrer Aktivierungs- und Änderungsgeschwindigkeit unterteilt. Die Primärregelleistung hat die Aufgabe, den Frequenzabfall oder –anstieg zu stoppen. Sie wird für kurzfristige Schwankungen innerhalb von 30 Sekunden eingesetzt (ZEBAU, 2012, S. 8). Um die Frequenz wieder auf den Sollwert zurückzuführen, wird die Sekundärregelleistung verwendet. Die Minutenreserveleistung (Tertiärregelleistung) kommt bei Abweichungen über einen längeren Zeitraum zum Einsatz, um die Sekundärregelleistung abzulösen, damit diese wieder zur Verfügung stehen kann. Im Gegensatz zur Primär- und Sekundärregelleistung muss die Minutenreserve manuell aktiviert werden.

Der Einsatz von Regelleistung muss seit dem Jahr 2007 öffentlich ausgeschrieben werden und kann auf der Internetplattform www.regelleistung.net eingesehen werden. Vergütet wird auf der einen Seite die Vorhaltung von Regelleistung. Alle Angebote für einen Ausschreibungszeitraum werden sortiert und es bekommen mit dem niedrigsten Leistungspreis beginnend alle Angebote den Zuschlag, bis die Gesamtsumme der benötigten Leistungsvorhaltung erreicht ist. Entsprechend wird eine Abrufreihenfolge anhand eines abgegebenen Arbeitspreises erstellt.

Nach dieser Merit-Order-Liste, der Einsatzreihenfolge der Kraftwerke, werden die Angebote mit dem niedrigsten abgegebenen Arbeitspreis ausgewählt. Die Wahrscheinlichkeit, für die Leistungsvorhaltung oder den Leistungsabruf ausgewählt zu werden, ist daher abhängig von den abgegebenen Preisen der übrigen Marktteilnehmer_innen und losgelöst von Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit.

4.3.2 Strompreis

Der größte Handelsplatz in Deutschland für elektrischen Strom ist die *European Energy Exchange* (EEX) in Leipzig. An dieser Börse werden neben Strom unter anderem auch Erdgas und Emissionsrechte europaweit gehandelt. Um ein Produkt an der EEX zu vermarkten muss jede_r Teilnehmer_in die Zulassungsordnung der EEX AG erfüllen. Der Stromhandel an der EEX unterscheidet sich nach Lieferzeitraum und -punkt und wird auf separaten Märkten gehandelt. Es wird unterschieden zwischen dem Terminmarkt für den langfristigen Handel für den aktuellen Monat bis für die nächsten Jahre, dem Spotmarkt für Stromlieferungen innerhalb von 1-2 Tagen und dem Intradaymarkt für kurzfristige Lieferungen bis zu 45 min vor Lieferung.

In der Abbildung 4 ist der Verlauf des stündlichen Spotmarktpreises des Jahres 2012 dargestellt. Der Preis schwankte zwischen -221,99 €/MWh und 210 €/MWh bei einem Mittelwert von 42,60 €/MWh. Es ist zu erkennen, dass die Maximal- beziehungsweise die Minimalwerte Sonderfälle sind und der Preis über das Jahr gesehen geringen, kontinuierlichen Schwankungen ausgesetzt ist.

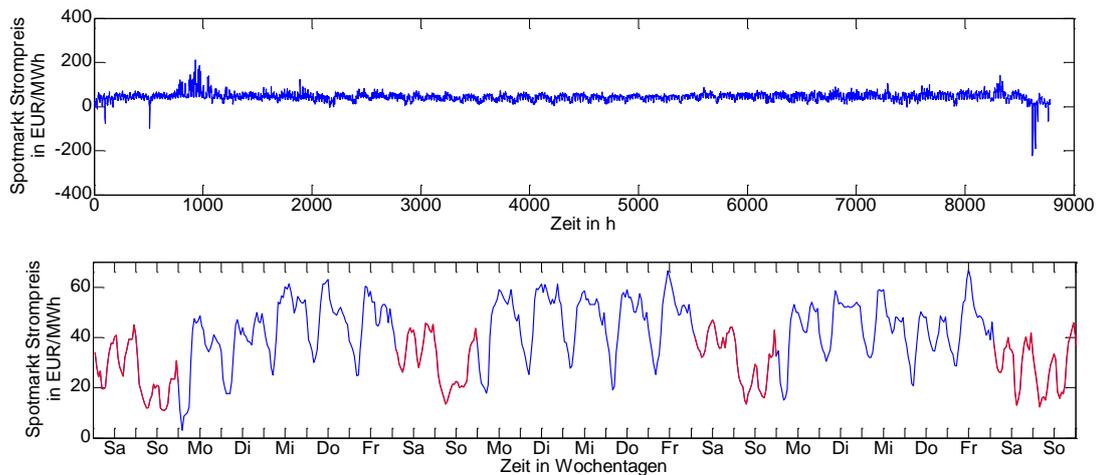


Abbildung 4: oben: Verlauf des EEX-Spotmarktpreises des Jahres 2012, unten: Strompreisverlauf über Wochentage Quelle: EEX

Exemplarisch ist in Abbildung 4 der Preisverlauf vom 23. Juni bis zum 15. Juli 2012 dargestellt. Das Verhältnis zwischen dem Preis am Tag und in der Nacht unterliegt einer Systematik und spiegelt vereinfacht das Verhältnis zwischen Stromnachfrage und Stromangebot wieder. Auch am Wochenende ist diese Systematik zu erkennen, denn an diesen Tagen sind die geringsten Strompreise abzulesen.

In Spitzenlastzeiten wird der Preis als Peakloadpreis und zu Grundlastzeiten als Baseloadpreis bezeichnet. In der Abbildung 5 ist die Höhe des Base- und Peakloadpreises seit dem Jahr 2009 dargestellt. Für eine stromgeführte ist neben der absoluten Höhe auch die Differenz zwischen beiden Preisen relevant. Diese Differenz ist von 8,75 EUR/MWh im Jahr 2009 auf 5,06 EUR/MWh im Jahr 2012 gesunken.

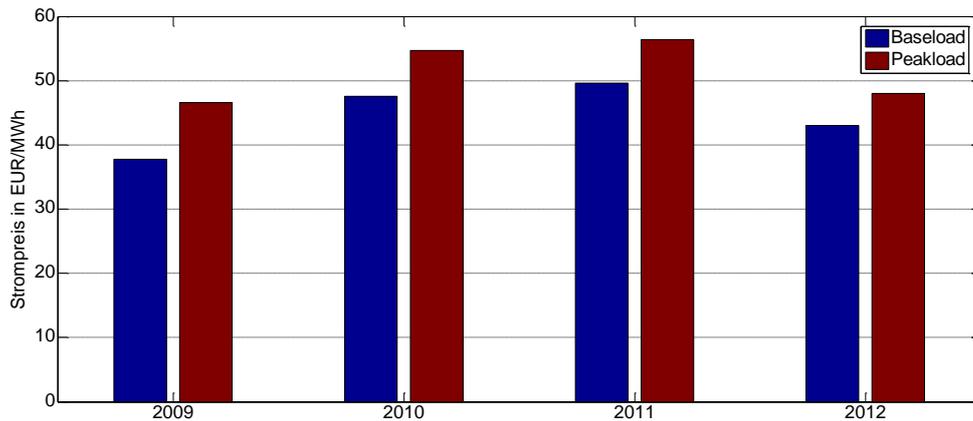


Abbildung 5: Base- und Peakloadpreise auf Basis des Tagesindex, Quelle EEX

4.3.3 Bilanzkreis und Ausgleichsenergie

Ein Bilanzkreis ist im Gegensatz zu einer geografisch definierbaren Regelzone ein virtuelles Konstrukt, in dem alle elektrischen Energieströme in den Bilanzkreis hinein oder heraus erfasst und miteinander verrechnet werden. Für jeden Bilanzkreis gibt es einen Bilanzkreisverantwortlichen, der für den Ausgleich der Leistungsbilanzen für jedes 15-Minuten-Intervall zuständig ist (Kurscheid, 2009, S. 21). Mit Hilfe von Prognosen meldet der Bilanzkreisverantwortliche bei dem Übertragungsnetzbetreiber für den Folgetag, wie groß die Strommenge ist, die ins Netz eingespeist wird oder aus dem Netz entnommen wird.

Mit Ausgleichsenergie wird die Energiemenge bezeichnet, die die Abweichungen von den Bilanzkreisprognosen ausgleicht. Sie ist die Umlage der Abrufkosten eingesetzter Regelenergie.

4.3.4 Stromgeführt Betriebsweise von BHKW

Die Beschreibung "stromgeführt" besagt, dass der BHKW-Betrieb sich in erster Linie auf die Deckung eines definierten Strombedarfs ausrichtet.

Das kann beispielsweise in einem Inselnetz der Strombedarf von einem oder mehreren Verbrauchern sein. Als stromgeführter Betrieb wird allgemein der Fokus auf die Erzeugung elektrischer Energie bezeichnet, auch wenn damit nicht die Deckung eines spezifischen Bedarfes angestrebt wird. So wird von einer netzorientierten Betriebsweise gesprochen, wenn sich der BHKW-Betrieb an der Netzlast orientiert. Für weitere Informationen über die Vorteile einer netzorientierten Betriebsweise von Mini-BHKW wird auf (Pielke, 2010) verwiesen.

5. Das KulturEnergieBunkerAltonaProjekt

Das Vorhaben des KulturEnergieBunkerAltona-Projektes, kurz KEBAP, ist es, in einen derzeit ungenutzten Luftschutzbunker in Hamburg Altona ein Kulturzentrum und ein Heiz(kraft)werk zu errichten. Der Bunker steht zwischen einem Wohngebiet und einer Parkanlage in der Schomburgstrasse 6-8 in Hamburg Altona. Er besteht aus zwei identischen Gebäudekomplexen, die direkt nebeneinander stehen. Daher kam der Gedanke, in die eine Hälfte des Gebäudes ein „Kulturteil“ und in den anderen ein „Energieteil“ zu installieren. In der Projektbeschreibung heißt es: „Die neuartige Mischung Kultur/Energie kommt sowohl den baulichen Gegebenheiten eines Bunkers als auch der Lage im Wohngebiet (Nahversorgung) entgegen. Die Kombination ist aus unserer Sicht besonders spannend, weil so der Bunker und seine neue Nutzung für den Stadtteil geöffnet und in diesem verankert werden (KEBAP e.V.). Der offene Charakter der Projektgruppe, die Möglichkeit der Mitbestimmung und Mitgestaltung standen von Beginn an im Vordergrund von KEBAP, wodurch es überhaupt erst zu der Zusammenarbeit im Rahmen dieser Abschlussarbeit gekommen ist.

Für die Ideensammlung, wie die Kulturräume genutzt werden können, wurden Informationsveranstaltungen organisiert und Anwohner_innen und weitere Interessierte eingeladen. Geplant ist der Umbau zu Bandproberäumen, Ateliers, Ausstellungsräumen, einem Tonstudio, einen großen Veranstaltungssaal und einer gastronomischen Einrichtung. Insgesamt stehen ca. 60 Räume zur Verfügung. Ziel bei der Nutzung der gegebenen Fläche ist die Mischung aus einer kommerziellen Vermietung und eine unkommerziellen Bereitstellung von öffentlichem Raum.

Im Fokus des „Energieteils“ steht die Bereitstellung regenerativ erzeugter Energie in Form von Wärme für einen eigenen Kundenkreis.

Diese erste Idee entwickelte sich im Verlaufe des Projektes weiter, so dass nun ebenfalls über die Einspeisung elektrischer Energie aus einer KWK-Anlage diskutiert wird.

Für den „Energieteil“ stehen daher mehrere Umsetzungsmöglichkeiten im Raum. Mit der Installation eines Biomasse-Heizkessels sind die Initiator_innen des Projektes 2011 an die Öffentlichkeit getreten. Als Energieträger soll feste Biomasse in Form von Holzhackschnitzeln genutzt werden. Zu beziehen sei diese als Durchforstungsholz aus Hamburger Parkanlagen und Gärten. Angestrebt wird eine Produktion thermischer Energie mit einer Leistung von drei bis vier Megawatt. Die Verteilung der Energie ist durch die Einspeisung in das Fernwärmenetz des Stromkonzerns Vattenfall Europa GmbH geplant. Eine Haupttrasse des Fernwärmenetzes liegt ca. 300 m entfernt vom Bunker und könnte als Anschlussstelle genutzt werden.

Eine weitere Umsetzungsmöglichkeit für den „Energieteil“ ist die Installation eines oder mehrerer Blockheizkraftwerke.

In einer ersten Machbarkeitsstudie, mit der das Ingenieurbüro ZEBAU GmbH im August 2011 beauftragt wurde, konnte die Wirtschaftlichkeit des Betriebes eines mit Holzhackschnitzeln befeuerten Heizkessels dargestellt werden. In einer Erweiterung dieser Machbarkeitsstudie wurde der Betrieb verschiedener BHKW-Typen und Nutzung verschiedener Energieträger untersucht. Ebenfalls wurde in dieser Studie ein BHKW-Betrieb mit zusätzlichem Verkauf von positiver Regelenergie untersucht. Laut Studie ist der Betrieb unter den betrachteten Parametern nicht wirtschaftlich darstellbar. Als Einflussfaktoren wurden geringe Laufzeiten des BHKW, nicht ausreichend hohe Preise für positive Regelenergie und niedriger veranschlagter Wärmepreis ausgemacht (ZEBAU, 2011).

An diese vorrangegangenen Machbarkeitsstudien soll diese Ausarbeitung anknüpfen und mögliche technische Konzepte für das Projekt in Aussicht stellen.

5.1 Der Bunker

Der sechsgeschossige Hochbunker wurde zwischen 1941 und 1943 erbaut und hat eine Kapazität, um ca. 3500 Menschen Schutz zu bieten. Die Gebäudehülle hat eine Wandstärke von 1,10 m, die Stärke der Decke liegt bei 1,40 m. Diese Faktoren und die Abwesenheit von Außenfenstern können sich positiv auf mögliche Schallemissionen aus dem Bunkerinneren auswirken.

5.2 Rahmenbedingungen des Projekts

Für die Bearbeitung meiner Simulationen wurden in Absprache mit den Initiator_innen von KEBAP e.V. einige Rahmenbedingungen festgelegt, die im folgenden Absatz erläutert werden.

5.2.1 Monetäre Rahmenbedingungen

Für die Simulationen wurde ein Arbeitspreis für die angebotene Fernwärme von 68 EUR/MWh angenommen. Damit orientiert sich dieser Wert an Angeboten konkurrierender Fernwärmeversorger von ca. 70 EUR/MWh. Ein Leistungspreis wird nicht betrachtet.

Die gesamten Investitionskosten für die Realisierung von KEBAP setzen sich aus den Kosten bezogen auf den Energieteil und den Kulturteil zusammen. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich die Kosten des Energieteils betrachtet, die ca. 70 % der Gesamtinvestitionen ausmachen. Auf der Grundlage einer KEBAP-internen Investitionsabschätzung für eine 2 x 2 MW-BHKW-Variante in Kombination mit ein 1000 m³ Wärmespeicher wird von einer Gesamtsumme von ca. 3,6 Mio. Euro ausgegangen. Darin enthalten sind Erwerbskosten, Umbaukosten, Projektierungs- und Planungskosten und die Investitionen der Anlagentechnik, wobei letztere ungefähr 2 Mio. Euro der Gesamtsumme ausmachen.

Vor diesem Hintergrund wird für die Simulation ein Teil der Kosten konstant gehalten, und ein Teil wird dynamisch an die jeweilige Kraftwerksgröße angepasst.

5.2.2 Sonstige Rahmenbedingungen

5.2.3 Wärmekunden

Die Anzahl der Wärmekunden beziehungsweise der Bedarf an jährlicher Wärmeproduktion konnte zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht exakt kalkuliert werden. In Absprache mit KEBAP e.V. wurde ein Nennwärmebedarf von jährlich 10 Gigawattstunden definiert und dieser Bedarf für alle untersuchten Varianten angenommen. Der Wert von 10 Gigawattstunden entspricht etwa dem Heiz- und Warmwasserbedarf von 1000 Haushalten im Bezirk Hamburg-Altona. Dem liegt ein durchschnittlicher Energieverbrauchswert der Gebäude von $156 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (vgl. (Kalkowsky, 2011, S. 78)) und einer mittleren Wohnungsgröße von 60 m^2 zugrunde. Mit Hilfe der Klimadaten aus dem Jahr 2012 kann daraus ein Spitzenbedarf mit einer Leistung von 3.600 kW ermittelt werden (vgl. 6.4.2).

5.2.4 Nutzung des Fernwärmenetzes

Die Vermarktung der Wärme wird von KEBAP e.V. mittels Durchleitung durch das Fernwärmenetz an „eigene“ Wärmekunden angestrebt. Dies wäre ein Novum im Hamburger Fernwärmesegment, welches bisher durch die beiden Stromkonzerne Vattenfall Europa GmbH (westliches Stadtgebiet und Zentrum) und Eon Hanse Wärme (östliches Stadtgebiet) dominiert werden. Für einen Anschluss an das Fernwärmenetz im Bezirk Altona müssen die von Vattenfall Europa GmbH festgelegten technischen Anschlussbedingungen berücksichtigt werden.

Detaillierte Anforderungen an Drücke und Temperaturen wurden im Rahmen dieser Arbeit ersetzt durch eine großzügige Annahme an Wärmeverlusten und eine konstante Temperaturdifferenz im Vor- und Rücklauf (vgl. 6.4.3).

5.2.5 Speichergröße

Für die Simulation wird mit der Speichergröße gerechnet, die entsprechend der gegebenen Räumlichkeiten maximal realisiert werden kann. Diese wird von KEBAP e.V. auf ein Volumen von 1000 m³ geschätzt. Lediglich für den Referenzfall, dem wärmegeführten Fall, wird mit einer Speichergröße von 100 m³ kalkuliert. Diese Größe ergab sich als Kompromiss, um einerseits einen deutlichen Gegensatz zu den stromgeführten Varianten herauszustellen und um andererseits ein realistisches Vergleichsszenario zu entwerfen, in dem mindestens ein Teil des zur Verfügung stehenden Raumes als Speicher genutzt werden würde.

Um eine Speichergröße von 1000 m³ in dem Bunker zu installieren sind mehrere Möglichkeiten gegeben. Eine Möglichkeit, die von KEBAP e.V. beschrieben wird, ist die Flutung bestimmter Räume, wobei die Innenwände verbleiben können und lediglich ein Bereich an den Außenwänden für Dämmung und Zirkulation umgebaut werden müsste. Eine detaillierte Ausarbeitung der Anforderungen des Wärmespeichers wird an dieser Stelle nicht angestrebt.

5.2.6 Platzbedarf

Im Energieteil des Bunkers befindet sich eine Halle mit einer Grundfläche von 143,8 m², die als Anlagenhalle umgebaut werden kann. Der Platzbedarf für zwei Blockheizkraftwerkmodule in der größten untersuchten Leistungsklasse (Variante C, 2 x 5 MW) inklusive Peripherie ist laut einer Anfrage an den BHKW-Hersteller 2G gegeben.

6. Simulationsmodelle

Um die unter 3.1 beschriebenen Betriebskonzepte bewerten und vergleichen zu können, wurden im Rahmen dieser Arbeit Simulationsmodelle verwendet, die für Produktionskapazitäten wie BHKW und Spitzenlastkessel kostenoptimierte Fahrpläne generieren. Dies wird mit Hilfe der numerischen Berechnungs-, Visualisierungs- und Programmiersoftware MATLAB der Firma MathWorks realisiert. Für die lineare Optimierung wird zusätzlich eine Erweiterung der Firma IBM mit dem Produktnamen „CPLEX“ verwendet (vgl. 6.2).

Für jede Anlagenkonstellation wird der Betrieb eines Jahres entsprechend des stündlichen Wärmebedarfes, des Strompreises, etc. simuliert. Die Generierung der Fahrpläne geschieht unter der Hauptbedingung, dass die thermischen Regelungsgrenzen nicht über- oder unterschritten werden. Die thermischen Regelungsgrenzen sind in diesem Fall der minimale und der maximale Speicherfüllstand.

6.1 Aufbau der Modelle

Das gesamte Simulationsmodell ist in vier Abschnitte unterteilt, die nacheinander durchlaufen werden. Im Folgenden wird der gesamte Programmablauf beschrieben und anschließend detailliert auf die einzelnen Abschnitte eingegangen.

Im ersten Abschnitt werden die benötigten Inputdaten eingelesen. Dazu zählt die Zeitreihe der Außentemperatur. Daraus wird später ein thermisches Lastprofil erstellt (6.4.2). Weiterhin wird eine Zeitreihe des Strompreises der Leipziger Strombörse eingelesen, die für die Erlöse der generierten Strommenge relevant ist.

Für die Variante C werden außerdem Zeitreihen des Leistungs- und Arbeitspreises und der Leistungswerte der negativen Minutenreserveleistung eingelesen. Für die Variante D werden Zeitreihen der Bilanzkreisabweichung und Ausgleichsenergiepreise benötigt.

Anschließend werden alle relevanten Parameter der technischen Komponenten wie die thermischen Leistungen der Produktionseinheiten, der minimale Teillastbereich und die Speichergröße definiert. An dieser Stelle wird die erste Schleife des Programmablaufes festgelegt, in der schrittweise die thermische Leistung des Blockheizkraftwerkes von 0,5 MW in 0,5 MW-Schritten auf 10 MW heraufgesetzt wird. Eine zweite Schleife variiert den jährlichen Wärmebedarf von 8 bis 12 GWh in ein Gigawattstundenschritten. Für jede Variante werden demnach 20 verschiedene BHKW-Leistungen und 5 Wärmebedarfe eingesetzt und der Betrieb jeweils für ein ganzes Jahr simuliert.

Im dritten Schritt werden aus den gegebenen Zeitreihen und den Parametern der technischen Komponenten für jede Stunde des Jahres ermittelt, welche Gaskosten und welche Gewinne aus dem Stromverkauf und der KWK-Vergütung erzielt werden können. Da die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf durch die festgelegten 10 GWh Jahreswärmebedarf konstant bleiben, werden sie an dieser Stelle nicht hinzugerechnet. Die Ausgabe dieses dritten Abschnittes ein Kostenvektor für jeden Erzeugertyp.

Im vierten Schritt, der linearen Optimierung, wird für den betrachteten Zeitraum der kostenoptimierte Fahrplan unter der Berücksichtigung des Speichervermögens für das BHKW, den Spitzenlastkessel und gegebenenfalls den Heizstab generiert.

Im anschließenden Schritt, der nicht mehr zum Modell hinzugerechnet wird, werden auf der Grundlage der Fahrpläne alle relevanten Parameter für die wirtschaftliche, ökologische und technische Auswertung errechnet und für die anschließende Visualisierung vorbereitet.

6.2 Der lineare Optimierer – ein Tool zur kostenoptimierten Fahrplangenerierung

Der verwendete lineare Optimierer der Firma IBM ist ein Werkzeug um lineare, gemischt-ganzzahlige und quadratische mathematische Problemstellungen zu lösen. Das Tool ist sehr leistungsfähig und kann nach Angaben von IBM mathematische Probleme mit einigen Millionen Parametern lösen (IBM, 2013). Mit seiner Hilfe werden die kostenoptimierten Fahrpläne generiert. Dies geschieht für jedes betrachtete Zeitintervall unter den zwei folgenden Bedingungen:

- Nebenbedingung: Kosten minimieren

$$\vec{f} * \vec{c} \text{ min.} \quad (4)$$

mit \vec{f} : Fahrplanvektor und \vec{c} : Kostenvektor

- Hauptbedingung: thermische Regelungsgrenzen dürfen nicht geschnitten werden

$$A * \vec{f} = \vec{b} \quad (5)$$

A : Matritze mit Informationen über den Wärmebedarf

\vec{b} : Vektor der thermischen Regelungsgrenzen

Für jedes zu optimierende Zeitintervall wird ein Gleichungssystem aufgebaut, welches vom linearen Optimierer eingelesen wird. Als Output wird der gesuchte Fahrplanvektor ausgegeben. Er enthält die Informationen über den Teillastfaktor der einzelnen Produktionskapazitäten für jede Zeiteinheit.

Für ein BHKW mit einem Teillastbereich bis 60 % bedeutet das beispielsweise, dass dieser Faktor entweder null (ausgeschaltet) oder zwischen 0,6 (minimaler Teillastbereich) oder 1 liegt (Volllast).

6.3 Beschreibung der Modell-Varianten

Im Folgenden werden die verschiedenen Betriebsvarianten beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden.

Jede Modellvariante ist mit einem Spitzenlastkessel ausgestattet, der für die vollständige Deckung des maximalen Wärmebedarfes dimensioniert ist. Im Falle eines Betriebsausfalles des BHKW oder einer Revision kann somit die Wärmeversorgung sichergestellt werden.

6.3.1 Variante A: wärmegeführter Betrieb (Referenzfall)

Der wärmegeführte Betrieb dient als Referenzfall. Die BHKW-Leistungsklasse wird in dieser Variante nach einer Faustformel bestimmt, die dem BHKW-Check entnommen wurde (HGC Hamburg, S. 22). Nach dieser Formel sollen mit 25 % des Spitzenwärmebedarfs ein Wärmedeckungsanteil von ca. 75 % erreicht werden. Der residuale Wärmebedarf wird von einem Spitzenlastkessel bereitgestellt.

Nach diesen Voraussetzungen wird für die Variante A ein BHKW mit einer Leistung von 1,3 MW und einen Spitzenlastkessel von 4,2 MW ausgewählt. Das entspricht einem Wärmedeckungsanteil von 75 % und 35 % Spitzenwärmebedarfsanteil.

Beide Produktionseinheiten beliefern einen Wärmespeicher mit einem Volumen von 100 m³. Der Wärmespeicher soll lediglich als Puffer zwischen Produktionseinheiten und Wärmeverbrauchern dienen. In den Zeiträumen mit einem Wärmebedarf, der geringer ist als die minimale Ausgangsleistung des BHKW, ermöglicht der Speicher weitere Betriebsstunden des BHKW.

Der Spitzenlastkessel wird betrieben, wenn der Wärmebedarf größer als die thermische Ausgangsleistung des BHKW ist. Zusätzlich kommt er in den Sommertagen mit dem geringsten Wärmebedarf zum Einsatz.

Der produzierte Strom wird nach dem Baseloadpreis der Strombörse des jeweiligen Quartals vergütet.

6.3.2 Variante B1: stromgeführter Betrieb

Das Modell der Variante B1 generiert einen BHKW- und einen Spitzenlastkesselfahrplan nach einer reinen EEX-Strompreis-Optimierung. Bevor der Kostenoptimierer gestartet wird, werden die in Abschnitt 6.3 erwähnten Kostenvektoren je Erzeuger auf folgender Grundlage erstellt: Für den Kostenvektor des BHKW definiert der Primärenergiefaktor zusammen mit dem Gaspreis, welche Gaskosten je Stunde entstehen. Davon subtrahiert werden potenzielle Erlöse aus dem Stromverkauf, die sich aus dem EEX-Strompreis und der elektrischen Leistung des BHKW zusammensetzen. Zu diesen Erlösen wird der KWK-Bonus für jede eingespeiste Kilowattstunde hinzugerechnet. Dem gegenüber stehen die Gaskosten durch den Betrieb des Spitzenlastkessels. Beide Kostenvektoren mit der Einheit Euro pro Stunde bilden die Grundlage für den kostenoptimierten Fahrplan des BHKW. Durch die Kopplung der beiden Erzeuger an einen thermischen Speicher muss nicht in jeder Stunde exakt die Wärmemenge produziert werden, die entsprechend des thermischen Lastprofils vorgegeben ist. Damit ist die Grundlage für die Flexibilität des zu generierenden Fahrplans gegeben. Auf der Grundlage der gegebenen Information, wie sich Strompreis und Wärmebedarf im betrachteten Zeitraum verändern, wird der Fahrplan erstellt, mit dem die geringsten Kosten verursacht werden. Dies geschieht unter der Hauptbedingung, dass die Speichergrenzen nach unten beziehungsweise nach oben niemals überschritten werden. Die Fahrpläne beinhalten nicht nur die Information, ob der entsprechende Erzeuger in der jeweiligen Stunde in Betrieb ist oder nicht, sondern ob dies auch im Teillastbereich oder mit Vollast geschieht (6.2).

Die Funktionsweise des Optimierers wird exemplarisch anhand der Abbildung 6 erläutert. Das obere Diagramm zeigt den Verlauf des Strompreis über einen Zeitraum von 120 Stunden. Die rot gefärbten Bereiche zeigen an, dass das BHKW in der entsprechenden Stunde in Betrieb ist. Im unteren Diagramm stellt die durchgezogene rote Linie den kumulierten Verlauf eines konstanten Wärmebedarfes dar und die gestrichelte rote Linie symbolisiert den maximalen Füllstand des Wärmespeichers. Der Abstand der roten Linien zueinander entspricht der Speicherkapazität. Die Differenz zwischen Wärmeproduktion und Wärmebedarf wird durch die blaue Kurve dargestellt. Durch den Wärmespeicher muss nicht exakt der nachgefragte Bedarf produziert werden. Solange die obere und die untere rote Linie nicht überschritten beziehungsweise unterschritten werden, existiert eine Flexibilität in der Auswahl der Produktionsstunden. Somit ist die Grundlage für den Strompreis-optimierten Betrieb gegeben.

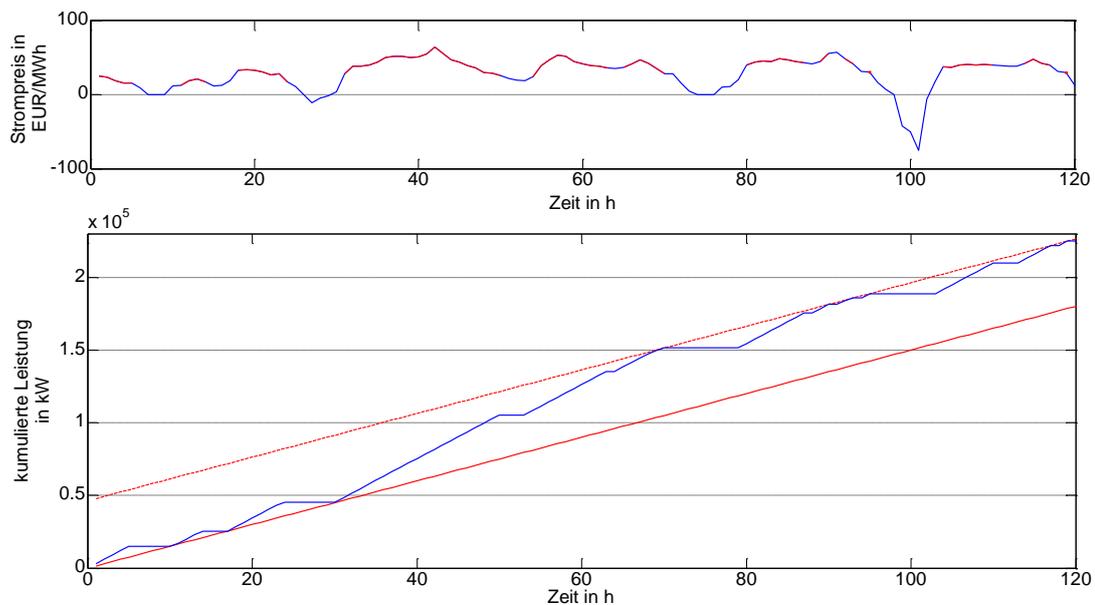


Abbildung 6: oben: Strompreisverlauf mit der Information über den Betriebszustand des BHKW (rot = BHKW in Betrieb), unten: exemplarischer Verlauf des kumulierten Wärmebedarfs (durchgezogene, rote Linie), der oberen Speichergrenze (gestrichelte, rote Linie) und der Differenz zwischen Wärmeproduktion und -bedarf (blaue Linie), Quelle: eigene Darstellung

6.3.3 Variante B2: stromgeführter Betrieb mit zwei baugleichen Blockheizkraftwerk-Modulen

Im Gegensatz zu der Variante B1 wird die Gesamtleistung des BHKW auf zwei identische Module aufgeteilt. Dadurch ergeben sich veränderte Wirkungsgrade und eine höhere spezifische KWK-Vergütung. Desweiteren vergrößert sich das Teillastspektrum durch die Möglichkeit, lediglich ein BHKW in Betrieb zu nehmen.

6.3.4 Variante C: stromgeführter Betrieb mit negativer Minutenreserveleistung

Zu der Optimierung auf den EEX-Strompreis wird diese Variante mit der Optimierung auf die Vorhaltung negativer Reserveleistung erweitert. An die Vorhaltung von negativer Reserveleistung ist die Bedingung geknüpft, dass die Vorhaltung stets in Vierstundenblöcken erfolgt. Diese Bedingung wird bei der Generierung des Fahrplans mitberücksichtigt. Neben der Optimierung auf den EEX-Strompreis wird der Betrieb des BHKW nun auch auf die Stunden gelegt, zu denen die Preise für die Vorhaltung von Reserveleistung ausreichend hoch sind, so dass der Einsatz der Primärenergie wirtschaftlich sinnvoll ist.

Die Höhe der Vorhaltung ergibt sich aus der elektrischen Leistung des BHKW plus der elektrischen Leistung des Heizstabes, der für diese Modellvariante als zusätzlicher Wärmeerzeuger implementiert wurde. Die Leistung des Heizstab entspricht der thermischen Ausgangsleistung des BHKW. Der Wirkungsgrad wird auf 1 festgelegt.

Aus den anonymen Ausschreibungsergebnissen je Vierstundenblock und der abgerufenen negativen Reserveleistung wurde der maximale Arbeitspreis je Abruf ermittelt.

Im Anschluss an die Optimierung auf den EEX-Preis und der Reserveleistungsvorhaltung wird in einem anschließenden Algorithmus überprüft, ob das BHKW zum Abruf negativer Reserveleistung aufgerufen worden wäre. Dafür müssen die folgenden drei Bedingungen für jede Viertelstunde des Jahres erfüllt sein:

1. Es liegt eine Leistungsvorhaltung im BHKW-Fahrplan vor.
2. Es gibt Bedarf an negativer Minutenreserveleistung.
3. Der maximale Arbeitspreis ist größer als der eigene, zuvor definierte Arbeitspreis.

Ein Abruf zur Minutenreserveleistung ist finanziell sehr lukrativ, da der Speicher durch den Heizstab beladen wird, ohne dass Erdgas dafür eingesetzt werden muss. Daher wird für die Simulation der eigene Arbeitspreis auf -30 EUR/MWh festgelegt. Jeder Abruf ist daher mit Kosten verbunden. Dieser Wert orientiert sich an den Einsparungen an Gaskosten abzüglich der KWK-Vergütung. Es wird angenommen, dass die EEX-Erlöse aus dem ursprünglichen Fahrplan bei einem Abruf weiterhin gezahlt werden. Um bereits im ersten Teil der Optimierung die ökonomischen Vorteile bei einem potenziellen Abruf mit in die Fahrplangenerierung einfließen zu lassen, wird der Preis für die Minutenreserveleistung verdoppelt. So kann die Anzahl der Stunden, in denen Leistung vorgehalten wird deutlich erhöht werden. Der Grund für die Anpassung ist die notwendige Bedingung für einen Abruf, dass in der jeweiligen Stunde eine Leistungsvorhaltung zuvor angemeldet wurde. Bei der Verrechnung der Erlöse durch die Leistungsvorhaltung werden wieder die Originalwerte des Jahres 2012 herangezogen.

6.3.5 Variante D: stromgeführter Betrieb mit Bilanzkreisausgleich

In dieser Variante wird neben dem Verkauf der erzeugten Strommenge an der Strombörse der BHKW-Betrieb genutzt um Bilanzkreisabweichungen zu minimieren oder auszugleichen. Für diese Untersuchung wird auf Prognose- und Produktionsdaten einer Windenergieanlage mit einer Nennleistung von 4 MW zurückgegriffen.

Diese Daten wurden von einem Windenergieanlagenbetreiber und potenziellen Kooperationspartner von KEBAP e.V. zur Verfügung gestellt.

Das Modell wird, wie in der Variante B2, mit zwei baugleichen BHKW-Modulen implementiert, um ein deutlich größeres Leistungsband abdecken zu können im Vergleich zu einem einzigen Modul.

Im ersten Teil dieses Simulationsmodells werden für beide Module ein kostenoptimierter Fahrplan nach den EEX-Preisen bei 80 % ihrer Leistung generiert. Für den zweiten Teil der Optimierung kann eine Leistungssteigerung oder -abnahme von je 20 % für den Bilanzkreisausgleich genutzt werden.

Anhand der folgenden Darstellung wird die Funktionsweise des Algorithmus zur Reduzierung der Bilanzkreisabweichung erläutert. Ein Reduzierung der Abweichung kann grundsätzlich nur erfolgen, wenn in dem entsprechenden Zeitintervall zuvor der Betrieb des BHKW angemeldet wurde. Dies ist in der Grafik in dem Zeitintervall von 4 bis 7 mit einer Leistung von 80 % der Nennleistung der Fall. In dem Zeitintervall von 3 bis 6 liegt nun eine Unterspeisung des Bilanzkreises vor (Prognose – Ist > 0). Ab dem 6. Zeitintervall erfolgt eine Überspeisung. Der Fahrplan des BHKW ändert sich nun wie folgt: Der Unterspeisung wird durch Hochfahren auf Volllast entgegengewirkt, bei der Überspeisung schaltet sich das BHKW ab. Alternativ ist eine Drosselung auf die minimale Leistung von 60 % der Nennleistung möglich. Die Leistungsanpassung hängt dabei von drei Faktoren ab:

- Minimale und maximale Leistung des BHKW
- Entgegengesetzte Bilanzkreisabweichung ist zu vermeiden
- Thermische Regelungsgrenzen dürfen durch die Fahrplanänderung nicht gebrochen werden. Dafür findet eine Überprüfung des restlichen Optimierungsintervalls statt, der in dieser Simulation bis zum Beginn des Folgetages andauert.

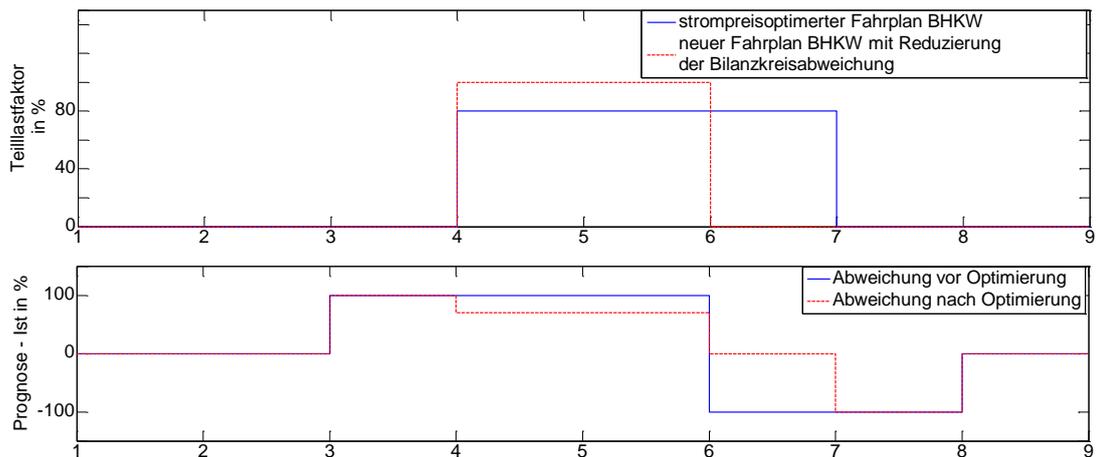


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Fahrplangenerierung zur Reduzierung der Bilanzkreisabweichung, Quelle: eigene Darstellung

Durch die Aufteilung der gesamten BHKW-Leistung auf zwei identische Module, die jeweils auf 60 % ihrer Nennleistung gedrosselt werden können, ergibt sich eine höhere Flexibilität: ein Modul kann bei Bedarf abgeschaltet und damit die angebotene Gesamtleistung um 70 % variiert werden.

Die Fahrplangenerierung auf Grundlage des EEX-Strompreises findet auf Stundenbasis statt. Die anschließende Optimierung des Bilanzkreisausgleiches wird für jede Viertelstunde durchgeführt, da die Prognose- und Produktionsdaten der Windkraftanlagen in dieser zeitlichen Auflösung zur Verfügung standen.

Die Vergütung der bereitgestellten Strommenge wird für jede Viertelstunde separat berechnet und in drei Fälle unterschieden.

1. Unterspeisung des Bilanzkreises und Leistungsanstieg der BHKW
80 % der Leistung (gemäß dem ursprünglichen Fahrplan) werden mit dem EEX-Strompreis und die zusätzliche Leistung mit dem Ausgleichsenergiepreis vergütet.

2. Überspeisung des Bilanzkreises und Leistungsreduzierung der BHKW
Die reduzierte Leistung wird mit dem EEX-Strompreis vergütet. Außerdem wird die Leistungsänderung mit der Differenz zwischen dem Spotmarktpreis und dem Ausgleichsenergiepreis vergütet. An dieser Stelle wird keine gelieferte Kilowattstunde sondern die Leistungsvorhaltung vergütet.

3. BHKW-Betrieb ohne Leistungsänderung

Diese Betriebsstunden werden analog zu der Vergütung in den Varianten B1 und B2 nach dem EEX-Strompreis vergütet.

6.4 Beschreibung der Datengrundlagen und Annahmen

6.4.1 Zeitraum

Die Simulationsergebnisse beziehen mit Ausnahme der Variante D (Bilanzkreisabweichung) auf Preisverläufe und Tagestemperaturen des Jahres 2012. Simulationsbedingt werden die ersten 364 Tage des Jahres ausgewertet. Der Zeitraum für die Variante D beginnt am 1.10.2011 und endet am 29.10.2012.

6.4.2 Thermisches Lastprofil

Das thermische Lastprofil stellt den stündlichen Bedarf an thermischer Energie von Wärmekunden auf Grundlage der Außentemperatur, der Art der Verbraucher und der Anzahl der Verbraucher dar.

Die Grundlage der Berechnung des verwendeten Wärmebedarfes entspricht der VDI 4655 „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“. Als mögliche Wärmekunden werden Mehrfamilienhäuser im potenziellen Versorgungsgebiet Hamburg Altona mit einem durchschnittlichen Wärmebedarf von $156 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ angenommen.

Der jährliche Wärmebedarf wird auf 10 GWh festgelegt und entspricht circa dem Bedarf von 1070 Haushalten (Annahme mit durchschnittlich 60 m^2 Heizfläche pro Haushalt).

Für die Varianten A bis C wird der Wärmebedarf auf Grundlage der mittleren täglichen Außentemperatur an der Messstation in Fuhlsbüttel des Jahres 2012 verwendet (DWD, 2013). Für die Variante D bezieht sich Wärmebedarf auf den Zeitraum vom 1.11.2011 bis zum 29.10.2012.

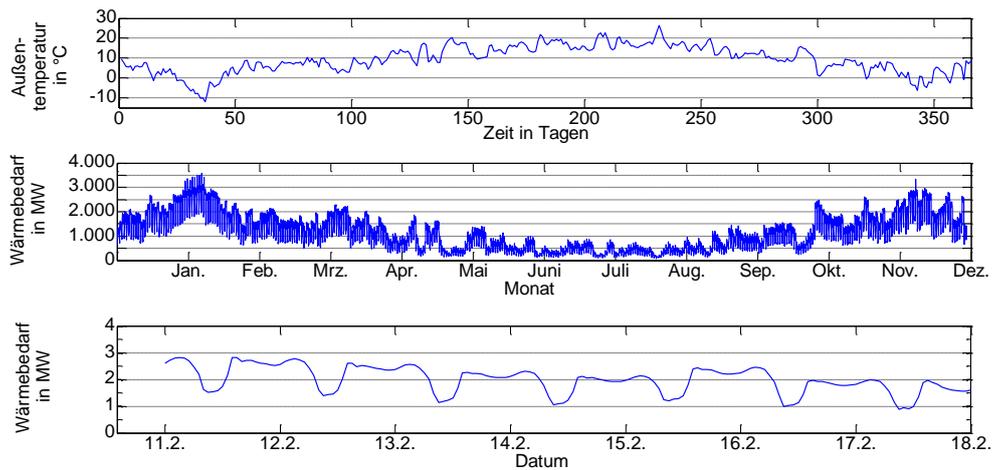


Abbildung 8: oben: gemittelte Außentemperatur pro Tag, Mitte: Thermisches Lastprofil in stündlicher Auflösung, unten: wöchentlicher Bedarfsverlauf einer Beispielwoche, Quelle: eigene Darstellung

6.4.3 Verluste

Die Versorgung mit Fernwärme ist stets mit thermischen Verlusten verbunden. Diese hängen von unterschiedlichen Faktoren ab, wie zum Beispiel der Außentemperatur und der Entfernung zwischen Wärmequelle und -senke. Im Rahmen dieser Arbeit werden die thermischen Verluste näherungsweise auf 15 % festgelegt. Diese wurden zu dem Nennwärmebedarf hinzugerechnet, so dass in jeder Anlagensimulation ein Bedarf von jährlich 11,5 GWh gedeckt werden. Für die Gewinne aus dem Verkauf der Fernwärme werden anschließend mit dem ursprünglichen Bedarf von 10 GWh gerechnet. Weitere Verluste werden nicht berücksichtigt.

6.4.4 Preise

6.4.5 Strompreis

Für die stromgeführten Varianten wird der stündliche Strompreis des Spotmarktes der European Energy Exchange (EEX) in Leipzig verwendet (EEX, 2013). Für die Variante A, dem wärmegeführten Fall wird der durchschnittliche Baseloadpreis des entsprechenden Quartals herangezogen.

6.4.6 Gaspreis

Für alle Varianten wird der gleiche Gaspreis beaufschlagt. Dieser beträgt 40,40 EUR/MWh. Dieser Preis geht aus KEBAP-internen Angeboten eines potenziellen Kooperationspartners hervor. Er setzt sich zu ca. 70 % aus dem Gaseinkaufspreis und ca. 30 % aus sonstigen Gebühren zusammen.

6.4.7 KWK-Vergütung

Für den Betrieb einer Kraft-Wärme-Kopplungsanlage kann beim Amt für Wirtschaft und Ausführkontrolle (BAFA) eine Förderung beantragt werden. Diese Förderung wird pro eingespeiste Kilowattstunde elektrischer Energie ausgezahlt. Ihre spezifische Höhe richtet sich nach der elektrischen Leistung des BHKW. Bis zu einer Leistung von 50 kW beträgt die Förderung 54,10 EUR/MWh. Kraftwerke bis zu einer Leistung von 250 kW werden ab dem 51 Kilowatt mit 40 EUR/MWh vergütet, bis zu einer Leistung von 2000 kW sinkt die die Vergütung auf 24 EUR/MWh, darüber hinaus beträgt sie 18 EUR/MWh. Die folgende Abbildung zeigt die Staffelung der spezifischen Förderung und den maximalen Förderbetrag über die BHKW-Leistung. Die KWK-Förderung ist auf die ersten 30.000 Vollbenutzungsstunden limitiert. Alle Daten der KWK-Förderung wurden der Internetseite des BAFA entnommen (BAFA, 2013).

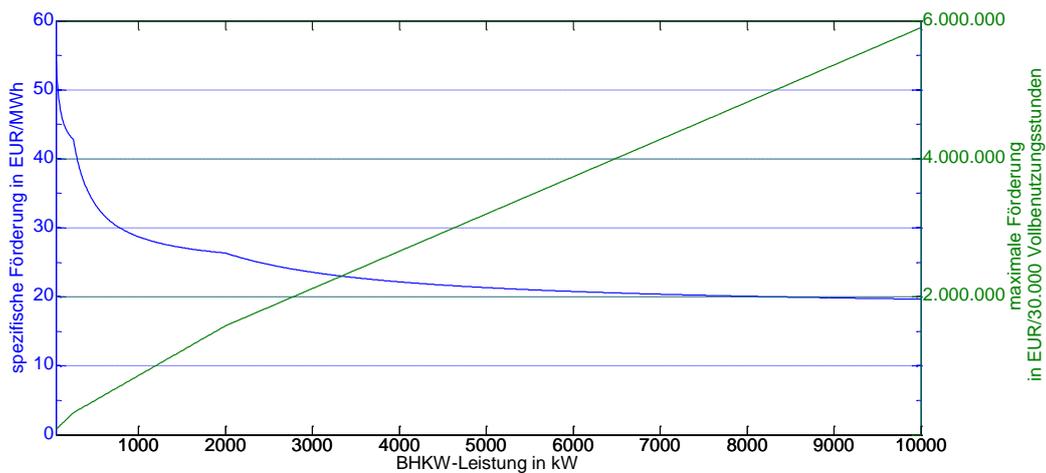


Abbildung 9: blau: Staffelung der KWK-Vergütung, grün: maximaler Förderbetrag bei einer gesamten Vollbenutzungsdauer von 30.000 Stunden, Quelle: eigene Darstellung

Auch wenn die spezifische Förderung über die Hälfte von über 50 EUR/MWh für Anlagen bis 50 kW auf ca. 20 EUR/MWh für Anlagen ab 8 MW abfällt, steigt der maximale Förderbetrag mit steigender BHKW-Leistung. Die KWK-Förderung ist daher für stromgeführte Betriebsvarianten mit großen Leistungen eine wichtige Einnahmequelle. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine maximale Auszahlungsdauer von 20 Jahren festgelegt. Relevant ist diese Limitierung der Förderung für große BHKW-Leistungen mit weniger als 1500 Benutzungsstunden pro Jahr, die demnach nach 20 Jahren die 30.000 Vollbenutzungsstunden nicht erreicht haben. Begründet wird diese Begrenzung, dass keine Aussage über den weiteren Betrieb nach 20 Jahren stromgeführter Betriebsweise großer BHKW-Leistungen gemacht werden kann.

6.4.8 Negative Regelleistung

Für die Variante C, bei der die Vorhaltung und Bereitstellung von negativer Regelleistung vermarktet wird, werden zwei zusätzliche Preisverläufe benötigt. Für die reine Vorhaltung von negativer Regelleistung wird ein viertelstündlicher Leistungspreis ermittelt.

Dazu wird anhand der Ausschreibungsergebnisse der negativen Regelleistung ein mittlerer Leistungspreis je Stunde aus den Angeboten bestimmt, die den Zuschlag für die Vorhaltung bekommen haben.

Auf ähnliche Weise wird ein stündlicher Grenzarbeitspreis berechnet. Dazu werden aus den Ausschreibungsergebnissen die Angebote nach Arbeitspreis sortiert. Nun werden die angebotenen Leistungen aufsummiert, bis der Wert der tatsächlich benötigten negativen Reserveleistung der jeweiligen Viertelstunde erreicht ist. Der Arbeitspreis des letzten Angebotes ist der Grenzarbeitspreis.

Die Ausschreibungsergebnisse so wie die benötigten Daten der eingesetzten Reserveleistung wurden der „Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung“ entnommen (regelleistung.net, 2013).

6.4.9 Ausgleichsenergiepreis

Der Ausgleichsenergiepreis ist der regelzonenübergreifende, einheitliche Bilanzausgleichsenergiepreis, der auf den Webseiten von allen vier Übertragungsnetzbetreiber_innen zum Download angeboten wird. Die Daten für das Jahr 2011 und 2012 wurden der Internetseite von der Firma 50hertz entnommen (50hertz, 2013).

6.4.10 BHKW-Kenndaten

Die benötigten BHKW-Kenndaten wie Strom-, Wärme- und Brennstoffausbeute in Abhängigkeit von der BHKW-Leistung basieren auf den Daten des „Preisatlas“ des Instituts für Energie- und Umwelttechnik e.V. (iuta, 2002, S. 58). Die Abhängigkeit der Brennstoffausbeute (Abbildung 10) und der Stromkennzahl (Abbildung 11) von der BHKW-Leistung wurden auf der Grundlage von Herstellerangaben, die im Rahmen eines spezifischen Angebotes für KEBAP e.V. zur Verfügung standen, angepasst.

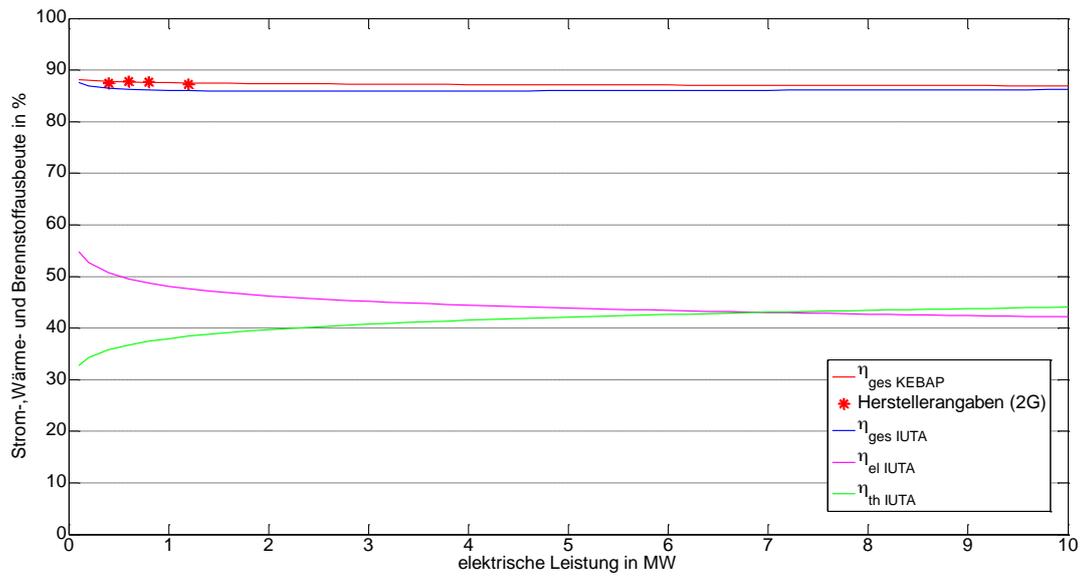


Abbildung 10: Strom-, Wärme- und Brennstoffausbeute über die elektrische Leistung, Quelle: eigene Darstellung

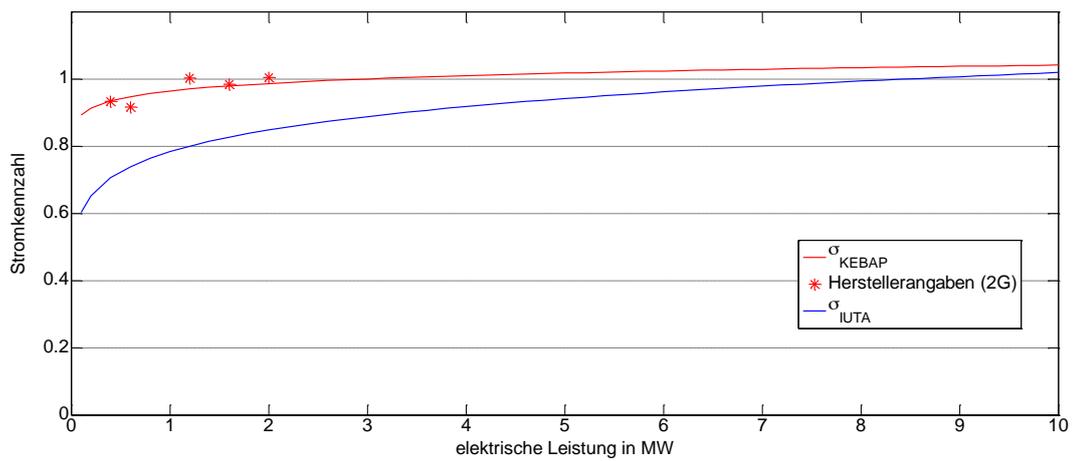


Abbildung 11: Stromkennzahl in Abhängigkeit der elektrischen Leistung des BHKW, Quelle: eigene Darstellung

6.4.11 Investition Technik

Die Investitionskosten für das BHKW wurden der Literaturquelle „BHKW-Kenndaten 2011“ der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. entnommen (ASUE, 2011, S. 12). Die verwendeten Preise entsprechen den „Spezifischen Richtpreisen von Erdgas-BHKW“. Wie bereits bei der Stromkennzahl wurde die Ausgleichskurve der Richtpreise mit vorliegenden Preisen eines Angebotes eines BHKW-Herstellers kombiniert.

6.4.12 Investition

Die Investitionskosten, die für alle Simulationsvarianten identisch angenommen wurden, teilen sich auf in einen konstanten und einen variablen Anteil. Die Kosten für den Erwerbs-, den Umbau- und die Projektierung wurden einer ersten Kostenkalkulation von KEBAP e.V. für eine 2x2 MW-BHKW-Anlage entnommen und für alle BHKW-Leistung als angenommen. Der variable Anteil ist abhängig von der installierten BHKW-Leistung und beträgt 15 % der gesamten Anlageninvestitionen (BHKW, Speicher und Spitzelastkessel).

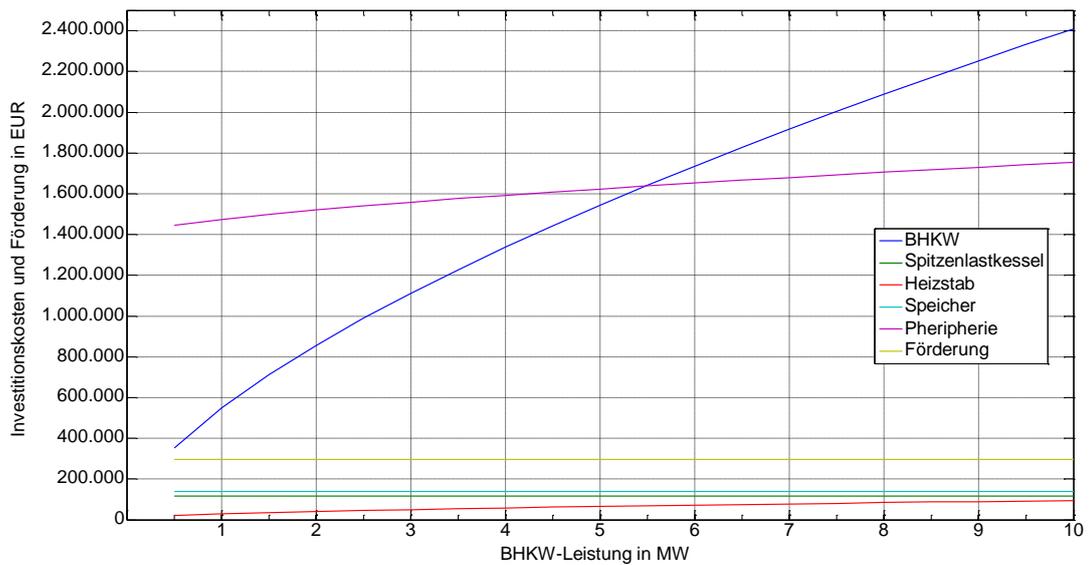


Abbildung 12: Investitionskosten und Förderung in Abhängigkeit der BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung

6.5 Alternative Simulation

Mit dem kommerziellen Simulationsprogramm „Energy Pro“ für Energiesysteme der Firma EMD International wurden die Simulationsergebnisse einzelner Anlagenkonstellationen verglichen. Mit einer Testlizenz wurde das Modell einer stromgeführten Variante mit zwei BHKW mit einer thermischen Leistung von je 2 MW nachgebildet. Dafür wurden die identischen Eingangsparameter wie technische Anlagenparameter, Strompreis und der jährlichem Wärmebedarf in die Software eingelesen, sofern dies in der Testlizenz möglich war. Über die Funktionsweise des Optimierers von „Energy Pro“ kann keine Angabe gemacht werden.

Im Fokus des Vergleichs beider Simulationsprogramme lag in den Parametern des generierten BHKW-Fahrplans, wie zum Beispiel die Betriebsstunden, die Anzahl der Starts und der Wärmedeckungsanteil durch die BHKW. Die folgende Tabelle zeigt die wichtigsten Eingangsparameter und die daraus resultierenden Simulationsdaten. Die Stromkennzahl beider Modelle unterscheiden sich, woraus unterschiedlich produzierte Strommengen kalkuliert wurden.

Tabelle 1: Vergleich der Simulationsergebnisse von zwei verschiedenen Optimierern, Quelle: eigene Darstellung

Parameter	Linearer Optimierer	Energy Pro	rel. Differenz in %
Thermische Leistung BHKW in kW	2 x 2000	2 x 2000	0
Wärmespeicherkapazität in MWh	46,35	46,35	0
Wärmebedarf in GWh/a	12,80	12,79	0,0
Wärmedeckungsanteil BHKW in %	98,6	99,7	1,1
Mittlere BHKW-Laufzeit in h	3213	3205	0,25
Gemittelte Anzahl der Betriebstarts	647	402	37,9
Mittlerer Strompreis in EUR/MWh	57,2	60,9	6,1

Die Anzahl der Betriebstarts unterscheiden sich bei beiden Optimierern sehr stark, wogegen die anderen Parameter vernachlässigbare Differenzen aufweisen. Es kann keine Aussage darüber gemacht werden, wie in der Software „Energy Pro“ die Betriebstarts kalkuliert werden. Ähnliche Unterschiede konnten bei weiteren Vergleichen von Ergebnissen der Software „Energy Pro“ festgestellt werden. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die berechneten Betriebstarts der eigenen Simulationsergebnisse tendenziell zu groß ausfallen.

6.6 Schwachstellen und Schwerpunkte des Tools

Das Simulationsmodell basiert auf der Betrachtung der gewandelten Energieströme und der daraus resultierenden Erlöse und Kosten unter Berücksichtigung von Preis- und Temperaturverläufe des Jahres 2012.

Grundlage der Simulationsergebnisse sind die generierten Fahrpläne für die BHKW beziehungsweise der Spitzenlastkessel. Für die Generierung dieser Fahrpläne wurden die größten Einflussfaktoren auf Kosten und Erlöse mitberücksichtigt. Weitere relevante Einflüsse, die ein reales Betriebsverhalten eines BHKW beeinflussen und sich damit auf potenzielle Erlöse und Kosten auswirken, wurden vernachlässigt. Dazu zählt das Anfahr- und Abfahrverhalten eines BHKW. Besonders die vielen jährlichen Anfahrmomente, die den stromgeführten Betrieb kennzeichnen, können einerseits den Bedarf an Primärenergie steigern, andererseits sinkt die Flexibilität in der Gestaltung des BHKW-Fahrplans.

Eine weitere Vereinfachung und ebenso als kritischen Faktor des Simulationstools zu bewerten ist die Beladepazität des thermischen Speichers. Diese wird innerhalb des Tools als „black box“ betrachtet, in welche Energiemengen hinein und heraus gehen. Es wird nicht berücksichtigt, dass sich die Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauf des Fernwärmenetzes in Abhängigkeit der Außentemperatur ändert. Es ist davon auszugehen, dass die Speicherkapazität im Sommer nicht im angenommenen Maße genutzt werden kann. Außerdem berücksichtigt diese statische Betrachtungsweise nicht Dynamiken innerhalb des Speichers, die durch gleichzeitige Be- und Entladevorgänge entstehen können und dadurch ebenfalls die Speicherkapazität beeinflussen. An dieser Stelle sei auf eine Studie des Ingenieurbüros SUmBi Ingenieure hingewiesen, in der diese Problematik thematisiert wird (sumbi, 2009).

Im Rahmen dieser Arbeit konnten keine verlässlichen Angaben über Instandhaltungs- und Wartungskosten für stromgeführte BHKW für das analysierte Leistungsspektrum recherchiert werden. Mit der getroffenen Annahme der Betriebskostenpauschale wurden diese Kostenstelle mitberücksichtigt, jedoch kann sie je nach Leistungsklasse große Unterschiede aufweisen und damit die Gesamtwirtschaftlichkeit beeinflussen. Die Vorteile des Modells ist die Implementierung in MatLab in der Programmiersprache C++. Dadurch lässt sich das Modul nahezu beliebig variieren und erweitern.

So war die Voraussetzung gegeben, dass aus der reinen Spotmarkt-Optimierung die Modelle der Variante C und D programmiert werden konnten. Mit MatLab, das auf die Bearbeitung von Matrizen spezialisiert wurde, konnte die Menge der erzeugten Simulationsdaten übersichtlich verwaltet werden. Das Kernstück des Modells, der lineare Optimierer, ist ein mächtiges Tool, das im Rahmen der Optimierung die gewünschten Resultate erbracht hat. Dennoch hat eine Simulation bestehend aus 20 BHKW-Leistungen und verschiedene Wärmebedarfe mehrere Tage gedauert.

7. Auswertung der Ergebnisse

In der folgenden Auswertung werden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt und anschließend analysiert. Die Auswertungen beziehen sich stets auf einen ausgewählten Parameter und deren Einfluss je Betriebsvariante und je thermischer BHKW-Leistung. Ziel dieser Auswertung ist es, das zu untersuchende Simulationsfeld von ca. 100 verschiedenen Anlagenvarianten nach Möglichkeit einzugrenzen und aus wirtschaftlicher, technischer und ökologischer Perspektive zu bewerten.

7.1 Technische Analyse

Die folgende Analyse technischer Parameter der Simulationsdaten gibt Aufschluss über die Funktionsweise des verwendeten Optimierers und soll zum Verständnis des stromgeführten Betriebes beitragen. Weiterhin ist diese Untersuchung hilfreich, um Aussagen über die technischen Anforderungen einer realen Anlage treffen zu können.

7.1.1 Betriebsstunden und Wärmedeckungsanteile

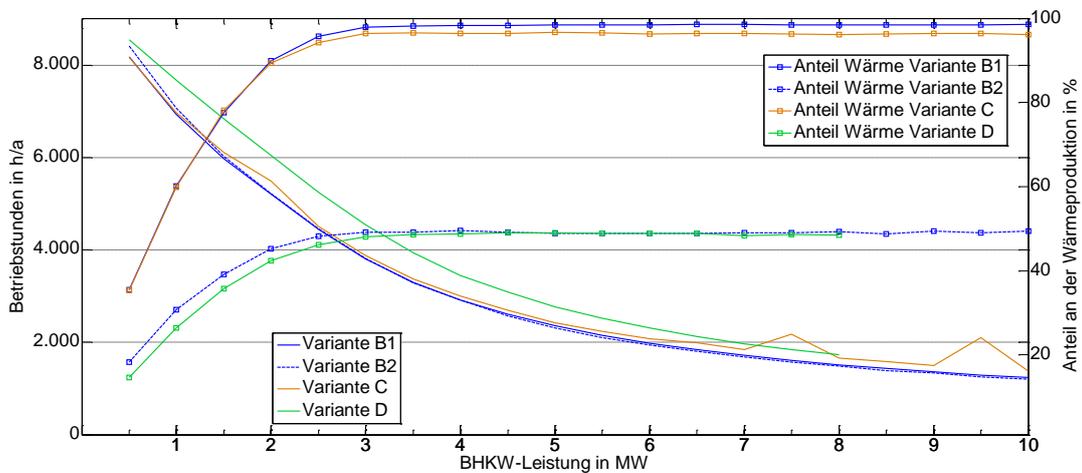


Abbildung 13: Jährliche Betriebsstunden und Anteil an der Wärmeproduktion des BHKW beziehungsweise der BHKW, Quelle: eigene Darstellung

Die Betriebsstunden fallen mit steigender Leistung von über 8000 auf unter 1300 Stunden bei allen Varianten. Zwischen einem halben Megawatt und 3 MW wird die Wärmeproduktion aus dem Spitzenlastkessel zunehmend von dem BHKW beziehungsweise der beiden BHKW übernommen. Der Wärmedeckungsanteil des Spitzenlastkessels beträgt bei allen Anlagen über 3 MW ca. 1 %.

7.1.2 Stromproduktion

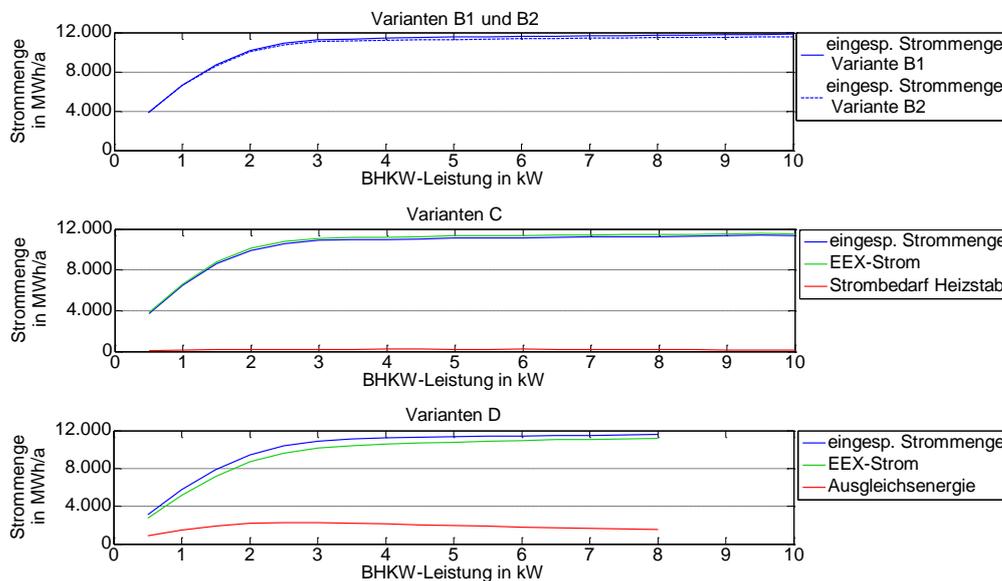


Abbildung 14: Eingespeiste Strommengen über die BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 14 zeigt die Menge der unterschiedlichen Stromprodukte der verschiedenen Varianten über die BHKW-Leistungsklassen. Die Gesamtmenge wird als eingespeiste Strommenge definiert. Entsprechend des abnehmenden Wärmedeckungsanteils des Spitzenlastkessels aus der vorangegangenen Grafik steigen die produzierten Strommengen mit zunehmender BHKW-Leistung zu Beginn stark an. Im weiteren Verlauf wirken die sinkenden Betriebsstunden dem zunehmenden elektrischen Ausgangsleistungen entgegen. Das mittlere Diagramm (Variante C) gibt außerdem Aufschluss über das Größenverhältnis zwischen der Strommenge, die nach dem EEX-Strompreis vergütet wird und der Strommenge, die durch die Abrufe von negativer Minutenreserveleistung durch den Heizstab bezogen wird. Entsprechend zeigt das untere Diagramm die Strommenge, die für den Bilanzkreisausgleich produziert wird. In den Abschnitten 7.1.11 und 7.1.12 werden die Simulationsdaten der Variante C beziehungsweise der Variante D erläutert.

7.1.3 Betriebsstarts

Mit sinkenden Betriebsstunden steigt die Anzahl der jährlichen An- und Abschaltvorgänge. In der Abbildung 15 ist daher die Zahl der Betriebsstarts dargestellt. Der starke Anstieg gibt Auskunft über die besonderen Anforderungen stromgeführter BHKW hoher Leistungsklassen.

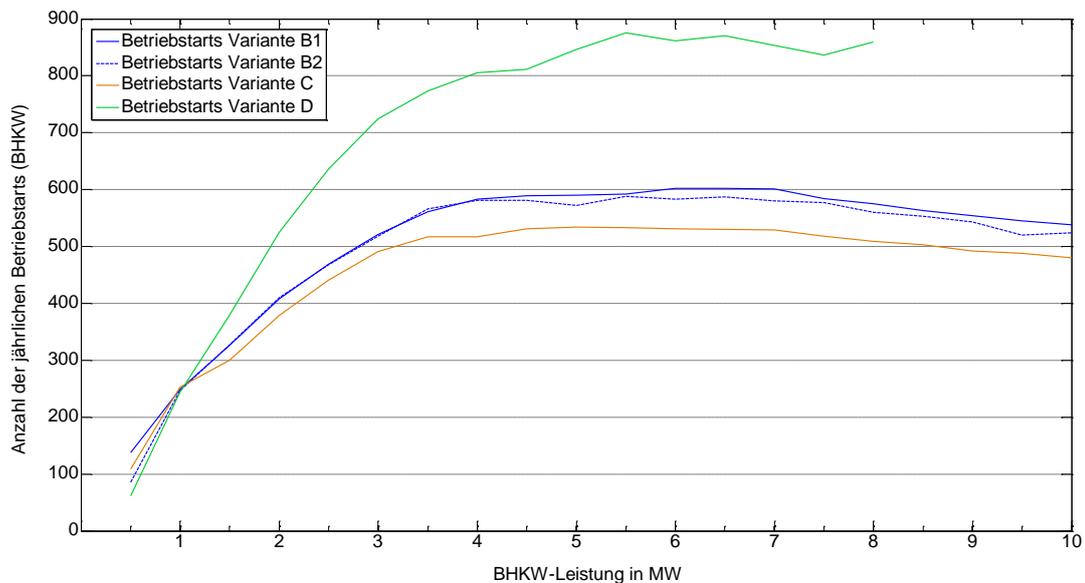


Abbildung 15: Anzahl der Betriebsstarts je Variante, Quelle: eigene Darstellung

Da der Verschleiss von der Betriebstemperatur des BHKW abhängt, wird in der folgenden Grafik die Anzahl der Betriebsstarts dargestellt, bei denen das BHKW zuvor mindestens drei Stunden lang abgeschaltet war. Das Anfahren unter dieser Bedingung wird als Kaltstart definiert.

Die Abbildung zeigt, dass der überwiegende Teil der zuvor errechneten Betriebsstarts Kaltstarts sind. Welche Auswirkungen ein potenziell höherer Verschleiss auf die Instandhaltungskosten und damit auf die Gesamtwirtschaftlichkeit der Anlage hat, bedarf weiterer Untersuchungen.

Außerdem wird an dieser Stelle die Analyse von geeigneten Gegenmaßnahmen empfohlen, den Verschleiß bestimmter Baugruppen gering zu halten. Beispielsweise kann bei abgeschalteten BHKW durch Nutzung des Wärmekreislaufes die Betriebstemperatur gehalten werden.

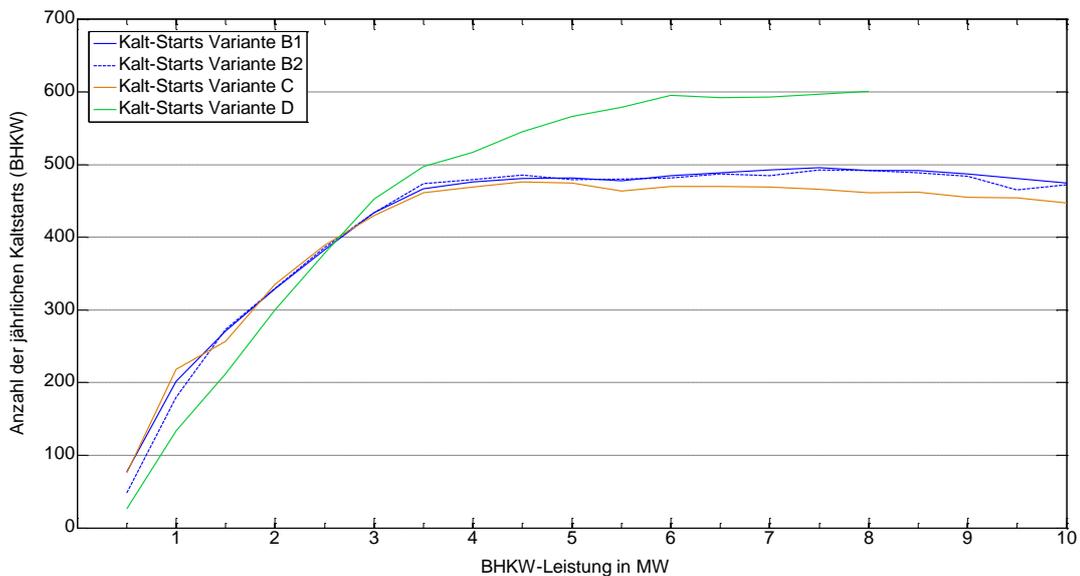


Abbildung 16: Anzahl der Kaltstarts je Variante, Quelle: eigene Darstellung

7.1.4 Durchschnittlicher Strompreis

Der Wert des durchschnittlich erzielten Strompreises gibt eine Aussage über die Flexibilität des BHKW-Fahrplans. Diese Flexibilität wird hauptsächlich beeinflusst durch die Größe der Speicherkapazität, der BHKW-Leistung und des Wärmebedarfes. Die Varianten B1 und B2 mit der reinen EEX-Strompreisoptimierung erreichen die höchsten Strompreise. Die Differenz zu den Varianten C und D wächst mit steigender BHKW-Leistung. Der Unterschied zu dem durchschnittlichen Baseloadpreis des Quartals bei der wärmegeführten Variante A, der im Jahresdurchschnitt 42,7 EUR/MWh beträgt, ist die Grundlage der stromgeführten Betriebsweise mit einer Optimierung auf den Spotmarktpreis. Es fällt auf, dass der Anstieg der Verlaufskurve des erzielten Durchschnittspreises mit steigender BHKW-Leistung abnimmt. Inwiefern die Mehreinnahmen beim Stromverkauf höhere Investitionskosten rechtfertigen, wird in der wirtschaftliche Auswertung im Abschnitt diskutiert.

Der dargestellte theoretische Strompreis ist der Preis, der mit einem unendlich großen Speicher erzielt wird. Unter 2 MW liegt er unterhalb der Preise der Simulationsdaten der stromgeführten Varianten, da in dieser theoretischen Betrachtung mit einer vollständigen Wärmedeckung durch BHKW gerechnet wurde.

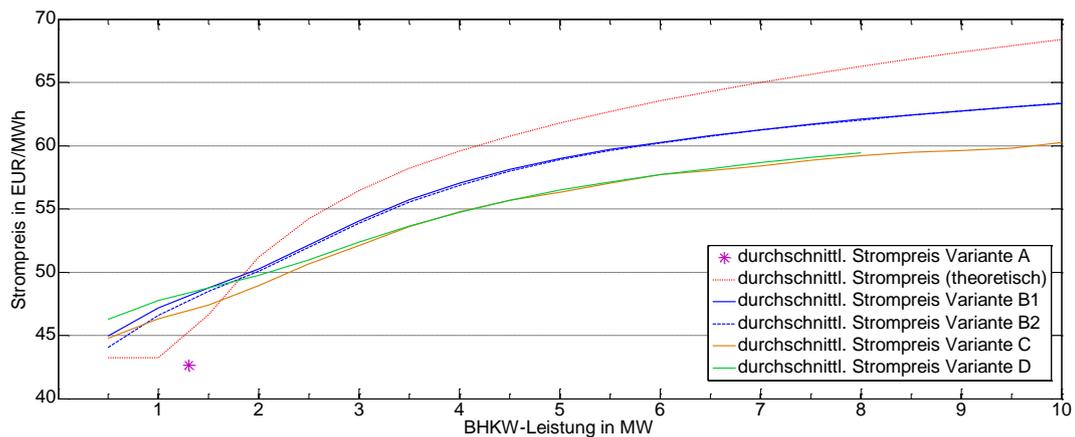


Abbildung 17: Durchschnittlicher Strompreis je Variante und theoretisch erzielbarer Strompreis , Quelle: eigene Darstellung

7.1.5 Speichergröße

Die folgenden Simulationsdaten zeigen den Einfluss des Speichervolumens auf den erzielbaren durchschnittlichen Strompreis über die BHKW-Leistung.

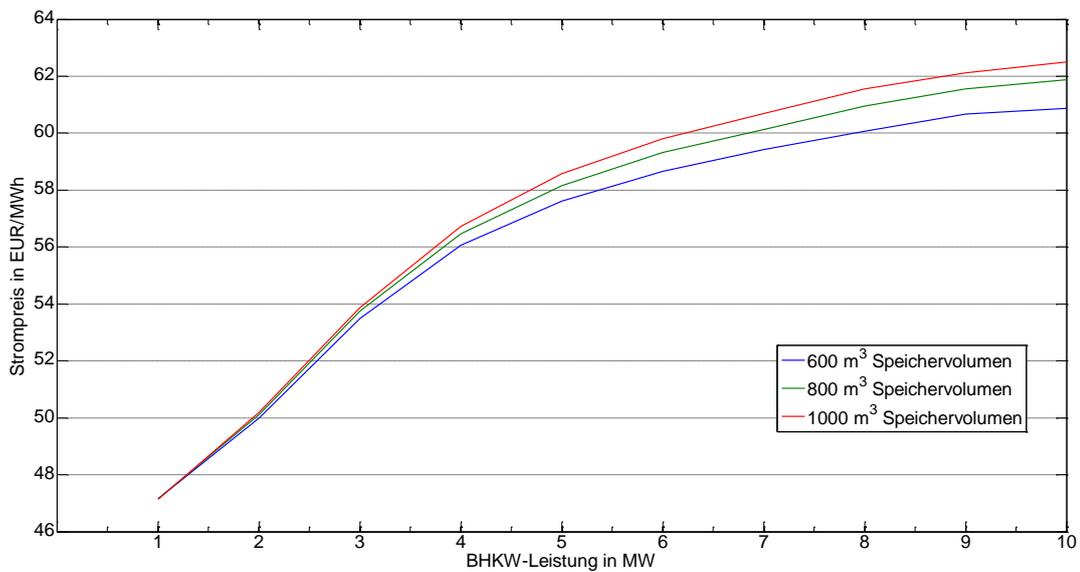


Abbildung 18: Durchschnittlicher Strompreis über die BHKW-Leistung für unterschiedliche Speichergößen, Quelle: eigene Darstellung

Der Einfluss der Speichergöße auf den mittleren Strompreis wächst mit steigender BHKW-Leistung. Für Leistungen unter 3 MW ist der Einfluss vernachlässigbar klein. Aufgrund des Verhältnisses zwischen Wärmebedarf und BHKW-Leistung kann in den kleineren Leistungsklassen das Speichervolumen nicht genutzt werden.

7.1.6 Auswertung des stromgeführten Betriebes am Beispiel von zwei BHKW-Leistungsklassen

Für die weitere Auswertung werden exemplarisch die Simulationsdaten zweier Anlagenkonstellationen, einmal mit 1 MW und mit 8 MW-BHKW-Leistung untersucht.

7.1.7 Geordnete Jahresdauerlinie

Die Darstellung der geordneten Jahresdauerlinie und der geordneten Betriebsstunden verdeutlicht die „Überdimensionierung“ der 8 MW-Variante bezogen auf den maximalen Wärmebedarf von 3.570 kW. Bei der 1 MW-Variante beträgt der Wärmedeckungsanteil 60 %, bei der 8 MW Variante über 98 %.

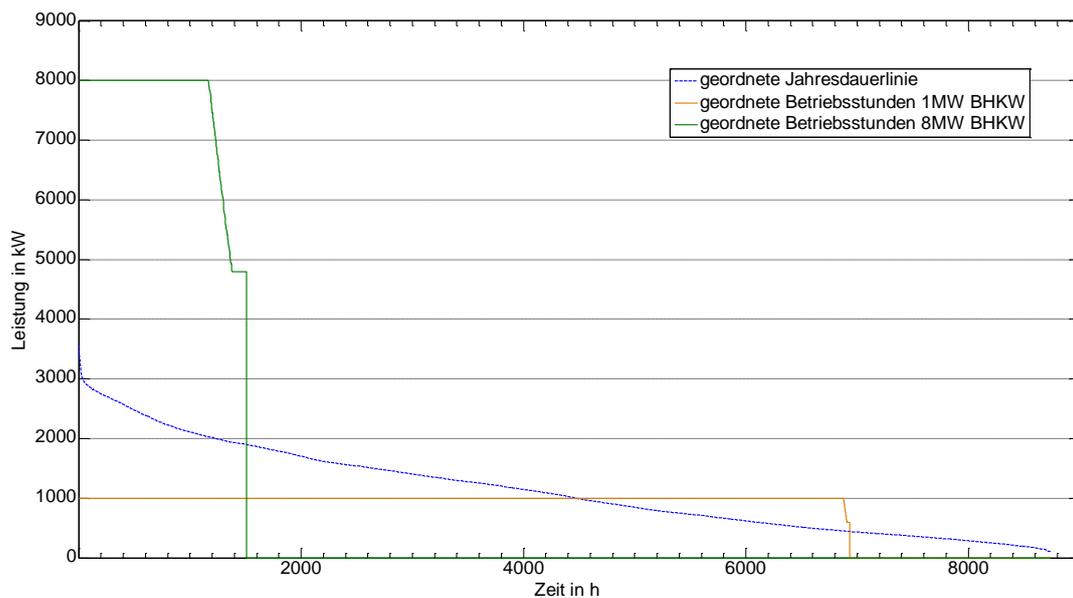


Abbildung 19: Geordnete Jahresdauerlinie und die geordneten Betriebsstunden für zwei ausgewählte BHKW-Leistungen der Variante B1, Quelle: eigene Darstellung

7.1.8 Speicherauslastung

Die Speicherauslastung wird für die beiden ausgewählten BHKW-Leistungen exemplarisch für zwei unterschiedliche Wochen des Jahres dargestellt. Die linke Spalte der beiden folgenden Abbildungen beziehen sich auf eine Winterwoche mit einem hohen Wärmebedarf. Im Gegensatz dazu sind auf der rechten Seite die Daten einer typischen Sommerwoche dargestellt.

Der rot eingefärbte Verlauf des Strompreises in Abbildung 20 gibt an, dass das BHKW in Betrieb ist. Die geringe Leistung des 1 MW BHKW führt nahezu zu einem Dauerbetrieb. Der thermische Speicher bleibt in dieser Jahreszeit die meiste Zeit unbefüllt. Im Vergleich dazu ist im Sommer bereits bei dieser Leistungsklasse eine Flexibilität in der Auswahl der Betriebsstunden möglich. Wenn der Strompreis in der Nacht sinkt, stellt das BHKW für einige Stunden den Betrieb ein. Es ist weiterhin zu erkennen, dass der Speicher unter der Woche gefüllt wird, um den Betrieb während der Niedrigpreisphase ab Stunde 144 zu vermeiden.

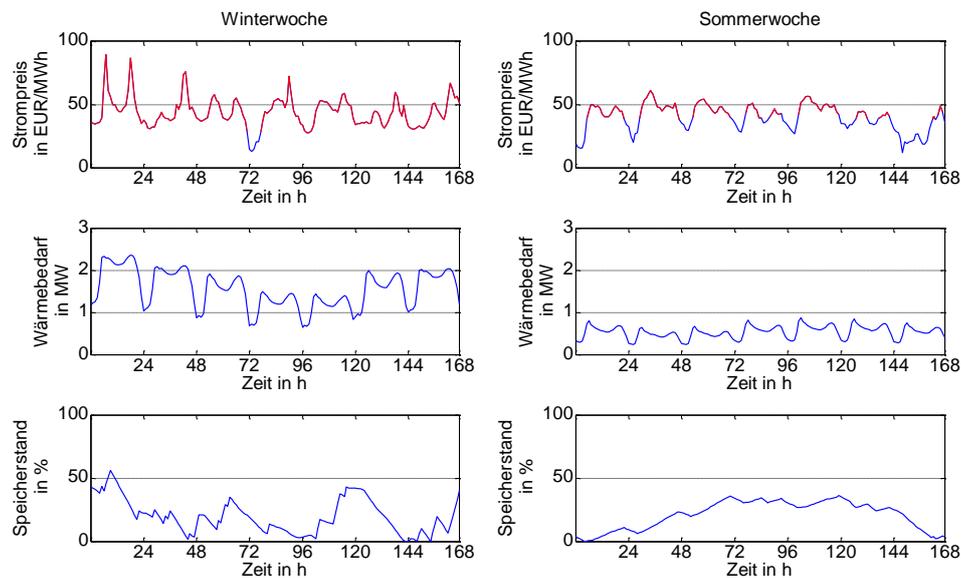


Abbildung 20: Speicherauslastung und BHKW-Flexibilität am Beispiel einer typischen Winter- und einer Sommerwoche, 1MW BHKW, Variante B1, Quelle: Eigene Darstellung

Das 8 MW BHKW ist in der Winterwoche täglich ausschließlich zu den am höchsten vergüteten Stunden in Betrieb. Es erreicht somit einen durchschnittlichen Strompreis von 57,5 EUR/MWh, das 1 MW-BHKW im gleichen Zeitraum dagegen 44,7 EUR/MWh. Der Verlauf des Speicherfüllstand des 8 MW-BHKW zeigt, dass in dieser Leistungsklasse die Speichergröße ausgenutzt wird, um den kostenoptimierten Betrieb zu realisieren.

Die Kopplung an einen Speicher ermöglicht außerdem erst die Wärmeversorgung durch eine BHKW-Leistung, die die maximale Heizlast übersteigt.

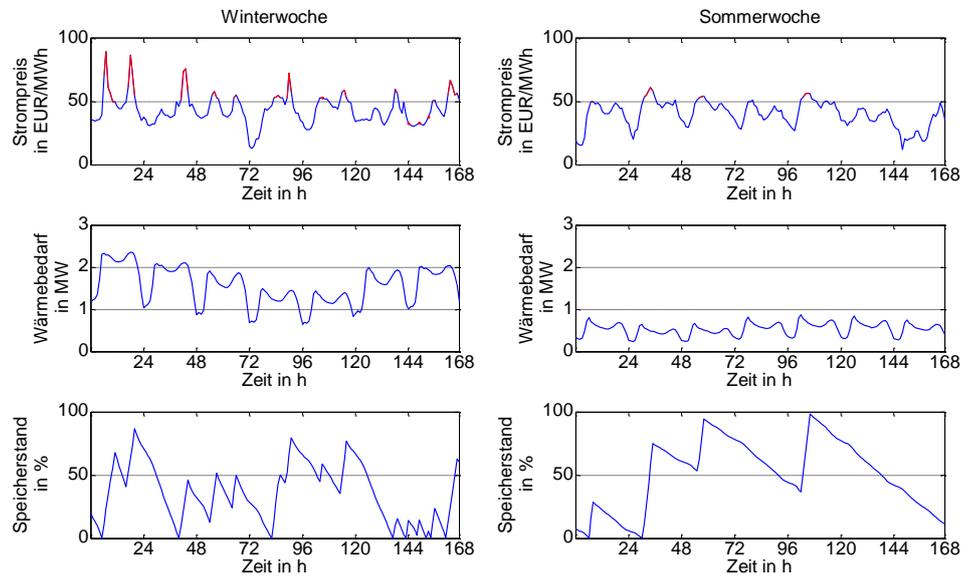


Abbildung 21: Speicherauslastung und BHKW-Flexibilität am Beispiel einer typischen Winter- und einer Sommerwoche, 8 MW BHKW, Variante B1, Quelle: Eigene Darstellung

7.1.9 Wärmeproduktion nach Erzeuger

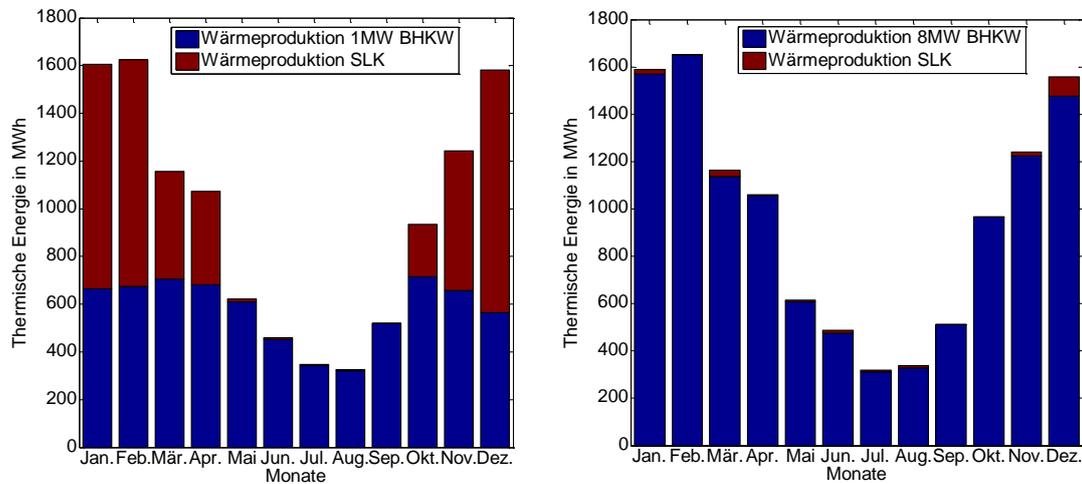


Abbildung 22: Wärmeproduktion nach Erzeuger für zwei ausgewählte BHKW-Leistungen der Variante B1, Quelle: eigene Darstellung

Die Abbildung 22 stellt die monatliche Wärmeproduktion nach Erzeuger dar. Die Differenzen in der monatlichen Gesamtproduktion zwischen der 1 MW und der 8 MW-Variante sind auf verschiedene Speicherfüllstände am Anfang beziehungsweise am Ende des Monats zurückzuführen.

Die Wärmebereitstellung durch den Spitzenlastkessel (SLK) von ca. 40 % bei der 1 MW-Variante wird im Fall des 8 MW-BHKW nahezu vollständig durch das BHKW substituiert.

7.1.10 Tägliche Betriebsstarts, Betriebsstunden und maximale Stillstandszeiten

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die täglichen Betriebsstarts, die täglichen Betriebsstunden und die maximale Stillstandszeit pro Woche für beide BHKW-Leistungen. Das BHKW mit 1 MW Leistung weist etwa von September bis Mai eine hohe Anzahl täglicher Betriebsstunden auf. In den Sommermonaten ändert sich dieses Verhalten, teilweise bleibt der Betrieb über zwei Tage am Stück aus.

Dem entsprechend gibt es wenige Betriebsstarts und Stillstandszeiten an Tagen mit einem hohen Wärmebedarf. Bis auf einen vernachlässigbaren Ausreißer kommt es maximal bis zu 3 Betriebsstarts pro Tag. An 182 Tagen im Jahr ist das BHKW 24 Stunden am Tag im Betrieb. Eine Flexibilität im Fahrplan ist an diesen Tag nicht gegeben.

Das BHKW mit 8 MW Leistung weist wesentlich mehr tägliche Betriebsstarts auf, die tägliche Anzahl ist jedoch nur geringfügig höher als bei der 1 MW-Variante. Die maximale Stillstandszeit steigt an einigen Tagen im Jahr auf 65 Stunden an. Auch bei einem hohem Wärmebedarf ist das Kraftwerk maximal 12 Stunden am Tag in Betrieb. Eine Flexibilität im Fahrplan ist daher das gesamte Jahr über gegeben und resultiert in einen hohen durchschnittlichen Strompreis von 61,6 EUR/MWh (vgl. Abbildung 17).

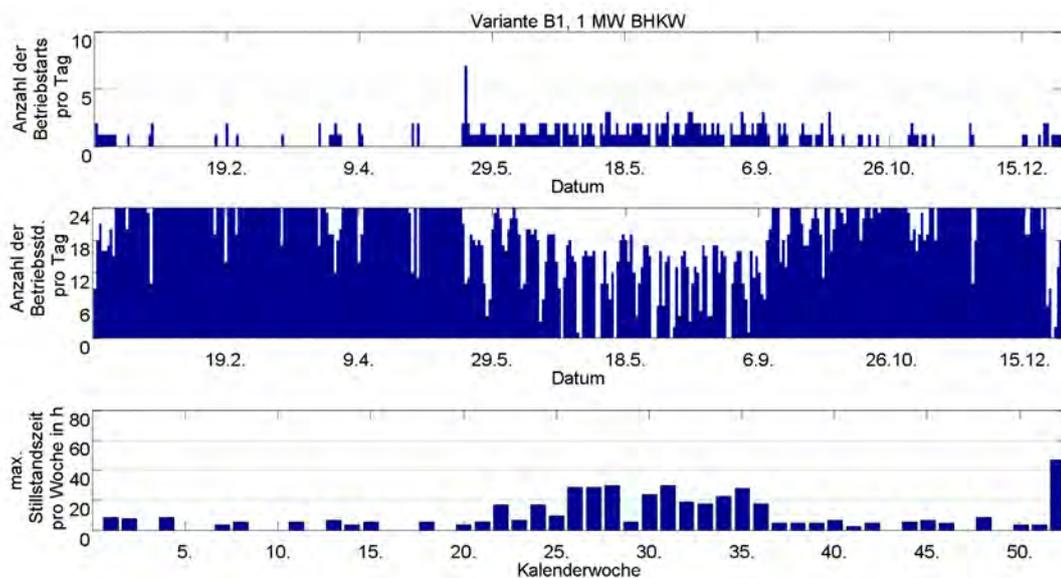


Abbildung 23: Variante B1, 1 MW BHKW

oben: Anzahl der Betriebsstarts pro Tag, Mitte: Anzahl der täglichen Betriebsstunden, unten: maximale Stillstandszeit pro Woche, Quelle: eigene Darstellung

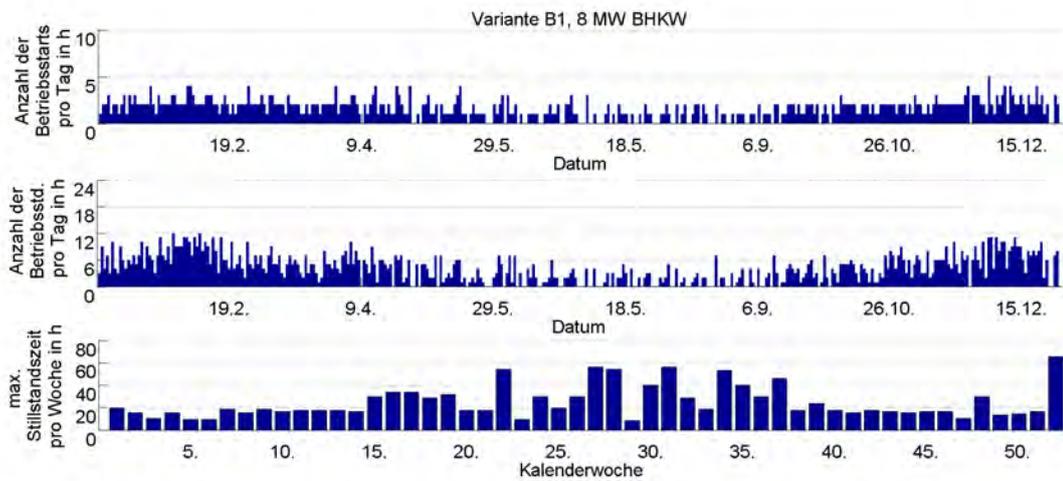


Abbildung 24: Variante B1, 8 MW BHKW

oben: Anzahl der Betriebsstarts pro Tag, Mitte: Anzahl der täglichen Betriebsstunden, unten: maximale Stillstandszeit pro Woche, Quelle: eigene Darstellung

Da die betrachteten Parameter das Resultat des Strompreis-optimierten Betriebes bei gleichzeitiger Wärmebedarfsdeckung sind, also von dem täglichen Wärmebedarf, dem Verlauf und der Höhe des Strompreises abhängig sind, ist in der folgenden Abbildung Börsenstrompreis und Heizleistung als wöchentlicher Mittelwert dargestellt. Außerdem sind die erzielten Strompreise ebenfalls als wöchentlicher Mittelwert gegenübergestellt.

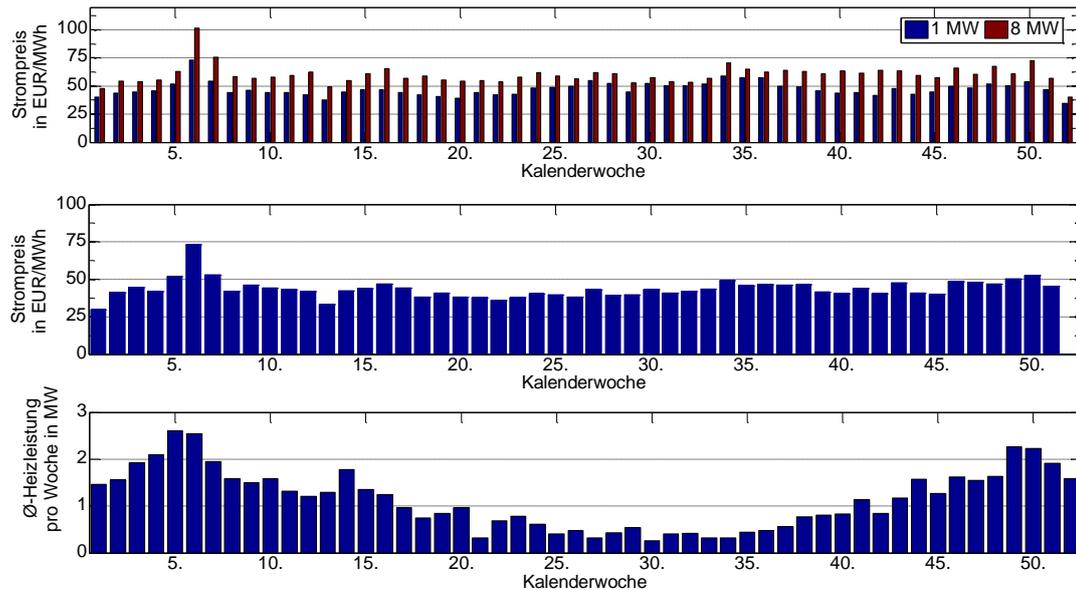


Abbildung 25: oben: durchschnittlicher Strompreis pro Woche für die 1 MW und 8 MW-Variante, Mitte: durchschnittlicher Strompreis pro Woche, unten: durchschnittliche Heizlast pro Woche, Quelle: eigene Darstellung

Der Betrieb mit einem 8 MW-BHKW erzielt in jeder Kalenderwoche einen höheren Strompreis, der im Durchschnitt 12,6 EUR/MWh beträgt. In dem Zeitintervalle von der 30. bis zur 34. Kalenderwoche, in dem der Wärmebedarf sehr gering ist, fällt diese Differenz im Durchschnitt auf 5,6 EUR/MWh, so dass das große BHKW bei der Flexibilität in der Auswahl der Betriebstunden kaum noch im Vorteil ist. Inwiefern die größere produzierte Strommenge durch den Leistungsunterschied wirtschaftlich vorteilhaft ist, wird im Abschnitt 7.3.2 betrachtet.

7.1.11 Auswertung der Vorhaltung und des Abrufs negativer Minutenreserveleistung (Variante C)

In dem Simulationszeitraum Januar bis Dezember 2012 wurde in 8420 Stunden die Vorhaltung von negativer Minutenreserveleistung mit einem Preis größer null vergütet. In diesem Zeitraum kam es in 13.320 Viertelstunden, das entspricht 3330 Stunden, zu einem Abruf von negativer Minutenreserveleistung. Auf der Basis dieser Werte werden die relativen Häufigkeiten von Leistungsvorhaltung und -abruf der Simulationsdaten bewertet.

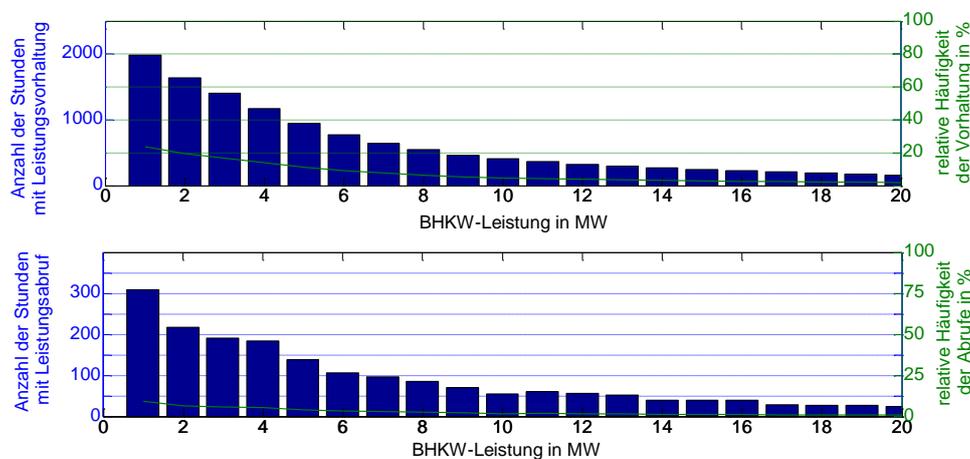


Abbildung 26: Absolute und relative Häufigkeit von Leistungsvorhaltung und -Abruf, Variante C, Quelle: eigene Darstellung

Mit steigender BHKW-Leistung sinkt nicht nur die Anzahl der Betriebsstunden allgemein, es verringert sich ebenfalls die Wahrscheinlichkeit, dass das BHKW über vier Stunden in Folge in Betrieb ist. Diese Bedingung für die Vorhaltung von negativer Reserveleistung ist mit steigender Leistung immer seltener gegeben (Abbildung 26, Diagramm oben).

Mit dem festgelegten Arbeitspreis von -30 EUR/MWh, das entspricht einer Zahlung an die Übertragungsnetzbetreibenden im Falle eines Abrufs, kann die Wahrscheinlichkeit für einen Abruf positiv beeinflusst werden.

Die Absicht, für einen Abruf zu bezahlen liegt darin begründet, dass bei jedem Abruf der Heizstab an der Stelle des BHKW eingeschaltet wird, so dass Wärme bereitgestellt wird ohne Aufwendung zusätzlicher Gaskosten. Jedoch kommt es mit steigender Leistung immer seltener zu Abrufen, da die Bedingung, das zuvor Leistung vorgehalten wurde, ebenfalls seltener erfüllt wird (untere Diagramm der Abbildung 26).

7.1.12 Auswertung Bilanzkreisausgleich (Variante D)

In diesem Abschnitt wird das Potenzial zum Bilanzkreisausgleich (Variante D) in Abhängigkeit der BHKW-Leistung untersucht. Die Grundlage dieser Simulationsdaten sind die Bilanzkreisabweichungen, die durch die Differenz zwischen der Prognose und der tatsächlichen Einspeisung einer 4 MW Windenergieanlage (WEA) verursacht werden. Die gesamte BHKW-Leistung teilt sich in zwei baugleiche Module auf, deren Fahrplan unabhängig voneinander optimiert werden. Im Folgenden wird mit BHKW-Leistung die Leistung der gesamten Anlage gemeint.

Die Abweichungen des Bilanzkreisausgleichs können durch einen angepassten BHKW-Fahrplan reduziert werden. In der folgenden Abbildung wird zwischen einer Reduzierung im Fall einer Unterspeisung und der Reduzierung im Fall einer Überspeisung des Bilanzkreises unterschieden.

Die größte Energiemenge wird bei einer Überspeisung von einem BHKW der gleichen Leistung wie der WEA kompensiert. Das geschieht durch vollständiges Abschalten oder Drosselung der Leistung. Im Fall einer Unterspeisung liegt die maximale Reduzierung der Abweichung bei einer BHKW-Leistung von 5 MW.

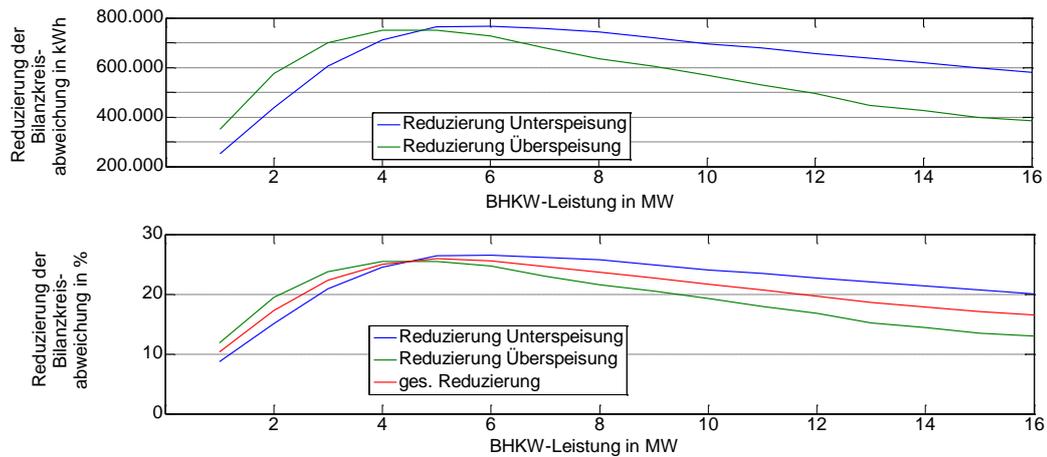


Abbildung 27: Absolute und relative Reduzierung der Abweichung des Bilanzkreises über die BHKW-Leistung, Quelle: eigene Darstellung

Von insgesamt 2,95 GWh können mit dem verwendeten Optimierer maximal 25,5 % der Überspeisung kompensiert werden. Im Falle einer Unterspeisung liegt die maximale Reduzierung bei 26,5 % (von 2,89 GWh).

7.2 Emissionsbetrachtung

7.2.1 Spezifische CO₂-Emissionen der BHKW

Für die folgenden CO₂-Betrachtungen werden ausschließlich die Variante B1 mit einem BHKW-Modul und die Variante B2 mit zwei BHKW-Modulen betrachtet. Die Variante C mit der Systemdienstleistung und die Variante D mit der Reduzierung der Nutzung von Ausgleichsenergie haben zusätzliche ökologische Auswirkungen. Für die folgende Betrachtung werden jedoch ausschließlich die direkten CO₂-Emissionen vor Ort betrachtet. Die Emissionen verursacht durch den Spitzenlastkessel werden in den Abbildung 30 und Abbildung 31 mitberücksichtigt.

Die spezifischen Emissionen dargestellt in Abbildung 28 basieren auf der Strom-Restwert-Methode. Danach werden von den gesamten CO₂-Emissionen des betrachteten BHKW eine Gutschrift für die Wärmeerzeugung abgezogen.

Diese Gutschrift errechnet sich aus den Emissionen, die bei der Produktion der gleichen Wärmemenge durch einen Referenzkessel entstanden wären.

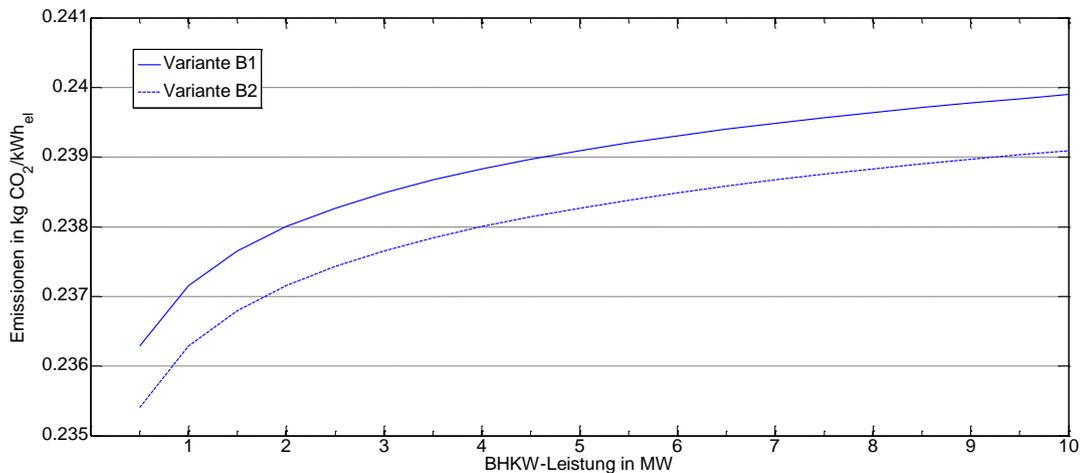


Abbildung 28: Spezifische CO₂-Emissionen über die BHKW-Leistung für die Variante B1 (ein BHKW-Modul) und die Variante B2 (zwei BHKW-Module), Quelle: eigene Darstellung

Aufgrund des hohen Brennstoffausnutzungsgrades, der unabhängig von der Modulleistung bei ca. 87 % liegt (vgl. 4.1), unterscheiden sich die Emissionen bezogen auf produzierte elektrische Energie um weniger als einen Prozent. Die Tatsache, dass die größere Leistungen höhere spezifische Emissionen aufweisen, liegt an der Wahl der Berechnungsmethode: Diese begünstigt kleinere Leistungen mit einer hohen Wärmeausbeute. Dadurch hat bei kleinen Leistungen die CO₂-Gutschrift durch die Wärmeproduktion einen größeren Einfluss auf den Wert der spezifischen Emissionen je elektrischer Kilowattstunde. Im Vergleich mit den durchschnittlichen CO₂-Emissionen konventioneller Kraftwerkstypen wird deutlich, dass der Unterschied zwischen den Varianten B1 und B2 zu vernachlässigen ist.

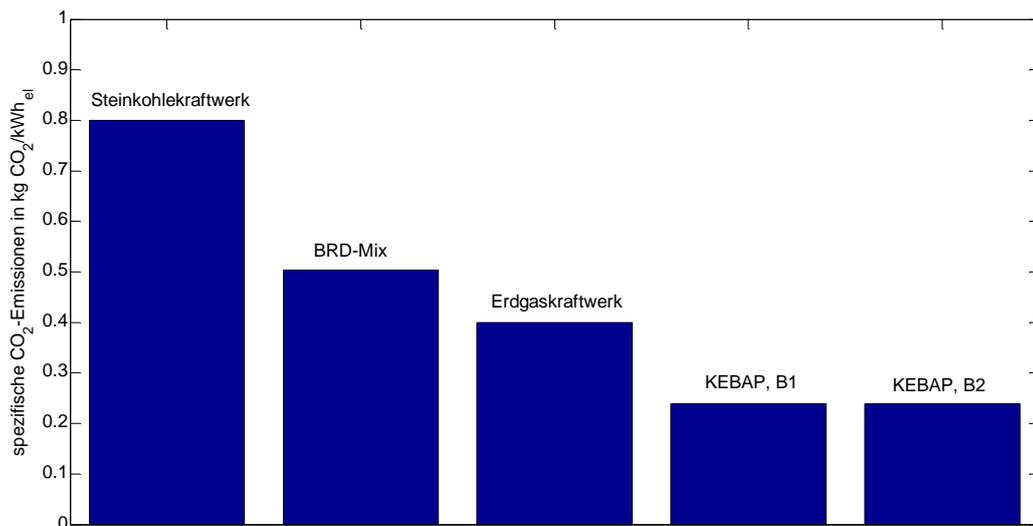


Abbildung 29: Spezifische CO₂-Emissionen über die BHKW-Leistung für verschiedene Kraftwerkstypen nach (statistika, 2013) , Quelle: eigene Darstellung

7.2.2 Absolute CO₂-Emissionen nach Energieart

Anhand der Daten der Variante B2 sind in der folgenden Abbildung die Emissionen in Kilogramm CO₂ pro Jahr nach Energieart dargestellt. Außerdem zeigt die Grafik, welche CO₂-Emissionen bei vergleichbaren Erzeugern entstanden wären. Für die Wärmeproduktion wird der durchschnittliche Emissionswert der Hamburger Fernwärme und für die Strommenge der Wert des deutschen Strommixes aus Abbildung 29 herangezogen .

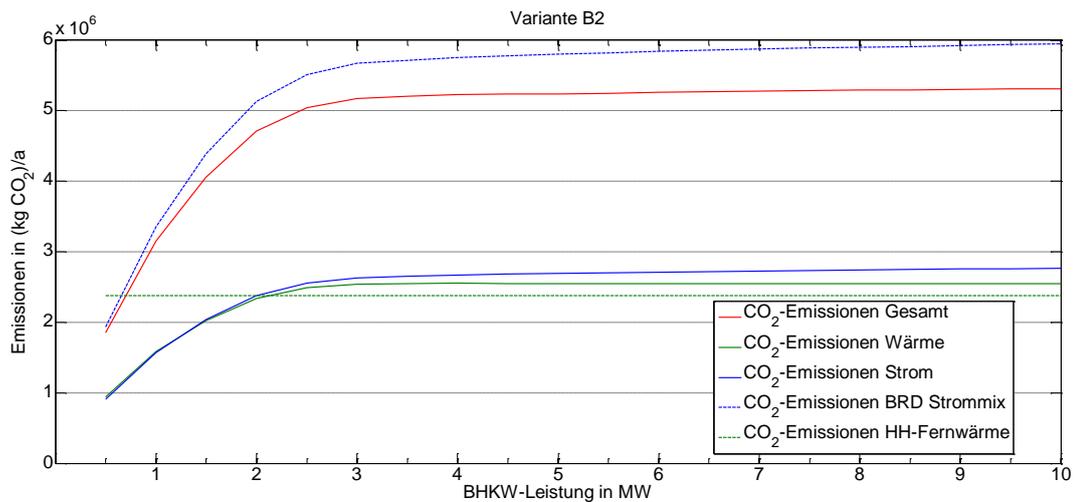


Abbildung 30: Emissionen pro Jahr über die BHKW-Leistung nach Energieart im Vergleich zu konventioneller Erzeugung, Quelle: eigene Darstellung

Die CO₂-Emissionen für die Wärmeproduktion steigen bis zu einer Leistung von 3 MW aufgrund des Wärmedeckungsanteils des Spitzenlastkessels an. Werden lediglich die anteiligen Emissionen der erzeugten Wärmemenge durch KEBAP betrachtet, wird ersichtlich, dass die Werte ab einer Leistung von 2 MW die Emissionen aus Hamburger Fernwärmeproduktionsanlagen übersteigen. Bei der Stromproduktion wird die Effizienz des KEBAP-BHKW deutlich: die Emissionen im Vergleich zum BRD-Strommix bei gleicher Strommenge sind erheblich geringer. Mit steigender Leistung vergrößert sich diese Differenz durch die höheren Stromkennzahlen.

7.2.3 Relative CO₂-Vermeidung

Um die CO₂-Einsparungen in Relation zu vergleichbarer Produktion zu betrachten, sind in Abbildung 31 die vermiedenen CO₂-Emissionen in Prozent aufgetragen. Auch wenn die Betrachtung der reinen Wärmeproduktion bei einer Leistung größer als 2 MW zu einer negativen Einsparung führt, so liegen die Gesamteinsparungen zwischen 21,3 und 34,8 %.

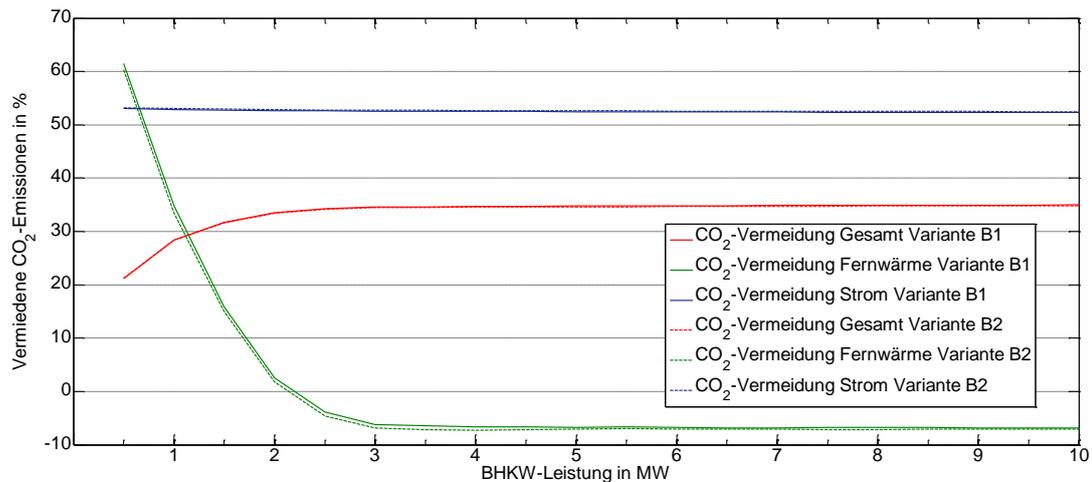


Abbildung 31: Vermiedene CO₂-Emissionen über die BHKW- Leistung nach Energieart für die gesamte Energieproduktion, Quelle: eigene Darstellung

7.3 Wirtschaftliche Analyse

7.3.1 Erlöse und Kosten

Im den folgenden Abbildungen werden die Verläufe der Erlöse und Kosten je Betriebsvariante über die thermische BHKW-Leistung dargestellt. Es wurden BHKW-Leistungen von einem halben Megawatt bis zu 10 MW simuliert, für eine höhere Anschaulichkeit werden in diesem Abschnitt jedoch nur die ganzzahligen Megawatt betrachtet.

Die errechneten Erlöse beziehen sich auf den Zeitraum, in denen die KWK-Vergütung ausgezahlt wird. Diese Einnahmequelle fällt mit dem Erreichen der 30.000 Betriebsstunde weg. Unter Abb. 7-1-2 werden daher anschließend die gemittelten Einnahmen über 20 Jahre betrachtet. Die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf sind für alle Leistungsklassen konstant und ergeben sich aus dem Nennwärmebedarf von 10 GWh und dem angestrebten Wärmepreis von 68 EUR/MWh.

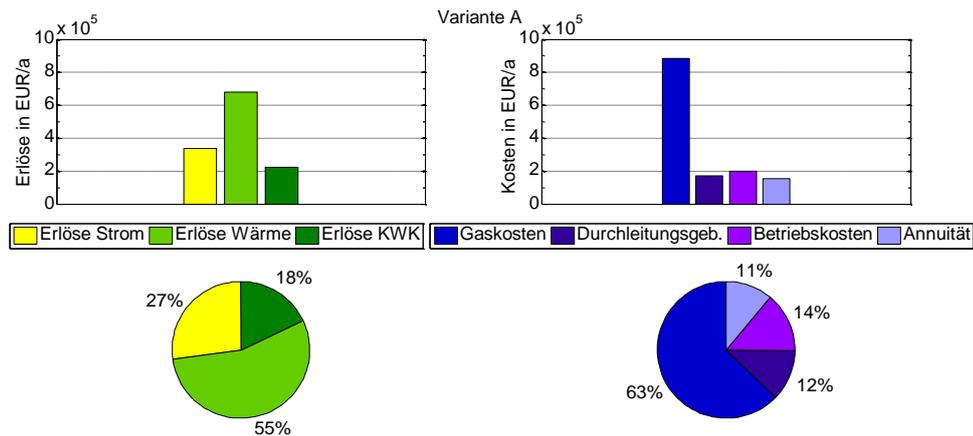


Abbildung 32: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante A (Referenzfall), Quelle: eigene Darstellung

Der Wärmeverkauf nimmt bei der Variante A mit 55 % den größten Anteil der gesamten Erlöse ein. Die Einnahmen durch den Stromverkauf liegen mit einem durchschnittlichen Baseload-Preis von 42,7 EUR/MWh bei 27 %. Die spezifische KWK-Vergütung beträgt 27,7 EUR/MWh_{el} und ergibt bei einer jährlichen Einspeisung von 8.400 MWh eine jährliche Vergütung von 232.000 EUR.

Die Brennstoffkosten überwiegen mit 63 % der jährlichen Ausgaben, jeweils knapp über 10 % betragen die Kosten durch die Durchleitungsgebühr, der Betriebskostenpauschale und der Annuität.

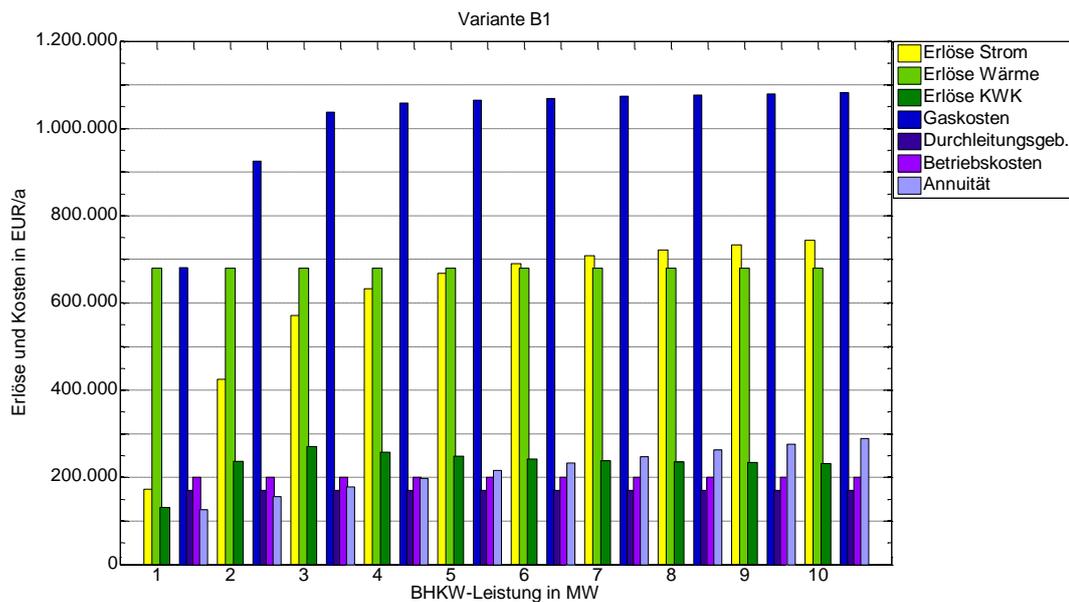


Abbildung 33: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung

Bei der Variante B1 mit einem stromgeführten BHKW-Modul nehmen die Stromeinnahmen stetig zu. Auf der einen Seite steigt die generierte Strommenge von 3.800 auf 11.800 MWh/a. Außerdem erhöht sich durch die sinkenden Betriebsstunden von 8178 auf 1238 pro Jahr die Flexibilität des BHKW-Fahrplans. Somit kann ein höherer durchschnittlicher Strompreis erzielt werden. Dieser steigt von 45 auf 62 EUR/MWh an. Die Erlöse durch den Wärmeverkauf sind konstant und der Verlauf der KWK-Vergütung hat ein Maximum bei 3 MW. Die Zunahme der Gaskosten bei den kleineren Leistungsklassen ist auf den Einsatz des Spitzenlastkessels zurückzuführen. Bis zu einer Leistungsklasse von 3 MW sinkt der Wärmedeckungsanteil des Spitzenlastkessels von 64 % auf 2 % und stagniert um diesem Wert. Die Durchleitungsgebühren und die Betriebskostenpauschale bleiben konstant. Durch die steigenden Investitionskosten des BHKW nimmt die jährliche Annuität stetig zu.

Die Variante B2 mit zwei baugleichen BHKW-Modulen unterscheidet sich bei den Erlösen und Kosten von der Variante B1 durch die höhere KWK-Vergütung und einer größeren Annuität.

Beide Zuwächse kompensieren sich im wesentlichen, jedoch sind in der Variante B2 kleinere BHKW-Leistungen wirtschaftlicher als bei der Variante B1 (Siehe Abbildung 34).

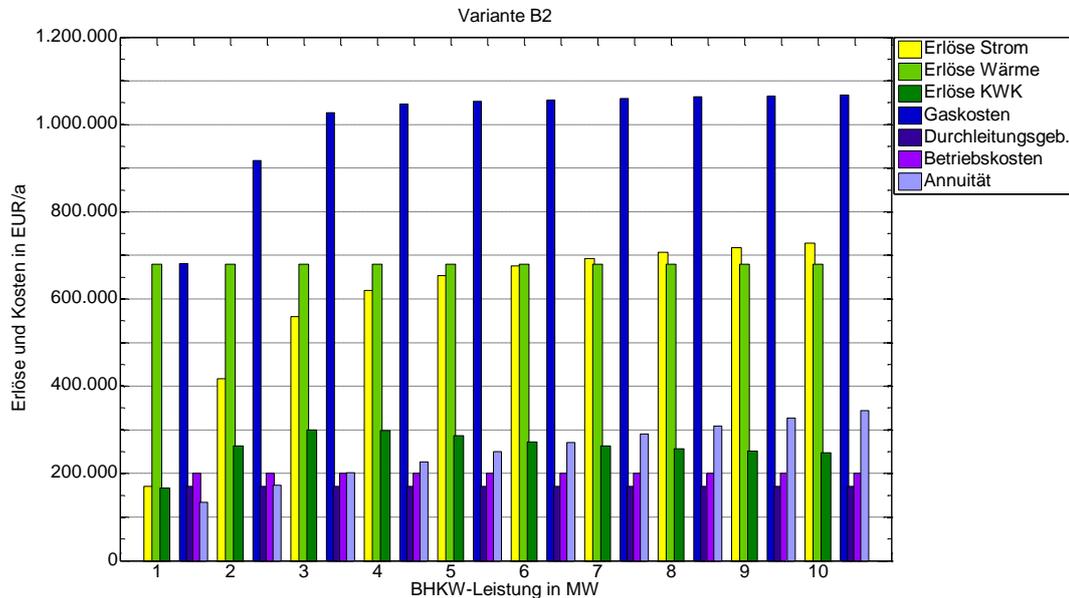


Abbildung 34: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante B2, Quelle: eigene Darstellung

Zu den bisherigen Einnahmequellen kommen bei der Variante C die Erlöse durch die Leistungsvorhaltung und die Kosten bei einem Abruf von negativer Minutenreserveleistung hinzu. Diese basieren auf 569 Abrufe pro Jahr bei einem Megawatt und nehmen stetig ab auf 76 Abrufe bei dem 10 MW-BHKW. Aufgrund der Voraussetzung, die Leistungsvorhaltung stets in Vierstundenblöcken anzubieten, nimmt die Wahrscheinlichkeit bei größeren Kraftwerken ab, in den Stunden den Betrieb angemeldet zu haben, in denen negative Minutenreserve benötigt wird. Unter welchen Bedingungen größere BHKW einen größeren Anteil an dieser Systemdienstleistung übernehmen können sollte in einer weiteren Potenzialanalyse untersucht werden.

Die Einnahmen aus dem Stromverkauf fallen im Vergleich zu der Variante B1 im Durchschnitt lediglich um 5,9 % geringer aus trotz zusätzlicher Optimierung auf eine hohe Vergütung durch die Leistungsvorhaltung.

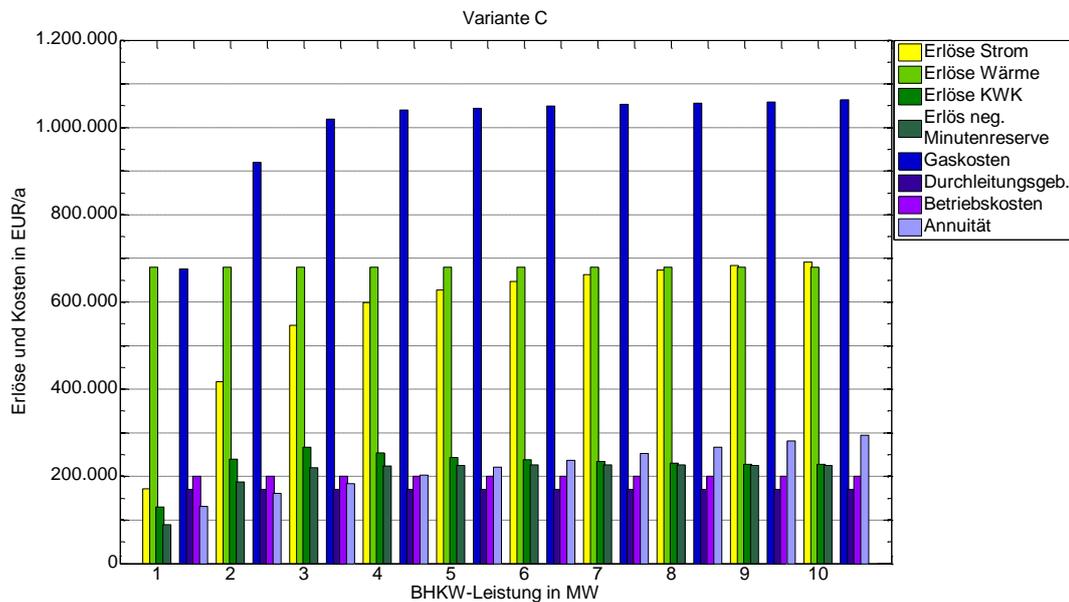


Abbildung 35: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante C, Quelle: eigene Darstellung

Die Zusatzerlöse bei der Variante D durch die Reduzierung der Bilanzkreisabweichungen nehmen bis zu einer Leistungsklasse von 3 MW linear zu, anschließend fällt der Zuwachs geringer aus. Sie betragen 37.000 EUR bei einem Megawatt, steigen auf 88.000 EUR an (3 MW) und betragen 123.000 EUR bei 10 Megawatt. Die Erlöse aus dem Stromverkauf fallen im Vergleich zu einer reinen EEX-Strompreisoptimierung für den gleichen Zeitraum um 12 % geringer aus. Eine Ursache dafür ist der durchgängige Betrieb im Teillastbereich bei 80 % der Nennleistung. Eine Optimierung, die zusätzlich die Wahrscheinlichkeit einer Bilanzkreisabweichung und somit eine gezielte zeitliche Flexibilität im Fahrplan der BHKW mitberücksichtigt, kann höhere Einnahmen beim Stromverkauf erwirtschaften.

Wie auch bei der Variante B2 fallen auf der Kostenseite die Annuitäten durch die zwei BHKW-Module stärker ins Gewicht.

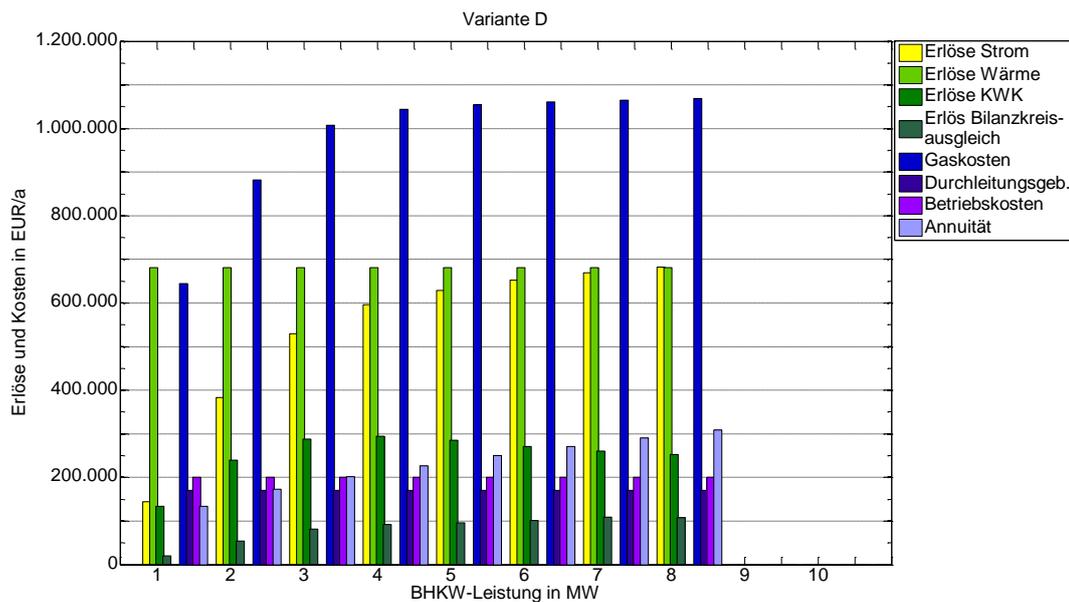


Abbildung 36: Erlöse und Kosten über die BHKW-Leistung, Variante D, eigene Darstellung

7.3.2 Gemittelte Gewinne und Wärme-Grenzpreis

Aus den ermittelten Erlösen und Kosten lässt sich der resultierende Gewinn berechnen. Wie bereits im Kapitel 6.4.3.3 (KWK-Förderung) beschrieben, wird die KWK-Förderung für die ersten 30.000 Vollbenutzungsstunden ausgezahlt. Daraus ergeben sich Förderzeiträume zwischen dreieinhalb und über 20 Jahre. In Abbildung 37 ist daher der gemittelte Gewinn über den Zeitraum von 20 Jahren über die BHKW-Leistung für alle Varianten dargestellt.

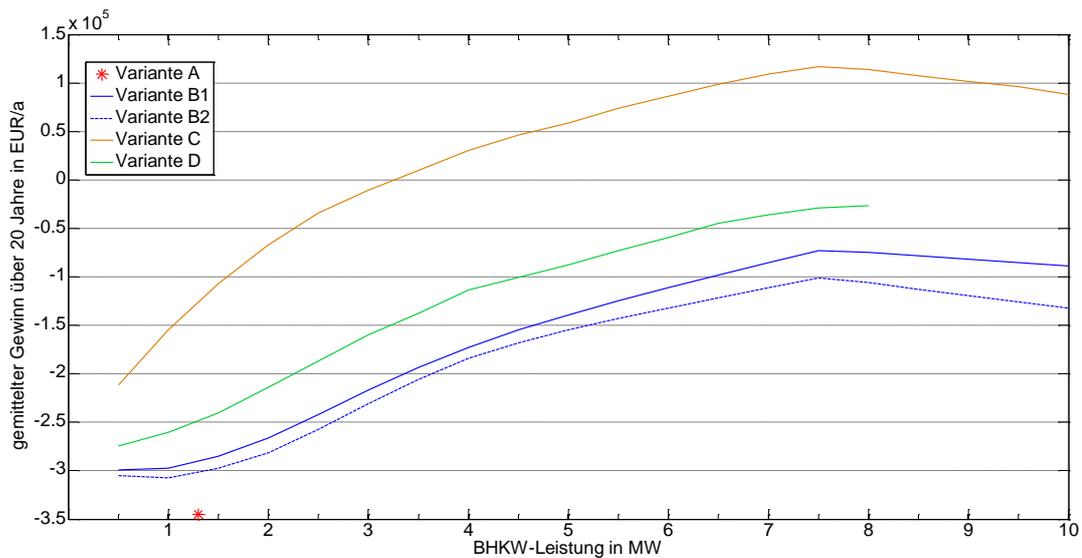


Abbildung 37: Gemittelter Gewinn über 20 Jahre über die BHKW-Leistung je Variante, eigene Darstellung

Die absoluten Beträge der Gewinne zeigen, dass lediglich die Variante C unter den getroffenen Annahmen für einige Leistungsklassen wirtschaftlich darstellbar ist. Für alle Varianten gilt, dass die gemittelten Gewinne mit der BHKW-Leistung ansteigen bis der festgelegte Auszahlungszeitraum der KWK-Förderung von 20 Jahren erreicht wird. Ab dieser Leistungsklasse sinken die Gewinne wieder. Bei den Varianten B1, B2 und C liegt dieser Wert bei einer BHKW-Leistung von 7,5 MW. In der Variante D werden höhere Betriebsstunden pro Jahr erreicht aufgrund des Teillastbetriebes für die Leistungsvorhaltung.

Bei kleinen BHKW-Leistungen bis ca. 3 MW nehmen die Gewinne am stärksten zu. Bei den Varianten B1 und B2 liegt die Ursache bei der maximalen KWK-Vergütung bei 2,5 MW (B1) und 3 MW (B2). Der weitere Anstieg ist auf die steigenden Gewinne durch den Stromverkauf zurückzuführen. Die ebenfalls steigende jährliche Annuität wirkt diesem Verhalten entgegen. Bei den Varianten B2 und D, also den Varianten mit zwei BHKW-Modulen, ist daher eine entsprechende Steigerungsrate des Gewinnes zu beobachten.

Die dargestellten Gewinne wurden mit dem angestrebten Wärmepreis von 68 EUR/MWh errechnet. Werden nun alle übrigen Erlöse und Kosten als gegeben betrachtet und nur die Einnahmen aus dem Wärmeverkauf variiert, so dass die mittleren Gewinne über 20 Jahre null betragen, lässt sich ein Wärme-Grenzpreis ermitteln. Diese Methode ergibt inverse Verläufe der vorangegangenen Gewinnkurven.

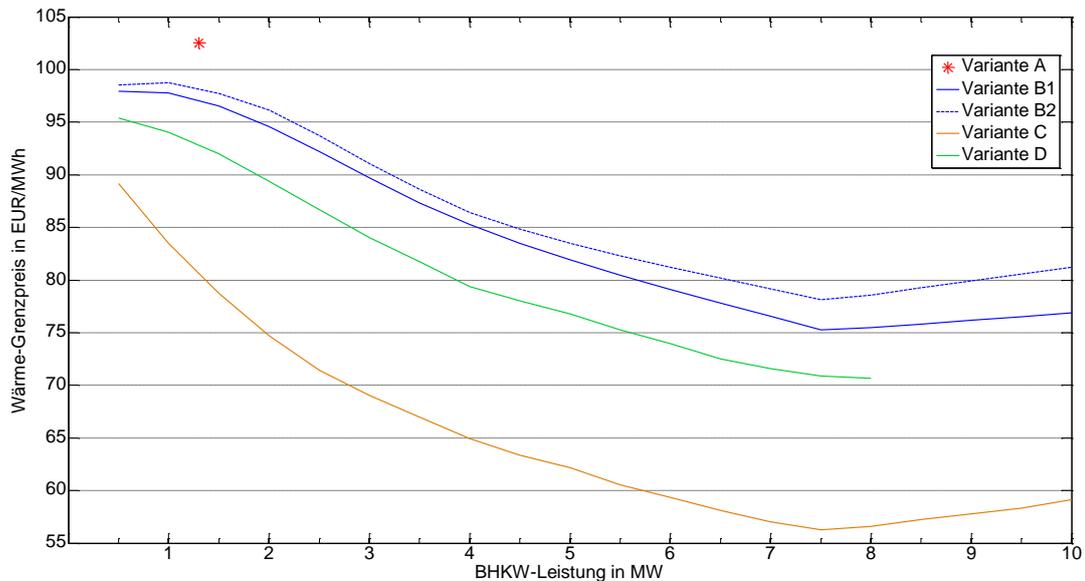


Abbildung 38: Wärme-Grenzpreis über die BHKW-Leistung je Variante, eigene Darstellung

Die Abbildung gibt einen Aufschluss darüber, in welcher Größenordnung der Wärmepreis unter gegebenen Bedingungen liegen müsste. Entsprechend der Abbildung 37) kann lediglich mit der Variante C ab einer BHKW-Leistung von 3,5 MW ein Fernwärmepreis unterhalb 68 EUR/MWh erreicht werden.

7.3.3 Varianz im Wärmebedarf

Bisher wurde für alle Varianten ein jährlicher Wärmebedarf von 10 GWh angenommen. Welchen Einfluss ein geringerer oder höherer Wärmebedarf auf den Gewinn über das betrachtete Leistungsspektrum hat, wird in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Darin sind die Gewinnkurven für einen Wärmebedarf von 8, 9, 10, 11 und 12 GWh aufgetragen. Exemplarisch sind in der Abbildung 39 die Verläufe einer reinen EEX-Strompreis-optimierten Variante (Variante B2) und in der Abbildung 40 die Ergebnisse der Variante C visualisiert.

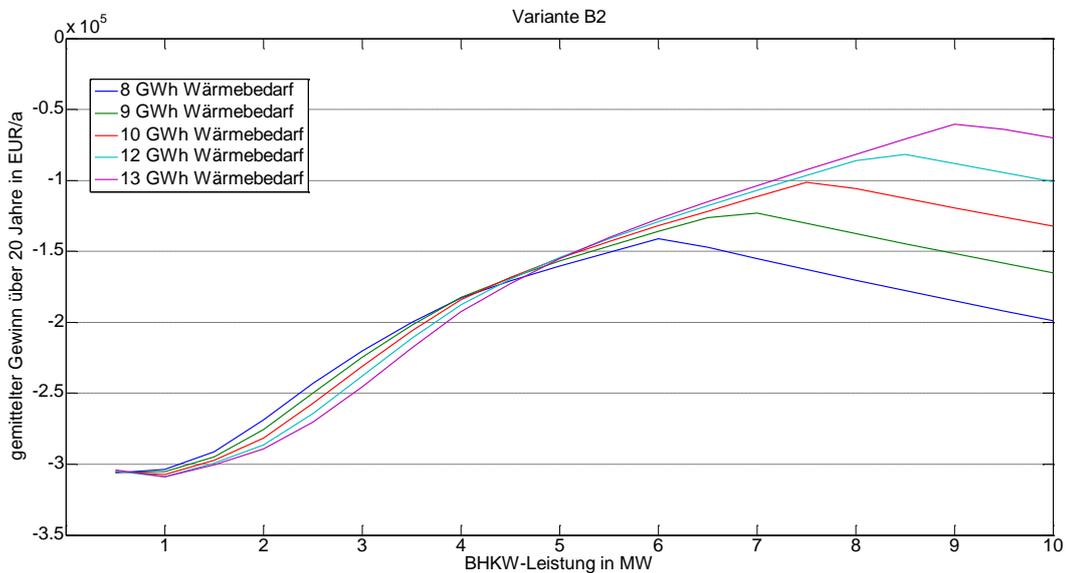


Abbildung 39: Gemittelter Gewinn über die BHKW-Leistung für verschiedene Wärmebedarfe, Variante B2, Quelle: eigene Darstellung

Die rote Kurve entspricht dem Verlauf des gemittelten Gewinns der Variante B2 aus der vorangegangenen Abbildung 37. Für Leistungen kleiner als 4,5 MW wirkt sich ein geringerer Wärmebedarf positiv auf den Gewinn aus. Ab diesem Wert ändert sich dieses Verhalten: bei steigender Leistung wachsen die Gewinne stärker, je größer der Wärmebedarf ist. Jede Gewinnkurve besitzt ein Maximalwert, der aufgrund des Betrachtungszeitraumes von 20 Jahren die Auszahlung der KWK-Förderung limitiert. Da die KWK-Förderung bei der Variante B2 bis zu 20 % der Einnahmen ausmacht, fällt die Gewinnkurve sobald diese Einnahmequelle ausbleibt.

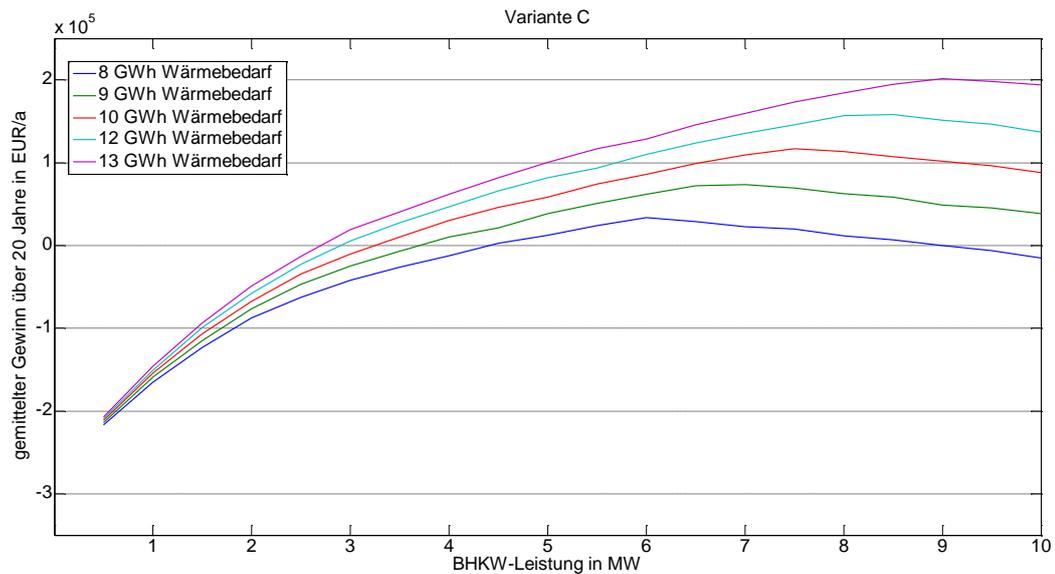


Abbildung 40: Gemittelter Gewinn über die BHKW-Leistung für verschiedene Wärmebedarfe, Variante C, Quelle: eigene Darstellung

Für die Variante C bedeutet ein höherer Wärmebedarf auch ein höherer Gewinn bei gleicher BHKW-Leistung. Auch in dieser Abbildung weisen die Gewinnverläufe ein Maximum auf, die auf die selben Ursache zurückzuführen ist wie bei der Variante B2. Jedoch wird deutlich, dass das Ausbleiben der KWK-Förderung im geringeren Maße die Gewinne vermindern im Vergleich zur Variante B2.

Ein größerer Wärmebedarf bedeutet höhere Betriebsstunden pro Jahr und erhöht in der betrachteten Variante die Wahrscheinlichkeit, für einen Vierstundenblock negative Reserveleistung anbieten zu können.

7.3.4 Varianz im Strompreisniveau

Für den stromgeführten Betrieb ist der Erlös aus dem Stromverkauf ein wichtiger Faktor für die Gesamtwirtschaftlichkeit. Die höheren Investitionskosten durch ein größer dimensioniertes BHKW im Vergleich zu einer Dimensionierung auf einen wärmegeführten Betrieb und die zusätzlichen Kosten durch den Wärmespeicher müssen hauptsächlich durch

die Mehreinnahmen durch den Stromverkauf kompensiert werden. Der Einfluss des Preisniveaus auf die gemittelten Gewinne werden im folgenden Abschnitt untersucht.

Abbildung 41 zeigt die gemittelten Gewinne über die BHKW-Leistung für die Variante B1 mit der reinen EEX-Strompreisoptimierung. Der Verlauf des Strompreises wurde dafür um 10% und um 20 % angehoben beziehungsweise herabgesetzt. Durch einen höheren Strompreis steigen die Gewinne bei zunehmender BHKW-Leistung. Bei einem niedrigeren Preisniveau ist diese Tendenz erst ab einer BHKW-Leistung von ca. 1,5 MW festzustellen. In dieser Leistungsklasse ist ein Minimum der Gewinne zu verzeichnen.

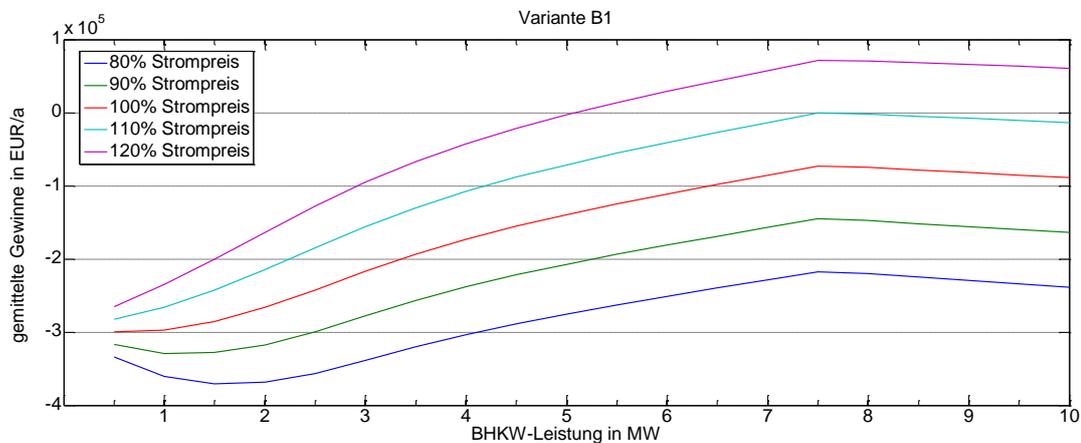


Abbildung 41: Absolute Veränderung des Gewinnes über die BHKW-Leistung bei Varianz im Strompreisniveau, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung

Die Betrachtung der relativen Gewinnsteigerung- und -reduzierung ist in der folgenden Abbildung für die Variante B1 und Variante C dargestellt. Der Knick bei einer Leistungsklasse von 7,5 MW ist, wie bereits im Abschnitt 7.3.2 beschrieben, auf die Beschränkung des Auszahlungszeitraumes der KWK-Förderung zurückzuführen. Eine Steigerung des Preisniveaus von 10 % führt beispielsweise bei der Variante B1 zu einer Gewinnsteigerung von bis zu 100 % (7,5 MW). Entsprechende Gewinnreduzierungen sind bei einem niedrigeren Strompreisniveau zu erwarten.

Da die Einnahmen aus dem Stromverkauf bei der Variante C nicht vollständig vom EEX-Strompreis abhängen, wirkt sich ein verändertes Strompreinsniveau nicht so stark auf die Gewinne aus im Vergleich zu der Variante B1.

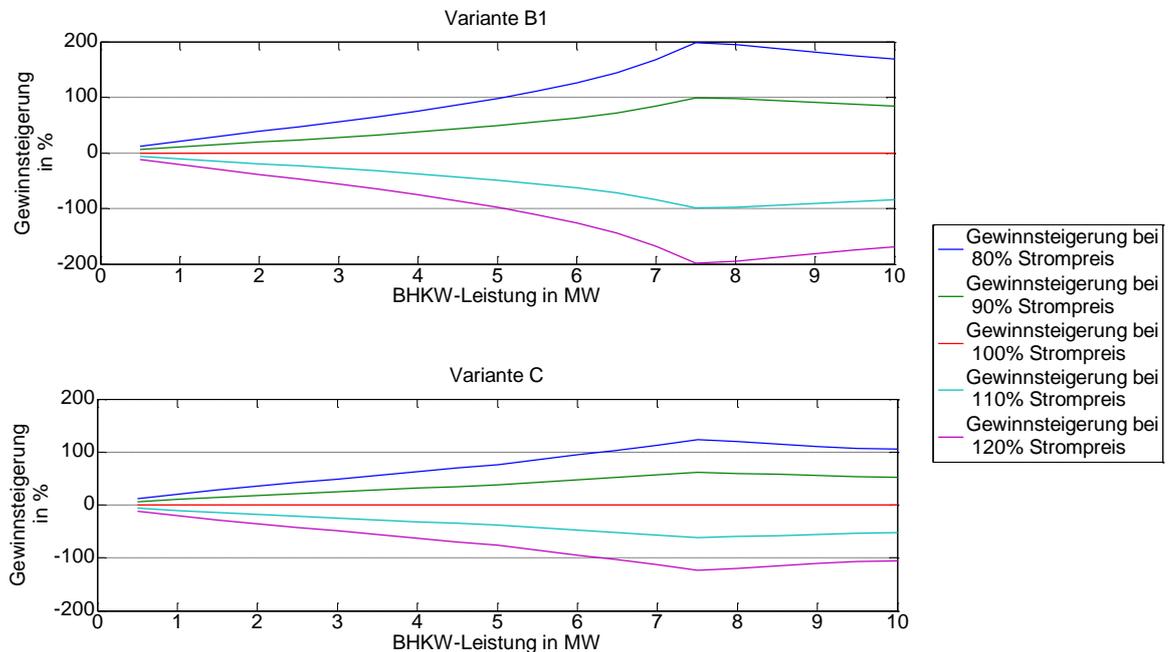


Abbildung 42: Relative Veränderung des Gewinns über die BHKW-Leistung bei Varianz im Strompreinsniveau, Variante B1 und C, Quelle: eigene Darstellung

7.3.5 Varianz zwischen Baseload- und Peakloadpreis

Neben der absoluten Höhe des Strompreises hat auch die Spreizung zwischen dem Baseload- und dem Peakloadpreis einen Einfluss auf die Strompreiserlöse.

Um diesen Einfluss für verschiedene Leistungsklassen zu untersuchen wurde der Verlauf des Strompreises manipuliert. Dafür wurden der stündliche Preis oberhalb des täglichen Mittelwertes um 10 und um 20 % herab- beziehungsweise herunter gesetzt (Abbildung 43).

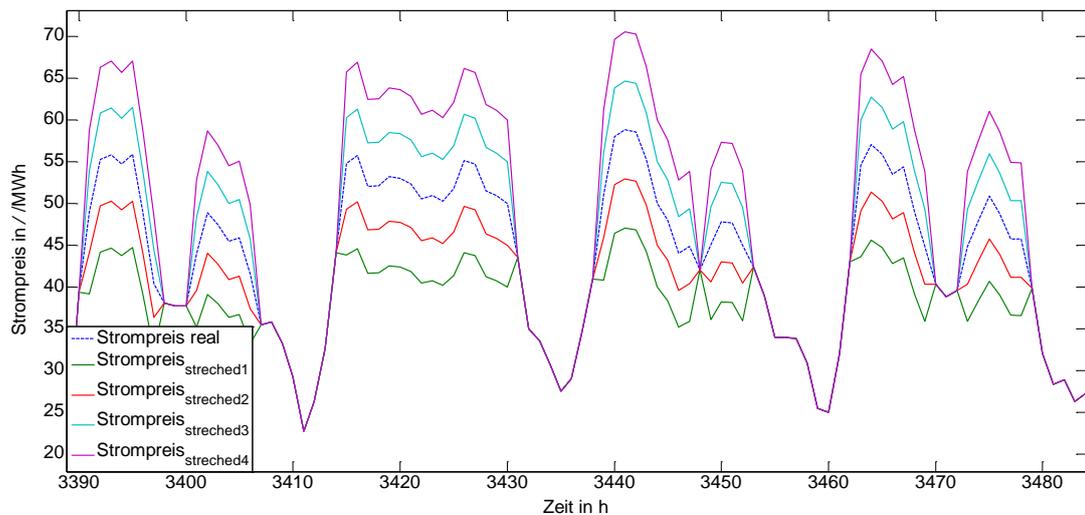


Abbildung 43: Spreizung des Strompreises, Quelle: eigene Darstellung

Die Auswirkungen auf die Gewinne bei einer veränderten Spreizung zwischen Base- und Peakloadpreis sind sehr stark abhängig von der BHKW-Leistung: Bei kleinen Leistungen ist dieser Einfluss der Spreizung nicht so ausgeprägt wie bei großen Leistungen. Ebenso hat die Spreizung bei der Variante B1 (Abbildung 44) einen größeren Einfluss als bei der Variante C (Abbildung 45). Wie schon bei der Veränderung des Preisniveaus, sinken zunächst die Gewinne bei kleinen Leistungsklassen, wenn die Differenz zwischen Base- und Peakloadpreis abnimmt.

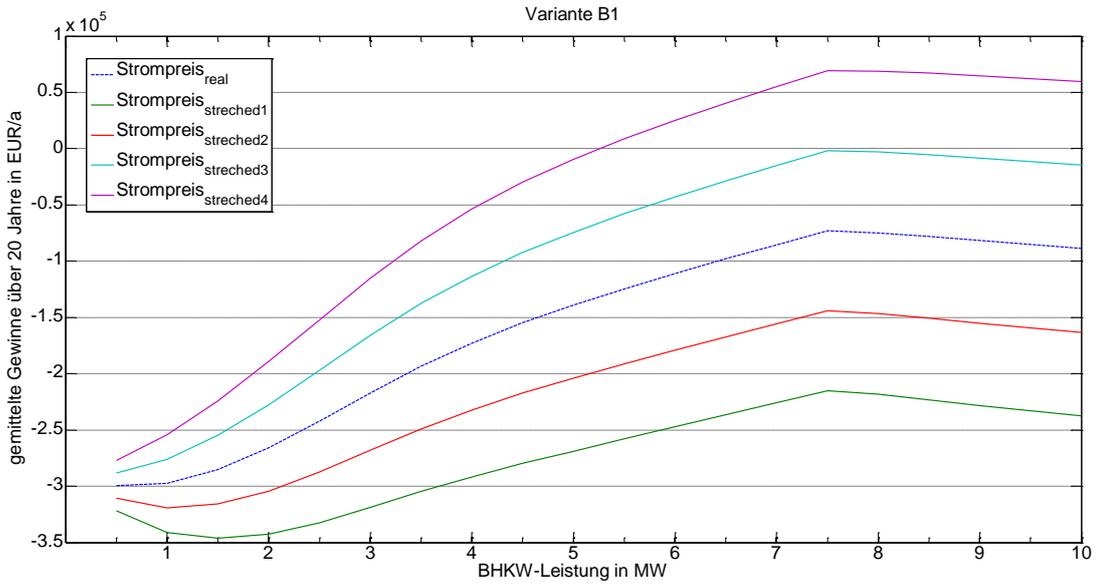


Abbildung 44: Absolute Veränderung des Gewinns bei Varianz zwischen Baseload- und Peakloadpreis, Variante B1, Quelle: eigene Darstellung

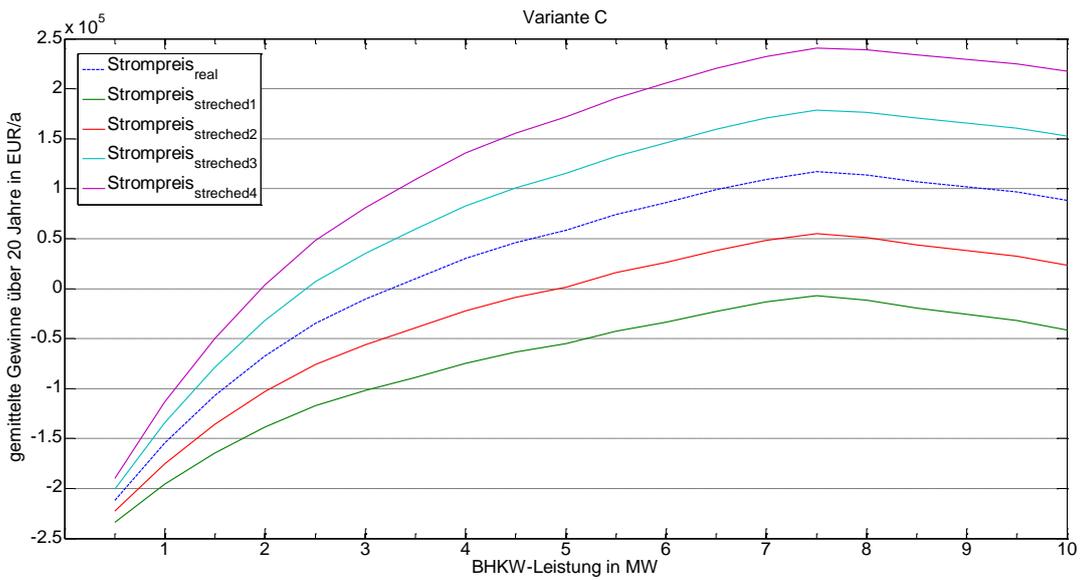


Abbildung 45: Absolute Veränderung des Gewinns bei Varianz zwischen Baseload- und Peakloadpreis, Variante C, Quelle: eigene Darstellung

7.4 Diskussion der Simulationsdaten

7.4.1 Variante B1 und B2

Die erzeugten Simulationsdaten basieren auf den Preisen und der Außentemperatur des Jahres 2012, beziehungsweise bei der Variante D auf den Zeitraum vom 1.10.2011 bis 29.10.2012. Auf Grundlage dieser Referenzzeiträume sind die Simulationsdaten zu betrachten. Durch das große Leistungsspektrum von 500 kW bis zu 10 MW für einen Wärmebedarf von maximal 3,6 MW werden die Einflüsse der untersuchten Parameter auf die BHKW-Leistung herausgestellt, wodurch gegebenenfalls lokale Minima oder Maxima sichtbar werden. Somit können nicht nur Aussagen über sinnvolle Anlagenkonstellation getroffen werden, sondern ebenso Leistungsklassen argumentativ ausgeschlossen werden. Dies trifft zum Beispiel auf die größten BHKW-Leistungen zu, die für KEBAP e.V. nicht in Betracht kommen.

Die Analyse der Betriebsweise der Variante B1 und B2, bei denen die Stromproduktion auf den Spotmarktpreis optimiert ist, zeigt das Potenzial stromgeführter BHKW in Kombination mit einem Wärmespeicher: Die erzielten durchschnittlichen Strompreise (Abbildung 17) liegen bereits bei kleinen BHKW-Leistungen deutlich über dem Referenzszenario (Variante A, wärmegeführt). Die Optimierung auf den Spotmarktpreis ist in diesem Zusammenhang als ein mögliches Steuersignal zu betrachten. Alternativ ist ein stromgeführter Betrieb des BHKW denkbar, das in einem Smart Grid eingebunden ist (vgl. (C4DSI, 2013)). Die Analyse der unterschiedlichen Betriebsweisen und der damit verbundenen Speicherausnutzung für eine typische Winter- und Sommerwoche (Abbildung 20) zeigen, dass die Freiheitsgrade in der Fahrplangenerierung stark von dem zu deckenden Wärmebedarf abhängen. Unterschiedliche Betriebsstrategien je nach Jahreszeit können daher sinnvoll sein, um das Potenzial einer Anlage zu steigern.

Die Aufteilung der gesamten Kraftwerksleistung auf zwei BHKW-Module ist mit höheren Investitionskosten (Abbildung 12) und einer geringeren Stromkennzahl (Abbildung 11) verbunden. Unter anderem verursacht letztere höhere CO₂-Emissionen. Der Betrieb von zwei Modulen bringt ebenso Vorteile mit sich, die aus der Auswertung der Simulationsergebnisse nur teilweise oder gar nicht hervorgegangen sind. Die hohe Anzahl von Anfahrmomenten kann sich je nach Leistungsklasse sehr unterschiedlich auf den Verschleiss und die Lebensdauer auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieser Sachverhalt nicht untersucht werden. Eine weitere Untersuchung über den möglichen Verschleiss beziehungsweise die Konditionen von Wartungsverträgen stromgeführter BHKW wird an dieser Stelle nahegelegt.

Unter den festgelegten Rahmenbedingungen sind die Varianten B1 und B2 nicht wirtschaftlich. Ursachen dafür liegen in der hohen jährlichen Annuität durch die Anlageninvestitionen, die Umbau- und Projektierungskosten. Eine Reduzierung der Investitionskosten, zum Beispiel durch einen zusätzlichen Förderbetrag, verschiebt die ermittelten Gewinnkurven (Abbildung 37) parallel nach oben.

Die Erlöse durch den Stromverkauf basieren auf einer Fahrplangenerierung ohne Berücksichtigung von technischen Einschränkungen wie zum Beispiel Vorwärmphasen bei einem Kaltstart, ect. Diese können je nach BHKW-Leistung die Freiheitsgrad bei der Generierung eines stromgeführten Fahrplans einschränken. Eine Betriebsweise, die ein Kompromiss zwischen der Strompreisoptimierung und einem geringen Verschleiß der Anlage darstellt, wird geringere Stromerlöse erwirtschaften.

Die Simulationsdaten zeigen, dass mit zunehmender BHKW-Leistung die Einnahmen hauptsächlich durch den Stromverkauf steigen. Die zukünftige Strompreisentwicklung hat daher einen enormen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes. Dieser Einfluss nimmt mit steigender BHKW-Leistung zu. Dieser Einfluss kann begrenzt werden, wenn die Erlöse auch aus anderen Stromprodukten generiert werden.

7.4.2 Variante C

Mit dem Modell der Variante C kann gezeigt werden, dass das BHKW neben der Wärmbedarfsdeckung und der EEX-Strompreisoptimierung auch eine Systemdienstleistung erbringen kann. Unter den getroffenen Annahmen führt dies zu signifikant höheren Gewinnen, die hauptsächlich durch die Vergütung aus der Vorhaltung von Minutenreserveleistung erzielt werden. Trotz der zusätzlichen Bedingungen für den Optimierer, kann ein hoher durchschnittlicher Strompreis erzielt werden.

Die potenziellen Gewinne durch diese Systemdienstleistung hängen von der eigenen Betriebsstrategie und die der konkurrierenden Marktteilnehmer_innen ab. Durch die Höhe des Leistungs- und des Arbeitspreises kann die Wahrscheinlichkeit für eine Leistungsvorhaltung oder –abruf beeinflusst werden. Dadurch sind in dieser Modellvariante viele zusätzliche Stellgrößen gegeben, welche die Gesamtwirtschaftlichkeit beeinflussen.

Durch die Bedingung, dass die Leistungsvorhaltung stets in Vierstundenblöcken erfolgt, nimmt die Anzahl der Abrufe mit steigender Leistung stark ab (Abbildung 26) und der Heizstab wird selten in Betrieb genommen. Dessen Einsatz ist aus betriebswirtschaftlicher Sicht anzustreben, da nicht nur Primärenergiekosten eingespart werden, sondern auch die Wartungskosten viel niedriger sind als durch den Einsatz des BHKW.

Unter welchen Voraussetzungen und mit welchen potenziellen Erlösen das Anbieten von negativer Minutenreserveleistung realisiert werden kann, ist durch weitere Untersuchungen zu prüfen.

7.4.3 Variante D

Die Simulationsdaten geben Aufschluss darüber, mit welchen BHKW-Leistungen die größten Reduzierungen der Bilanzkreisabweichung erreicht werden. Maximal sind das 26 % mit zwei 2,5 MW BHKW-Modulen (Abbildung 27).

Damit kann grundsätzlich gezeigt werden, dass eine zusätzliche Optimierung in den BHKW-Fahrplan integriert werden kann, ohne dass die Einnahmen aus EEX-Strompreisvergütung stärker abnehmen als die Zusatzerlöse. Bei einer Reduzierung der Bilanzkreisabweichung von 26 %, das entspricht ca. 1,5 GWh, sind Mehreinnahmen von ca. 60.000 EUR/a (Abbildung 37) zu erwarten. Im folgenden wird erläutert, durch welche Änderungen des Optimierers das Potenzial zur Reduzierung der Bilanzkreisabweichung erzielt werden kann. Mit einer konstanten Leistungsdrosselung bei 80 % der Nennleistung wird im ersten Schritt des Algorithmus ein strompreisoptimierter Fahrplan erstellt und in einer zweiten Optimierung der generierte Fahrplan gemäß der Bilanzkreisabweichung angepasst. Durch die konstante Leistungsdrosselung geht Potenzial bei beiden Optimierungsstufen verloren. Durch eine zeitlich variable Leistungsdrosselung können höhere Strompreise und geringere Bilanzkreisabweichungen erzielt werden. Dafür ist neben der Lastprognose der Windenergieanlage die Information nötig, zu welcher Tageszeit mit was für einer Abweichung gerechnet wird. Diese Konfidenzintervalle können bei der strompreisoptimierung bereits berücksichtigt werden. Außerdem könnte, die in der Variante C, der Heizstab benutzt werden, um eine Überspeisung des Bilanzkreises auszugleichen. Inwiefern dies wirtschaftlich sinnvoll ist, hängt von der Höhe des alternativ zu zahlenden Ausgleichsenergiepreis zusammen.

8. Zusammenfassung

Die fluktuierende Einspeisung aus Erneuerbaren Energien fordert Flexibilität von konventionellen Kraftwerken.

Am Beispiel des Bürgerkraftwerkes KulturEnergieBunkerAltonaProjekt (KEBAP) wurden mit Hilfe eines Simulationsmodells verschiedene stromgeführte Anlagenvarianten eines BHKW in Kombination mit einem Wärmespeicher unter technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten analysiert. Für einen konstanten Wärmebedarf von 10 GWh wurden BHKW-Leistungen zwischen 500 kW und 10 MW untersucht.

Mit zunehmender Leistung können die Gewinne durch zusätzliche Stromerlöse gesteigert werden. Voraussetzung dafür ist die durchgängige KWK-Vergütung. Bei zunehmender BHKW-Leistung nehmen die jährlichen Betriebsstunden ab und damit die Flexibilität im Fahrplan zu. Ebenso nehmen die Belastungen durch die Anzahl der Betriebsstarts zu. Die daraus resultierenden Mehrkosten müssen weiterführend analysiert werden. Unter den getroffenen Annahmen ist der reine Strompreis-optimierte Betrieb nicht wirtschaftlich. Zusatzgewinne zum Strompreis-optimierten Betrieb können durch die Vorhaltung und den Abruf von negativer Minutenreserveleistung oder durch die Reduzierung von Bilanzkreisabweichungen generiert werden. Der Betrieb eines stromgeführten BHKW in Kombination mit einem Wärmespeicher ist einerseits hocheffizient und dadurch ökologisch sinnvoll. Vor dem Hintergrund der Energiewende und den daraus resultierenden Anforderungen an die Flexibilität von konventionellen Kraftwerken können dezentrale BHKW einen wichtigen Beitrag zur Netzstabilität durch die Bereitstellung von Systemdienstleistungen leisten. Aktuell ist der stromgeführte BHKW-Betrieb nur bedingt wirtschaftlich, daher müssen neue Finanzierungsmechanismen geschaffen werden, die den Ausbau und Betrieb angemessen fördern.

9. Literaturverzeichnis

50hertz. (Mai 2013). *50hertz - Ausgleichsenergiepreise*. Abgerufen am Mai 2013 von

http://www.50hertz.com/cps/rde/xchg/trm_de/hs.xsl/2655.htm?rdeLocaleAttr=de&rdeCOQ=SID-5BE147FA-8DA32769

ASUE. (Juli 2011). BHKW-Kenndaten 2011.

BAFA. (Mai 2013). *Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*. Abgerufen am Mai 2013 von

http://www.bafa.de/bafa/de/energie/kraft_waerme_kopplung/

BMU. (August 2007). Das Integrierte Energie- und Klimaschutzprogramm (IEKP).

C4DSI. (Mai 2013). *Modellbildung und Simulation zukünftiger Versorgungssysteme*. Abgerufen am Mai 2013 von

<http://www.energiewende180.de/projekte/projekt-single/article/modellbildung-und-simulation-zukuenftiger-versorgungssysteme/>

CONSENTEC. (Dezember 2008). Gutachten zur Höhe des Regelenergiebedarfs. Gutachten im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen . (H.-J. Haubrich, Hrsg.)

DWD. (2013). *Deutscher Wetterdienst*. Abgerufen am Jan 2013 von

http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima__Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten__kostenfrei%2Fausgabe__standardformat__node.html%3F__nnn%3Dtrue&_state=maximized&_windowLabel=T82002

EEX. (Mai 2013). *www.eex.com*. Abgerufen am Jan 2013 von European Energy Exchange.

- HGC Hamburg. (kein Datum). BHKW-Check. *Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotenzialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken*. (B. f. Umwelt, Hrsg.)
- HGC Hamburg. (Januar 2011). BHKW-Check. *Handbuch zur Ermittlung von Einsparpotenzialen durch den Einsatz von Blockheizkraftwerken*. (B. f. Umwelt, Hrsg., & H. H. GmbH, Redakteur)
- iuta. (Juni 2002). Preisatlas. *Ableitung von Kostenfunktionen für Komponenten der rationellen Energienutzung*.
- IWES. (Dezember 2009). Dynamische Simulation der Stromversorgung in Deutschland nach dem Ausbauszenario der Erneuerbaren-Energien-Branche. (F. I. Kassel, Hrsg.)
- Kalkowsky, F. (2011). Energiebunker.
- Kamper, A. (2010). Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz. Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Scientific Publishing.
- KEBAP e.V. (kein Datum). *KulturEnergieBunkerAltonaProjekt*. Abgerufen am Mai 2013 von <http://kulturenergiebunker.blogspot.de>
- Kurscheid, E. M. (Mai 2009). Zur Bereitstellung positiver Minutenreserve durch dezentrale Klein-KWK-Anlagen.
- Pielke, M. (Februar 2010). Netzorientierte Integration von Mini-Blockheizkraftwerken in das elektrische Verteilungsnetz. (I. f. Technische Universität Braunschweig, Hrsg.)
- regelleistung.net. (Mai 2013). *Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung*. Abgerufen am Mai 2013 von <https://www.regelleistung.net/ip/action/abrufwert>
- SRU. (Mai 2009). Thesenpapier - Weichenstellung für eine nachhaltige Stromversorgung. (S. f. Umweltfragen, Hrsg.)
- statistika. (Mai 2013). *Statistika - Das Statistikportal: Statistiken, Marktdaten und Studien*. Abgerufen am Mai 2013 von <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/38910/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-nach-kraftwerk/>

sumbi. (Oktober 2009). Möglichkeiten zum stromgeführten Betrieb der BHKW und Reduktion des Anteils des Spitzenlastkessels beim Energiebunker Wilhelmsburg. (s. Ingenieure, Hrsg.)

VDE-Studie. (Mai 2012). Erneuerbare Energie braucht flexible Kraftwerke - Szenarien bis 2020. (V. V. e.V., Hrsg.)

ZEBAU. (März 2012). Ergänzung zur Machbarkeitsstudie für das Kultur Energie Bunker Altona Projekt.

ZEBAU. (August 2011). Machbarkeitsstudie für das Kultur Energie Bunker Altona Projekt.

10. Versicherung über Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, den _____