

Simulationsbasierte Analyse des langfristigen, ökonomischen Potentials der
Wirk- und Regelleistungsführung von Blockheizkraftwerken

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science (M.Sc.)“ im Studiengang
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und
der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Hentel

Vorname: Jan



Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Ort, den* Hannover, den 08.01.2016

*(Datum der Beendigung der Arbeit)

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
Symbolverzeichnis	XII
Anhangsverzeichnis	XIV
Kurzfassung	1
Abstract	1
1. Einleitung.....	2
2. Entwicklung der Forschungsfrage	4
2.1. Methodik	4
2.1.1. Die Methode “Design Science Research” (Hevner 2007).....	4
2.1.2. Konkretisierung der Methodenanwendung für den Kontext dieser Arbeit	6
2.2. Literaturübersicht.....	7
2.2.1. Analyse der Konzepte auf Basis bereits erarbeiteter Ergebnisse.....	7
2.2.2. Strukturierung der Konzeptanalyse.....	10
2.2.3. Kritische Beurteilung der Literaturbasis.....	13
2.2.4. Ziele dieser Arbeit.....	13
3. Theoretischer Hintergrund zu der Vermarktung der Leistungen von Blockheizkraftwerken	15
3.1. Energieprodukte eines Blockheizkraftwerkes	15
3.1.1. Wärmeenergie.....	15
3.1.2. Elektrische Energie	15
3.2. Vermarktungsmöglichkeiten für Anlagen gemäß dem Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien.....	16
3.2.1. Geförderte Direktvermarktung	17
3.2.2. Einspeisevergütung	19
3.3. Vermarktungsmöglichkeiten für Anlagen gemäß dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung.....	19
3.3.1. Kraft-Wärme-Kopplungsstrom	20
3.3.2. Einspeisevergütung	20
3.4. Stromhandel an der European Power Exchange.....	22
3.4.1. Day-Ahead-Handel	22
3.4.2. Intraday-Handel.....	23

3.5.	Regelleistungsprodukte.....	25
3.5.1.	Primärregelleistung	27
3.5.2.	Sekundärregelleistung.....	28
3.5.3.	Minutenreserve	29
3.5.4.	Übersicht aller ausgeschriebenen Regelleistungsprodukte	29
3.6.	Bedingungen der Dienstleistung eines externen Vermarktungsmanagements	30
4.	Technische Rahmenbedingungen verschiedener Blockheizkraftwerke.....	32
4.1.	Technische Komponenten.....	32
4.1.1.	Motoren und Gasturbinen	32
4.1.2.	Generator	33
4.1.3.	Steuerungstechnik.....	33
4.1.4.	Systeme zu der Vorbereitung der Brennstoffe	33
4.1.5.	Wärmespeicher	35
4.1.6.	Spitzenlastkessel.....	38
4.1.7.	Heizspirale	38
4.1.8.	Elektrischer Speicher	39
4.1.9.	Auslegung der Komponenten.....	39
4.2.	Übersicht über die Energieströme, Wirkungsgrade sowie die Stromkennzahlen	43
4.2.1.	Energieströme	43
4.2.2.	Wirkungsgrade	44
4.2.3.	Stromkennzahl.....	46
5.	Hauptteil.....	47
5.1.	Definition der zu simulierenden Szenarien	47
5.1.1.	Wärmesenke der Beispielsiedlung	47
5.1.2.	Kleine Szenarien - Eine Siedlung.....	52
5.1.3.	Mittelgroße Szenarien - 5 Siedlungen	54
5.1.4.	Große Szenarien - 10 Siedlungen	55
5.1.5.	Zusammenfassung und Übersicht der zu simulierenden Szenarien	56
5.2.	Angebotsstrategie für die Regelleistungsprodukte.....	60
5.2.1.	Analyse der historischen Ausschreibungsergebnisse der Primärregelleistung.....	60
5.2.2.	Analyse der historischen Ausschreibungsergebnisse der Sekundärregelleistung	61
5.2.3.	Analyse der historischen Ausschreibungsergebnisse der Minutenreserveleistung.....	64
5.2.4.	Zusammenfassung der gewählten Regelleistungsstrategie	68
5.3.	Aufbau des Simulationstools	69

5.3.1.	Interaktionsoberfläche des Tools	69
5.3.2.	Einzulesende Vektoren	71
5.3.3.	Modul A	74
5.3.4.	Modul B	75
5.3.5.	Modul C	81
5.3.6.	Kritische Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Simulationstools	82
5.4.	Ergebnisse der Simulation	82
5.4.1.	Ergebnisvektoren.....	83
5.4.2.	Erdgas-Blockheizkraftwerk.....	84
5.4.3.	Biogas-Blockheizkraftwerk	91
5.4.4.	Holzhackschnitzel-Blockheizkraftwerk	97
6.	Diskussion.....	104
6.1.	Zusammenfassung.....	104
6.1.1.	Erdgas-Blockheizkraftwerk.....	104
6.1.2.	Biogas-Blockheizkraftwerk	105
6.1.3.	Holzhackschnitzel-Blockheizkraftwerk	105
6.1.4.	Blockheizkraftwerktypen in dem Vergleich.....	106
6.2.	Interpretation der Ergebnisse	107
6.2.1.	Kritische Analyse der Ergebnisse	107
6.2.2.	Beurteilung der Arbeitsthese	112
6.2.3.	Vergleich mit Ergebnissen anderer Autoren	114
6.2.4.	Handlungsempfehlungen	115
6.3.	Evaluation der Forschungsmethodik.....	115
6.4.	Limitationen und Forschungsperspektive	117
	Referenzen	119
	Internetquellen.....	123
	Anhang	124
A.	Stellungnahmen der Hersteller zu dem Betriebsverhalten ihrer Blockheizkraftwerke	124
B.	Datenbasis zu der Marktanalyse der Wirkungsgrade von Blockheizkraftwerken mit Motorbetrieb.....	128
C.	Wärmeverluste des Wärmespeichers	132
D.	Interviews mit den Vermarktungsdienstleistern.....	133
E.	Statistische Auswertung des Wärmelastprofils einer repräsentativen Wohnsiedlung	136
F.	Übersicht der einzulesenden Vektoren.....	137

G.	Struktur des Vektors „Bedingungen_Regelleistung“	139
H.	Struktur des Vektors „Verguetung_Modul_A“	140
I.	Übersicht Monatsmarktwerte 2014	141
J.	Statistische Auswertungen der Regelleistungsprodukte für die Jahre 2012 bis 2015	141
K.	Struktur des Vektors „Verguetung_Modul_BCD“	143
L.	Struktur des Vektors „Tech_Parameter“	146
M.	Entwicklerhandbuch	147
	Ehrenwörtliche Erklärung	245

1. Einleitung

Die deutsche Energiewirtschaft befindet sich in einem Wandel. Die Endlichkeit der fossilen Brennstoffe sowie der anthropogene Treibhauseffekt zwingen die Weltgemeinschaft auf langfristige Sicht die Erzeugung elektrischen Stromes auf Basis anderer Ressourcen als der Kohle, dem Erdgas oder dem Erdöl zu erreichen. Die Legislative der Bundesrepublik Deutschland versucht diesen Wandel aktiv mit Subventionen voranzutreiben. Sie fördert Kraftwerke, die Strom aus erneuerbaren Energien gewinnen, mit dem Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien in der seit dem 01.08.2014 geltenden Fassung (kurz: EEG 2014) und Kraftwerke, die betriebsbedingte Abwärme verwenden, mit dem Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Stand: 21.07.2014) (kurz: KWKG 2002). Diese Markteingriffe bewirken die Umsetzung vieler innovativer Kraftwerkskonzepte wie die Windenergie- oder die Photovoltaikanlagen sowie die Blockheizkraftwerke (kurz: BHKW). Eine Auswirkung der so erwirkten „Energiewende“ ist die Entwicklung zu vielen kleineren und dezentral einspeisenden Kraftwerken. Die BHKW wandeln Brennstoffe, wie Erd-, Bio- oder Holzgas, mittels Verbrennungsmotoren in Nutzwärme und elektrischen Strom um. Private oder öffentliche Gebäude haben einen Wärmebedarf, den sie durch die produzierte Wärme decken können, sodass diese einen Mehrwert erbringt. Zusätzlich leisten eingespeiste Strommengen Deckungsbeiträge für die Bewirtschaftung des BHKW. Die Anlagenbetreiber oder -vermarkter können zwischen den Alternativen der Stromeinspeisung mit fester Vergütung oder der geförderten Direktvermarktung wählen, die einer Orientierung an den Preisen der Strombörsen entspricht und die Bereitstellung netzunterstützender Regelleistung ermöglicht. Ob und für welche BHKW-Konfigurationen die mit höherem Aufwand verbundene Marktorientierung aus der ökonomischen Perspektive Sinn ergibt, ist das Interesse der Analysen dieser Arbeit.

Diesbezüglich ermöglicht ein erstelltes Simulationstool mit MATrix LABoratory-Kodierung (MATLAB-Kodierung) die Untersuchung von BHKW, welche die Brennstoffe Biogas, Erdgas oder Holzhackschnitzel nutzen und mit der Unterstützung eines Spitzenlastkessels und eines thermischen Speichers sowie variabel mit einer Power-to-Heat-Anlage (kurz: PtHA) oder einem elektrischen Speicher eine Wärmesenke versorgen. Die Analyse umfasst simulierte Szenarien, die sich hinsichtlich des genutzten Brennstoffes des BHKW, der Größe der Wärmesenke, der Höhe der Nennleistung des BHKW, der Kapazität des thermischen Speichers sowie der Nutzung der Zusatzkomponenten unterscheiden. Die Ergebnisse ermöglichen Aussagen über die Auswirkungen der BHKW-Leistung, des genutzten Brennstoffes, der PtHA und der Batterie auf die Höhe des ökonomischen Potenzials von BHKW, die marktorientiert operieren und nicht bei fester Vergütung einspeisen. Zusätzlich enthalten die Resultate der Untersuchungen differenzierte Informationen über die Verteilung der Einnahmenstruktur, der notwendigen Betriebsdynamik sowie der umgesetzten Energiemengen.

Das Ziel dieser Arbeit ist eine Grundlage für Wirtschaftlichkeitsberechnungen von BHKW zu schaffen. Die Verrechnung der ökonomischen Potenziale marktorientierter BHKW mit den bei fester Vergütung einspeisenden Benchmark-Anlagen wird in dieser Arbeit nicht unternommen, da dies eine umfangreiche Marktanalyse bezüglich der verwendeten BHKW und ihrer zusätzlichen Komponenten erfordert und dessen Erarbeitung den Zeitrahmen dieser Arbeit übersteigt. Die in das Simulationstool implementierten Vermarktungsstrategien basieren auf statistischen Auswertungen aktueller Marktdaten und bilden nachvollziehbare Prioritäten für die iterativen Entscheidungsprozesse ab. Optimierungsalgorithmen ermitteln die bestmöglichen ökonomischen Potenziale sowie die

diesbezüglich notwendige Konfiguration der technischen sowie marktbezogenen Parameter. Sie sind nicht Bestandteil des Simulationstools, sodass die generierten Ergebnisse Möglichkeiten aufzeigen, die weiter optimierbar sind. Der Autor entscheidet sich für dieses Vorgehen ebenfalls aufgrund der zeitlichen Restriktionen. Die Analysen dieser Arbeit beschränken sich weiterhin auf die ökonomische Beurteilung der betrachteten Szenarien. Aussagen über ökologische Auswirkungen sind mit Hilfe der generierten Daten in begrenztem Umfang möglich, aber nicht Bestandteil der Argumentation, da sie inhaltlich einer anderen Forschungsperspektive zuzuordnen sind. Weiterhin bleiben die Anstrengungen dieser Ausarbeitung auf den deutschen Energiewirtschaftsraum beschränkt, da die Komplexität der gesetzlichen Rahmenbedingungen verschiedener Nationen zu hoch ist, um ihr gerecht werden zu können.

Der Aufbau dieser Masterarbeit entspricht der gebräuchlichen Struktur für Abschlussarbeiten. Dieser Einleitung folgt das zweite Kapitel, welches der Vorstellung der angewandten Forschungsmethodik sowie der Literaturanalyse dient. Die verwendete Methode basiert auf dem Konzept des „Design-Science-Research-Cycles“ nach Hevner (2007). Die Literaturanalyse wird den Anforderungen nach Webster und Watson (2002) gerecht. Auf Basis der identifizierten Forschungslücke werden abschließend die Arbeitsthese aufgestellt.

Die Kapitel 3 und 4 stellen alle für den Kontext notwendigen theoretischen Grundlagen dar. Die zu betrachtenden gesetzlichen sowie energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen umfassen die relevanten Paragraphen des EEG 2014 und des KWKG 2002, die Anforderungen der Strombörsen und des Regelleistungsmarktes sowie die Bedingungen der Vermarktungsdienstleister und bilden das dritte Kapitel. Das vierte Kapitel analysiert die technischen Möglichkeiten aller in den Simulationsszenarien berücksichtigten BHKW sowie der Zusatzkomponenten und erläutert energietechnische Zusammenhänge.

Das Kernstück der Arbeit stellt das fünfte Kapitel dar. Die enthaltenen Abschnitte definieren die Szenarien, die zu der Beantwortung der Arbeitsthese dienen, und werten die Daten des Regelleistungsmarktes statistisch aus, um eine geeignete Vermarktungsstrategie zu entwickeln. Darauf aufbauend stellen sie die Struktur des Simulationsskriptes vor und präsentieren die ausgewerteten Resultate, die sich aus der Simulation der aufgestellten Szenarien ergeben.

Das abschließende und sechste Kapitel widmet sich der Diskussion der Ergebnisse, indem es diese zusammenfasst und interpretiert. Diese Interpretationen bieten das Potenzial als Handlungsempfehlung für BHKW-Projekte zu dienen. Weiterhin evaluiert es die verwendete Forschungsmethode, leitet den wissenschaftlichen Beitrag dieser Arbeit her und gibt einen Ausblick auf weitere vielversprechende Fragestellungen.

Parametrierung (mit/ohne PRL sowie der Leistungspreisparameter) erst auf Basis der Simulationsergebnisse aufgefallen.

Die gewissenhafte Umsetzung dieser Arbeit und insbesondere die Kapitel 5 und 6 werden der letzten Richtlinie gerecht und ermöglichen einem betriebswirtschaftlichen sowie technisch interessiert Adressatenkreis den Zugang zu den erarbeiteten Erkenntnissen.

Anhand der oben beschriebenen Durchführbarkeit der Richtlinien und der daraus folgenden energiewirtschaftlich bedeutenden Ergebnisse ist die Forschungsmethode als geeignet zur Beantwortung der Fragestellung zu beurteilen.

6.4. Limitationen und Forschungsperspektive

Dieser Abschnitt stellt die Leistungen dieser Arbeit heraus und zeigt auf welche Aspekte diese nicht differenziert betrachtet hat. Diese Limitationen determinieren die weiterhin zu schließenden Forschungslücken, die eine unterschiedliche Dringlichkeit aufweisen. Das so entworfene Abbild des auf den Kontext bezogenen Erkenntnisstandes stellt die Perspektive für weitere Forschung in diesem Bereich dar.

Die vorliegenden Analysen zeigen ökonomische Potenziale für einen marktorientierten Betrieb der betrachteten BHKW auf. Weiterhin ermöglichen diese eine differenzierte Analyse der Erlösstruktur, des Betriebsverhaltens sowie der umgesetzten Energiemengen der verschiedenen Szenarien. Das erstellte Simulationstool kann für weitere Analysen genutzt und bei Bedarf modifiziert werden. Aufgrund der Veränderlichkeit sämtlicher Inputparameter können auch andere BHKW-Typen, - Konfigurationen oder -Leistungsklassen hinsichtlich der aufgeführten Aspekte untersucht werden.

In dem direkten Anschluss an die Analysen dieser Arbeit ist die Berechnung aller für den Betrieb der Szenarien notwendigen Aufwendungen notwendig. Auf dieser Basis könnten absolute Aussagen über die Wirtschaftlichkeit der marktorientierten BHKW-Konfigurationen aufgestellt werden. Weiterhin sollte nach Verwendungszwecken für überschüssige Wärmemengen gesucht werden, denn diese sind bei allen marktorientierten Szenarien teilweise in großer Höhe vorhanden. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse der Trocknung von Holzhackschnitzel wird diesbezüglich dringend empfohlen, da dieser BHKW-Typ eine günstige Alternative zu der Wärmebereitstellung darstellt. Außerdem sind bei den bestehenden Fern- sowie Nahwärmenetzen Geschäftsmodelle zu der Einspeisung der andernfalls nicht nutzbaren Wärmemengen zu diskutieren.

Von besonderem Interesse sind technische Analysen der Auswirkungen des BHKW-Betriebes mit hoher Starthäufigkeit, um den erhöhten Wartungsaufwand quantifizieren zu können. In einem ähnlichen Kontext steht die Forschungsfrage, ob die PRL wirklich präqualifizierbar ist. Die Untersuchungen dieser Arbeit gehen auf Basis der technischen Möglichkeiten von der Realisierbarkeit dieses Produktes aus, obwohl keine praktischen Beispiele bekannt sind. Ein weiterer technischer Aspekt, der nicht berücksichtigt wurde, sind die Restriktionen des Wärmehubs für größere Szenarien. Der diesbezügliche Zusatzaufwand, sofern er vorhanden ist, ist in dem Fall einer Konkretisierung zu kalkulieren.

Wie bereits erwähnt, ist die angewendete Marktstrategie nicht das Resultat einer Optimierungsfunktion. Die Umsetzung einer solchen wird als sehr komplex eingeschätzt, würde jedoch die Validität der Ergebnisse steigern. Diese geänderte Strategie sollte so gestaltet werden,

dass potenzielle Entwicklungsszenarien auf den Energiebörsen und Regelleistungsmärkten simulierbar sind. Die Auswirkungen dieser Veränderungen sind für die Planung und Dimensionierung zukünftiger Anlagen äußerst relevant, da die aufzustellenden Geschäftsmodelle für Abschreibungszeiträume von mehr als 10 Jahren rentabel bleiben müssen. Hinsichtlich des angesprochenen Fördervorteils kleinerer BHKW, die nach dem EEG von 2014 vergütet werden, ist eine Vermarktungsstrategie dieser mit unabhängigen Fahrplänen denkbar, um die ökonomischen Potenziale zusätzlich zu steigern.

Die betrachteten Zusatzkomponenten wurden in den Szenarien stark in ihren Verwendungsmöglichkeiten eingeschränkt. Der Autor hat dies in dem Kontext dieser Arbeit als sinnvoll erachtet. Dementsprechend sind andere Betriebs- und Vermarktungsstrategien denkbar, die einen positiven Einfluss auf die ökonomischen Potenziale haben können. Eine differenziertere Betrachtung wird empfohlen, wobei zu bedenken ist, dass die Optimierung der Zusatzkomponenten ohne BHKW-Bezug den Rahmen des betrachteten Kontextes verlässt.

Eine Perspektive, die in den vorliegenden Analysen keine Beachtung findet, ist die ökologische. Die Ergebnisse ermöglichen die Kalkulation der verschiedenen Kohlenstoffdioxidbilanzen. Vor dem Hintergrund, dass die BHKW nicht ohne auf die Netzsituation Rücksicht zu nehmen in dieses einspeisen, sondern durch die Bereitstellung von Regelleistung dieses aktiv stützen, können fossil befeuerte Kraftwerke eventuell aus der Regelleistungsvorhaltung verdrängt werden. Die Untersuchung der kontextbezogenen, ökologischen Zusammenhänge könnte eine zusätzliche Motivation liefern, die bestehenden Marktbarrieren des Regelleistungsmarktes insbesondere für BHKW zu verringern, die durch das EEG 2014 gefördert werden.