

# Integration von fluktuierenden erneuerbaren Energien in den Bilanzkreis mittels flexibel steuerbarer Erzeugung aus Blockheizkraftwerken

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Arne Dammasch

Technische Universität Braunschweig, Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen – elenia, Schleinitzstr. 23, 38106 Braunschweig, Tel.: (+49) (531) 391-7753, a.dammasch@tu-braunschweig.de, www.elenia.tu-braunschweig.de

**Kurzfassung:** Dieser Beitrag befasst sich mit der Marktintegration fluktuierender erneuerbarer Energien. Es wird untersucht, inwiefern aktiv gesteuerte Blockheizkraftwerke (BHKW) ein geeignetes Mittel zur Integration der schwankenden Energiebereitstellung von Wind- und Photovoltaikanlagen (PV) auf Bilanzkreisebene sind. Dies geschieht durch die Implementierung eines Energiemanagements (EM) in Form eines virtuellen Kraftwerks, bestehend aus dezentralen BHKW. Die Untersuchungen basieren auf einer umfangreichen computergestützten Simulation eines frei skalierbaren Bilanzkreismodells. Die vorliegenden Inhalte stammen aus der Dissertation des Autors (siehe oben). Diese wurde am 24. Juni 2015 unter dem Titel „Aktiver Bilanzkreisgleichgewicht durch stromgeführte Blockheizkraftwerke im virtuellen Kraftwerk zur Integration fluktuierend einspeisender regenerativer Energien“ eingereicht und am 6. November 2015 erfolgreich vor der Promotionskommission in Braunschweig verteidigt.

**Keywords:** Ausgleichsenergie, Bilanzkreismanagement, Blockheizkraftwerke, Energiemanagement, flexible Erzeugung, Virtuelles Kraftwerk

## 1 Ausgangslage und Problemstellung

Der in Deutschland fortschreitende Ausbau erneuerbarer Energien führt in vielerlei Hinsicht zu Herausforderungen in der Energieversorgung. So kommt es neben den Aspekten der technischen Integration zu Veränderungen im energiewirtschaftlichen Umfeld.

Verbunden mit der Novelle des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2014 unterliegen Neuanlagen mit einer installierten Erzeugungsleistung von über 500 kW<sub>el</sub> seit dem 1. August 2014 der Verpflichtung zur Teilnahme an der Direktvermarktung. Zum 1. Januar 2016 wurde diese Grenze auf 100 kW<sub>el</sub> herabgesetzt [1]. Diese Änderung wird zukünftig zu einem deutlichen Anstieg erneuerbarer Energieanlagen in der Direktvermarktung führen.

Im Hinblick auf die fluktuierenden erneuerbaren Energiesysteme, wie Wind- und PV-Anlagen, stehen vor allem deren Vermarkter vor einer großen Herausforderung. Auf der einen Seite sind Bilanzkreisverantwortliche, beispielsweise Direktvermarkter, gemäß Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV) dazu verpflichtet, ihren Bilanzkreis auf Viertelstundenbasis im Gleichgewicht zu halten [2]. Auf der anderen Seite ist ein Ziel des Gesetzgebers, den Anteil erneuerbarer Energien in der Direktvermarktung zu steigern.

Bedingt durch Ungenauigkeiten bezüglich der Leistungsprognosen aus diesen Anlagen kann es jedoch auf Ebene der Bilanzkreise vermehrt zu Fahrplanabweichungen kommen. Die eu-

ropäische Strombörse EPEX Spot SE in Paris hat hierauf reagiert und zum 29. März 2011 die Vorlaufzeit zum Handelsschluss am Intraday-Markt auf 45 Minuten reduziert. Kurze Zeit später erfolgte am 14. Dezember 2011 die Einführung von 15-Minuten-Kontrakten, welche die Bilanzkreisbewirtschaftung seitdem nochmals deutlich unterstützen [3]. Mit der jüngsten Anpassung der Randbedingungen im Spotmarkthandel vom 16. Juni 2015 wurde die Vorlaufzeit für Intraday-Geschäfte auf 30 Minuten herabgesetzt [4]. Dennoch sind Abweichungen aufgrund der verbleibenden Restprognosefehler der Erneuerbaren sowie des Fehlens von Mechanismen zum Echtzeitausgleich von Bilanzkreisen weiterhin unvermeidbar.

## **2 Zielsetzung**

Die vorliegenden Untersuchungen sollen zeigen, dass aktiv steuerbare BHKW einen großen Beitrag zur Integration erneuerbarer Energien in die Energiewirtschaft leisten können. Der Fokus liegt auf Anlagen mit fluktuierendem Energieerzeugungscharakter, welche auf Ebene des Bilanzkreismanagements zu Fahrplanabweichungen führen können. Neben den BHKW werden die erneuerbaren Energiesysteme Wind und PV betrachtet.

Hierzu wurde eine Simulationsumgebung, inklusive aller Einzelkomponenten, entwickelt. Durch die Komplexität des gewählten Untersuchungsraums ist es erforderlich, dass die zugrunde gelegten Märkte und Energiesysteme im Modell detailliert nachgebildet sind. Hierzu wurden zum einen alle Komponenten als einzelne, voneinander unabhängige Teilmodule modelliert. Zum anderen sollten die Eingangsparameter der Simulation frei wählbar sein, um für das erstellte Tool im Kontext der sich kontinuierlich ändernden rechtlichen Rahmenbedingungen auch zukünftig eine Anwendbarkeit gewährleisten zu können.

Zur Untersuchung und Bewertung des Ausgleichspotenzials steuerbarer BHKW wird eine Vielzahl fiktiver Bilanzkreisconfigurationen analysiert. Basierend auf systemtechnischen Auswertungen der untersuchten Configurationen werden Kernaussagen bezüglich des Integrationspotentials fluktuierender erneuerbarer Energien abgeleitet.

## **3 Modellaufbau und Datengrundlage**

Für die Ausgestaltung einer Simulation von Bilanzkreisen werden Modelle von elektrischen Energieerzeugungsanlagen und dem Spotmarkt der EPEX Spot SE benötigt. Auf der Erzeugerseite stehen die erneuerbaren Energiequellen, Wind und PV sowie dezentrale BHKW. Die Marktkomponente bildet den Day-Ahead- und den Intraday-Markt ab und dient für weiterführende wirtschaftliche Betrachtungen als Grundlage. Da in dieser Arbeit die reine Direktvermarktung betrachtet wird, sind keine herkömmlichen Verbraucher im Bilanzkreis integriert.

### **3.1 Modellaufbau**

Im Zuge des weiteren Vorgehens werden mehrere Modelle miteinander gekoppelt und als Module in die Gesamtsimulation integriert. Ein Modul umfasst Einzelteile der Simulation, welche sich einem gemeinsamen Zeithorizont zuordnen lassen. Auf der zeitlichen Achse werden die Module in die Kategorien „ex ante“, „aktuelle Viertelstunde“ und „ex post“ unterteilt. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Module in den drei genannten Kategorien.

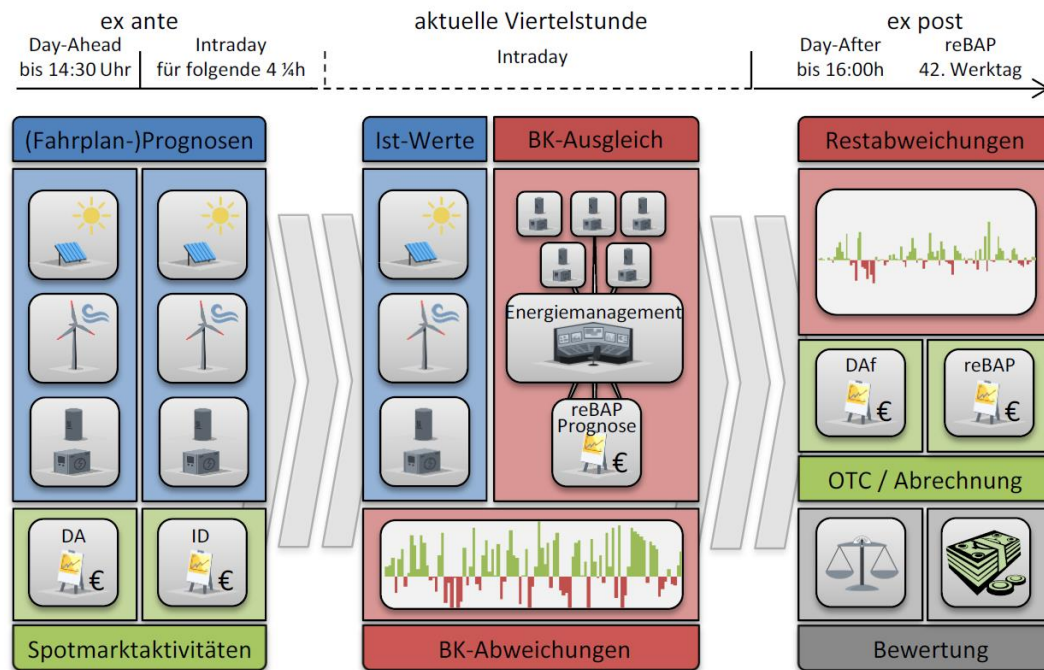


Abbildung 1: Modulübersicht in drei Kategorien

### 3.1.1 Ex-ante Module

In dieser Kategorie befinden sich die Module für die Prognose von Zeitreihen der einzelnen Erzeugungskomponenten sowie die Module zur Nachbildung des Spotmarktes. Neben der regenerativen Energieerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen werden an dieser Stelle auch die einzelnen BHKW prognostiziert. Die Prognosen erfolgen sowohl Day-Ahead (DA) für die Fahrplananmeldung als auch Intraday (ID) für eine kurzfristige Fahrplankorrektur.

Durch die mit Unsicherheiten behafteten Day-Ahead-Prognosen entstehen am Tag des eigentlichen Geschehens Abweichungen zu den tatsächlichen Werten. In dem hier vorliegenden Modell der Bilanzkreissimulation werden zu diesem Zweck Kurzfristprognosen für Wind-, PV-Anlagen und BHKW erstellt. Im direkten Vergleich von Day-Ahead- zu Intraday-Prognosen ergeben sich in den meisten Fällen Abweichungen. Diese Abweichungen werden in einem weiteren Schritt über den Intraday-Handel an der EPEX Spot platziert. Ziel ist es auch hier, eine ausgeglichene Fahrplanbilanz für jede Viertelstunde zu erreichen.

### 3.1.2 Module für aktuelle Viertelstunde

Im Normalfall werden die üblichen Portfoliooptimierungen bis kurz vor diesem Zeitpunkt durchgeführt. In der aktuellen Viertelstunde hat der Bilanzkreisverantwortliche oftmals keine Möglichkeiten, ein Gleichgewicht herbeizuführen. Hier greift dieser Ansatz und es wird untersucht, inwiefern mittels aktiv steuerbarer BHKW auf die Momentanabweichungen einer Viertelstunde eingewirkt werden kann. In der Kategorie „Aktuelle Viertelstunde“ erfolgt die Ermittlung der Fahrplanabweichungen durch die Gegenüberstellung der Day-Ahead- und Intraday-Prognosen mit den momentanen Ist-Leistungswerten und werden an ein aktiviertes Energiemanagement übergeben. Anhand des Vorzeichens der Abweichung wird bestimmt, ob das virtuelle Kraftwerk positive oder negative Leistung bereitstellen muss. Im Anschluss werden alle BHKW einzeln angesprochen und es wird geprüft, ob ein Betriebseingriff möglich ist.

### 3.1.3 Ex-post-Module

Dieser Kategorie werden alle Module zugeordnet, die nach der aktuellen Viertelstunde zum Einsatz kommen. Hierzu zählt u. a. die Ermittlung der Restabweichungen, welche nach einer Optimierung am Intraday-Markt und ggf. nach einem erfolgten Einsatz des Energiemanagements verbleiben. Diese Restabweichungen dienen in der Ergebnisauswertung als Erfolgskennzahl zur Bewertung des Potenzials eines aktiven Bilanzkreismanagements.

Nach erfolgreichem Abschluss einer Bilanzkreissimulation werden alle Fahrplan-, Prognose- und Ist-Leistungsdaten sowie die simulierten Aktivitäten an den Spotmärkten zusammengetragen. Mittels geeigneter Preisdatengrundlagen werden alle Bilanzkreisaktivitäten monetär bewertet. Die monetäre Analyse ist jedoch nicht Gegenstand dieses Beitrages.

## 3.2 Datengrundlage

Zur Durchführung einer komplexen Bilanzkreissimulation ist die Bereitstellung einer Vielzahl externer Daten notwendig. Daten, welche jedoch nicht frei verfügbar sind, werden durch eine Reihe synthetischer Verfahren zusätzlich generiert. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die verfügbaren sowie über die zu generierenden Daten.

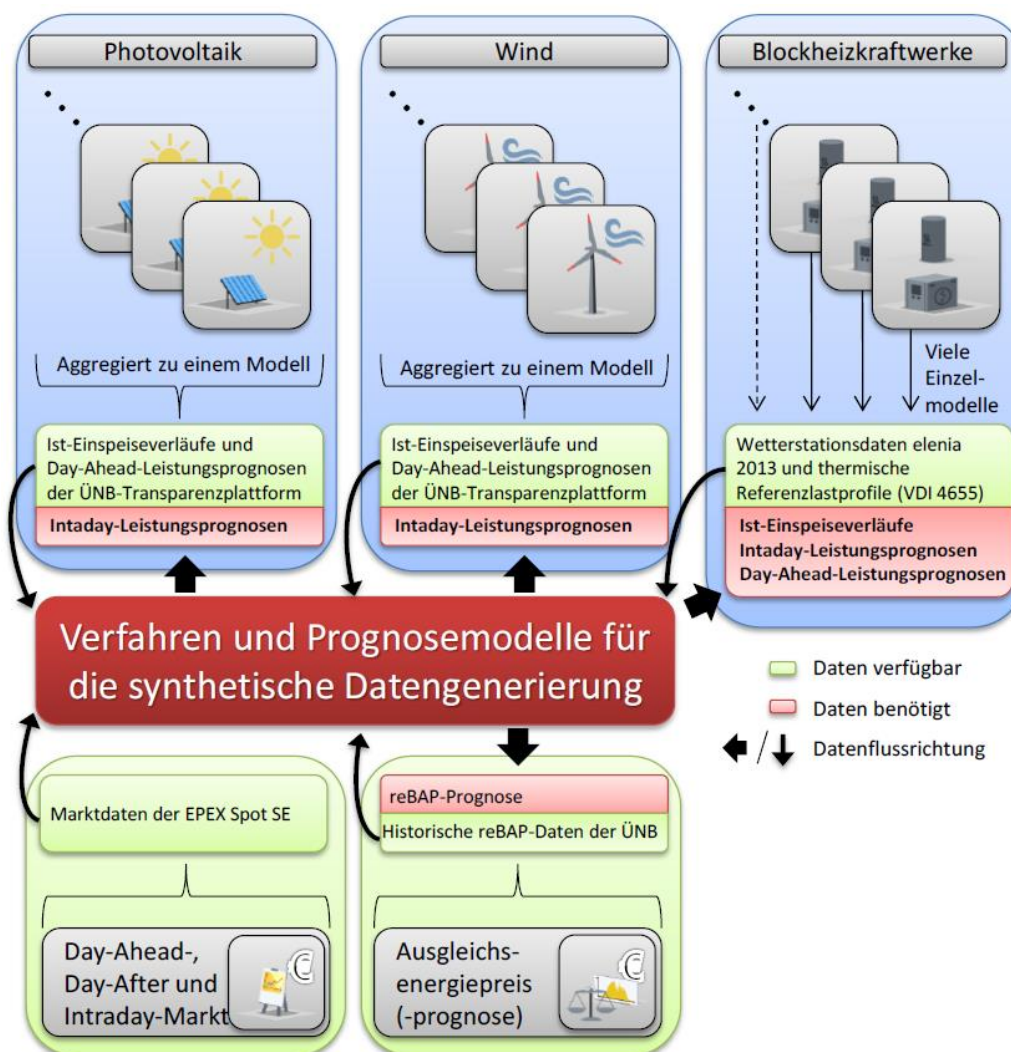


Abbildung 2: Datenverfügbarkeit für die Bilanzkreissimulation

Neben den Einspeiseverläufen von Wind-, PV-Anlagen und BHKW müssen die relevanten Marktdaten zum Day-Ahead- und Intraday-Markt aufbereitet werden. Durch den zeitlichen Betrachtungsrahmen des Jahres 2013 stehen teilweise historische Daten zur Verfügung. Die Generierung von Leistungsprognosen für die Anlagen ist jedoch eine Herausforderung.

### Wind und Photovoltaik

Als Grundlage für den Erzeugungsverlauf aus Wind- und PV-Anlagen werden die Daten der Transparenzplattform der ÜNB herangezogen und der Zeitraum erstreckt sich über das Jahr 2013. Berücksichtigt werden die Leistungsverläufe der Day-Ahead-Prognose und der Ist-Verlauf. Abbildung 3 zeigt die viertelstündlichen Day-Ahead-Prognoseabweichungen für die Energieerzeugung aus Wind- und PV-Anlagen im Jahr 2013 für Deutschland.

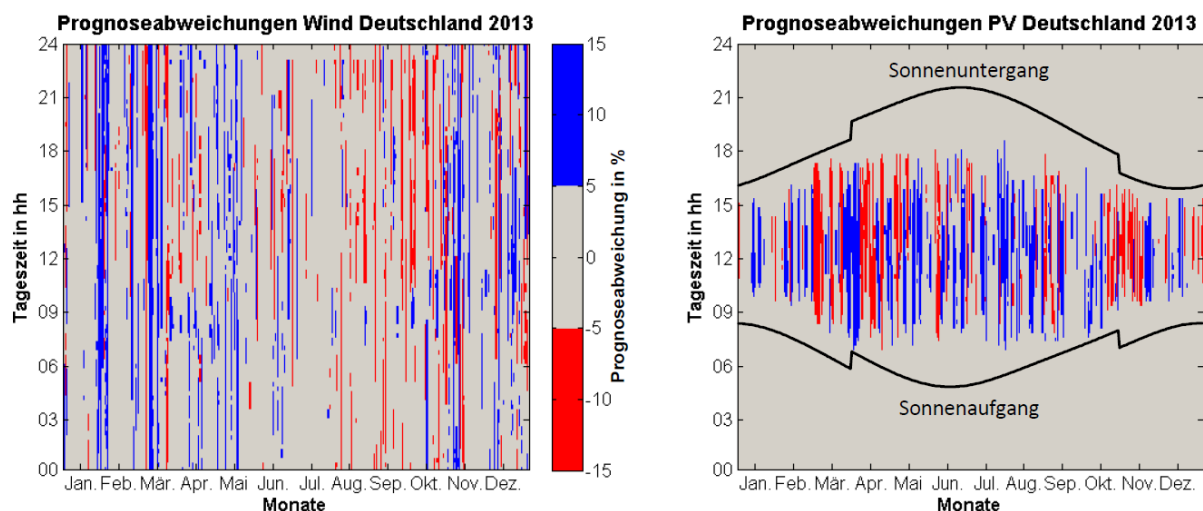


Abbildung 3: Prognoseabweichungen Wind (l.) und PV (r.) in Deutschland 2013

Es zeigt sich deutlich, dass sowohl bei der Windenergie als auch bei der Photovoltaik Prognoseabweichungen im Bereich von  $\pm 5$  % einen großen Anteil besitzen. Auf Basis des Gesamtjahres 2013 liegt der Prognosefehler bei Windenergieanlagen mit einem RMSE von 4,29 % im Bereich des aktuellen Standes der Technik. Ebenso liegt dieser Fehler für die Photovoltaik im Jahr 2013 in Deutschland mit 7,04 % im realistischen Bereich [5].

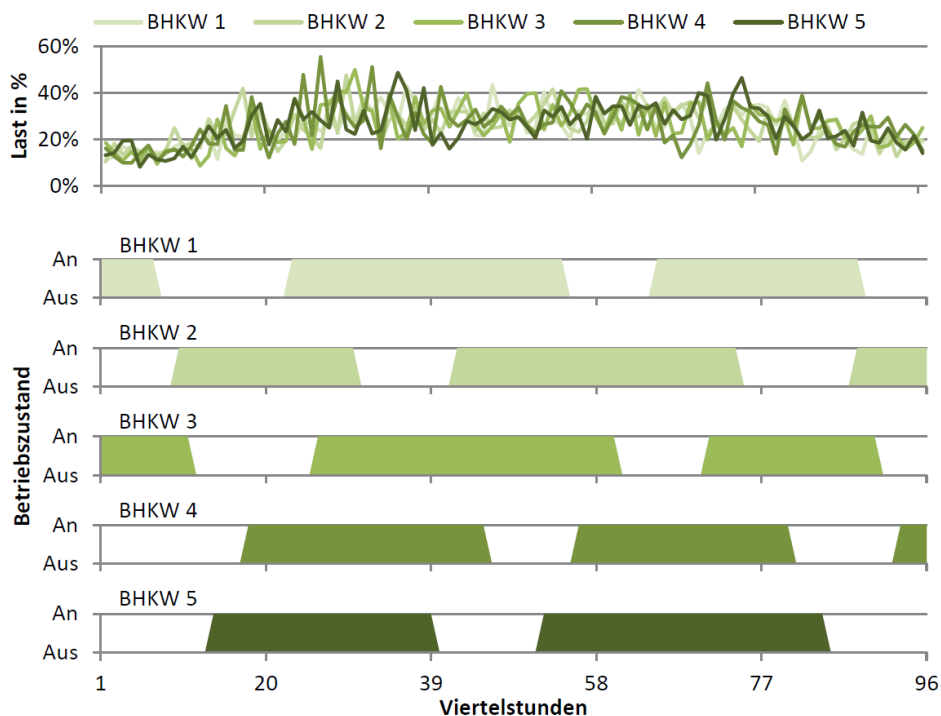
### Blockheizkraftwerke

Gegenüber der Prognoseerstellung für die Wind- und Photovoltaikeinspeisung muss bei der Erstellung des BHKW-Moduls ein umfangreicherer Ansatz gewählt werden. Hierbei ist die thermische Seite maßgeblich für das Betriebsverhalten und die Einschaltzeiten der Anlage verantwortlich. Unter Berücksichtigung eines gleichbleibenden Wärme komfortlevels lassen sich BHKW nicht nach Belieben an- bzw. ausschalten.

Für eine Generierung von BHKW-Fahrplänen werden thermische Lastprofile zugrunde gelegt. Diese Profile basieren auf der Richtlinie VDI 4655 „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen“. Mittels der Typtage und einer auf Wetterstationsdaten des elenia aus dem Jahr 2013 basierenden Verteilung lassen sich thermische Jahresprofile erstellen.

Um eine Heterogenität in Bezug auf die einzelnen BHKW-Systeme gewährleisten zu können, werden stochastisch verrauschte, thermische Profile generiert. Hierbei werden die viertel-

stündlichen Grundprofile sowohl auf der zeitlichen als auch auf der Leistungsachse variiert. Dies geschieht mittels Normalverteilungsfunktionen. Anhand von fünf thermischen Tageslastgängen wird die Profilvariation in der Abbildung 4 exemplarisch dargestellt.



**Abbildung 4: Beispiele variierender BHKW-Lastgänge und Betriebszeiten**

Ähnlich des Prinzips der stochastischen Variation werden für alle thermischen Lastprofile Day-Ahead- und Intraday-Prognosen erstellt. Hierbei wird intraday ein mittlerer absoluter prozentualer Fehler von 7,5 % vom tatsächlichen Wert angenommen. Für die Day-Ahead-Prognosen beträgt dieser Wert 15 %. Die Werte entsprechen den aktuellen Kenntnissen auf dem Gebiet der thermischen Gebäudeprognosen und stammen vom Institut für Verfahrenstechnik, Energietechnik und Klimaschutz (IVEK) der Hochschule Hannover.

### Marktdaten

Zur Darstellung der Wirkleistungsmärkte sowie des Ausgleichsenergiehandels wird auf historische Daten zurückgegriffen. Als Basis wurde das Jahr 2013 gewählt, um die Kompatibilität zu den Leistungsverläufen der Wind- und PV-Anlagen zu gewährleisten. Zudem müssen die Daten in Viertelstundenaufösung vorliegen.

## 4 Ergebnisse

Im Vordergrund steht die Reduzierung von Bilanzkreisabweichungen durch das virtuelle Kraftwerk. Es wird der Betrieb sowohl ohne als auch mit Energiemanagement analysiert und bewertet. Diese Vorgehensweise ermöglicht die gegenüberstellende Bewertung der Bilanzkreisszenarien hinsichtlich des Potenzials zur Reduzierung der BK-Abweichungen. Einen Überblick über die zugrunde gelegten Daten und Annahmen befindet sich in Tabelle 1.



Tabelle 1: Simulationsgrundlagen und -annahmen

BHKW-Daten	Wert	Datengrundlage	Jahr
Elektrische Leistung	19,2 kW	Day-Ahead-Markt	2013
Thermische Leistung	36,1 kW	Intraday-Markt	2013
Wirkungsgrad	94,7 %	Day-After-Markt	Vgl. Day-Ahead
Wärmebedarf	ca. 185 MWh/a	Ausgleichsenergie	2013
BHKW-Versorgung	80 - 85 %	EEG-Einspeisung	2013
Therme-Versorgung	15 - 20 %	EEG DA-Prognose	2013
Betriebsweisen	wg./ EM	EEG ID-Prognose	synthetisch
		BHKW th. Last	VDI 4655*
		BHKW th. Prognosen	synthetisch

\* basierend auf Temperaturdaten 2013

#### 4.1 Aktiver Bilanzkreisausgleich

Im Folgenden werden die Simulationsergebnisse analysiert. Hierzu wurde eine Vielzahl von Jahresberechnungen für Kombinationen von 0 bis 100 BHKW mit einer Leistung von je 19,2 kW<sub>el</sub> bei gleichzeitiger Variierung der Leistung von Wind- und PV-Anlagen von 0 bis 10 MW durchgeführt. Aus einer Anzahl von 7.326 einzelnen Jahressimulationen lässt sich anhand von grafischen Flächendiagrammen der Zusammenhang zwischen der Anzahl an flexiblen BHKW und der installierten Leistung von fluktuierenden erneuerbaren Energien darstellen.

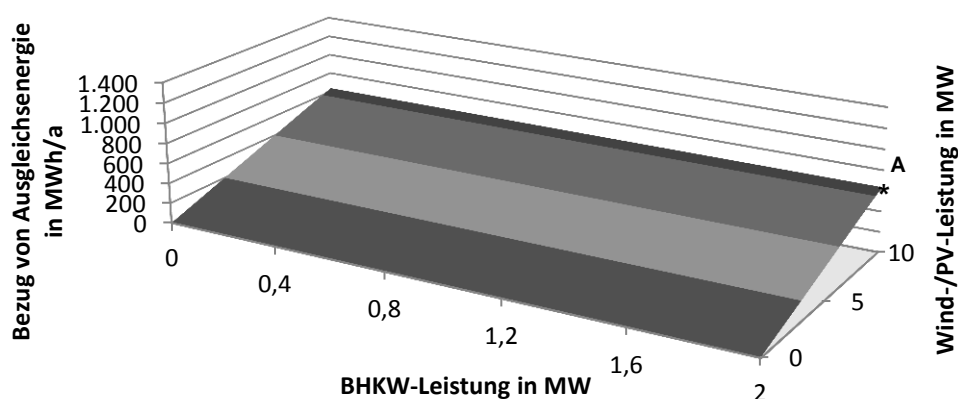


Abbildung 5: Ausgleichsenergiebedarf DA- + ID-Handel ohne EM

In Abbildung 5 zeigt sich, dass die BHKW für sich betrachtet so gut wie keine Bilanzkreisabweichungen verursachen. Bei einem ausschließlichen Betrieb mit fluktuierenden erneuerbaren Energien steigen die Abweichungen, mit steigender Leistung, nahezu linear an. Zudem fällt auf, dass in einem Bilanzkreis, bestehend aus Wind-, PV-Anlagen und BHKW, fast ausschließlich die erneuerbaren Energien für den Ausgleichsenergiebezug verantwortlich sind.

Weiterhin wird untersucht, welche Auswirkungen ein gesteuerter BHKW-Betrieb auf den Jahresbedarf an Ausgleichsenergie hat. Hierfür wurden alle Simulationen mit einem aktivierten

Energiemanagement wiederholt, welches auf alle Restabweichungen nach erfolgter Intraday-Korrektur reagiert. Dies erfolgt durch aktive Eingriffe in den BHKW-Betrieb, solange bis entweder alle Abweichungen eliminiert oder keine Anlagen mehr zum Steuern verfügbar sind.

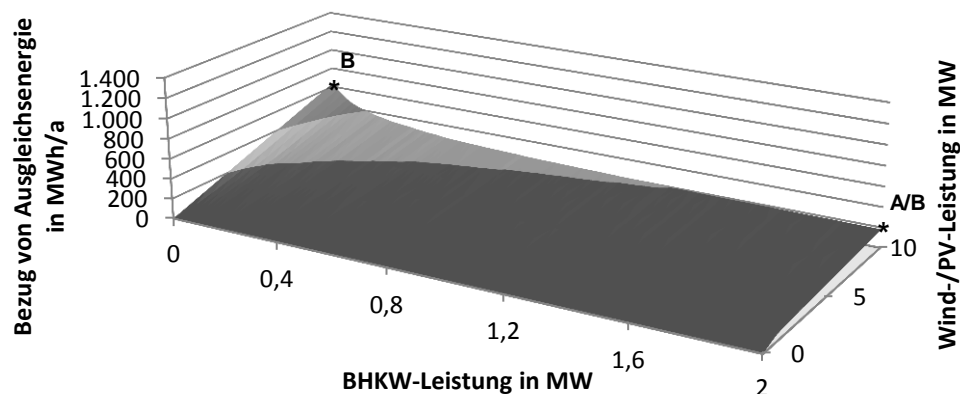


Abbildung 6: Ausgleichsenergiebedarf DA- + ID-Handel mit EM

Abbildung 6 zeigt sehr deutlich, dass der Jahresbezug von Ausgleichsenergie durch die Integration von steuerbaren BHKW abgesenkt werden kann. So lassen sich die Ausgleichsenergiemengen alleine durch das aktivierte Energiemanagement von 635 MWh/a auf 182 MWh/a verringern (siehe Datenpunkte A, Abbildung 5 und Abbildung 6). Dies entspricht einer Reduktion von über 71 %. Zudem ist zu erkennen, dass bei einer installierten Leistung von 10 MW fluktuierender erneuerbarer Energien, eine steigende Anzahl an gesteuerten Blockheizkraftwerken sogar zu einer kontinuierlichen Absenkung der Ausgleichsenergiemengen gegenüber der Ausgangssituation ohne BHKW führt (siehe Datenpunkte B, Abbildung 6).

In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass durch den Intraday-Handel Über- und Unterdeckungen über mehrere Stunden vermieden werden, obgleich sich die Zahl der ausgeglichenen Viertelstunden nicht signifikant erhöht. Eine große Verbesserung lässt sich durch das Aktivieren des Energiemanagements erzielen. Die weißen Bereiche überwiegen in diesem Fall gegenüber den farbigen Bereichen, in denen ein Bilanzkreisungleichgewicht stattgefunden hat.

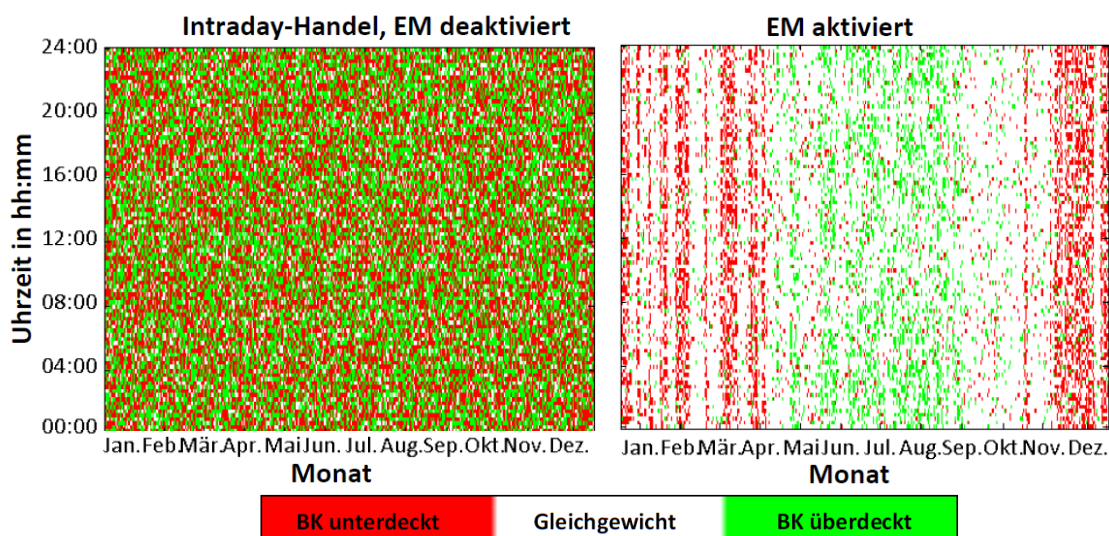


Abbildung 7: Bilanzkreiszustände über ein Jahr für verschiedene Betriebsweisen



Auffällig ist, dass Überdeckungen im Bilanzkreis bei aktiviertem Energiemanagement zum Großteil in den wärmeren Monaten von Mai bis September auftreten. Demgegenüber häufen sich die unterdeckten Viertelstunden im Bilanzkreis insbesondere im Zeitraum von November bis April, sprich in den kälteren Monaten. Diese saisonalen Effekte sind auf die thermischen Randbedingungen, denen die Blockheizkraftwerke unterliegen, zurückzuführen.

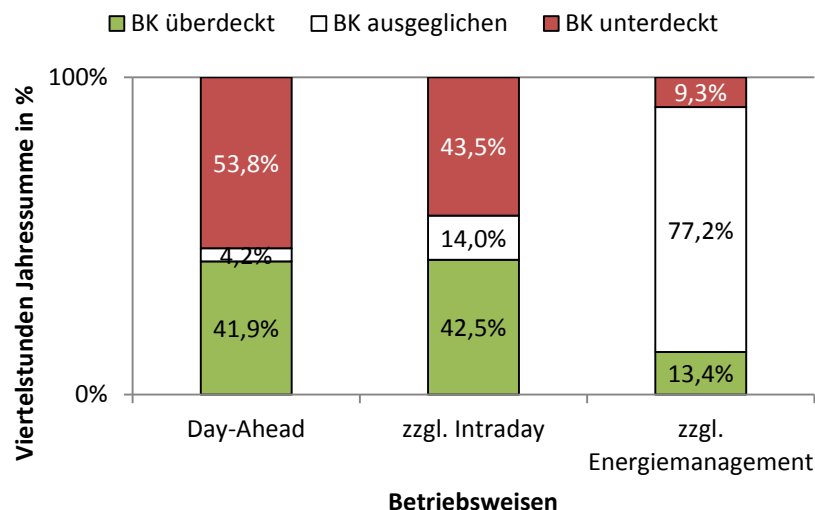


Abbildung 8: Verteilung der Bilanzkreiszustände einzelner Betriebsweisen

Wenngleich der Intraday-Handel im Vergleich zum Day-Ahead-Handel mehr Viertelstunden mit einem ausgeglichenen Bilanzkreis hervorbringt, kann diese Zahl durch die Verwendung des aktiven Energiemanagements noch einmal signifikant gesteigert werden.

Weiterhin, werden die verschiedenen Leistungskombinationen zwischen Blockheizkraftwerken und fluktuierenden erneuerbaren Energien verglichen. Hierzu wird die prozentuale Verringerung des Ausgleichsenergiebedarfs durch das aktivierte Energiemanagement ermittelt.

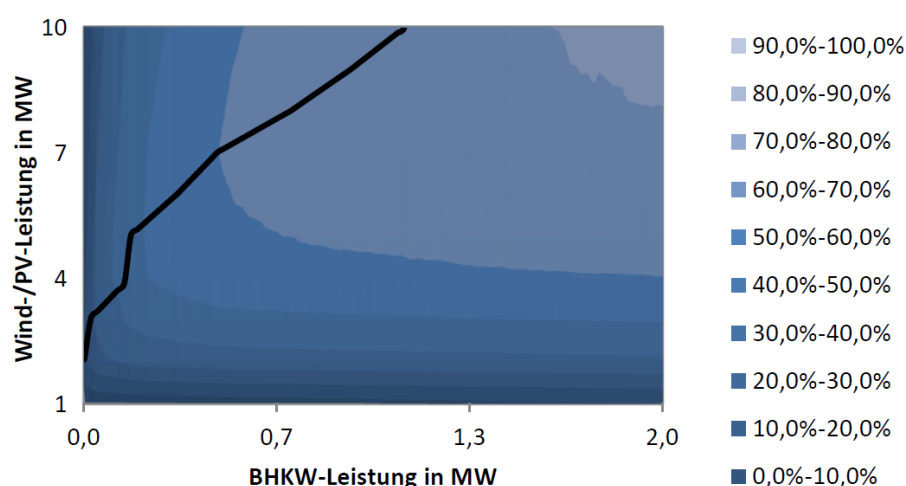


Abbildung 9: Verringerung des Ausgleichsenergiebedarfs durch ein Energiemanagement

Die in Abbildung 9 dargestellte schwarze Kurve verläuft durch die Punkte, in denen bei gegebener Wind- und PV-Leistung eine bestimmte BHKW-Konfiguration zu einer maximalen

Verringerung der jährlichen Ausgleichsenergie führt. Steigt die BHKW-Anzahl, so nähert sich der optimale Leistungsanteil flexibler BHKW am Bilanzkreis einem Wert von ca. 10 %.

Mit einer fortschreitenden Erhöhung des steuerbaren BHKW-Anteils im Bilanzkreis und des zeitgleichen Fixierens der Wind- und PV-Leistung stellt sich jedoch ein Sättigungseffekt ein. Ab einem bestimmten Punkt bringt ein zusätzliches, steuerbares Blockheizkraftwerk nur noch einen marginalen Effekt hinsichtlich der Ausgleichsenergievermeidung. Zudem muss eine gewisse Leistungsgröße fluktuierender erneuerbarer Energien im Bilanzkreis integriert sein, damit die Blockheizkraftwerke ein gewisses Potenzialniveau in Bezug auf die Ausgleichsenergiereduktion erreichen können.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Das vorgestellte Simulationsmodell eines innovativen Bilanzkreismanagements ermöglicht die Quantifizierung des Potenzials flexibel steuerbarer BHKW zur Marktintegration fluktuierender erneuerbarer Energien. Es wurde ein komplexes, computergestütztes Simulationsmodell entwickelt, mittels dessen ein beliebig skalierbares Modell eines Bilanzkreises generiert werden kann. Die Betrachtung erfolgt über den Zeitraum eines Kalenderjahres. Für die Analyse wurden Jahressimulationen von 7.326 Bilanzkreiskonfigurationen durchgeführt.

Hervorzuheben sind die Erkenntnisse hinsichtlich eines aktiven Bilanzkreismanagements durch den Einsatz flexibel steuerbarer BHKW. Diese besitzen ein hohes Potenzial für flexible Energiemanagementsysteme. So lassen sich Abweichungen im Bilanzkreis, bestehend aus Wind-, PV-Anlagen und BHKW, durch aktive Betriebseingriffe signifikant verringern. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Leistungsanteil von ca. 10 % steuerbarer BHKW am Gesamtbilanzkreis den Jahresbezug von Ausgleichsenergie um mehr als 60 % reduziert. Aus systemtechnischer Sicht eignen sich flexible BHKW daher ideal zur Integration erneuerbarer Energien auf Bilanzkreisebene. Durch eine gezielte, punktuelle Förderung von Flexibilität könnte somit ein sehr hohes Integrationspotenzial für erneuerbare Energien gehoben werden.

Da das Modell modular aufgebaut ist, können weitere innovative Ansätze individuell integriert werden. Insbesondere eine Erweiterung des flexiblen Anlagenparks um dezentrale, elektrische Speicher stellt einen vielversprechenden Ansatzpunkt zur weiteren Verbesserung des Potenzials des Bilanzkreisausgleichs dar.

## 6 Literatur

- [1] EEG, „Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien“, BGBl. I S. 1066, 2014.
- [2] StromNZV, „Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen - Stromnetzzugangsverordnung“ - BGBl. I S. 2243, 2014.
- [3] EPEX SPOT SE, „Trading on EPEX SPOT 2015“, [Online], Stand: 16. Juni 2015.
- [4] EPEX SPOT SE, „EPEX SPOT and ECC to reduce Intraday lead time on all markets - Trading up to 30 minutes before delivery“, Paris, 2015.
- [5] Lange, B. et al., „Prognosen der zeitlich-räumlichen Variabilität von Erneuerbaren“, in: Transformationsforschung für ein nachhaltiges Energiesystem.