1 Einleitung

1.1 Problemstellung

„Wichtig ist, dass wir den Ausbau der erneuerbaren Energien, die Übertragung durch die Netze und die Sicherheit der Stromversorgung zusammenbringen, das Ganze dann noch mit dem Ziel der Bezahlbarkeit.“ (Bundeskanzlerin 2012) Diese Aufforderung der Bundeskanzlerin Merkel unterstreicht, dass beim Ausbau der erneuerbaren Energien die Sicherheit der Stromversorgung nicht vernachlässigt werden darf. Laut (Mittendorf 2005) wird unter dem Begriff Systemsicherheit verstanden, dass jegliche Störeinflüsse in jedem Erzeugungs- und Lastzustand sicher zu beherrschen sind. Hierzu ist es zum einen notwendig, dass die Erzeuger, Speicher und Lasten ihre prognostizierten Erzeugungs- und Lastprofile einhalten. Zum anderen ist es notwendig, dass die Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) ein dennoch entstehendes Ungleichgewicht, z.B. durch einen Kraftwerksausfall, mit Regelenergie ausgleichen. Dieser Ausgleich des Ungleichgewichts von Erzeugung und Verbrauch mit Hilfe von Regelenergie wird als Frequenzhaltung bezeichnet, da hierdurch Abweichungen der Frequenz von der Sollnetzfrequenz unterbunden werden sollen. Die ÜNB halten Regelenergie in Form von Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve vor (VDN 2003).

Durch den Ausbau der Windenergie und den damit einhergehenden Rückgang der konventionellen Kraftwerke (DLR et al. 2012) könnte die Regelleistungsbereitstellung durch Windparks, die es heute noch nicht gibt, vor allem zukünftig sinnvoll sein. Durch die Novellierung des Erneuerbaren-Energien-Gesetzes im Jahr 2011 wurde zum 1.1.2012 u. a. die optionale Marktprämie (s. Abschnitt 7.6) eingeführt, über die im Februar 2015 circa 35 GW Windleistung vermarktet wurden (ÜNB 2015; EEG 2012). Durch die Novellierung wird die Regelleistungsbereitstellung durch erneuerbare Energien bei einer Vermarktung über die optionale Marktprämie erlaubt. Dies gilt nicht im Fall der Festpreisvergütung. Die Tatsache, dass viele Vermarkter von Windparks Regelleistung bereitstellen wollen, um Zusatzerlöse zu generieren, ist ein weiteres Motiv für die Entwicklung eines Verfahrens.

Derzeit wird mit Windparks noch keine Regelleistung in Deutschland bereitgestellt, was darauf zurückzuführen ist, dass es hierfür noch kein Verfahren gibt, das die besonderen Eigenschaften der Windenergie, die Dargebotsabhängigkeit und Prognoseungenauigkeit, berücksichtigt. Dargebotsabhängigkeit bedeutet, dass die Leistung eines Windparks vom Winddar-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

gebot abhängig ist. Daraus folgt, dass in Zeiten mit einer hohen Windgeschwindigkeit viel Regelleistung durch Windparks bereitgestellt werden kann, wohingegen in Zeiten mit einer geringen Windgeschwindigkeit nur wenig oder gar keine Regelleistung bereitgestellt werden kann. Die Prognoseungenauigkeit der Windenergie ist beispielhaft in Abbildung 1 anhand des normalized root-mean-square error (nRMSE, s. Abschnitt 7.6) für verschiedene Vorlaufzeiten der Prognose der Windenergie in Deutschland dargestellt. Der nRMSE ist ein Maß für die Güte einer Schätzung, wie sie die Prognose darstellt (Papula 2009). Bei einem nRSME von 0 % entspricht die reale Einspeisung immer der Prognose. Je höher der nRMSE, desto ungenauer die Prognose. Dabei können auch Werte größer 100 % erreicht werden. Es ist zu erkennen, dass die Ungenauigkeit der Prognose mit größerer Vorlaufzeit zunimmt. Durch diese Prognoseunsicherheit kann nicht genau vorhergesagt werden, wie viel Regelleistung durch Windparks zu einem zukünftigen Zeitpunkt bereitgestellt werden kann. Eine Vorlaufzeit von einer Stunde (1 h) bedeutet, dass z. B. die Prognose für die Erzeugung von 13 Uhr bis 13:15 Uhr um 12 Uhr erstellt wird.

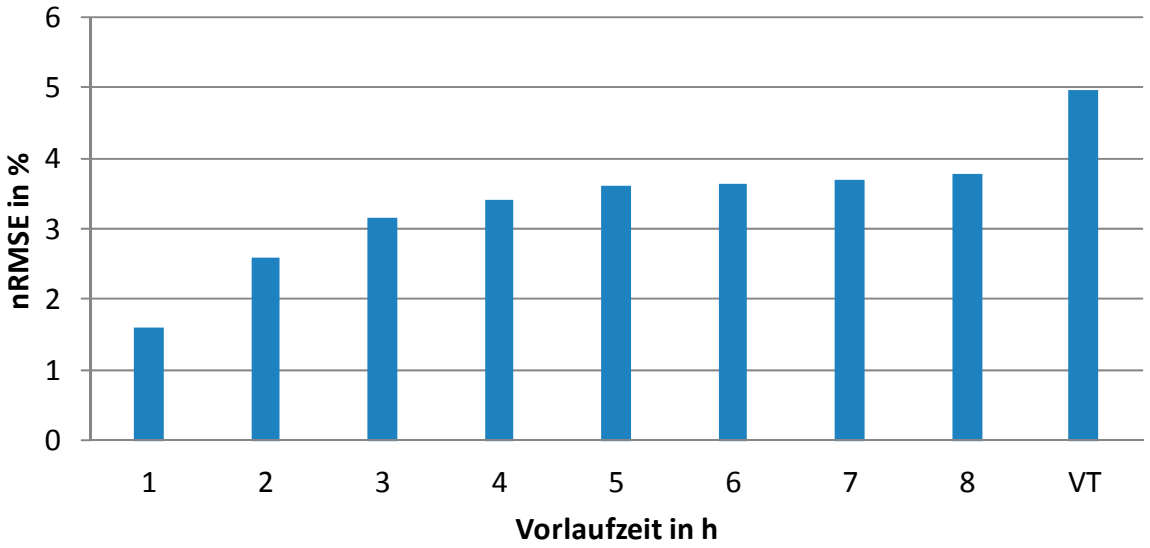

Abbildung 1: Darstellung des nRMSE des Prognosefehlers in Abhängigkeit der Vorlaufzeit für die Windenergie in Deutschland, wobei VT für Vortag steht (eigene Darstellung nach Lange et al. 2011)

Ein Verfahrensvorschlag zur Regelleistungsbereitstellung durch Windparks muss daher vor allem die Dargebotsabhängigkeit und Prognoseungenauigkeit der Windenergie berücksichtigen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Regelleistungsbereitstellung, die zur Frequenzhaltung benötigt wird. Weitere Systemdienstleistungen, die für eine sichere Stromversorgung not-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

wendig sind, wie z. B. die Spannungshaltung oder das Engpassmanagement, werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

1.2 Zielsetzung

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, einen Vorschlag für ein Verfahren zur Regelleistungsbereitstellung durch Windparks zu entwickeln. Dieser Vorschlag soll Antworten auf die folgenden 2 Fragen finden.

1. Wie kann die Erstellung eines Regelleistungsangebots mit Windparks erfolgen (Abschnitt 3)?
2. Wie kann der Nachweis der Regelleistungsbereitstellung durch Windparks erfolgen (Abschnitt 4)?

Der Verfasser hat bereits mehrere Veröffentlichungen mit anderen Autoren durchgeführt, die einen Verfahrensvorschlag, der die Dargebotsabhängigkeit und Prognoseungenauigkeit berücksichtigt, zum Thema hatten (u.a. Speckmann at al. 2010; Speckmann und Baier 2011; Speckmann et al. 2012; Jansen und Speckmann 2013a). Die umfassendste Veröffentlichung hierzu ist der Abschlussbericht des vom Verfasser beantragten und zeitweise geleiteten Projekts „Regelenergie durch Windkraftanlagen“ (RdW 2014). In dem Projekt zeigte sich, dass die Partner insbesondere in Bezug auf die Nachweisführung noch uneinig waren. Daher liegt ein Schwerpunkt dieser Arbeit auf einem rein technischen Vergleich der beiden Nachweisverfahren, der bisher noch nicht durchgeführt wurde und der die Entscheidungsfindung für ein Verfahren unterstützen soll (Abschnitt 4.2). Daneben werden die wesentlichen technischen Inhalte in Bezug auf die Angebotserstellung und Nachweisführung aus den bisherigen Veröffentlichungen dargestellt, da diese u.a. für das bessere Verständnis des Vergleichs benötigt werden. Im Gegensatz zu den bisherigen Veröffentlichungen werden die technischen Inhalte meistens ausführlicher und teilweise um einzelne Aspekte erweitert dargestellt. Des Weiteren werden in den jeweiligen Abschnitten mit inhaltlichen Überschneidungen zu den bisherigen Veröffentlichungen des Verfassers dargestellt, welche Leistungen vom Verfasser und welche Leistungen nicht vom Verfasser erbracht wurden. Auf wirtschaftliche Aspekte wird im Gegensatz zu den bisherigen Veröffentlichungen nicht eingegangen.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

1.3 Vorgehensweise

In Abbildung 2 sind der Aufbau der Arbeit und die Verknüpfungen der einzelnen Abschnitte untereinander dargestellt.

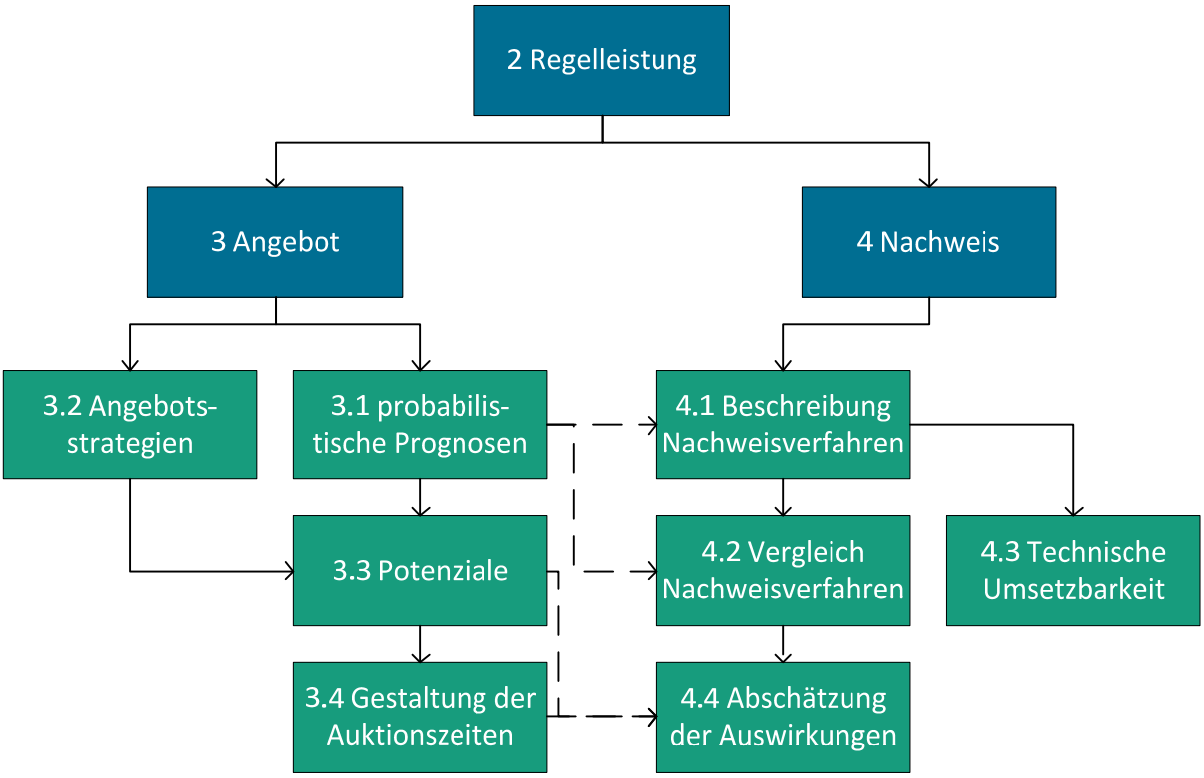

Abbildung 2: Darstellung des Aufbaus der Arbeit

Anfangs wird in Abschnitt 2 darauf eingegangen, was Regelleistung ist und worin der Zusammenhang zwischen den Märkten für Regelleistung und den anderen Märkten für elektrische Energie besteht. In diesem Abschnitt wird weiterhin beschrieben, wie zuverlässig ein Regelleistungsangebot sein muss und wie der Bedarf an vorzuhaltender Regelleistung bestimmt wird. Abschließend wird in diesem Abschnitt darauf eingegangen, wie der Stand der Forschung im Bereich Regelleistungsbereitstellung durch Windparks ist. Dabei liegt ein besonderes Augenmerk auf den beiden Fragestellungen dieser Arbeit, dem Nachweisverfahren und der Angebotserstellung.

In Abschnitt 3 wird die Angebotserstellung mit Windparks behandelt. Hierzu werden in einem ersten Schritt in Abschnitt 3.1 probabilistische Prognosemodelle für Windparks (Abschnitt 3.1.1) und steuerbare Anlagen (Abschnitt 3.1.2) beschrieben. Die probabilistische Prognose für Windparks beruht auf einer Kerndichteschätzung. Das probabilistische Prognosemodell für steuerbare Anlagen wurde entwickelt, um das Pooling von steuerbaren Anlagen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

und Windparks zu untersuchen (Abschnitt 3.1.3). In Abschnitt 3.2 werden Angebotsstrategien für Windparks beschrieben. Diese fußen aufgrund der Prognoseungenauigkeit der Windenergie auf größtenteils kürzeren Vorlaufzeiten, als es sie derzeit an den Regelleistungsmärkten gibt. In Abschnitt 3.3 werden dann die Potenziale zu den Angebotsstrategien für einen 30-GW-Windparkpool für das Jahr 2012 untersucht, der aus allen Windparks in Deutschland besteht. Hierbei wird auch untersucht, welche Potenziale sich durch ein Pooling mit steuerbaren Anlagen ergeben. Im letzten Abschnitt 3.4 werden, aufbauend auf den Potenzialuntersuchungen, Empfehlungen abgegeben, wie die Auktionszeiten an den Regelleistungsmärkten ausgestaltet werden sollten.

In Abschnitt 4 wird ein Vorschlag für ein Nachweisverfahren der Regelleistungsbereitstellung gemacht. Dabei werden die 2 möglichen Nachweisverfahren „mögliche Einspeisung“ und „Fahrplan“ in Abschnitt 4.1 anhand des Beispiels eines Pools mit 2 Windparks beschrieben. Um ein Nachweisverfahren empfehlen zu können, wird in Abschnitt 4.2 ein Vergleich der beiden Nachweisverfahren angestellt. Durch den Vergleich wird die Fragestellung untersucht, ob Windparks generell einen Fahrplan einhalten sollten oder nicht. Der Vorteil einer Fahrplaneinhaltung ist die Reduzierung des Bedarfs an vorzuhaltender Regelleistung. Nachteilig sind die Abregelungsverluste, die durch die Abregelung der Windparks auf einen Fahrplanwert entstehen. Das Ergebnis gibt einen Hinweis darauf, ob Windparks generell einen Fahrplan einhalten sollten (Verfahren „Fahrplan“) oder nicht (Verfahren „mögliche Einspeisung“). In Abschnitt 4.3 wird auf die technische Umsetzbarkeit der beiden Verfahren eingegangen, indem anfangs generische Musterprotokolle für die beiden Verfahren definiert werden, deren Einhaltung anschließend anhand realer Windparkdaten überprüft wird. Abschließend werden in Abschnitt 4.4 die möglichen Auswirkungen der Regelleistungsbereitstellung durch Windparks in Deutschland beschrieben.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

2 Regelleistung

Die zentralen Fragestellungen dieses Abschnitts lauten:

- Was sind die Regelleistungsmärkte und wie hängen diese mit den anderen Märkten für elektrische Energie zusammen (Abschnitt 2.1 - 2.3)?
- Wie zuverlässig muss ein Angebot an den Regelleistungsmärkten sein (Abschnitt 2.4)?
- Warum sollten Windparks Regelleistung bereitstellen und welche Erfahrungen mit und Forschungsergebnisse zu dem Thema gibt es (Abschnitt 2.5)?

2.1 Handel von elektrischer Energie

Mit der EU-Binnenmarktrichtlinie Elektrizität 96/92/EG wurde am 19.12.1996 die Liberalisierung der Märkte für leitungsgebundene Energien eingeleitet. Deutschland hat die Vorgaben der Richtlinie mit dem Energiewirtschaftsgesetz vom 24.4.1998 umgesetzt. Durch das Energiewirtschaftsgesetz wurde der gesamte Strommarkt für den Wettbewerb frei gegeben. Seitdem können Stromkunden ihren Versorger frei wählen. Des Weiteren müssen die Netzbetreiber allen Netznutzern einen diskriminierungsfreien Netzzugang ermöglichen. Außerdem wurde die Entflechtung der Bereiche Erzeugung, Netz, Vertrieb und Handel festgelegt, was auch als Unbundling bezeichnet wird. Im Jahr 2005 wurde die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen ins Leben gerufen, die ein unabhängiges Regulierungsorgan darstellt. Die Bundesnetzagentur soll zum einen in ihrem Zuständigkeitsbereich den Wettbewerb fördern und zum anderen einen diskriminierungsfreien Netzzugang gewährleisten (Konstantin 2009) (Bundesnetzagentur 2015).

Regelzonen

Das deutsche Verbundnetz ist in das europäische Verbundnetz eingebunden. Dieses hatte früher die Bezeichnung UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) und wird heute als Synchrongebiet Kontinentaleuropa bezeichnet. Das Synchrongebiet Kontinentaleuropa ist ein Teil des Verbundes der europäischen Übertragungsnetzbetreiber ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), der aus insgesamt 5 Synchrongebieten besteht (ENTSO-E 2012b). Elektrische Energie kann und wird zwischen den Synchrongebieten mit Hilfe von Hochspannung-Gleichstrom-Übertragung transferiert (ENTSOE 2015). Das deutsche Verbundnetz besteht aus 4 Regelzonen. Eine Regelzone ist ein Ver-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

sorgungsgebiet, für dessen Primär- und Sekundärregelleistung und Minutenreserve ein Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich ist (Konstantin 2009). Die deutschen Regelzonen sind: Amprion, 50Hertz, TenneT und TransnetBW (regelleistung.net 2013b).

Spotmarkt

In einem liberalisierten Markt gibt es eine Vielzahl von Produkten mit unterschiedlichen Volumina, Laufzeiten und Preiskonditionen. Dabei kann zwischen den kurzfristigen Spotmärkten (s. Abbildung 3) und den langfristigen Terminmärkten unterschieden werden. Des Weiteren können Produkte über die Strombörse oder in bilateralen OTC-Geschäften gehandelt werden. OTC steht für over the counter. Die Strombörse erfüllt dabei die Aufgabe, allen Marktteilnehmern einen transparenten und aus finanzieller, rechtlicher und technischer Sicht sicheren Marktplatz zur Verfügung zu stellen. In Deutschland hat sich im Sommer 2000 die Energiebörse EEX (European Energy Exchange) etabliert, an der Spot- und Termingeschäfte durchgeführt werden können (Konstantin 2009). Die Spotgeschäfte werden seit 2008 an der EPEX SPOT in Paris durchgeführt (EPEX SPOT 2013a). Die Termingeschäfte werden weiterhin an der EEX durchgeführt (eex 2015).

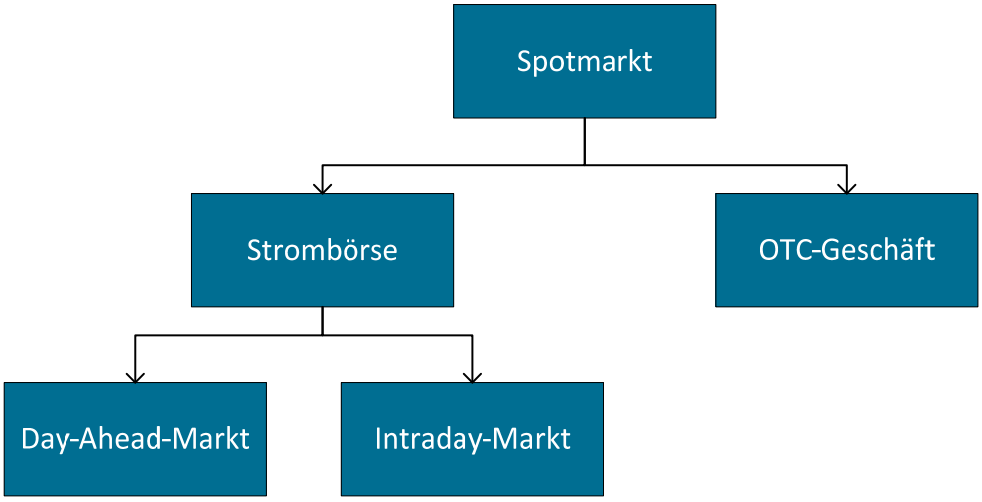

Abbildung 3: Übersicht über die Produkte am Spotmarkt, wobei OTC für over the counter steht (eigene Darstellung nach Konstantin 2009)

Die 4 deutschen Regelzonen und die österreichische Regelzone bilden das Handelsgebiet des Day-Ahead-Markts, der am Vortag der physikalischen Lieferung stattfindet. Das Mindestvolumen beträgt 0,1 MW pro Stunde. Es findet eine tägliche Auktion um 12 Uhr statt, die auch an Wochenenden und Feiertagen durchgeführt wird. Neben den einzelnen Stunden des Fol-

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

getages können auch Blöcke, die mehrere Stunden umfassen, gehandelt werden (EPEX SPOT 2012).

Das Handelsgebiet des Intraday-Markts umfasst nur die 4 deutschen Regelzonen. Am Intraday-Markt ist es möglich untertags Stromgeschäfte abzuschließen. Das Mindestvolumen beträgt 0,1 MW. Der Handel am Intraday-Markt erfolgt kontinuierlich, wobei jedes Produkt bis zu 45 Minuten vor Lieferbeginn gehandelt werden kann. Neben 15-Minuten- und Stundenprodukten können auch Blöcke gehandelt werden, die aus mehreren Stunden bestehen (EPEX SPOT 2012).

2012 wurden an der EPEX 245 TWh am Day-Ahead-Markt und 16 TWh am Intraday-Markt in Deutschland und Österreich gehandelt (EPEX SPOT 2013b). Die gehandelte Energiemenge entspricht jedoch nur einem Teil des elektrischen Energieverbrauchs. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der OTC-Handel aufgrund günstiger Transaktionskosten von vielen bevorzugt wird (Bundesverband Erneuerbare Energien 2011).

Neben den Spot- und Terminmärkten gibt es die Regelleistungsmärkte, die in Abschnitt 2.2 beschrieben werden, und den Yesterday-Markt. Am Yesterday-Markt können nachträglich Produkte gehandelt werden. Dadurch können Bilanzkreise ihre Fahrplanabweichungen nachträglich ausgleichen (Spot-ex GmbH 2012). Rechtliche Grundlage hierfür ist die Stromnetzzugangsverordnung, die nachträgliche Fahrplanänderungen regelzoneninterner Fahrpläne bis 16 Uhr des auf den Erfüllungstag folgenden Werktages erlaubt (StromNZV 2012).

Bilanzkreise

Jede Regelzone besteht aus einer Vielzahl von Bilanzkreisen. Sie bestehen aus mindestens einer Einspeise- oder Entnahmestelle, und es gibt keine Einspeise- oder Entnahmestelle, die nicht einem Bilanzkreis zugeordnet ist. Jeder Bilanzkreis hat einen Bilanzkreisverantwortlichen. Dieser ist für die Ausgeglichenheit von Einspeisungen in und Entnahmen aus seinem Bilanzkreis innerhalb jeder Viertelstunde verantwortlich (StromNZV 2012).

Der Austausch elektrischer Energie zwischen Bilanzkreisen, u. a. aufgrund von Börsengeschäften, erfolgt mithilfe von Fahrplänen. Diese geben u. a. an, wie viel elektrische Leistung in einem Viertelstundenintervall zwischen 2 Bilanzkreisen ausgetauscht wird. Die Bilanzkreisverantwortlichen müssen den Übertragungsnetzbetreibern bis 14:30 Uhr ihre Fahrpläne

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

für den Folgetag übertragen. Die Fahrpläne aller Bilanzkreise in einer Regelzone müssen eine insgesamt ausgeglichene Bilanz der Regelzone ergeben. Die Bilanzkreisverantwortlichen sind dazu berechtigt, die Fahrpläne bis zu 15 Minuten vor physikalischer Erbringung noch zu ändern. Der ÜNB hat jedoch das Recht, diese geänderten Fahrpläne abzulehnen, falls dadurch Engpässe zu erwarten sind (StromNZV 2012).

Die rechtliche Grundlage für den Betrieb eines Bilanzkreises bildet der Bilanzkreisvertrag, der zwischen dem Bilanzkreisverantwortlichen und dem jeweiligen ÜNB abzuschließen ist. Der Bilanzkreisvertrag ermöglicht es, elektrische Energie in die Regelzone des jeweiligen ÜNB einzuspeisen oder elektrische Energie zu entnehmen (Bundesnetzagentur 2011a).

Der Bilanzkreisvertrag regelt auch die Pflichten eines Bilanzkreisverantwortlichen. Dies betrifft vor allem die Verantwortung für die Einhaltung der Fahrpläne. Eine Abweichung vom Fahrplan bzw. die Inanspruchnahme von Ausgleichsenergie ist daher nur zulässig, wenn damit nicht prognostizierbare Abweichungen ausgeglichen werden. Dies ist z. B. der Ausfall eines Kraftwerks. Ergeben sich im Rahmen der Bilanzkreisabrechnungen große Abweichungen vom Fahrplan, die der Bilanzkreisverantwortliche nicht auf nicht prognostizierbare Abweichungen zurückführen kann, so kann sich der ÜNB an die Bundesnetzagentur wenden. Diese kann ein Aufsichtsverfahren gegen den Bilanzkreisverantwortlichen einleiten. Dem Bilanzkreisverantwortlichen droht schlimmstenfalls die Auflösung des Bilanzkreisvertrags (Bundesnetzagentur 2011a).

Ausgleichsenergie

Die Ausgleichsenergie ist die Summe der Abweichungen eines Bilanzkreises von dem Fahrplan innerhalb eines Viertelstundenintervalls (StromNZV 2012). Der Unterschied zwischen Ausgleichsenergie und Regelleistung wird anhand eines Beispiels einer Insel mit 2 Bilanzkreisen erläutert. Die Insel entspricht dabei einer Regelzone. Auf der Insel gibt es eine Vielzahl von Erzeugern und Verbrauchern, die entweder Bilanzkreis A (BK-A) oder Bilanzkreis B (BK-B) zugeordnet sind. Entsprechend ihrer Verpflichtung geben die Bilanzkreisverantwortlichen von BK-A und BK-B einen Fahrplan beim ÜNB ab. Da es auf der Insel nur 2 Bilanzkreise gibt, entspricht der Leistungsbezug des einen Bilanzkreises der Leistungsabgabe des anderen, da die Summe aller Fahrpläne eine ausgeglichene Bilanz der Regelzone ergeben muss.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Aufgrund nicht prognostizierbarer Ereignisse ergeben sich Abweichungen von den Fahrplänen der beiden Bilanzkreise. Diese sorgen zum einen für einen Ausgleichsenergiebezug der Bilanzkreise. Zum anderen machen sie auch die Bereitstellung von Regelleistung durch den ÜNB notwendig. In Abbildung 4 wird dies verdeutlicht.

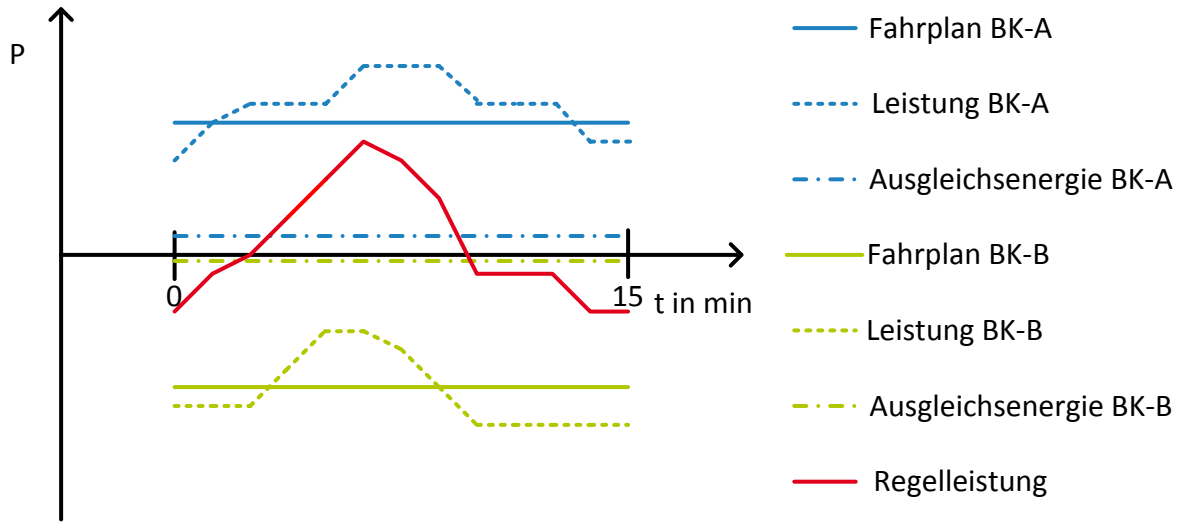

Abbildung 4: Veranschaulichung des Unterschieds zwischen Ausgleichsenergie und Regelleistung anhand des Beispiels einer Insel mit 2 Bilanzkreisen (BK-A und BK-B)

Die durchgezogenen blauen und grünen Linien entsprechen den Fahrplänen der Bilanzkreise, die viertelstundenscharf angegeben werden. BK-A stellt somit Energie für BK-B bereit. Von diesen Fahrplänen ergeben sich Abweichungen, da das reale Einspeiseverhalten, das in der Abbildung als Leistung gepunktet dargestellt ist, von den Fahrplänen abweicht. Die Summe der Abweichungen von BK-A und BK-B muss jederzeit durch Regelleistung ausgeglichen werden. Die Regelleistung wird von dem ÜNB für die Bilanzkreise bereitgestellt. Die Regelleistung entspricht der roten Linie. Genau wie der Fahrplan wird auch die Ausgleichsenergie viertelstundenscharf ermittelt. Sie entspricht dem Mittelwert der Fahrplanabweichungen aller Bilanzkreise in einem Viertelstundenintervall (StromNZV 2012) und ist als gepunktet-gestrichelte Linie dargestellt.

2.2 Beschreibung der 3 Regelleistungsarten

Die ÜNB sind für die Frequenzhaltung in ihrer Regelzone verantwortlich und halten hierfür Regelleistung in Form von Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserve vor, die sie auf den Regelleistungsmärkten beschaffen (VDN 2003). Ein Frequenzanstieg tritt dann auf, wenn mehr Erzeugung als Verbrauch im System vorliegt. Ein Frequenzabfall hingegen kommt dann zu Stande, wenn mehr Verbrauch als Erzeugung im System vorliegt. Zur

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Frequenzhaltung muss jederzeit ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch bestehen (Schwab 2009).

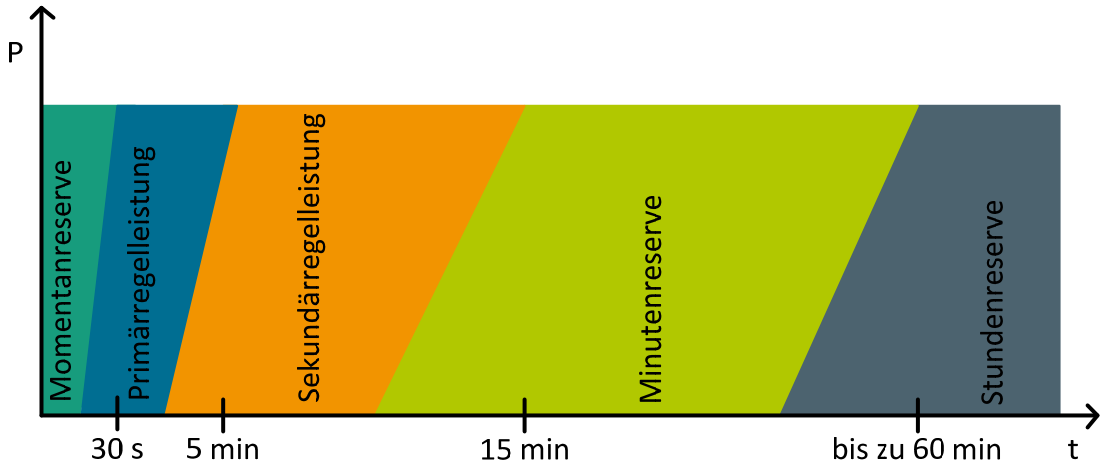

Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der 3 Regelleistungsarten, ergänzt um die Momentanreserve und Stundenreserve (eigene Darstellung nach Waffenschmidt 2011)

In Abbildung 5 ist der zeitliche Verlauf der 3 Regelleistungsarten dargestellt, ergänzt um die Momentanreserve und die Stundenreserve. Kommt es zu einer Frequenzabweichung im Verbundnetz, z. B. aufgrund eines Kraftwerksausfalls, wirkt anfangs die Momentanreserve. Diese wird aus der kinetischen Energie gespeist, die in den frequenzsynchron rotierenden Schwungmassen (z.B. Synchrongeneratoren) gespeichert ist. Die Momentanreserve wirkt verzögerungsfrei bei einem Leistungsungleichgewicht durch das Abbremsen oder Beschleunigen dieser Schwungmassen (ÜNB 2014, EFZN 2013). Nach circa 5 s wird die Primärregelleistung aktiviert. Dies erfolgt gleichzeitig für alle Einheiten in Europa, die Primärregelleistung zur Verfügung stellen. Anschließend wird die Sekundärregelleistung aktiviert. Diese hat 2 Aufgaben. Die erste Aufgabe besteht darin, die Primärregelleistung abzulösen und die Frequenz wieder auf 50 Hz zurückzuführen. Die zweite Aufgabe ist es, die vereinbarten Austauschleistungen über die Kuppelstellen zu andere Regelzonen wieder auf die Sollwerte zurückzuführen. Schließlich wird die Minutenreserve aufgerufen, die die Sekundärregelleistung in einer Regelzone ablöst (UCTE 2009). Im Anschluss daran wirkt die Stundenreserve des Bilanzkreises, der in diesem Beispiel durch einen Kraftwerksausfall den Frequenzabfall verursacht hat. Die Reserve des Bilanzkreises muss dabei 45 bis 60 Minuten nach dem Ausfall des Kraftwerks aktiviert werden, je nachdem, zu welchem Zeitpunkt in einer Viertelstunde das Kraftwerk ausgefallen ist (StromNZV 2012).

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.