

Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Erbringung von Primärregelleistung durch Energiespeicher

Technische Analyse und wirtschaftlicher Vergleich

Fabian Wandelt, Dennis Gamrad, Wolfgang Deis
CREAVIS – Science to Business
Evonik Industries AG
Marl, Germany
fabian.wandelt@evonik.com

Johanna Myrzik
Inst. f. Energiesysteme, Energieeffizienz & Energiewirtschaftl.
Technische Universität Dortmund
Dortmund, Germany

Abstract— Aufgrund der Energiewende, mit dem Wandel von einer fossil befeuerten zu einer regenerativen Energieversorgung, wird die Erforschung von alternativen Konzepten für Netzdienstleistungen immer wichtiger. Ein solches Konzept ist die Erbringung von Regelleistung mit Energiespeichern. In diesem Beitrag wird u. a. der Verlauf der Netzfrequenz analysiert und ein Simulationsmodell zur Untersuchung eines Speichers in der Anwendung Primärregelleistung entwickelt. In diesem Zusammenhang wird ein Konzept, gestützt durch entsprechende Simulationsergebnisse, vorgestellt, das insbesondere für Betreiber großer industrieller Verbrauchsanlagen zeigt, wie diese in Kombination mit Batteriespeichern zur Regelleistungserbringung genutzt werden können. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse vergleicht die verschiedenen Konzepte der Primärregelleistungserbringung mit Batteriespeichern.

Keywords— Speichersysteme, Batteriespeicher, Systemdienstleistungen, Primärregelleistung, Lastmanagement

I. EINLEITUNG

Eine regenerative und emissionsarme elektrische Energieversorgung ist aktuell eines der zentralen Ziele von Forschung und Entwicklung. Herausforderungen ergeben sich dabei durch die wetterabhängige, und dadurch nur bedingt vorhersagbare, Einspeisung der meisten regenerativen Energiequellen. Die Speicherung von elektrischer Energie ist eine Option die Herausforderungen der Energiewende zu bestreiten. Speicher können die Erzeugung und den Verbrauch von Energie zeitlich entkoppeln und so zu einer Entlastung der Netze beitragen.

In diesem Beitrag werden Konzepte zur Erbringung von Primärregelleistung (PRL) mit elektrischen Energiespeichern dargestellt. Als Beispielsystem wird dabei ein Großbatteriespeicher auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie betrachtet. Batteriespeicher sind ein Beispiel für schnell reagierende Elektrizitätsspeicher. Insbesondere Lithium-Ionen-Batterien sind in der Lage PRL zu erbringen [1].

II. REGELLEISTUNG

Da elektrische Netze kaum in der Lage sind Energie zu speichern, ist es erforderlich, dass sich Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt decken. Unterschiede zwischen Erzeugung und Verbrauch können durch Messung der Netzfrequenz, welche innerhalb eines Wechselspannungsnetzes an jedem Ort nahezu gleich ist, erfasst werden. Zu viel Erzeugung bzw. zu wenig Verbrauch führt zu einer positiven Abweichung zur Sollfrequenz und zu wenig Erzeugung bzw. zu viel Verbrauch führt zu einer negativen Abweichung zur Sollfrequenz. Hierbei kommen kleinere Abweichungen zur Sollfrequenz unter anderem dadurch zustande, dass die Netzlast und die Erzeugung von Energie aus Windkraft und Photovoltaik nicht vollkommen genau prognostizierbar sind. Größere Abweichungen dagegen, welche im Extremfall auch Netzausfälle zur Folge haben können, können beispielsweise durch den Ausfall eines Kraftwerkes verursacht werden. [2]

A. Arten von Regelleistung

Aufgrund unvermeidlicher Differenzen zwischen Erzeugung und Verbrauch, ist es erforderlich, dass es Systeme gibt, die bei Bedarf fehlende Leistung ins Netz ein- oder ausspeisen und somit Regelleistung erbringen. Regelleistung gehört, wie z. B. auch Spannungshaltung und Schwarzstartfähigkeit, zu den sogenannten System-

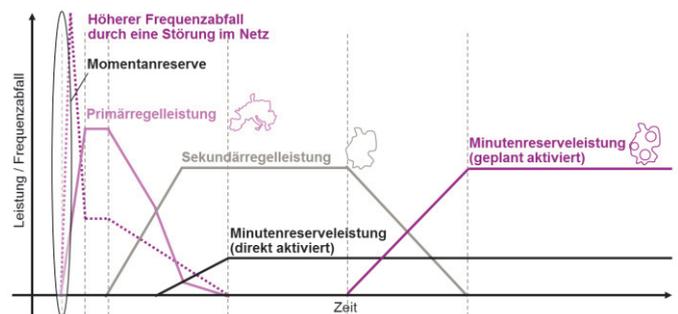


Abbildung 1. Ablösekonzept für Regelleistung im europäischen Verbundnetz [3]

dienstleistungen, welche von Netzbetreibern bereitgestellt werden müssen. Hierbei wird zwischen Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserveleistung unterschieden. PRL wird für das zentraleuropäische Verbundnetz solidarisch erbracht und muss nach 30 Sekunden, nach Auftritt einer Störung im Netz, voll verfügbar sein. Sekundärregelleistung wird jeweils für eine bestimmte Regelzone erbracht und muss nach 5 Minuten in voller Höhe verfügbar sein, um eine Störung innerhalb der Regelzone auszugleichen und die PRL abzulösen. Bei länger anhaltenden Störungen wird begonnen, die Sekundärregelleistung von der Minutenreserveleistung, welche für den durch die Störung betroffenen Bilanzkreis erbracht wird, abzulösen. Obwohl es sich hierbei um ein Ablöseverfahren (siehe Abbildung 1) handelt, darf nicht fälschlicherweise davon ausgegangen werden, dass PRL für lediglich 15 Minuten erbracht werden muss und danach aussteigen darf. Vielmehr ist es so, dass PRL kontinuierlich erbracht werden muss, um die Auswirkungen von überlagerten Störungen innerhalb des zentraleuropäischen Verbundnetzes schnell zu begrenzen.

Neben den Begriffen Primärregelleistung, Sekundärregelleistung und Minutenreserveleistung wird häufig auch die sogenannte Momentanreserve genannt. Diese wird derzeit durch die im Netz befindlichen rotierenden Massen umgehend aktiviert, sobald es zu einem plötzlichen Frequenzabfall kommt, ist jedoch nur für wenige Sekunden wirksam. Momentanreserveleistung könnte jedoch auch durch Batteriespeichersysteme erbracht werden, da diese in der Lage sind, die erbrachte Wirkleistung im Millisekundenbereich zu variieren. Somit könnte der Verlust von rotierenden Massen, bedingt durch eine Erhöhung des Anteils von Erzeugungsanlagen auf Basis regenerativer Energie, u. a. durch Batteriespeichersysteme kompensiert werden. [2]

In diesem Beitrag soll insbesondere auf die Erbringung von PRL eingegangen werden.

B. Ausschreibung von Primärregelleistung

Die Voraussetzungen und Regularien zur Erbringung von Regelleistung werden im sogenannten Transmission Code [4] beschrieben. Zur Erbringung von PRL wird von den Übertragungsnetzbetreibern (ÜNBs) ein Ausschreibungsverfahren durchgeführt. Bei dieser Ausschreibung können Anbieter ihre Anlagen auf einer Internetplattform [5] zur Erbringung von PRL anbieten. Bei der Ausschreibung beträgt die Mindestleistung ± 1 MW und muss symmetrisch für den Zeitraum von einer Woche erbracht werden. Vergütet wird die Erbringung von Primärregelleistung über einen Leistungspreis. Eine Voraussetzung zur Teilnahme an der Ausschreibung ist eine Präqualifikation der Anlage. Für diese Präqualifikation muss u. a. ein vordefiniertes Leistungsprofil abgefahren werden. Die Präqualifikation soll somit sicherstellen, dass der Erbringer, die Anforderungen für die Erbringung von PRL technisch sowie organisatorisch erfüllt. Derzeit sind für das zentraleuropäische Verbundnetz 3.000 MW PRL [5] gefordert.

III. ERKENNTNISSE AUS NETZFREQUENZANALYSEN

Der Verlauf der Netzfrequenz bestimmt maßgeblich die zu erbringende PRL im europäischen Verbundnetz. Daher wurde

eine modellbasierte Analyse von realen Frequenzdaten durchgeführt.

Im Mittel beträgt die Netzfrequenz im europäischen Verbundnetz 50 Hz. Durch äußere Umstände, wie z. B. eine hohe Einspeisung regenerativer Energie, kann der Frequenzmittelwert über einen gewissen Zeitraum von diesem Sollwert abweichen. Die zu erbringende PRL wird in Abhängigkeit der Frequenzabweichung vom Sollwert berechnet. Weicht die Netzfrequenz um mehr als ± 200 mHz vom Sollwert ab, muss 100% der vermarkteten Leistung erbracht werden. In dem Bereich einer Frequenzabweichung von -10 mHz und 10 mHz ist ein Totband definiert. Befindet sich die Frequenz innerhalb dieses Totbandes, muss keine Regelleistung erbracht werden (vgl. Abbildung 4).

In Abbildung 2 sind die durchschnittlichen Tagesfrequenzabweichungen für das Jahr 2013 dargestellt. Es zeigt sich, dass im Verlauf eines Jahres große und länger andauernde Frequenzabweichungen auftreten können. Ein Beispiel für eine länger andauernde Überfrequenz ist zwischen dem 19. und 30. Juni (Tag 170 bis 181) zu beobachten. Für einen Regelleistungserbringer bedeutet eine andauernde Überfrequenz im Durchschnitt auch eine tendenziell andauernde Aufnahme von Energie aus dem Netz. Für Speicher ergibt sich dadurch eine besondere Herausforderung aufgrund ihrer begrenzten Kapazität. Bei lang anhaltenden oder starken Frequenzabweichungen in eine Richtung droht somit ein Voll- bzw. Leerlaufen des Speichers.

IV. KONZEPTE ZUR REGELLEISTUNGSERBRINGUNG DURCH BATTERIESPEICHER

Von den Übertragungsnetzbetreibern wird eine verlässliche Erbringung von PRL gefordert. Aufgrund der begrenzten Kapazität eines Batteriespeichers und der Frequenzabhängigkeit der Primärregelung, kann ein Voll- bzw. Leerlaufen der Batterie nicht ausgeschlossen werden. Um die Zeitverfügbarkeit eines Speichers zur Erbringung von PRL zu erhöhen, können mehrere Konzepte, dargestellt in Abbildung 3, genutzt werden.

Eine Möglichkeit, um eine hohe Zuverlässigkeit eines Speichers zur Erbringung von PRL zu gewährleisten, ist ein großes Kapazitäts-Leistungs-Verhältnis. Je größer die Kapazität eines Speichers, desto länger kann bei einer bestimmten Leistung ent- bzw. geladen werden.

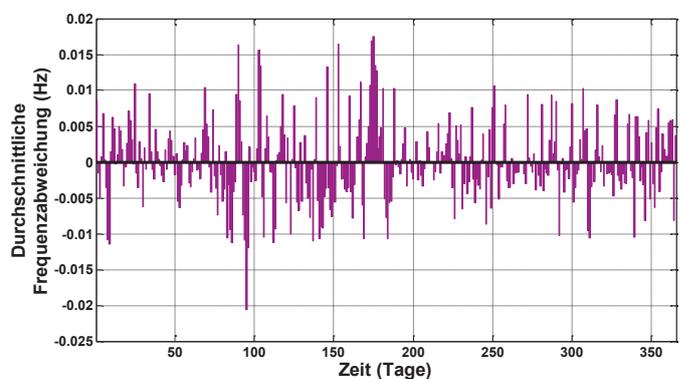


Abbildung 2. Durchschnittliche Tagesfrequenzabweichung

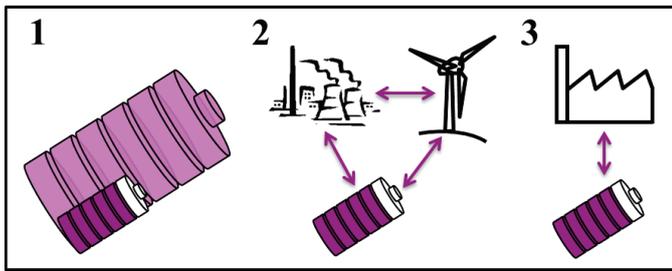


Abbildung 3. Konzepte zur Erbringung von Primärregelleistung mit Batteriespeichern

Des Weiteren können Regelleistungserbringer zu einem Pool von Anlagen zusammengeschlossen werden. In so einem Pool ist die Integration von Speichern denkbar. Droht der Ausfall einer Anlage, beispielsweise durch das Voll- oder Leerlaufen eines Speichers, kann eine weitere zurückgehaltene Anlage die Erbringung von Regelleistung übernehmen. Dabei ist zu beachten, dass die zurückgehaltene Leistung nicht vermarktet werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, welche in diesem Beitrag näher betrachtet wird, ist die Kombination eines Speichers mit einer Industrieanlage bzw. einem großen Verbraucher. Hierbei wird letztendlich ein ähnliches Verhalten wie bei einem konventionellen Erbringer (z. B. Kraftwerk) simuliert. In einem konventionellen Kraftwerk werden beispielsweise durch Turbinendrosselung oder Kondensatstau kurzfristig Energiereserven aktiviert und somit PRL erbracht. Diese Kurzzeitspeicher lassen sich durch eine Nachführung von Brennstoff, welcher einen Langzeitspeicher darstellt, zeitlich unbegrenzt wieder auffüllen. [6]

Durch die Kombination von Batteriespeicher und Verbraucher fungiert die Batterie als Kurzzeitspeicher und der Verbraucher als Langzeitspeicher. Eine besondere Herausforderung ist hierbei, den Einfluss auf die Industrieanlage möglichst gering zu halten, da Parameter wie Produktqualität und Produktionsmenge kaum bis gar nicht beeinflusst werden dürfen.

V. BETRIEBSSTRATEGIEN FÜR ENERGIESPEICHER

Verschiedene Energiespeicher, wie beispielsweise Batterien, sind in der Lage, die Anforderungen an die Primärregelleistungserbringung hinsichtlich Geschwindigkeit und Flexibilität zu übertreffen. Durch Ausnutzung dieser Freiheitsgrade ist es möglich, den Verlauf des Ladezustandes im gewissen Maße zu beeinflussen. Zwei solcher Betriebsstrategien, welche von den deutschen ÜNBs in einem Leitfaden [7] dargestellt und ausdrücklich zugelassen sind, werden im Folgenden näher betrachtet und sind in Abbildung 4 dargestellt.

A. Optionale Übererfüllung

Bei der Erbringung von PRL ist es gemäß Transmission Code [4] möglich die geforderte Leistung um bis zu 20% über zu erfüllen. Diese Übererfüllung kann zur Regelung des Ladezustandes eines Batteriespeichers genutzt werden. Wird z. B. eine negative Erbringung von Regelleistung benötigt, kann mit 120% der geforderten Leistung geladen werden. Dies

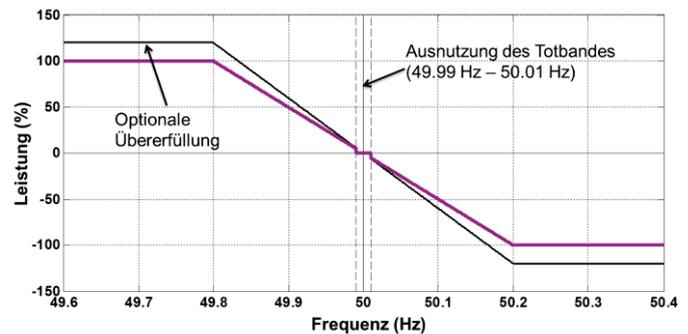


Abbildung 4. Geforderte PRL in Abhängigkeit der Frequenz

ist beispielweise sinnvoll, wenn der Ladezustand des Speichers in der Nähe seiner unteren Kapazitätsgrenze ist. Durch die erhöhte Ladeleistung wird die Batterie schneller auf einen höheren Ladezustand gebracht. [7]

B. Totband

Eine weitere Betriebsstrategie ist die Ausnutzung des Totbandes. Befindet sich die Netzfrequenz innerhalb des Totbandes wird keine PRL gefordert. Während dieser Zeit kann es hilfreich sein, den Ladezustand auf ein mittleres Niveau zu heben, falls sich dieser in der Nähe der Kapazitätsgrenzen des Speichers befindet. So eine Ausnutzung des Totbandes ist zulässig, solange das Laden und Entladen des Speichers netzfreundlich erfolgt. Dies bedeutet, dass nur geladen werden darf, wenn die Frequenz im positiven Bereich des Totbandes zwischen 50 Hz und 50,01 Hz ist. Gleichermäßen darf ein Entladen des Speichers nur im negativen Bereich (49,99 Hz bis 50 Hz) stattfinden. [7]

Um eine netzfreundliche Nutzung des Totbandes sicherzustellen, wird eine hohe Messgenauigkeit von den ÜNBs gefordert. Die Genauigkeit der Frequenzmessung muss dabei besser als der Toleranzbereich des Totbandes sein. Beträgt die Messgenauigkeit beispielsweise ± 5 mHz, ist eine Ausnutzung des Totbandes im Bereich von 49,995 Hz und 50,005 Hz nicht zulässig.

VI. SIMULATIONSMODELL

Mit der Software Matlab/Simulink®, welche sich besonders zur Durchführung numerischer Berechnungen und der grafischen Darstellung der Ergebnisse eignet, wurde ein Simulationsmodell entwickelt, um das Verhalten von Energiespeichern unter einstellbaren Bedingungen zu simulieren. Das Modell berechnet aus dem Verlauf der Netzfrequenz und den Regeln des Transmission Codes den Leistungsverlauf für die Erbringung von z. B. PRL. Ausgehend von diesen Daten wird der Ladezustandsverlauf (State-of-Energy) simuliert. Weiterhin wird der tägliche durchschnittliche Energieumsatz berechnet. Die Simulation wird genutzt, um einen Eindruck über die Entwicklung des Ladezustands, der Zyklenbelastung und der zu erbringenden Leistung des Gesamtsystems zu bekommen.

Um die Kombination von Batteriespeicher und industrieller Verbrauchsanlage zu untersuchen, wurde das Simulationsmodell um eine flexibel steuerbare Last erweitert.

Durch eine Kombination von Verbraucher und Batteriespeicher entstehen zusätzliche Freiheitsgrade [7], um Regelleistung zu erbringen. Die Betriebsführung hängt dabei stark von der jeweiligen Industrieanlage ab. Dabei können einerseits Anforderungen aus dem Produktionsbetrieb sowie Zustände des Speichers im Modell berücksichtigt werden.

Von dem erweiterten Modell werden außerdem Indikatoren berechnet, um die Belastung der Verbrauchsanlage bewerten zu können. Diese hier definierten Indikatoren sind die Einsatzhäufigkeit n und die durchschnittliche Einsatzdauer T der Anlage. Die Einsatzhäufigkeit beschreibt die Anzahl der Aktivierungen der Verbrauchsanlage, um den Speicher bei der Erbringung von PRL zu unterstützen. Die Einsatzdauer beschreibt die durchschnittliche Zeit in Minuten pro Einsatz, in der die Verbrauchsanlage zur Unterstützung des Speichers verwendet wird.

VII. SIMULATIONSERGEBNISSE

A. Batteriespeicher im Einzelbetrieb

In einer ersten Simulation wurde das Verhalten eines Speichers im Einzelbetrieb unter Annahme einer unbegrenzten Kapazität untersucht. Der Speicher reagiert direkt auf ein Frequenzsignal nach den Regeln des Transmission Codes, ohne Ausnutzung von Freiheitsgraden. Dazu wurde das Jahr 2013 für eine Primärregelleistungserbringung von 1 MW simuliert. Der Gesamtwirkungsgrad des Batteriespeichersystems wurde für einen vollständigen Lade- und Entladevorgang vereinfacht mit $\eta=100\%$ angenommen. In Abbildung 5 ist das Ergebnis der Simulation, als Funktion von Ladezustand über der Zeit, dargestellt. Weiterhin sind die durchschnittlichen Frequenzabweichungen aus Abbildung 2 im Diagramm aufgetragen. Es zeigt sich, dass der Verlauf des Ladezustandes analog zur Frequenzabweichung verläuft. Bei einer durchschnittlichen Überfrequenz im Netz wird der Speicher tendenziell geladen, bei einer durchschnittlichen Unterfrequenz tendenziell entladen. Zur Orientierung wurde die State-of-Energy Achse skaliert für einen Speicher mit 1 MWh Energieinhalt dargestellt. Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall eine vergleichsweise hohe Kapazität des Batteriespeichers benötigt werden würde, um für den betrachteten Zeitraum mit einer Batterie alleine ununterbrochen PRL zu erbringen.

In Annahme der oben beschriebenen Bedingungen, wurde der durchschnittliche Energieumsatz für das gesamte Jahr 2013 berechnet und ist in Abbildung 6 dargestellt. In 2013 wäre im

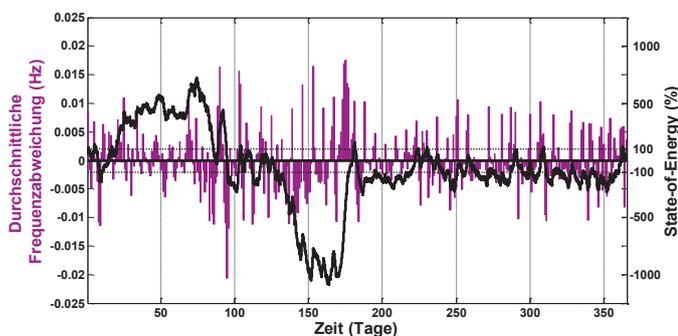


Abbildung 5. Verlauf des Ladezustandes und durchschnittliche Frequenzabweichung für einen Batteriespeicher im Einzelbetrieb

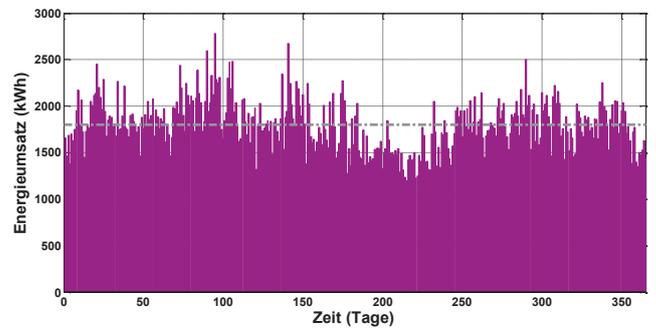


Abbildung 6. Täglicher Energieumsatz für die Erbringung von 1 MW PRL

Durchschnitt ein Energieumsatz von ca. 1.800 kWh am Tag nötig gewesen um 1 MW PRL zu erbringen. Dies entspricht einer äquivalenten Vollzyklenzahl von etwa 330 Zyklen pro Jahr für einen Speicher mit 1 MWh Energieinhalt.

B. Batteriespeicher in Kombination mit einer Industrieanlage

In einer zweiten Simulation wurde das Verhalten des Speichers untersucht, wenn zusätzlich eine industrielle Verbrauchsanlage zum Ladezustandsausgleich genutzt wird. Dazu wurde für die flexible Last der Verbrauchsanlage eine Leistung von 20% der maximal zu erbringenden Regelleistung angenommen. In Abbildung 7 ist das Ergebnis der Simulation, als Funktion von Ladezustand über der Zeit, dargestellt.

Durch einen geeigneten Kombinationsbetrieb mit der Verbrauchsanlage wird eine Überschreitung der Kapazitätsgrenze verhindert und der Ladezustand auf einem mittleren Niveau gehalten. Somit kann der Ladezustand für den gesamten Simulationszeitraum innerhalb einem wesentlich kleineren Kapazitätsbereich gehalten werden, als im Einzelbetrieb aus Kapitel VII.A.

In Kombination mit einer Industrieanlage beträgt der durchschnittliche Energieumsatz des Batteriespeichers etwa 1.800 kWh pro Tag für den betrachteten Zeitraum. Somit ändert sich die durchschnittliche umgesetzte Energie im Vergleich zum Einzelbetrieb nicht. Jedoch sind die maximalen täglichen Ausschläge höher als im Einzelbetrieb, wie in Abbildung 8 dargestellt.

Um die Auswirkungen auf die Industrieanlage messbar zu machen, wurden die in Kapitel VI beschriebenen Indikatoren in der Simulation berechnet. Für das Jahr 2013 wären in etwa 300 Aktivierungen der Verbrauchsanlage nötig gewesen, um den

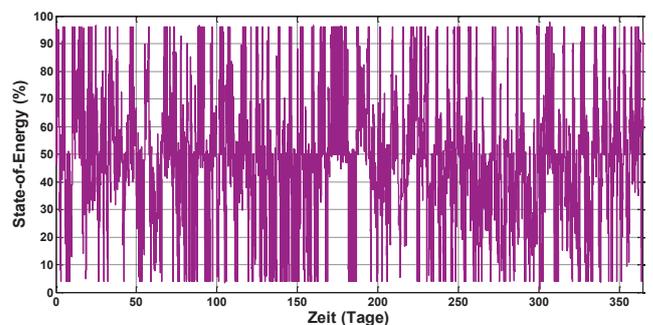


Abbildung 7. Verlauf des Ladezustandes in Kombination mit einer Industrieanlage

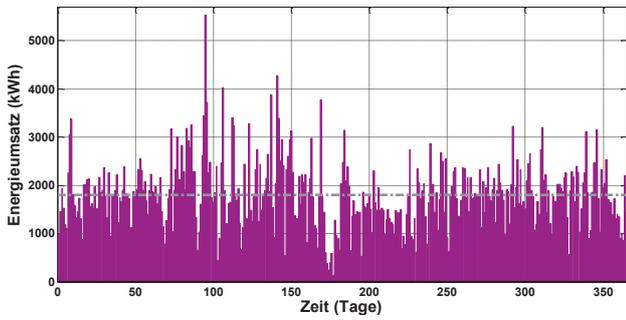


Abbildung 8. Tageslicher Energieumsatz für einen Batteriespeicher in Kombination mit einer Industrieanlage

Ladezustand des Batteriespeichers in seinen Grenzen zu halten. Die durchschnittliche Einsatzzeit der Anlage betrug dabei ca. 110 Minuten.

C. Batteriespeicher in Kombination mit einer Industrieanlage und optimierter Betriebsstrategie

Um den Einfluss der Betriebsstrategien aus Kapitel V zu untersuchen wurde eine dritte Simulation durchgeführt. Hierbei wurden beide Betriebsstrategien, die Ausnutzung des Totbandes sowie die optionale Übererfüllung, angewendet. Der Verlauf des Ladezustandes verbleibt innerhalb der Kapazitätsgrenzen des Speichers und ähnelt somit dem Verlauf in Abbildung 7. Allerdings ändert sich der durchschnittliche Energieumsatz und steigt um 200 kWh auf 2.000 kWh pro Tag. Die maximale Höhe der Ausschläge bleibt, wie in Abbildung 9 dargestellt, jedoch gleich.

Die Industrieanlage wäre im Fall der optimierten Betriebsstrategien etwa 200-mal aktiviert worden, mit einer durchschnittlichen Einsatzzeit von $T=115$ Minuten.

VIII. ANALYSE DER WIRTSCHAFTLICHKEIT

Mit Hilfe einer Kapitalwertberechnung wird die Wirtschaftlichkeit der oben beschriebenen Ansätze zur Primärregelleistungserbringung mit Batteriespeichern verglichen. Die möglichen Erlöse berechnen sich aus den von den ÜNBs gezahlten Leistungspreisen für die Erbringung von PRL. Somit wird die vorgehaltene Leistung vergütet. Eine Vergütung für die erbrachte Arbeit gibt es im Markt für PRL nicht. Für die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit wurden die PRL-Preise der letzten 3 Jahre analysiert, um einen Durchschnittswert zu bestimmen. Diese Preisentwicklung ist in Abbildung 10 dargestellt.

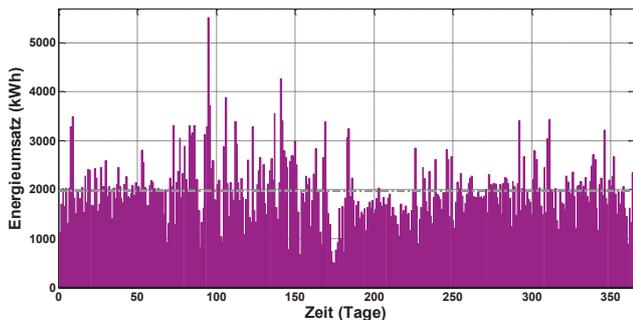


Abbildung 9. Tageslicher Energieumsatz für einen Batteriespeicher in Kombination mit einer Industrieanlage und optimierter Betriebsstrategie

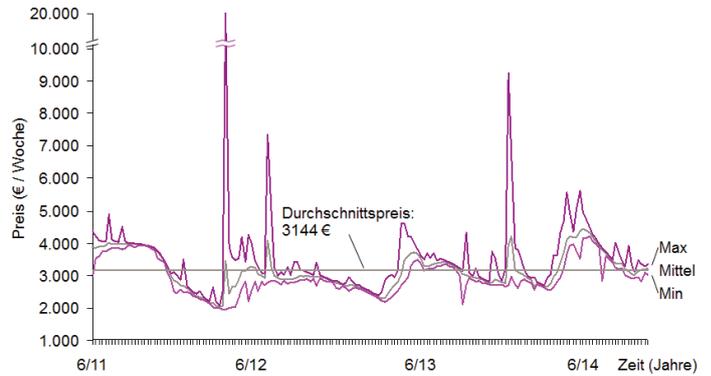


Abbildung 10. Preis für 1 MW PRL in Deutschland [5]

Es zeigt sich, dass im Mittel 3.144 € pro MW und Woche erwirtschaftet werden konnten. Dies entspricht einem jährlichen Erlös von 163.488 € pro MW. Es wird angenommen, dass die Menge an ausgeschriebener PRL in den nächsten Jahren konstant bleibt [8]. Bei einer Vermarktung der Anlage in einem Regelleistungspool, müssen gemäß [9] etwa 30% der Erlöse an den Betreiber des Pools gezahlt werden. Damit verringern sich die durchschnittlichen jährlichen Erlöse auf rechnerisch ca. 114.442 € pro MW.

Die Investitionskosten für einen Batteriespeicher mit 1 MW Leistung und einer Kapazität von 1 MWh werden zu 600 €/kW angenommen [10]. Durch eine Erhöhung der Kapazität erhöht sich auch die Investition für den Speicher. Wird beispielsweise die Kapazität vervierfacht, erhöhen sich die Investitionsausgaben auf 1.650 €/kW [10]. Obwohl die Simulation in Kapitel VII.A gezeigt hat, dass noch eine erheblich größere Kapazität für eine zuverlässige PRL-Erbringung notwendig ist, wird in dieser Wirtschaftlichkeitsanalyse mit einer konservativen Investitionsausgabe von 1.650 €/kW gerechnet. Die für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung notwendigen Angaben sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis der Kapitalwertberechnung. Es zeigt sich, dass die Kombination von Batteriespeichersystem und industrieller Verbrauchsanlage den höchsten Kapitalwert für einen Betrachtungszeitraum von 10 Jahren erwirtschaftet. Bereits nach 5 Jahren ist der Kapitalwert der Investition positiv. Auch die Vermarktung des Batteriespeichers in einem Regelleistungspool, weist nach 10 Jahren einen positiven Kapitalwert auf, jedoch wird dieser, aufgrund der um 30% verringerten Erlöse, erst im Jahr 8 erreicht. Eine Vergrößerung der Kapazität des Batteriespeichers führt bei einer Abschreibedauer von 10

TABELLE 1. ANNAHMEN DER WIRTSCHAFTLICHKEITSBERECHNUNG

Annahmen	Möglichkeiten der PRL-Erbringung		
	Hohe Kapazität	Pool	Batterie + Last
Abschreibedauer	10 Jahre		
Kalkulationszinssatz	10 %		
Investitionsausgabe	1.650.000 €	600.000 €	600.000 €
Jährlicher Erlös	163.488 €	114.422 €	163.488 €

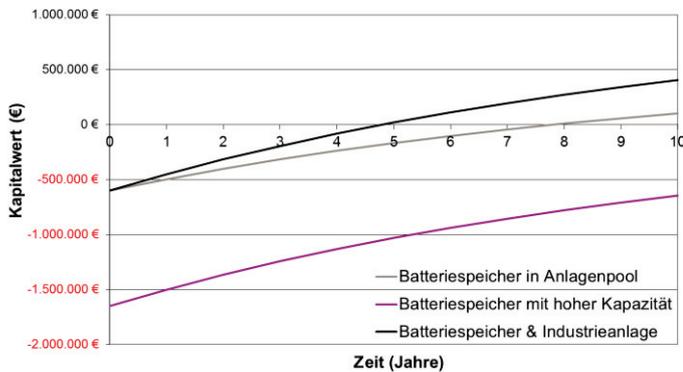


Abbildung 11. Vergleich der Wirtschaftlichkeit

Jahren und dem angenommenen Kalkulationszinssatz von 10% nicht zu einer vorteilhaften Investition. Obwohl die Kapazität der Batterie lediglich vervierfacht wurde, was für eine zuverlässige PRL-Erbringung nicht ausreichend ist (siehe Kapitel VII.A), kann aufgrund der hohen Anfangsinvestition kein positiver Kapitalwert erreicht werden.

IX. AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE

Mit dem entwickelten Simulationsmodell kann die Erbringung von PRL durch Großbatteriespeicher mit verschiedenen Betriebsstrategien und in Kombination mit Verbrauchsanlagen untersucht werden. In Abbildung 5 ist ersichtlich, dass eine sehr hohe Kapazität des Batteriespeichers benötigt wird, um zuverlässig PRL zu erbringen. Durch eine Kombination von Industrieanlage und Batteriespeicher kann dieselbe Menge PRL mit einer erheblich kleineren Kapazität der Batterie erbracht werden. Dabei wird die Verbrauchsanlage im Durchschnitt weniger als einmal pro Tag aufgerufen, um den Ladezustand innerhalb seiner Grenzen zu halten.

Durch den Einsatz der optimierten Betriebsstrategien kann gezeigt werden, dass sich die Einsatzhäufigkeit der Industrieanlage um ein Drittel verringern lässt. Dabei bleibt die durchschnittliche Einsatzzeit der Anlage in einem vergleichbaren Bereich, allerdings führt dies zu einer Erhöhung des täglichen Energieumsatzes der Batterie. Insbesondere dann, wenn die Frequenz innerhalb des Totbandes verbleibt, wird durch die optimierten Betriebsstrategien zusätzliche Energie umgesetzt. Auch die Übererfüllung der geforderten PRL führt zu einer Steigerung des Energieumsatzes.

X. FAZIT

Es ist möglich, mit Großbatteriespeichern PRL zu erbringen. Aufgrund der Tatsache, dass Batteriespeicher Kurzzeitspeicher sind und bei der Primärregelung in Abhängigkeit der Netzfrequenz geladen bzw. entladen werden, besteht die Gefahr die Kapazitätsgrenzen des Speichers zu erreichen. Eine Möglichkeit, dies zu verhindern, wäre eine Erhöhung der Kapazität des Batteriespeichers, was gleichzeitig zu einer Erhöhung der Investitionskosten führen würde. Somit

verringert sich, aufgrund der gleichbleibenden Einnahmen, die Wirtschaftlichkeit des Speichers. Eine Alternative um eine zuverlässige Erbringung von PRL zu garantieren, ist die Eingliederung des Speichers in einen Pool von Regelleistungserbringern. Aufgrund der Abgaben an den Regelleistungspool-Betreiber sinken jedoch die erzielbaren Erlöse. Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination von einem Speicher mit einem flexiblen Verbraucher. Wie in diesem Beitrag gezeigt, ermöglicht der kombinierte Betrieb eine zuverlässige Bereitstellung von PRL. Betreiber von Industrieanlagen, die bislang nicht in der Lage sind PRL zu erbringen, können von einem solchen kombinierten Betrieb profitieren. Darüber hinaus erzielt die Kombination von Speicher und Industrieanlage den höchsten Kapitalwert der drei dargestellten Optionen.

Durch den Einsatz optimierter Betriebsstrategien kann die Belastung einer Industrieanlage im kombinierten Betrieb erheblich verringert werden. Dabei ist zu beachten, dass durch den gestiegenen Energieumsatz des Speichers die Lebensdauer der Batterie sinken kann [11]. Für jede Kombination von Batteriespeicher und Industrieanlage muss somit ein Optimum zwischen Einsatzhäufigkeit der Anlage und Energieumsatz des Speichers gefunden werden. Wo dieses Optimum liegt, hängt von der Anlage und der Speichertechnologie ab. Mit Hilfe der beschriebenen Indikatoren und des entwickelten Simulationsmodells kann dieses Optimum bestimmt werden.

REFERENCES

- [1] A. Poullikas, "A comparative overview of large-scale battery systems for electricity storage", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, Elsevier, 2013, pp.778-788.
- [2] D. Gamrad, G. Markowz, W. Deis und C. Kolligs, „Bereitstellung von Primärregelung durch Großbatteriespeicher“, VDI-Konferenz Elektrochemische Energiespeicher für stationäre Anwendungen, Ludwigsburg, 2012.
- [3] ENTSO-E, "Operation Handbook – Policy 1: Load-Frequency Control", März 2009.
- [4] H. Berndt, M. Hermann, H. D. Kreye, R. Reinisch, U. Scherer und J. Vanzetta, „TransmissionCode - Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber“, Version 1.1, August 2007.
- [5] Internetplattform zur Vergabe von Regelleistung, URL: <http://www.regelleistung.net>, abgerufen am 20. Oktober 2014.
- [6] M. Mühl, D. Gamrad und F.-J. Blug, „Batteriespeicher der MW-Klasse aus Sicht eines Kraftwerkbetreibers, Kraftwerkstechnik – Sichere und nachhaltige Energieversorgung – Band 5“, Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013.
- [7] Deutsche Übertragungsnetzbetreiber, „Eckpunkte und Freiheitsgrade bei Erbringung von Primärregelung“, April 2014, URL: <https://www.regel-leistung.net/ip/action/static/prequal>, abgerufen am 20. Oktober 2014.
- [8] Deutsche Energie-Agentur, „Systemdienstleistungen 2030“, Berlin, 2014.
- [9] Agora Energiewende, „Power-to-Heat zur Integration von ansonsten abgeregeltem Strom aus Erneuerbaren Energie“, Berlin, Juni 2014.
- [10] D. U. Sauer, „Ergänzende Technologien zur Integration erneuerbarer Energien“, Konferenz „Energiewende – Zwischen Konzept und Umsetzung“, Bonn, 03.06.2013.
- [11] A. Jossen und W. Weydanz, „Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen“, Untermeitingen: Reichardt Verlag, 2006.